

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES



L'Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

ORSTOM

**GUIDE DES PRATIQUES HYDROLOGIQUES
SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS RURAUX
EN AFRIQUE TROPICALE ET EQUATORIALE**

J-F NOUVELOT

Etude financée par le Fonds d'Aide et de
Coopération de la République Française

Mars 1993

2001

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES

L'Institut français de recherche scientifique
pour le développement en coopération

**GUIDE DES PRATIQUES HYDROLOGIQUES
SUR LES PETITS BASSINS VERSANTS RURAUX
EN AFRIQUE TROPICALE ET EQUATORIALE**

J.F. NOUVELOT

Etude financée par le Fonds d'Aide et de
Coopération de la République Française

24 NOV. 1993

Mars 1993



~~F 38125~~

SOMMAIRE

PREFACE	5
INTRODUCTION	7
PARTIE I : PRINCIPES DE L'HYDROMETRIE SUR PETITS BASSINS VERSANTS RURAUX	9
1.1. Définition et objectifs	11
1.2. Choix des systèmes de bassins	14
PARTIE II : PRATIQUE DES MESURES	25
2.1. Précipitations	28
2.2. Eaux de surface	42
2.3. Observations climatologiques	91
2.4. Erosion mécanique	110
2.5. Infiltration	141
2.6. L'eau dans la zone non saturée	152
2.7. Eaux souterraines	162
2.8. Qualité des eaux	185
2.9. Relevés complémentaires	196
PARTIE III : TRAITEMENT DES DONNEES ET PUBLICATION DES RESULTATS	211
3.1. Archivage et traitement des données	213
3.2. Rapports et publications	241
PARTIE IV : ORGANISATION LOGISTIQUE ET EVALUATION DES COUTS	267
4.1. Organisation logistique et humaine des observations et mesures	269
4.2. Evaluation des coûts	277
PARTIE V : PRESENTATION DE CAS-TYPES	287
5.1. Bassins naturels	289
5.2. Bassins aménagés	370
ANNEXES	389
Annexe 1 : Carte d'implantation des différents bassins représentatifs et expérimentaux en Afrique de l'Ouest et du Centre francophone	391
Annexe 2 : Synthèse des différents dispositifs de mesures et d'observation utilisés sur 127 BVRE ruraux africains	393
Annexe 3 : Fiches types	397
Annexe 4 : Bibliographie thématique	411
Annexe 5 : Bibliographie - répartition par pays	447
Annexe 6 : Inventaire par pays	495
TABLE DES MATIERES	



PREFACE

Editer un "Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale" en 1992, alors que l'exploitation de tels bassins a commencé dans cette partie de l'Afrique il y a plus de trente ans et est à la base de nombreuses études de synthèse, pourra surprendre certains spécialistes de l'hydrologie africaine.

Pourtant, cette publication répond à une double demande. La première a été exprimée par plusieurs hydrométristes des services hydrologiques des Etats membres du CIEH qui sont de plus en plus sollicités par des partenaires divers tels que services d'aménagement, bureaux d'études, universitaires pour exécuter des campagnes de mesures sur des petits bassins ruraux. La seconde émane des opérateurs des projets de développement rural, d'envergure réduite, qui souhaitent améliorer leurs connaissances du milieu avant d'entreprendre des travaux d'aménagement et sont pour cela à la recherche de documentation pertinente.

Les pratiques hydrométriques sur des bassins de petite superficie à des fins d'aménagement ou de recherche ont des effets, des spécificités qui les différencient des pratiques sur les réseaux de base. Le nombre de paramètres à mesurer, la densité des postes de mesure, la fréquence élevée des mesures sont parmi ces spécificités qui exigent que les protocoles de mesure et l'organisation logistique soient préparées avec rigueur et minutie pour éviter toute défaillance matérielle et humaine et, par là, supprimer tout risque de perte d'information.

En effet, une campagne de mesures sur un petit bassin a pour objectif d'établir un bilan des éléments du cycle hydrologique. Que la chronique des mesures d'un paramètre soit incomplète par suite d'une panne d'un instrument ou d'une erreur de manipulation, et le bilan d'une saison sera alors compromis ou au mieux imprécis. Ce guide a donc pour but premier de fournir, sous une forme pratique, à tous ceux qui entreprennent des travaux hydrologiques sur petits bassins versants, des indications précises et concrètes sur toutes les opérations de préparation des campagnes, d'exécution des mesures sur le terrain, de traitement des données et de présentation des résultats. Ces deux derniers points méritent toute l'attention des techniciens car ils représentent la phase finale de la campagne par laquelle l'information recueillie est restituée et le travail de terrain est valorisé.

Par la large diffusion souhaitée pour ce guide, le CIEH espère aussi uniformiser les pratiques dans l'ensemble de la sous-région. Un petit bassin versant est, en général, choisi pour sa représentativité de conditions morphoclimatiques particulières, et fait partie d'un échantillon de bassins judicieusement implantés pour couvrir une gamme variée de ces conditions. Il est donc tout à fait recommandé que les procédures de mesures et d'élaboration des données sur l'ensemble des bassins de l'échantillon soient relativement proches les unes des autres pour faciliter par la suite la préparation des études de synthèse.

Ce guide est le fruit d'un important travail de rassemblement de documentation et d'études de cas provenant en grande partie de l'Orstom. Il était en effet essentiel que toute l'expérience acquise par les hydrologues de cet Institut au cours des trois dernières décennies soit capitalisée et transmise aux plus jeunes générations qui prennent le relais dans les services hydrologiques nationaux.

L'hydrologie est une discipline expérimentale par excellence qui exigera toujours, surtout dans un contexte environnemental évolutif, des données issues du terrain pour progresser dans la compréhension des processus tant quantitatifs que qualitatifs du cycle de l'eau. Ce guide devrait pouvoir apporter une contribution significative dans le domaine des travaux hydrométriques au bénéfice et de la recherche scientifique et des projets de mise en valeur du monde rural.

Le Secrétaire Général du CIEH

Amadou DIAW

INTRODUCTION

Les services hydrologiques des Etats de l'Afrique francophone intertropicale sont fréquemment sollicités, par les services d'aménagement hydraulique, pour fournir des données hydropluviométriques sur des bassins versants ruraux dont la superficie n'excède pas quelques centaines de km². Bien que diverses méthodes de transposition des informations disponibles à des bassins non observés aient été proposées par différents auteurs, certains organismes techniques ou de recherche sont souvent amenés à s'engager dans des campagnes de mesures et d'observations, afin de mieux appréhender les divers phénomènes hydro-climatiques.

Dans le but de fournir à ces institutions des références sur des expériences déjà menées dans des contextes physico-climatiques similaires, le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) a jugé opportun de mettre à leur disposition un document technique traitant des divers aspects des pratiques hydrologiques propres à ce type d'études.

Le savoir-faire des hydrologues de l'Orstom (l'Institut de recherche scientifique pour le développement en coopération) dans ce domaine, assis sur une expérience de quarante ans de travaux tant en Afrique de l'Ouest et du Centre qu'en Afrique du Nord, à Madagascar, en Amérique Latine, aux Antilles ou en Océanie, a amené le CIEH à confier à cet organisme, par l'intermédiaire de son Département des eaux continentales (Dec), dans le cadre d'une convention signée en mai 1990, la rédaction de ce document guide.

L'ouvrage comprend cinq parties :

- La partie 1 définit, tout d'abord, la place des bassins représentatifs et expérimentaux dans le cadre général de la recherche hydrologique. Puis, sont exposés les différents critères utilisés pour le choix des zones à étudier et la sélection des bassins.
- La partie 2 traite des différents phénomènes à mesurer en précisant : le dispositif expérimental à mettre en place, l'instrumentation, les travaux d'installation, les protocoles de mesures.
- La partie 3 aborde, ensuite, l'archivage et le traitement des données aux différents stades des études, avec certaines orientations générales pour l'interprétation des résultats ; puis des plans-types sont proposés pour les différents rapports et publications.
- La partie 4 fournit des éléments pour l'organisation logistique et humaine, ainsi que pour la présentation d'un budget-type.
- La partie 5 présente, enfin, plusieurs exemples d'études effectuées tant sur des bassins naturels que sur des bassins aménagés.
- En annexe figurent :
 - . une carte d'implantation des 127 ensembles de bassins ruraux répertoriés ;
 - . une synthèse des différents dispositifs de mesures et d'observations utilisés sur ces 127 ensembles ;
 - . des fiches-types pour l'archivage et certains traitements des données ;
 - . une liste bibliographique thématique ;
 - . une liste bibliographique, classée par pays, concernant l'ensemble des bassins ;
 - . un inventaire détaillé de ces différents bassins.

PARTIE 1

PRINCIPES DE L'HYDROMETRIE SUR PETITS BASSINS VERSANTS RURAUX

1.1. DEFINITION ET OBJECTIFS

Le concept de bassin versant représentatif a depuis les années 30 sensiblement évolué. Il s'agissait à l'origine, par une approche analytique, de distinguer, sur des cas choisis (d'où une nécessaire notion de représentativité), les facteurs explicatifs dominants du ou des phénomènes hydrologiques étudiés et d'en préciser quantitativement l'action à l'aide de mesures appropriées. Une telle analyse ne pouvait s'envisager que sur des bassins versants de taille relativement modeste, où la variabilité du milieu physico-climatique n'est pas excessive. L'appellation "Bassins Versants de Recherche et Expérimentaux" est aujourd'hui couramment utilisée (UNESCO, OMM) à la place de "Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux". Plus récemment, a été introduite en Europe la notion de "Bassins Versants de Référence pour l'Environnement (ou les Ecosystèmes)". Néanmoins, quelle que soit l'appellation ou la définition adoptée, le sigle BVRE reste communément utilisé, celui de BRE étant réservé aux bassins de référence.

Dans le contexte africain, où la demande d'information hydrologique est intimement liée aux impératifs de développement, les études menées sur petits bassins ont essentiellement une finalité pratique. Elles doivent permettre, à partir de courtes périodes d'observation mettant en évidence les mécanismes de l'écoulement, de préciser certaines données ou d'améliorer certaines extrapolations. Les exemples sont nombreux et concernent des aménagements très divers :

- Calcul des débouchés d'ouvrages d'axes routiers ou ferroviaires, ou des caractéristiques des déversoirs de petits barrages, pour lequel il est impensable de procéder à une étude hydrologique exhaustive sur le terrain, son coût risquant de dépasser le coût du génie civil.

Un groupe de bassins représentatifs de chaque type de sol, de relief ou de couverture végétale des différentes régions traversées est alors aménagé. C'est la méthode utilisée, par exemple, pour le tracé du chemin de fer Transcamerounais : Douala-Tchad, le long duquel cinq ensembles de bassins ont été analysés.

- Etude de la crue de projet de grands barrages dont la genèse dépend du mécanisme des apports de différentes régions naturelles. L'étude du barrage de Kouilou au Congo en est un exemple.
- Etude de l'alimentation naturelle ou des potentialités de réalimentation artificielle des nappes souterraines (étude des grès de Garoua au Cameroun).
- Etude à des fins agricoles : l'irrigation principalement (bassins de Djiginoum au Sénégal).
- Alimentation en eau des zones rurales ou des agglomérations.

Jusque dans un passé relativement proche, ces techniques ont été utilisées en phase "projet" des ouvrages. Elles peuvent également être utilisées en phase "exploitation" des aménagements. Ainsi, le suivi hydrométrique de petites retenues aurait intérêt à être intensifié pour atteindre une meilleure connaissance des apports, des volumes soutirés et des volumes déversés. Les résultats pourraient être exploités pour la conception de nouveaux ouvrages et pour les études sur l'utilisation et la gestion des ressources en eaux.

Les paramètres à étudier, intimement liés aux objectifs, sont donc très variés :

- volumes d'écoulement annuels et/ou saisonniers,
- débits de crues exceptionnelles,
- débits d'étiages,
- volumes d'apports solides (dans les retenues) ou d'érosion (sur les bassins),
- régimes et systèmes d'alimentation des eaux souterraines,
- données sur la qualité des eaux.

Après un grand développement dans les années 60, les études sur petits bassins ont connu un ralentissement sensible dès la fin des années 70. Actuellement, mis à part les nombreuses opérations initiées en Guinée (dans le Nord du pays et le Fouta-Djalon), les études menées concernent essentiellement l'hydrologie des bas-fonds (Sénégal, Burkina-Faso et Mali).

L'implantation de bassins représentatifs peut avoir d'autres finalités que celles liées à des applications pratiques immédiates. Parmi les plus importantes, peuvent être citées :

1. Complément du réseau hydrométrique de base

Les BVRE, de par leur taille, fournissent des informations complémentaires de celles collectées sur les réseaux hydrométriques de base. C'est particulièrement le cas dans les pays africains où, abstraction faite des moyens matériels, financiers ou humains nécessaires, l'étendue des territoires et les difficultés d'accès rendent difficile, voire impossible, l'installation et surtout l'exploitation de réseaux hydrométriques de densité suffisante sur les petits et moyens cours d'eau. L'expérience montre que, compte tenu des difficultés d'exploitation, le nombre de stations hydrométriques de petits bassins donnant des résultats satisfaisants, eu égard aux dépenses engagées, est très souvent dérisoire. La solution de remplacement consiste à restreindre le réseau de stations à un petit nombre de bassins représentatifs des zones, ou régions, souffrant d'une carence d'information. Sur ces bassins, un réseau pluviométrique suffisamment dense permet, grâce à des modèles pluie-débit plus ou moins complexes, d'utiliser les séries statistiques de longue durée des stations pluviométriques, disponibles à l'échelle régionale dans la plupart des pays. Le rôle des facteurs physiographiques : sol, état de surface, pente, couvert végétal, etc., peut également être analysé dans le but de faciliter le transfert de l'information à des bassins non observés. Cette méthode, bien adaptée entre autres à l'étude des crues, a été utilisée par l'Orstom, tant en Afrique que dans les Départements et Territoires d'Outre-Mer ou en Amérique Latine. Elle a donné de bons résultats dans le Nord-Est du Brésil, où une couverture de petits bassins représentatifs exploités quelques années (deux à cinq ans généralement) a été répartie sur une aire géographique de plus de un million de km².

2. Mise au point, réglage et contrôle des modèles

Les facilités offertes par les BVRE pour la mise au point, le réglage et le contrôle des modèles mathématiques permettent d'améliorer les méthodes de calculs, de prédétermination ou simplement d'évaluation de la ressource en eau prise dans son sens le plus large.

Les techniques de modélisation trouvent ici une justification, par le fait que la transposition des mécanismes à des bassins non observés est beaucoup plus efficace que la transposition des résultats brutes, qui s'avère bien souvent décevante.

3. Suivi des changements à long terme des écosystèmes

Le suivi des changements à long terme des écosystèmes concerne aussi bien les milieux naturels non influencés directement par les activités humaines (on parle alors de bassin repère), que les milieux soumis à une influence humaine normale pour la région étudiée (bassin témoin). Pour P. Dubreuil (118), il s'agit indistinctement de bassins de référence.

Il faut bien admettre que la localisation de bassins repères, libres d'intervention humaine pour une période suffisamment longue pour que puissent être perçus d'éventuels changements, est un souhait optimal qui paraît difficile à atteindre, y compris dans les pays en voie de développement. Pour ces derniers, où l'impact des actions anthropiques sur les milieux est de plus en plus sensible et risque de présenter un caractère irréversible, l'intérêt devrait se porter sur l'installation de bassins témoins.

4. Suivi des interventions anthropiques intensives

Le suivi des interventions anthropiques intensives s'intéresse, plus particulièrement, aux changements subis par les diverses composantes du cycle hydrologique, sous l'influence des modifications de la couverture végétale ou des pratiques culturales. De telles études ne peuvent être menées que sur des bassins où le complexe sol-végétation est relativement homogène, avec des caractéristiques physiques uniformes. Les surfaces concernées sont nécessairement modestes : de l'hectare à quelques km². Ce sont des bassins qualifiés d'élémentaires qui, de par leur taille et leur nature, se prêtent parfaitement aux expérimentations. L'appellation de "bassins expérimentaux" est alors pleinement justifiée.

Après une phase de calibrage, une ou plusieurs caractéristiques sont modifiées (généralement l'une des formes d'occupation des sols : couverture ou pratique culturale) pour en mesurer l'effet sur le cycle hydrologique. Afin de faciliter les comparaisons, il est conseillé d'utiliser un couple de bassins (bassins jumeaux), l'un servant de référence, l'autre subissant la modification. Il n'est pas nécessaire que les deux bassins soient rigoureusement de superficies identiques, un rapport 3 peut être toléré. La méthode, qui consiste à n'observer qu'un unique bassin sur lequel on procède au traitement modificateur à l'issue d'une première période d'observations, double

le temps d'expérimentation, mais élimine les incertitudes liées à la difficulté de trouver des critères absolument objectifs permettant d'assurer que deux bassins sont vraiment identiques.

5. Recherche fondamentale sur les processus hydrologiques

La recherche fondamentale sur les processus hydrologiques est à l'origine des études sur bassins versants représentatifs qui, dès les années 30, ont permis l'énoncé des premiers concepts théoriques de l'hydrologie analytique : hydrogramme unitaire de Sherman, lois de l'infiltration de Horton. Le bassin est alors utilisé pour une étude fine des différents composants du cycle hydrologique : précipitations, évaporation et évapotranspiration, ruissellement, écoulement retardé, écoulement de base, eaux dans la zone non saturée du sol, eaux souterraines. Des mesures pour l'analyse de l'érosion mécanique ou chimique, voire de la pollution naturelle ou anthropique, peuvent également y être effectuées.

Il est, cependant, relativement rare que ces divers thèmes fassent, simultanément, sur le même système de bassin, l'objet de recherches connexes, le programme d'activités étant toujours orienté en fonction de problématiques spécifiques inhérentes au milieu physico-climatique. Le qualificatif de "Recherche" convient parfaitement à ce type de bassins.

6. Formation des hydrologues et des chercheurs

Grâce aux moyens de mesures et d'observations disponibles sur le terrain, ainsi qu'à la connaissance des processus hydrologiques à laquelle on peut parvenir, les BVRE représentent une excellente école de formation pour les hydrologues.

1.2. CHOIX DES SYSTEMES DE BASSINS

1.2.1. NOTION DE REPRESENTATIVITE

Lorsque l'objectif poursuivi est essentiellement pratique, c'est-à-dire s'il s'agit de l'estimation de caractéristiques hydrologiques pour un projet d'aménagement précis, le problème de la représentativité du bassin versant ne se pose pas vraiment. Il va de soi que les résultats obtenus, voire les installations, pourront tout de même être utilisés à d'autres fins, entre autres, lors de synthèses régionales.

Lorsque l'objectif présente un caractère plus général : extension de données, recherche fondamentale, influence des changements naturels des écosystèmes, prévision hydrologique, l'implantation d'un bassin représentatif est alors moins circonstancielle et doit être déterminée en fonction du contexte régional. De cette représentativité, c'est-à-dire de l'homogénéité bassin-région, dépendra la possibilité d'extension ou de transposition des résultats.

Les méthodes de régionalisation hydrologique, dans les zones ou les pays pâtissant d'un manque d'information, reposent sur des procédés essentiellement cartographiques qui permettent, par "croisement" des facteurs explicatifs dominants de l'écoulement superficiel, de délimiter un ensemble de régions hydrologiques homogènes, c'est-à-dire des régions dans lesquelles on présume une certaine similarité des caractéristiques hydrologiques. Le guide international des pratiques en matière de recherche sur les bassins représentatifs et expérimentaux, publié par l'UNESCO (131), donne en exemple les méthodes utilisées sur le bassin du Rio Jaguaribe au Brésil, en Nouvelle Zélande et en URSS. On peut citer également le travail effectué en 1974, par l'Orstom (129), sur l'ensemble du Nord-Est brésilien : sur une surface dépassant 1 500 000 km², 229 zones homogènes furent identifiées et un programme pluri-annuel établi pour l'implantation de 22 ensembles de bassins représentatifs.

Le choix des facteurs de représentativité doit être fait en fonction du contexte physico-climatique qu'il est possible de définir par :

- le climat : régime des précipitations, de l'évaporation, des températures, du vent, etc.,
- le sol et le sous-sol, pris sous l'angle perméabilité-infiltration,
- le relief, représenté généralement par la pente,
- la géomorphologie, traduite par certains paramètres morphométriques (surface, forme, structure du réseau hydrographique), ou les modelés,
- la végétation, sous son aspect de couverture du sol.

Toutefois, si un tel travail était envisagé pour certaines régions, certains bassins, ou certains pays de l'Afrique de l'Ouest, cette approche essentiellement déterministe, mais un tant soit peu empirique, pourrait, partant des observations hydro-climatiques recueillies durant plus de trois décennies sur plusieurs dizaines d'ensembles de bassins représentatifs, voire sur certaines stations des réseaux généraux, être complétée par une approche statistique. Cette démarche, qui est d'ailleurs souvent la seule utilisée lors de la transposition des résultats à des bassins non observés, permettrait non seulement un meilleur choix des facteurs explicatifs de l'écoulement, mais également un choix moins arbitraire de leur hiérarchisation. Il faudrait, également, tenir compte de l'apparition et du rapide développement de nouvelles techniques (la télédétection, par exemple), comme de l'énorme croissance des moyens informatiques, tant au niveau de "l'hardware" que du "software". De tels outils ont favorisé le développement de systèmes qui permettent le traitement et la gestion d'informations spatialisées de tous types. Les systèmes d'informations géographiques (SIG), qui assurent l'intégration de données graphiques et statistiques, sont, par exemple, parfaitement adaptés aux études de régionalisation. Ceci implique, et c'est là que se situe parfois le principal obstacle à l'utilisation de telles techniques, que toutes les cartes thématiques représentant les différents facteurs sélectionnés aient été numérisées et les données statistiques archivées en banques. Le fait qu'elles se présentent sous des échelles différentes n'est plus alors un obstacle majeur.

La numérisation des documents cartographiques, effectuée soit à la table à digitaliser, soit au scanner, ou provenant directement d'images satellitaires, devrait porter :

- sur les facteurs explicatifs sélectionnés :
 - . isolignes du (ou des) facteurs climatiques,
 - . cartes topographiques, ou modèles numériques de terrain (MNT), pour le relief,
 - . cartes des états de surface, des sols, du sous-sol et de la végétation ;
- sur les caractéristiques hydrographiques, pour lesquelles les MNT peuvent, également, être utilisés :
 - . réseau hydrographique,
 - . limites des bassins versants.

Le découpage d'un espace géographique en bassins versants présente un caractère arbitraire puisqu'il dépend du choix des exutoires. Il semble, cependant, difficile de s'en affranchir, si l'on admet qu'il n'est pas souhaitable de séparer, radicalement, la notion de région hydrologique de la notion de bassins versants. Une approche voisine de celle utilisée pour la transposition des variables hydrologiques à des bassins non observés, basée sur les caractéristiques moyennes des bassins versants : précipitations moyennes, pente moyenne, perméabilité ou infiltration moyenne, etc., est parfaitement envisageable, compte tenu des facilités offertes par les SIG. Le croisement des facteurs dominants, qui revient à une superposition des différentes cartes thématiques, pourrait alors être fait au niveau des bassins versants. Cette approche "globale" présente l'avantage de respecter les limites naturelles de partage des eaux et surtout d'éviter de pousser à l'excès la zonation, excès inévitable lors d'une superposition point par point (ou pixel) des différents facteurs. La principale difficulté réside dans la délimitation des bassins "unitaires". Pas tant dans sa réalisation pratique qui peut, au moins partiellement, être automatisée, mais dans le choix des superficies à considérer. Bien évidemment, ce choix sera tributaire : du contexte physico-climatique pour lequel on recherche une certaine homogénéité, des documents cartographiques disponibles, mais également de l'aire couverte par l'étude. Pour une région de quelques milliers de km², un découpage en bassins "unitaires" de 10 à 30 km² semble satisfaisant ; pour une région de plusieurs dizaines de milliers de km², les bassins choisis pourront avoir une surface variant entre 50 et 100 km²; enfin, pour une vaste région de plusieurs centaines de milliers de km², ils dépasseront 100 km². Ce dernier cas se situe à la limite d'utilisation de la méthode, l'homogénéité physico-climatique des bassins "unitaires" étant alors difficilement assurée. S'il s'agit de couvrir une aire géographique importante, il est possible qu'il soit nécessaire de la diviser en grandes régions physico-climatiques à l'intérieur desquelles les facteurs de représentativité pourront être différents. Par exemple, Casenave et Valentin (725), s'appuyant sur les travaux de différents pédologues et hydrologues couvrant l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest francophone, ont montré qu'il était possible de hiérarchiser, en fonction d'une régionalisation phytoclimatique, les facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle.

1.2.2. BASSINS REPRESENTATIFS

1.2.2.1. PRINCIPES GENERAUX

Lors du choix d'un bassin représentatif, deux approches contradictoires sont possibles. On peut en effet considérer :

- soit que les facteurs de représentativité doivent être aussi proches que possible de leur valeur "moyenne" dans l'ensemble de la région ;
- soit, au contraire, que le bassin doit contenir toute la gamme de variation des facteurs.

La première conception, la plus ancienne, a parfois été utilisée, principalement lors des premières implantations réalisées par l'Orstom. La seconde s'appuie sur le corollaire qu'un bassin d'une certaine étendue est un ensemble généralement complexe, dont les caractéristiques hydrologiques observées à l'exutoire sont la résultante de tous les processus élémentaires générés sur les différentes unités homogènes. Un bassin, même de faible superficie, est rarement homogène dans sa totalité. Il est constitué d'au moins trois unités réparties en toposéquence, avec des sols caractéristiques des plateaux, des pentes et des bas fonds de vallée. C'est l'association de ces différentes unités qui permet dans la pratique de définir le bassin "type".

Pour des conditions climatiques déterminées, abstraction faite du relief, la formation de l'écoulement

dépend, essentiellement, de l'association sol-état de surface (ce dernier incluant le couvert végétal). Le rôle de cette association ne peut être quantifié qu'en étudiant le bilan hydrique d'unités homogènes.

De ces divers constats, est née la nécessité d'effectuer des études sur bassins "types" (ou bassins élémentaires) et, plus tard, des études telles que celles menées à l'aide d'un simulateur de pluie par certains hydrologues et pédologues de l'Orstom. Bien que ces deux approches concernent des surfaces sensiblement différentes (bassin versant et parcelle de 1 m²), elles procèdent de la même démarche qui peut se résumer ainsi : la résolution d'une intégrale exige la connaissance des éléments différentiels. Ceci suppose, qu'une fois cette connaissance acquise, on possède la clé d'intégration.

Instrument d'analyse, le bassin "type" permet aussi l'étude de certains aspects particuliers :

- séparation des phases de ruissellement dans et hors du réseau hydrographique,
- alimentation des nappes phréatiques en relation avec le complexe sol-végétation et la pluviosité.

Cependant, les relations mises en évidence sur une catégorie de bassins (ou de surfaces) ne sont pas nécessairement applicables à des bassins plus grands. L'analyse des caractéristiques hydrologiques d'une zone "homogène" suppose donc le choix d'un ensemble de bassins de superficies différentes. Pour des raisons inhérentes à la fois au milieu physico-climatique qui obéit à une certaine cohérence spatiale, et aux conditions de gestion des installations (coût, exploitation, etc.), les bassins retenus seront de préférence emboîtés ou contigus.

En Afrique de l'Ouest, un ensemble "type" de bassins pourrait comporter :

- deux bassins représentatifs répartis dans les classes 10 - 30 / 50 km² et 30 / 50 - 100 km² ;
- un à trois bassins élémentaires (ou types) de quelques centaines d'hectares à quelques km² suivant le contexte physiographique (rarement plus d'une dizaine de km², même en zones arides) ;
- un bassin, parfois qualifié de "grand", d'une superficie de 100 à 500 km² englobant si possible les autres bassins.

L'étude de "grands" ensembles, particulièrement dans les zones sahéliennes où des phénomènes de dégradation hydrographique apparaissent fréquemment lorsque les aires de drainage dépassent quelques dizaines de km², peut présenter tout d'abord certaines difficultés d'ordre météorologique sur le terrain, mais aussi au niveau du traitement et de l'exploitation des données (pour la modélisation des crues, par exemple).

Il est certain que le choix d'un bassin représentatif n'est jamais parfait. Ce n'est seulement qu'au terme de l'interprétation des résultats que l'on peut juger de sa pertinence. Pour J. Rodier (137), l'essentiel est que ce choix ne soit pas trop défectueux et que, si nécessaire, on sache apporter les corrections aux données recueillies pour pouvoir les transposer à d'autres bassins non observés.

1.2.2.2. CRITERES DE SELECTION

1.2.2.2.1. CHOIX DE LA REGION HYDROLOGIQUE

La région hydrologique à étudier, définie, suivant les objectifs et les moyens utilisés, par la conjugaison plus ou moins quantitative d'un certain nombre de facteurs explicatifs, peut occuper plusieurs zones géographiques distinctes. Le choix entre ces divers secteurs se fera en considérant différents critères qui peuvent être hiérarchisés :

1. Disponibilité de documents photographiques et cartographiques.

Les documents photographiques peuvent être :

- . des photographies aériennes : en Afrique de l'Ouest et du Centre se sont essentiellement des photographies au 1/50 000^{ème} à émulsion panchromatique ou infra-rouge, cette dernière présentant l'avantage de réagir à l'humidité. Très localement, existent des couvertures dont l'échelle, suivant les applications qui en ont été faites, varie du 1/15 000^{ème} au 1/100 000^{ème}, avec parfois des photos

"couleur" (naturelle ou infra-rouge).

- des images satellitaires : LANDSAT à défilement héliosynchrone ou Spot.

Les documents cartographiques, à moyenne ou grande échelle, nécessaires incluent non seulement les cartes topographiques, mais également l'ensemble des cartes thématiques utiles pour le choix des bassins, et, ultérieurement, lors de l'interprétation des résultats :

- cartes des caractéristiques climatologiques permettant de juger de l'exposition des sites potentiels,
- cartes géologiques et/ou hydrogéologiques,
- cartes pédologiques et des états de surface,
- cartes de la végétation et de l'utilisation des sols,
- cartes des aménagements existants (essentiellement hydrauliques), et des projets d'aménagements.

Les documents à petites ou moyennes échelles (1/200 000^{ème} et en deçà) conviennent au niveau d'une pré-prospection, mais sont très insuffisants pour l'exploitation de bassins dont la superficie est très souvent inférieure à 50 km². Les levés complémentaires, qui sont fréquemment effectués lors des études, ne peuvent malheureusement que révéler, a posteriori, une erreur d'implantation.

A titre indicatif, les limites d'emploi des documents cartographiques peuvent être les suivantes :

<u>Echelle</u>	<u>Surface du bassin</u>
1/1 000 000	1 000 km ²
1/ 500 000	250 km ²
1/ 200 000	50 km ²
1/ 100 000	10 km ²
1/ 50 000	2,5 km ²
1/ 25 000	0,5 km ²
1/ 10 000	0,1 km ²

- Présence de stations pluviométriques, hydrométriques, climatologiques ou piézométriques. Des renseignements sur la qualité de l'information disponible et la longueur des chroniques d'observations sont également très utiles.
- Absence de projets d'aménagement risquant d'avoir, en cours d'études, une incidence non négligeable sur les processus hydrologiques : axes routiers, voies ferrées, retenues, prises d'eau, aménagements agricoles divers (irrigation, modifications apportées à l'utilisation et au traitement des sols), etc.
- Niveau de développement des infrastructures régionales.

L'accessibilité des bassins doit être relativement satisfaisante, y compris, si possible, en saison des pluies. La présence d'un village, voire d'un centre plus important ou d'une quelconque structure d'accueil, est également à prendre en considération. L'installation des équipements ainsi que leur exploitation en seront facilitées.

- Caractéristiques du réseau hydrographique.

Un examen des cartes à échelle moyenne (1/200 000^{ème}, par exemple) et si possible des photographies aériennes permet de juger rapidement de la représentativité du réseau hydrographique (forme générale, exposition, etc.), ainsi que de la possibilité de trouver des bassins versants répondant au programme d'études (paragraphe 1.2.2.1).

1.2.2.2.2. CHOIX DES BASSINS

L'hydrologue travaille un peu à la manière du biologiste qui chaque fois qu'il souhaite affiner ses recherches augmente le grossissement de son microscope. Le processus itératif s'effectue en utilisant des jeux de documents cartographiques d'échelles croissantes. Ainsi, une fois la zone de travail sélectionnée, est localisé un certain nombre d'ensembles de bassins, de préférence emboîtés, ayant sensiblement les superficies souhaitées. Leur représentativité est vérifiée par une estimation rapide des facteurs conditionnels dominants choisis pour répondre à un objectif spécifique ou, plus généralement, pour satisfaire aux critères de définition des zones de même comportement hydrologique.

Le choix définitif ne peut être fait sans une prospection minutieuse de terrain. Toutefois, pour limiter les déplacements, réalisés parfois dans des conditions difficiles, un certain nombre de critères peuvent, comme pour le choix de la région, être pris en considération en utilisant des documents cartographiques ou photographiques d'échelle grande ou moyenne :

1. La ligne de partage des eaux superficielles des différents bassins et sous-bassins doit être aussi distincte que possible pour une estimation, suffisamment précise, de leur superficie. Lorsque la présence d'une nappe souterraine est connue ou soupçonnée, il est souhaitable que ses limites ne dépassent pas sensiblement celles du bassin topographique. Malheureusement, il est très rare de disposer de documents hydrogéologiques suffisamment précis pour effectuer a priori un tel contrôle. Il est, par contre, plus facile d'évaluer si des pertes souterraines sont possibles à l'exutoire.
2. La présence de sites favorables à l'installation de postes ou stations d'observations et de mesures est à vérifier. S'agissant principalement de stations hydrométriques, l'emploi de photographies aériennes avec vision stéréoscopique est généralement nécessaire.
3. Les infrastructures locales s'évaluent aux voies d'accès et de communications à l'intérieur des bassins et dans les environs immédiats, ainsi qu'à la présence ou à la facilité d'implantation de structures d'accueil pour le personnel et le matériel.
4. L'existence d'un potentiel humain pour le recrutement de travailleurs, tant pour la phase d'installation que pour celle d'exploitation des bassins, ou d'observateurs, peut être décisive.
5. L'absence de certaines anomalies importantes doit être enfin contrôlée : grandes failles, karsts (dans les formations calcaires, volcaniques ou gréseuses en relation ou non avec le réseau hydrographique), zones de rétention anormalement développées, etc.

Même si l'on dispose de cartes topographiques au 1/50 000^{ème}, il sera fait, au moyen de photographies aériennes, une première esquisse cartographique des systèmes de bassins comprenant :

- le contour des bassins et éventuellement des sous-bassins déjà retenus,
- le réseau hydrographique, avec les dépressions naturelles et les retenues artificielles, les zones humides et de débordements,
- les accidents géologiques ou tectoniques : failles, karsts, dolines, etc.,
- les axes de pénétration, avec les villages, les hameaux, les fermes,
- les principales zones lithologiques et phytologiques, y compris les aires cultivées.

La couverture de photographies aériennes pouvant être plus ou moins ancienne (dans certains pays de l'Afrique de l'Ouest, les dernières missions datent des années 50), les images satellitaires permettent, à l'aide de traitements informatiques relativement peu onéreux, d'élaborer diverses cartes thématiques à l'échelle du 1/50 000^{ème}. Ces documents apporteront une information complémentaire, et surtout très actualisée, par rapport à celle fournie par les photographies aériennes : changements intervenus dans les voies de communications, le réseau hydrographique, l'aménagement du territoire, l'occupation des sols, etc.

Cette esquisse cartographique sera très utile lors de la prospection de terrain qui doit permettre :

1. de choisir entre les différents systèmes de bassins sélectionnés sur documents, en portant une attention

particulière :

- . aux caractéristiques du sol (y compris son occupation), à la végétation, au modelé, au sous-sol ;
- . aux voies de communications : une enquête auprès des autochtones permettra d'évaluer l'état des routes, des pistes ou des chemins en saison des pluies. Il n'est pas rare que certaines pistes tracées sur les cartes ou apparaissant sur les clichés soient impraticables, même en saison sèche, à cause d'ornières, d'éboulements, de ponceaux détruits, etc. ;
- . à la possibilité de recruter de la main-d'œuvre locale ;
- . à la présence de matériaux de construction : sable, pierre, bois, argile, etc.

2. de rassembler et consigner dans un carnet de route le maximum d'informations :

- . kilométrage et temps de parcours entre des points facilement localisables sur cartes ou sur clichés ;
- . nom d'observateurs potentiels ;
- . toponymie, non mentionnée sur les cartes, de cours d'eau, de sites caractéristiques, de villages ou hameaux ;
- . hauteurs d'eau maximales observées en certains sites (cours d'eau ou retenues) : laisses de crues ou informations fournies par les riverains ;
- . traces de ruissellement ou d'érosion ;
- . types d'activité humaine : agriculture (types de cultures, pratiques culturelles), pêche (barrages à poissons), prélèvements de matériaux (même au niveau artisanal) et aménagements estivaux dans le lit des cours d'eau (radiers, seuils temporaires), carrières en exploitation etc. ;
- . pérennité des écoulements ou fréquence d'assèchement des cours d'eau ;
- . ouvrages existants : ponts, radiers permanents, retenues, prises d'eau, digues, etc. ;
- . projets d'aménagements (essentiellement hydrauliques) non encore recensés ;
- . postes ou stations de mesures et d'observations hydro-climatiques n'appartenant pas aux réseaux généraux.

3. de sélectionner certains sites pour l'implantation des futures stations hydrométriques. Une bonne précaution est d'avoir avec soi un décimètre ou double-décimètre souple, ou un distanciomètre de poche. La prospection des sites se fera en suivant un ordre logique, de préférence de l'aval vers l'amont.

La meilleure période de l'année pour effectuer ce travail se situe en début de saison sèche : il est alors possible d'observer aisément les laisses de crues, on peut juger des possibilités d'accès et, enfin, on dispose de toute la saison sèche pour entreprendre les travaux d'installation.

1.2.2.2.3. CRITERES DE SELECTION DES SITES POUR L'IMPLANTATION DE STATIONS HYDROMETRIQUES

Une station hydrométrique installée sur un cours d'eau pour la mesure des débits se caractérise par trois sections différentes :

- la section limnimétrique où se mesure les hauteurs du niveau d'eau,
- la section de contrôle située à l'aval de la section limnimétrique, ou confondue avec elle (cas des seuils jaugeurs), et de laquelle dépend la relation hauteur-débit,
- la section de jaugeage où s'effectue les mesures de débit.

Les principales qualités à rechercher seront donc :

- Une bonne stabilité de la relation hauteur-débit, assurée par la présence d'un contrôle permanent et valable pour tous les niveaux d'eau. Bien qu'il soit délicat d'apprécier la pérennité, voire la présence, d'un contrôle, ou la stabilité du lit d'un cours d'eau, on minimisera les risques en recherchant un seuil

rocheux, ou au moins un bief sensiblement rectiligne constitué d'un matériel présentant une bonne cohésion. Un pont ou un dalot peuvent parfois servir de contrôle, mais on se méfiera des constructions précaires. Pour faciliter l'étalonnage de la station, le site retenu doit permettre l'observation de tous les niveaux d'eau et la mesure de tous les débits, des plus faibles aux plus élevés.

- Une bonne sensibilité, traduite par le fait qu'une faible augmentation du débit doit correspondre à la plus grande variation possible du plan d'eau. On peut montrer, à l'aide de formules traduisant les écoulements à surface libre en régime uniforme, que la sensibilité est d'autant meilleure que la section est étroite et profonde, et les vitesses d'écoulement faibles (fig. 1). On recherchera donc un étranglement du lit, avec des berges stables, en évitant cependant les zones à fortes turbulences.
- Un emplacement favorable à l'installation d'échelles limnimétriques et d'un limnigraphe.
- Une section de jaugeages, pas trop éloignée de la station limnimétrique et d'accès relativement aisé. Pour de petits bassins caractérisés par des variations rapides du niveau d'eau, les techniques de mesures utilisées imposent de lire aisément les échelles depuis la section de jaugeages (paragraphe 2.2.2.3.1).

Il est certain que ces conditions sont rarement réunies dans la nature, et il sera très souvent nécessaire de prévoir un certain nombre d'aménagements :

- voies d'accès,
- construction de contrôles artificiels, parfois différents en fonction de la hauteur d'eau (paragraphe 2.2.2.3.2.3.),
- rétrécissement du lit par la construction de digues ou de batardeaux,
- consolidation des berges.

Remarque :

Le choix définitif ne pourra souvent être fait qu'après avoir nettoyé, débroussaillé ou désencombré le bief retenu sur une distance égale à au moins dix fois sa largeur. Dans les lits à faible pente, fréquemment alluvionnaires, un relevé topographique préliminaire permettra d'éviter des erreurs grossières d'implantation. Des observations sommaires, effectuées au cours de la saison des pluies précédant le début des études (échelles à maxima implantées en différents sites, par exemple), peuvent également être très utiles.

1.2.3. BASSINS EXPERIMENTAUX

1.2.3.1. PRINCIPES GENERAUX

Pour l'hydrologue, l'expérimentation au sens strict consiste à analyser et évaluer l'impact des activités humaines sur le cycle de l'eau. Sur les bassins ruraux, elle concerne essentiellement les problèmes de déboisement, reforestation, et modifications engendrées par les cultures ou les pratiques culturelles.

Le choix et l'organisation des systèmes de bassins, qui sont comme souligné antérieurement (paragraphe 1.1.) nécessairement de faible superficie (bassins élémentaires), dépendent du plan d'expérience. Leur nombre est en étroite relation avec le nombre de facteurs à considérer.

Pour étudier par exemple l'impact de la déforestation, en partant de l'hypothèse que le sol, la pente et le régime des précipitations y sont identiques, le suivi de deux bassins représente un dispositif minimum : un bassin avec le couvert forestier naturel, un autre où il a été supprimé. Par sécurité "statistique", il est malgré tout souhaitable que plusieurs paires de bassins puissent être observées. Il n'est pas nécessaire, toutefois, qu'ils aient rigoureusement la même superficie (paragraphe 1.1. [4]).

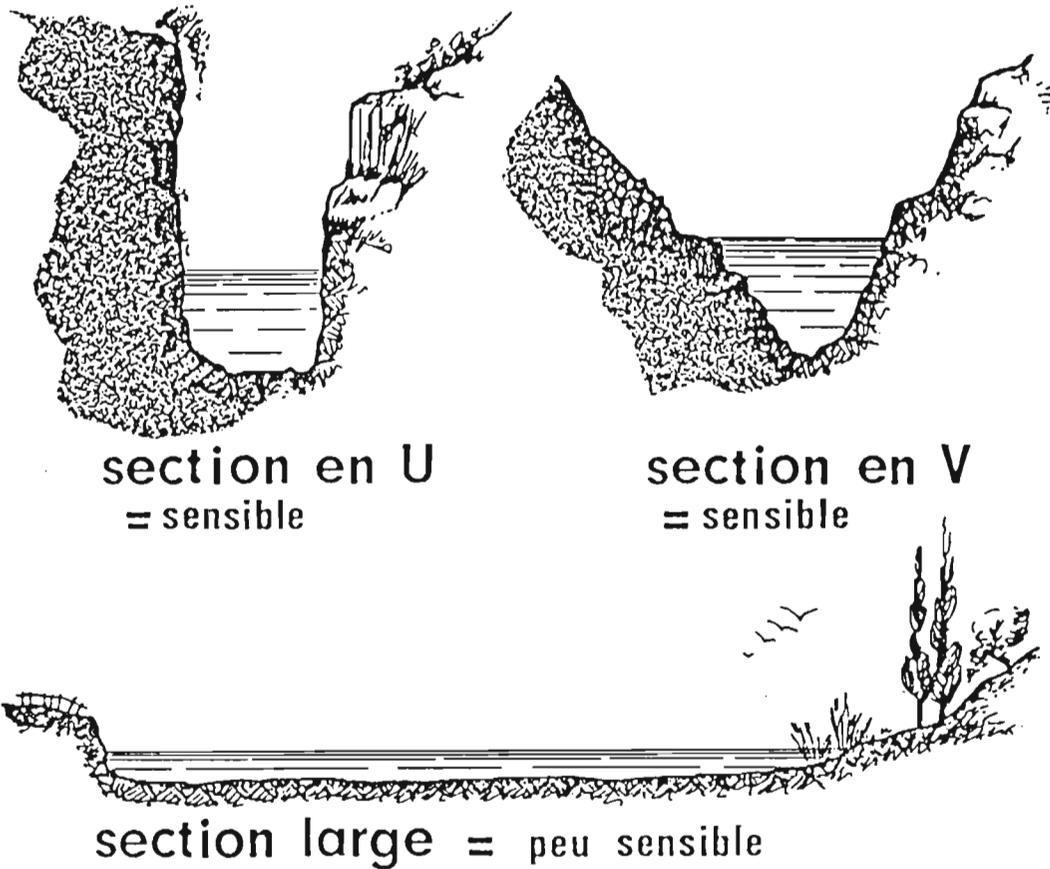


Fig- 1 - SENSIBILITE D'UNE SECTION DE COURS D'EAU (D'APRES J.THIEBAUX)

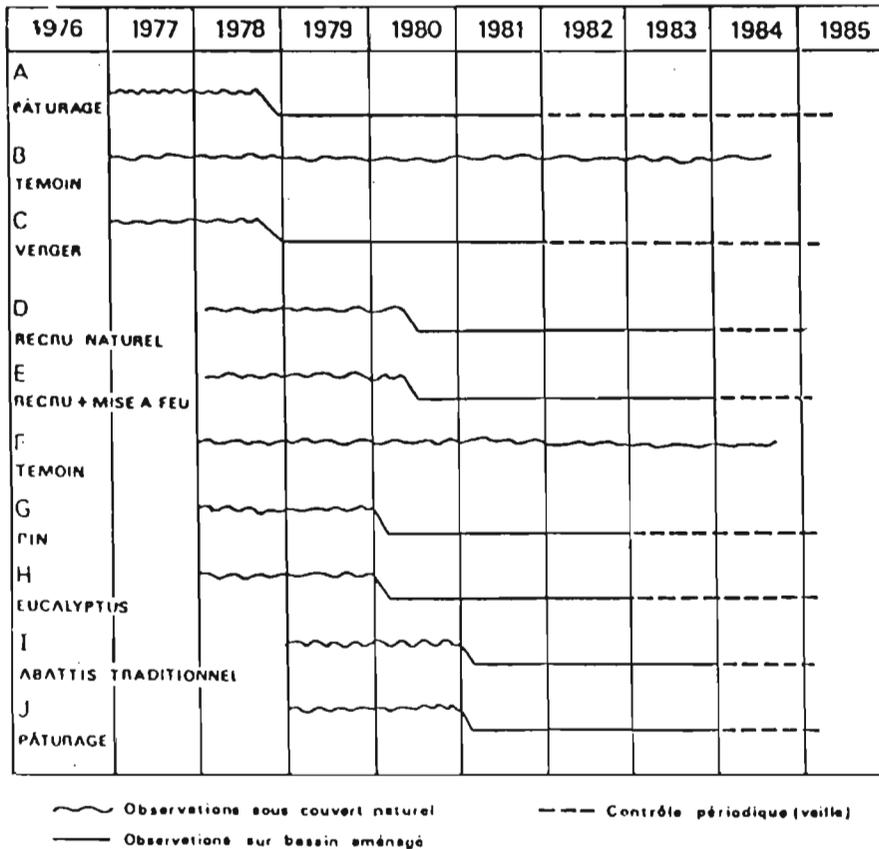


Fig-2 - ECEREX - PROJET D'AMENAGEMENT DES BASSINS VERSANTS EXPERIMENTAUX

La méthode qui consiste à étudier le même bassin, avant et après modifications, limite le nombre d'installations et diminue les facteurs d'incertitude lors de l'interprétation des résultats, mais augmente la durée d'expérimentation (paragraphe 1.1. [4]). Ainsi, dans le cadre du projet ECEREX mené conjointement en Guyane par le CTFT, l'INRA, le Museum National d'Histoire Naturelle et l'Orstom, on s'est attaché à mesurer les effets que les transformations de l'écosystème primaire pourraient entraîner sur l'équilibre des phénomènes d'écoulement et d'érosion, contribuant ainsi à évaluer les conséquences des différentes possibilités de mise en valeur sur les facteurs naturels de production eau-sol. Ces recherches comparatives menées sur dix petits bassins, dont deux bassins témoins non altérés en cours d'études, n'ont pas été réalisées simultanément et ont nécessité une caractérisation préalable, d'une durée d'au moins deux ans, des phénomènes dans l'écosystème original (fig. 2).

1.2.3.2. CRITERES DE SELECTION

La nécessité d'effectuer des observations intensives sur de petites superficies induit certaines contraintes :

- Le modelé et les conditions d'accès ne doivent pas être un obstacle à la réalisation des aménagements, traitements et observations nécessaires. Il faut, néanmoins, veiller à ne pas introduire de modifications parasites (pistes, tassements excessifs des sols, piétinement de la végétation) qui rendraient l'interprétation des résultats délicate, voire erronée.
- La nécessité de disposer du sol en toute liberté demande un accord préalable du ou des propriétaires (particuliers ou collectivités). Dans certains cas, l'acquisition des terrains devra être envisagée.
- Si la représentativité des observations pluviométriques semble plus facilement garantie que sur un bassin de plus grande superficie, la mesure de l'écoulement peut par contre s'avérer délicate. Le site d'implantation de la station hydrométrique devra souvent être aménagé : nécessité de concentrer les eaux de ruissellement, de mesurer avec précision hauteurs d'eau et débits, d'éviter les pertes par inféroux ou par infiltration plus profonde dans le lit.
- Les particularités locales doivent absolument être écartées.

1.2.4. PARCELLES EXPERIMENTALES

1.2.4.1. PRINCIPES GENERAUX

Les parcelles d'expérimentation représentent, à côté du bassin expérimental, un instrument d'analyse quantitative intéressant. Si les premières d'entre elles ont été consacrées à l'étude des facteurs de l'érosion des sols, leur intérêt dans l'analyse des processus hydrologiques n'a pas échappé aux chercheurs :

- étude des modifications du bilan hydrique en fonction du couvert végétal, de la pente (degré, longueur, exposition) ou du traitement du sol,
- simulation physique des phénomènes hydrologiques,
- étude de l'hydrodynamique des sols.

A cette échelle, le simulateur de pluie représente un excellent outil pour l'analyse des paramètres exerçant une influence sur l'infiltration, le ruissellement ou l'érosion. La possibilité de fixer les caractéristiques des averses et l'état d'humectation des horizons pédologiques, en testant différents types de sol, d'état de surface, de couvert végétal ou de pente, représente à la fois un gain de temps et de précision, les conditions aux limites ou les phénomènes exceptionnels, difficilement observables dans la nature, pouvant être reproduits à volonté.

Il est possible de différencier :

- *Les petites parcelles dont la dimension est de l'ordre du m².*

Utilisées essentiellement, à cause de leur maniabilité, sous pluies simulées, elles permettent d'étudier la dynamique de l'infiltration et dans une certaine mesure la détachabilité des sols.

- *Les parcelles de quelques dizaines de m².*

Utilisées parfois sous pluies simulées, ce qui engendre de lourdes infrastructures, mais plus souvent sous pluies naturelles, elles permettent d'étudier, dans de bonnes conditions, le ruissellement en nappe (l'apparition de petites rigoles pouvant tout de même être observée). A la suite des nombreux travaux effectués aux Etats-Unis et plus tard en Afrique, un standard voisin de 100 m² (20 mètres de long sur 5 mètres de large), assurant un contrôle relativement aisé des volumes liquides et solides, a été adopté.

- *Les parcelles dites "de versants" pouvant atteindre plusieurs milliers de m².*

Elles représentent un instrument d'analyse de l'écoulement en nappe et en grosses rigoles, ainsi que des phénomènes d'érosion. Les méthodes de mesures et d'observations sont alors proches de celles utilisées sur les petits bassins versants.

Le nombre et la situation des parcelles dépendent du nombre de facteurs à étudier. L'interprétation des résultats sera facilitée si des bassins expérimentaux sont exploités conjointement (prise en compte du facteur d'échelle). L'étude des bassins versants de Mouda au Cameroun en est un exemple (1126).

1.2.4.2. CRITERES DE SELECTION

Etant donné les faibles dimensions des parcelles, les contraintes de choix sont encore plus draconiennes que pour les bassins expérimentaux :

- La pente doit être uniforme.
- Le couvert végétal et les sols (y compris leur utilisation) doivent être homogènes.
- L'écoulement ne doit pas être perturbé par des modifications de surface involontaires : piétinements, traces de roues de véhicules, sentiers ou chemins, etc..
- Les délimitations doivent être précises. Définies souvent d'une manière artificielle, elles doivent être étanches avec des effets de bord peu sensibles. Les limites latérales sont, dans la plupart des cas, perpendiculaires aux courbes de niveau (paragraphe 2.4.2.2.1.).
- Un dispositif doit permettre de recueillir et mesurer les eaux de ruissellement, ainsi qu'éventuellement les transports solides (paragraphe 2.4.2.2.1.). Certains systèmes permettent parfois de mesurer le drainage (vertical ou oblique) des sols.

PARTIE 2

PRATIQUE DES MESURES

Le programme d'équipement de bassins représentatifs et expérimentaux dépend, abstraction faite des contraintes financières et des moyens en personnel, de deux critères fondamentaux : les objectifs poursuivis et les conditions physico-climatiques de la région à étudier.

La démarche suivie devrait être celle de toute démarche scientifique, à savoir la formulation d'une hypothèse puis la vérification de cette hypothèse par expérimentation. C'est la seule manière logique d'établir un plan de mesures et d'observations.

Au niveau de la conception de programmes, l'hydrologue suit très souvent une approche déterministe, sans toutefois préjuger des méthodes utilisées pour atteindre les résultats recherchés. La fiabilité et le degré de précision de ces résultats étant évalués au moyen de méthodes statistiques, la durée et la densité des observations sont deux caractéristiques auxquelles il est important d'accorder, dans tous les cas, la plus grande importance. La prise en compte du caractère aléatoire des phénomènes hydro-climatiques par l'intermédiaire de stations de référence bénéficiant de longues chroniques d'observations (stations pluvio-climatologiques des réseaux généraux, par exemple) permet, cependant, de réduire les délais d'obtention des résultats. Néanmoins, la notion de stations de référence impose la connaissance de la variabilité spatiale de ces mêmes phénomènes, qui ne peut être obtenue que par des observations suffisamment denses.

La durée de vie d'un bassin représentatif se situe, suivant la variabilité des paramètres observés, entre deux et cinq ans. Elle sera, par exemple, plus longue en zone sahélienne ou sub-désertique qu'en zone équatoriale. Les bassins expérimentaux, de par la nature des études qui y sont développées, nécessitent, pour conduire à des résultats significatifs au sens de la statistique, des durées d'exploitation plus longues.

Dans de nombreux cas, les observations réalisées concernent essentiellement les écoulements de surface et les précipitations, ces dernières étant à l'origine de tous les apports, si l'on néglige les petites quantités d'eau conée rencontrées parfois dans certaines nappes profondes. A ces mesures, que l'on peut qualifier de minimales, peuvent, suivant les objectifs poursuivis, s'en ajouter d'autres :

- l'évaporation des surfaces d'eau libre et l'évapotranspiration du sol et de la végétation,
- la circulation de l'eau dans la partie non saturée des sols ou dans les aquifères,
- l'érosion et la sédimentation,
- le transport de matières dissoutes.

2.1. PRÉCIPITATIONS

L'eau contenue dans l'atmosphère est apportée par l'évaporation des surfaces d'eau libre (essentiellement les océans) et par l'évapotranspiration des surfaces terrestres couvertes ou non de végétation. Elle se trouve essentiellement sous forme de vapeur d'eau, à raison de quelques dizaines de grammes par m³ d'air. C'est la condensation de cette vapeur d'eau qui produit les précipitations.

Si l'on s'en tient aux manifestations les plus visibles des perturbations pluvieuses en Afrique de l'Ouest (localisation et évolution spatio-temporelle de l'activité orageuse), quelques distinctions majeures peuvent être faites :

- Tout d'abord, **les lignes de grains** qui correspondent à de grands systèmes perturbés d'une extension de 300 à 1 000 km. Ils se déplacent d'Est en Ouest, ou du Nord-Est au Sud-Ouest, à environ 40 km/h. Les précipitations s'accompagnent d'une activité orageuse intense et une forte agitation atmosphérique, principalement au Nord de l'isohyète 1 000 mm. Ces orages d'extension limitée se caractérisent par de violentes rafales de vent d'Est précédant la pluie qui s'abat ensuite brutalement. Les intensités maximales s'observent en début d'averse. Le corps principal des précipitations a une durée souvent inférieure à une heure, mais il se prolonge par une traîne à faibles intensités sensiblement plus longue (plusieurs heures).

L'appellation populaire de "tornade", bien qu'imaginée, doit être écartée en raison d'une signification différente dans le vocabulaire météorologique.

- Ensuite, les pluies dites de "**mousson**" qui résultent de turbulences et ascendances dues aux irrégularités du relief ou à la rugosité de la surface terrestre (la végétation, par exemple) sur le flux océanique. Ce sont des précipitations abondantes et de longue durée qui couvrent de très vastes étendues, avec des intensités souvent très soutenues pendant plusieurs heures. On les rencontre surtout au Sud de l'isohyète 1 200 - 1 300 mm. Les pluies à convection thermique, qui peuvent être rattachées à cette même catégorie, sont beaucoup plus étroitement liées au relief et plus localisées. Elles sont limitées aux régions soumises aux masses d'air équatoriale et tropicale maritimes.

2.1.1. CONCEPTION DES DISPOSITIFS D'OBSERVATION

Bien que certaines méthodes modernes aient l'ambition de fournir des informations pluviométriques "surfaciques" (mesures par radar, détection par satellites), les mesures ponctuelles, qualifiées de "classiques", resteront encore longtemps les outils fondamentaux de l'hydrologie quantitative.

Sur les BVRE, ces mesures ont deux finalités essentielles : estimer les précipitations moyennes à l'échelle du bassin ou d'une certaine surface, rechercher les relations avec les différentes caractéristiques hydrologiques (ruissellement, humidité du sol, écoulement souterrain, érosion, etc.). Il est donc indispensable d'estimer, aussi précisément que possible, les quantités d'eau précipitées, ainsi que leur répartition dans le temps et dans l'espace. Apparaît ainsi la notion de réseau pluviométrique à laquelle est liée la notion de densité qui, bien que relative, peut être quantifiée par une approche géostatistique. Des méthodes d'estimation des espacements moyens à prévoir entre stations pluviométriques ont été mises au point aux Etats-Unis et en France (Creutin, Obléd, Lebel). Elles font appel à la notion de longueur ou de portée de corrélation. Le problème à résoudre peut être posé simplement : "pour un type de précipitations donné, quelle est la distance qui doit, en moyenne, séparer deux pluviomètres pour obtenir un coefficient de corrélation choisi ?". Bien évidemment, cette distance diminue avec le pas de temps d'observation. Pour cette raison, l'erreur d'estimation d'une pluie moyenne, calculée sur un bassin versant à partir d'un réseau pluviométrique donné, sera d'autant plus élevée que l'intervalle d'observation sera court. La densité doit donc s'apprécier par rapport au pas de temps auquel les données seront utilisées. Qualifier un réseau de "dense" n'a de sens qu'au delà d'une certaine durée d'observation.

On peut imaginer, en considérant les conditions d'isotropie respectées, qu'il est possible de définir l'aire S, couverte par un pluviomètre, par un cercle dont le rayon R correspond à une distance telle que la corrélation r soit égale à 0,90. Nous aurons, par exemple :

	pour	$\Delta t = 6 \text{ h}$	$S = 100 \text{ km}^2$
et,	pour	$\Delta t = 15 \text{ mn}$	$S = 10 \text{ km}^2$

Ces deux réseaux ont en théorie la même densité utile. Dans la pratique, intervient également le

phénomène d'échantillonnage qui explique qu'un unique pluviomètre installé sur un bassin de 10 km² ne donne pas la même information que dix pluviomètres sur un bassin de 100 km².

Dans la nature, les conditions d'isotropie sont rarement respectées. L'orographie, par exemple, peut perturber sensiblement la distribution spatiale des précipitations. De plus, la prise en compte de la variabilité du milieu physique (caractéristiques des sols, du couvert végétal, du chevelu hydrographique, etc.) dans l'étude des relations pluie-débit impose des contraintes supplémentaires dont il faudra tenir compte, lors de la mise en place du réseau d'observations.

La démarche à suivre consisterait donc à :

- définir l'intervalle ou pas de temps de référence,
- analyser la précision souhaitée dans l'estimation des précipitations,
- étudier au niveau régional la structure ou les corrélations spatiales des précipitations au pas de temps choisi,
- éventuellement, prendre en compte l'hétérogénéité spatiale des caractéristiques physiographiques.

Il s'agit là d'un processus théorique irréalisable, particulièrement dans des régions où les études sur bassins représentatifs sont précisément un palliatif au manque d'informations hydro-climatiques.

En se basant sur l'expérience acquise par les chercheurs de l'Orstom en zone intertropicale, le réseau pluviométrique minimal pourrait, tous types d'appareils confondus (pluviomètres, pluviographes ou totalisateurs - paragraphe 2.1.2), respecter les normes suivantes :

<u>Surface</u>	<u>Nombre d'appareils</u>
1 km ²	4
2 km ²	5
5 km ²	6
10 km ²	6 - 8
25 km ²	8 - 12
50 km ²	12 - 15
100 km ²	15 - 20
500 km ²	20 - 25

Il s'agit de valeurs moyennes qui correspondent à des caractéristiques physiographiques ne présentant pas une très forte hétérogénéité. Lorsque les conditions climatiques ou géomorphologiques sont susceptibles de provoquer une irrégularité spatiale notable (régions à fort relief ou zones arides, par exemple), les chiffres proposés devront être majorés, principalement pour les plus petits bassins. Sur les bassins où les caractéristiques du ruissellement imposent de travailler avec des pas de temps très courts (parfois de l'ordre de cinq minutes), l'emploi d'appareils enregistreurs est impératif. Leur nombre sera souvent limité par des contraintes d'ordre économique ou de capacité de traitement de l'information ; on s'efforcera, malgré tout, qu'il ne soit pas inférieur aux valeurs suivantes :

<u>Surface</u>	<u>Nombre de pluviographes</u>
S < 5 km ²	1
S = 10 km ²	2
S = 25 km ²	3
S > 25 km ²	20 % du total des appareils

Dans la pratique, le plan d'implantation d'un réseau pluviométrique se prépare à partir de photographies aériennes, et de cartes topographiques et thématiques. On recherche, a priori, une distribution harmonieuse qui tienne compte cependant des voies d'accès et des particularités physiographiques. Il est indispensable que bon nombre d'appareils soient accessibles en toutes saisons, soit à pied (pour les petits bassins), soit à bicyclette, à vélomoteur ou motocyclette, suivant la distance à parcourir. La consigne d'exploitation sera, au moins pour les petits bassins, d'effectuer les relevés après chaque averse. Les appareils enregistreurs ayant une vitesse d'avancement compatible avec le pas de travail choisi doivent aussi être distribués de manière équilibrée. Dans les zones d'accès difficiles, seront utilisés des appareils enregistreurs ayant une capacité de stockage ou

d'enregistrement importante, ou des pluviomètres totalisateurs moins précis que les précédents, mais plus économiques. Ces derniers pourront servir également de moyen de contrôle des pluviomètres classiques, les relevés des deux appareils placés côte à côte étant effectués par des personnes différentes.

Lorsque le dispositif de mesures et d'observations compte différents bassins emboîtés, les réseaux pluviométriques présentent nécessairement une certaine hétérogénéité, les plus petits bassins ayant une densité d'appareils supérieure à celle des bassins qui les englobent (fig. 3).

2.1.2. CHOIX ET INSTALLATION DE L'INSTRUMENTATION

Le choix des appareils est commandé par de nombreux facteurs : le pas de temps de travail, le type de précipitations (hauteur-durée), les conditions de circulation dans la zone d'étude, les conditions climatiques auxquelles ils sont soumis (hautes températures, forte évaporation, etc.), la capacité de stockage requise, l'objectif de l'étude.

Il est important de souligner que dans de nombreux cas il n'est pas nécessaire de connaître la hauteur pluviométrique tombant effectivement sur le sol (les appareils couramment utilisés ne le permettent d'ailleurs pas). Par contre, cette donnée est indispensable au calcul du bilan hydrique exact d'un système hydrologique, au niveau d'une parcelle par exemple, ou dans la plupart des applications agronomiques. Un dispositif de mesure spécial doit alors être installé (pluviomètre au sol).

Lors du choix du type d'appareil, une sage précaution sera de respecter les normes en vigueur dans le pays ou la région concerné. L'exploitation et l'interprétation des observations, comme la maintenance des appareils, s'en trouveront facilitées.

2.1.2.1. PLUVIOMETRES

2.1.2.1.1. PLUVIOMETRE STANDARD

Un pluviomètre est un appareil qui permet de mesurer la quantité de pluie tombée en un lieu déterminé, durant un certain intervalle de temps. Il est relevé par un observateur, généralement une fois par jour lorsqu'il s'agit d'un poste pluviométrique, plusieurs fois en 24 heures dans certaines stations météorologiques ou climatologiques. Sur les BVRE, il n'est pas rare d'effectuer un relevé après chaque averse.

Le modèle qui a été le plus couramment utilisé en Afrique francophone, durant de nombreuses années, est le pluviomètre "Association", défini au XIX^{ème} siècle par l'Association pour l'Avancement des Sciences. Il se compose d'un seau tronconique, de pente suffisante pour limiter les rejaillissements, avec une ouverture de 400 cm² matérialisée par une bague à arête tranchante. Sa capacité est généralement de 7 litres (soit 175 mm de précipitations), parfois de 11 litres (soit 275 mm de pluie) pour les pays tropicaux. Posé sur un piquet dépassant du sol de 1,2 m, son aire de captation est placée à 1,5 m de hauteur (fig. 4). La lecture se fait à l'aide d'une éprouvette en plastique moulé (autrefois elle était en verre), avec une précision pouvant atteindre 0,05 mm.

Le pluviomètre à seau métallique a été progressivement remplacé par un pluviomètre à seau plastique transparent tropicalisé, dont le fond conique gradué permet une lecture directe avec une approximation de 0,25 mm, de 0 à 10 mm et de 0,5 mm, de 1 à 10 cm. Certains appareils sont équipés d'une éprouvette également en plastique moulé, placée sous l'entonnoir de manière à améliorer la précision de la lecture (de l'ordre de 0,05 mm) des faibles quantités de pluie. L'ouverture de ces appareils se situe à un mètre au-dessus du sol (nouvelle norme, photo 1), mais il est aussi possible de l'installer à un 1,50 m pour respecter les normes locales (entre autres, les normes ASECNA). Néanmoins, si la mesure directe peut satisfaire les agronomes, il est recommandé aux hydrologues d'exploiter le seau plastique avec l'éprouvette, de la même manière que pour le pluviomètre "Association". Les deux appareils ont d'ailleurs la même ouverture de bague.

Très simple au premier abord, la mesure de précipitation est cependant sujette à un certain nombre d'erreurs dues à l'inclinaison et à la hauteur de la bague, au rejaillissement des gouttes, au mouillage des parois, à l'évaporation et surtout à l'environnement. L'effet du vent, principalement, peut être très important : l'accélération de l'écoulement de l'air autour de l'obstacle que constitue le pluviomètre modifie la trajectoire des gouttes de pluie qui divergent en approchant de l'ouverture, de telle sorte que la quantité captée est systématiquement inférieure à celle qui le serait par la même surface placée perpendiculairement à la trajectoire (fig. 5). L'erreur croît avec le rapport de la vitesse du vent à la vitesse de chute des gouttes de pluie. Comme la vitesse du vent croît avec la hauteur au-dessus du sol, on peut penser que plus l'ouverture de l'appareil est près du sol, meilleure sera la captation de la précipitation (voir paragraphe 2.1.2.1.2., la description du pluviomètre au sol).

Le choix du site d'implantation d'un pluviomètre doit donc se faire à partir de certains critères dont le but est de minimiser les effets perturbateurs :

- emplacement bien dégagé de tout obstacle trop élevé : la distance minimale du pluviomètre aux objets environnants ne doit pas être inférieure à quatre fois leur hauteur ;
- sol plat : éviter les zones pentues, particulièrement si la pente a la même direction que les vents dominants ;
- emplacement abrité de la pleine force du vent, sans que toutefois l'abri amène des perturbations plus importantes que celles à éviter.

Pour Brown et Pech (1962), un pluviomètre bien abrité dans toutes les directions doit être entouré d'obstacles qui, vus de l'orifice, sous-tendent des angles de 20 à 30°. Ces obstacles doivent être suffisamment larges pour minimiser les effets de turbulence.

De nombreuses formes d'écran ou de collerettes ont été imaginées sans que les résultats obtenus aient été vraiment concluants. L'effet d'abri, pour être efficace, doit porter sur plusieurs centaines de m², voire plusieurs hectares, c'est pour cela qu'une clairière en forêt ou savane constitue un site privilégié d'implantation. Dans les zones à fortes déclivités, pour limiter un déficit systématique de précipitations, certains ont proposé d'utiliser des pluviomètres dont l'orifice serait incliné parallèlement à la pente (stéréo-pluviomètres). Dans la pratique, les terrains accidentés sont souvent soumis à des effets locaux (turbulences) qui perturbent fortement les mesures et limitent l'intérêt de tels appareils. Il semble donc illusoire de vouloir mesurer les précipitations sur les crêtes et les sommets.

L'installation de l'appareil doit être faite avec soin. Il faut, excepté pour des études particulières, respecter les normes relatives à l'aire et à la hauteur au-dessus du sol de la surface de captation (bague de 400 cm² située à 1,5 m de hauteur, en Afrique francophone - norme ASECNA).

L'appareil est placé sur un pied, de préférence métallique, enfoncé suffisamment dans le sol par battage ou à l'aide d'une tarière. Un dé en béton peut, si nécessaire, assurer une meilleure stabilité. Une planchette, une collerette ou simplement des fers plats placés en croix permettent de fixer, à l'aide de vis, le support métallique du pluviomètre, généralement constitué d'un trépied pour faciliter le réglage de l'horizontalité de l'ouverture (fig. 6). Il faut enfin vérifier, principalement s'il s'agit d'appareils usagés ou ayant été transportés dans des conditions difficiles, que la bague n'a pas été déformée, que l'étanchéité du seau est parfaite et que les graduations de l'éprouvette sont adaptées au diamètre de la bague. On veillera à ce que la capacité du seau soit suffisante, compte tenu du régime pluviométrique.

Pour répondre à des problématiques spécifiques, rencontrées dans l'exploitation des appareils ou l'utilisation des observations, des types spéciaux de pluviomètres ont été proposés (pluviomètre au sol, par exemple).

2.1.2.1.2. PLUVIOMETRE AU SOL

Ce type d'appareil est indispensable lorsque la connaissance des quantités de pluie atteignant le sol est vraiment nécessaire : calculs de bilans hydriques et de coefficients de ruissellement précis, applications agronomiques.

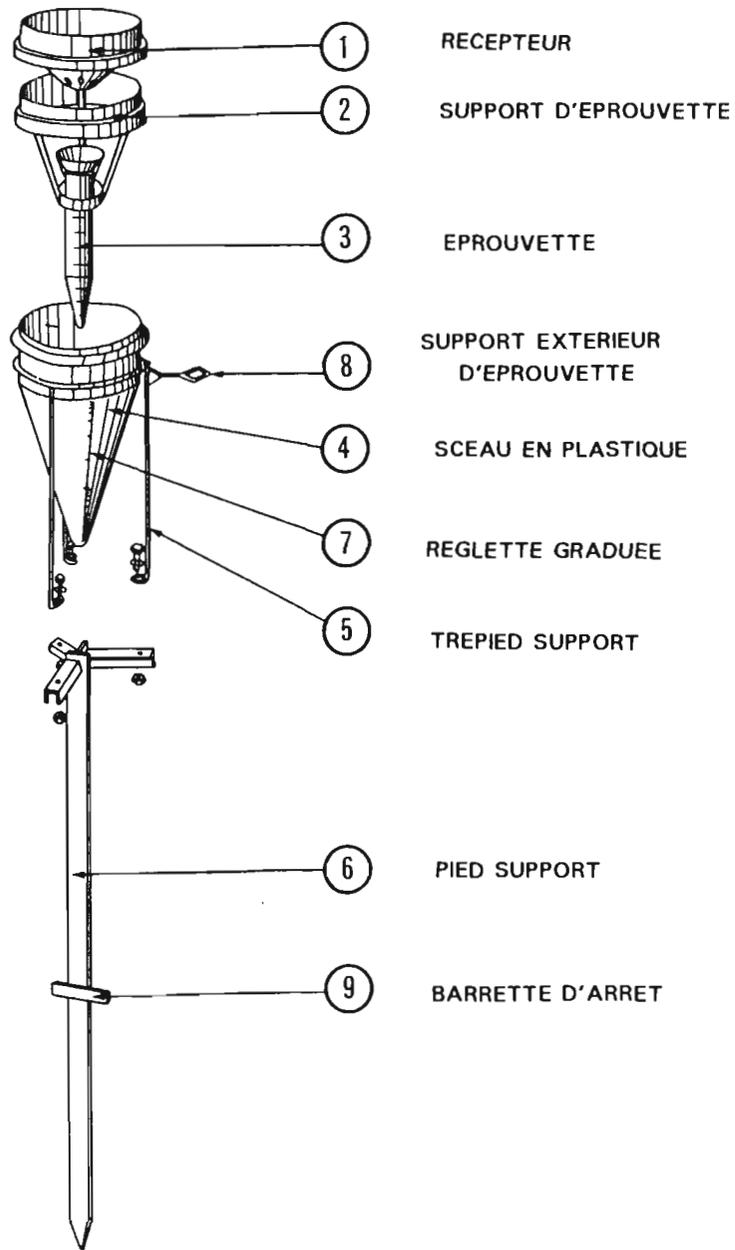


Fig-6- PLUVIOMETRE SPIEA MODIFIE METEOROLOGIE NATIONALE FRANCAISE

En Afrique francophone, est utilisé un pluviomètre du type "Snowdon", légèrement modifié par l'Orstom (photo 2). Le seau est du type "Association", avec une ouverture de 400 cm², installé au centre d'une fosse carrée de 165 cm de côté et de 40 à 50 cm de profondeur, de telle sorte que la bague soit exactement au niveau de la surface du sol. Une grille anti-rebond, faite de lames métalliques entrecroisées (épaisseur de tôle inférieure à 3 mm), encadre le seau en affleurant également au niveau du sol. Le carroyage est formé de 112 carrés élémentaires de 15 cm de côté. La fosse est de préférence bétonnée sur les côtés pour éviter les éboulements, et son fond est garni de matériaux filtrants (graviers) qui permettent une évacuation rapide des eaux de pluie, voire de ruissellement (fig. 7).

De telles installations, relativement coûteuses, ne peuvent être envisagées pour un réseau pluviométrique d'une certaine importance. Dans de nombreuses applications, la connaissance des précipitations tombant sur le sol n'est d'ailleurs pas indispensable. Les mesures effectuées à 1,5 m au-dessus du sol peuvent alors être considérées comme un simple indice pluviométrique. Les résultats des modèles pluie-débit, par exemple, s'en montrent peu ou pas altérés.

Une solution pratique consiste à associer, en certains sites, un pluviomètre standard au pluviomètre enterré. P. Chevallier et J.M. Lapetite (305) ont pu ainsi montrer qu'il existait, en Afrique de l'Ouest, une relation, fonction de la latitude, entre les observations faites à l'aide de ces deux types d'appareils (fig. 8).

Si A et B sont les coefficients de la régression établie à partir des pluies journalières :

$$P_{sol} = A \cdot P_{standard} + B$$

et, si PJ est la hauteur de précipitation journalière de période de retour annuelle, on définit l'écart X par la relation :

$$X = (A \cdot PJ) + B / PJ$$

et

$$X = 10,7 \cdot 10^{-6} \cdot LAT^4 + 0,95$$

Un autre ajustement donne l'écart en fonction de PJ (fig. 9) :

pour	PJ < 62 mm	X = - 0,026 . PJ + 2,63
	PJ > 62 mm	X = - 0,0007 . PJ + 1,08

Différentes mesures réalisées en Côte d'Ivoire, au Sénégal ou au Burkina-Faso montrent qu'il faut nuancer ces coefficients et que l'environnement immédiat de l'appareillage est probablement un facteur important. Il faut noter que l'installation de tels dispositifs dans l'enceinte d'une station climatologique représente une garantie pour la qualité des observations, mais n'est pas le meilleur moyen d'extrapolation des résultats à l'ensemble d'un bassin. Les sites privilégiés d'implantation des postes pluviométriques doivent en effet être abrités du vent, alors que la station climatologique est de préférence installée dans une zone bien dégagée, bénéficiant d'une exposition maximale.

2.1.2.1.3. PLUVIOMETRE TOTALISATEUR

Les pluviomètres totalisateurs permettent d'accumuler les précipitations sur des périodes supérieures à la journée (semaine, mois, saison ou année). Comme déjà précisé, ils sont utilisés pour effectuer des observations dans des zones d'accès difficile, ou comme instrument de contrôle des pluviomètres journaliers (paragraphe 2.1.1.).

Ils se composent d'un entonnoir, identique à celui des pluviomètres "standards", placé sur un récipient collecteur de capacité suffisante (une estimation des volumes cumulés probables devra être faite en fonction de la périodicité des relevés et de la zone climatique). Ce récipient, très souvent de forme tubulaire, peut être métallique (acier inoxydable ou zinc) ou en plastique.

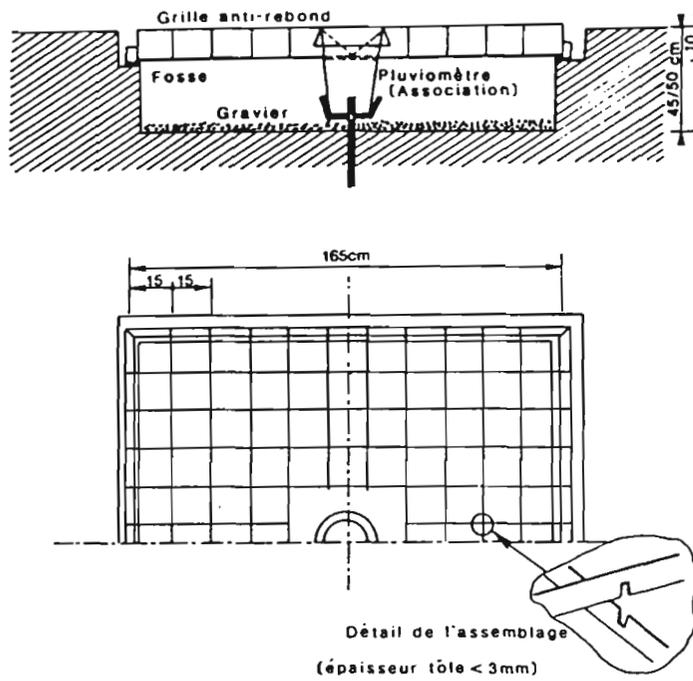


Fig-7- PLUVIOMETRE AU SOL UTILISE PAR L'ORSTOM EN AFRIQUE DE L'OUEST

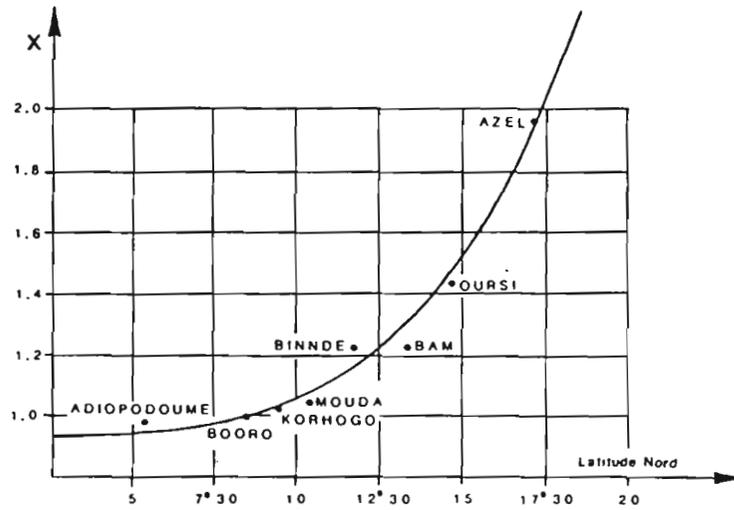


Fig-8- ECART EN FONCTION DE LA LATITUDE

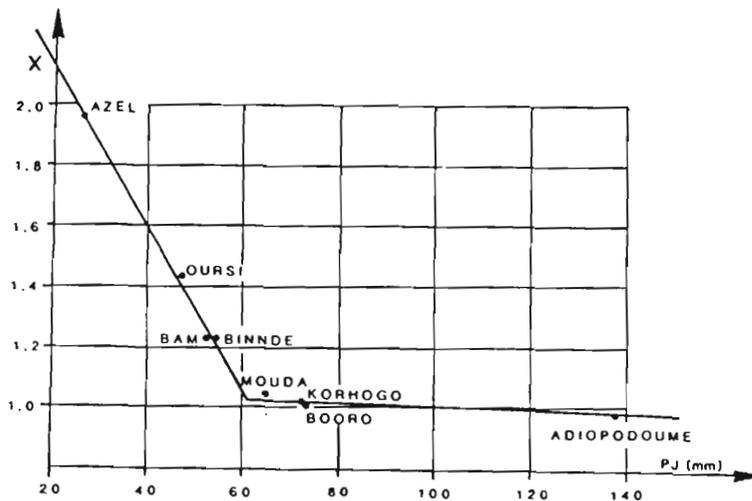


Fig-9- ECART X EN FONCTION DE LA PLUIE JOURNALIERE DE FREQUENCE ANNUELLE

(D'APRES P.CHEVALIER et J.M.LAPETITE)

Les critères d'installation sont les mêmes que ceux décrits pour les pluviomètres journaliers (paragraphe 2.1.2.1.1.). Pour réduire les risques de pertes par évaporation, on versera une couche d'huile de moins de un centimètre d'épaisseur : les huiles de moteur à faible viscosité, non détergentes, sont recommandées. Cette substance devra être renouvelée périodiquement pour éviter que se forme une émulsion sans effet sur l'évaporation. Les mesures peuvent être effectuées, soit à l'aide d'une jauge graduée absorbant peu l'eau et à faible effet de capillarité lorsqu'il s'agit de volumes importants stockés dans un récipient de section constante, soit à l'aide d'une éprouvette. Une précision du demi millimètre de pluie est suffisante pour les relevés hebdomadaires. Pour les relevés mensuels et annuels, les résultats seront arrondis au millimètre.

2.1.2.2. APPAREILS ENREGISTREURS

Les appareils enregistreurs présentent les mêmes caractéristiques générales que les pluviomètres, et sont soumis aux mêmes normes d'installation. Un dispositif réalisé grâce à différents mécanismes permet de suivre en continu, pour le moins sur des intervalles de temps compatibles avec le pas de travail choisi, la chronologie des précipitations. Parmi les nombreux systèmes disponibles, deux sont les plus couramment utilisés : les mécanismes à flotteur et siphon et les mécanismes à augets basculeurs.

2.1.2.2.1. MECANISME A FLOTTEUR ET SIPHON

L'eau recueillie dans l'entonnoir de ce type de pluviographe s'accumule dans un cylindre et entraîne un flotteur qui porte un stylet inscripteur ; quand le cylindre, dont la capacité correspond à une certaine hauteur de pluie, est plein, le niveau d'eau atteint le col d'un siphon qui s'amorce et vide en quelques secondes l'eau accumulée, entraînant flotteur et stylet ; puis le cycle recommence (fig. 10).

Le fonctionnement aléatoire du siphon fait que ce type d'appareil, qui présente pourtant l'avantage de fournir un enregistrement continu, est souvent, du moins en Afrique francophone, délaissé. De plus, il se prête mal à un enregistrement direct sur mémoire informatique.

2.1.2.2.2. MECANISME A AUGETS BASCULEURS OU BASCULANTS

La pluie collectée par l'entonnoir s'écoule dans un système composé de deux augets qui reposent, alternativement, sur des butées placées de part et d'autre d'un axe de basculement. Lorsque l'auget supérieur est plein, il bascule jusqu'à sa butée en se vidant brusquement, l'autre auget commençant alors à se remplir. Pour assurer l'enregistrement sur un diagramme, le mouvement de bascule est transmis par engrenage à une came de profil spécial qui permet l'entraînement d'un stylet (fig. 11). Ce système se prête particulièrement bien à toutes formes d'automatisation (enregistrement sur mémoire ou télétransmission). Il suffit d'adapter un contacteur à mercure, ou un petit aimant agissant sur un interrupteur, pour créer à chaque basculement une impulsion directement utilisable dans tout dispositif de comptage électronique, sans qu'il soit nécessaire de passer par l'intermédiaire d'un codeur analogique numérique. L'enregistrement peut être fait, durant un intervalle de temps fixe ou variable, en totalisant le nombre de basculements, ou en associant la date (jour, heure, minute) à chaque basculement. La dernière de ces deux solutions permet une reconstitution précise du pluviogramme, mais nécessite des capacités de stockage sur site plus importantes. Toutefois, différents modes de compactage, sans dégradation de l'information, ont été développés et sont actuellement opérationnels.

Le stockage sur mémoire évite le travail fastidieux du dépouillement des enregistrements sur diagrammes, ainsi que certaines limitations inhérentes à ces systèmes : fragilité du papier, réglage minutieux du système inscripteur, autonomie limitée, etc.

L'auget le plus communément utilisé en Afrique francophone a une capacité de 20 cm³ (soit 20 g d'eau) ce qui, pour un entonnoir de 400 cm², correspond à 0,5 mm de pluie. La tendance actuelle est de réduire la taille des augets pour augmenter la précision de l'appareil, tout en conservant une même surface de captation. L'utilisation de plus en plus fréquente du plastique rend les mécanismes plus sensibles à l'usure, et, à cause de leur faible poids, aux basculements intempestifs (vent, petits mouvements accidentels).

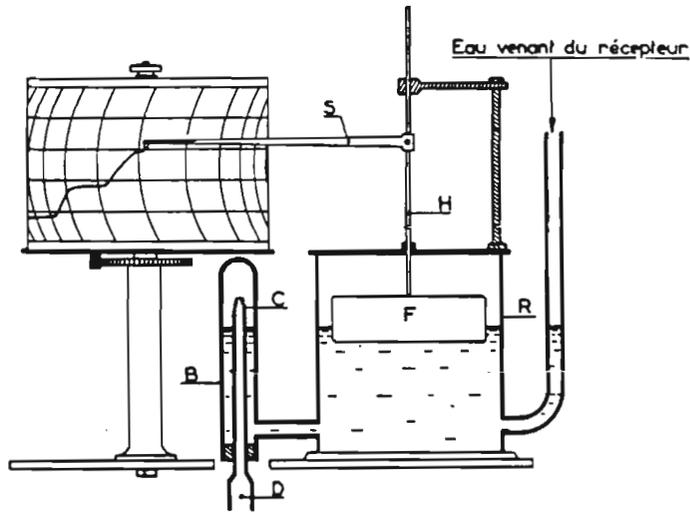


Fig-10- PLUVIOGRAPHE A SIPHON

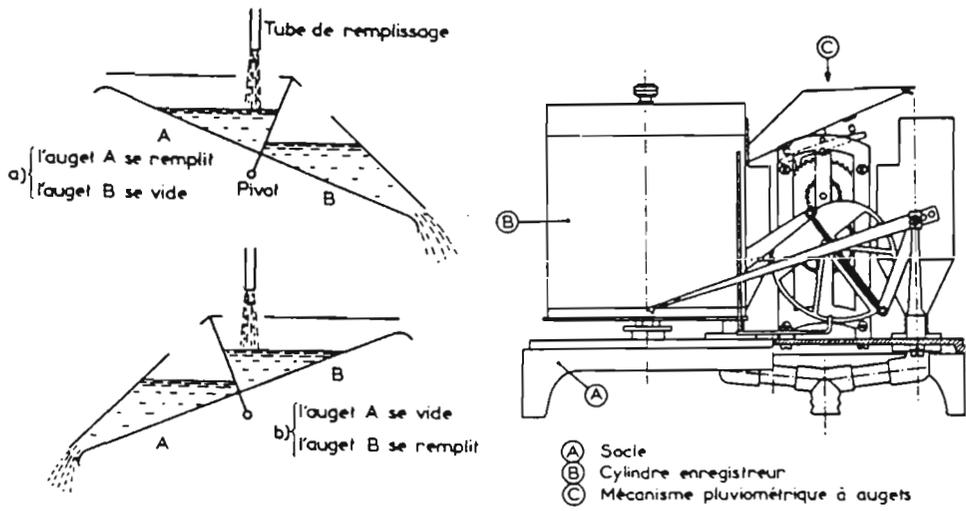


Fig-11- PLUVIOGRAPHE A AUGETS BASCULEURS (D'APRÈS G.REMENIERAS)

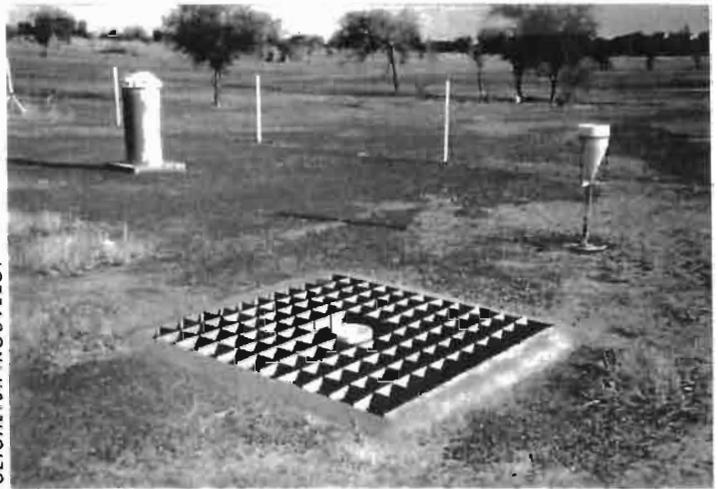
PHOTO - 1



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Pluviomètre en plastique
Djigouinoum - (Sénégal) -

PHOTO - 2



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Pluviomètre au sol type "Snowdon" - Bidi - (Burkina-Faso) -

PHOTO - 4



CLICHÉ: J. P. TRIBOULET

Pluviomètre à impulsions
- Hapex - (Niger) -

PHOTO - 3



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Pluviographe avec guérite - Djigouinoum - (Sénégal) -

PHOTO - 4-a



CLICHÉ: J. P. TRIBOULET

Centrale d'acquisition - Hapex - (Niger) -

La conception même de l'appareillage entraîne un certain nombre d'erreurs systématiques. Ainsi, le basculement, qui correspond à une perte d'équilibre, nécessite un certain temps (quelques dixièmes de seconde) pendant lequel l'auge reçoit un excédent d'eau perdu pour l'enregistrement. Cette erreur, dite "de remplissage", est d'autant plus élevée que l'intensité est forte. Par contre, un sous remplissage est souvent observé lors de faibles intensités. L'appareillage ne donnerait donc l'intensité exacte qu'au voisinage d'une valeur déterminée (aux environs de 10 mm/h, pour une bague de 400 cm²).

Ces erreurs ne sont vraiment sensibles que pour des surfaces de captation de 2 000 cm², couplées à des auges de 20 cm³ de capacité : l'erreur par défaut peut être alors estimée à 12 % pour une intensité de 120 mm/h. Avec une bague de 400 cm², cette erreur est divisée par cinq. Il ne semble donc pas nécessaire, dans ces conditions, d'envisager un tarage systématique de chacun des appareils utilisés. Il n'empêche qu'un certain nombre de précautions doivent être prises :

- Bien que les appareils soient tarés en usine, il sera bon de contrôler, après vérification de leur horizontalité, que le basculement se fait à + ou - 3 % pour un volume d'eau de 20 cm³. La méthode la plus simple consiste à utiliser une pipette de laboratoire.
- L'ajutage de vidange de l'entonnoir doit être suffisant pour éviter une mise en charge de l'eau de pluie. Un trou de 2,5 mm de diamètre permet de mesurer une intensité maximale de 300 mm/h si l'aire de captation est de 400 cm² (on note l'insuffisance d'un tel ajutage pour une surface réceptrice de 2 000 cm²). Une sage précaution consistera à réalésier systématiquement les ajutages à l'aide d'une mèche de 5 mm. Ceci évite également les obstructions fréquentes dues à des dépôts de poussières, de terre, de débris végétaux ou autres détritiques.
- Afin de contrôler globalement le fonctionnement de l'appareil, l'eau de pluie s'évacuant des auges devra être recueillie dans un récipient. La mesure sera effectuée à l'éprouvette (adaptée à la surface d'ouverture), aussi souvent que le pluviographe sera visité (changement de diagramme, contrôle de cassettes ou de mémoires statiques).
- Dans le cas d'enregistrements sur diagrammes, la vitesse de déroulement utilisée devra être adaptée à la précision recherchée dans la connaissance du facteur temps :
 - . tambour journalier : vitesse de défilement de 13 à 16 mm/heure, suivant le type d'appareil,
 - . tambour hebdomadaire : vitesse de défilement voisine de 2,5 mm/heure,
 - . table déroulante hebdomadaire : vitesse de défilement de 120 mm/heure,
 - . table déroulante bi-mensuelle : " 25 à 60 mm/heure
 - . table déroulante mensuelle : " 2,5 à 20 mm/heure,
 - . table déroulante trimestrielle : " 5 à 10 mm/heure.

Dans les études du ruissellement sur petits bassins, il ne sera pas prudent de choisir une vitesse de déroulement inférieure à 10 mm/heure. Les appareils équipés d'horloge à balancier et à ressort devront être contrôlés régulièrement. L'utilisation de plus en plus fréquente d'horloges à quartz représente un progrès important.

2.1.2.2.3. PLUVIOGRAPHE A PESEE

Dans les pluviographes à pesée, l'eau de pluie s'accumule, à la sortie de l'entonnoir, dans une cuve posée sur une balance à ressort qui entraîne le stylet d'enregistrement.

2.1.2.2.4. PLUVIOGRAPHE A SIPHON BASCULE

Dans ce type de pluviographe, très utilisé par le Bureau Météorologique Britannique, la pluie qui tombe dans l'entonnoir est dirigée dans une chambre contenant un flotteur auquel est fixée une tige qui actionne une plume. Lorsque le flotteur atteint la partie supérieure de la chambre, il déclenche un crochet de retenue et le poids

de l'eau fait basculer toute la chambre autour d'un support en arête de couteau. Ce mouvement envoie brusquement l'eau dans un siphon monté au fond de la chambre. A la fin du siphonnage, un contrepoids remet cette dernière en position prête à être remplie de nouveau.

2.1.2.2.5. PLUVIOMETRE D'INTENSITE

L'eau reçue dans le pluviomètre se déverse dans un tube relié à un capteur de hauteur d'eau à ultrasons qui utilise le principe du temps de propagation des ondes ultrasoniques dans l'eau. La vidange se fait par siphonnage, amorcé par l'enfoncement brusque d'un flotteur au moment où le niveau maximum est atteint. Les mesures peuvent être mémorisées sur un système d'acquisition, avec un pas de temps de une seconde. Ce dispositif est proposé en remplacement du système utilisant un capteur de pression dont les résultats se sont avérés assez décevants, mais qui reste tout de même une voie de recherche.

2.1.2.2.6. SPECTRO-PLUVIOMETRES OPTIQUES ET DISTROMETRES

Ces appareils, qui permettent une acquisition d'information au niveau de la goutte de pluie, sont cités pour mémoire, car coûteux et encore du domaine de la recherche.

Remarques :

Les pluviographes les plus utilisés en Afrique francophone sont des appareils à augets basculeurs installés dans une guérite, avec une aire de captation de 400 cm², calée à un mètre au-dessus du sol. On rencontre parfois des bagues placées à 1,50 m, en accord avec les pluviomètres dont il a été fait mention précédemment (paragraphe 2.1.2.1.1.). Les guérites les plus anciennes, de forme cylindrique, ont souvent un emplacement réservé au seau de contrôle (photo 3). Plus récemment, sont apparues des guérites troncs-coniques qui n'offrent plus cette facilité (photos 4 et 4a). Il est alors indispensable d'adjoindre à l'appareil un récipient collecteur connecté, par un tuyau souple (caoutchouc ou plastique), au système d'évacuation.

La fixation au sol se fait à l'aide de pattes pour les guérites cylindriques, ou d'un pied-support avec flasques pour les guérites troncs-coniques. Un socle en béton assure une meilleure stabilité au dispositif qui doit pouvoir résister aux vents violents des "tornades". Dans certains cas, un système de haubanage pourra être nécessaire.

Le grand nombre d'appareils enregistreurs utilisés dans les études de BVRE, ainsi que la durée parfois très courte des événements pluviométriques observés, plaident pour une large utilisation de technologies modernes éprouvées : horloges de précision à quartz (dont la dérive est souvent inférieure à une minute par mois), dispositifs de comptage électroniques avec archivage sur mémoire statique. La consommation en énergie étant très faible, le fonctionnement peut être assuré par un panneau solaire photovoltaïque de faible puissance (énergie maximum de 8 Wh).

2.1.3. MESURE DE L'INTERCEPTION DES PRECIPITATIONS

2.1.3.1. PHENOMENE D'INTERCEPTION

La pluie qui tombe sur la végétation, et plus particulièrement sur une forêt, n'arrive pas au sol en totalité. Une fraction est interceptée, puis directement évaporée. Une autre partie passe à travers le couvert végétal en le touchant ou non. Une troisième fraction, enfin, atteint également le sol par écoulement le long du tronc des arbres : soit que les gouttes de pluie le frappent directement, soit que l'eau interceptée par les feuilles chemine le long des rameaux, puis des branches, avant de l'atteindre.

Les quantités mesurées peuvent varier sensiblement suivant le type et la durée des précipitations ainsi que la nature des peuplements végétaux. Cependant, la plupart des études montrent que l'écoulement le long des troncs dépasse rarement quelques pour-cent. Quant à l'interception, elle représente fréquemment entre 15 et 30% du total des précipitations (309).

2.1.3.2. DISPOSITIF DE MESURE

Les précipitations incidentes sont, dans de nombreux cas, mesurées à l'aide de pluviomètres ou pluviographes installés dans des clairières à proximité de la zone d'étude. L'installation d'appareils sur la cime des arbres ou arbustes, outre les difficultés qu'elle peut représenter, s'est avérée inutile.

La station d'interception se compose, suivant l'objectif des études, soit de pluviomètres placés à la hauteur standard, soit de pluviomètres posés à même le sol, soit de pluviomètres installés dans une fosse équipée, ou non, d'un système anti-rebonds. L'environnement local assurant une bonne protection contre le vent, la hauteur d'implantation des appareils ne devrait pas influencer sensiblement les résultats.

Les pluviomètres pourront être placés aux noeuds d'un quadrillage dont chaque carré unitaire aura quelques mètres de côté (de 2 à 10 mètres suivant l'aire d'étude). Une autre méthode plus économique consiste à diviser l'ensemble des appareils en deux lots de tailles identiques : l'un composé de pluviomètres fixes, l'autre de pluviomètres mobiles qui seront déplacés à plusieurs reprises au cours de l'étude.

L'eau qui s'écoule le long des troncs est recueillie par une gouttière en plastique souple, qui fait le tour complet de l'arbre, avant de se déverser dans un récipient fermé où elle est stockée. Les observations sont effectuées à l'échelle de la journée, ou mieux à l'échelle de l'averse.

Pour évaluer le stockage maximal du couvert végétal et la variation de l'interception avec la durée des précipitations, l'installation de pluviographes est indispensable.

Ce dispositif pourra avantageusement être complété par l'installation d'appareils permettant l'observation des principaux facteurs climatiques qui influencent le phénomène étudié :

- un bac d'évaporation enterré Orstom, type "Colorado" (paragraphe 2.3.6.1.),
- un abri météorologique pour la mesure de la température et de l'humidité de l'air (paragraphe 2.3.2.).

2.2. EAUX DE SURFACE

Les eaux superficielles qui ne représentent qu'une phase du cycle hydrologique obéissent, sous l'influence du contexte physico-climatique, à une dynamique relativement complexe. Par commodité, il est d'usage de différencier, en faisant abstraction de certains cas particuliers :

- le ruissellement sur le sol qui apparaît quand l'intensité de l'infiltration effective devient inférieure à celle de la pluie et que la phase d'imbibition s'achève ;
- l'écoulement dans le réseau hydrographique qui se manifeste tout d'abord par la formation de rigoles et de ravines, puis de thalwegs de plus en plus importants à mesure que la surface drainée augmente ;
- l'eau dite "stagnante", stockée dans les dépressions naturelles ou les retenues artificielles dans lesquelles l'écoulement est très lent, voire nul.

L'écoulement dans le réseau hydrographique est, de par sa nature, un écoulement concentré indissociable de la notion de bassin versant. Le débit mesuré en un point d'un cours d'eau ne représente pas, contrairement à une hauteur pluviométrique, un "phénomène" ponctuel, c'est la résultante des écoulements élémentaires observés sur l'ensemble de la surface drainée, véritable opérateur de transformation de la pluie en débit. Dans cette transformation, la conservation des volumes n'est toutefois pas respectée, des pertes étant toujours observées. Elles dépendent à la fois de la pluie elle-même, des autres facteurs climatiques, mais aussi des caractéristiques physiques et physiographiques du bassin. Cette résultante de l'intégration dans le temps et l'espace de phénomènes éminemment complexes est, malgré tout, probablement la seule composante du cycle de l'eau qui puisse être mesurée avec une précision relativement bien connue.

L'étude du ruissellement sur le sol, hors du réseau hydrographique, peut quant à elle avoir divers objectifs :

- appréhender et comprendre les processus et les mécanismes hydrologiques (humectation des sols, formation des écoulements, infiltration, percolation, érosion) par une analyse des différents facteurs explicatifs (précipitations, relief, sols, états de surface, végétation, etc.) ;
- évaluer quantitativement les actions anthropiques.

Elle ne peut être menée que sur de petites surfaces où règnent des conditions physico-climatiques suffisamment homogènes : bassins naturels de quelques hectares, parcelles expérimentales de quelques centaines ou dizaines de m², jusqu'à des micro parcelles de quelques m² à peine.

Quant aux retenues, en plus de l'analyse de certains processus climatologiques (l'évaporation par exemple), elles permettent, en s'entourant de précautions, d'estimer à moindre coût certains paramètres hydrologiques (lames ruisselées ou coefficients d'écoulement, par exemple).

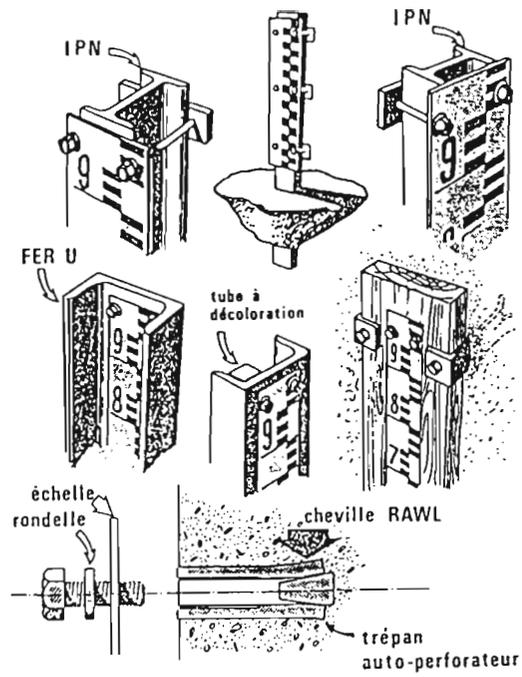
2.2.1. DISPOSITIF GENERAL

Dans les études de BVRE, la mesure de l'écoulement ne s'opère pas uniquement à l'exutoire du bassin choisi. En fonction des objectifs poursuivis (voir paragraphe 1.1.), le contrôle des débits se fait également en un certain nombre de sites répartis sur le cours d'eau principal ou sur des affluents, afin d'analyser le rôle du milieu physico-climatique et plus particulièrement l'influence des superficies drainées. D'une manière générale, à l'intérieur d'une zone hydrologique relativement homogène, la plupart des caractères quantitatifs du régime hydrologique (crues, module, etc.) varient avec la surface, ou plus précisément avec le logarithme de la surface du bassin versant.

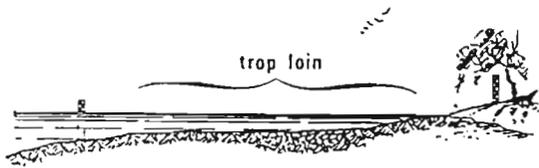
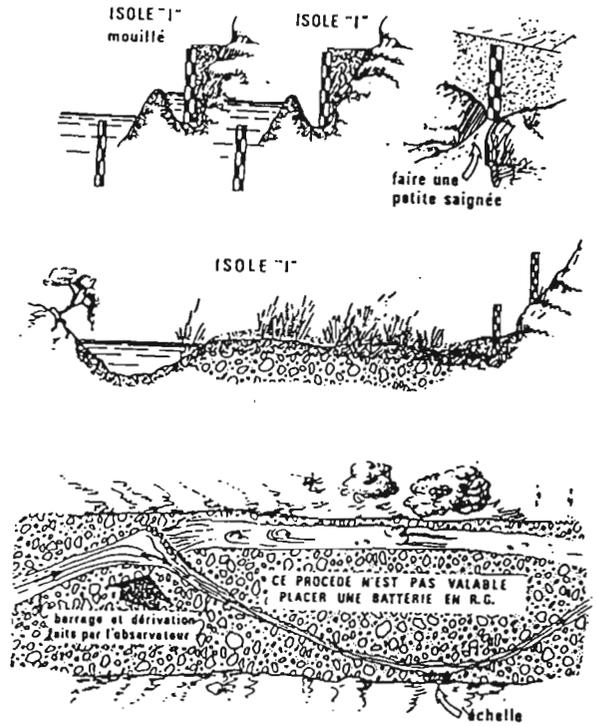
Partant d'un découpage en deux intervalles par module logarithmique, et compte tenu des surfaces généralement étudiées, plusieurs classes de bassins peuvent être différenciées :

$$\begin{array}{ccccccc}
 < & 2 & / & 2-10 & / & 10-20 & / & 20-100 & / & 100-200 & / & > & 200 - 1\ 000 \text{ km}^2 \\
 \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & & \underbrace{\hspace{4.5cm}} & & & & \underbrace{\hspace{4.5cm}} & & & & & \\
 \text{classe 1} & & & \text{classe 2} & & & & \text{classe 3} & & & & &
 \end{array}$$

- la classe 1 correspond aux bassins élémentaires, domaine privilégié pour l'expérimentation et la recherche scientifique ;



RELATION



SUR FOND PLAT TRONÇONNER LES ECHELLES

MAUVAISE INSTALLATION

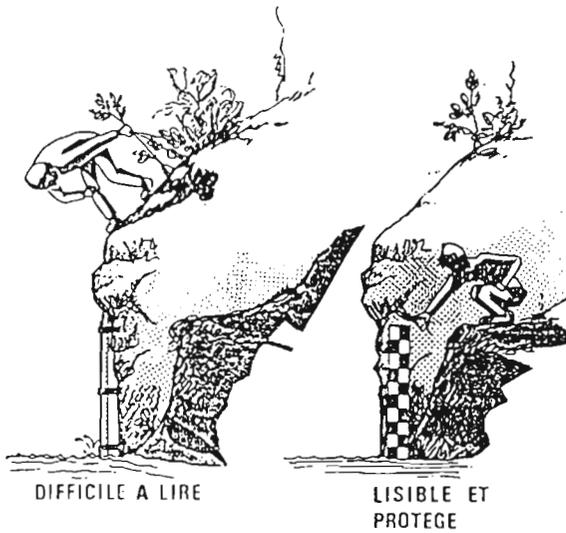
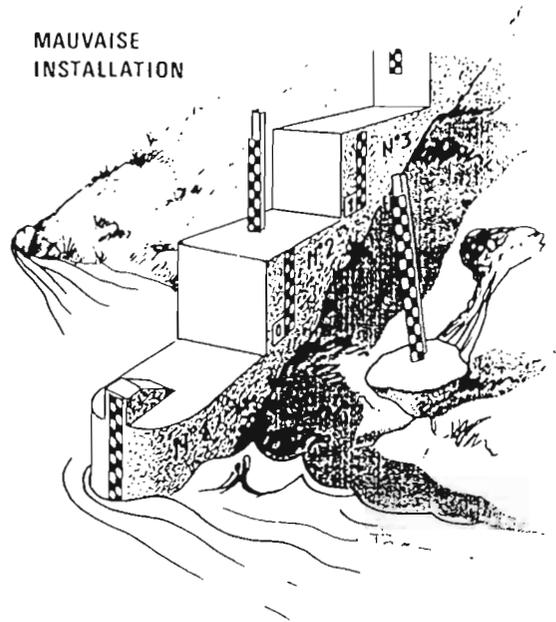


Fig-12- INSTALLATION DES ECHELLES LIMNIMETRIQUES (D'APRES J.THIEBAUX)

- dans la classe 2, se trouvent les bassins à vocation de représentativité permettant une extension géographique à de nombreux cas d'intérêt économique (petits ponts, barrages, prévision des crues, etc.) ;
- la classe 3 permet, du moins dans les pays intertropicaux, de faire le lien avec les informations fournies par les stations des réseaux hydrométriques nationaux.

Lors des premières études de bassins représentatifs effectuées par l'Orstom en Afrique de l'Ouest et du Centre, il était recommandé que parmi les bassins retenus, l'un d'entre eux ait une superficie voisine de 20-25 km². Sur de telles surfaces, la notion d'homogénéité est généralement à rejeter, par contre, celle de représentativité prend tout son sens. On peut, en effet, y trouver les séquences de sols, les formations géologiques, les assemblages de vallées, de pentes et de plateaux, les différentes couvertures végétales qui permettent de caractériser l'ensemble d'une région. De plus, elles correspondent assez bien à l'aire couverte par les "tornades" intertropicales, facilitant par là même l'analyse des processus hydrologiques (analyse des crues par la méthode de l'hydrogramme unitaire, par exemple).

2.2.2 INSTRUMENTATION ET MESURES HYDROMETRIQUES SUR LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Dans les études portant sur de petits bassins où des variations rapides de l'écoulement peuvent être observées, le mesurage en continu du débit est absolument nécessaire. A quelques exceptions près, la méthode utilisée consiste à enregistrer les variations du niveau d'eau dans une section transversale du cours d'eau. Des mesures ou l'emploi de formules hydrauliques permettent, ensuite, d'établir les relations de transformation de hauteur en débit.

Toutes les stations hydrométriques installées sur les BVRE comprendront donc :

- une station limnimétrique équipée d'échelles et d'un enregistreur,
- une station de mesure, ou un dispositif de contrôle du débit.

2.2.2.1 ECHELLES LIMNIMETRIQUES

Les échelles limnimétriques graduées en centimètres, ou plus rarement en millimètres, doivent être installées de manière que leur 0 soit placé au-dessous du niveau d'eau le plus bas que l'on puisse raisonnablement observer durant l'étude. Ce 0 est rattaché à un repère fixe, placé hors d'atteinte des plus hautes eaux (ce peut être une pointe métallique surmontant une borne en béton). Il doit, si possible, être raccordé au système de nivellement général du pays. Inamovible, ce repère sert également à caler en altitude les autres appareils installés ou les aménagements réalisés à hauteur de la station limnimétrique (limnigraphe, déversoir, digues, etc.), ou sur le bassin versant (piézomètres, par exemple).

Les échelles, composées d'éléments de un mètre, seront parfaitement nivelées entre elles. Pour assurer un calage précis, il est prudent de prévoir un jeu entre l'échelle et son support (fig. 12).

Les observations limnimétriques doivent pouvoir être effectuées (en toutes circonstances, y compris en cas de conditions exceptionnelles) quelle que soit la hauteur d'eau. Il faut également que l'échelle puisse être lue depuis la section où sont réalisées en hautes eaux les mesures de débit. Elle sera placée dans une zone assez calme, protégée des vagues et remous, le plus près possible de l'appareil enregistreur dont elle restera tout de même séparée. Solidement fixée, elle ne doit pas gêner l'écoulement, ni arrêter les débris transportés par le cours d'eau (photo 5).

Par précaution, elle pourra être doublée d'une échelle à maximum destinée à repérer, avec la plus grande précision possible, la cote maximale atteinte en crue. Différents systèmes ont été proposés. On peut citer, parmi les plus efficaces, celui utilisé par le service hydrologique du Maroc. Il se compose d'un élément en zinc recouvert d'une peinture blanche résistante à l'eau, avec en surcharge un filet de peinture bleue lavable. Cet élément est placé dans un tube percé galvanisé, de 50 mm de diamètre. Protégé des eaux de pluie par un bouchon vissé, il est retenu à sa partie inférieure par une barrette en fer plat soudée. Un autre dispositif consiste à mettre, dans un tube galvanisé ou en plastique de 40 à 50 mm de diamètre, des débris de polystyrène ou des copeaux de

bois qui viendront, lors de la montée des eaux, se déposer sur un élément central. On peut citer, également, les systèmes à godets dans lesquels sont placés de petits flotteurs en bois.

2.2.2.2. LIMNIGRAPHERS

Il est hors de propos de développer, dans le détail, les différentes technologies des nombreux appareils disponibles à la vente. Tous comportent deux parties essentielles : l'organe de mesure du temps et l'organe de mesure de la hauteur d'eau.

L'organe de chronométrie a été pendant longtemps un simple mouvement d'horlogerie à ressort (plus rarement à poids) assurant le déplacement du support d'enregistrement (feuille ou bande de papier, bande perforée) en fonction du temps. La non-linéarité de la force imprimée au mouvement d'horlogerie par le ressort entraîne nécessairement une dérive de la mesure. La vulgarisation des horloges à quartz, peu onéreuses bien que de haute précision, explique l'apparition de nouveaux appareils plus performants. Cependant, leur précision est liée non seulement à la fréquence du quartz, mais aussi à l'inertie du système assurant le défilement du dispositif d'enregistrement. C'est pour cela que les appareils équipés de systèmes d'acquisition sur support informatique marquent un réel progrès. Grâce à de tels dispositifs, tous les enregistrements des différents appareils installés sur un bassin peuvent facilement être rattachés à la même base de temps.

Le choix du système de mesure devra s'appuyer sur quatre critères principaux :

- La sensibilité, qui représente la variation la plus faible du niveau d'eau que l'appareil peut percevoir.
- La précision, qui traduit l'écart entre la valeur enregistrée et la valeur réelle de la hauteur d'eau. Il s'agit donc de l'erreur induite par l'appareil.
- La fidélité, qui définit l'aptitude de l'appareil à reproduire la même indication pour le même niveau d'eau.
- L'amplitude de mesure, qui donne la variation maximum qu'il est possible d'enregistrer.

2.2.2.2.1. LIMNIGRAPHERS A FLOTTEUR

Probablement les plus anciens et sûrement les plus simples, les limnigraphes à flotteur servent souvent de référence dans les essais comparatifs. Robustes et fiables, ils nécessitent cependant une installation verticale encombrante, souvent vulnérable aux crues et sensible à l'envasement. Ces différents inconvénients doivent être relativisés, dans la mesure où les études sur BVRE ne demandent jamais des installations très lourdes, les cours d'eau étudiés présentant rarement des marnages très importants. Suivant les caractéristiques de la section de mesures, ils peuvent être scellés sur un pont (photo 5), appuyés contre un arbre (photo 6), étayés par des tubes métalliques (photos 10 et 11), ou fixés au bajoyer du canal d'amenée d'un déversoir (photo 9).

Le déplacement du flotteur est transmis à une poulie par l'intermédiaire d'un câble dont la tension est assurée par un contrepoids. La précision théorique dépend :

- du couple résistant, poulie-enregistreur (trop important, il donne un enregistrement en escaliers) ;
- du diamètre de la poulie (généralement lié à l'échelle de réduction des hauteurs d'eau) ;
- du diamètre du flotteur.

Un enregistrement précis correspond à un appareil à faible couple résistant, équipé d'une grande poulie et d'un gros flotteur. La précision théorique, de l'ordre du millimètre, est rarement atteinte.

La figure 13 donne un exemple d'installation. Le puits percé de petits orifices de 3 à 5 millimètres de diamètre est installé directement dans le lit du cours d'eau : les oscillations du plan d'eau (batillage) sont suffisamment bien amorties si la surface totale des orifices représente le 1/100^{ème} de la section du puits.

Il sera prudent de prévoir une porte de visite pour assurer, si nécessaire, après une période de hautes eaux, un curage aisé du dispositif. Cette opération de nettoyage ne pose généralement pas de problème, le niveau d'eau entre deux crues restant très bas, voire nul.

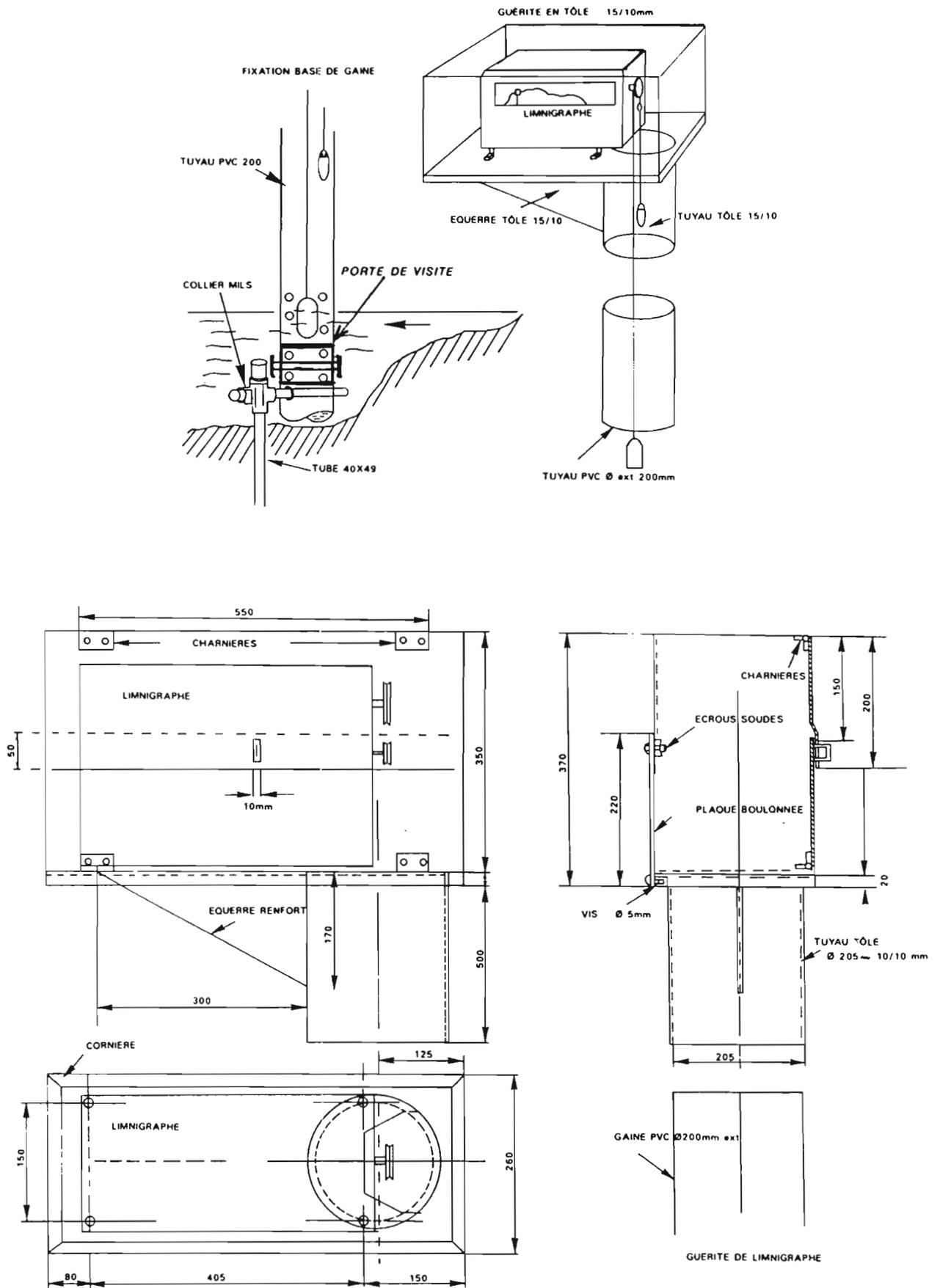


Fig-13- LIMNIGRAPHE A FLOTTEUR (D'APRÈS J.ALBERGEL)

2.2.2.2.2. LIMNIGRAPHERS A PRESSION

Le principe de fonctionnement des appareils à pression est relativement ancien, mais les limitations technologiques n'ont pas permis, pendant longtemps, d'utiliser la mesure directe de pression. Les appareils les plus courants fonctionnent sur le principe d'une mesure de pression différentielle, qui consiste à créer un débit de gaz constant dans une canalisation souple débouchant dans l'écoulement (schéma de fonctionnement, fig. 14). Ce système ne tolère aucune contre-pente. Il a néanmoins apporté un progrès en matière de souplesse d'emploi : facilité d'installation (le tube de prise de pression est simplement glissé dans un tube de protection souple), éloignement possible du système d'enregistrement par rapport au point de mesure. Toutefois, alors que l'organe de chronométrie a longtemps été pour les limnigraphes à flotteur la seule limitation à leur autonomie, s'ajoute pour les limnigraphes à pression la nécessité de disposer d'une réserve de gaz (souvent de l'air comprimé). Des dispositifs modernes utilisent aujourd'hui des mini-compresseurs pouvant être alimentés par des panneaux solaires.

Ces appareils ne mesurent donc pas directement le niveau d'eau, mais une grandeur physique qui lui est liée. Une certaine inertie, inhérente au type de mesure, peut entraîner une perte d'information lorsque les variations de hauteur d'eau sont rapides. Plus le volume d'air contenu dans le tube de prise de pression est grand (fonction du diamètre et de la longueur du tube), plus le retard à l'enregistrement est important. Le remède consiste à augmenter le débit du gaz. La précision attendue est de l'ordre du centimètre.

La prise de pression peut présenter une certaine vulnérabilité dans les cours d'eau à très fortes vitesses. Ces dernières représentent également, à cause de l'énergie cinétique de l'eau, un facteur d'erreur supplémentaire. Par contre, le dépôt de sédiments perméables ne présente pas d'inconvénients majeurs. De plus, l'échappement de bulles de gaz favorise l'auto-nettoyage de la prise.

Si ces appareils pneumatiques ont incontestablement le mérite d'être peu coûteux en génie civil et de pouvoir être mis facilement à l'abri des crues, ils n'en sont pas moins d'un entretien assez délicat : nécessité d'un approvisionnement continu en gaz (gestion de bouteilles ou entretien du mini compresseur toujours sensible à la poussière), purge régulière du circuit pneumatique, vérification de l'étanchéité, nettoyage de la prise de pression.

2.2.2.2.3. NOUVEAUX LIMNIGRAPHERS

Les nouveaux matériels aujourd'hui disponibles se caractérisent par une mise en oeuvre et une exploitation souvent plus aisées, et sans aucun doute plus rapides, que pour les divers systèmes décrits précédemment. S'agissant toutefois d'appareils faisant largement appel à l'électronique, ils demandent pour leur mise en oeuvre, comme pour leur utilisation, un minimum d'expérience et de connaissances dans ce domaine.

L'emploi de centrales d'acquisition électroniques est rendue nécessaire par le fait que les capteurs de mesure de la hauteur d'eau délivrent l'information sous forme analogique ou digitale (photo 7). Cette information peut, comme dans les systèmes plus anciens, être enregistrée sur des supports "classiques" (diagrammes, par exemple), mais l'un des grands intérêts de ces matériels est de pouvoir stocker directement les données (non seulement les hauteurs d'eau, mais aussi le temps mesuré par une horloge à quartz) sur mémoire informatique, de préférence statique.

Les mémoires utilisées sont issues de différentes technologies :

- Des EPROM, pour les mémoires amovibles. Ce sont des mémoires mortes programmables électriquement et effaçables par ultraviolets. Elles conservent l'information sans alimentation électrique.
- Des RAM CMOS, pour les mémoires résidentes. Ce sont des mémoires vives statiques à accès aléatoire en technologie faible consommation. Au repos, les besoins en énergie sont très faibles.
- Des EEPROM qui sont des mémoires mortes programmables et effaçables électriquement. Elles allient une relative souplesse de procédures d'écriture et d'effacement, proche des RAM, avec une non volatilité.

La collecte des mesures se fait par retrait de cassettes ou de cartouches (mémoires amovibles), ou à l'aide de terminaux ou de micro-ordinateurs portables (mémoires résidentes fixes).

Parmi les capteurs actuellement disponibles, peuvent être mentionnés :

- Les **capteurs de pression**, qui utilisent la propriété que possèdent certains matériaux de transformer leur déformation mécanique en une grandeur électrique, mettant en oeuvre :
 - . la variation d'un champ électrique, en utilisant un transformateur différentiel ou un condensateur à air ;
 - . la piézo-électricité, qui reste du domaine du laboratoire ;
 - . la variation de résistivité, en utilisant soit une jauge de contrainte, soit une sonde piézorésistive. La première, relativement fragile, se compose de plusieurs jauges collées qui présentent une résistance électrique variable en fonction de l'élongation qu'elles subissent. La seconde, actuellement la plus utilisée, car la plus fiable, se présente comme un bloc composite réalisé par diffusion en couches minces de ponts de résistance dont la résistance, précisément, varie en fonction de la pression exercée sur le capteur.

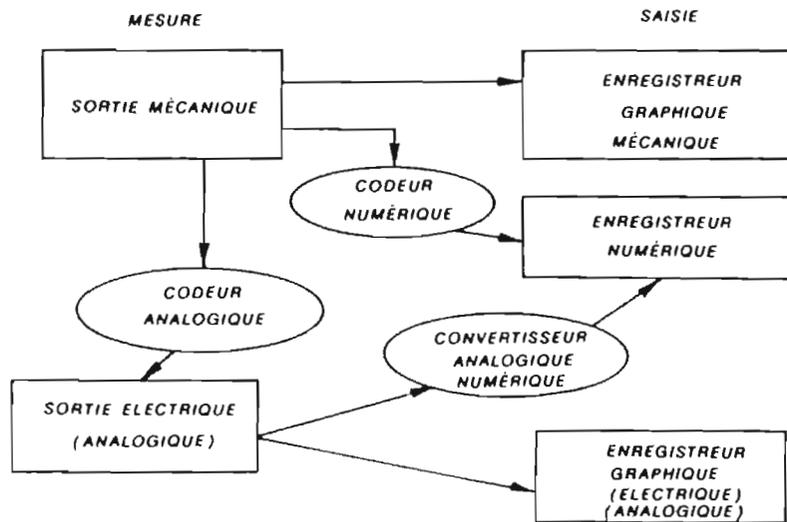
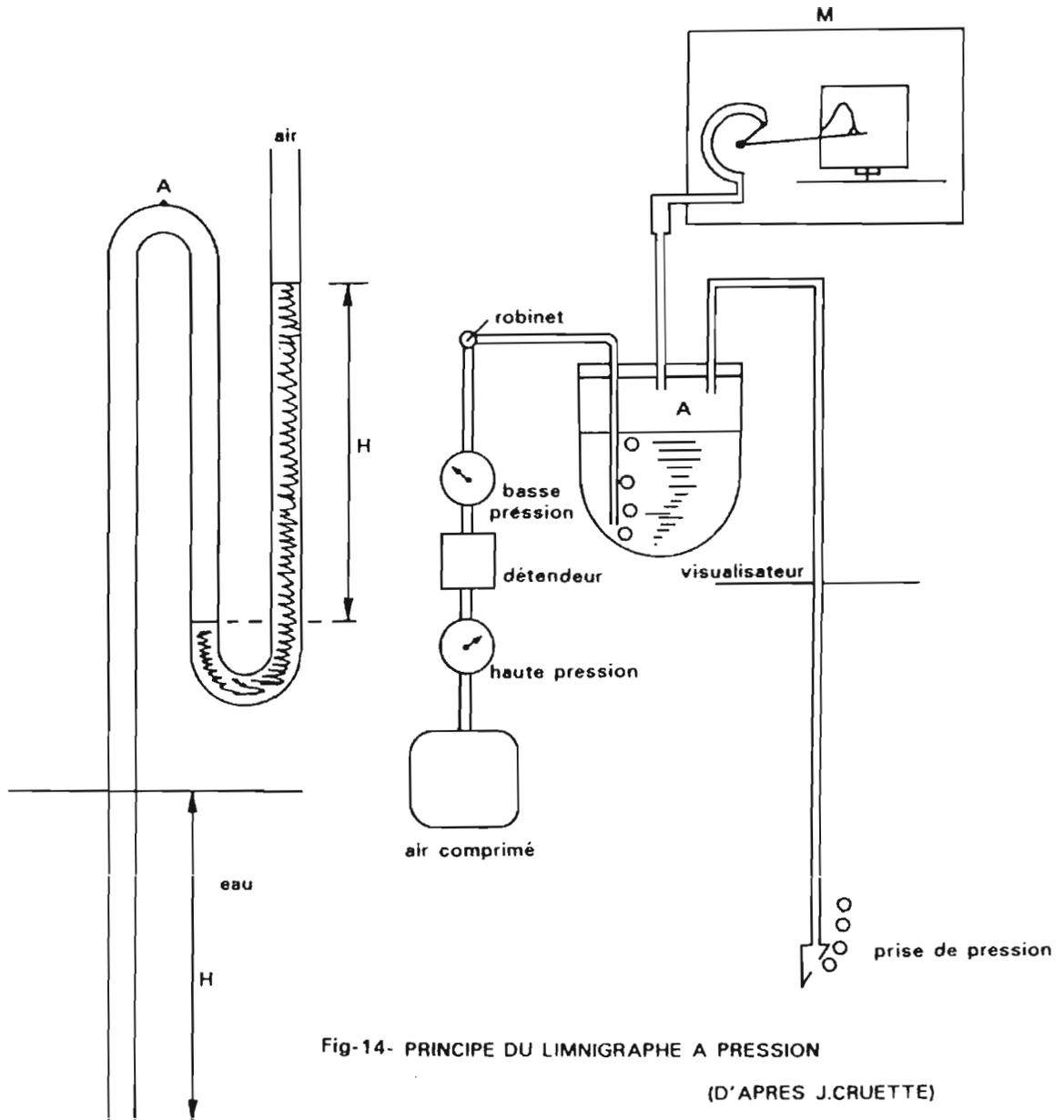
Ces dispositifs ne mesurent donc pas directement le niveau d'eau, mais une pression qui est aussi fonction de la pression atmosphérique et de la densité de l'eau qui peut être sensiblement différente de l'unité si le pourcentage de matières solides transportées est important. Ils sont, de plus, sensibles aux variations de température. Des compensations ou des corrections doivent donc être faites, soit au niveau du capteur lui-même, soit au niveau de la centrale d'acquisition. Ces corrections ne sont pas toujours faciles à réaliser, car l'aptitude d'un transducteur à prendre la température de la membrane de la cellule de mesure au contact avec le milieu extérieur est mal connue. La mise à l'air libre du système étant souvent assurée par un capillaire au débouché duquel une goutte d'eau peut se former, un diamètre suffisant devra être assuré (6 à 7/10 mm).

Lors du choix d'un type de capteur, il sera important de s'enquérir de ses caractéristiques : sa fidélité (la présence de membranes entraîne inévitablement une hystérésis qui se traduit par une réponse non linéaire, puis à la longue par un fluage, c'est-à-dire une dérive dans le temps du 0), sa précision sur la gamme de mesures, sa résistance à l'agressivité de l'eau (l'eau salée, par exemple), son comportement lors d'écoulements intermittents (résistance aux températures élevées, stabilité du 0). Il est certain que des solutions pratiques permettant d'améliorer le fonctionnement des appareils peuvent être mises en oeuvre sur le terrain. Ainsi, dans les cours d'eau non pérennes, le capteur pourra être maintenu dans un réservoir plein d'eau.

- Les **capteurs à ultrasons**, conçus en utilisant la propriété qu'ont les ondes acoustiques, comme les ondes lumineuses, de se réfléchir sur l'interface air/eau. Cette capacité permet de réaliser des systèmes où les points d'émission et de détection sont confondus. On mesure ainsi le temps t correspondant à l'aller et retour d'un train d'ondes. Si V est la vitesse de déplacement du son, la hauteur de parcours h est égale à $V \cdot t / 2$.

Le capteur peut être placé de différentes manières :

- . Au-dessus du plan d'eau, ce qui limite au maximum les installations et tous les inconvénients inhérents à l'immersion des systèmes. Sur un parcours de quelques mètres, la résolution peut être inférieure au centimètre si les variations temporelles et spatiales de température et d'humidité, ainsi que les turbulences de l'air et le batillage de l'eau sont faibles. Autant de conditions qui sont rarement réunies dans la nature.
- . Immergé, les conditions d'installation étant alors comparables à celles des autres capteurs. Avec des fréquences de plusieurs centaines de KHz, la résolution peut être inférieure au millimètre pour une portée de quelques mètres. Les variations de température, dans le temps comme dans l'espace, sont moindres que dans l'air et peuvent, plus facilement, être corrigées. Par contre, la présence de bulles d'air est rédhibitoire. Les dépôts qui peuvent apparaître sur la sonde ne deviennent gênants qu'au-delà d'un centimètre d'épaisseur.
- les **systèmes spéciaux**, signalés pour mémoire : les capteurs à corde vibrante, les échelles électriques, les systèmes à palpeur ou les capteurs utilisant le temps de parcours d'ondes lumineuses.



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT



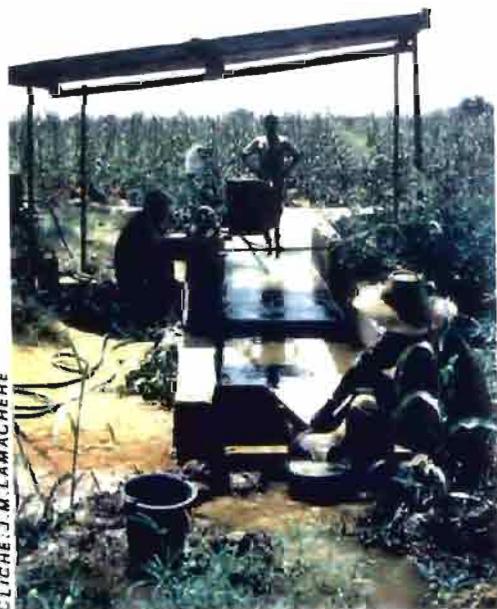
Limnigraphe et échelle scellés sur un pont
- Djiguinoum - (Sénégal)

CLICHÉ: J. F. NOUVELOT



Limnigraphe électronique
- Djiguinoum - (Sénégal)

CLICHÉ: J. M. LAMACHÈRE



Tarage d'un déversoir
- Bidi - (Burkina-Faso)

CLICHÉ: J. F. NOUVELOT



Limnigraphe à flotteur, installation sommaire
- Djiguinoum - (Sénégal)

CLICHÉ: J. CAL LÉDE



Codeur mécanique sur limnigraphe

CLICHÉ: J. F. NOUVELOT



Limnigraphe installé dans un lit mineur très ouvert
- Bidi - (Burkina-Faso)

CLICHÉ: J. F. NOUVELOT



Tour de limnigraphe en tubes métalliques

2.2.2.2.4. MODERNISATION DES ANCIENS LIMNIGRAPHERS

Le dépouillement de l'information limnigraphique, à l'égal du traitement de la pluviographie, est une opération longue et fastidieuse, sujette à erreurs, que l'on doit s'efforcer d'automatiser. La solution fréquemment adoptée consiste à adapter sur le limnigraphe un codeur qui permet le stockage des observations sur des mémoires de masse.

Les codeurs (ou convertisseurs) analogiques-numériques disponibles relèvent de différentes technologies :

- *Codeurs potentiométriques*

Ce sont des potentiomètres montés sur l'arbre de transmission des hauteurs d'eau du limnigraphe. En tournant, l'arbre fait varier leur résistance qui intégrée à un circuit électronique de type analogique permet un traitement automatique de la donnée : affichage, stockage et éventuellement transmission.

- *Codeurs mécaniques à contact*

Ils se composent d'une série de contacts à balais commandés par des cames montées sur un axe. Chaque contact correspond à un bit. Autonomes et robustes, ils présentent tout de même un couple résistant non négligeable (photo 8).

- *Codeurs magnétiques*

Les cames et les balais sont ici remplacés par des aimants.

- *Codeurs opto-électriques*

Ils sont formés de détecteurs optiques montés devant un disque à fentes.

- *Codeurs électriques*

Ils transmettent une impulsion par unité de mesure et doivent être équipés d'un détecteur de sens de variation (montée ou descente). Ils présentent l'inconvénient de demander une alimentation permanente en énergie électrique et sont donc mal adaptés aux observations de terrain.

La figure 15 schématise les différents systèmes d'acquisition à choisir, en fonction de la mesure à effectuer.

2.2.2.3. MESURE DU DEBIT

2.2.2.3.1. TRANSFORMATION HAUTEUR-DEBIT

Les mesures en continu des hauteurs d'eau, décrites antérieurement (paragraphe 2.2.2.2.), sont utilisées essentiellement pour le calcul des volumes écoulés qui ne peut se faire sans la connaissance de la relation physique, ou plus précisément d'une représentation approchée de cette relation, liant la hauteur au débit. Cette opération, appelée "tarage", est basée sur un certain nombre de mesures de débit qui ont fait l'objet, tant pour les jaugeages au moulinet que pour les méthodes de mesures chimiques ou au flotteur, de publications spécialisées importantes (403, 404, 405, 434, 451, 461, 467, 468, 469, 1035).

Le moulinet hydrométrique à hélice ou à coupelles, universellement utilisé, présente certaines limitations qui rendent délicate, voire impossible, son utilisation dans les cas de fortes vitesses (6 à 7 m/s) ou au contraire d'écoulements très lents (quelques cm/s), de fortes turbulences, de présence de débris (végétaux, plastiques, etc.) ou de sédiments grossiers. Il faut souligner la relative fragilité des systèmes de rotation et la nécessité d'utiliser des étalonnages individuels ou statistiques dépendant du type de suspension de l'appareillage. D'autres technologies, basées sur l'effet Faraday d'induction magnétique, méritent d'être citées pour les avantages qu'elles procurent : possibilité de mesurer de très faibles vitesses (existence d'un véritable 0 due à l'absence d'une

constante de démarrage), faible vulnérabilité à l'encrassement et aux chocs (le système ne comportant aucune pièce mobile), étalonnage définitif, peu d'entretien et prise en compte du sens du flux. Le moulinet reste cependant l'instrument de mesure du débit privilégié des hydrologues.

Quel que soit le dispositif utilisé, les moyens électroniques actuellement disponibles (calculatrices de poche, micro-ordinateurs portables) permettent le dépouillement des mesures de débit en temps réel, ou peu différé, accompagné éventuellement de tracés graphiques sur écran ou imprimante (sections transversales, répartition spatiale de la vitesse du courant, etc.). De tels systèmes assurent un gain de temps appréciable, et surtout permettent une optimisation de la mesure par un choix judicieux des points et un contrôle quasi immédiat des résultats.

Les méthodes de traduction des hauteurs en débits, basées sur le tracé de la courbe d'étalonnage établie à partir des jaugeages, ont également fait l'objet d'ouvrages spécialisés (413, 437, Norme ISO 1100/2-1982 [F]). Néanmoins, lorsque les variations de hauteurs d'eau sont rapides, ce qui est fréquemment le cas sur les BVRE, certaines techniques particulières permettent d'atteindre de meilleurs résultats :

- *Jaugeages au moulinet par la méthode des verticales indépendantes*

Cette méthode, qui consiste à établir la courbe d'étalonnage d'un certain nombre de verticales réparties sur l'ensemble de la section de mesure, s'applique aux stations hydrométriques dont les variations de cote se situent entre 1 et 5 cm / 10 mn. Ces courbes d'étalonnage permettent, pour des hauteurs limnimétriques pré-sélectionnées, de déduire dans un premier temps les débits unitaires des verticales retenues (débits par unité de largeur, correspondant dans la pratique à la superficie de la parabole des vitesses, donc exprimés en m^2/s), et par suite le débit total, comme il est fait dans le dépouillement d'un jaugeage classique. L'application de la méthode impose certaines contraintes :

- . s'assurer de la stabilité de la section,
- . effectuer les mesures toujours sur les mêmes verticales qui devront être matérialisées d'une manière très visible : marquage à la peinture sur la passerelle ou le câble, abscisse de référence pour les transporteurs aériens,
- . lire pour chaque verticale la cote du plan d'eau, au début et à la fin des mesures effectuées ; ce qui impose d'installer la section de jaugeage à proximité de la station limnimétrique.

Le choix des verticales est fonction du niveau des plus hautes eaux susceptible d'être observé. Si la largeur de la section mouillée change sensiblement avec le niveau d'eau, une distribution variable des verticales, fonction de la cote de l'échelle, peut être adoptée en veillant, toutefois, à ce que certaines d'entre elles soient communes aux différentes répartitions.

Le nombre de verticales se situe, suivant la largeur de la section, entre 6 et 10, et devrait rarement être inférieur à 5. La répartition peut se faire en appliquant, à partir des berges, la règle des milieux (1/2, 1/4, 3/4, 1/8, 7/8, etc.). On peut aussi, sur une section de largeur L, espacer les verticales de 0,1 L ou 0,2 L en prenant une verticale supplémentaire près des berges, et une ou deux verticales additionnelles quand le fond du lit présente des variations rapides de pente (fig. 16).

Le dépouillement, jusqu'au calcul du débit unitaire de chaque verticale, est identique à celui d'un jaugeage "classique" ou complet. Les paraboles des vitesses d'une même verticale correspondant à différentes hauteurs d'eau peuvent être regroupées, sur un même graphique, en prenant le fond du lit pour origine des profondeurs. Certaines mesures partielles peuvent ainsi être complétées par interpolation, voire même avec une certaine prudence par extrapolation (fig. 17).

Dans une seconde phase, est tracée la courbe d'étalonnage afférente à chaque verticale : $q_s = f(H)$ (fig. 18a). Un minimum de cinq points ne présentant pas une trop forte dispersion est nécessaire. De plus, les extrapolations, vers les forts comme vers les faibles débits, doivent rester raisonnables. Pour une hauteur à l'échelle H (on choisit de préférence des valeurs rondes : 0,5 - 1,0 - 1,5 m, etc.), les valeurs des débits unitaires relatives à chaque verticale sont lues sur la courbe de tarage correspondante. Ces valeurs sont ensuite portées verticalement, à partir de l'abscisse de cette même verticale (fig. 18b). L'intégration par planimétrie de la courbe $q_s = F(L)$ permet, comme pour un jaugeage "classique", de calculer le débit correspondant à la hauteur d'eau H.

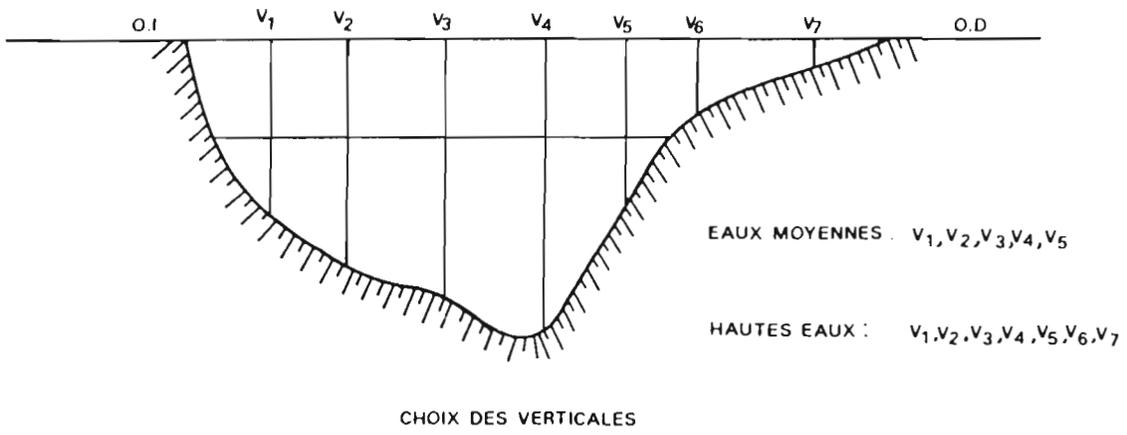


Fig-16 - JAUGEAGES PAR VERTICALES INDEPENDANTES

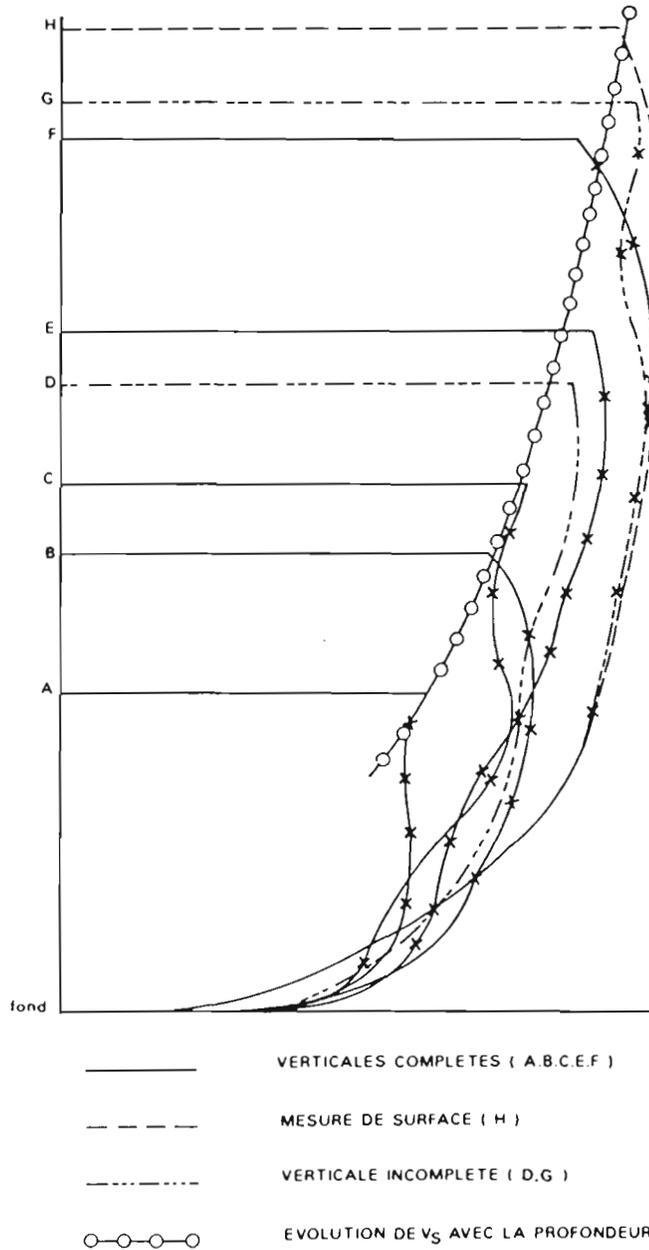


Fig-17 - PARABOLES DES VITESSES SUCCESSIVES SUR UNE VERTICALE INDEPENDANTE (D'APRES G-JACCON)

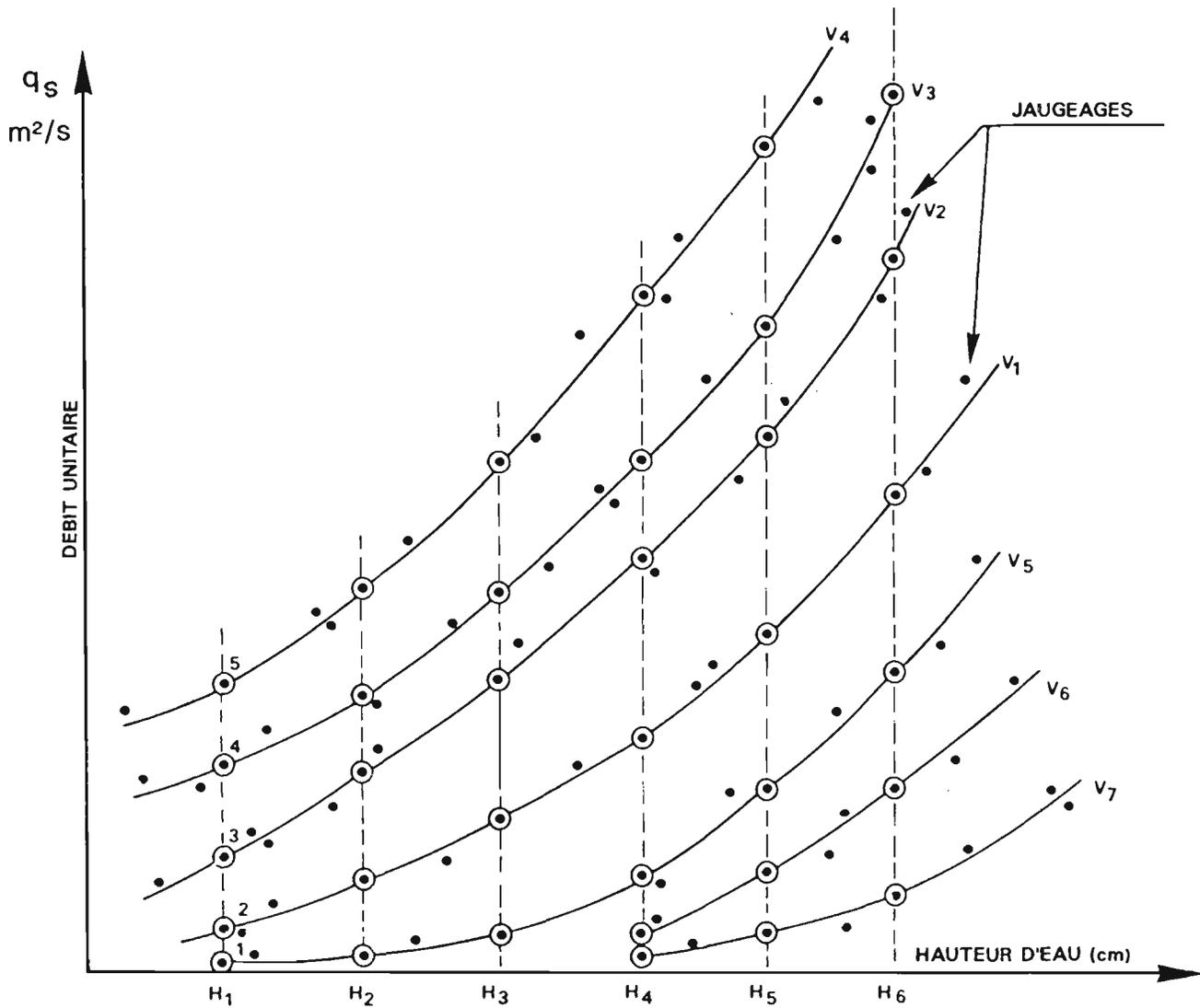


Fig-18 a - COURBES : COTES - DEBITS UNITAIRES

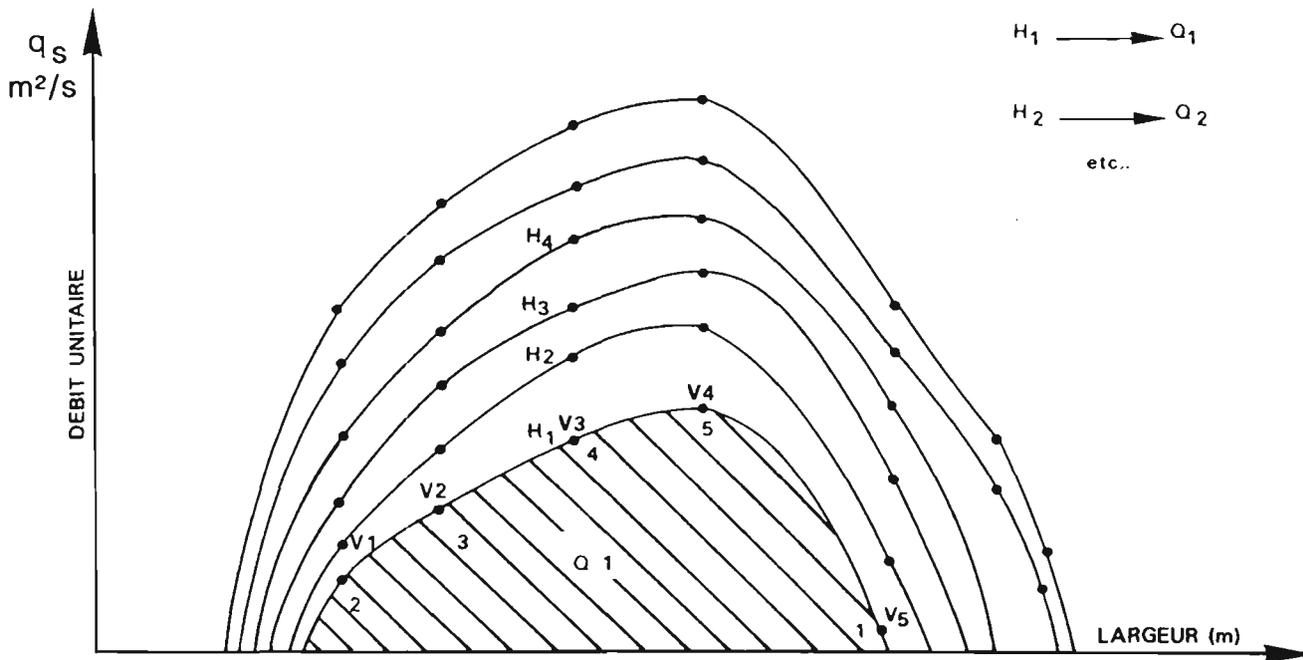


Fig-18 b - CALCUL DES DEBITS

Cette méthode est donc une opération continue (l'appellation "jaugeage continu" est d'ailleurs abusivement utilisée) : chaque mesure supplémentaire permet d'affiner le tracé des différentes courbes, ce qui impose des contrôles fréquents de la stabilité de la section de mesure.

- *Jaugeages au moulinet par la méthode des points indépendants*

Sur certains petits bassins à fortes pentes, la cote du plan d'eau peut varier de plusieurs centimètres par minute. La mesure par verticales indépendantes n'est plus alors suffisamment précise, et il est nécessaire de procéder par points indépendants, c'est-à-dire par points pré-sélectionnés.

Cette méthode exige une section de mesure parfaitement stable, si possible calibrée et équipée d'un dispositif qui permette de repérer, sur les différentes verticales choisies, un certain nombre de points définis une fois pour toutes en fonction de la cote à l'échelle. L'utilisation d'un système à perche fixe est recommandé avec, si possible, la facilité d'utiliser simultanément plusieurs moulinets (dans ce cas, la méthode par verticale indépendante peut être suffisante).

Chaque mesure doit être faite le plus rapidement possible (des temps de 20 secondes seulement peuvent être utilisés) en prenant comme référence le fond du lit et en notant, en début et fin, la cote du plan d'eau.

Pour chaque point, est tracée la courbe de variation de la vitesse en fonction de la hauteur d'eau. En portant sur le même graphique toutes les mesures effectuées aux différents points sélectionnés d'une même verticale (ce graphique est similaire au graphique 18a dans lequel q_s serait remplacé par la vitesse V et les verticales $V_1...V_7$ par les points $P_1...P_n$), on obtient un faisceau de courbes qui permet d'évaluer, pour une série de cotes choisies, la variation de la vitesse en fonction de la profondeur, c'est-à-dire de tracer la "parabole" des vitesses à partir de laquelle sera calculé le débit unitaire correspondant. Le calcul du débit total se fait ensuite de la même manière que dans la méthode par verticales indépendantes.

2.2.2.3.2. DISPOSITIFS PRE-ETALONNES

2.2.2.3.2.1. Quelques définitions

Quel que soit le dispositif hydraulique de mesure utilisé, on peut définir (fig. 19, 20 et 21) :

h : la charge ou différence de niveau entre la surface libre du plan d'eau amont et la crête du seuil déversant, mesurée à une distance suffisante du dispositif pour que l'inflexion du niveau d'eau ne soit pas sensible

h' : la lame d'eau mesurée au droit du seuil

P : la hauteur de pelle, distance séparant la crête du dispositif et le fond du canal amont

h_1 : la hauteur d'eau à l'amont du dispositif, $h_1 = P + h$

h_2 : la hauteur d'eau à l'aval du dispositif

c : la hauteur séparant la crête du seuil et le niveau de l'eau à l'aval du dispositif

b : la largeur du dispositif

B : la largeur du canal d'aménée

Si $b = B$, le dispositif est sans contraction latérale.

Deux types de systèmes peuvent être différenciés : les déversoirs et les canaux jaugeurs.

- Les **déversoirs** peuvent être, soit en mince paroi quand la largeur de la crête du seuil l (fig. 22) est négligeable vis-à-vis de la hauteur de la nappe déversante h , c'est-à-dire en général quand $h/l > 1,5 - 2$, soit à seuil épais dans les cas contraires. Ils peuvent être de formes variées, mais les plus utilisés sont de forme triangulaire (fig. 20) ou rectangulaire (fig. 21), plus rarement trapézoïdale (fig. 38).

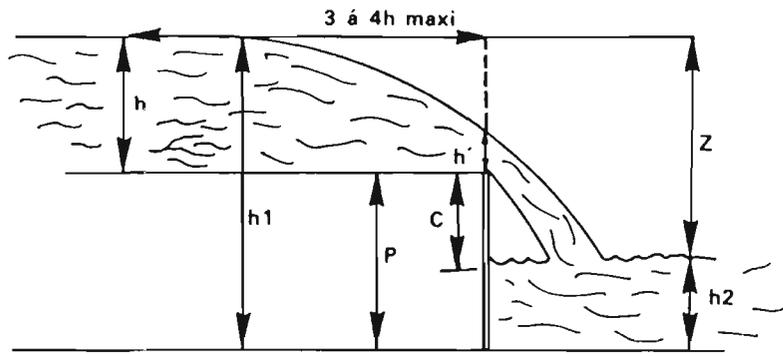


Fig-19- DISPOSITIF DE MESURE DU DEBIT

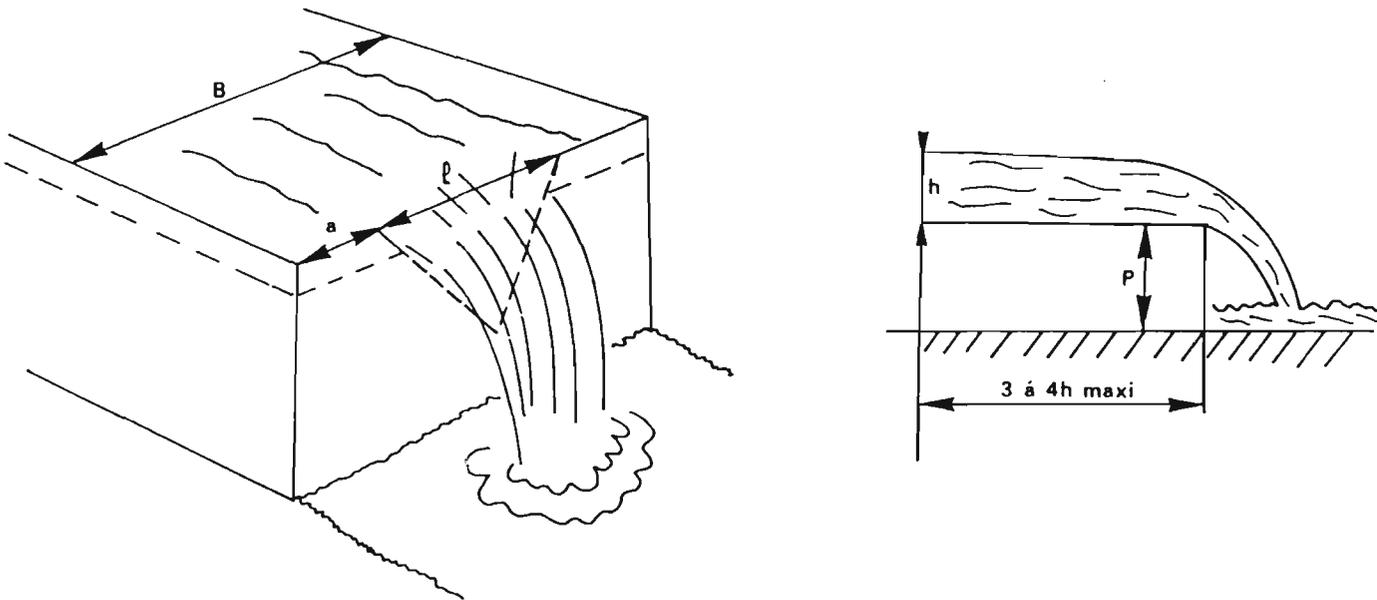


Fig-20- DEVERSOIR TRIANGULAIRE EN MINCE PAROI

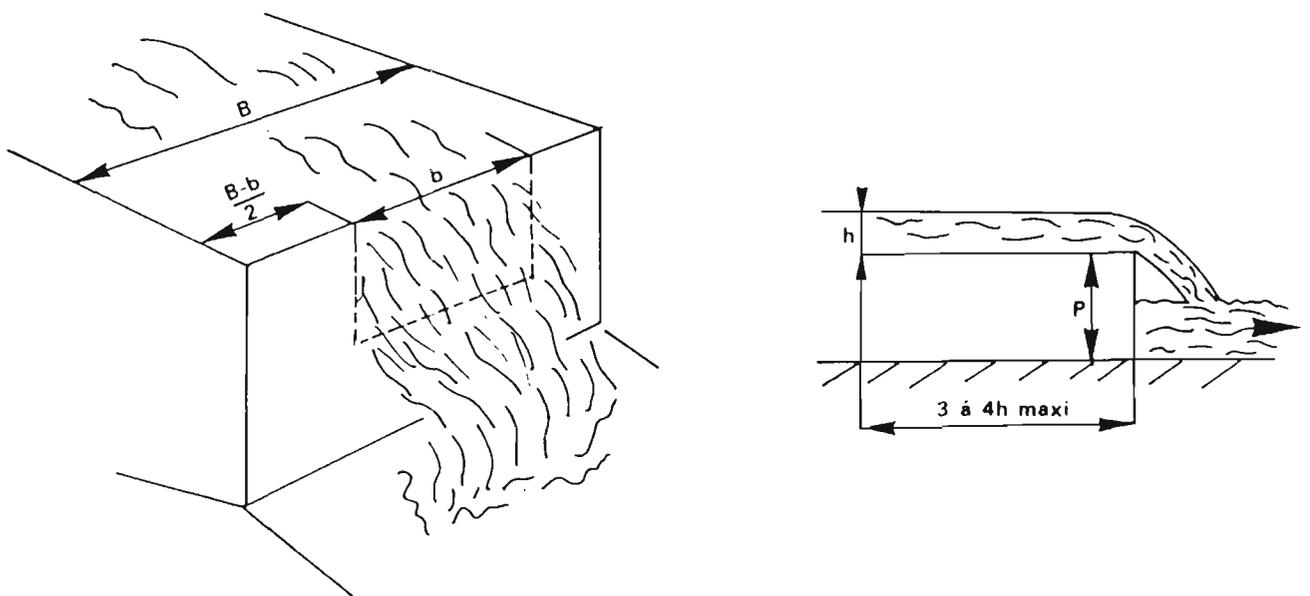


Fig-21- DEVERSOIR RECTANGULAIRE A CONTRACTION LATERALE EN MINCE PAROI

Les seuils épais les plus faciles à réaliser ont un profil rectangulaire qui peut être, soit à arêtes vives (fig. 22), soit avec des extrémités arrondies. Les seuils à profil triangulaire sont également d'usage assez courant (fig. 23).

Les formules d'étalonnages de ces différents déversoirs ne sont valables que si les normes de fonctionnement sont respectées, principalement si la lame déversante est dénoyée et aérée. Un déversoir est dit dénoyé quand le niveau amont n'est pas influencé par le niveau aval.

- Tous les systèmes de *canaux jaugeurs* sont basés sur le principe qu'une réduction de la section du canal d'écoulement, appelée col ou étranglement, provoque une accélération de la vitesse, donc un abaissement du niveau de la surface libre, duquel on peut déduire le débit en raison des relations fondamentales liant les charges aux vitesses.

Le rétrécissement de la section peut être obtenu, soit en faisant converger progressivement les parois latérales, le fond étant maintenu plat ; soit en imprimant au fond la forme d'un seuil qui s'élève en pente douce, les parois étant maintenues parallèles ; soit encore en faisant simultanément converger les parois latérales et remonter le fond sous forme de seuil.

Les dispositifs les plus connus sont les canaux jaugeurs HS, H et HL, les canaux Venturi qui nécessitent la lecture de deux cotes (amont et aval), et les canaux Parshall qui ne sont que des Venturi améliorés fonctionnant avec la lecture de la seule cote amont.

2.2.2.3.2.2. Choix du dispositif

Ce choix doit tenir compte :

- de la gamme de débits à mesurer,
- du débit maximum à faire transiter,
- de la présence ou non de matériaux en suspension et/ou charriés,
- de la présence de débris flottants,
- de la possibilité de respecter les conditions théoriques d'implantation et de fonctionnement,
- de la remontée admissible du plan d'eau amont,
- des conditions d'écoulement.

1. Gamme de débits

La formule générale de calcul du débit peut s'exprimer par la formule :

$$Q = C \cdot b \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^n$$

C est un coefficient de débit (fonction de la hauteur d'eau h), sans dimension

b une dimension linéaire, en m (une surface, en m², dans le cas des orifices)

g l'accélération de la pesanteur, voisine de 9,81 m/s²

n un coefficient égal à 1/2 pour les orifices, 3/2 pour les seuils et déversoirs à crête horizontale, 5/2 pour les déversoirs triangulaires

h la charge, en m.

Q est alors exprimé en m³/s.

La précision sur le débit est la somme des erreurs relatives faites sur les différents termes, soit :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta b}{b} + n \cdot \frac{\Delta h}{h}$$

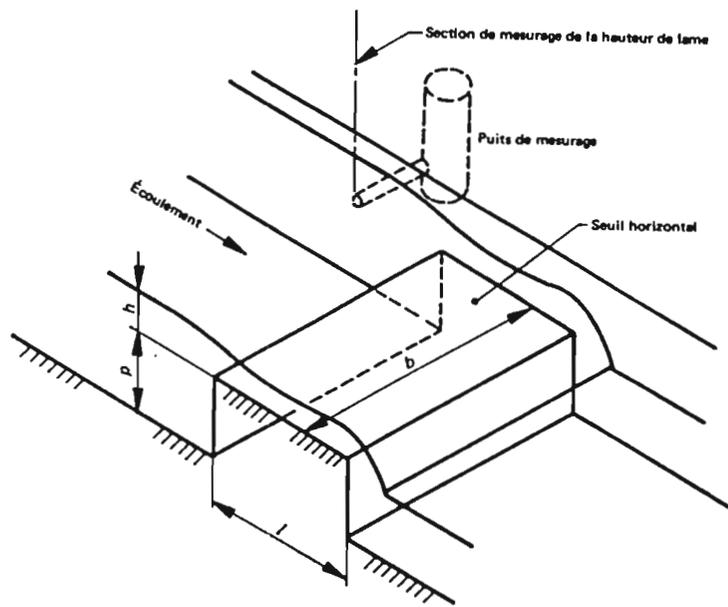


Fig-22- SEUIL ÉPAIS A PROFIL RECTANGULAIRE (NORME ISO 3846 - 1977 [F])

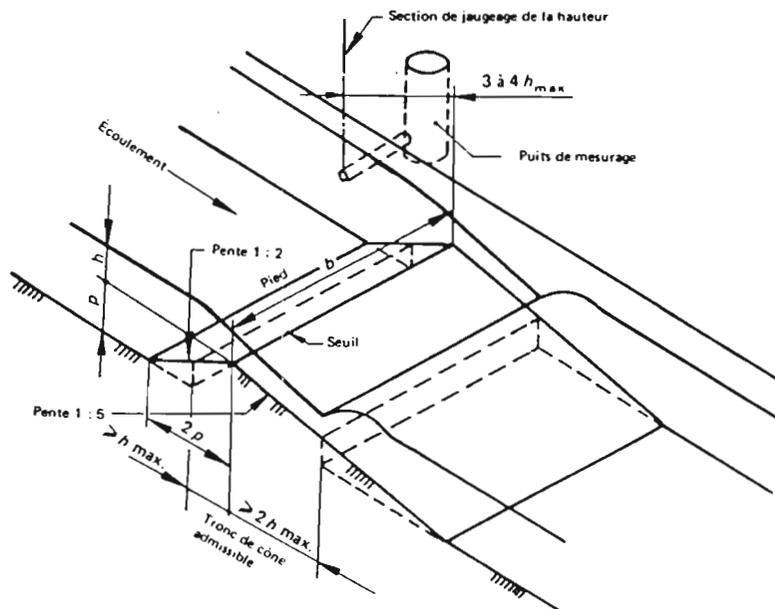


Fig-23- SEUIL ÉPAIS À PROFIL TRIANGULAIRE (NORME ISO 4360 - 1979 [F])

Si, pour comparaison, on ne tient compte que de l'erreur possible due à l'imprécision sur la mesure de h, on constate que l'erreur est :

- minimum pour les orifices : $\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\Delta h}{h}$
- moyenne pour les déversoirs à contractions latérales et les seuils épais : $\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{3}{2}\right) \cdot \frac{\Delta h}{h}$
- maximum pour les déversoirs triangulaires : $\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{5}{2}\right) \cdot \frac{\Delta h}{h}$

Pour une charge donnée, le déversoir triangulaire est l'appareil le moins précis. Par contre, il présente l'avantage d'avoir une plage de mesure étendue.

Pour tous les dispositifs, la précision est d'autant meilleure que la lame d'eau est plus importante. Si par exemple une erreur de 0,5 cm est faite sur une lame déversante de 3 cm d'un déversoir triangulaire, l'erreur sur le débit sera :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left(\frac{5}{2}\right) \cdot \left(\frac{0,5}{3}\right) = 42 \%$$

Les courbes de la figure 24 dues à J. Barthélémy sont données à titre de comparaison entre différents dispositifs. Elles ne peuvent en aucune façon servir de courbes de tarage.

2. Débit maximum à faire transiter

Un projet d'installation ne peut être établi sans une évaluation du débit maximum à faire transiter. Pour cela, sera rassemblé le maximum d'informations en effectuant tout d'abord une enquête de terrain : recherche de laisses de crues, demandes de renseignements auprès des autochtones (hauteurs d'eau atteintes en amont et en aval d'un radier ou d'un pont, par exemple). Un levé topographique de la section choisie (y compris les zones d'expansion) sera ensuite effectué jusqu'à la cote maximale retenue. Si des délaissés de crues sont suffisamment apparents, la pente de la ligne d'eau sera également nivelée. Dans le cas contraire, on se contentera d'un profil en long du fond du lit, de part et d'autre de la section, sur une distance d'environ dix fois sa largeur.

L'estimation du débit maximum sera faite à partir de la formule de Manning-Strickler (Norme ISO 1070-1973 [F], 434) :

$$Q = S \cdot n \cdot i^{1/2} \cdot Rh^{2/3}$$

- avec :
- Q le débit, en m³/s
 - S la section mouillée, en m²
 - n le coefficient de rugosité de Strickler (inverse de celui de Manning)
 - i la pente de la ligne d'eau, en m/m
 - Rh le rayon hydraulique, en m, avec Rh = S / P (P étant le périmètre de la section mouillée S).

On prendra pour n les valeurs suivantes, liées à la nature du lit :

rochers	20
pierres	25
herbes sur des rives en terre	30
graviers grossiers	35
graviers moyens	40
graviers fins	45

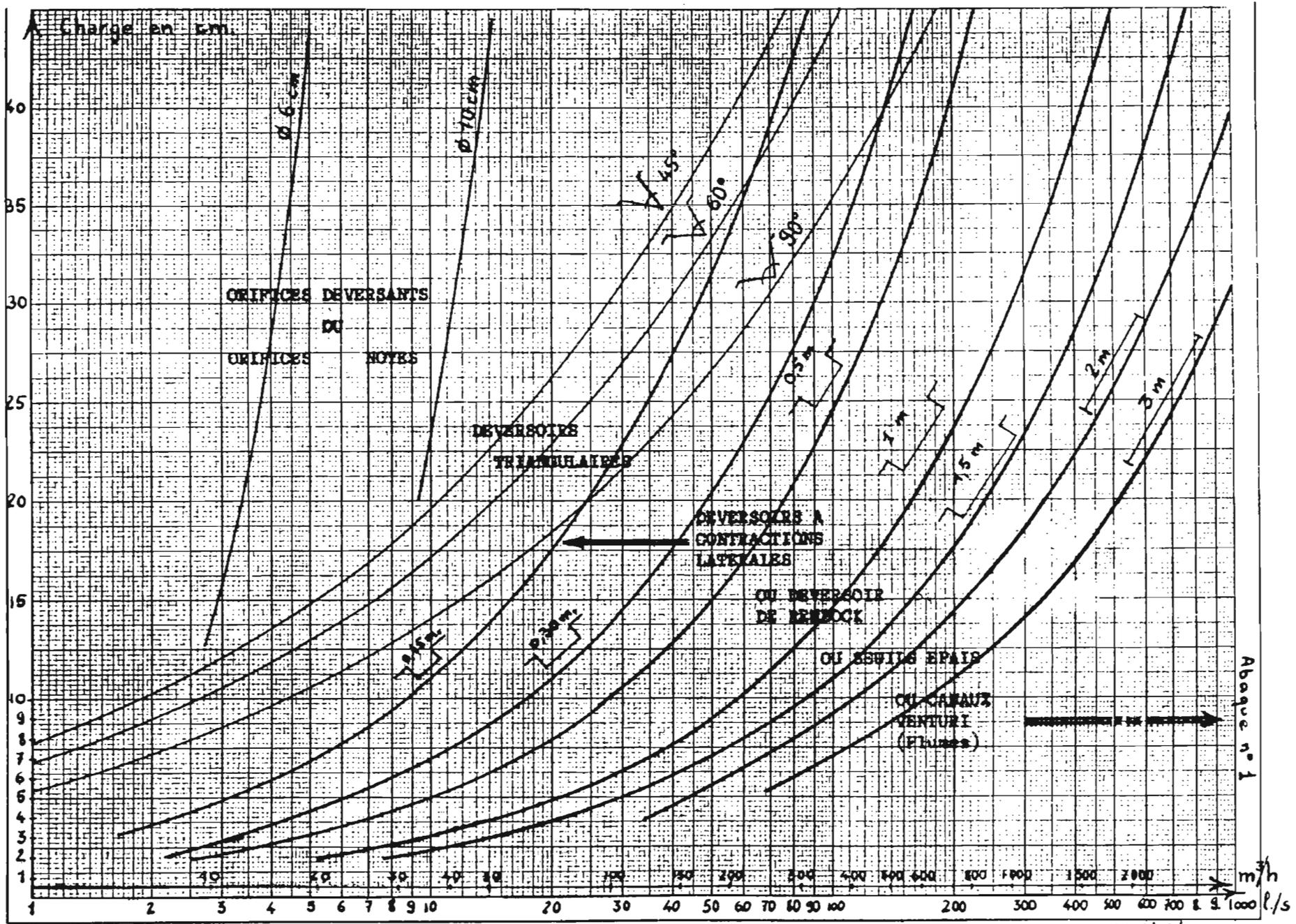


Fig-24- DEBIT DES DEVERSOIRS EN MINCE PAROI EN FONCTION DE LA CHARGE

(D'après J-BARTHELEMY)

Débit

sable	50
maçonnerie, pierres de taille	60
ciment, bois raboté	80
béton lisse	95

3. *Présence de matériaux en suspension et/ou charriés*

Le dispositif de mesures, en élevant le niveau d'eau dans le chenal d'aménée, favorise la sédimentation des matières solides, la vitesse d'écoulement se trouvant alors ralentie.

Plusieurs solutions peuvent être adoptées :

- utilisation d'un canal jaugeur de type Venturi, Flume ou Parshall ;
- installation d'un seuil épais qui fonctionne avec des hauteurs de crête moins élevées, donc des vitesses d'approche plus fortes, que les déversoirs à mince paroi ;
- déversement libre en bout de chenal permettant un autocurage normal.

4. *Présence de corps flottants*

Les corps flottants sont particulièrement dangereux pour tous les dispositifs présentant des échancrures : déversoirs en V, déversoirs à contractions latérales, canaux jaugeurs. Dans ces derniers, le passage du régime fluvial au régime torrentiel, propice à l'évacuation des matières solides transportées en suspension ou charriées, n'est souvent pas suffisant pour éliminer les corps flottants encombrants.

5. *Respect des conditions théoriques d'implantation et de fonctionnement*

Les étalonnages des déversoirs, des seuils et des canaux jaugeurs résultent d'essais très précis faits en laboratoire. Les formules proposées ne peuvent donc être utilisées que si les conditions de fonctionnement respectent celles des essais. Une sage précaution sera d'effectuer, dans tous les cas, quelques jaugeages de contrôle, soit au moulinet, soit à l'aide d'une capacité tarée (photo 9).

L'écoulement dans le chenal d'aménée doit être uniforme et stable. Il faut éviter des vitesses d'approche trop élevées ou la formation de courants préférentiels. Dans ce but, diverses règles pourront être appliquées :

- Le chenal d'aménée doit être rectiligne sur une longueur suffisante. En appelant b la largeur du déversoir ou du col du canal jaugeur et B la largeur du canal d'aménée, cette longueur doit être supérieure ou égale à $10 B$, si $b / B > 0,5$; dans le cas contraire, elle peut être plus courte, surtout si les vitesses d'approche sont négligeables.

Il doit être lisse (sans végétation, cailloux ou galets), horizontal et, en théorie, de section rectangulaire. Cette dernière condition est de moindre importance si l'échancrure du dispositif est petite par rapport à la section du canal qui doit tout de même rester uniforme sur toute sa longueur.

- Un chenal d'aménée à pente assez forte peut créer un ressaut à l'amont du système de mesure. Pour ne pas perturber les observations, celui-ci devra se situer à une distance égale à au moins 30 fois la hauteur de la lame d'eau maximale.
- Le système jaugeur doit être installé perpendiculairement à la direction de l'écoulement, en respectant les dimensions prescrites et en s'assurant d'une parfaite étanchéité.
- L'aval du dispositif de mesurage est sans importance si l'on veille à ce que l'écoulement ne soit pas noyé. Dans les systèmes à lame déversante, il faut tout de même éviter l'affouillement du lit par un dallage ou un enrochement, ou éventuellement en construisant une cuvette dans laquelle une lame d'eau suffisante absorbera l'énergie provoquée par la chute d'eau.
- Un système de tranquillisation peut permettre de ramener un écoulement perturbé à des conditions proches de celles de l'étalonnage théorique s'il se trouve installé à une distance du point de mesure au moins égale à 10 fois la charge maximale à mesurer. Deux sortes de dispositifs peuvent être envisagés (408) :

. *Par création d'une perte de charge (fig. 25).*

Ce sont les dispositifs les plus efficaces. Ils permettent de régulariser un écoulement ayant une vitesse d'approche trop élevée. Il suffit que la perte de charge soit au moins égale au rapport $V^2/2g$ dont la valeur est généralement faible, d'où son peu d'incidence sur la hauteur du plan d'eau amont. Par exemple :

$$\begin{aligned} \text{si } V &= 1 \text{ m/s,} & V^2 / 2g &= 1/19,6 \\ \text{si } V &= 0,5 \text{ m/s,} & V^2 / 2g &\approx 1,3 \text{ cm (fig. 25)} \end{aligned}$$

De nombreux systèmes ont été imaginés : grilles faites de barreaux orthogonaux ou en nids d'abeille, barreaux placés en quinconces, chicanes, etc. De bons résultats peuvent aussi être obtenus en plaçant une rangée de briques creuses ou en installant verticalement des tôles ondulées dans le sens du courant, de façon régulière (bosses en face des bosses), sur une longueur supérieure à quatre fois l'amplitude des ondulations (fig. 26).

. *Par diminution de la turbulence.*

Cette diminution est obtenue en plaçant des plaques verticalement dans le sens du courant, sur une longueur se situant entre 5 et 10 fois l'espacement entre deux plaques. On peut utiliser également des empilements de tôles ondulées ou de tuyaux (fig. 27). Ces dispositifs présentent l'inconvénient de s'encrasser rapidement.

6. Remontée admissible du plan d'eau amont

L'élévation du niveau d'eau à l'amont du dispositif peut avoir des conséquences importantes, surtout dans les lits à faible pente. Elle dépend du type de déversoir ou de seuil utilisé, ainsi que de sa largeur. Une évaluation de cette élévation par rapport au niveau normal de l'écoulement doit être faite pour le débit maximum à faire transiter.

En reprenant les définitions du paragraphe 2.2.2.3.2.1. (fig. 19), le niveau normal d'écoulement est donné par la valeur h_2 (hauteur d'eau à l'aval). L'élévation est alors :

$$Z = P + h - h_2$$

Toutefois, le lit du cours d'eau et le canal d'amenée présentant une certaine pente, la remontée de niveau ne se fait pas horizontalement, mais en adoptant un certain profil appelé courbe de remous. Les méthodes de calcul classiques de cette courbe sont beaucoup trop compliquées pour le résultat approximatif recherché. La méthode approchée, dite des ingénieurs de la ville de Paris, surestime généralement les résultats, ce qui va dans le sens de la sécurité. Elle s'applique pour des pentes faibles et pour une section constante. La surface de l'eau est assimilée à une parabole dont le grand axe est vertical (fig. 28). Si D est la distance séparant le seuil du point de raccordement avec le niveau normal, Z_0 la hauteur de la lame d'eau au droit du seuil, au-dessus de l'écoulement aval et i la pente du canal :

$$D = 2 Z_0 / i$$

7. Conditions d'écoulement

La condition essentielle est le dénoyage de la lame déversante qui correspond à un écoulement totalement indépendant du niveau aval.

Pour les déversoirs en mince paroi, on considère que la lame déversante reste dénoyée si la cote du plan d'eau aval h_2 est telle que la hauteur de retombée c (fig. 19) reste supérieure à 0,5 fois la charge maximum et, en tout état de cause, supérieure à 10 cm. Dans la pratique, on est amené à prendre $c < 10$ cm, en assurant une aération suffisante de la lame.

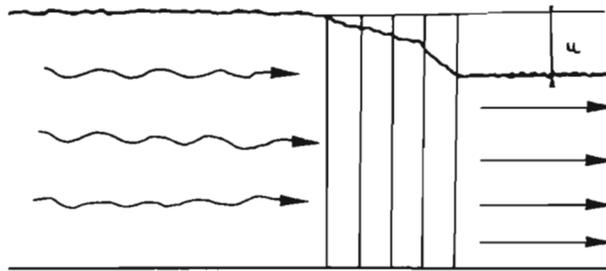
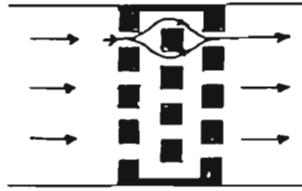
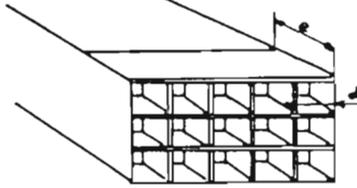


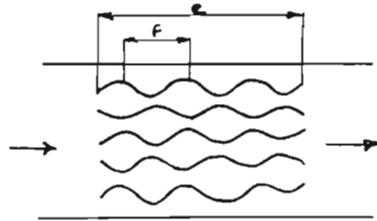
Fig-25 - CREATION D'UNE PERTE DE CHARGE



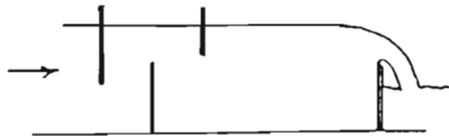
GRILLE DE BARREAUX



GRILLE $5d < e < 10d$

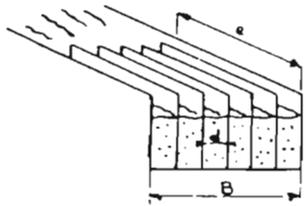


TOLES ONDULÉES : $e > 4f$

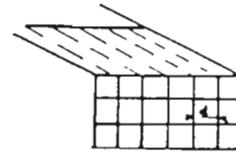


CHICANES

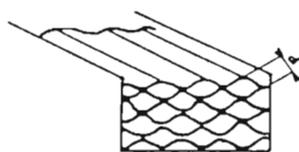
Fig-26 - DISPOSITIFS CREANT UNE PERTE DE CHARGE



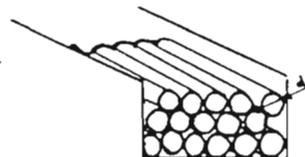
PLAQUES VERTICALES : $5d < e < 10d$



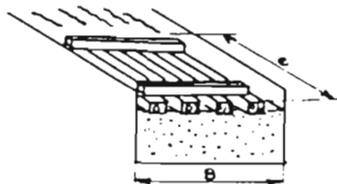
NIDS D'ABEILLE



TÔLES ONDULÉES



TUYAUX



RADEAUX FLOTTANTS

Fig-27 - DISPOSITIFS DE TRANQUILLISATION (D'APRES J-BARTHELEMY)

Pour les seuils épais, on prendra :

$$h_{\text{amont}} \geq 1,25 h_2$$

Une lame déversante est suffisamment aérée, si elle ne présente pas de différence de pression entre son côté inférieur et son côté supérieur. La tendance de la nappe à adhérer au déversoir ou au seuil est provoquée par l'absorption de l'air entraîné dans l'eau sous forme de bulles. Le débit d'air ainsi absorbé est fonction de la largeur de la lame, de la nature du point d'impact, et de la hauteur de chute.

Pour les déversoirs en mince paroi, ce phénomène reste limité si la charge est d'au moins 5 cm pour les systèmes triangulaires, et de 2 cm pour les systèmes rectangulaires.

2.2.2.3.2.3. Réalisation pratique et calcul du débit

1. Déversoirs en mince paroi

Les déversoirs en mince paroi sont les dispositifs les plus simples à réaliser. Ils sont le plus souvent construits en tôle d'acier qu'il est prudent de traiter à l'aide d'une peinture anti-rouille (fig. 29).

Les arêtes amont doivent être usinées ou limées perpendiculairement à la face amont de la paroi, sans rayures ni bavures, alors que les arêtes aval doivent être chanfreinées. La tôle utilisée sera suffisamment épaisse pour assurer une bonne rigidité au dispositif, un système de raidisseur placé à l'aval pourra éventuellement être ajouté.

Leur fixation doit garantir une parfaite horizontalité de la crête et une bonne étanchéité. Elle peut consister en une plaque-support fixée solidement aux bajoyers et au radier du canal, le déversoir étant alors placé côté amont. La fig. 30 montre quelques exemples de fixations proposées par J. Barthélémy.

La mesure de la charge est faite à l'aide d'un limnimètre installé à une distance de la crête, égale à trois ou quatre fois la charge maximale. On utilise, soit une échelle émaillée fixée sur l'une des parois du canal, soit de préférence un régllet métallique en acier inoxydable gradué en millimètres. Un système de fixation réglable à l'aide d'une vis de pression peut être aménagé. Il présente, toutefois, l'inconvénient d'être difficile à lire (formation d'un ménisque). Il est donc préférable d'utiliser un limnimètre à pointe recourbée ou droite (fig. 31). Un limnigraphe, placé à côté du limnimètre, permet l'enregistrement en continu du niveau d'eau. Son installation dépendra du type choisi (paragraphe 2.2.2.2.), mais il sera bon de prévoir, dans tous les cas, l'emplacement d'un puits tranquillisateur dans une des parois du canal.

Le calage du zéro du limnimètre, par rapport à la crête du déversoir, doit être réalisé avec soin : l'emploi d'un niveau à lunette est hautement souhaitable, mais un contrôle rapide peut être fait à l'aide d'un tuyau de plastique souple transparent, rempli d'eau. Pour les déversoirs triangulaires, il est préférable d'utiliser un cylindre de rayon connu r , placé dans la pointe du V d'angle α . La hauteur mesurée est alors (fig. 32) :

$$H = r \cdot [1 + \sin(\alpha/2)] / \sin(\alpha/2)$$

- *Déversoirs rectangulaires avec contractions latérales* (ou déversoirs de Poncelet)

Ces déversoirs sont relativement commodes à réaliser et à utiliser (fig. 21) :

- . l'échancrure peut être choisie suivant la gamme de débits à mesurer,
- . la longueur du canal d'amenée est réduite du fait du ralentissement significatif de l'écoulement,
- . si la contraction est assez importante, la lame est suffisamment aérée et les conditions d'état de surface des parois du canal peuvent ne pas être parfaites.

Différentes formules d'étalonnage ont été proposées :

Formule de Kindsvater - Carter (d'après norme ISO 1438/1-1980 [F]) :

$$Q = (2/3) \cdot C_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot e \cdot h_e^{2/3}$$

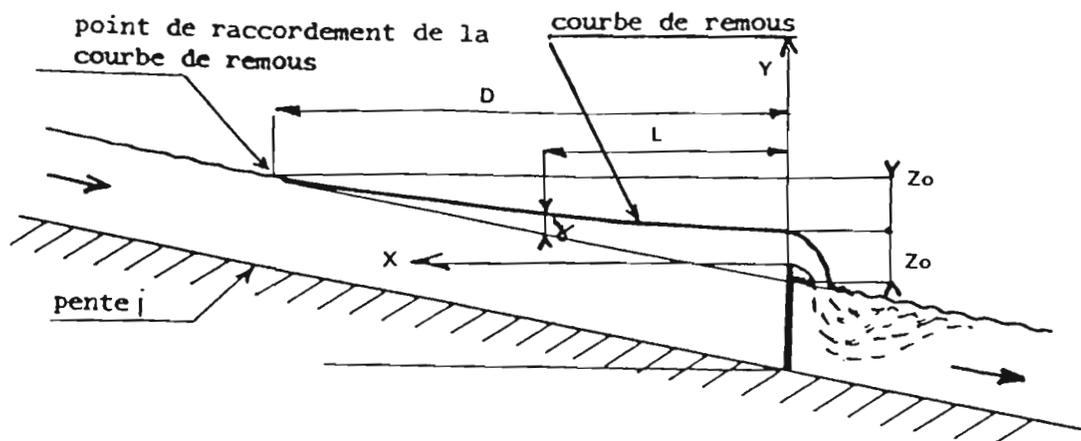


Fig- 28 - COURBE DE REMOUS (D'APRES J.BARTHELEMY)

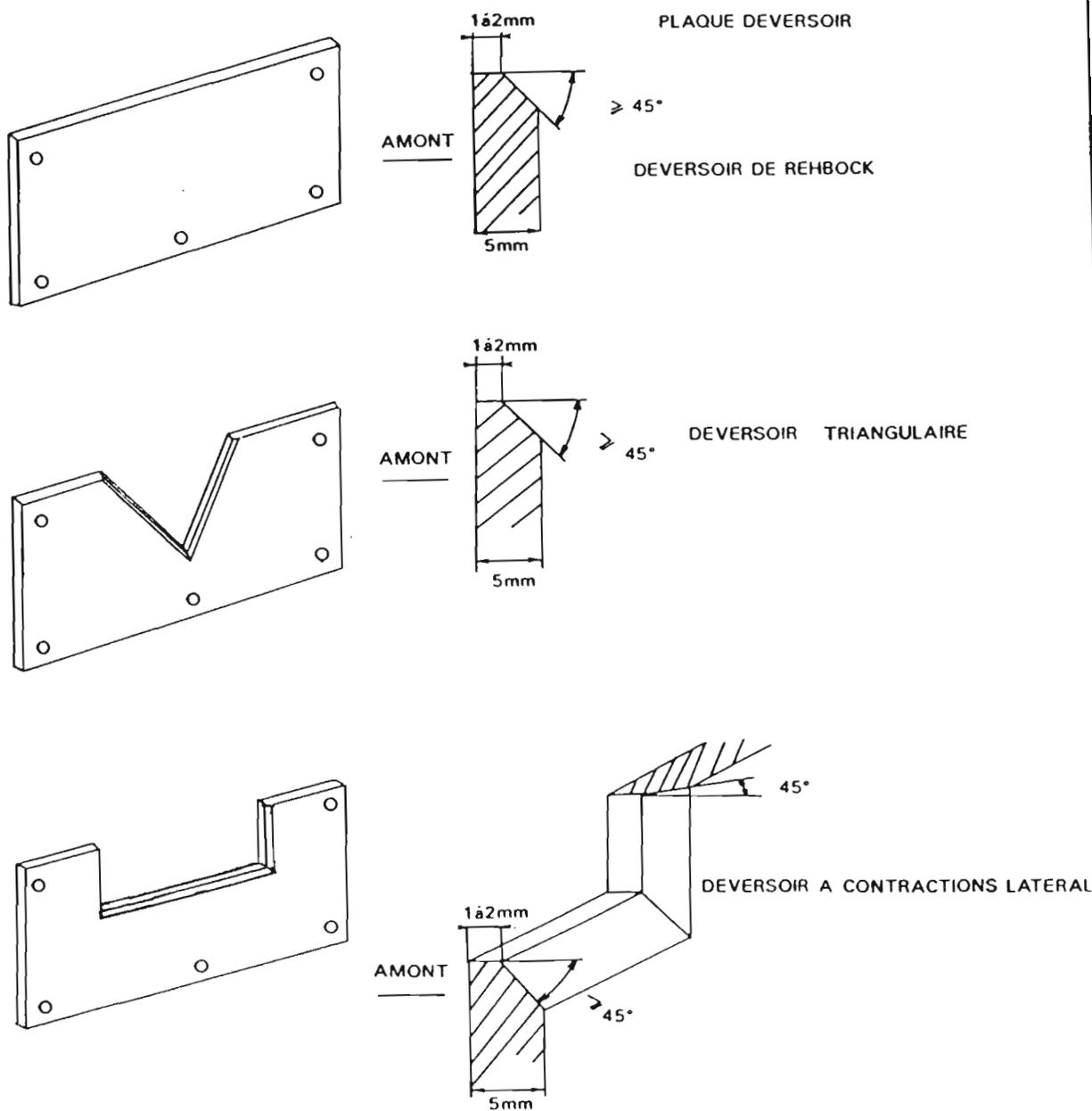
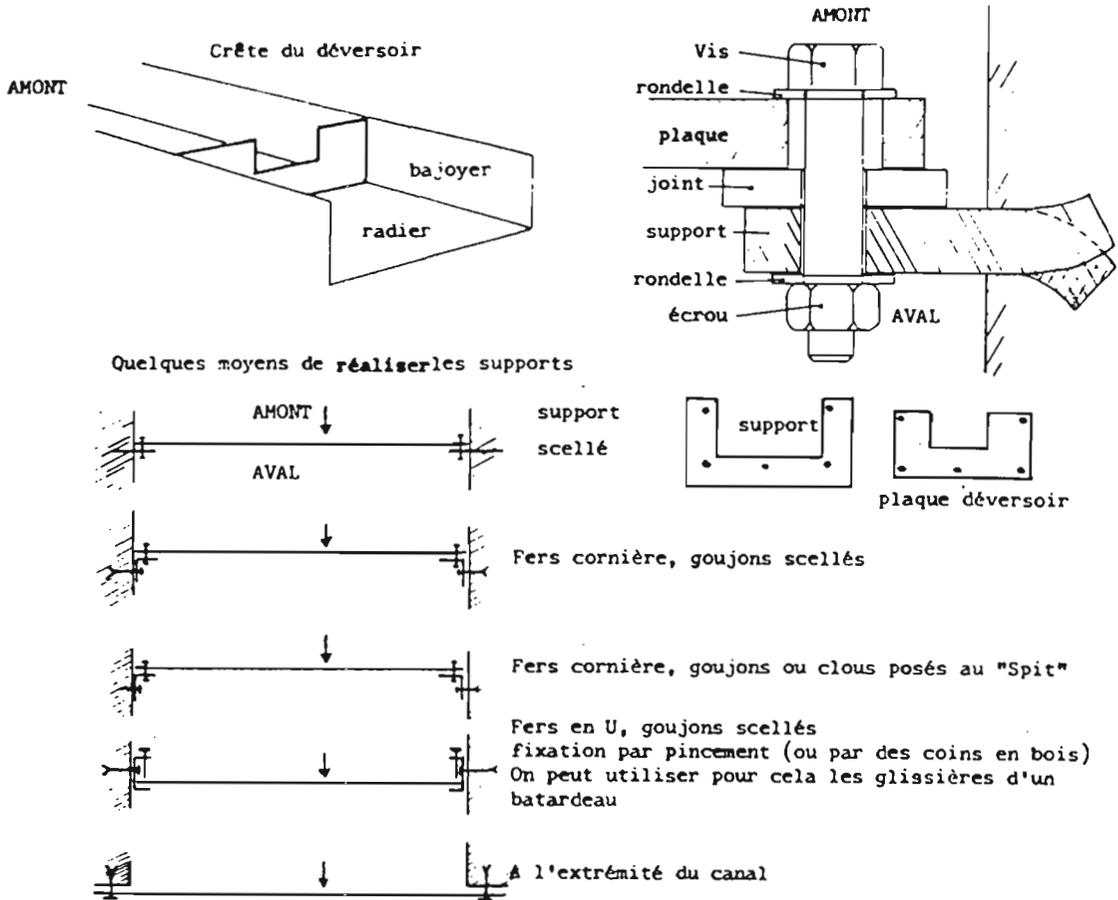
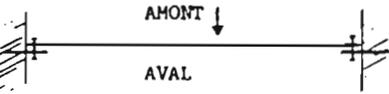


Fig-29- DEVERSOIRS EN MINCE PAROI (D'APRES J.BARTHELEMY)



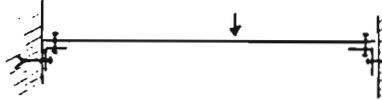
Quelques moyens de réaliser les supports



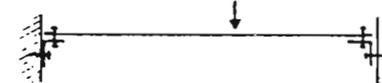
support scellé



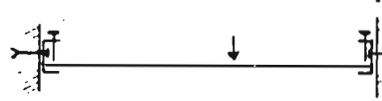
plaque déversoir



Fers cornière, goujons scellés



Fers cornière, goujons ou clous posés au "Spit"

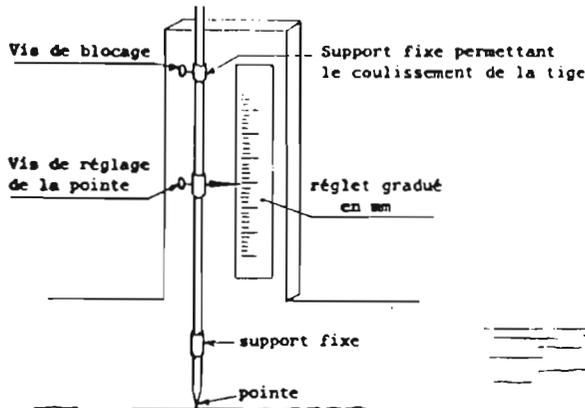


Fers en U, goujons scellés
fixation par pincement (ou par des coins en bois)
On peut utiliser pour cela les glissières d'un batardeau



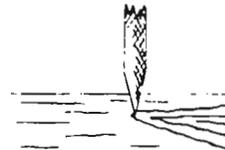
À l'extrémité du canal

Fig-30 - FIXATION DES DEVERSOIRS EN MINCE PAROI (D'APRES J.BARTHELEMY)

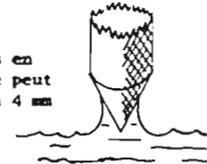


pointe droite :

La mesure doit être faite en descendant, la cote du plan d'eau est celle lue au moment où la pointe touche la surface de l'eau



Ne pas faire les mesures en montant, car le ménisque peut fausser la mesure de 3 à 4 mm



La pointe est écartée des bajoyers d'au moins 3 cm

Pointe recourbée : La mesure est alors faite en montant, jusqu'au moment où un sillage est visible.

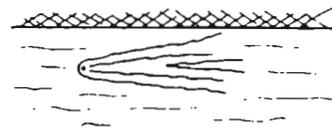
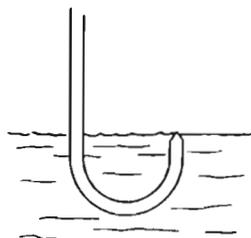


Fig-31 - LIMNIMETRE A POINTE



$$H = r + r\sqrt{2}$$

Fig-32 - VERIFICATION D'UN DEVERSOIR TRIANGULAIRE

avec :

C_e : coefficient de débit, sans dimension

b_e : largeur effective, en mètres

h_e : charge effective, en mètres

Q : débit, en m^3/s ;

$$C_e = f(b/B, h/P)$$

P étant la hauteur de pelle.

$$b_e = b + K_b \quad h_e = h + K_h$$

K_b et K_h qui compensent les influences combinées de la tension superficielle et de la viscosité sont déterminées expérimentalement.

Les courbes des fig. 33 et 34 permettent de déterminer C_e et K_b . On peut, sans grosses erreurs, prendre $K_h = 1$ mm.

Formule de la Société Suisse des Ingénieurs et Architectes (S.I.A.) (408) :

$$Q = (2/3) \cdot C \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot h^{2/3}$$

Q en m^3/s ; largeur et hauteur, en mètres.

avec :

$$C = [0,578 + 0,037 \cdot (b/B)^2 + (0,003615 - 0,0030 \cdot (b/B)^2) / (h + 0,0016)] \cdot [1 + 0,5 \cdot (b/B)^4 \cdot h^2 / (h + P)^2]$$

où $h/P \leq 1$
 $b/B \geq 0,3$

et

$$0,025 \cdot B/b \leq h < 0,80 \text{ m}$$

$$P \geq 0,30 \text{ m}$$

Formule de Francis :

Plus simple que les précédentes, cette formule s'écrit :

$$Q = 1,83 \cdot (b - 0,2 \cdot h) \cdot h^{3/2}$$

Q en m^3/s ; largeur et hauteur, en mètres.

h doit être mesurée à une distance d'au moins deux mètres du déversoir et la largeur du canal doit respecter la condition : $(B - b) / 2 \geq 3 h_{max}$.

- *Déversoirs rectangulaires sans contraction latérale* (ou de Rehbock)

Ce type de déversoir, de réalisation relativement aisée, présente un certain nombre d'inconvénients et de contraintes :

- le canal d'amenée doit être rectiligne sur une longueur égale à 20 fois la charge maximum, avec des parois en bon état (ciment lissé),

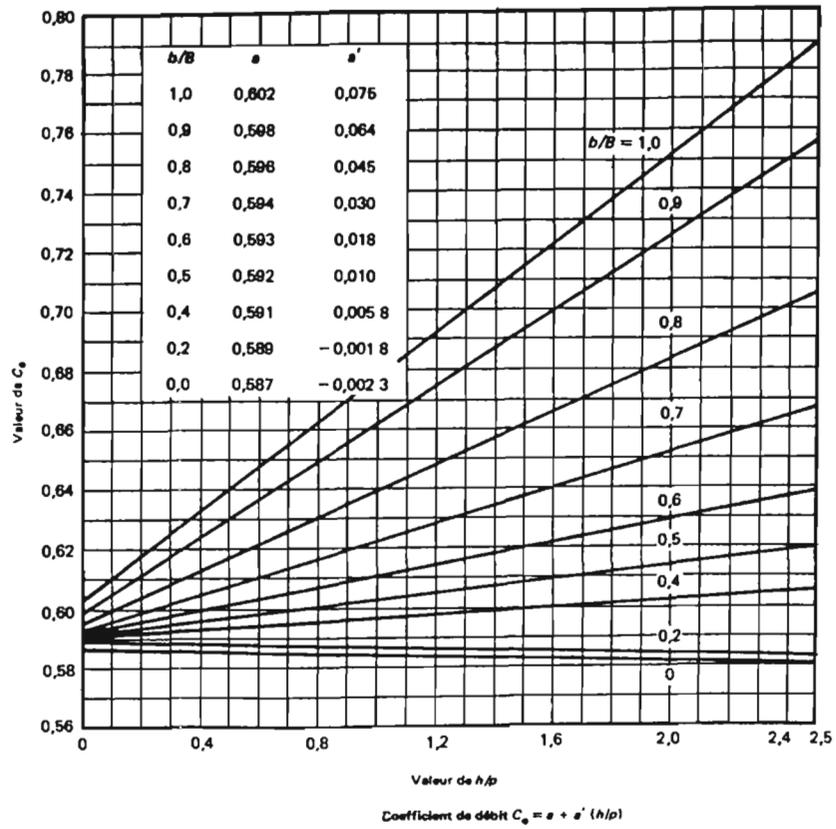


Fig-33 - NORME ISO 1438/1-1980 (F)

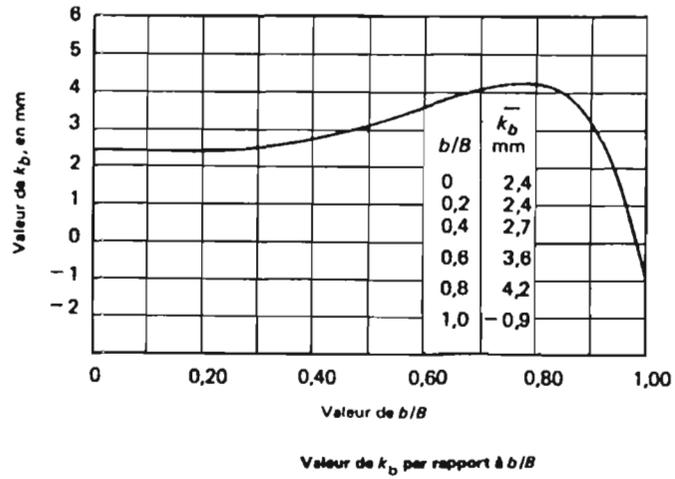


Fig-34 - NORME ISO 1438/1-1980 (F)

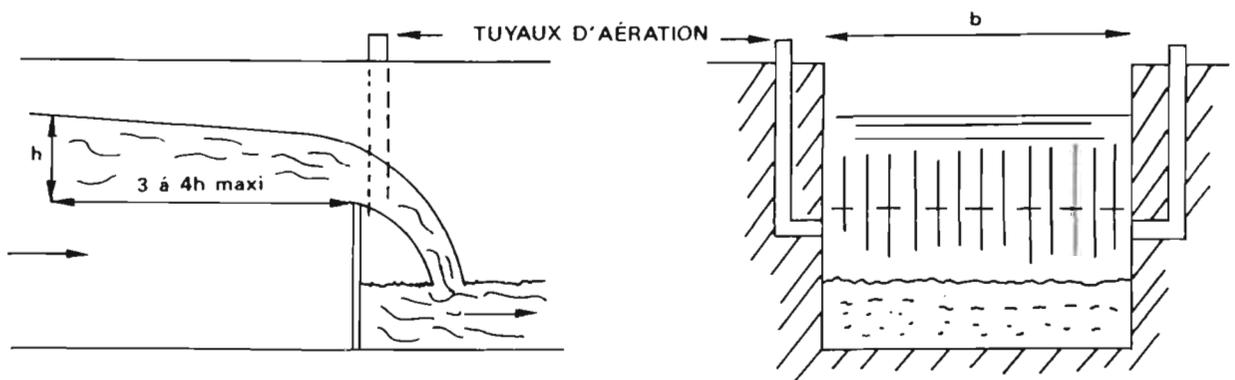


Fig-35- AERATION D'UN DEVERSOIR RECTANGULAIRE EN MINCE PAROI, SANS CONTRACTION LATÉRALE

(D'APRES J.BARTHELEMY)

- . la lame déversante doit être aérée en installant des tuyaux dont la section doit être égale à : $b \cdot h / 200$ ($b \cdot h$ étant le produit de la largeur de crête par la charge - fig. 35),
- . la charge doit être mesurée à une distance de la lame supérieure à $5 h_{max}$.

Différentes formules d'étalonnage peuvent être utilisées :

Formule de Kindsvater-Carter (434), en prenant simplement $b / B = 1$:

$$Q = (2 / 3) \cdot C_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b_e \cdot h_e^{3/2}$$

avec les mêmes définitions et unités que pour un déversoir à contraction latérale.

$$C_e = 0,602 + 0,075 \cdot h / P$$

$$b_e = b - 0,001 \text{ (en mètres)}, \quad h_e = h + 0,001 \text{ (en mètres)}$$

Formule de Rehbock :

$$Q = (2 / 3) \cdot C_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot h_e^{3/2}$$

en 1912, Rehbock propose d'utiliser :

$$h_e = h$$

$$C_e = (2 / 3) \cdot [0,605 + 1 / (1050 \cdot h - 3) + 0,08 \cdot h / P]$$

puis, en 1929 :

$$h_e = h + 0,0012 \text{ (en mètres)}$$

$$C_e = 0,602 + 0,083 \cdot h / P$$

- Déversoirs triangulaires

Les déversoirs triangulaires sont des dispositifs simples, qui n'exigent pas que les parois du canal amont soient en excellent état. Ce dernier peut, de plus, être de longueur réduite (fig. 20).

Il convient à la mesure des faibles débits qui peuvent varier, tout de même, dans d'assez fortes proportions ; il est peu sensible aux courants préférentiels. Il manque, toutefois, de précision et le ralentissement de l'écoulement, qu'il crée, supprime l'autocurage et provoque une élévation importante du niveau d'eau. Les corps flottants peuvent se prendre facilement dans l'échancrure.

Différentes formules permettent de calculer le débit :

Formule de Kindvater-Shen (408) :

$$Q = (8 / 15) \cdot C_e \cdot \operatorname{tg}(\alpha / 2) \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_e^{5/2}$$

α : angle d'échancrure

Q en m^3/s et h_e , charge effective, en mètres

avec $20^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$
 $h_e = h + kh$
 $C_e = f(h / P, P / B, \alpha)$

h étant la charge, P la hauteur de pelle, B la largeur du canal d'amenée.

Les courbes des fig. 36 et 37 extraites de la norme ISO 1438/1-1980[F] (434) permettent d'estimer

Ce et kh en fonction de l'angle d'échancrure.

Formule de Gourley, d'application plus simple :

$$Q = 1,32 \cdot \operatorname{tg}(\alpha / 2) \cdot h^{2,47}$$

Q en m³/s et h en mètres.

Il faut que la surlargeur $a > (3/4) \cdot l$ (fig. 20)

l étant la largeur maximum de l'échancrure triangulaire.

- *Déversoirs trapézoïdaux*

La forme la plus utilisée est celle d'un trapèze isocèle évasé vers le haut (fig. 38).

Le débit total est donné par la formule : $Q = q_1 + q_2$

avec :

q_1 = débit de la partie rectangulaire

$$= C_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot h^{3/2}$$

q_2 = débit des deux parties triangulaires

$$= (8 / 15) \cdot C_e \cdot b' \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2}$$

La formule de Gourley et Crimp peut être utilisée pour une valeur quelconque de α :

$$Q = 1,32 \cdot h^{2,47} \cdot \operatorname{tg}\alpha + 1,69 \cdot b^{1,02} \cdot h^{1,47}$$

Cipolletti a proposé un déversoir trapézoïdal dont α est tel que $\operatorname{tg}\alpha = 1/4$, ce qui permet de compenser l'influence de la contraction due aux joues du déversoir, par l'augmentation de la largeur superficielle de la nappe due à la forme de l'échancrure, de manière à conserver un coefficient C_e constant pour une large gamme de variation de la charge h.

$$Q = C_e \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot h^{3/2}$$

ainsi $Q = 1,86 \cdot b \cdot h^{3/2}$

avec $0,08 < h < 0,60$ m

$$h < a / 2$$

$$h < b / 3$$

$$h < P / 3$$

- *Déversoirs composés*

Ce type de déversoir est utilisé pour gagner en précision sur la mesure des faibles débits.

Deux exemples sont donnés ci-après (fig. 39) :

. Déversoirs à contraction latérale

Le débit total est défini par la relation : $Q = q_1 + q_2 + q_3$

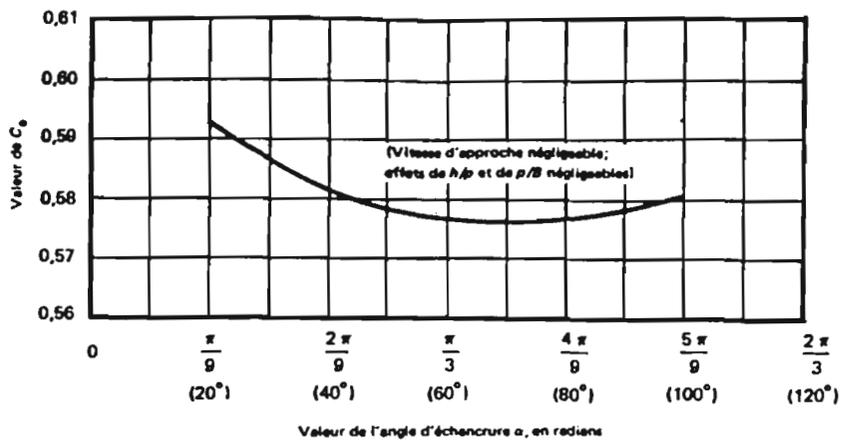


Fig-36- COEFFICIENT DE DEBIT C_e PAR RAPPORT A L'ANGLE D'ÉCHANCRURE

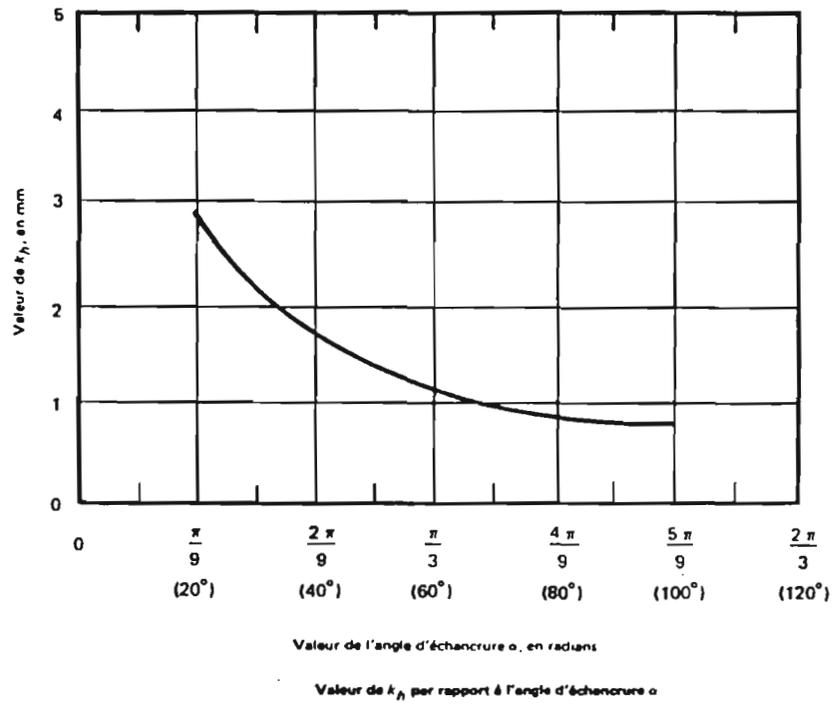


Fig-37 - NORME ISO 1438/1-1980(F)

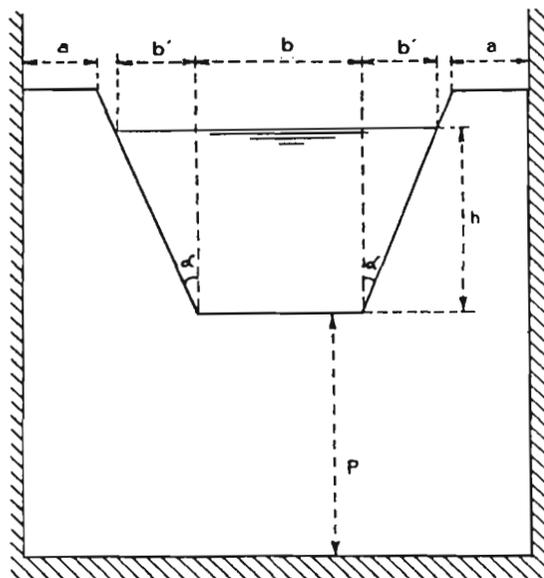


Fig-38- DEVERSOIR TRAPEZIQUE (D'APRES M.CARLIER)

avec :

$$q_1 = C \cdot b \cdot H^{3/2}$$

$$q_2 + q_3 = C \cdot (B - b) \cdot h^{3/2}$$

. Déversoir triangulaire

$$Q = q_1 + q_2 + q_3$$

Partie triangulaire : $q_1 \approx C_1 \cdot H^{5/2}$

Contractions latérales : $q_2 + q_3 \approx C \cdot [(B - b) / 2 + c] \cdot h^{3/2}$

C et C1 peuvent être calculés par les différentes méthodes proposées antérieurement.

2. Déversoirs à seuil épais

La forme des seuils pouvant être très variée, seuls sont présentés, ci-après, ceux dont la réalisation ne présente pas de grandes difficultés.

- Seuils rectangulaires

Ils sont le plus souvent construits en béton ; leur surface doit être lisse, les faces amont et aval sont verticales, planes, perpendiculaires au fond et aux côtés du chenal (fig. 22).

Les normes d'installation sont sensiblement les mêmes que celles préconisées pour les déversoirs en mince paroi : le limnimètre doit se situer à une distance de 3 - 4 h_{max} et la lame déversante doit être suffisamment aérée.

La formule de Bazin, appliquée au régime dénoyé, permet de calculer le débit :

$$Q = 0,385 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot b \cdot h^{3/2}$$

Q en m³/s, largeur et hauteur en mètres.

La norme ISO 3846 - 1977 [F] préconise l'utilisation de la formule :

$$Q = (2 / 3)^{3/2} \cdot C \cdot \sqrt{g} \cdot b \cdot h^{3/2}$$

avec les notations déjà définies.

$$C = 0,864 \quad \text{si,} \quad 0,1 \leq h / l \leq 0,4$$

$$0,15 \leq h / P \leq 0,6$$

l étant la largeur du déversoir, dans la direction du courant, et P la hauteur de pelle.

$$C = 0,191 \cdot h / l + 0,782 \quad \text{si,} \quad 0,4 < h / l \leq 1,6$$

$$\text{et} \quad h / P \leq 0,6$$

Si, $h / P > 0,6$, avec $h / l < 0,85$, les valeurs de C calculées doivent être multipliées par un facteur de correction :

Valeur de h / P	Facteur de correction
0,6	1,011
0,7	1,023
0,8	1,038
0,9	1,054
1,0	1,064
1,25	1,092
1,5	1,123

Les limites suivantes sont recommandées :

$$h \geq 0,06 \text{ m}$$

$$b \geq 0,3 \text{ m}$$

$$P \geq 0,15 \text{ m}$$

$$0,15 \leq P / l \leq 4$$

$$0,1 \leq h / l \leq 1,6 \quad (\text{avec } h / P \leq 0,85, \text{ pour } h / l > 0,85)$$

$$0,15 \leq h / P \leq 1,5 \quad (\text{avec } h / l \leq 0,85, \text{ pour } h / P > 0,85)$$

Si l'arête amont est arrondie suivant un quart de cercle de 0,05 à 0,10 m de rayon ou chanfreinée à 45° jusqu'à 0,12 l, C doit être multiplié par 1,12 / 1,14.

Pour des charges égales à une ou deux fois la largeur du seuil, le comportement est voisin de celui des déversoirs en mince paroi.

Pour les déversoirs à poutrelle (seuils dont la largeur est relativement étroite vis à vis de la charge), la formule de Bazin et de la Société Belge des Mécaniciens peut être utilisée :

$$Q = 0,41067 \cdot [1 + 1,8 / (1\,000 \cdot h)] \cdot [1 + 0,55 \cdot (h / (h + P))^2] \cdot (0,70 + 0,185 \cdot h / l) \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2}$$

- *Seuils triangulaires*

Construits en métal ou en béton, les seuils triangulaires se composent d'une pente amont de 1 (verticale) à 2 (horizontale) et d'une pente aval de 1 (verticale) à 5 (horizontale). La crête est rectiligne, horizontale et perpendiculaire à l'écoulement. De plus, l'angle doit être le même sur toute sa largeur, ce qui demande une construction soignée (fig. 23).

Le débit est donné par la relation :

$$Q = (2 / 3)^{3/2} \cdot C_D \cdot C_V \cdot \sqrt{g} \cdot b \cdot h^{3/2}$$

Q en m³/s ; largeur et hauteur, en mètres.

C_D est le coefficient de débit (sans dimension) ;

C_V est un coefficient tenant compte de la vitesse d'approche (sans dimension).

Pour $h \geq 0,15 \text{ m}$: C_D = 1,15

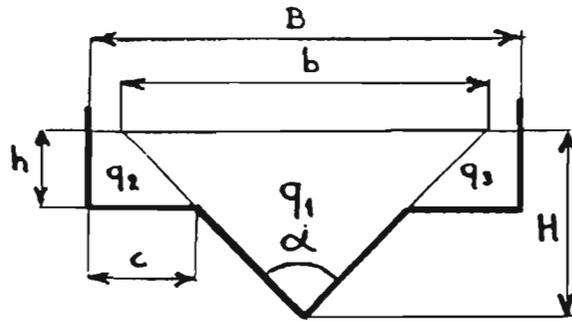
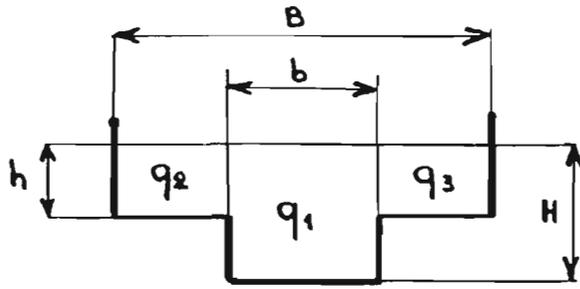


Fig- 39 - DEVERSOIRS COMPOSES

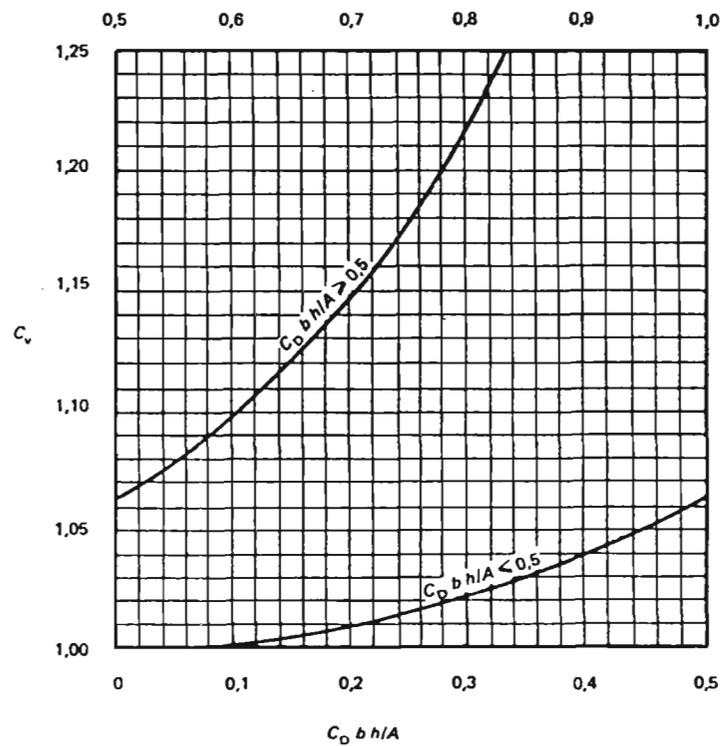


Fig-40- COEFFICIENT DE VITESSE D'APPROCHE C_v (NORME ISO 43460-1979(F))

Pour $h < 0,15$ m : $C_D = 1,15 \cdot (1 - 0,0003 / h)^{3/2}$

C_V est déterminé en fonction du rapport $C_D \cdot b \cdot h / A$ à partir des courbes tirées de la Norme ISO 4360- 1979 [F] (fig. 40). $A = (P + h) \cdot b$ représente la section mouillée en amont du déversoir.

On peut noter que C_V ne dépend pas de la largeur b .

Les limites d'utilisation préconisées sont : $h \geq 0,03$ m (métal lisse) ; $h \geq 0,06$ m (béton fin) ;
 $P \geq 0,06$ m ; $b \geq 0,3$ m, $h/P \leq 3,0$; $b/h \geq 2,0$.

3. Cas des déversoirs noyés

Les formules proposées antérieurement correspondent toutes à une lame déversante dénoyée. Si le niveau amont est influencé par le niveau aval, la formule de calcul du débit peut être mise sous la forme :

$$Q = C_2 \cdot \sqrt{g} \cdot b \cdot h^{3/2}$$

Le coefficient de débit C_2 étant alors le produit du coefficient C applicable à un déversoir dénoyé de même type, par un coefficient K qui est fonction des conditions d'écoulement et principalement du rapport h_1 / h (h_1 étant la hauteur d'eau de la nappe aval dépassant la crête du déversoir - fig. 41).

- Pour un déversoir en mince paroi, d'après Bazin, dans le domaine : $0,25 \cdot P < h - h_1 < 0,75 \cdot P$, on peut utiliser la relation :

$$K = 1,05 \cdot (1 - h_1 / 5 \cdot P)^3 \cdot \sqrt{1 - h_1 / h} \quad (\text{fig. 41, courbe 3})$$

- Pour un déversoir à seuil épais, le niveau aval, bien que plus élevé que le seuil, n'a aucune influence sur le niveau amont, ni sur le débit tant que :

$$h_1 / h < 0,82$$

Au delà, le coefficient K à appliquer est très inférieur à celui défini pour les déversoirs en mince paroi (fig. 41).

Il faut observer que l'application de ces formules impose l'installation de deux stations hydrométriques, ce qui est à éviter dans le cadre d'études sur BVRE.

4. Canaux jaugeurs

Les canaux jaugeurs, comme les déversoirs à seuil épais, conviennent mieux à la mesure de débits importants que les déversoirs en mince paroi. Certains d'entre eux (canal jaugeur à col trapézoïdal ou canal jaugeur en U) permettent de mesurer une large gamme de débits. Ce sont des dispositifs à contraction sur les parois et/ou sur le fond qui font passer l'écoulement, au droit de la section de contrôle, du régime fluvial au régime torrentiel. Il en résulte un écoulement en veine dénoyée, et le niveau à l'amont de la contraction est alors une fonction croissante et connue du débit.

Les Venturi classiques qui nécessitent la mesure des charges amont et aval sont évidemment à proscrire. Le Parshall, qui n'est qu'un Venturi amélioré puisqu'il ne demande la mesure que de la hauteur d'eau amont, présente l'avantage de fonctionner avec des pertes de charge très réduites, grâce à un canal divergent faisant suite au col. En contrepartie, il est moins précis qu'un déversoir. Pour améliorer la mesure sur des cours d'eau caractérisés par une grande amplitude de variation du débit, certains auteurs (432) ont préconisé l'emploi de Parshall emboîtés, avec un seul contrôle de charge.

La construction sur le terrain de ces différents dispositifs demande une certaine technicité, et surtout des moyens qu'il est parfois difficile de réunir dans le cadre d'études effectuées en pays tropicaux où les conditions rencontrées peuvent être défavorables (moyens d'accès, matériel disponible, main d'oeuvre non spécialisée, climat, etc.). Pour des gammes de débits relativement faibles, il est possible de disposer de systèmes préfabriqués en métal, fibrociment ou plastique. Pour des débits plus importants, sont disponibles des

gabarits de trousseage ayant la forme du profil longitudinal, ou des formes préfabriquées pour la partie convergente et le col (parties les plus importantes et surtout les plus délicates, à réaliser). Toutes ces solutions sont relativement onéreuses.

La fig. 42 donne les dimensions usuelles d'un Parshall (412). La largeur du col l_2 est généralement comprise entre $l_1/3$ et $l_1/2$ (l_1 étant la largeur d'entrée). La profondeur à l'amont h_1 est mesurée au $2/3$ de la distance entre le seuil d'entrée du convergent et l'entrée du col (le 0 de l'échelle correspondant au niveau du radier).

Les rapports entre les dimensions principales du dispositif préconisés par Parshall sont (toutes les valeurs étant exprimées en mètres) :

$$A = 1,196 \cdot l_2 + 0,479$$

$$B = 0,49 \cdot l_2 + 1,194$$

$$C = l_2 + 0,305$$

Le débit est donné par la formule :

$$Q = 372 \cdot l_2 \cdot h_1^n \cdot 3,28^n$$

avec :

- Q : le débit, en l/s
- l_2 : la largeur du col, en mètres
- h_1 : la profondeur à l'amont, en mètres
- n : un exposant fonction de l_2

l_2 en m	0,2	0,6	0,8	1,0	2,0	2,6
n	1,506	1,548	1,560	1,569	1,598	1,609

Pour plus amples informations, on consultera l'ouvrage publié par le Département de l'Agriculture des Etats-Unis "Field Manual for Research in Agricultural Hydrology" (411) dans lequel sont décrits de nombreux autres déversoirs et canaux jaugeurs (HS, H, HL ou super-critiques), ainsi que les Normes ISO 1438-1975 [F] et ISO 4349-1983 [F] (434).

5. *Chenal se terminant par une chute*

Pour être appliquée, cette technique impose certaines conditions :

- le chenal amont doit présenter une section droite régulière, sur une distance égale à au moins 20 fois la profondeur maximale en bout de chenal (h_{max}),
- l'écoulement doit être de type fluvial avec des vitesses uniformes,
- les parois et le fond doivent être lisses (de préférence cimentés).

La profondeur h_e est mesurée exactement au bout du chenal, au droit de la chute.

Le débit est donné par la formule :

$$Q = C \cdot \sqrt{g} \cdot b \cdot h_e^{3/2}$$

avec les notations et les unités habituelles.

$C = 1,66$ pour une lame déversante confinée, c'est-à-dire si les parois du chenal s'étendent au delà du seuil sur une distance $l > 6 h_{max}$.

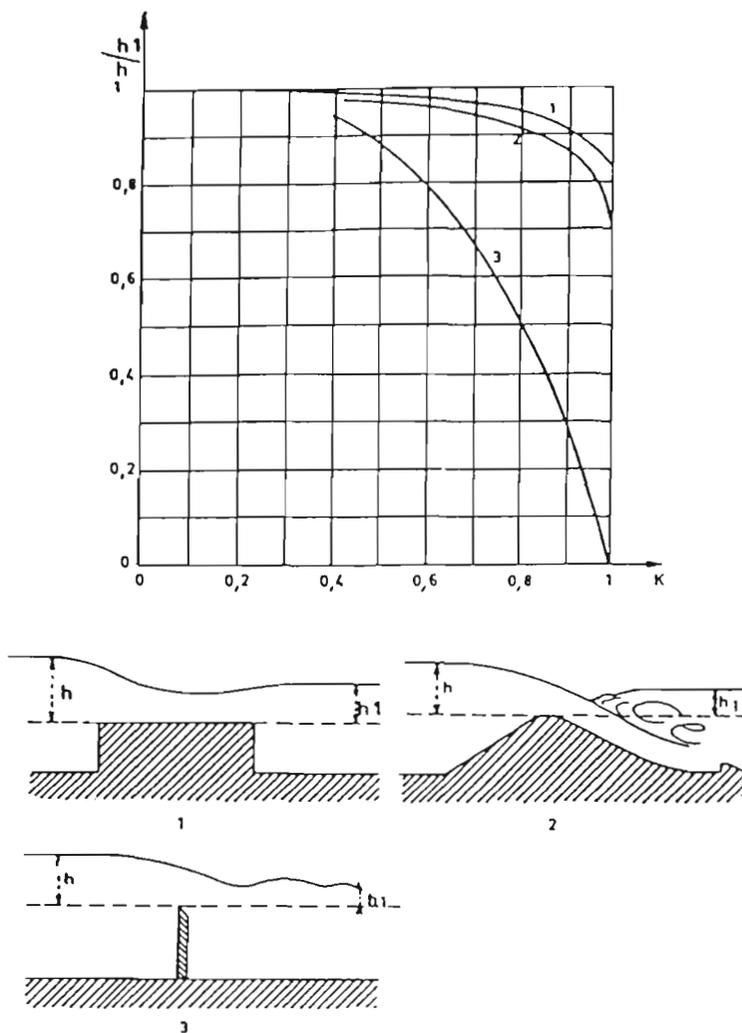


Fig-41- VALEUR DU COEFFICIENT K POUR DIVERS TYPES DE DEVERSOIRS NOYES
 1: LARGE SEUIL - 2: BARRAGE TOIT - 3: CRETE MINCE
 (D'APRES M.SCHMIDT, DIE WASSERWIRTSCHAFT, AVRIL 1957)

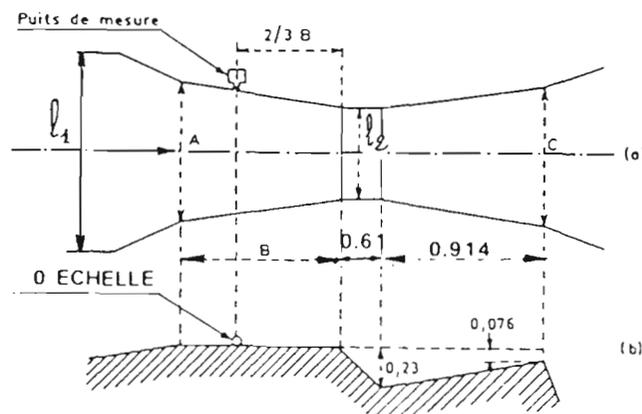


Fig-42- DIMENSIONS USUELLES D'UN PARSHALL (m)
 (a): VUE EN PLAN (b): PROFIL LONGITUDINAL DU RADIER

(D'APRES M.CARLIER)

$C = 1,69$ pour une lame déversante non confinée, c'est-à-dire si les parois du chenal s'arrêtent au niveau du seuil.

Ces coefficients, qui ont été calculés pour des chenaux horizontaux, peuvent également être utilisés, avec une moindre précision, pour des chenaux en pente.

Les conditions d'application sont alors (fig. 43 et 44 - Norme ISO 3847 - 1977 [F]) :

- la hauteur de chute d (distance entre le fond du chenal et la surface de l'eau aval) doit être supérieure à h_e
- $b > 0,3$ m
- $h_e > 0,04$ m

2.2.2.3.3. DISPOSITIFS DE MESURE PERMANENTE DE LA VITESSE DU COURANT

Ces dispositifs restent, souvent, encore au stade de la recherche ou de l'expérimentation, particulièrement pour les cours d'eau naturels.

2.2.2.3.3.1. Stations à ultra-sons

La mesure permanente de la vitesse du courant est effectuée, sur différentes horizontales, à l'aide de couples de transducteurs à ultra-sons placés selon une diagonale faisant un angle avec l'axe de l'écoulement (fig. 45). Chacun des transducteurs de chaque couple émet en direction de l'autre des trains d'ondes ultrasonores, dont les temps de parcours dans l'eau sont modifiés par la composante de la vitesse d'écoulement selon l'axe de propagation de ces ondes. La connaissance des temps de parcours permet de déduire la valeur de la vitesse moyenne du courant dans l'axe de l'écoulement, à la cote de cheminement des ondes.

La détermination du débit est réalisée par intégration (en fonction de la profondeur) des vitesses moyennes fournies par les différentes paires de transducteurs.

Ces dispositifs ne permettent donc pas de s'affranchir de la mesure du niveau d'eau. Par contre, ils permettent de mesurer des écoulements de sens alternés (zones plates, zones de marée, etc.).

Ils peuvent être installés dans des thalwegs ou des cours d'eau de largeurs très différentes, de quelques centimètres à plusieurs dizaines de mètres. Leur coût n'est pas sensiblement supérieur à celui d'un limnigraphe électronique, mais l'intervention d'un spécialiste est recommandée. De plus, aucun test n'a jamais été effectué dans les régions intertropicales.

2.2.2.3.3.2 Stations électromagnétiques

La mesure directe du débit utilise la conductivité des eaux naturelles : la création d'un champ magnétique alternatif, dans toute la masse de l'écoulement, permet de recueillir une force électro-motrice entre deux électrodes placées dans la section de mesures.

De très faibles vitesses et le sens des écoulements peuvent être appréciés. Les coûts en matériel, en installation et fonctionnement restent élevés.

2.2.2.4 INSTALLATION DU DISPOSITIF DE MESURES ET D'OBSERVATIONS

Le choix du dispositif de mesure du débit s'appuie sur plusieurs critères :

- gammes des débits à mesurer,

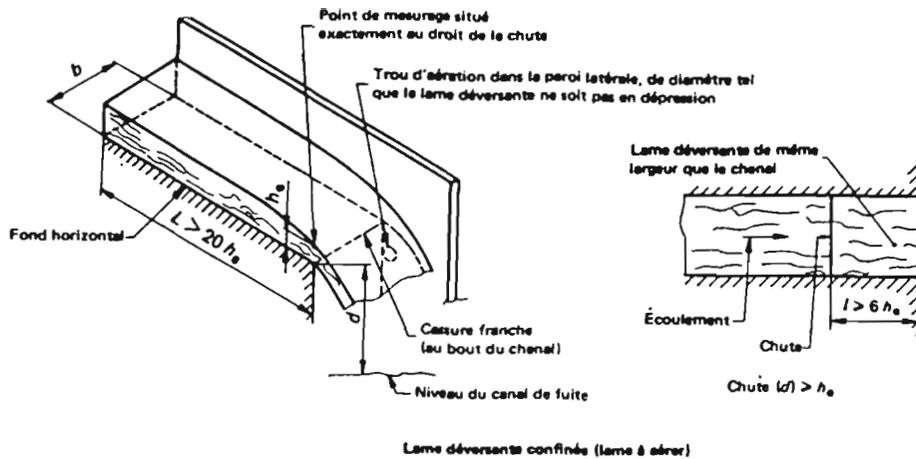


Fig-43- (D'APRES NORME ISO 3847-1977[F])

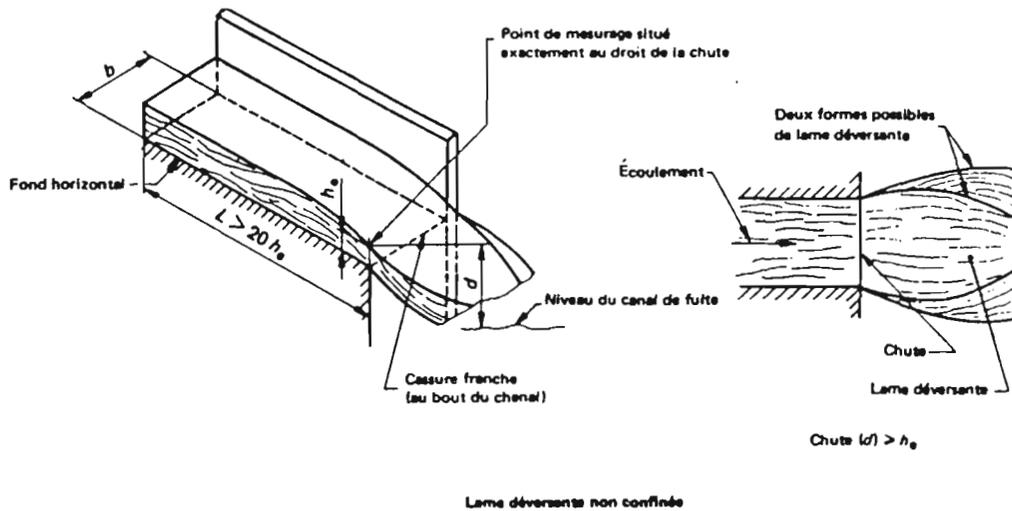


Fig-44- (D'APRES NORME ISO 3847-1977[F])

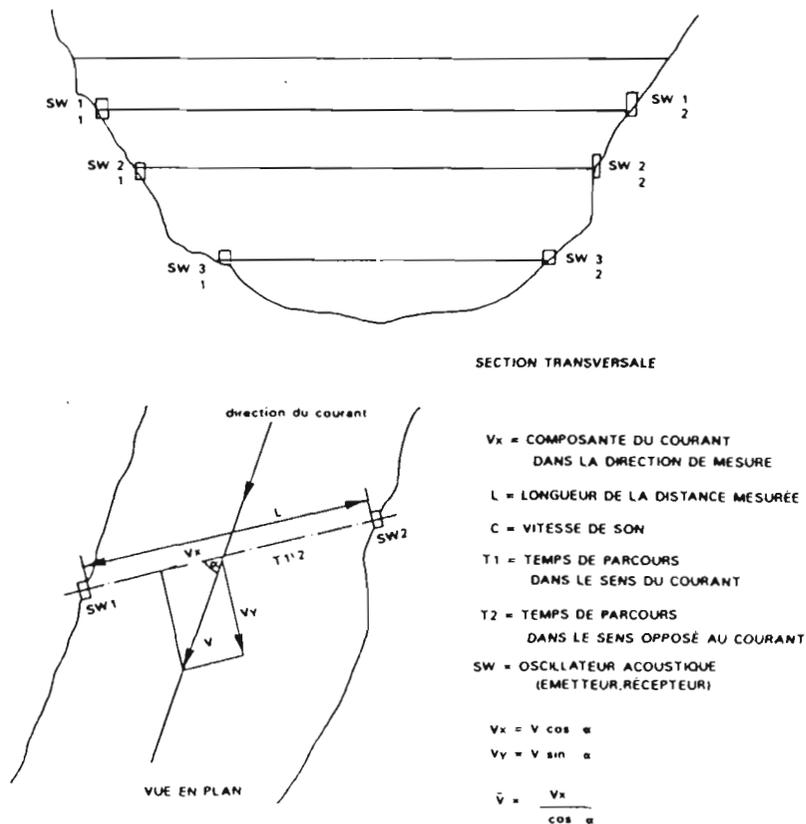


Fig-45 - SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MESURE DES VITESSES PAR ULTRASONS

- caractéristiques du lit du cours d'eau : profondeur, largeur, nature du fond et des berges, existence de zones d'expansion ou d'endoréisme,
- type d'écoulement : fluvial ou torrentiel,
- régime hydrologique : cours d'eau pérenne ou intermittent,
- caractéristiques des crues : temps de montée et de décrue, temps de réponse.

Par commodité, le critère de classification adopté est la largeur du lit mineur, c'est-à-dire le lit dans lequel se fait l'essentiel de l'écoulement, des débordements pouvant être observés uniquement en très hautes eaux :

- Lit dont la largeur est supérieure à 15 mètres

L'équipement comprend :

- . Une batterie d'échelles composée, dans les lits très ouverts, d'éléments séparés implantés dans une des berges (fig. 12).
- . Un limnigraphe ancré dans la même berge que les échelles. Dans les lits très ouverts à faibles pentes transversales, l'appareil devra être parfois installé au milieu du lit (photo 10).

Dans de nombreux cas, il s'agira d'aménagements légers, faciles à installer et à démonter pour être, éventuellement, transportés et utilisés sur d'autres sites.

Pour les installations réalisées dans le lit du cours d'eau (limnigraphe à flotteur, par exemple), l'emploi de tubes galvanisés (40-49 mm) et de colliers type "Mils" est très pratique et efficace (photo 11). Si le lit est suffisamment argileux, l'ancrage se fait en creusant des trous à l'aide d'une tarière, ce qui permet un démontage facile par simple humectation accompagnée d'un mouvement de rotation des tubes. Dans les fonds sableux, le battage des tubes est nécessaire et la construction d'un dé de béton est recommandée.

Pour des appareils installés hors du lit mineur (limnigraphe à mesure de pression, par exemple), un support construit en fer-cornières est suffisant (photo 7).

Si le lit est stable (seuil rocheux, matériel présentant une bonne cohésion) et si l'écoulement est intermittent (sans aquifère significatif), aucun aménagement supplémentaire n'est nécessaire. La section de jaugeage sera simplement matérialisée par un câble gradué, les mesures de débit étant effectuées à gué, à l'aide d'une perche, si la profondeur ne dépasse pas un mètre, ou en bateau, avec treuil et lest, dans le cas contraire. Si tous les jaugeages peuvent être réalisés à gué, le câble gradué peut avantageusement être remplacé par des repères fichés dans le fond du lit et espacés tous les 2 ou 5 mètres, suivant sa largeur (fers à béton de 5 mm peints en rouge, par exemple - photo 12). L'installation d'un téléphérique, toujours onéreuse, ne sera envisagée que si les conditions d'écoulement la justifient (fortes vitesses).

Si le lit manque de stabilité, la construction d'un radier en béton, ou en gabions, de plusieurs mètres de large, respectant le mieux possible la morphologie naturelle, devra être envisagée (photo 13). Pour assurer correctement son ancrage, il est indispensable d'atteindre une couche présentant une cohésion suffisante, ou mieux le bed-rock. Les berges devront être protégées par des bajoyers.

La réalisation d'un déversoir à seuil épais, ou d'un système de déversoirs encastrés, impose des travaux plus importants et plus coûteux qui ne dispensent pas, dans la plupart des cas, d'étalonner la section par des mesures de débit.

Sur les cours d'eau pérennes ou sur les cours d'eau présentant des débits de tarissement non négligeables, un petit canal, éventuellement équipé d'un déversoir, sera aménagé pour mesurer, avec plus de précision, les faibles débits (fig. 46 - photo 14).

Pour améliorer la sensibilité de la station hydrométrique et faciliter la mesure des débits, on peut être amené à réduire la largeur du lit du cours d'eau par la construction de digues. Il faut alors s'assurer que la hauteur et la solidité de l'ouvrage sont suffisantes, et que la zone de retenue qui se forme en période de hautes eaux, en amont de l'ouvrage, n'entraîne pas de modifications sensibles de l'écoulement (altération de la forme de l'hydrogramme). De plus, les réparations rendues nécessaires par une destruction, même partielle, sont souvent difficiles à effectuer en saison des pluies, ce qui risque, à côté du préjudice financier, d'entraîner une perte d'information rédhibitoire.

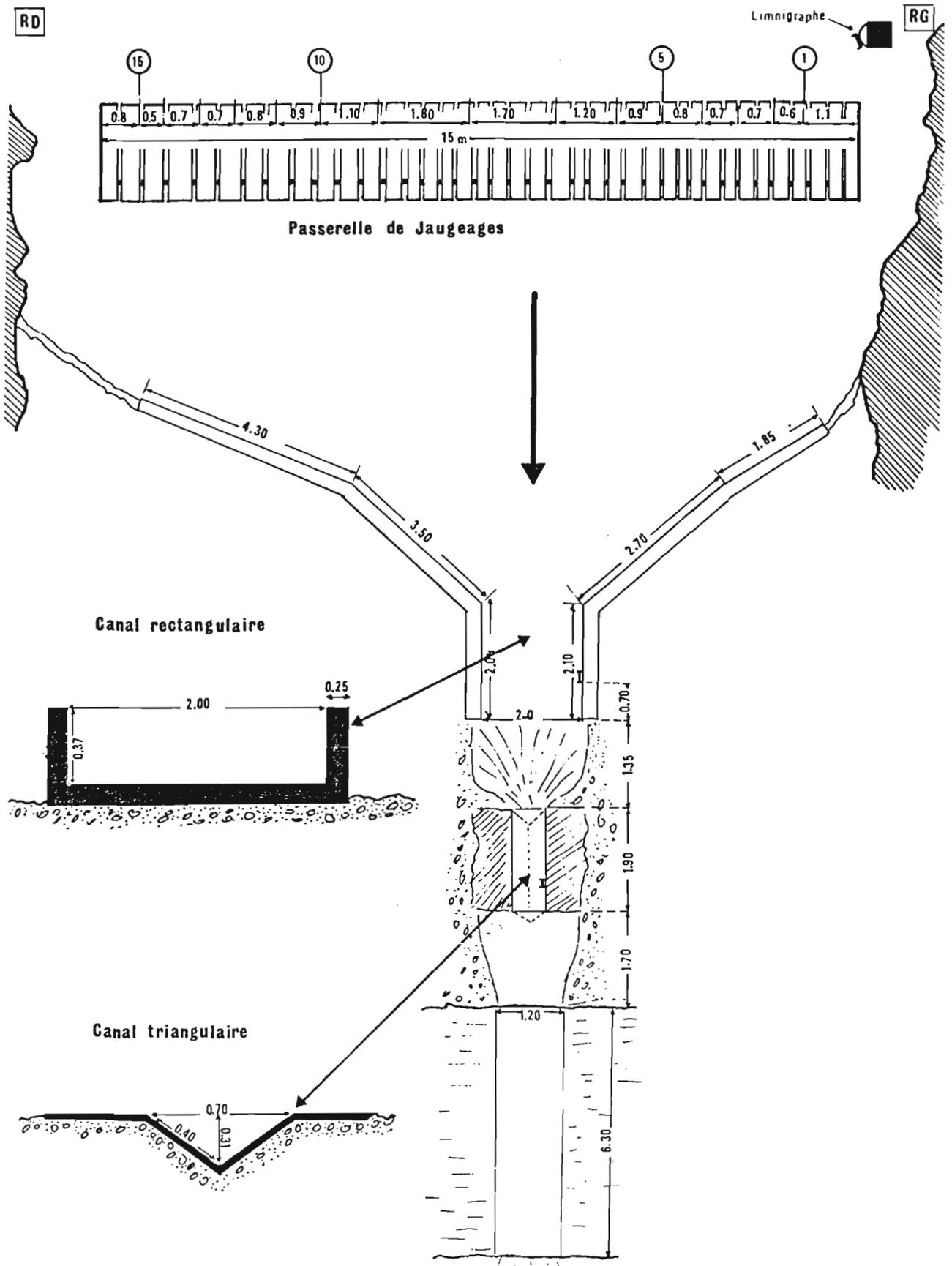


Fig-46 - AMENAGEMENT D'UNE STATION HYDROMETRIQUE
BASSIN DE L'OUED ZITA, TUNISIE (D'APRES H.CAMUS)

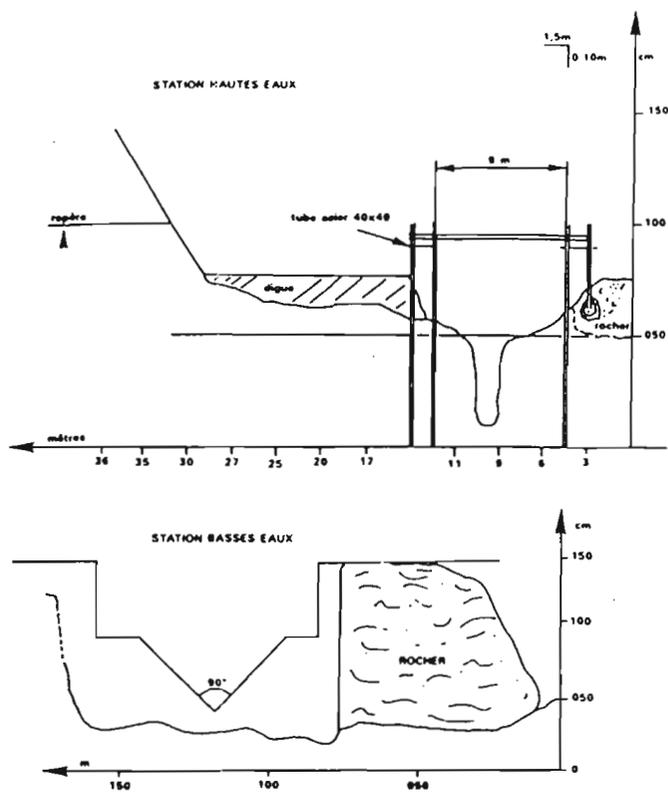


Fig-47 - STATION HYDROMETRIQUE DE BRE. (D'APRES J.ALBERGEL)

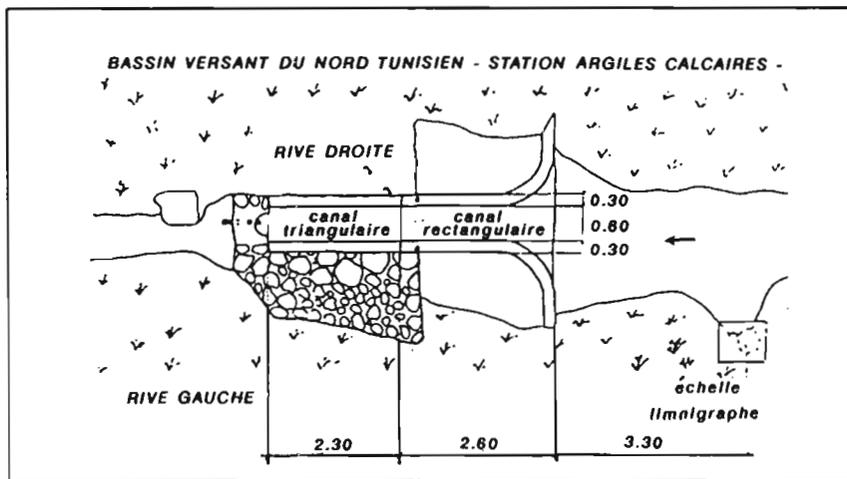


Fig-48 - VUE EN PLAN

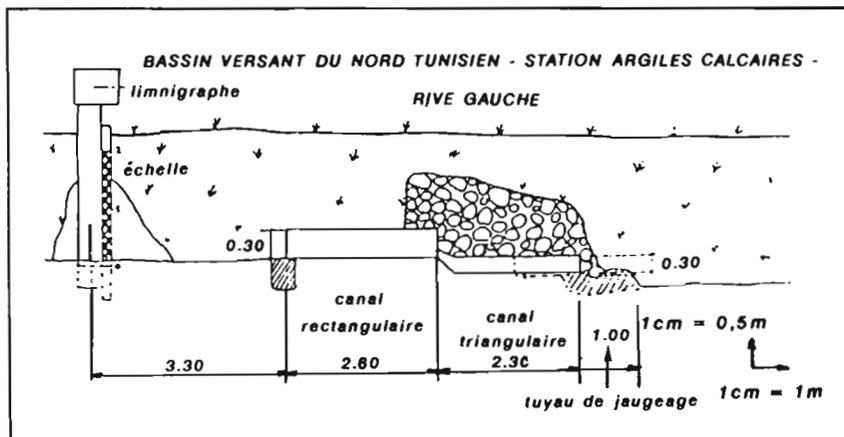


Fig-49 - AMENAGEMENT EN CASCADE. VUE EN COUPE.
(D'APRES G.GIRARD ET J.GUISCAFRE)

PHOTO - 12



CLICHÉ: J.F. NOUVELOT

Section de jaugeages - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 13



CLICHÉ: J.F. NOUVELOT

Seuil en gabions - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 14



CLICHÉ: J.F. NOUVELOT

Section de jaugeages de basses eaux - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 15



CLICHÉ: B. THÉBÉ

Déversoirs amboîtés - Mouda - (Cameroun)

PHOTO - 17



CLICHÉ: J.M. DELFIEU

Jaugeages de crue - Bidi - (Burkina-Faso)



CLICHÉ: J.F. NOUVELOT

Passerelle de jaugeages - Bidi - (Burkina-Faso)

- *Lit de quelques mètres de largeur*

Alimentés généralement par des bassins versants de faible superficie, ces cours d'eau peuvent présenter des variations rapides de débit qui rendent difficile le tarage des stations hydrométriques. Des techniques spéciales de jaugeage doivent être utilisées (paragraphe 2.2.2.3.1.).

Au moins deux sections de mesure seront dans de nombreux cas nécessaires : l'une pour les moyennes et hautes eaux, l'autre équipée d'un déversoir, ou d'un canal jaugeur, pour les basses eaux (fig. 47). La réalisation d'aménagements, parfois lourds, et l'emploi de dispositifs pré-étalonnés se justifient alors pleinement. Pour assurer une précision suffisante sur toute la gamme des débits, il peut s'avérer nécessaire de construire une série d'aménagements en cascade.

Dans l'exemple des fig. 48 et 49 :

- . les très faibles débits, inférieurs à 3 l/s, sont mesurés à l'aide d'une capacité tarée, grâce à une goulotte,
- . un canal triangulaire, étalonné au micro-moulinet, permet de mesurer les débits entre 3 et 15 l/s,
- . un canal rectangulaire, étalonné également au micro-moulinet, contrôle les débits entre 15 et 300 l/s.

Les canaux pourraient être avantageusement équipés de seuils jaugeurs. Par contre, l'utilisation en cascade de déversoirs est rendue difficile par la nécessité de respecter les normes de fonctionnement, donc d'éviter les interférences entre les différents ouvrages.

Un système de déversoirs emboîtés, de formes différentes adaptées à plusieurs gammes de débits, peut aussi être utilisé (fig. 50 et photo 15).

Les dispositifs installés pour la mesure des faibles débits seront équipés d'échelles millimétriques : réglés en acier inoxydable, ou limnimètres à pointe droite ou recourbée.

Toutes ces stations sont généralement équipées de passerelle à partir de laquelle les jaugeages sont effectués à l'aide d'une perche ou, plus rarement, à l'aide d'une potence. Comme les supports de limnigraphe, ces passerelles peuvent être montées en tubes métalliques de 40-49 mm qui offrent peu de résistance à l'eau. Le tablier est construit de la même manière en tubes galvanisés (petites passerelles) ou en UPN de 120 mm (photo 16) supportant un platelage de planches en bois de 30-50 cm (photo 17). Des repères à la peinture matérialisent les verticales de jaugeage.

Dans les lits instables, le même type d'installations que celui préconisé pour les cours d'eau plus larges pourra être construit.

- *Lit dont la largeur est inférieure à 1 - 1,5 mètre*

Dans les lits étroits, l'écoulement doit être canalisé, et l'installation d'un dispositif pré-étalonné facilitera la mesure des débits dont les variations sont souvent très rapides (fig. 51). Dans les lits instables, devront être respectés, le mieux possible, le profil et la section droite du thalweg. Pour cela, une semelle en béton, dépassant le fond du lit de quelques centimètres et se prolongeant sur les berges par des bajoyers, sera construite. Dans tous les cas, un bon ancrage devra être assuré.

Des planches posées sur les bajoyers serviront de passerelle de jaugeage, les faibles débits étant, quant à eux, contrôlés à l'aide d'une capacité étalonnée (photo 18).

2.2.3 PARCELLES DE RUISSELLEMENT

De dimensions pouvant aller du m² à quelques hectares, les parcelles de ruissellement se caractérisent par une ligne de partage des eaux artificielle.

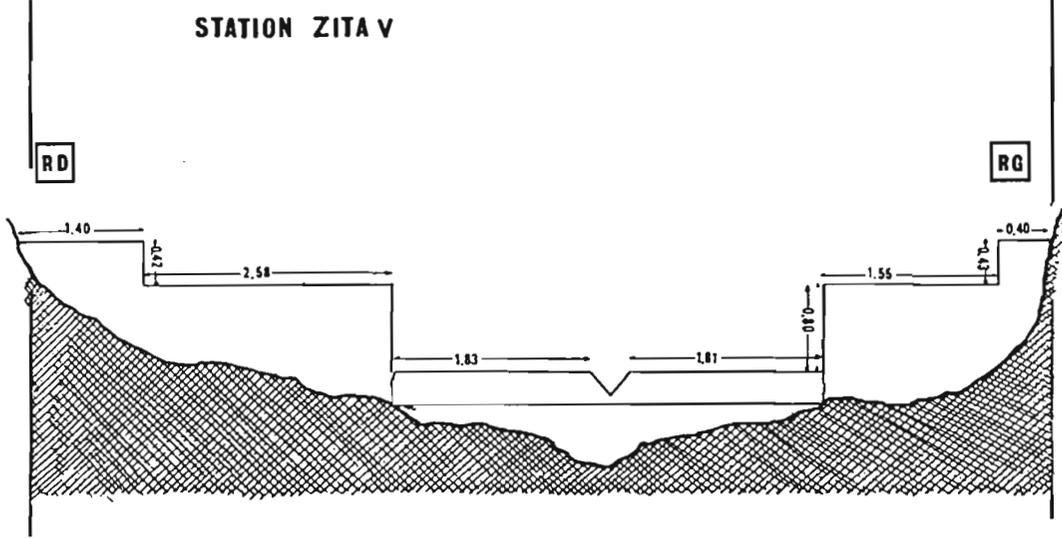


Fig-50 - DEVERSOIRS EMBOITES OUED ZITA - TUNISIE (D'APRES H-CAMUS)

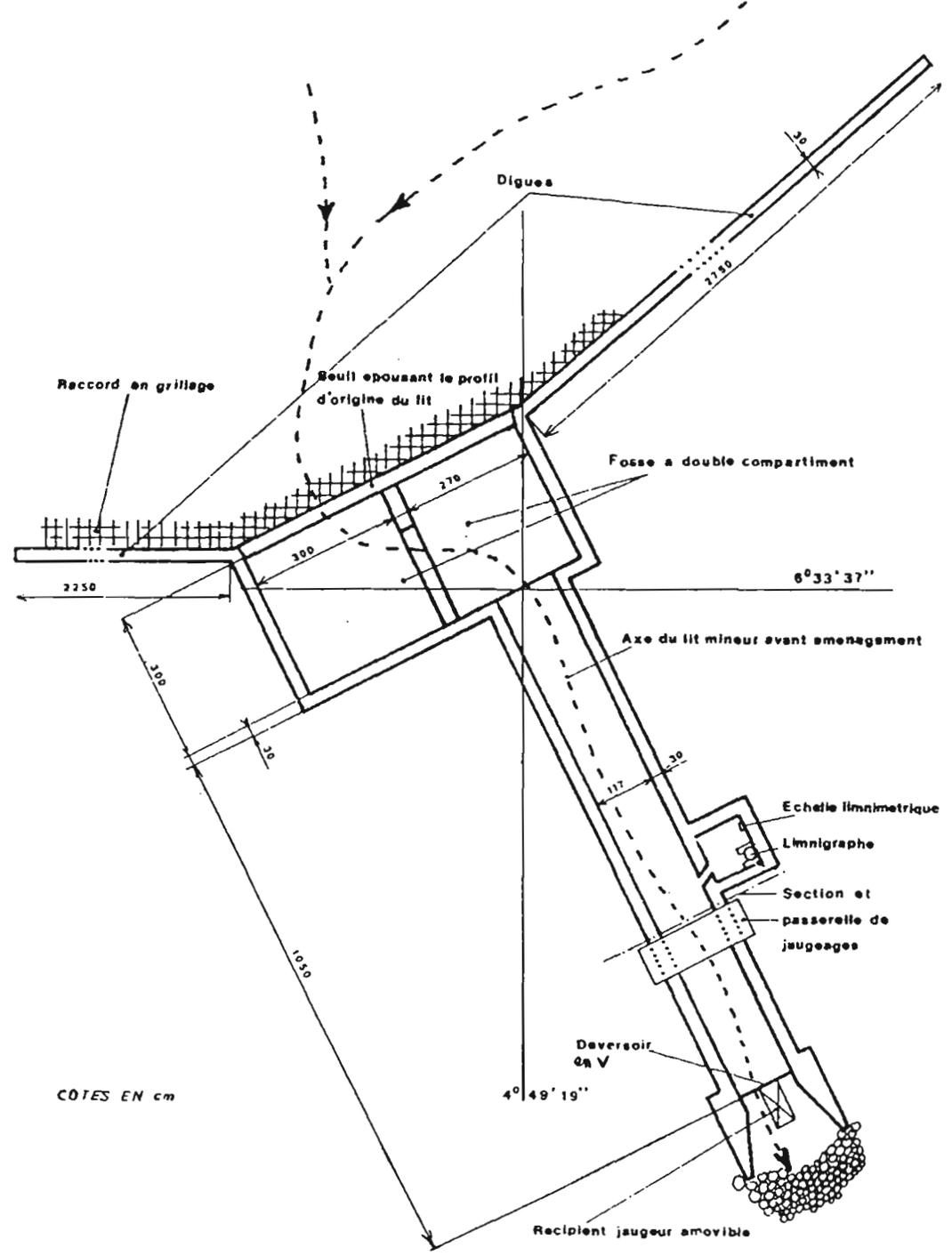


Fig-51 - BASSIN DE SAKASSOU - COTE D'IVOIRE (D'APRES A-LAFFORGUE)

Exception faite des micro-parcelles de 1 m² utilisées pour la mesure du ruissellement et de l'infiltration sous pluie simulée (paragraphe 2.5.), la quasi-totalité des mesures effectuées sur parcelles en Afrique francophone avait pour premier objectif l'étude de l'érosion. Par commodité, le sujet est donc traité dans le chapitre "Erosion" (paragraphe 2.4.).

2.2.4 RETENUES D'EAU NATURELLES OU ARTIFICIELLES

Dans de nombreuses zones intertropicales d'Afrique ou d'Amérique du Sud, dans le Sertão brésilien ou au Burkina-Faso par exemple, l'insuffisance de la ressource en eau, facteur limitant du développement, est à l'origine d'une politique d'emmagasinement des eaux de surface dans des dépressions naturelles aménagées ou, plus fréquemment, dans des barrages réservoirs.

L'optimisation de la gestion de ces ouvrages demande d'étudier avec soin leur fonctionnement et leur influence sur le bilan hydrique régional, en assurant un minimum de mesures.

Dans les conditions naturelles, l'eau est supposée conservée la même masse volumique, ce qui n'est pas rigoureusement exact puisqu'elle transporte des matières solides en quantités variables. Sur un intervalle de temps donné t, l'équation générale du bilan hydrique d'une retenue découle donc de l'application du principe de la conservation de la masse.

Elle peut s'écrire :

$$\Delta V = V_{ec} + V_p - (V_{ev} + V_i + V_d + V_u) \quad (1)$$

ΔV étant la variation du stock d'eau dans la retenue

V_{ec} les apports en provenance des tributaires (y compris éventuellement les apports souterrains V_{ecs})

V_p les apports des précipitations tombant directement sur la retenue

V_{ev} le volume d'eau évaporé

V_i les pertes par infiltration (à hauteur du barrage V_{id} , ou dans le fond de la retenue V_{if})

V_d le volume d'eau sortant de la retenue par déversements

V_u le volume d'eau prélevé pour divers usages (irrigation, alimentation des populations et du bétail, etc.).

L'équation (1) peut s'écrire également :

$$V_{ec} = \Delta V - V_p + V_{ev} + V_i + V_d + V_u$$

Ainsi, une retenue alimentée par un seul tributaire, ou pour le moins par un tributaire principal, est susceptible de fournir une information presque équivalente à celle que l'on peut obtenir d'une station hydrométrique classique. Pour cela, certaines conditions, souvent moins contraignantes et moins onéreuses que celles nécessaires au bon fonctionnement d'une station hydrométrique, doivent tout de même être satisfaites.

Ce sont, par ordre d'importance :

- L'existence de courbes de cubature suffisamment précises donnant volumes et surfaces en fonction de la hauteur d'eau (fig. 52).

De bons relevés topographiques et/ou bathymétriques sont pour cela nécessaires.

- La présence d'un déversoir (évacuateur de crues) de construction soignée, garantissant une bonne stabilité de l'étalonnage (photo 20 et fig. 52a).

Les déversoirs surdimensionnés assurent peu de précision. Il y aura un grand intérêt à choisir des réservoirs déversant peu ou pas, c'est-à-dire de capacité suffisante eu égard aux apports. L'évaluation de la capacité maximale d'emmagasinement, en terme de lame écoulée annuelle sur le bassin versant, fournit une bonne appréciation de la qualité d'information à espérer. Des études menées dans le Nord-Est brésilien ont montré qu'il fallait que cette lame soit au moins égale au module moyen

(déversement 1 année sur 3). Si elle atteint trois fois le module (déversement 1 année sur 10), l'information recueillie correspondrait à celle d'une bonne station hydrométrique.

- L'enregistrement en continu des variations du plan d'eau à l'aide d'un limnigraphe assurant une précision de l'ordre du centimètre ou, si possible, du demi-centimètre (fig. 52b).

S'agissant d'eau stagnante, l'ancrage de l'appareil ne présente aucune difficulté (photo 19). Néanmoins, il faudra souvent se préserver du battillage ou des vaguelettes provoqués par le vent.

- La présence d'au moins un pluviomètre proche de la retenue (de préférence au droit du barrage).
- Le contrôle des divers prélèvements effectués.

Dans les bassins ruraux, il s'agira principalement de prélèvements à des fins agricoles (irrigation). Les canaux pourront être équipés de déversoirs ou de jaugeurs, mais il faudra très souvent se contenter d'étalonner les vannes en recherchant la relation $Q = f(n)$ (n , étant le nombre de tours de la commande d'ouverture), et de contrôler la durée des dotations.

- La présence d'un bac évaporatoire à proximité du site.

On peut utiliser de préférence un bac flottant, mais aussi tout autre type (classe A ou enterré type "Orstom") affecté d'un terme de réduction souvent calculé à l'échelle régionale. Dans bien des cas, les données recueillies sur la station climatologique la plus proche sont suffisantes.

- La possibilité de mesurer les pertes par infiltration dans la digue et dans la retenue.

Certains barrages sont équipés de drains dans lesquels des mesures peuvent être effectuées. Il s'avère que ces pertes sont très souvent négligeables, voire nulles.

Les pertes par infiltration dans la retenue sont difficiles à apprécier, ou nécessiteraient une infrastructure qui ôterait tout intérêt à la méthode. Fort heureusement, les apports de matières solides fines piégées dans la retenue colmatent le fond du réservoir, le rendant quasiment imperméable. Seules les zones périphériques, recouvertes épisodiquement, d'eau peuvent présenter une perméabilité non négligeable.

A titre d'exemple, est donnée la reconstitution, établie par J.P. TRIBOULET du C.I.E.H., du volume d'apport annuel du bassin versant de 2 100 km² alimentant le barrage réservoir de Loubila, au Burkina-Faso, dont la capacité maximale est de 36 millions de m³. Le détail des calculs est présenté dans le tableau qui suit après avoir défini les variables suivantes :

H	hauteur d'eau dans le réservoir lue à l'échelle à la date indiquée
V	volume stocké pour la hauteur H, d'après la courbe hauteur-volume (fig. 52)
ΔV	variation de volume entre deux dates
S	superficie du plan d'eau de la retenue pour la hauteur H, d'après la courbe hauteur-surface (fig. 52)
Sm	superficie moyenne du plan d'eau entre deux dates
E	taux d'évaporation journalière (Orstom, Klein, 1962)
N	nombre de jours de l'intervalle entre deux dates
Vev	volume évaporé pendant l'intervalle de temps N
P	pluie directe sur le plan d'eau estimée à l'aide des données recueillies au poste de Donsé
Vp	volume de pluie tombée sur la retenue
Vd	volume d'eau déversé estimé à l'aide de la courbe d'étalonnage des déversoirs (fig. 52a)
Vu	volume d'eau soutiré dans la retenue pour les besoins de l'alimentation en eau de Ouagadougou (basé sur les données fournies par l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement pour l'année 1986).

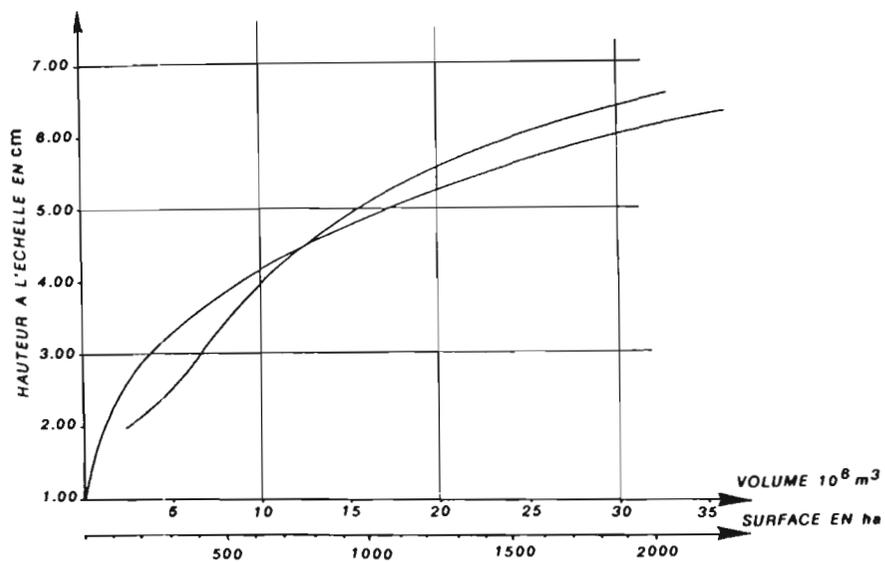


Fig-52 - COURBES COTE-SURFACE ET COTE VOLUME DU RESERVOIR DE LOUMBILA
(D'APRES J.P.TRIBOULET) BURKINA FASO

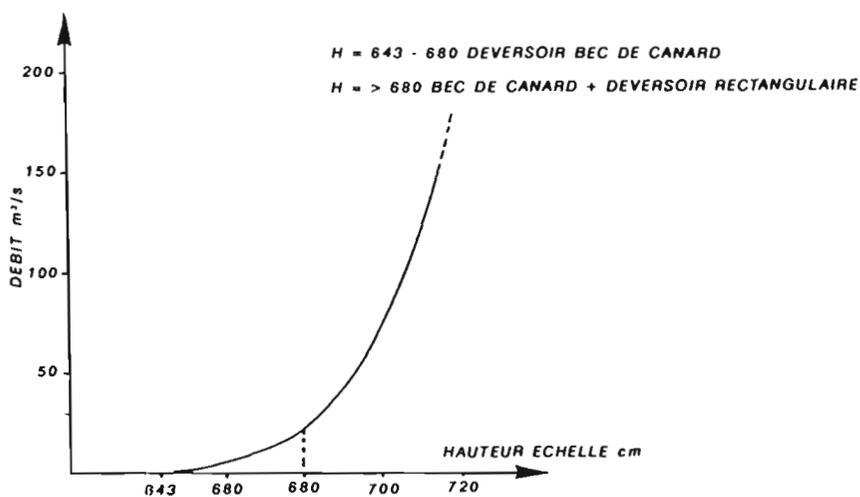


Fig-52a - COURBE D'ETALONNAGE DES DEVERSOIRS DU BARRAGE DE LOUMBILA
(D'APRES J.P.TRIBOULET) BURKINA FASO

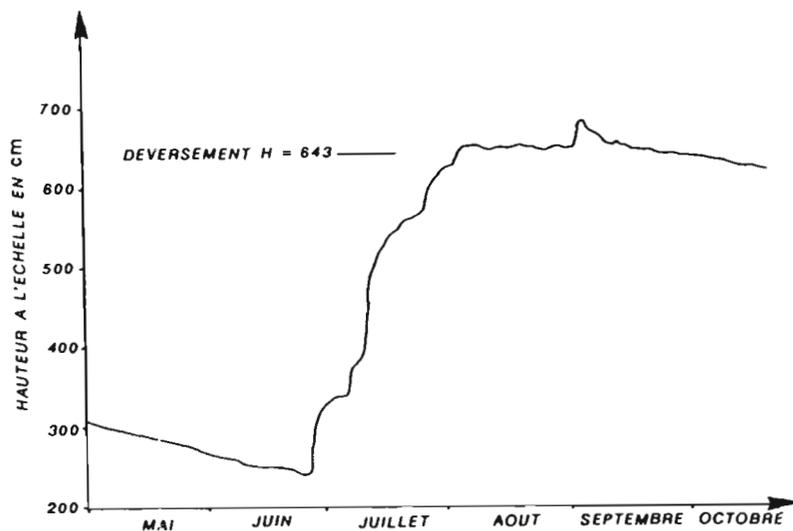


Fig-52b - HAUTEURS D'EAU DE L'ANNEE 1985 RESERVOIR DE LOUMBILA
(D'APRES J.P.TRIBOULET) BURKINA FASO



CLICHÉ : J.F. NOUVELOT

Équipement hydrométrique d'un petit cours d'eau - Thyase-Kaymor - (Sénégal)



CLICHÉ : J.F. NOUVELOT

Station limnigraphique contrôlant une retenue d'eau - Bidi - (Burkina-Faso)



CLICHÉ : J.F. NOUVELOT

Évacuateur de crue - Bidi - (Burkina-Faso)

Vec volume d'apport du bassin versant.

1985	Jour	H	V	ΔV	S	Sm	E	N	Vev	P	Vp	Vd	Vu	Vec	
Mois		cm	Mm ³	Mm ³	ha	ha	mm/j	jours	Mm ³	mm	Mm ³	Mm ³	Mm ³	Mm ³	
	31/5	268	2,80		330										
Juin				-0,80		300	6	25	0,45	0	0		0,52	0,17	
	25/6	240	2,00		270										
				3,00		355	5	5	0,09	74	0,26		0,10	2,93	
	30/6	325	5,00		440										
Juillet				28,00		1020	5	31	1,58	110	1,12		0,50	28,96	
	31/7	624	33,00		1600										
Août				5,60		1738	4	8	0,56	43	0,75	0,91	0,12	6,44	
	08/8	655	38,60		1875										
				-0,60		1863	4	23	0,22	122	2,27	4,31	0,44	2,10	
	31/8	651	38,00		1850										
Sept.				6,50		2015	5	4	0,40	80	1,61	5,28	0,06	10,58	
	04/9	686	44,50		2180										
				-6,10		1990	5	26	2,59	52	1,03	9,67	0,36	5,49	
	30/9	643	36,40		1800										
Oct.				-5,00		1690	6	31	3,14	7	0,12		0,48 ^a	(-1,50)	
	31/10	616	31,40		1580										
									9,03						7,98 20,17 2,58 56,67^b

^a Le volume soutiré Vs correspond au volume pompé pour l'alimentation en eau potable de la ville de Ouagadougou ; il est probable qu'en octobre s'ajoutent des pompages pour satisfaire les besoins d'un périmètre d'irrigation d'environ 36 ha, mais les quantités sont inconnues ; par ailleurs l'évaporation réelle a pu être supérieure à 6 mm/j ; ces deux incertitudes expliquent le résultat négatif du bilan pour le mois d'octobre.

^b total arrêté au 30/9/85.

2.3. OBSERVATIONS CLIMATOLOGIQUES

Hormis les observations pluviométriques qui couvrent l'ensemble du BVRE (Voir paragraphe 2.1.), les observations climatologiques ne sont, très fréquemment, effectuées qu'en un seul site représentatif des conditions générales de la zone d'étude.

La principale finalité de cette station est la mesure de l'évaporation (prise dans son sens le plus large) et de ses facteurs explicatifs. Suivant le contexte naturel et surtout l'objectif des études, on recherchera, soit une simple estimation globale de l'évapotranspiration potentielle ou réelle, soit au contraire une connaissance approfondie des divers processus qui interviennent dans ces phénomènes. L'instrumentation sera évidemment très différente suivant l'approche choisie.

La mesure précise de la consommation en eau de la végétation demande des moyens financiers, humains ou matériels, rarement disponibles dans le cadre d'études de BVRE ruraux africains. L'installation d'évapotranspiromètres, de cases lysimétriques, d'appareils permettant de déterminer tous les éléments du bilan radiatif, ou de dispositifs très sophistiqués tels que ceux qui mesurent le débit de la sève des arbres, ne peut être objectivement envisagée dans ce contexte. Ce type de station, pour des raisons de commodités compréhensibles (présence de personnel qualifié, facilités d'entretien, utilisation du réseau de distribution d'énergie électrique), est fréquemment installé, y compris dans les pays développés, à proximité, voire sur le terrain même, d'un institut scientifique spécialisé. L'implantation des principales stations climatologiques suivies par C. Riou (534) en Afrique Centrale (Ndjaména, Bangui, Brazzaville) répondait à ces mêmes impératifs.

Pour ces différentes raisons, ne seront données dans cet ouvrage que les caractéristiques d'un parc à instruments classiquement utilisé lors des études de BVRE menées par l'Orstom en Afrique francophone.

Il comprend :

- un abri météorologique complet équipé :
 - . d'un ensemble psychrométrique (thermomètre sec et thermomètre humide),
 - . d'un thermomètre à maximum,
 - . d'un thermomètre à minimum,
 - . d'un évaporomètre PICHE (optionnellement).

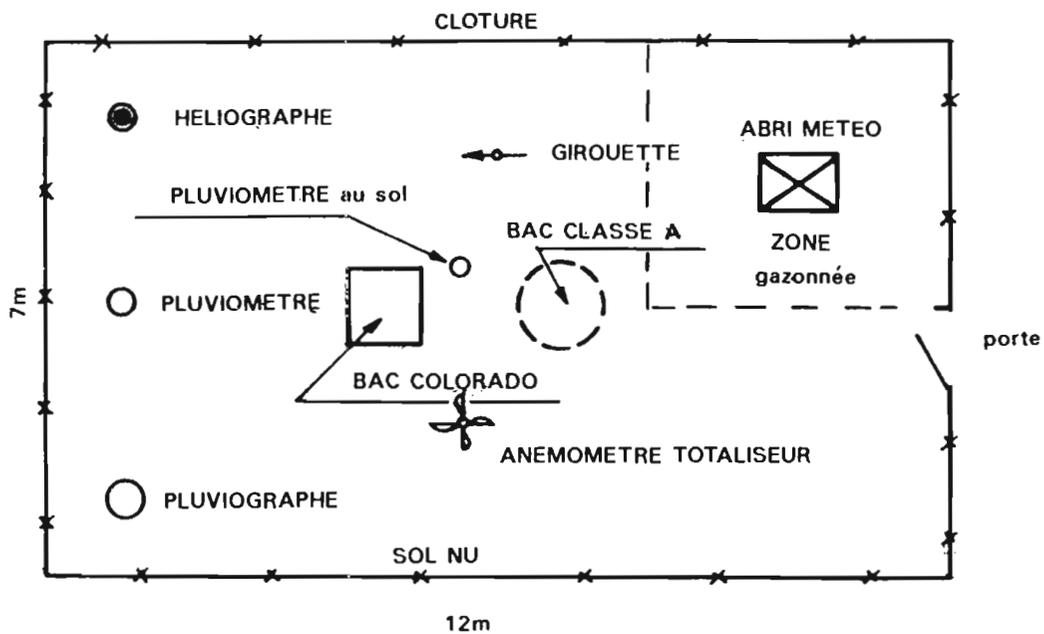
Un thermographe et un hygrographe peuvent compléter le dispositif.

- une série de pluviomètres et un pluviographe,
- un bac d'évaporation,
- un anémomètre et une girouette (ou, éventuellement, un anémographe directionnel),
- un héliographe.

2.3.1. PRINCIPES D'INSTALLATION

Le site retenu pour l'installation de la station doit être plat et dégagé, de telle manière que les observations des différents instruments soient le moins possible perturbées par le milieu environnant immédiat (rideau d'arbres, cultures, constructions diverses, cours d'eau, mare), excepté si l'objectif de l'étude consiste, précisément, à étudier un environnement particulier (bas fond, mare ou lac par exemple [528]). Les obstacles devront être éloignés, d'au moins trois fois leur hauteur, des limites du parc matérialisées par une clôture à claire voie (grillage à larges mailles), haute de un mètre.

Les dimensions de la station n'ont pas fait l'objet de normalisation. Elles peuvent varier de moins de 100 m² (par exemple, 7 m x 12 m, cf. fig. 53 et photo 21) à 400 m² (20 m x 20 m).



échelle 1/100

Fig-53- PLAN SCHEMATIQUE D'UNE STATION CLIMATOLOGIQUE AUXILIAIRE

(D'APRES J.CALLEDE)

Pour éviter la réverbération sur le sol nu et les rayonnements parasites qui en résultent, le terrain devrait être gazonné ou tout au moins enherbé (la hauteur du tapis devant se situer entre 10 et 25 cm). Toutefois, les conditions climatiques rendent parfois difficile, voire impossible, le respect de telles normes. Il importe donc de préciser les conditions dans lesquelles les observations sont effectuées. Si leur but est de quantifier les caractéristiques de l'environnement naturel du bassin étudié, le sol pourra être laissé en l'état. Si, au contraire, des études comparatives doivent être effectuées avec d'autres stations (du réseau météorologique national, par exemple), un protocole d'installation et d'exploitation plus contraignant devra être respecté.

2.3.2. ABRI METEOROLOGIQUE

L'abri météorologique peut être en bois ou en plastique, mais de préférence du même type que celui installé dans les stations météorologiques officielles les plus proches (photo 22).

Généralement de section horizontale d'environ 80 x 50 cm, il doit être fixé sur un support de telle sorte que les capteurs qu'il renferme soient situés entre 1,25 m et 2 m au dessus du sol (normes OMM). Dans l'hémisphère Nord, les portes sont orientées face au Nord, afin que le rayonnement solaire direct ne puisse pénétrer (c'est le contraire dans l'hémisphère Sud).

Les dimensions minimales du terrain sur lequel peut être installé un abri sont de 9 mètres sur 6 mètres.

2.3.3. MESURES DE LA TEMPERATURE DE L'AIR

2.3.3.1. THERMOMETRES

L'unité de mesure de la température est le degré Celsius. Certaines formules utilisent, toutefois, le degré Fahrenheit dont la relation avec le degré Celsius est : $^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$.

Le principe de fonctionnement des thermomètres classiques est basé sur la dilatation d'un liquide (mercure ou alcool). Les bilames et les tubes de Bourdon ne sont utilisés que pour les thermomètres enregistreurs. Les mesures électriques par thermocouples, qui nécessitent un appareillage fragile et onéreux, ne sont utiles que si des résultats très précis sont vraiment indispensables.

Indépendamment du dispositif utilisé, une mesure ne peut être représentative que si le capteur est mis en équilibre thermique avec le milieu ambiant, ce qui nécessite une ventilation satisfaisante de l'abri et une protection suffisante contre les radiations solaires directes ou indirectes. La lecture des thermomètres s'effectue donc immédiatement après l'ouverture de l'abri, avant que les effets des rayonnements, en provenance de l'extérieur ou simplement émis par l'observateur lui-même, ne soient perceptibles. Ce dernier ne doit pas s'approcher de trop près des appareils, en évitant, cependant, les erreurs de parallaxe.

Pour les études sur BVRE, trois relevés par jour sont dans la plupart des cas suffisants : 06, 12 et 18 heures TU (Temps Universel de Greenwich - Norme OMM.). Suivant les pays d'Afrique, la correspondance entre heure TU et heure légale est la suivante :

- l'heure légale correspond à l'heure TU en : Algérie, Burkina-Faso, Côte-d'Ivoire, Gambie, Ghana, Guinée, Guinée Bissau, Libéria, Mali, Maroc, Mauritanie, Sénégal, Sierra Leone, Togo ;
- l'heure légale est en avance d'une heure sur l'heure TU en : Angola, Bénin, Cameroun, Congo, Gabon, Guinée équatoriale, Niger, Nigéria, République Centrafricaine, Tchad, Tunisie, Zaïre.

Certains thermomètres sont gradués en 1/2 ou 1/5 de degré, d'autres plus précis en 1/10 de degré. L'observateur doit donc être capable d'interpoler entre deux graduations et d'éviter des confusions en cas de changement d'instrument. On se contente souvent d'une précision de 0,2 degré.

Le *thermomètre à maximum* est un thermomètre à mercure comportant un étranglement à la base de la colonne.

PHOTO - 21



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Station climatologique - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 22



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Abri météorologique - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 23



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Intérieur d'un abri météorologique - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 24



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Bac d'évaporation "Colorado" modifié Orstom - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 25



CLICHÉ: A. LARAQUE

Bac d'évaporation de classe A - Sumé - (Brésil)

PHOTO - 26



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Thermomètre flottant - Bidi - (Burkina-Faso)

Il est installé sur une planchette, la tige légèrement inclinée (de 4 à 5 degrés), le réservoir vers le bas (photo 23). Après l'unique observation de la journée, effectuée le soir, la colonne de mercure est abaissée en secouant vigoureusement le thermomètre, réservoir en bas, suivant la ligne idéale prolongeant la tige, ou en le frondant à une distance suffisante de tout obstacle. Il n'est pas indispensable de ramener toute la colonne dans le réservoir, il suffit qu'elle indique une température sensiblement inférieure au maximum susceptible d'être observé le jour suivant.

Le *thermomètre à minimum* (photo 23) est un thermomètre à alcool dont la colonne, lorsqu'elle descend, entraîne un index coloré grâce à la tension superficielle du liquide, et le laisse en place lorsqu'elle remonte. La température minimale est donnée par l'extrémité supérieure de l'index, c'est-à-dire l'extrémité opposée au réservoir. A l'instant de la lecture, la colonne indique la température du moment et doit donc être en concordance avec celle lue sur le thermomètre à mercure. Pour que l'index ne puisse se déplacer sous l'effet de son propre poids, le thermomètre à minimum est lui aussi fixé sur un support, la tige légèrement inclinée.

Après la lecture effectuée lors des observations du soir, le thermomètre à minimum est basculé afin de ramener l'index sur la colonne d'alcool.

Fréquemment, la colonne des thermomètres à maximum, et surtout des thermomètres à minimum, se fractionne, soit au cours des transports, soit à la suite de manipulations. Les lectures effectuées sont dès lors erronées. Pour les ramener à des conditions normales de fonctionnement, les thermomètres à maximum peuvent être simplement "frondés" en utilisant l'oeillet de fixation. Pour les thermomètres à minimum, la faible densité de l'alcool rend ce système inefficace. Il faut chauffer le réservoir après avoir, au préalable, fait descendre l'index en frondant l'appareil de façon à ce que la colonne remonte jusqu'à l'extrémité de la tige où se situe une petite chambre d'expansion. Il faut, ensuite, rapidement arrêter la montée de la colonne en plongeant le réservoir dans de l'eau froide. Plusieurs manoeuvres sont parfois nécessaires.

2.3.3.2. THERMOGRAPHE

Le capteur utilisé en thermographie est constitué par un tube de Bourdon ou, plus généralement, par un bilame réalisé par la soudure à plat de deux lames de métaux dont les coefficients de dilatation sont les plus différents possible. Lors d'une variation de température, les différences de dilatation de chaque lame créent des contraintes qui entraînent une déformation du bilame. Ces déformations, après amplification mécanique, sont inscrites sur un diagramme entraîné par une horloge.

Lors de son installation, il convient de faire coïncider l'indication de température donnée par l'appareil avec celle des thermomètres (des vis de réglage sont prévues à cet effet).

Pour un même appareil, plusieurs gammes d'utilisation sont proposées. Il est donc important de s'assurer que le diagramme utilisé correspond à la plage choisie.

L'appareil est installé sur le plancher de l'abri météorologique.

2.3.3.3. THERMOMETRE-ENREGISTREUR A DISTANCE

Lorsque l'enregistreur ne peut être placé sur le site d'observation (mesure de la température de l'eau, du sol, etc.), il est nécessaire d'utiliser un thermographe dont le capteur est placé à l'extrémité d'un câble pouvant atteindre plusieurs mètres de longueur.

2.3.4. MESURE DE L'HUMIDITE DE L'AIR

L'humidité relative de l'air est le rapport, exprimé en pour-cent, entre le rapport r de mélange de l'air et le rapport r_w du mélange saturant, dans les mêmes conditions de température t et de pression p .

$$U = (r / r_w) \cdot 100$$

$$\text{ou} \quad U = (e / e_w) \cdot (p - e_w) / (p - e) \cdot 100$$

- e étant la tension de vapeur d'eau contenue dans l'air à la température t,
- ew la tension de vapeur saturante (ou maximale) à cette même température.

Dans la pratique, le facteur $(p - ew) / (p - e)$ est très proche de 1 et on admet que $U = (e / ew) \cdot 100$ (la différence sur U n'étant que de quelques centièmes).

Le rapport e / ew peut être évalué, avec une bonne précision, en mesurant la température de l'air ambiant et celle d'un thermomètre dont le réservoir est constamment recouvert d'une fine pellicule d'eau. L'ensemble des deux thermomètres sec et humide s'appelle psychromètre.

A partir de la loi de Dalton, Regnault a établi la relation :

$$U \% = 100 \cdot [ew (Th) - A \cdot P \cdot (Ts - Th) / 1000] / ew (Ts)$$

P est la pression atmosphérique,

ew (Th) et ew (Ts) sont les tensions de vapeur saturante à la température Th donnée par le thermomètre humide, et Ts donnée par le thermomètre sec (c'est-à-dire la température de l'air ambiant),

A est le coefficient psychrométrique qui dépend du type de psychromètre, du taux de ventilation, de la température et de l'humidité. Le rôle de la ventilation est important, particulièrement pour des taux faibles. Pour des taux supérieurs ou égaux à 3 - 5 m/s, A reste pratiquement le même. Ainsi, pour tous les psychromètres bien conçus A est égal à 0,66. Sa dépendance vis-à-vis de la température et de l'humidité devient alors insignifiante.

Si la station d'observation est située à une altitude inférieure à 1 000 mètres, la pression P peut être considérée comme constante.

Pour de plus amples informations, on consultera les documents spécialisés publiés par l'Organisation Météorologique Mondiale - OMM - (553).

Les observations sont effectuées aux mêmes heures que celles de la température : 06, 12 et 18 H TU.

2.3.4.1. PSYCHROMETRE A VENTILATION NATURELLE

Fixé à l'intérieur de l'abri météorologique (photo 23), ce type de psychromètre se compose de deux thermomètres ordinaires, dont l'un est équipé d'un dispositif d'humidification constitué par une mousseline entourant le bulbe, alimentée par une râche trempant dans un réservoir rempli d'eau pure. La mousseline doit rester parfaitement propre.

La lecture des deux thermomètres doit être rapide et quasi simultanée, en commençant par le thermomètre humide.

Cet appareil présente l'inconvénient d'avoir une ventilation qui dépend du type d'abri et qui, surtout, n'est pas constante.

2.3.4.2. PSYCHROMETRE A VENTILATION FORCEE

La ventilation est assurée par une petite turbine actionnée par un moteur mécanique qui aspire l'air extérieur et le fait passer sur les deux bulbes à une vitesse de 5 à 6 m/s. L'équilibre thermique est atteint en deux minutes.

2.3.4.3. HYGROMETRE ENREGISTREUR OU HYGROGRAPHE

L'organe sensible des hygrographes est un faisceau de cheveux dont l'allongement est fonction de l'humidité relative. Cet allongement est amplifié de telle manière que les variations du stylet enregistreur sur un

diagramme soient proportionnelles aux variations d'humidité.

Il est installé dans l'abri météorologique, et sa mise en oeuvre est très voisine de celle du thermographe. Certains constructeurs proposent des appareils appelés Thermo-hygrographes (photo 23).

2.3.4.4. ATMOMETRES

Les atmomètres sont destinés à mesurer le pouvoir évaporant de l'air sur une surface poreuse mouillée constituée, soit par des sphères, des cylindres ou des plaques de porcelaine poreuse, soit par des rondelles de papier filtre comme dans le cas de l'évaporomètre Piche. Ce dernier instrument, très communément utilisé, se compose d'un tube de verre cylindrique gradué en millimètres, dont l'extrémité est fermée par un disque de papier buvard, de 30 mm de diamètre, maintenu à l'aide d'une pince en laiton. Rempli d'eau distillée ou d'eau de pluie, il est suspendu à l'intérieur de l'abri météorologique (photo 23).

Les observations sont effectuées deux fois par jour, le matin à 6 H TU pour mesurer l'évaporation de la nuit, le soir à 18 H pour l'évaporation diurne.

Ces instruments présentent l'avantage d'être maniables et bon marché. Il n'existe cependant pas de critères satisfaisants d'exposition (à laquelle ils sont très sensibles) et les dépôts de poussière sur les surfaces évaporantes faussent sensiblement les relevés. Les disques de papier doivent donc être changés très fréquemment. L'évaporomètre Piche est, en outre, très sensible aux variations de vitesse du vent. Les résultats obtenus ont donc peu de rapport avec l'évaporation effective constatée sur les surfaces naturelles ; des formules correctrices (formule de Bouchet, par exemple) ont, cependant, été proposées.

2.3.5. BATTERIE DE PLUVIOMETRES ET PLUVIOGRAPHES

La mesure des précipitations a été traitée au chapitre 2.1. Il faut néanmoins rappeler que si la station climatologique, par la présence d'un observateur qualifié, est un site privilégié pour obtenir des observations de bonne qualité et donc mener à bien des études pluviométriques détaillées et précises (installations d'appareils à différentes hauteurs au dessus du sol, étude comparative de différents types d'appareils, etc.), ses conditions d'installation (vaste site bien dégagé, exposé au vent) ne sont pas propices à de bonnes mesures de la pluie.

Si plusieurs pluviomètres ou pluviographes sont installés côte à côte, ils doivent être séparés, les uns des autres, d'une distance de quatre mètres suivant une perpendiculaire à l'axe des vents dominants.

2.3.6. BACS EVAPORATOIRES

Les bacs évaporatoires, d'emploi largement répandu, servent de base à plusieurs méthodes d'évaluation de l'évaporation des étendues d'eau naturelles ou artificielles, ainsi que de l'évapotranspiration.

L'évaporation est simplement mesurée en observant le changement de niveau de la surface d'eau libre dans le bac. Pour essayer de se rapprocher le plus possible des conditions régnant sur une grande étendue d'eau, il faut, contrairement à ce qui se passe pour les atmomètres, rechercher à augmenter le plus possible l'inertie thermique.

Sachant que les résultats obtenus en différents sites ne sont comparables que pour un même type de bac installé dans un environnement similaire, il y aura grand intérêt à utiliser l'appareil d'emploi le plus courant dans la zone d'étude.

Les bacs peuvent être exposés de trois manières différentes :

- *enterrés* : la plus grande partie du réservoir se trouve au dessous du niveau du sol, et la surface évaporante est sensiblement au même niveau que le terrain ;
- *au-dessus du sol* : le bac tout entier et donc la surface évaporante sont légèrement surélevés par rapport au terrain ;

- *sur l'eau* : le bac est monté sur une plate-forme flottante ancrée.

Bien évidemment, seuls les deux premiers types d'appareils peuvent être installés à l'intérieur du périmètre d'une station climatologique.

2.3.6.1. BAC "COLORADO"

La bac type "Colorado" est un bac enterré nord-américain, dont la surface évaporante est de forme carrée de 3 pieds de côté (0,925 m). Sa profondeur varie de 1,5 à 3 pieds, le rebord se situe à 4 pouces (10 cm) au dessus du terrain, l'eau affleurant sensiblement au niveau du sol.

De nombreux pays d'Afrique Francophone ont adopté ce type de bac, à peine modifié par le Service Hydrologique de l'Orstom. Sa section est de 1 m² (1 m x 1 m), la hauteur totale est de 60 cm, le bord supérieur dépassant le niveau du sol de 10 cm ; la hauteur d'eau dans le bac est de 50 cm (photo 24 et fig. 54).

Il peut être confectionné en tôle d'acier de 20/10 mm, et ceinturé d'une cornière de 30 mm, soudée 10 cm en dessous du bord supérieur (marque du niveau du sol). Il est peint en gris mat, après avoir reçu au moins deux couches de peinture anti-corrosion. Des bacs en plastique teinté dans la masse peuvent, également, être utilisés. Une pointe de mesure est soudée dans un angle à 5 cm des parois latérales et calée à 10 cm au-dessous du rebord. Une plaque en tôle, également soudée aux parois, forme un puits de tranquillisation triangulaire, sans fond. La surface évaporante étant de 1 m², chaque millimètre évaporé équivaut à 1 litre d'eau.

Les observations sont faites deux fois par jour pour mesurer, comme dans le cas de l'évaporomètre Piche, l'évaporation de la nuit (mesure de 6 H) et l'évaporation diurne (mesure de 18 H) :

- En l'absence de précipitation, il suffit, à l'aide d'une éprouvette graduée, de 1 litre de capacité, de rajouter de l'eau dans le bac jusqu'à ce que le niveau d'eau affleure la pointe de mesure. Si le niveau est trop bas, on observe deux "pointes" séparées (la pointe et son image dans l'eau). Dès que l'eau affleure, elle forme un ménisque très visible autour de la pointe. La mesure est parfois faite en nombres entiers de litres, ce qui permet de n'utiliser qu'une simple bouteille, plus facile à se procurer ou à remplacer, et moins fragile qu'une éprouvette. Un étalonnage préalable reste indispensable.
- A la suite d'un épisode pluvieux, il est nécessaire de décompter le volume d'eau apporté par la pluie. La solution la plus simple consiste à installer, à proximité du bac, un pluviomètre dont la surface réceptrice est calée à la même hauteur que les rebords de l'évaporomètre (10 cm au dessus du niveau du sol). Toutefois, la variabilité des observations pluviométriques, due à l'aire et à la forme de la surface de captation ainsi qu'aux conditions environnementales des appareils, rend très imprécise le calcul de l'évaporation.

Certaines solutions ont été suggérées et testées :

- Partant de l'hypothèse que lors d'une pluie l'évaporation est quasi nulle, le bac peut être recouvert durant toute la durée de l'événement. Il s'agit d'une solution très contraignante.
- Un dispositif composé de deux bacs identiques, l'un fonctionnant normalement (bac 1), l'autre étant recouvert d'une pellicule d'huile interdisant l'évaporation (bac 2).

En l'absence de précipitation, le niveau du bac 2 ne varie pas et l'évaporation est mesurée par le complément d'eau à apporter au bac 1 pour le remettre à niveau.

Lors de précipitations, deux situations sont possibles :

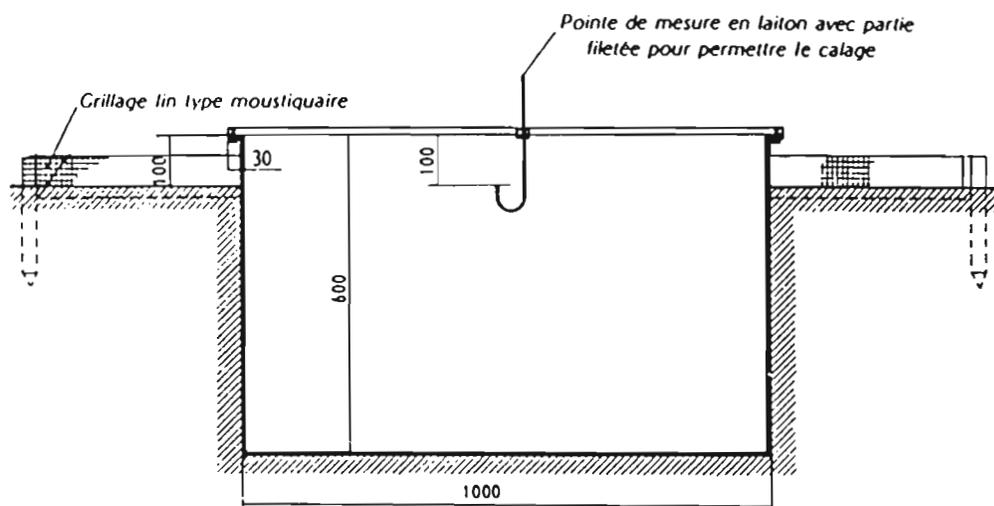


Fig-54 - BAC ENTERRE TYPE ORSTOM (D'APRES M.ROCHE)

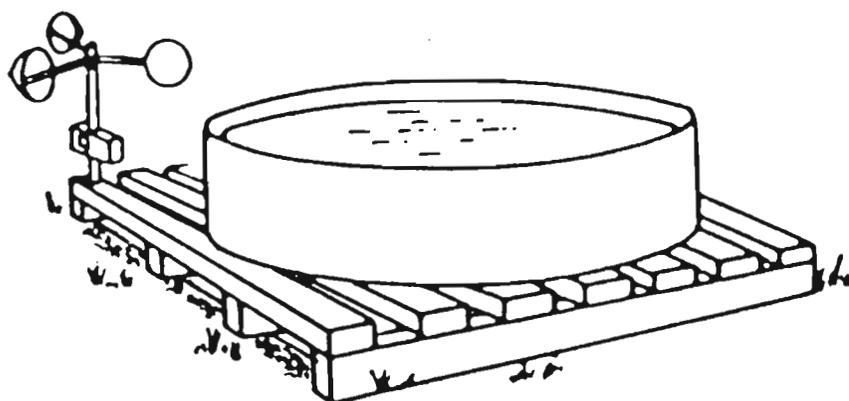


Fig-54a - BAC DE CLASSE A - U.S WEATHER BUREAU (D'APRES J.P.BRUNEL)

- . la hauteur précipitée est inférieure à la hauteur évaporée. Cette dernière est alors égale au complément d'eau à rajouter dans le bac 1, auquel on additionne le volume d'eau retirée du bac 2 ;
- . la précipitation est supérieure à l'évaporation qui est alors égale au volume d'eau retiré du bac 2, auquel on retranche le volume d'eau retiré du bac 1.

D'autres systèmes ont été proposés. Toutefois, leur degré de complexité rend leur utilisation impossible dans le cadre d'études sur BVRE ruraux. On peut citer le dispositif, réalisé à Brazzaville (Congo) par R. Chartier (508), consistant à repérer avec précision la hauteur d'eau dans le bac, juste avant la pluie.

2.3.6.2. BAC "DE CLASSE A"

Le bac "de classe A" du Weather Bureau nord-américain est le plus employé de par le monde. Il est de forme circulaire de 4 pieds (121,9 cm) de diamètre et de 10 pouces de profondeur (25,4 cm). L'eau doit affleurer entre 2 et 3 pouces (5,1 et 7,6 cm) du rebord de l'appareil. Il repose sur des caillebotis en bois, le fond étant placé à 6 pouces (15,2 cm) au-dessus du sol. De la terre est ensuite remblayée jusqu'à 1 pouce en-dessous du fond, de manière que l'air puisse circuler librement (photo 25 et fig. 54a). Il est construit en tôle galvanisée, en cuivre ou en monel et il n'est généralement pas peint. Les mesures sont effectuées dans un puits de tranquillisation, de 4 pouces de diamètre et d'un pied de hauteur, comportant un petit trou de communication à sa partie inférieure.

Bien que ce bac constitue un standard quasi universel ayant fait l'objet de nombreuses études sous des latitudes et à des altitudes très différentes, il répond assez mal (faible profondeur, faible inertie thermique, etc.) aux renseignements recherchés.

2.3.6.3. BACS EVAPORATOIRES ENREGISTREURS

L'automatisation des mesures d'évaporation sur bac a fait l'objet de recherches qui n'ont souvent débouché que sur la construction de prototypes, sans qu'aucun appareil ne parvienne, de par ses qualités (fiabilité, robustesse, simplicité de fonctionnement), à s'imposer.

Le principe de base consiste à maintenir constant le niveau d'eau du bac. Le dispositif doit donc permettre, soit de rajouter de l'eau (évaporation), soit d'en retirer (précipitations). Le rajout peut se faire à l'aide d'un réservoir en charge dont l'ouverture est contrôlée (par un flotteur, par exemple), le retrait étant effectué par pompe (électrovanne ou électropompe) ou simplement par gravité.

Les entrées et sorties peuvent être enregistrées par un dispositif de mesure des volumes d'eau, soit simplement à l'aide d'un limnigraphe suffisamment sensible, soit en utilisant un système à augets basculeurs, très pratique pour effectuer des enregistrements sur mémoires informatiques.

2.3.6.4. INSTALLATION ET MAINTENANCE

L'installation des bacs demande un certain nombre de précautions. Ils doivent être, tout d'abord, placés parfaitement horizontaux. Soumis à des phénomènes dans lesquels interviennent la température, l'humidité, les précipitations et le vent, ils doivent être éloignés autant que possible de l'abri météorologique, en restant sous le vent dominant. Si les conditions locales (climat, sol) ne permettent pas d'entretenir une couverture gazonnée ou herbacée, le sol sera maintenu dans son état naturel. Il faut éviter les supports en béton, les surfaces cimentées ou recouvertes de graviers. Des inspections régulières doivent être effectuées pour vérifier l'étanchéité des appareils : aisées pour les bacs de classe A, elles sont plus délicates pour les bacs "Colorado" qu'il sera prudent de déterrer une fois l'an, principalement s'il s'agit de bacs métalliques qui pourront, à cette occasion, être repeints. L'eau sera maintenue propre en effectuant des nettoyages, aussi fréquemment qu'il est nécessaire, pour éviter l'accumulation de débris divers (végétaux, insectes, etc.), le dépôt de sédiments, la formation d'écume, etc. L'introduction d'une petite quantité de sulfate de cuivre empêche la croissance d'algues. Dans les régions arides ou tropicales, il est souvent nécessaire de protéger les bacs contre les petits animaux (reptiles, batraciens, oiseaux, etc.). Un grillage fin de type "moustiquaire", fiché en terre et dépassant la surface du sol de 8 à 10 cm, peut être installé tout autour de l'appareil (fig. 54). Il est important que le système de protection utilisé ne joue pas le rôle d'écran, le remède étant alors pire que le mal. L'emploi de substances chimiques répulsives est encore plus délicat.

2.3.6.5. MESURES CONNEXES

Lors de l'exploitation des bacs d'évaporation, il convient d'y associer des mesures de température de l'eau et du vent.

2.3.6.5.1. TEMPERATURE DE L'EAU

La grande inertie thermique de l'eau rend inutile l'emploi de thermomètres à maximum et à minimum. Des mesures périodiques (6-12 et 18 H TU, par exemple) sont effectuées à l'aide d'un thermomètre ordinaire complètement immergé et tenu horizontalement par un support, ou un flotteur en liège ou en polystyrène (photo 26).

Pour enregistrer les variations de température en continu, l'emploi d'un thermographe à distance est nécessaire.

2.3.6.5.2. VENT

Pour les besoins hydrologiques, la mesure du vent, en relation essentiellement avec les phénomènes d'évaporation, se limite fréquemment à des observations faites entre 0,5 et 2 mètres au-dessus du sol.

Pour être significative, cette mesure doit être faite en terrain découvert, où tout obstacle est séparé du point d'observation, d'une distance au moins égale à 10 fois sa hauteur.

Le vent en surface peut être considéré comme une quantité vectorielle bidimensionnelle définie par deux valeurs représentant, respectivement, la direction et la vitesse :

- *Direction*

La mesure de la direction du vent s'effectue généralement plusieurs fois par jour, à l'aide d'une girouette, aux mêmes horaires que les autres observations. Elle est portée sur une rose des vents à huit (N, NE, E, SE, S, SW, W, et NW), ou parfois à seize directions. Par convention la direction indiquée est celle d'où vient le vent.

Les girouettes enregistreuses permettent de connaître la direction du vent à chaque instant, le dépouillement des observations se faisant simplement par pointage sur le diagramme.

- *Vitesse*

Les anémomètres à main ne sont cités que pour mémoire. Les appareils les plus couramment utilisés sont les anémomètres totaliseurs, constitués d'un moulinet à coupelles ou à pales relié à un compte tours (photo 27).

Relevé à heures fixes (6 H, 12 H, 18 H. TU), le compteur permet de calculer par différence la distance parcourue D entre deux relevés séparés par un temps T et donc de calculer une vitesse moyenne $V = D / T$ (exprimée, en m/s).

Certains appareils permettent d'enregistrer, simultanément, la vitesse instantanée et la direction (anémographes directionnels). De tels instruments sont précieux pour connaître les vitesses maximales instantanées et leur direction ; par contre, le calcul des vitesses moyennes, sur un intervalle de temps donné, doit être fait par intégration de la courbe d'enregistrement.

PHOTO - 27



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Anémomètre - Bidi - (Burkina-Faso) -

PHOTO - 28



CLICHÉ: J. M. LAMACHERE

Bac d'évaporation flottant - Bidi - (Burkina-Faso) -

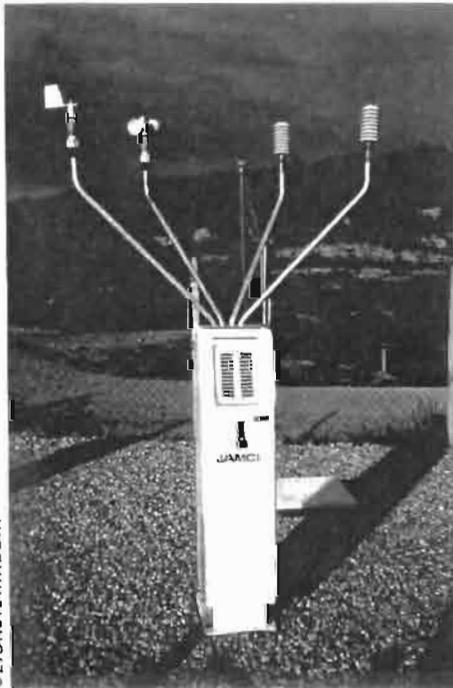
PHOTO - 29



CLICHÉ: J. F. NOUVELOT

Héliographe Campbell-stokes - Bidi - (Burkina-Faso) -

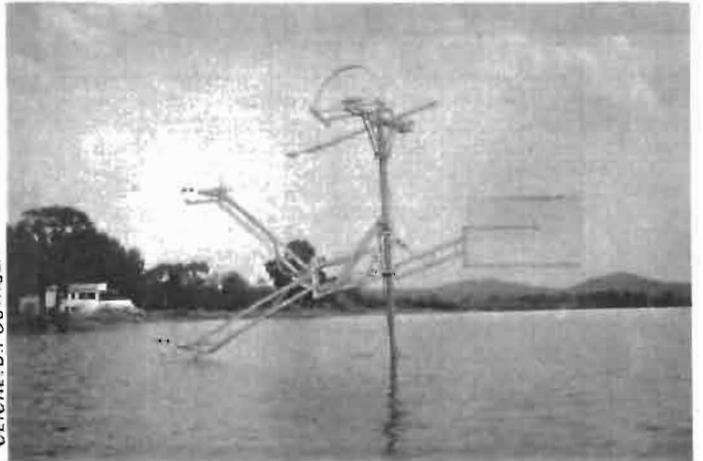
PHOTO - 31



CLICHÉ: E. RABBIA

Station climatologique automatique
- La Jasse - (France) -

PHOTO - 30



CLICHÉ: B. POUYAUD

Mesure des paramètres de l'évaporation
- Mare d'Oursi - (Burkina-Faso) -

2.3.6.6. BAC D'EVAPORATION FLOTTANT

Lorsque les mesures ont pour objectif l'évaluation de l'évaporation sur une étendue d'eau, il est logiquement préférable d'immerger partiellement le bac en le maintenant par des flotteurs, de manière que les niveaux d'eau dans le bac et la retenue se situent à 10 cm en dessous des bords supérieurs.

Devant les difficultés d'exploitation (accès délicats, instabilité du dispositif, présence de vaguelettes pouvant provoquer des éclaboussures dans le sens de la retenue vers le bac ou vice-versa) les hydrologues ont, après quelques tentatives, longtemps renoncé à utiliser ce type d'appareil. Toutefois, un modèle expérimenté avec succès par l'Orstom sur la Mare d'Oursi (Burkina-Faso) est opérationnel depuis 1978, et semble donner entière satisfaction (503). Il est constitué d'un bac en tôle d'acier de 20/10 mm, d'une ouverture de 1 m² et de 0,30 m de profondeur. Ceinturé d'une cornière de 30 mm soudée 10 cm en dessous du bord supérieur, il s'encastre dans un châssis de 1,50 x 1,50 x 0,40 m réalisé en tube serrurier rectangulaire de 20 x 35 mm. Dix arceaux sont fixés sur les côtés à l'aide de boulons, et des fentes percées sur les montants en fer plat du châssis permettent d'ajuster leur hauteur suivant un débattement vertical de 8 cm. Les flotteurs en plastique sont de forme cylindrique (bidons d'huile de 29 cm de diamètre et 36 cm de hauteur - fig. 54b et photo 28).

L'ancrage est réalisé en jetant un corps mort d'une cinquantaine de kg, attaché par une chaîne à l'un des coins du cadre inférieur du châssis. L'accès peut se faire à l'aide d'une embarcation, d'une passerelle ou d'un ponton si l'appareil est proche de la berge.

2.3.7. DUREE D'INSOLATION

La durée d'insolation, définie comme le nombre d'heures, ou fractions d'heure, où le soleil brille, est mesurée à l'aide d'un héliographe. Il importe donc que le site d'installation soit tel que le soleil ne puisse être occulté par un obstacle, quelle que soit l'heure du jour ou la saison. En particulier, la hauteur des obstacles au-dessus de l'horizon, dans les zones de lever et de coucher du soleil, ne doit pas dépasser trois degrés.

Parmi les nombreux appareils disponibles : héliographes Jordan, Marvin ou de Foster, l'héliographe Campbell - Stokes est le plus communément utilisé. Il se compose d'une sphère de verre d'un diamètre de 10 cm environ, derrière laquelle est disposée une bande de carton soutenue par une monture concentrique, à une distance telle que son foyer optique se trouve sur la bande. Le carton est carbonisé au point où se forme l'image du soleil (photo 29). Apparaît, ainsi, une tâche noirâtre plus ou moins continue suivant les apparitions du soleil au cours de son mouvement diurne.

Le support de bandes porte trois systèmes de rainures dans lesquelles peuvent s'engager trois sortes de bandes, selon la période de l'année. Dans l'hémisphère Nord :

- bandes courbes longues (à placer dans les rainures inférieures), du 12 avril au 2 septembre (bandes d'été) ;
- bandes rectilignes (à placer dans les rainures médianes), du 2 mars au 11 avril et du 3 septembre au 10 novembre (bandes d'équinoxes) ;
- bandes courbes courtes (à placer dans les rainures supérieures), du 11 novembre au 1er mai (bandes d'hiver).

Le carton utilisé doit être de bonne qualité pour ne pas s'allonger sous l'effet de l'humidité ou de la pluie.

L'appareil est installé, sur un support fixe, à 1 mètre environ au dessus du sol. Placé horizontalement, il est orienté de telle manière qu'à 12 H (midi vrai, heure à laquelle le soleil passe au méridien) la carbonisation se fasse sur la ligne marquée XII sur le carton et également repérée sur la monture. En pratique, à l'aide d'une boussole, on aligne, dans la direction Nord-Sud géographique, le plan vertical passant par le repère XII du support et le centre de la sphère, puis la valeur de la latitude du site (relevée sur une carte) est affichée sur la monture en faisant basculer le support de la sphère. Si tous les réglages sont satisfaisants, les tracés de carbonisation doivent être parallèles aux lignes centrales des bandes d'enregistrement : un tracé symétrique qui n'est pas parallèle à la ligne centrale indique un réglage défectueux de la latitude, un tracé asymétrique est causé par un mauvais réglage de l'orientation et/ou un mauvais nivellement.

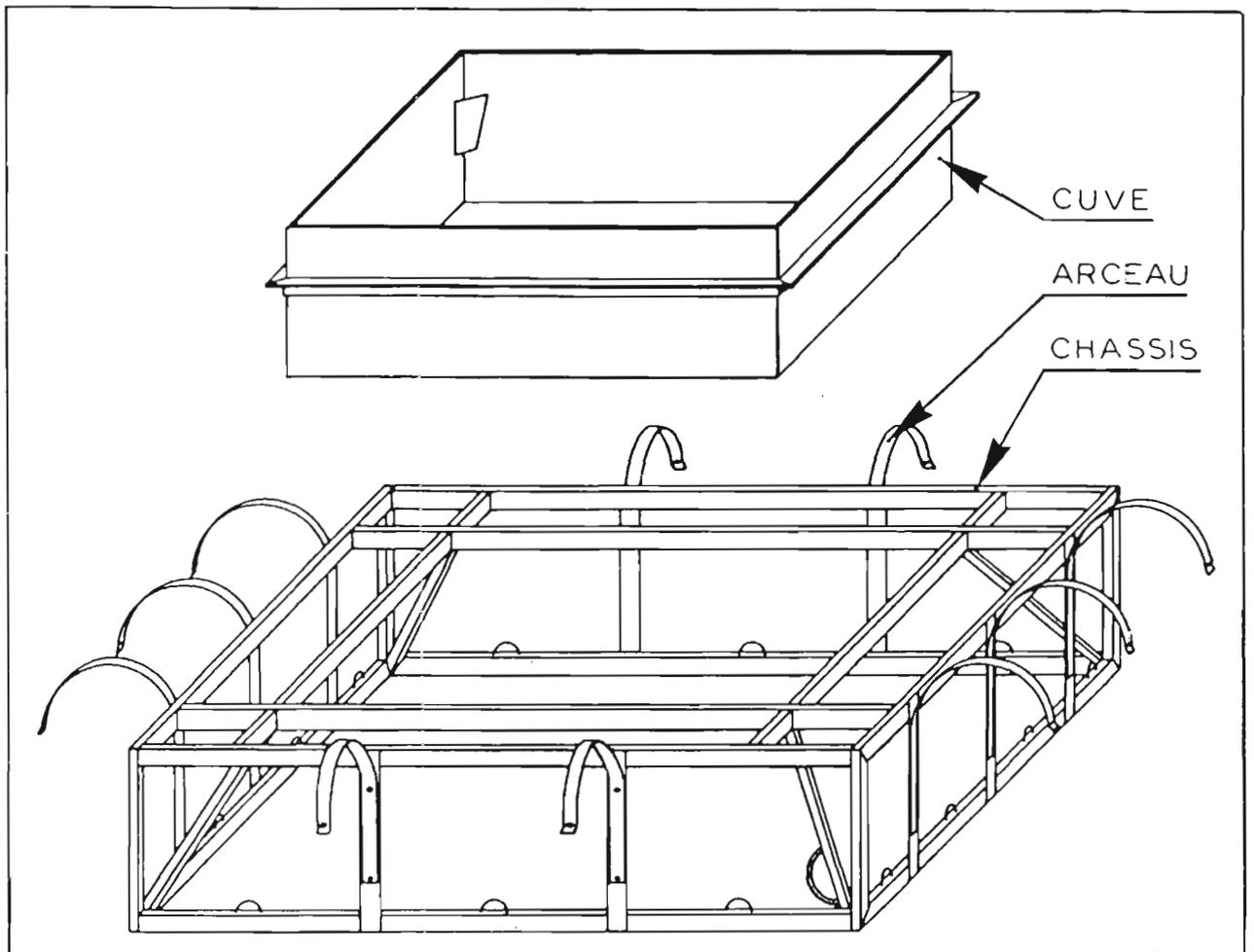


Fig-54b - BAC D'EVAPORATION FLOTTANT (D'APRES A.BERNARD)

La durée d'insolation est calculée, en heure et dixièmes d'heure, en mesurant la longueur carbonisée en mm, et en utilisant comme référence l'intervalle, également en mm, séparant deux traits horaires à hauteur de la carbonisation.

Si le tracé est nettement brûlé avec des extrémités arrondies, la longueur mesurée devra être réduite d'une valeur égale à la moitié du rayon de courbure de chacune des extrémités. On peut estimer que cela correspond à une réduction de 1/10 d'heure, de la longueur totale. Si la trace est étroite, toute sa longueur sera comptabilisée. Si elle présente des étranglements, on soustraira à la longueur totale 1/10 d'heure pour chacun d'entre eux.

2.3.8. RAYONNEMENT

La seule mesure de l'insolation peut paraître insuffisante pour les applications demandant une évaluation indirecte de l'évaporation ou de l'évapotranspiration. Cependant, la mesure systématique du rayonnement (solaire, terrestre ou global) ne peut être envisagée dans le cadre d'études sur BVRE. Si, certains dispositifs sophistiqués ont été exceptionnellement installés dans le cadre d'études particulières (Mare d'Oursi - Burkina-Faso ; photo 30), dans de nombreux cas, la solution adoptée a consisté à recourir à des formules empiriques qui permettent de calculer les différents termes du bilan radiatif à partir de la durée d'insolation.

2.3.8.1. RAYONNEMENT GLOBAL

La formule de Black permet d'estimer le rayonnement global journalier :

$$R_g = R_{go} \cdot (A + B \cdot S / S_o)$$

où :

S est la durée d'insolation mesurée à l'héliographe,

S_o la durée du jour,

R_{go} le rayonnement solaire à l'entrée dans l'atmosphère (J / cm⁻²),

A et B deux coefficients obtenus statistiquement, dont les valeurs varient suivant les zones climatiques.

Glover propose d'estimer ces deux constantes par les expressions suivantes :

$$A = 0,29 \cos \Phi \quad (\Phi \text{ étant la latitude})$$

et
$$B = 0,52$$

S_o et R_{go} sont des paramètres astronomiques qui dépendent de la latitude du lieu considéré et de la période de l'année. Leur valeur peut facilement être déterminée (527).

2.3.8.2. RAYONNEMENT ATMOSPHERIQUE

Le rayonnement atmosphérique peut être calculé par la formule de Brunt :

$$R_a = \sigma \cdot T^4 \cdot (a + b \cdot \sqrt{e})$$

où :

σ est la constante de Stefan - Boltzmann égale à 4,9.10⁻⁷ J. cm².°K⁴/j

T température moyenne sous abri, convertie en degrés Kelvin (°C = °K - 273,15)

e la tension de vapeur d'eau moyenne dans l'air, en mb

a et b des coefficients empiriques.

On adopte généralement : a = 0,44 et b = 0,08.

2.3.8.3. RAYONNEMENT NET

Pour déterminer le rayonnement net, Riou (534) propose la formule suivante :

$$R_n = (1 - a) \cdot R_g - \underbrace{\sigma \cdot T^4}_1 \cdot \underbrace{(0,4 - 0,05 \cdot \sqrt{e})}_2 \cdot \underbrace{(0,5 + 0,5 \cdot S / S_o)}_3$$

S, S_o, σ, T, e et R_g ont été définis antérieurement,

a est l'albédo, fonction de la réflectance de la surface du sol. D'après Brutsaert, les valeurs suivantes peuvent être adoptées :

Type de surface	Albédo
Eau profonde	0,04 - 0,08
Sols sombres humides ; champs labourés	0,05 - 0,15
Sols gris ; champs dénudés	0,15 - 0,25
Herbe verte et végétation basse	0,15 - 0,25
Prairie sèche et savane	0,20 - 0,30
Forêt	0,15 - 0,25

Au cours de l'année, des valeurs différentes pourront être utilisées en fonction des saisons.

Le terme 1 de l'équation de Riou représente le rayonnement terrestre.

Le produit : terme 1 x terme 2 représente le bilan des rayonnements de grandes longueurs d'onde.

Le terme 3 est un terme correctif qui permet de tenir compte de l'enneigement.

2.3.9. EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

L'évapotranspiration potentielle correspond à l'évapotranspiration d'un sol couvert d'une végétation en plein développement disposant de toute l'eau dont elle a besoin.

Il s'agit ici, comme souligné antérieurement (paragraphe 2.3.8.), uniquement d'évaluations indirectes.

2.3.9.1. FORMULE DE PENMAN

L'évaluation du rayonnement net permet le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) à l'aide de la formule de Penman (1948), que Riou (534) juge la mieux adaptée à l'Afrique tropicale.

Elle s'écrit :

$$ETP = [\delta / (\delta + \gamma)] \cdot R_n / L + E_a \cdot \gamma / (\delta + \gamma)$$

ETP : évapotranspiration potentielle, en mm/j.

L : chaleur latente d'évaporation de l'eau ($242 \text{ J} / \text{mm} \cdot \text{cm}^2$).

γ : constante psychrométrique fonction de la pression atmosphérique Pa (souvent prise égale à 960 mb) et du coefficient psychrométrique égal à 0,665 :

$$\gamma = 0,665 \cdot \text{Pa} / 1000$$

δ : dérivée, en fonction de la température, de la tension de vapeur d'eau saturante, pour la température moyenne sous abri T.

B. Pouyaud (528) propose de la calculer par la formule :

$$\delta = T^2 / 457 - T / 178 + 0,662 \text{ (en mb / } ^\circ\text{C)}$$

L'auteur pense que la température moyenne doit, de préférence, être calculée sur une période de 24 heures ; d'autres chercheurs suggèrent de ne considérer que la période diurne ; P. Chevallier (1104) propose de faire une simple moyenne arithmétique, en accordant un poids double à la valeur mesurée à midi.

Rn : rayonnement net au dessus de la surface évaporante, en $\text{J} / \text{cm}^2 / \text{jour}$, calculé comme expliqué précédemment (paragraphe 2.3.8.3.).

Ea : pouvoir évaporant de l'air qui représente l'évaporation, en mm / jour, d'une nappe d'eau fictive à la température de l'air sous abri T.

On admet que Ea suit une loi de la forme :

$$Ea = f(u) \cdot (E_w - e)$$

Equation de Dalton, où :

f(u) est une fonction de la vitesse du vent, pour laquelle Riou propose la relation :

$$f(u) = 0,24 \cdot U_{200}$$

(U_{200} étant la vitesse du vent à deux mètres du sol).

E_w : tension de vapeur d'eau saturante correspondant à la température T, estimée par B. Pouyaud au moyen de la formule :

$$E_w = T^3 / 1386 - T^2 / 286 + 0,71 \cdot T + 4,8$$

T étant la température moyenne définie antérieurement ;

e : tension de vapeur d'eau moyenne, en mb.

On peut également utiliser la relation :

$$Ea = 0,26 \cdot (1 + 0,54 \cdot U_{200}) \cdot (E_T - e)$$

avec :

E_T : pression maximale de vapeur d'eau, en mb, pour la température moyenne de l'air T ;

e : tension de vapeur d'eau moyenne, déjà définie.

2.3.9.2. BAC D'EVAPORATION

C. Riou (534) propose de calculer l'ETP à partir des observations faites sur un bac "Colorado" type Orstom :

$$ETP \simeq E_{\text{bac}} - \gamma \cdot E_a \cdot (\delta + 2\gamma)$$

E_{bac} étant l'évaporation sur bac, exprimée en mm.

Les autres paramètres ont été définis antérieurement.

2.3.10. AUTRES MESURES

2.3.10.1. TEMPERATURE DU SOL

Dans le cadre d'études menées en collaboration avec d'autres spécialistes (agro-climatologues, pédologues, agronomes), l'hydrologue peut être amené à mesurer la température du sol, en surface comme en profondeur.

En surface, ce sont surtout les températures extrêmes (maximales et minimales) qui font l'objet d'observations. Les thermomètres utilisés sont identiques à ceux installés dans l'abri météorologique : ils sont disposés horizontalement sur un petit support.

Pour les mesures effectuées à 5, 10 et 20 cm de profondeur, sont utilisés des thermomètres coudés, alors que les observations à - 0,5 m ; - 1 m ; - 1,5 m et - 2 m sont faites à l'aide de thermomètres plongeurs.

2.3.10.2. PRESSION ATMOSPHERIQUE

En Afrique intertropicale, les variations de la pression atmosphérique (marée barométrique) sont extrêmement régulières d'un jour à l'autre, et les zones d'altitude y sont très restreintes (Cameroun, Guinée). Des observations localisées et continues ne se justifient donc pas.

La pression atmosphérique normale est définie comme étant égale à 1013,2 mb, ce qui équivaut à 760 mm de mercure.

2.3.11. STATIONS CLIMATOLOGIQUES AUTOMATIQUES

Les énormes progrès faits dans le domaine de l'électronique ont permis le développement de technologies et de matériels nouveaux, tant pour l'observation ou l'enregistrement que pour la télétransmission (par radio, satellite, ou téléphone) des différents paramètres climatologiques.

Quels que soient les phénomènes observés, la centrale d'acquisition (ou station) est intégrée dans un abri, protégé thermiquement, où des logements permettent la fixation de différents mâts-supports de capteurs (photo 31).

Les capteurs de température et d'humidité de l'air sont placés dans de micro-abris. D'autres systèmes permettent de mesurer la direction et la vitesse du vent, l'insolation, le rayonnement, mais aussi les précipitations et la température du sol, sans que la liste soit limitative.

L'alimentation énergétique peut être rendue autonome par l'utilisation de batteries rechargées par des panneaux solaires.

L'enregistrement des mesures sur mémoires statiques, ou même de données ayant subies sur site un pré-

traitement (calcul de moyennes, d'extrêma ou de valeurs "seuils"), facilite grandement l'archivage en banques de l'information. Néanmoins, la mise en place et surtout le fonctionnement de telles installations demandent, sinon la présence, du moins la possibilité d'intervention rapide d'un personnel suffisamment qualifié. De telles contraintes peuvent difficilement être assumées dans le cadre d'études ponctuelles, menées dans des régions éloignées et difficiles d'accès.

2.4. EROSION MECANIQUE

2.4.1. LES DIFFERENTS PHENOMENES

Les précipitations et leur ruissellement sur le sol constituent, en Afrique intertropicale, la cause fondamentale de l'érosion mécanique, les autres facteurs (pente, nature du sol, couverture végétale, actions anthropiques) n'intervenant que pour limiter ou accélérer le processus. Néanmoins, d'autres phénomènes peuvent, dans certaines régions, avoir un impact non négligeable. C'est le cas de l'érosion éolienne observée dans les zones arides caractérisées par des sols dénudés riches en humus et des précipitations annuelles inférieures à 600 mm, suffisamment concentrées dans le temps pour que la saison sèche s'étende sur plus de cinq mois. Les études sur BVRE se prêtent mal à l'analyse de tels processus, pour lesquels la notion de bassin versant est dénuée de sens. Ce type d'actions restant tout de même limité et localisé à certaines régions septentrionales, seules les manifestations de l'érosion hydrique seront abordées dans ce chapitre.

Ces manifestations sont multiformes et résultent d'une action mécanique directe des précipitations, aussi bien que d'actions indirectes. La pluie en tombant fait éclater les agrégats du sol et déplace les particules, c'est l'érosion de rejaillissement ou de splash. Lorsque le ruissellement apparaît sur le sol, il intervient à la fois par sa force tractrice et par son action sur la cohésion des particules. Le transport des éléments ainsi arrachés se fait de différentes façons : suspension, saltation et roulement. Toutefois, l'écoulement superficiel présentant des caractéristiques différentes de l'amont vers l'aval, il en est de même de l'érosion induite.

2.4.1.1. EROSION AREOLAIRE

Le ruissellement diffus (sheet flood des auteurs américains) entraîne une érosion en nappe ou aréolaire. Après le passage d'une pluie, les signes observés ne sont pas très spectaculaires : accumulation de terre derrière les touffes d'herbe, apparition d'éléments grossiers à la surface du sol, accumulation d'éléments fins en bas des pentes (photo 32).

2.4.1.2. EROSION EN RIGOLES ET EN GRIFFES

L'érosion aréolaire s'observe rarement seule. L'existence d'une pente, même parfois très faible, et d'une certaine hétérogénéité du terrain (nature du sol, micro-accidents) font que les eaux de ruissellement se concentrent et creusent de petits chenaux qui se rassemblent en rigoles. Le terrain peut alors apparaître comme "griffé".

2.4.1.3. EROSION EN RAVINES

Au-delà des griffes, se manifeste l'érosion en ravines qui incise les couches plus profondes du sol, parfois jusqu'à la roche mère (photo 33).

La taille des ravines, tant en profondeur qu'en largeur, peut varier de 50 cm à plusieurs dizaines de mètres. Les agronomes considèrent qu'un travail mécanique peut facilement gommer un réseau de rigoles, mais que ça n'est plus possible pour un réseau de ravines.

Un ravinement généralisé aboutit à la formation de badlands. En milieu tropical, on peut citer la forme très spectaculaire de l'érosion en lavaka, répandue sur les Hauts plateaux malgaches.

2.4.1.4. EROSION LINEAIRE AU FOND DES COURS D'EAU ET SUR LES BERGES

Plusieurs thalwegs se rejoignant forment un ruisseau qui avec d'autres ruisseaux forment une rivière, etc. L'ensemble de ces cours d'eau qui constitue un réseau hydrographique hiérarchisé transporte les sédiments, ou pour le moins une partie de ceux-ci, provenant des zones situées plus à l'amont. La charge solide ainsi déplacée

dépend de la vitesse du courant, donc de l'énergie du cours d'eau. Si les apports de sédiments venant de l'amont sont faibles, l'énergie alors disponible permet l'érosion des berges et du fond du lit. C'est ainsi qu'est définie la capacité de transport d'un cours d'eau qui varie tout au long de son parcours. Par exemple, l'érosion dans un torrent, souvent très spectaculaire, se fait toujours de l'aval vers l'amont (érosion régressive) tant que le profil d'équilibre n'est pas atteint. Dans des zones plus planes, un faciès de méandres peut se développer sous l'action d'une érosion dite "verticale", car elle ronge les berges et provoque leur recul par des chutes successives de masses de terre.

Le transport des sédiments par les cours d'eau se fait, comme sur les versants, de différentes façons, ce qui permet de distinguer :

- La charge en suspension, constituée de matériaux dont la taille et la densité leurs permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. C'est souvent la seule fraction du débit solide qui puisse être mesurée assez aisément. Fort heureusement, dans la très grande majorité des cas, elle représente quantitativement un pourcentage très important du transport global.
- La charge de fond, formée de matériaux trop gros pour être mis en suspension compte tenu de leur densité et de la vitesse du courant. Ils roulent sur le fond ou se déplacent par translation.

Entre le transport par charriage sur le fond et le transport par suspension, on définit parfois le transport par saltation qui correspond à un déplacement des matériaux par bonds successifs.

2.4.1.5. AUTRES FORMES D'EROSION HYDRIQUE

- *Mouvements de masse*

L'eau agit non seulement par décapage plus ou moins rapide des couches pédologiques, mais aussi sur toute la profondeur du sol. En provoquant une augmentation de son poids et l'humectation d'un plan de glissement, elle favorise la formation d'écoulements boueux ou de glissements de terrain.

- *Dépôts de sédiments*

Terme du cycle de l'érosion, les dépôts de sédiments présentent très souvent un caractère temporaire. Autant que les autres phénomènes, ils interviennent dans le façonnement des paysages.

Une particule déplacée par une quelconque des forces d'érosion décrites précédemment peut se déposer après un cheminement plus ou moins long, puis être remise en mouvement dès la pluie suivante ou, au contraire, rester au même endroit des milliers d'années. De cette manière, toutes les particules arrachées aux versants n'atteignent pas les cours d'eau : les bas de pentes à l'extrémité d'un champ ou à l'aval d'une ravine sont des lieux privilégiés de dépôt, comme le sont, dans les réseaux hydrographiques, les vallées de montagne, les plaines à l'aval des lits pentus, les cônes de déjection, les plaines d'inondations ou les deltas à l'amont des lacs et des retenues artificielles.

2.4.2. METHODES DE MESURE

Phénomène discontinu, dans le temps comme dans l'espace, l'érosion peut être étudiée en considérant des échelles très différentes : de l'agrégat au bassin versant, de l'averse, ou du phénomène météorologique exceptionnel, aux bilans mensuels ou annuels. L'échelle de mesure et, par conséquent, les méthodes seront donc très liées aux objectifs poursuivis : échelle de l'agrégat ou du profil pour la pédologie, échelle du champ ou du petit bassin versant pour les problèmes agricoles, échelle du bassin versant moyen ou grand pour les études d'aménagement du territoire et d'infrastructures (ponts et chaussées, chemins de fer, hydro-électricité, etc.).

Par commodité, on différenciera :

- la mesure du détachement des éléments mobilisables,
- la mesure de l'ablation subie par les sols sur les interfluves,

PHOTO - 32

CLICHÉ: J.F. NOUVELOT



Érosion aréolaire - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 33

CLICHÉ: B. THÉBÉ



Érosion en ravines - Mouda - (Cameroun)

PHOTO - 34

CLICHÉ: B. POUYAUD



Partiteur de débit - (Équateur)

PHOTO - 35

CLICHÉ: B. POUYAUD



Dispositif expérimental de mesure de l'érosion sur parcelle

PHOTO - 37

CLICHÉ: J.F. NOUVELOT



Fosse à sédiments - Bidi - (Burkina-Faso)

PHOTO - 36

CLICHÉ: J.F. NOUVELOT



Délimitation d'un micro bassin - Bidi - (Burkina-Faso)

- la mesure des transports solides dans les cours d'eau.

En toute logique, les études de la détachabilité et de l'hydrodynamique des sols devraient être abordées simultanément. Cependant, pour des facilités de présentation, l'étude de l'eau dans le sol sera traitée dans un chapitre différent (paragraphe 2.6.).

2.4.2.1. EFFET DU SPLASH

Le splash est le rejaillissement consécutif à l'impact des gouttes de pluie sur le sol. Les éclaboussures qu'il provoque sont constituées d'eau et de particules solides.

Les chercheurs ont, dans ce domaine, orienté leurs travaux essentiellement vers des mesures en laboratoire (test de stabilité structurale de Hénin, travaux de Ellison). Des mesures de terrain peuvent, cependant, pour certains types de sols (entre autres les sols limoneux), présenter un intérêt non négligeable puisque les fines particules résultant de la destruction des agrégats sont facilement emportées par le ruissellement et contribuent à la formation d'un glçage qui à son tour favorise le ruissellement, et donc l'érosion.

Une méthode de mesure simple a été, dès le début des années 60, préconisée par F. Fournier. Elle consiste à placer, dans des trous creusés dans le sol à l'aide d'une tarière, des entonnoirs en verre, de telle façon que le bord supérieur du cône affleure et que la queue plonge dans une bouteille (fig. 55). L'eau de précipitation, l'eau et la terre du splash sont ainsi recueillies, en prenant garde de ne pas collecter l'eau de ruissellement. Le mélange terre-eau est ensuite séché à 105°, puis pesé. Le poids est exprimé en tonnes par hectare (T/ha), en prenant comme base de calcul la surface captante de l'entonnoir. Pour être significatif, le résultat doit représenter la moyenne de plusieurs mesures (5 au minimum). Cette méthode ne donne qu'une estimation globale du splash. Pour étudier également les distances de déplacement des particules, il est possible d'entourer chaque entonnoir de cylindres en tôle de 40 cm de hauteur (pour éviter l'action du vent) et de diamètres croissants, un entonnoir non protégé servant de témoin (618).

Pour éviter le débordement des bouteilles et l'obturation des queues d'entonnoirs par des débris végétaux ou de petits animaux, A. Bollinne (608) suggère d'utiliser un entonnoir de 5,2 cm de diamètre dans la queue duquel est placé un filtre imputrescible en verre frité, de 3 cm de diamètre. L'ensemble du dispositif est placé dans un trou cylindrique, suffisamment profond pour permettre l'évacuation de l'eau. L'appareil est pesé avant d'être installé, puis après chaque relevé, nettoyage des parties externes du dispositif et passage à l'étuve. Le poids de matériaux recueillis sur le filtre s'obtient simplement par différence.

2.4.2.2. ABLATION SUBIE PAR LES SOLS

La complexité des phénomènes a amené les chercheurs à effectuer dans des canaux, avec ou sans pluies simulées, des tests de résistance des matières solides au ruissellement (force de cisaillement). Néanmoins, les premières mesures au champ ont été réalisées sous pluies naturelles et sur parcelles.

2.4.2.2.1. PARCELLES ET MICRO-BASSINS VERSANTS

Parcelles et micro-bassins ont pour finalité de permettre, en de multiples conditions naturelles ou anthropiques :

- de mesurer le ruissellement et la perte en terre résultant de l'attaque du sol par l'eau,
- d'étudier les divers facteurs explicatifs de ces deux phénomènes,
- de mesurer l'efficacité conservatrice du couvert végétal, de techniques ou de systèmes culturaux.

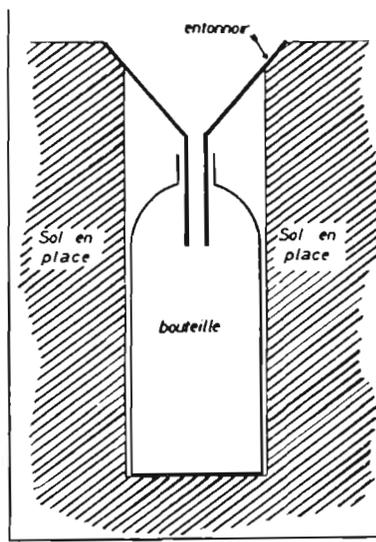


Fig-55- DISPOSITIF POUR LA MESURE DU SPLASH (D'APRES A.BOLLINNE)

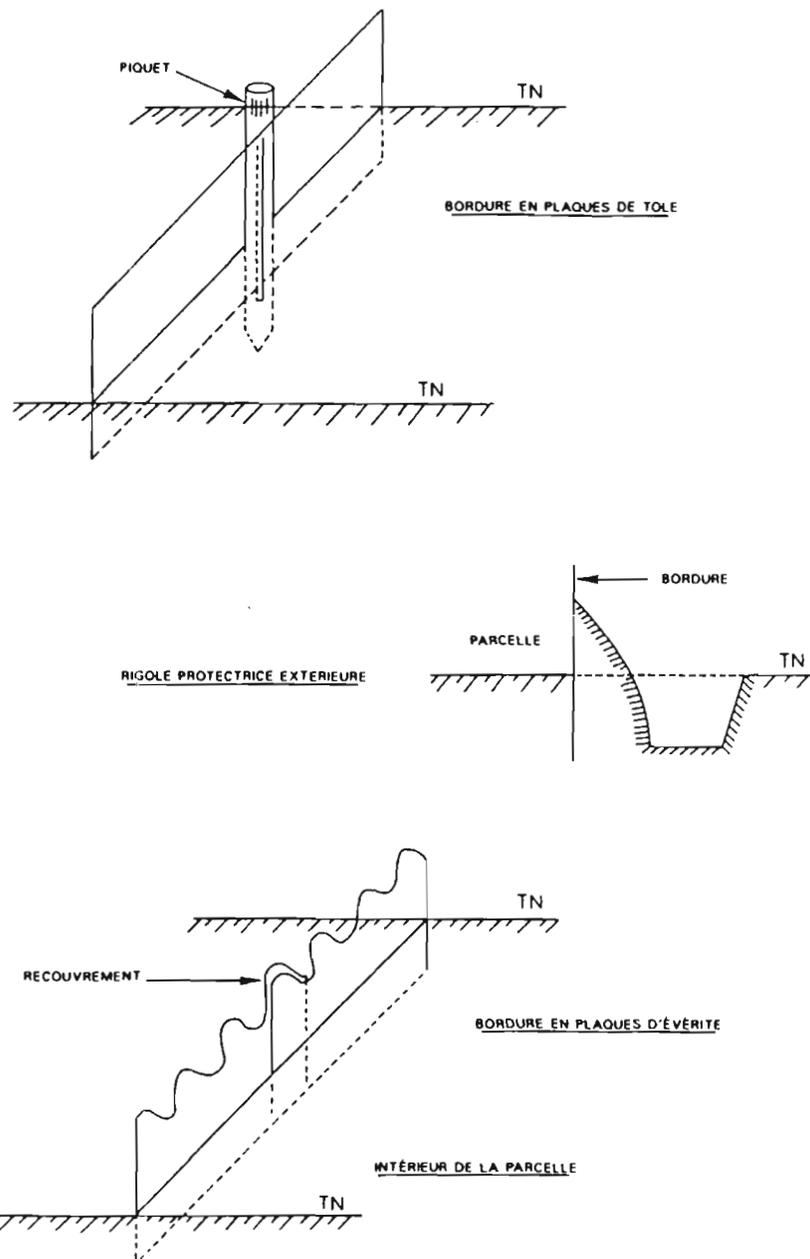


Fig-56- DELIMITATION DES PARCELLES DE MESURE DE L'ÉROSION (D'APRES J.M.MASSON)

De taille petite à moyenne (quelques dizaines à quelques milliers de m²), placées dans une portion d'espace représentative (un versant) et délimitées artificiellement, les parcelles, contrairement aux bassins versants (même de petite superficie), présentent l'avantage de pouvoir constituer des milieux globalement homogènes. Elles permettent ainsi de cerner le rôle des différents facteurs explicatifs du ruissellement et de l'érosion en comparant les réponses de différentes parcelles à une pluie donnée ou, au contraire, de la même parcelle à différentes pluies.

Fermées artificiellement à l'amont et de faible superficie, elles ne peuvent donner qu'une idée relative des phénomènes mesurés. Les résultats obtenus présentent donc, essentiellement, un intérêt comparatif dans l'analyse de situations différentes. Pour que les comparaisons soient significatives, il faut malgré tout que les méthodes utilisées soient suffisamment homogènes, avec, entre autres, une standardisation des superficies étudiées.

2.4.2.2.1.1. Parcelles type "Wischmeier"

Pour l'étude de l'érosion en nappe et rigoles, E. Roose (656), s'appuyant sur les études menées aux USA par Wischmeier et Smith (671), propose un dispositif et un protocole de mesures qui permettent une évaluation correcte de la pluie, du ruissellement, de la charge en suspension fine, du transport des matériaux grossiers et de l'érosion totale.

1. La parcelle

Représentative du sol étudié, elle doit se situer sur une pente homogène (ni concave, ni convexe), un planage pouvant parfois être nécessaire. Elle présente les caractéristiques suivantes (photo 34) :

- Longueur : 20 à 25 mètres, l'optimum étant de 22,2 mètres.
- Largeur : 4 à 5 mètres suivant l'hétérogénéité des sols.
- Bordure : haute de 10 cm, faite à l'aide de plaques de tôle ou de plastique, ou de planches fichées dans le sol sur une profondeur d'au moins 10 cm (fig. 56) ; une simple levée de terre est à proscrire, car elle peut augmenter artificiellement la charge solide.
- Grand axe généralement perpendiculaire aux courbes de niveau.
- Protection par un fossé contre le ruissellement venant de l'amont.

2. Dispositifs de mesures

Les précipitations sont mesurées à l'aide d'un pluviographe dont la précision permet d'apprécier les intensités sur des pas de temps minimums voisins de 5 minutes. Si la connaissance exacte des pluies tombant sur le sol est nécessaire, un système du type "Snowdon" (paragraphe 2.1.2.1.2) peut être installé. Lorsque le dispositif comporte plusieurs parcelles, le pluviographe est installé en son centre. Un système de plusieurs pluviomètres et pluviographes peut être envisagé si l'aire d'étude, ou l'hétérogénéité des précipitations, le justifie.

Le système collecteur est constitué d'un canal de réception en béton coulé sur place, d'un piège pour les sédiments lourds et de cuves de stockage. L'ensemble est couvert par des tôles (fig. 57).

Les cuves de stockage doivent être de dimensions suffisantes pour permettre la mesure du ruissellement et des matières fines transportées lors d'averses importantes, ou même de séquences d'averses.

L'estimation des capacités nécessaires peut être faite en prenant pour référence l'averse de fréquence décennale, à laquelle on appliquera un coefficient de ruissellement estimé à partir de la connaissance que l'on peut avoir du milieu. Par exemple, pour une pluie de 100 mm ruisselant à 80 % sur une parcelle de 100 m², les cuves devront avoir une capacité totale de : $0,100 \times 0,80 \times 100 = 8 \text{ m}^3$.

Suivant la précision recherchée, le pas de temps des mesures, ou la capacité de stockage nécessaire, différents dispositifs peuvent être utilisés :

- L'ensemble de l'eau et des particules solides est recueilli dans une cuve en béton (ou métallique) qui pourra être, si nécessaire, de dimensions importantes.

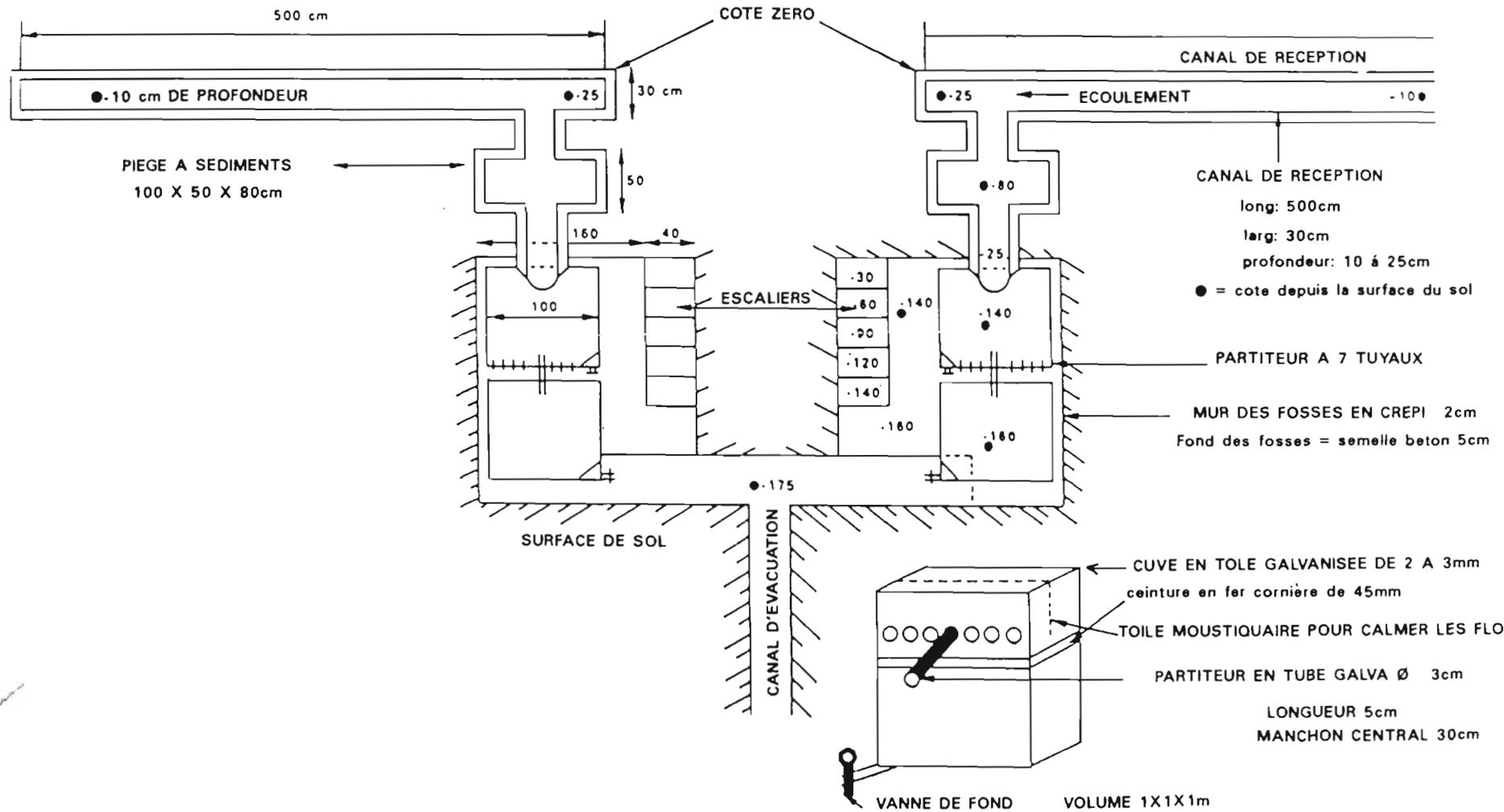


Fig-57 - PLAN D'UN COUPLE DE PARCELLES D'EROSION REALISEES AU CENTRE ORSTOM D'ADIOPODOUME
L'ENSEMBLE A ETE RECOUVERT D'UN TOIT DE TOLES (ROOSE - 1970)

On se contente souvent de mesurer le volume d'eau total ruisselé, mais la cuve peut être équipée d'un limnigraphe qui permet de connaître les variations de hauteur d'eau (donc de débit) en fonction du temps. Ce dispositif, de par sa dimension, risque de ne pas être parfaitement étanche ; de plus, il est long à vidanger et l'estimation de la charge solide est peu pratique (problème d'échantillonnage).

- Deux cuves métalliques (tôle d'acier de 2 mm d'épaisseur) de 0,5 à 2 m³ de capacité sont séparées par un partiteur qui permet de ne mesurer qu'une fraction connue du débit et des matières solides transportées (fig. 58 et photo 34).

Pour les averses faibles et moyennes ne remplissant que la première cuve de stockage, la mesure du volume ruisselé et du poids total des matières solides est relativement aisée. Pour les plus fortes averses, la précision dépend du soin avec lequel le partiteur a été construit. Il en existe de différents types, plus ou moins sophistiqués, parmi lesquels on peut citer les partiteurs à fentes dont la réalisation reste assez délicate.

Un système peu coûteux et relativement fiable peut être réalisé à l'aide de fûts à essence de 220 litres reliés par des partiteurs formés de 11 à 21 tuyaux (suivant les volumes à mesurer) de 2 cm de diamètre et de 2 cm de long, soudés sur une horizontale à un niveau précis. On sélectionne sur le terrain, une fois le dispositif installé, les tuyaux qui fonctionnent parfaitement, les autres étant rebouchés.

Pour tous les types de partiteur adoptés, un tarage précis, après installation, est toujours nécessaire. Il est possible de suivre les variations de débit en installant un limnigraphe dans la deuxième cuve.

- Pour éviter l'emploi d'un partiteur, la cuve de stockage peut être équipée d'un petit déversoir triangulaire qui permet, avec l'aide d'un limnigraphe, de connaître les volumes déversés. Ce système impose également un étalonnage précis sur le terrain. Un tel dispositif, plutôt utilisé pour des parcelles de grande superficie sur lesquelles les volumes ruisselés peuvent être importants, impose de prélever en période de crue, à la sortie du déversoir, des échantillons de la charge solide. Des procédés manuels ou automatiques pourront être utilisés (paragraphe 2.4.2.2.1.2.).

3. Protocole de mesures et calcul de la charge solide

Les mesures se font de préférence à l'échelle de l'averse, ce qui impose des moyens en matériel et en personnel souvent importants.

- Les précipitations

Les hauteurs précipitées et les intensités sont calculées à partir des enregistrements pluviographiques. Si le dispositif de mesure compte plusieurs appareils, le résultat correspond à une moyenne pondérée (paragraphe 3.1.4.).

- Volumes ruisselés

- . En l'absence de débordements, il suffit de mesurer la hauteur d'eau h dans la (ou les) cuve(s) de stockage :

$$V_r = h \cdot s \quad (s \text{ étant la section de la cuve})$$

- . Si le système est équipé d'un partiteur, le volume dans la cuve aval V doit être multiplié par le nombre de trous ou de fentes ou, plus précisément, par un coefficient de correction n mesuré sur le terrain après tarage. Si le dispositif de mesure n'est pas couvert il faudra soustraire, du volume total, le volume d'eau précipitée V_p , et éventuellement le volume de terre sédimentée V_s . Il faudra enfin tenir compte du volume d'eau V_c stocké dans la (ou les) cuves placées à l'amont du partiteur.

$$V_r = nV + V_c - V_p - V_s$$

- . Pour les systèmes équipés d'un limnigraphe et d'un déversoir, le volume déversé V_d se calcule par intégration de la courbe de variation du débit en fonction du temps, définie à partir du limnigramme et de la courbe de tarage du déversoir. Il faut ajouter le volume d'eau stockée dans les cuves V_c , et soustraire le volume de sédiments déposés V_s . Si le dispositif n'est pas couvert, il faudra tenir compte également des volumes précipités V_p .

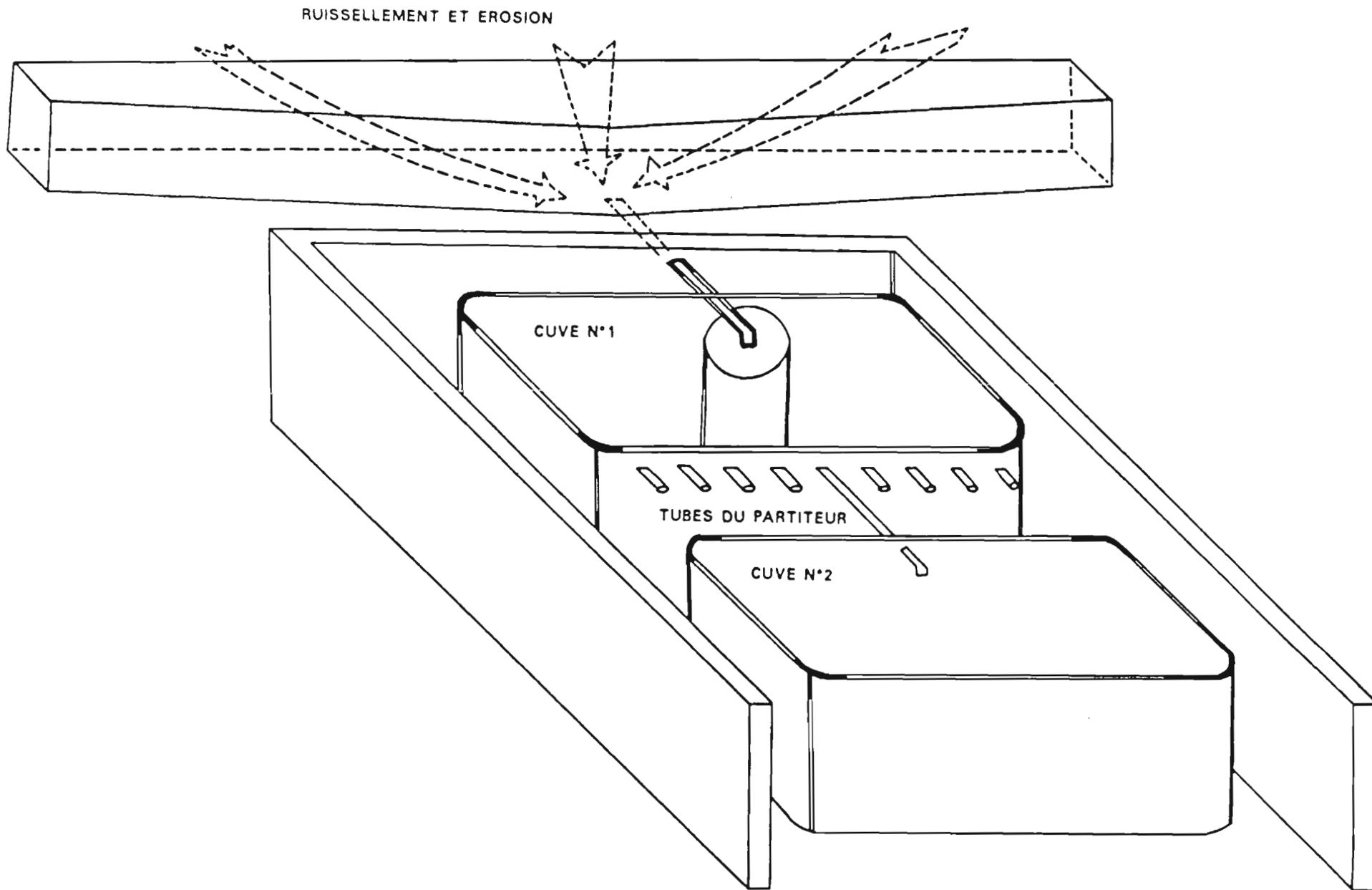


Fig-58 - SYSTEME DE COLLECTE DU RUISSELLEMENT ET DE L'EROSION SUR PARCELLE (SUME-BRESIL)

$$V_r = V_d + V_c - V_p - V_s$$

La lame ruisselée L_r est égale au rapport du volume ruisselé V_r par la superficie de la parcelle S :

$$L_r = V_r / S$$

L_r en mm, V_r en litres et S en m^2 .

Le coefficient de ruissellement est donné par la relation :

$$K_r \% = L_r / P \cdot 100$$

P étant la hauteur de pluie, en mm.

- *Poids de sédiments grossiers*

Les sédiments lourds transportés par saltation ou roulement se retrouvent dans le canal de réception et dans le piège à sédiments lourds ou, en son absence, dans la première cuve de stockage. Une fois cette cuve, ou ce piège, vidangé de son eau (à l'aide de vannes, d'une pompe ou simplement au seau), la partie boueuse restant au fond est recueillie à l'aide d'un récipient taré (seau de 5 ou 10 litres de capacité, par exemple). Chaque fois que le récipient est plein, il est pesé avant qu'un échantillon moyen standard soit prélevé (une petite sonde tubulaire peut être utilisée à ce effet), puis stocké dans un sac en plastique étanche. Ces différents échantillons sont regroupés et homogénéisés en laboratoire pour extraire, à partir d'une dizaine de prises, un échantillon réduit pesant de 100 à 200 g. Ce dernier est pesé d'abord humide (poids Ph), puis séché jusqu'à poids constant dans une étuve ventilée (soit durant 2 jours, environ). Il est ensuite pesé, après passage (10 minutes environ) dans un dessiccateur (poids Ps).

Si le poids total de sédiments humides extrait du piège et du canal est P , le poids total de terre sèche est donné par la relation :

$$PT = P \cdot Ps / Ph$$

Lorsque les quantités de terre recueillies sont conséquentes, elles sont retirées dans leur totalité, puis stockées, un à deux jours à l'ombre, dans un grand récipient qui permet d'assurer un bon drainage. Après pesage de l'ensemble, quelques échantillons sont prélevés pour être pesés humides, puis séchés en laboratoire afin de pouvoir calculer, de la même manière que précédemment, le poids de terre sèche.

- *Poids de terre érodée en suspension fine*

Les matières en suspension fine se déposent peu dans le piège à sédiments et se retrouvent dans les cuves de stockage. Avant d'être vidangé à l'aide d'une vanne de fond, d'une pompe, d'un siphon ou simplement d'un seau, leur contenu est agité énergiquement.

Durant la vidange, chaque fois que le niveau baisse d'une certaine hauteur (5 cm par exemple), un échantillon d'un demi litre est prélevé. Les différents échantillons ainsi obtenus, représentatifs d'un volume total d'eau VT , sont mélangés dans un jerrican en plastique. Si ce mélange ne représente pas un volume trop important, il est ramené dans sa totalité au laboratoire. Dans le cas contraire, un ou plusieurs échantillons moyens en sont extraits pour faciliter le transport.

Le traitement des échantillons au laboratoire consiste ensuite à faire flocculer les matières solides, en ajoutant 1 cm^3 d'acide chlorhydrique ou mieux 1 cm^3 d'une solution de sulfate d'alumine à 50 g/l pour 1 litre de suspension (l'acide chlorhydrique présente en effet l'inconvénient de dissoudre certaines particules). Après un repos de un à trois jours, l'eau surmontant le dépôt est siphonnée à l'aide d'un petit tuyau en plastique souple, au bout duquel est placé un siphon en verre ou en métal. Le culot est versé ensuite dans un becher de 250 à 1 000 cm^3 de capacité. Après une attente de 24 heures, un nouveau siphonnage est effectué. Le dépôt restant est séché à 105° dans une étuve ventilée, jusqu'à poids constant PC_1 .

Une autre solution consiste à filtrer le premier culot, puis, après passage à l'étuve et séchage dans un dessiccateur, à peser l'ensemble : terre + filtre, P_t .

Pour déterminer le poids de terre sèche PC_2 , il est indispensable d'avoir pesé au préalable le filtre seul

après passage à l'étude et au dessiccateur, soit un poids Pf (645) :

$$PC_2 = Pt - Pf$$

En principe PC₁ doit être peu différent de PC₂ :

$$PC \approx PC_1 \approx PC_2$$

Si PC correspond à un échantillon de V litres, le poids total de terre est donné par la relation :

$$PS = PC \cdot VT / V$$

Lorsque les concentrations en suspension fine sont faibles, la méthode par dessiccation peut entraîner une surestimation des résultats par précipitation de composés dissous.

4. Dispositif d'ensemble

Un dispositif de quatre à six parcelles doit permettre de tester à la fois l'érosivité en milieu naturel (sol-climat), les risques d'érosion sous cultures traditionnelles et l'efficacité de deux ou trois méthodes de protection (photo 35). Suivant les objectifs poursuivis, ce dispositif pourra évidemment être plus ou moins complet.

Si le but des recherches consiste essentiellement à étudier l'impact des mises en cultures (leur type et les pratiques culturales utilisées) ou d'aménagements anti-érosifs, E. Roose (656) suggère d'adopter un protocole de mesures proche de celui préconisé par Wischmeier et Smith en adjoignant au dispositif une parcelle nue standard. Cette parcelle a pour but de permettre l'estimation de l'érodibilité du sol étudié, c'est-à-dire de sa susceptibilité à l'érosion. Ses caractéristiques ont été définies d'une manière très précise : 72,6 pieds de long, 9 % de pente, traitée comme une jachère nue, sans aucun apport de matière organique depuis trois ans, travaillée superficiellement chaque fois qu'il se forme une croûte limitant la détachabilité du sol. Pour l'Afrique, E. Roose juge préférable de choisir des pentes caractéristiques du type de sol et du paysage.

L'équation de Wischmeier et Smith (672), dite équation universelle, ne s'applique qu'à l'érosion en nappe. Elle se limite à certains types de sols (sols bruns lessivés tempérés, ferrallitiques et ferrugineux tropicaux), et à certaines conditions géomorphologiques : pénélaines et collines (pentes de 1 à 20 %) ; il faut de plus que l'énergie cinétique des pluies soit fonction de leur intensité. Il s'agit d'un modèle statistique (élaboré à partir d'une dizaine de milliers de résultats), essentiellement pratique, non valable à l'échelle de l'averse (même si les calculs se font en différenciant les événements pluvieux) et qui ne peut prétendre se substituer aux études scientifiques visant à une meilleure connaissance des processus élémentaires de l'érosion.

Elle s'énonce par l'équation : $E = R \cdot K \cdot C \cdot SL \cdot P$

E : perte en terre consécutive à un événement pluvieux (mesurée sur parcelle ou à prévoir), exprimée en tonnes par acre, ou après transformation en tonnes / hectare (facteur de passage : 2,5) ;

R : agressivité du climat (érosivité potentielle) qui renseigne sur l'interaction de l'énergie cinétique de la pluie Eg, et de l'intensité maximale en 30 minutes, Im :

$$R = Eg \cdot Im / 100$$

Eg, en pieds / tonne / acre
Im, en pouces / heure.

Si l'on passe en unités métriques avec : Eg, en m / t / km² et Im, en mm / h, il est nécessaire de diviser par 1.735,6 pour avoir la même valeur de R.

Eg est calculée à partir des enregistrements pluviographiques, dans des tranches d'intensité homogènes. Wischmeier propose de calculer l'énergie cinétique correspondante par la formule :

$$Eu = 1\,214 + 890 \cdot \log Ih$$

Eu, énergie cinétique, en t / km² / mm de pluie.

Ih, l'intensité, en mm / h, de la tranche considérée.

Pour avoir l'énergie cinétique de la tranche correspondante, il suffit de multiplier par le nombre p de mm de pluie.

On ne traite généralement que la pluie supérieure à un certain seuil.

L'énergie totale Eg est la somme des énergies de chaque tranche : $Eg = \sum (p \cdot Eu)$.

K : indice de résistance du sol à l'érosion hydrique (érodibilité). Il se mesure sur la parcelle standard de référence pour laquelle les trois derniers termes de l'équation sont par définition égaux à 1. (En Afrique, d'après E. Roose : $0,01 < K < 0,3$).

C : facteur biologique exprimant la nature des cultures et les pratiques agricoles en cours :
 $0,001 < C < 1$

SL : facteur topographique comprenant la pente (S en %) et L la longueur de cette pente.

Wischmeier et Smith ont proposé de calculer SL par la formule :

$$SL = (\sqrt{L} / 100) \cdot (0,76 + 0,53 \cdot S + 0,0765 \cdot S^2)$$

avec, L en pieds et S en %.

(SL = 1 si la pente est égale à 9 % et la longueur à 72,6 pieds).

P : facteur tenant compte de l'efficacité des aménagements anti-érosifs ($0,1 < P < 1$).

Le produit K . C . SL . P traduit l'érodabilité du milieu.

Pour une application précise de la méthode de Wischmeier en Afrique de l'Ouest, on consultera avec profit la thèse de E. Roose (655).

2.4.2.2.1.2. Parcelles moyennes et grandes, micro-bassins

Bien que les études sur parcelles présentent un intérêt essentiellement comparatif, la prise en compte du facteur "d'échelle" peut être abordée en considérant des parcelles de superficies supérieures à 100 m². De plus, il n'est pas raisonnable de tester sur de trop petites parcelles l'efficacité de certains aménagements : billonnage en courbes de niveau, fossés, banquettes en terrasses, etc. Il faut néanmoins savoir qu'au-delà d'une certaine dimension l'homogénéité pédologique, topographique, voire pluviométrique de la parcelle ne peut plus être assurée.

Des études sur versants pourront être menées en choisissant des parcelles de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de m². Lorsque la surface atteint quelques hectares, il est possible, suivant le modelé, de définir, à l'aide d'un relevé topographique précis, les contours du bassin versant naturel. Dans les zones relativement plates situées à l'aval de certains de ces micro-bassins, la ligne de partage des eaux peut être matérialisée artificiellement par la construction d'une petite diguette (fig. 59 et photo 36).

Les dispositifs de mesure de l'érosion sont parfois les mêmes que ceux décrits antérieurement (paragraphe 2.4.2.2.1.1.). Si les volumes ruisselés et les pertes en terre sont importants, l'installation d'une fosse à sédiments équipée d'un limnigraphe et d'un déversoir s'avère alors nécessaire (fig. 60 et photo 37). Il s'agit d'un système similaire à celui utilisé pour des bassins de plusieurs centaines d'hectares ou de quelques km². Toutefois, sur ces bassins, à l'érosion en nappe et en rigoles des interfluves, s'ajoutent l'érosion en ravines et l'érosion linéaire. Le protocole de mesures reste sensiblement le même que celui décrit au paragraphe 2.4.2.2.1.1. [3], la fosse devant être, de préférence, vidangée après chaque crue.

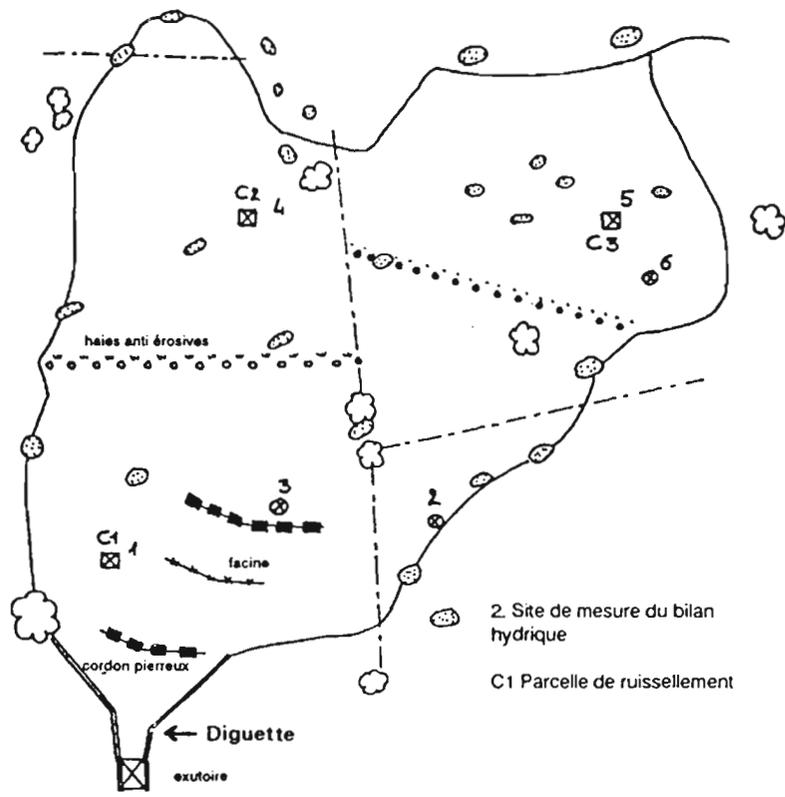


Fig-59- BASSIN VERSANT DE YARANE (2,4ha) THYSSE KAYMOR
DELIMITATION D'UN PETIT BASSIN PLAT

(D'APRES J.ALBERGEL)

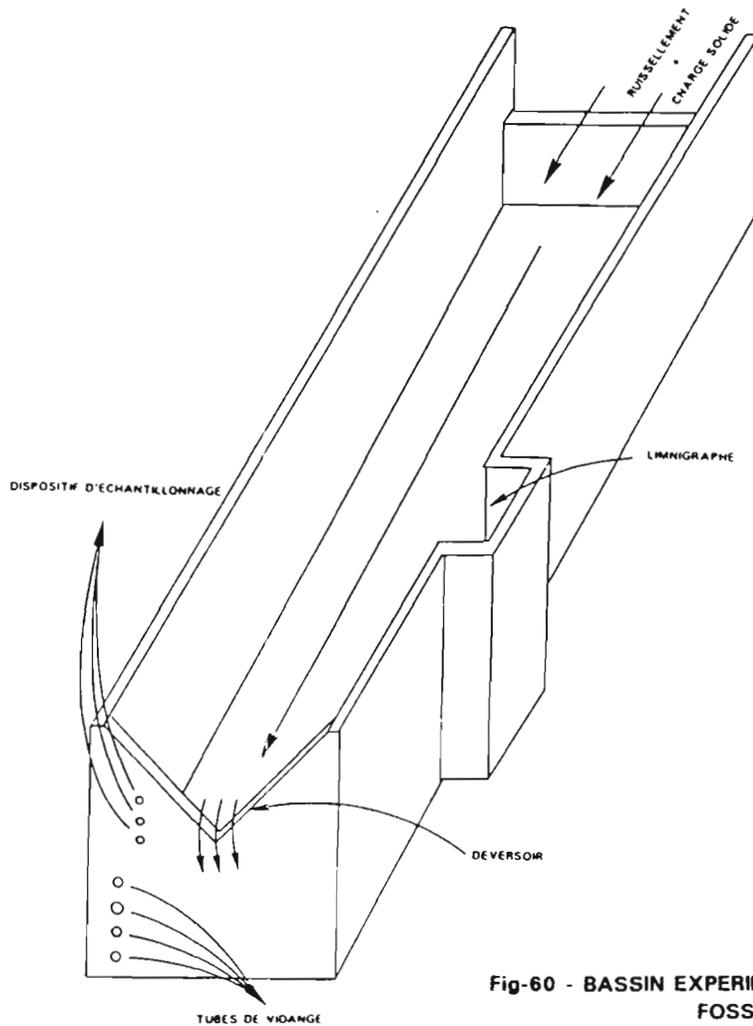


Fig-60 - BASSIN EXPERIMENTAL DE SUME (BRESIL)
FOSSE A SEDIMENTS

Si le dispositif n'est pas équipé d'un système d'échantillonnage automatique, des prélèvements devront être effectués à la sortie du déversoir (au seau, par exemple) tout au long de la crue (montée, pic et décrue). Le nombre de prélèvements dépendra de l'importance du ruissellement, mais ne devrait pas être inférieur à 5 (2 à la montée, 1 au maximum, 2 à la descente). A débit égal, les concentrations sont sensiblement plus élevées lors de la montée de la crue qu'à la descente.

L'unique prélèvement, fait à un instant t , est supposé être représentatif de l'ensemble de la section qui reste il est vrai, dans tous les cas, de dimensions modestes.

Les manipulations de terrain, comme celles de laboratoire, identiques à celles exposées antérieurement (paragraphe 2.4.2.2.1.1.), permettent de calculer, pour chaque échantillon, la concentration de matières solides en suspension C , exprimée en g/l.

Le débit instantané Q , à l'instant t , est calculé à partir de l'enregistrement limnigraphique et de la courbe de tarage du déversoir.

Le débit solide instantané est donné par la relation :

$$Q_s(t) = C(t) \cdot Q(t)$$

Q en l/s, C en g/l et Q_s en g/s.

Les différents prélèvements permettent de tracer le "solidogramme" qui donne les variations du débit solide en fonction du temps. Le poids de matières en suspension transitant durant la crue est calculé en intégrant la courbe de débit solide sur toute la durée de l'événement :

$$P_s = \int_{t_d}^{t_f} Q_s(t) \cdot dt$$

Dans la pratique, il suffit de calculer l'aire définie par le solidogramme et l'axe du temps (fig. 61).

Pour s'affranchir du tracé du solidogramme, on peut d'une manière moins précise estimer la concentration moyenne durant la crue :

$$C_m = \sum(C_n \cdot Q_n) / \sum Q_n$$

et calculer le poids de matière en suspension par l'expression :

$$P_s = C_m \cdot \int_{t_d}^{t_f} Q(t) \cdot dt$$

Cette procédure très contraignante peut être évitée par l'emploi de systèmes de prélèvements automatiques. Le plus simple d'entre eux consiste à implanter à des hauteurs différentes, contre la lame du déversoir au-dessus de la cote de débit nul, de petits tubes qui permettent d'effectuer des prélèvements par gravité. Ce dispositif n'échantillonne, malheureusement, que la montée de la crue.

Des systèmes plus sophistiqués permettent d'extraire, sur une période quelconque, un échantillon moyen pondéré par le débit écoulé (J.M. Fritsch - 627).

2.4.2.2.1.3. Mesure de l'érosion sous pluie simulée

Ces techniques ne sont citées que pour mémoire, car elles demandent généralement des moyens financiers, humains et techniques très importants. On pourra consulter les résultats des travaux menés de 1975 à 1980 par A. Lafforgue (et al.), en Côte d'Ivoire (635), au Burkina-Faso et au Niger, sur des parcelles de 50 m² (photo 38), à l'aide d'un appareil dérivé du simulateur de pluie de type "Swanson".

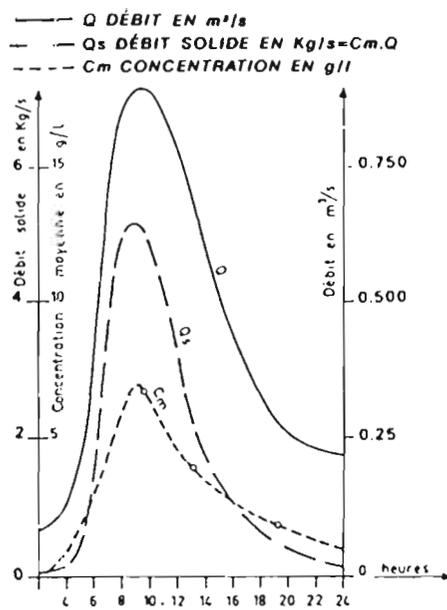


Fig-61 - SOLIDOGRAMME (Q_s) HYDROGRAMME (Q) ET CONCENTRATION MOYENNE (C_m)

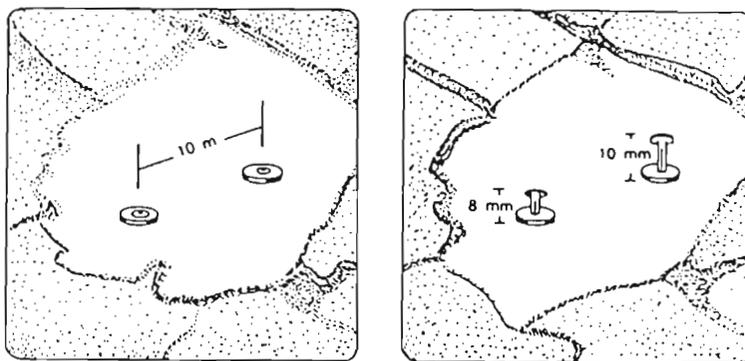


Fig-62 - DETERMINATION DES PERTES EN TERRE PAR LA METHODE DES PIQUETS ET RONDELLES

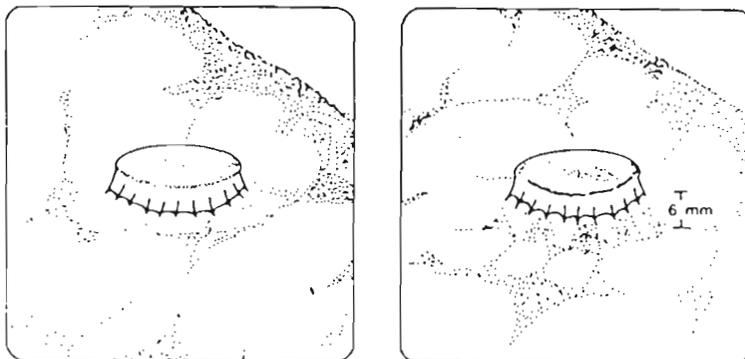


Fig-63 - DETERMINATION DE LA PERTE EN TERRE A L'AIDE D'UNE CAPSULE (D'APRES MANUAL DE CONSERVACION DEL SUELO Y DEL AGUA-MEXIQUE)

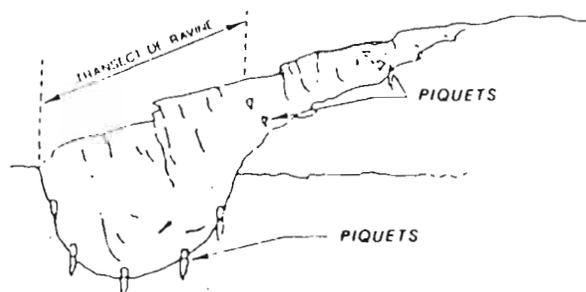


Fig-64 - QUANTIFICATION DE LA PERTE EN TERRE DANS UNE RAVINE

Les mesures effectuées ultérieurement par différents chercheurs de l'Orstom (704, 722, 724), à la fin des années 70 et durant les années 80, en utilisant la simulation de pluie sur mini-parcelles de 1 m², avaient pour but d'étudier les phénomènes de ruissellement et d'infiltration, l'érosion mesurée ne permettant qu'une estimation de la résistance des sols à la battance des pluies.

2.4.2.2.2. METHODE DES REPERES

Les mesures d'érosion aux exutoires des parcelles, ou de très petits bassins, ne donnent que des estimations globales concernant l'ensemble de la surface drainée. Elles ne permettent pas de mesurer la formation et les modifications des rigoles sur les interfluves, ou les variations spatiales et temporelles de l'érosion en nappe (zones érodées ou zones d'atterrissement). La dynamique des ravines du réseau hydrographique ne peut être, non plus, appréhendée.

Sur les versants, la technique la plus simple consiste à utiliser des repères bien stabilisés qui peuvent être des repères naturels (affleurements rocheux, arbustes, etc.) ou de simples piquets (rayons de bicyclette, clous, fers à béton - photo 39 -). Les variations du niveau du sol sont mesurées à partir d'un point de référence (tête du piquet, peinture indélébile). Hors des zones d'atterrissement, le niveau du sol peut être suivi à l'aide de rondelles (fig. 62). De petits obstacles artificiels, qui jouent vis-à-vis du ruissellement le même rôle qu'une pierre ou une racine, peuvent également être installés (fig. 63).

Tous ces procédés présentent l'inconvénient de modifier, dans des proportions plus ou moins importantes, les conditions de ruissellement. Il est donc préférable d'installer des repères horizontaux (fil rigide ou de préférence règle métallique) posés sur deux tiges en métal solidement fixées dans le sol et distantes de un à plusieurs mètres. La mesure du micro-relief se fait, à intervalles réguliers (tous les 5 cm par exemple), à l'aide d'aiguilles coulissant dans des trous (629). Des systèmes plus modernes, mais sensiblement plus coûteux, utilisent les ultrasons ou le laser.

Différents sites de mesures devront être répartis sur l'ensemble de la zone d'étude (généralement un versant complet), afin que les résultats ponctuels puissent être intégrés spatialement.

Suivant l'agressivité du phénomène et la précision des mesures, les observations pourront être faites à l'échelle de l'averse, du mois, de la saison ou de l'année.

L'étude morpho-dynamique des ravines peut aussi faire appel à la technique des repères fixes implantés dans différentes sections transversales (fig. 64). Des relevés topographiques périodiques, effectués en des sections parfaitement localisées, permettent d'éviter l'implantation de nombreux repères permanents (photo 40).

Certains auteurs (O. Planchon, 650) préconisent l'installation de dispositifs composés de petits pièges à sédiments, complétés, dans les ravines, d'échelles à maxima formées de cornières métalliques sur lesquelles sont soudés, à intervalles de 5 cm, des godets remplis de gazoil. E. Roose suggère d'utiliser des cailloux de différents calibres pour apprécier la vitesse maximale de ruissellement. L'ensemble de ces dispositifs ne permet pas de quantifier, en terme de surface, la perte en terre et le ruissellement, il représente par contre un excellent moyen d'analyse (photo 41).

Toutes les mesures de terrain pourront être complétées d'enquêtes historiques, pour lesquelles la photo-interprétation représente un outil précieux, si toutefois des jeux de photographies aériennes, pris à des dates différentes, sont disponibles.

2.4.2.3. EROSION EN MASSE

L'érosion en masse, que favorise un plan de glissement, est souvent localisée et sporadique. Elle est, par là-même, difficilement quantifiable. Elle peut être mesurée à l'aide de repères disposés en lignes horizontales et fichés dans le sol à intervalles réguliers. Leur déplacement est évalué à partir de références fixes, situées hors de la zone concernée. Pour suivre le mouvement du sol en profondeur, on utilise des repères souples (bandes d'aluminium ou de caoutchouc) enfoncés à l'aide d'un cylindre creux ou, simplement, en creusant un trou de faible diamètre à la tarière. L'étude détaillée du profil vertical nécessite le creusement de fosses.

PHOTO 38



CLICHÉ: B. POUYAUD

Simulateur de pluie type "Swanson" pour mesure de l'érosion - (Côte d'Ivoire)

PHOTO 39



CLICHÉ: J.F. NOUVELOT

Piquet pour contrôle de l'érosion - Thyse-Kaymor - (Sénégal)

PHOTO 40



CLICHÉ: B. THÉBÉ

Étude d'une ravine - Mouda - (Cameroun)

PHOTO 41



CLICHÉ: B. POUYAUD

Piège à sédiments type "Planchon" - (Équateur)

2.4.2.4. TRANSPORTS SOLIDES DANS LES COURS D'EAU

Toutes les particules solides arrachées aux versants ne parviennent pas au réseau hydrographique qui peut subir lui-même des modifications : érosion des berges et du fond du lit ou, au contraire, atterrissements plus ou moins localisés dans certains biefs (paragraphe 2.4.1.4.). Les mesures sur parcelles peuvent donc difficilement être extrapolées à l'ensemble d'un bassin versant, de la même manière que les mesures réalisées en rivière ne permettent pas d'évaluer l'ablation des sols à l'échelle du versant ou du champ. L'interprétation des résultats doit donc être menée avec discernement, chaque technique ayant nécessairement des applications bien ciblées.

La quantité de sédiments, ou charge totale, transportée par un cours d'eau est composée de la charge en suspension et du transport de fond (glissement ou roulement sur le fond et saltation).

Deux méthodes de mesure sont possibles :

- collecte d'échantillons à hauteur d'une section de mesure pour suivre les variations dans le temps du transport solide ;
- levés topographiques et bathymétriques de lacs ou de retenues artificielles pour évaluer l'apport global de sédiments durant une période déterminée.

2.4.2.4.1. MESURES EN STATION

Les mesures effectuées aux exutoires de petits bassins versants sont identiques à celles décrites au paragraphe 2.4.2.2.1.2. Sur les bassins plus importants, afin de bénéficier de l'information hydrométrique et des infra-structures disponibles (limnigraphe, passerelle, téléphérique, bateau, éclairage, etc.), les mesures de transport solide sont de préférence réalisées à hauteur ou à proximité des stations limnigraphiques.

2.4.2.4.1.1. Transports en suspension

1. Matériel de prélèvement

Le matériel de prélèvement doit être adapté aux caractéristiques de la section de mesure (gamme de concentrations des matières en suspension, vitesses du courant). De plus, l'appareil utilisé ne doit pas modifier l'écoulement, au point d'aboutir à une sélection des sédiments qui pourrait changer leur composition granulométrique et leur concentration. Lorsque les quantités de matières en suspension sont faibles, il est préférable de prélever des échantillons de volume important (5 à 10 litres). L'Organisation Météorologique Mondiale recommande les volumes de prélèvements suivants :

Concentration probable, en g/m ³	Volume de l'échantillon, en litres
> 500	1
100-500	5
< 100	10

Les préleveurs peuvent être classés en trois catégories principales :

- *Préleveurs instantanés*

Les préleveurs instantanés sont constitués d'un récipient largement ouvert qui peut être refermé, de façon quasi instantanée, au moyen d'une commande appropriée.

Le système le plus simple se compose d'un flacon lesté à large ouverture, qui peut être descendu à profondeur voulue. Des appareils plus sophistiqués, formés d'un cylindre horizontal ouvert aux deux

extrémités en position d'attente, s'orientent automatiquement dans le sens du courant et se referment sur commande (sonde de Collet - fig. 65).

Les prélèvements effectués à l'aide d'un seau depuis la berge d'un cours d'eau, d'une passerelle ou d'un pont entrent dans cette catégorie d'appareils.

- *Préleveurs à pompe*

Un embout formé d'un tube métallique faiblement coudé, fixé sur un lest ou une perche, permet d'effectuer, à l'aide d'un tuyau flexible et d'une pompe, des prélèvements en divers points de la section de mesures. La pompe utilisée peut être une pompe à main de type Japy (procédé rustique, très utilisé dans les années 60-70 par les chercheurs de l'Orstom - 605, 622, 644, 645 - fig. 65a), une pompe péristaltique ou toute autre pompe facilement mobilisable sur le terrain.

Le pompage introduit toujours une forte perturbation hydraulique au point de prélèvement. Il reste toutefois sans grandes conséquences, lorsque les sédiments sont de faible granulométrie (diamètre inférieur à 0,06 mm).

Un autre procédé, d'emploi plus complexe, consiste à utiliser un récipient dans lequel le vide a été fait au moyen d'une pompe. Les prélèvements se font par aspiration à l'aide d'une vanne qui permet de mettre le récipient en communication avec l'eau. Des systèmes automatiques pilotés par un dispositif d'asservissement à un limnigraphe, donc installés seulement en certains points fixes, obéissent au même principe.

- *Préleveurs par intégration*

Les appareils fonctionnant par intégration présentent l'avantage de prélever des échantillons durant un intervalle de temps suffisamment long pour atténuer les fluctuations de concentration. Ils peuvent, selon les modèles, fonctionner point par point ou par intégration le long d'une verticale. Dans ce dernier cas, l'échantillon recueilli permet de mesurer la concentration moyenne pondérée par le débit sur toute la verticale. Le plus simple d'entre eux est constitué d'une bouteille à large col fixée à une perche. A travers le bouchon, passe un ajutage d'admission qui doit être dirigé face au courant tandis qu'un deuxième conduit, dirigé vers l'aval, permet à l'air de s'échapper (fig. 66). Des systèmes obéissant au même principe peuvent être installés sur des saumons de lestage.

Les appareils de prélèvements automatiques à poste fixe installés sur les fosses à sédiments (paragraphe 2.4.2.2.1.2.) peuvent également être utilisés pour les mesures en cours d'eau.

2. *Mesures in situ*

Les mesures faites in situ ne nécessitent pas de prise d'échantillons. Les appareils les plus connus utilisent les propriétés des rayonnements électromagnétiques. Les autres procédés, encore au stade des études de laboratoire, ne sont pas très bien adaptés aux mesures de terrain.

Trois techniques différentes sont employées : absorption ou diffusion d'un rayonnement, radio-activité naturelle des matières en suspension.

Les dispositifs les plus simples et les moins coûteux mesurent l'absorption de la lumière (rayonnements visibles) par les matières en suspension. Malheureusement, il n'existe pas de relation entre concentration et absorption. Ce procédé permet, tout de même, de suivre en continu une station où sont effectués périodiquement des prélèvements à partir desquels un étalonnage spécifique peut être établi, à condition toutefois que les concentrations restent inférieures à 10 g/l.

Les appareils utilisant les rayons γ permettent de mesurer des concentrations plus élevées et de s'affranchir des problèmes liés à la composition granulométrique des matières solides transportées.

3. *Traitement des échantillons*

Le traitement des échantillons permettant d'aboutir au calcul du résidu sec est identique à celui décrit pour l'évaluation du poids de terre érodée en suspension fine sur parcelles (paragraphe 2.4.2.2.1.1.).

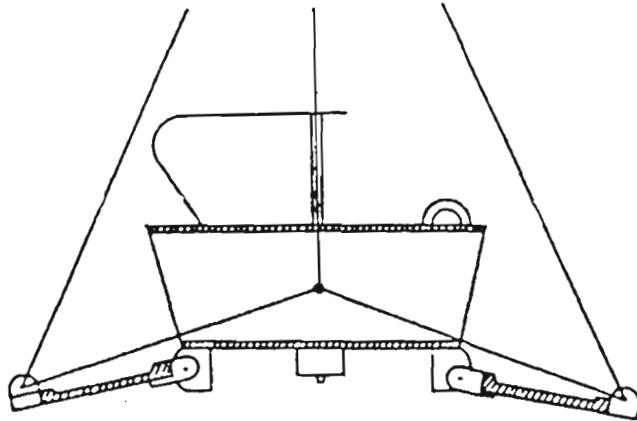


Fig-65 - SONDE TYPE COLLET

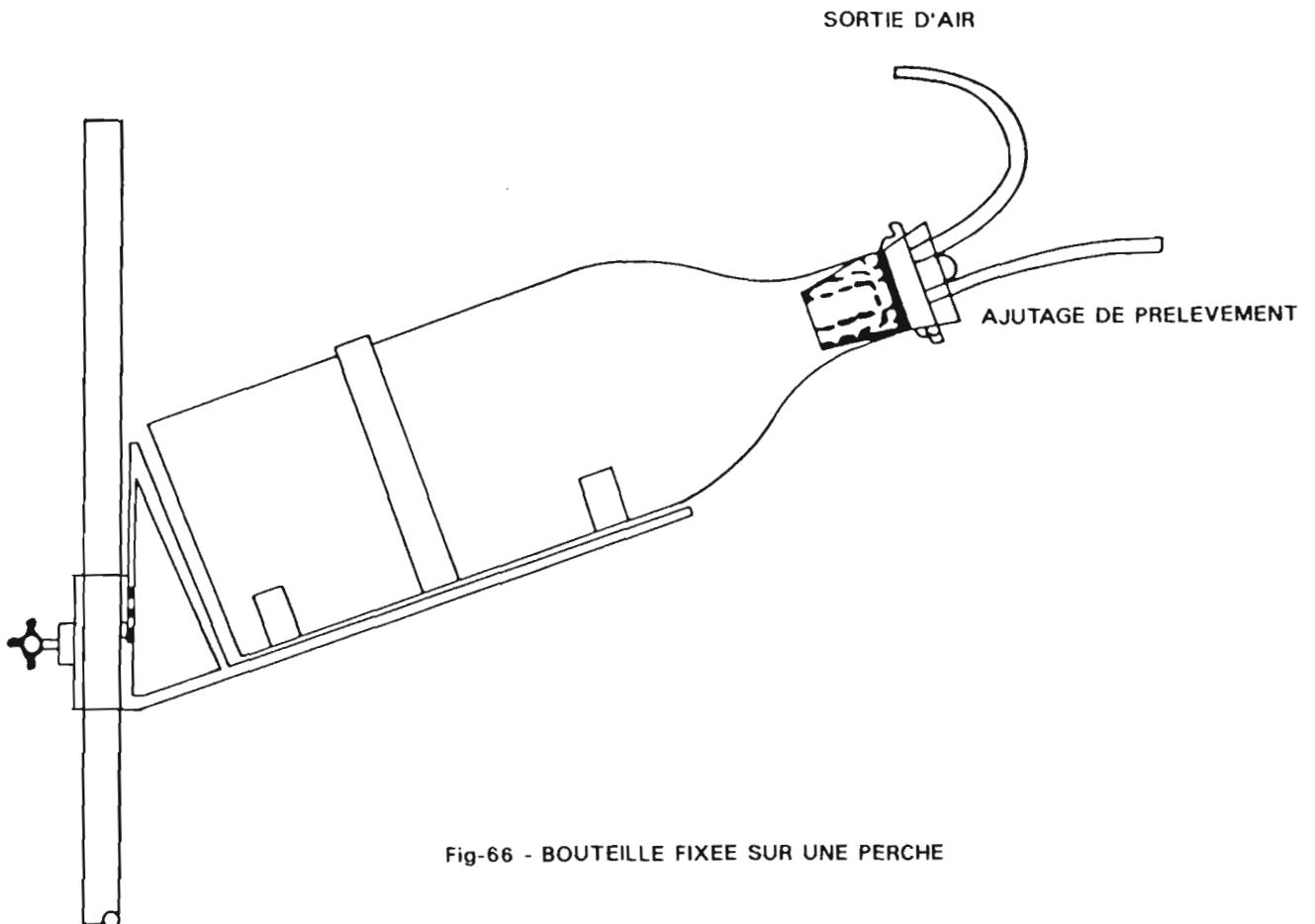


Fig-66 - BOUTEILLE FIXEE SUR UNE PERCHE

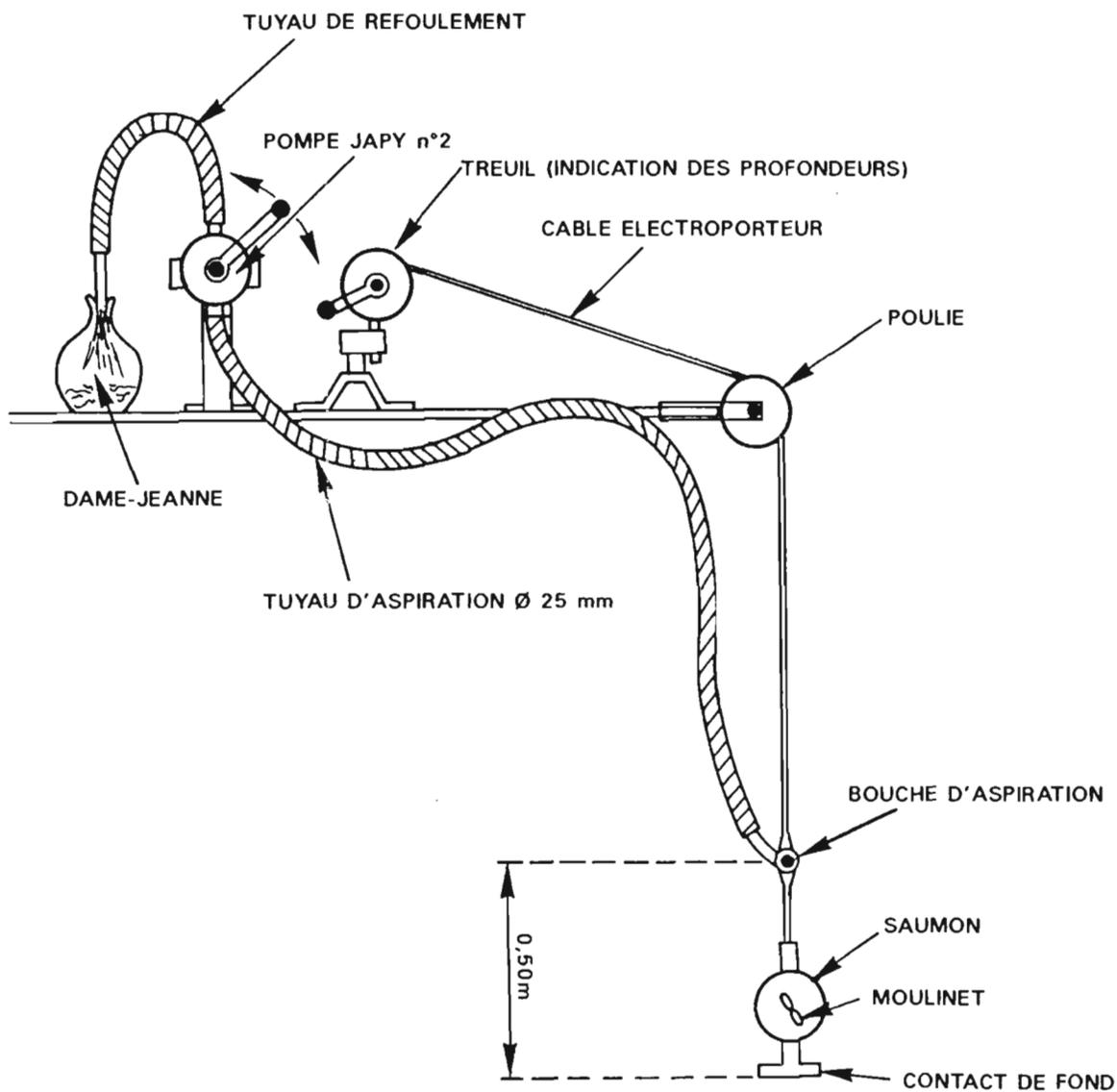


Fig-65a - PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS DE MATIERES EN SUSPENSION
 A L'AIDE D'UNE POMPE (D'APRES P.POURRUT)

Lors des différentes manipulations (jaugeages, prélèvements, laboratoire), il est indispensable de procéder à une identification soigneuse et claire des échantillons. Flacons, jerricans, bouteilles, bechers ou filtres seront datés et numérotés de façon à éviter tous risques de confusion.

La mesure du poids des matières solides transportées en suspension peut être complétée par une analyse granulométrique identique à celle pratiquée en pédologie :

- Les teneurs en sable ($d > 50 \mu$) sont déterminées par tamisage des différents diamètres : sables grossiers, moyens et fins.
- Les teneurs en limons et argiles sont évaluées par des méthodes basées sur la loi de Stokes.

Il est possible d'analyser de cette manière les variations de la répartition granulométrique en fonction de la profondeur. Lorsque les quantités de dépôts solides sont insuffisantes, l'analyse est faite à partir d'un mélange de plusieurs échantillons.

4. Méthodes de calcul

Considérant la section S d'un cours d'eau de largeur L, chaque verticale V peut être définie par son abscisse l comptée sur L, et sa profondeur totale P.

Si en un point d'une verticale V, situé à la profondeur p, sont mesurées à la fois la vitesse du courant v et la concentration c de matériaux en suspension, le débit liquide sur un élément de surface dS de la section S à proximité du point est donné par la relation :

$$ql = v \cdot dS$$

et le débit solide sur la même surface élémentaire s'écrit :

$$qs = c \cdot ql = c \cdot v \cdot dS$$

Le débit solide total sur l'ensemble de la section S s'obtient par intégration :

$$QS = \iint_S qs = \iint_S c \cdot v \cdot dS = \iint_S c \cdot v \cdot dl \cdot dp$$

et le débit liquide total est donné par l'expression :

$$QL = \iint_S v \cdot dS$$

La concentration moyenne dans la section est définie par le rapport :

$$Cm = QS / QL$$

L'évaluation du débit solide d'un cours d'eau, à un instant donné, nécessite donc de mesurer simultanément, en divers points de la section de référence, la concentration en matières solides et la vitesse du courant.

Les mesures de vitesse se font au moulinet (chapitre 2.2.), alors que les mesures de concentration s'effectuent à l'aide d'un des dispositifs décrits antérieurement [1].

Pour des cours d'eau de quelques mètres de largeur, de telles mesures, parfois qualifiées de jaugeages complets, sont relativement longues, alors que les crues observées se caractérisent par des temps de montée et de base souvent très courts. Pour appréhender ces événements durant lesquels se fait une part importante du transport solide, il est nécessaire de recourir à des procédés de mesures simplifiés. Les résultats ainsi obtenus peuvent faire l'objet de corrections établies à partir de mesures complètes effectuées périodiquement.

- *Jaugeages complets*

Les jaugeages complets doivent permettre l'estimation la plus exacte possible du débit solide et servent, par là même, de référence.

TRANSPORTS SOLIDES

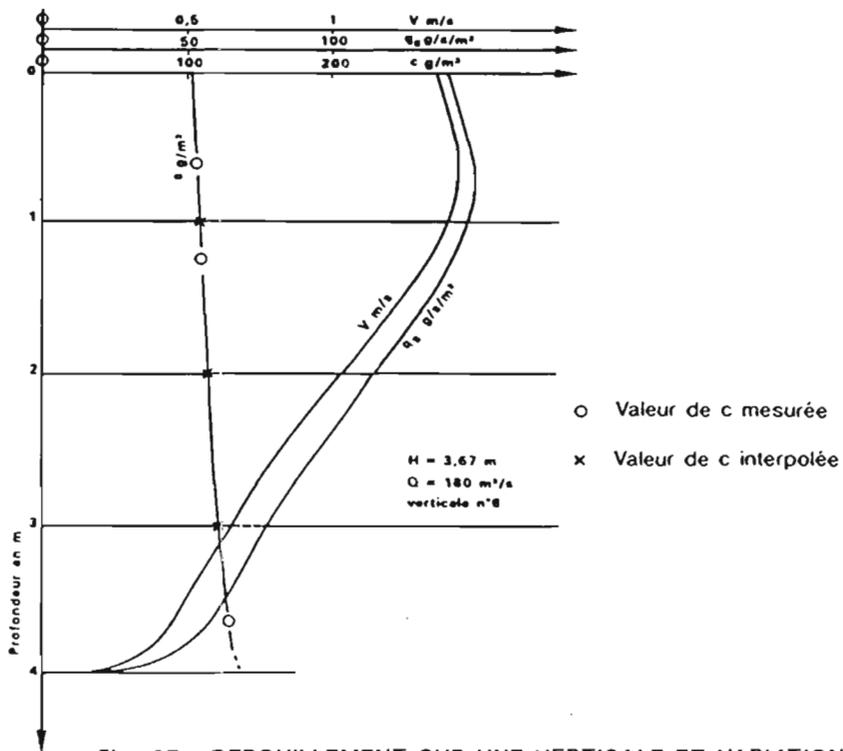


Fig- 67 - DEPOUILLEMENT SUR UNE VERTICALE ET VARIATION DU DEBIT SOLIDE PAR UNITE DE LARGEUR

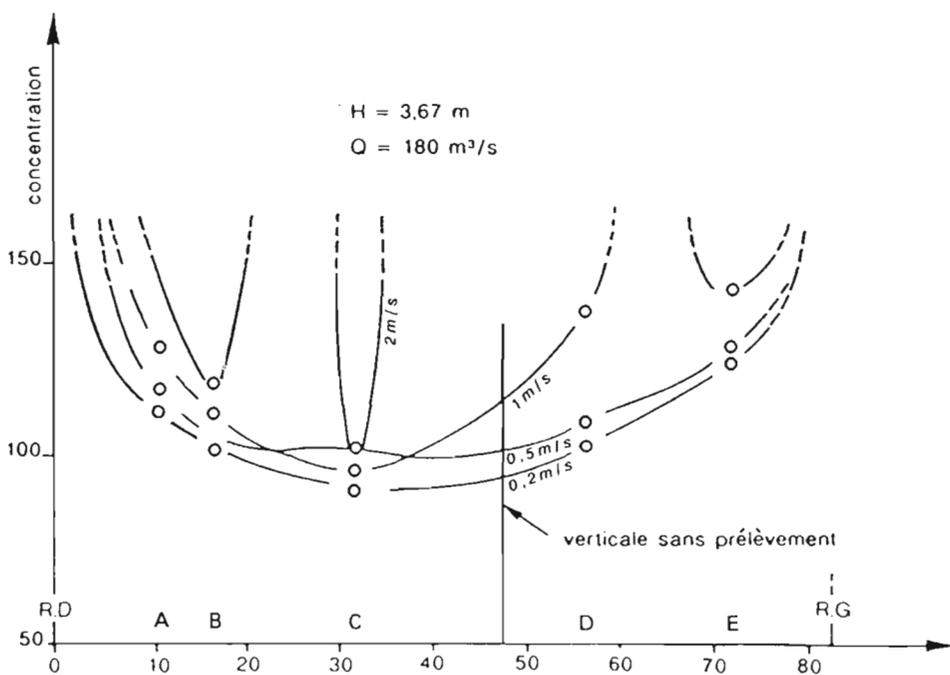


Fig- 68 - VARIATION DES CONCENTRATIONS SOLIDES DANS UNE SECTION DE MESURE

Les opérations de prélèvements sont très souvent plus longues et plus laborieuses que les mesures de vitesse du courant. De plus, les difficultés de stockage, de transport et de traitement des échantillons contraignent à réduire au minimum le nombre de prises qui sera, ainsi, souvent inférieur au nombre de points de mesure de vitesse. Afin de valoriser l'information hydrométrique lors du calcul du débit solide total, des estimations de la concentration seront effectuées par interpolation, soit sur les verticales où ont été faits les prélèvements, soit même sur des verticales où seules des mesures de vitesse ont été effectuées (fig. 67 et 68). Il est tout de même souhaitable que les verticales échantillonnées coïncident avec des verticales de mesure des vitesses. Le choix de ces verticales est fait en fonction de la connaissance que l'on peut avoir du cours d'eau. Les prises d'échantillons à proximité des berges sont à éviter, car des phénomènes locaux d'érosion, parfois provoqués par les opérations de prélèvement, peuvent y être observés. Le nombre d'échantillons par verticales est fonction de la profondeur, mais se situe généralement entre 3 et 5 points répartis harmonieusement en évitant de trop se rapprocher du fond où la proportion de matières solides transportées par saltation ou charriage peut augmenter sensiblement. Sans cette précaution, l'interpolation entre les deux mesures les plus profondes d'une verticale peut amener à surestimer, notablement, l'influence des concentrations des tranches inférieures.

Le calcul du débit solide peut se faire, comme pour un jaugeage classique, par la méthode des paraboles, la courbe de variation de la vitesse du courant en fonction de la profondeur, établie pour chaque verticale, étant remplacée par la courbe de variation du produit : $C \text{ (g/m}^3\text{)} \cdot V \text{ (m/s)}$. Cette courbe représente la variation du débit solide par unité de surface q_s / u_s (en g / s / m^2) (fig. 67). Son intégration par planimétrie permet d'obtenir le débit par unité de largeur q_s / u_l . En répétant le même processus pour chaque verticale, il est possible de tracer la courbe de variation des q_s / u_l , sur toute la largeur de la section de mesure. La surface limitée par cette courbe et par l'axe des abscisses, où sont repérées les verticales, représente le débit solide total en suspension dans la section de mesure (fig. 69).

La méthode des isotaches peut également être utilisée en traçant dans la section de mesure les courbes d'égal débit par unité de surface (q_s / u_s). Le planimétrie, par valeurs croissantes de q_s / u_s , des surfaces cumulées limitées par ces courbes permet de porter, sur un nouveau graphique, en abscisses les superficies ainsi calculées, et en ordonnées les valeurs correspondantes des q_s / u_s . L'aire limitée par la courbe obtenue et les axes de coordonnées représente le débit solide total QS (fig. 70).

Remarque :

Lorsque les variations de débit sont très rapides, les mesures de vitesse et les opérations d'échantillonnage ne peuvent être menées de front. Divers prélèvements seront alors effectués sur l'ensemble de la section, et la concentration moyenne C_m sera prise égale à la moyenne arithmétique C_a des concentrations des différents échantillons. Le débit liquide QL sera estimé à l'aide de la courbe de tarage de la section et le débit solide QS donné par la relation :

$$QS = C_a \cdot QL$$

- Mesures simplifiées

Si la turbulence est jugée suffisante pour que les concentrations soient homogènes dans la section de mesure, un seul point de prélèvement permettra de suivre les variations dans le temps du transport en suspension. C'est la méthode utilisée pour évaluer les poids de matières fines, non piégées dans les fosses à sédiments. Malgré son imprécision, elle est largement employée du fait de sa simplicité, d'autant plus qu'elle peut être facilement automatisée.

Lorsque les conditions d'écoulement n'assurent pas une homogénéisation suffisante des matières solides, le prélèvement d'un seul échantillon ne permet pas de calculer directement les quantités transportées. Il est alors nécessaire d'établir la relation liant la concentration de cet échantillon témoin C à la concentration moyenne C_m . Pour cela, un certain nombre de jaugeages complets est nécessaire (645), et la précision des résultats est étroitement liée à la fréquence des mesures.

Faute de temps (durant les crues rapides, par exemple), les jaugeages complets sont parfois remplacés par des prélèvements de surface effectués sur toute la largeur de la section de mesure. La concentration superficielle moyenne C_s est calculée par intégration de la courbe de variation de la concentration le long de la section ou, plus simplement, à partir de la moyenne arithmétique des différents prélèvements. La corrélation entre C_m et C_s est, dans de nombreux cas, meilleure que celle liant C_m et C.

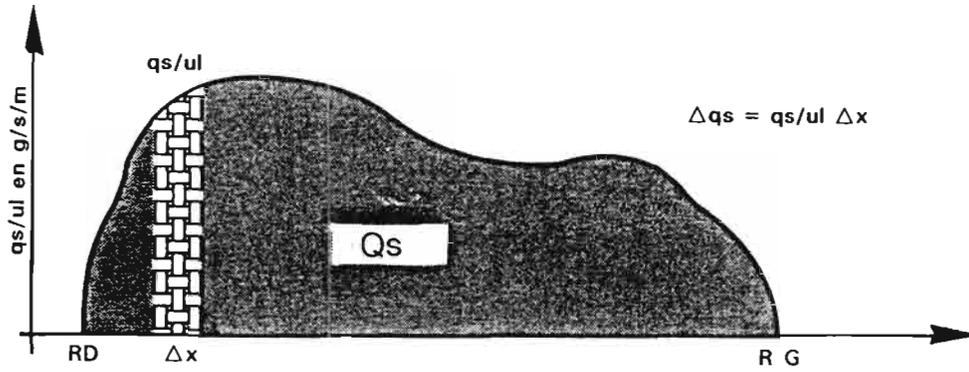


Fig- 69 - VARIATION DU DEBIT PAR UNITE DE LARGEUR LE LONG DE LA SECTION

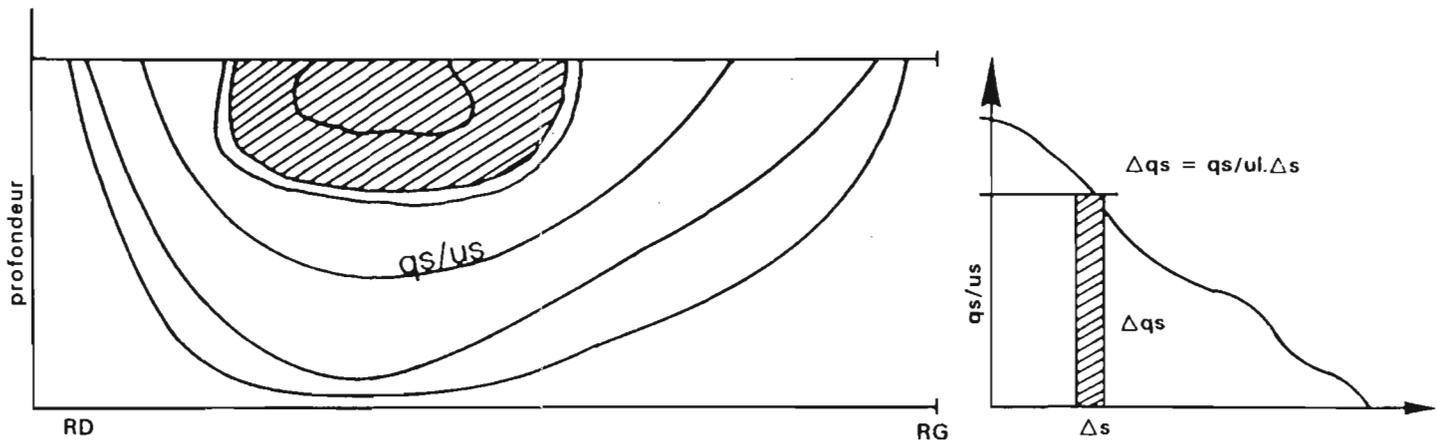


Fig-70 - COURBES D'EGAL DEBIT SOLIDE PAR UNITE DE SURFACE, CALCUL DU DEBIT SOLIDE TOTAL

2.4.2.4.1.2. Transports de fond

1. Matériel de mesure

Hors des parcelles et des petits bassins versants dont les exutoires peuvent être équipés de pièges ou de fosses à sédiments, la mesure du transport de fond reste très imprécise, les dispositifs communément utilisés perturbant de manière non négligeable le régime des sédiments. Fort heureusement, ce processus d'érosion est relativement peu actif en Afrique de l'Ouest, tant sur les bassins versants de taille grande et moyenne, que sur les bassins de quelques km² seulement. Les équipements de mesures actuellement disponibles seront donc décrits très sommairement :

- Les *nasses* sont constituées d'une poche de grillage montée sur un cadre métallique qui laisse passer les matières en suspension, mais retient les matériaux grossiers.
- Les *pièges* sont des récipients très aplatis de section longitudinale triangulaire dont le bord correspondant au sommet du triangle est dirigé vers l'amont. A l'opposé, dans la partie supérieure aval du récipient, une série de petites cloisons inclinées vers l'aval constitue le piège où viennent se prendre les matériaux (essentiellement les sables).
- Les *appareils à dépression* sont construits de façon à ce que les pertes de charge soient compensées par une dépression à l'arrière du dispositif, la vitesse d'entrée de l'eau étant alors à peu près égale à celle du cours d'eau au point de mesure. Une cloison perforée provoque un ralentissement de l'écoulement qui permet aux sédiments de se déposer dans la partie inférieure, l'eau sortant par la partie supérieure.
- Les *hydrophones*, dont le principe est basé sur l'enregistrement du bruit que font les matériaux en se déplaçant sur le fond, restent encore au stade expérimental.
- Les *sondeurs à ultrasons* permettent de suivre le déplacement des dunes dans les fonds sableux à faibles pentes.
- Les *traceurs fluorescents ou radio-actifs*, dont les méthodes d'utilisation (intégration spatiale ou intégration dans le temps) sont très délicates, demandent une certaine pratique.

2. Méthodologie générale

Les mesures doivent être effectuées, en différents points de la section transversale, en tenant compte du fait que les zones actives sont très différentes en périodes de crues et à l'étiage. Le transport de fond n'est pas généralement un phénomène continu, il ne commence à se produire qu'à partir d'un certain débit. Le processus peut se compliquer davantage lorsqu'un phénomène de pavage est observé, c'est-à-dire lorsqu'une couche de matériaux grossiers, peu faciles à déplacer, protège de l'érosion les sédiments plus fins qui, seuls, seraient facilement emportés par les eaux.

Comme pour les ravines, il est possible de mesurer dans le lit des cours d'eau l'ampleur des affouillements ou des atterrissements, les deux phénomènes pouvant très bien se succéder dans le temps. Ces observations, contrairement aux mesures du transport en suspension, ne peuvent être faites qu'en des sites suffisamment éloignés des stations hydrométriques qui, dans les études sur BVRE, se caractérisent précisément par une bonne stabilité.

Creusements et atterrissements sont mesurés à l'aide d'une chaîne lestée à sa partie inférieure et placée verticalement dans un trou qui est ensuite comblé. Lorsqu'il y a affouillement, la chaîne se couche horizontalement au niveau du creusement maximal. Elle peut aussi être recouverte par un remblaiement (au cours d'une décrue par exemple) qui sera mesuré par l'épaisseur de la couche de sédiments déposée sur la partie horizontale de la chaîne. Pour des mouvements de matériaux plus importants, la chaîne peut être remplacée par un empilement de briques. Divers dispositifs de ce type seront implantés en différents points du profil en long du cours d'eau.

Une méthode plus lourde consiste à effectuer périodiquement, en diverses sections transversales du lit, des relevés topographiques précis. Cette méthode n'est cependant valable qu'en l'absence de processus alternés

"affouillement-atterrissement". Dans le cas contraire, le bilan peut être très incomplet.

2.4.2.4.2. MESURES GLOBALES DANS LES RETENUES

Une retenue d'eau naturelle ou artificielle constitue, à l'échelle du bassin versant, un piège à sédiments de grande taille. En se donnant les moyens de contrôler le bilan hydraulique du réservoir et la turbidité des volumes déversés ou soutirés, l'envasement permet de déduire une valeur moyenne des transports solides, sur une période allant de la mise en eau (pour un barrage) ou des premiers levés bathymétriques (pour une retenue naturelle) à la date des mesures. Les relevés peuvent devenir ensuite périodiques.

Si on ne dispose que du levé des volumes déposés, il est nécessaire de faire une hypothèse sur le coefficient d'efficacité de la retenue quant au piégeage des sédiments. Ce coefficient dépend du temps de séjour de l'eau dans le réservoir, c'est-à-dire essentiellement du rapport de sa capacité de stockage au volume annuel écoulé, ainsi que de son mode d'exploitation.

2.4.2.4.2.1. Techniques de mesure

Les mesures sont de préférence effectuées à la fin d'un cycle hydrologique. Plusieurs cas peuvent être différenciés :

- *Retenues s'asséchant en cours d'année* : un simple levé topographique est à réaliser.
- *Petits réservoirs* dont la surface du plan d'eau, au moment de la mesure, n'excède pas quelques hectares : un relevé bathymétrique peut être fait à l'aide d'un lest descendu au bout d'un câble gradué, le long de profils matérialisés par des fils, également gradués, tendus entre les berges. L'espacement des mesures variera entre 2 et 20 mètres, suivant la surface à couvrir et l'irrégularité du fond. Il peut être parfois assez délicat (sédiments boueux) de saisir le moment exact où le lest touche le fond.
- *Retenues moyennes à grandes* : des moyens de levés et de repérages plus importants sont nécessaires. Néanmoins, l'emploi de matériels sophistiqués et malheureusement très onéreux de repérage (avec suivi automatique de repères mobiles, par exemple) et de mesure de distances (géodimètre) ne peut être envisagé dans le cadre d'études sur BVRE. La méthode proposée s'inspire de celle utilisée par les hydrologues de l'Orstom en Tunisie (619). Elle consiste à enregistrer, à l'aide d'un écho-sondeur à bande déroulante, les variations de profondeur de la retenue le long de profils transversaux préalablement repérés. Ce balisage, qui doit permettre de couvrir l'ensemble du réservoir, est effectué à la fois sur photographies aériennes et sur les documents cartographiques à grande échelle disponibles. Ces derniers doivent permettre de tracer les profils correspondant aux conditions initiales (temps t_0). Si des mesures périodiques doivent être effectuées, les profils seront balisés sur le terrain de façon permanente.

Le matériel nécessaire, outre le bathygraphe, se compose d'une embarcation propulsée par un moteur et d'un chronomètre. Deux opérateurs, l'un pour la manoeuvre du bateau, l'autre pour le contrôle de l'écho-sondeur, mènent l'opération.

Les levés se font profil par profil : au démarrage de l'embarcation placée entre deux repères, sont mis en route simultanément l'enregistreur et le chronomètre qui ne sert qu'au contrôle de la vitesse du bateau. Celui-ci est dirigé, à vitesse constante et réduite, vers le repère de la rive opposée. L'enregistrement et le chronomètre sont arrêtés dès que le bateau atteint l'autre extrémité du profil. Un contrôle de la mesure peut être fait en effectuant un second levé bathymétrique en sens inverse. Lorsque près des berges les eaux sont peu profondes, le bateau ne peut parcourir toute la longueur des profils. Le point d'arrêt de l'embarcation doit alors être repéré précisément, le relevé des profils étant complété par topographie classique.

Le dépouillement des mesures se fait également par profil :

- . La section d'origine est d'abord établie, d'après les plans disponibles ou d'après un relevé antérieur.
- . Pour transformer sur l'enregistrement l'échelle des temps en échelle des distances, il est

indispensable de pouvoir rattacher la cote du plan d'eau, au moment de la mesure, au système de nivellement des profils, puis de calculer la vitesse V , maintenue constante, par la relation :

$$V = l / t$$

avec l la distance parcourue, et t le temps de parcours donné par l'enregistrement et vérifié à l'aide du chronomètre.

Le nouveau profil, ainsi obtenu, est reporté sur le même graphique que le profil d'origine, ou un profil antérieur, afin de mesurer par planimétrie l'envasement (section S_a des profils de la figure 71).

Si, lors des relevés, apparaît un envasement important sur la partie exondée des profils, un levé topographique devra compléter le levé bathymétrique. Il est donc préférable d'effectuer les mesures au moment où les réservoirs sont à leur taux de remplissage le plus élevé, c'est-à-dire généralement en début de saison sèche. Le choix de cette période permet, de plus, d'établir un bilan sur des cycles hydrologiques complets.

Une fois effectué le calcul des envasements par profil, l'estimation du volume d'envasement total de la retenue peut être faite suivant plusieurs méthodes (619) :

- *Méthode de Kolmogorov*

Le volume compris entre deux profils non parallèles P_a et P_b , le fond de la retenue et le plan d'eau sont partagés en deux parties par un profil intermédiaire virtuel P_c partant de A et parallèle au profil P_b (fig. 71 a).

Les sections S_a et S_b sont déterminées par planimétrie. Pour estimer S_c , on admet la proportionnalité entre surfaces et largeurs :

$$S_c = S_a \cdot l_c / l_a$$

$$V_{bc} = V_1 = (S_b + S_c) \cdot h_1 / 2$$

h_1 étant la longueur de la perpendiculaire aux deux profils P_b et P_c ; l_a et l_c la longueur des profils P_a et P_c .

$$V_{ac} = V_2 = S_c \cdot h_2 / 2 = S_a \cdot l_c \cdot h_2 / 2 / l_a$$

h_2 étant la longueur de la perpendiculaire abaissée de A sur le profil P_c .

Le volume total entre les deux profils P_a et P_b est donné par l'équation :

$$V_{ab} = V_1 + V_2$$

- *Méthode de la hauteur moyenne*

Chacun des profils P_a , de surface d'envasement S_a , est assimilé à un rectangle de longueur l_a et de hauteur h_a (fig. 71 b) ; l_a étant la longueur du profil P_a à la cote de mesure.

Ainsi, $h_a = S_a / l_a$

La surface d'eau S_{ab} entre deux profils P_a et P_b est déterminée par planimétrie et le volume des apports entre ces deux mêmes profils par la relation :

$$V_{ab} = S_{ab} \cdot (h_a + h_b) / 2$$

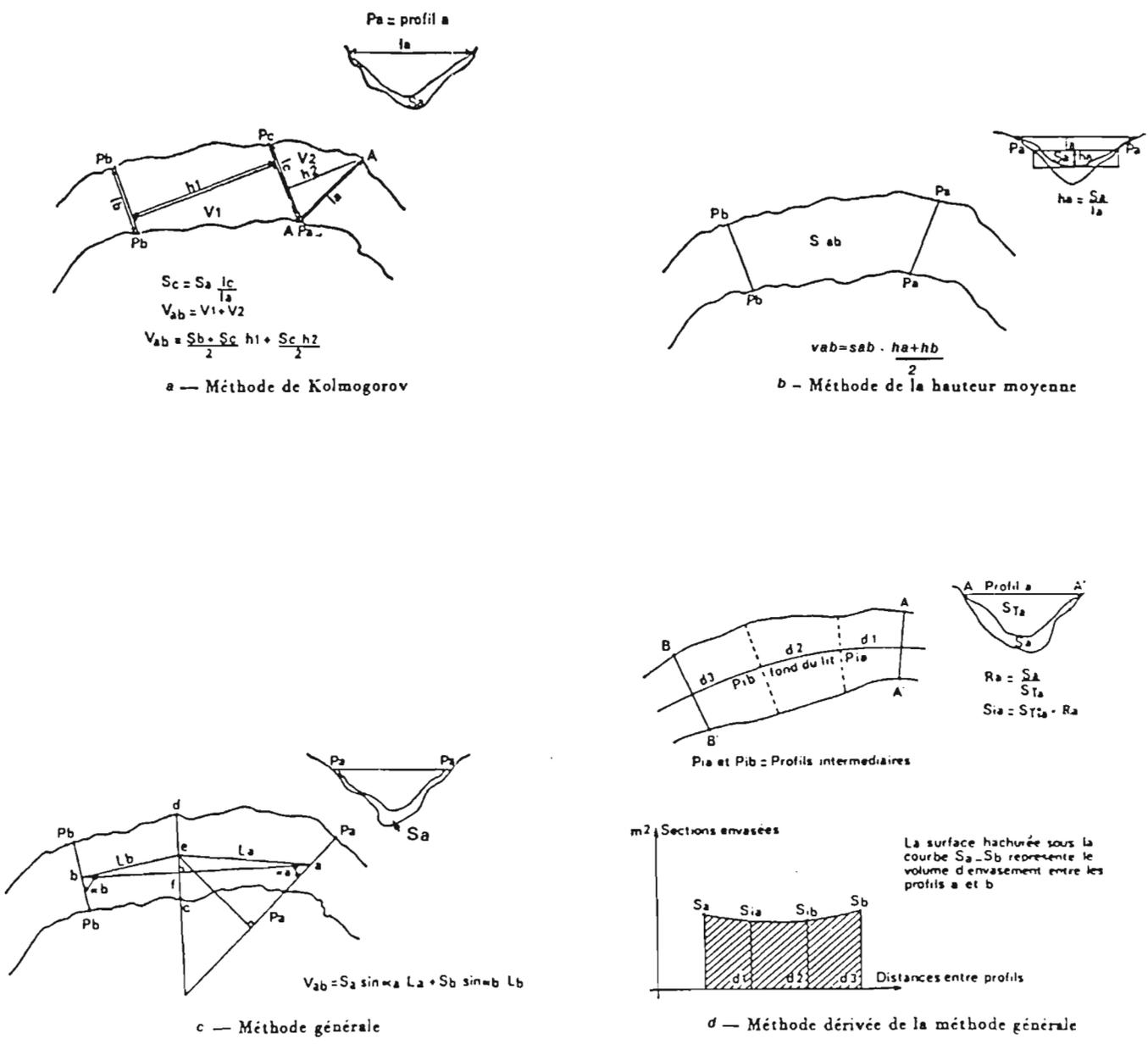


Fig-71- CALCUL DE L'ENVASUREMENT DES RETENUES (D'APRES J.CLAUDE)

- **Méthode générale**

Après le calcul des surfaces envasées S_a et S_b des profils P_a et P_b , l'estimation de la distance séparant ces deux profils est faite en joignant leur milieu a et b , en traçant ensuite la droite cd perpendiculaire au segment ab en son milieu, puis en calculant les distances L_a et L_b entre le milieu e du segment cd et les points a et b .

En tenant compte de l'inclinaison des sections P_a et P_b par rapport aux droites ea et eb , le volume total V_{ab} s'écrit (fig. 71 c) :

$$V_{ab} = S_a \cdot \sin(\alpha_a) \cdot L_a + S_b \cdot \sin(\alpha_b) \cdot L_b$$

- **Méthode dérivée de la méthode générale**

C'est une simplification de la méthode générale qui tient compte des particularités des retenues longiformes en utilisant, également, des profils intermédiaires (fig. 71 d).

Pour chaque profil relevé, est calculé le rapport d'envasement :

$$R = \text{section envasée} / \text{section totale d'origine}$$

ou
$$R = S_a / S_{Ta}$$

On affecte aux profils intermédiaires, tracés entre les profils mesurés, le rapport d'envasement du profil le plus proche. Un profil en long de la retenue passant par les points les plus bas de chaque profil en travers est ensuite tracé. Enfin, un dernier graphique, comportant en abscisses les distances entre les différents profils en travers relevés sur le profil en long, et en ordonnées les surfaces d'envasement mesurées ou calculées, permet de déterminer le volume total d'envasement par planimétrie de l'aire comprise entre la ligne brisée joignant les points représentatifs de chaque profil en travers et l'axe des abscisses.

2.4.2.4.2.2. Evaluation du transport solide

La comparaison, entre la masse de matériaux arrachés au bassin versant, la charge solide dans les cours d'eau et les sédiments déposés dans les retenues, demande quelques précautions.

Les matériaux en place (les sols comme les sédiments) se composent d'un mélange de trois phases : solide, eau, air.

En appelant :

V	:	le volume du mélange des trois phases
d_a	:	la densité apparente de ce même mélange
V_s	:	le volume des solides contenu dans V
d_r	:	la densité réelle des solides
p_s	:	le poids sec des solides
H_v	:	l'humidité volumique (eau extractible à 105°C)
ρ	:	la densité de l'eau
V_a	:	le volume d'air du mélange
e	:	la densité de l'air

$$V \cdot d_a = V_s \cdot d_r + H_v \cdot \rho + V_a \cdot e$$

En prenant un volume unitaire, et sachant que $\rho \approx 1$ et $e \approx 0$, il reste :

$$\begin{aligned} & da = V_s \cdot dr + H_v \\ \text{ou} & V_s = (da - H_v) / dr \end{aligned} \quad (1)$$

V_s , qui représente donc le volume de solides dans un volume unitaire, est par définition donné par la relation :

$$\begin{aligned} & V_s = ps / dr \\ \text{soit} & ps = V_s \cdot dr = da - H_v \end{aligned}$$

Le volume V_a occupé par l'air dans l'unité de volume est donné par l'expression :

$$V_a = 1 - H_v - V_s = 1 - H_v - (da - H_v) / dr$$

On en déduit :

$$\begin{aligned} - \text{ Pour un sol sec :} & H_v = 0 \\ & V_s = da / dr \\ & V_a = (dr - da) / dr \end{aligned}$$

et ainsi, la porosité totale p , en %, (indice des vides) est donnée par la relation :

$$p = (V_a / 1) \cdot 100 = [(dr - da) / dr] \cdot 100$$

$$\begin{aligned} - \text{ Pour une boue (solide + eau, sans air) :} & V_a = 0 \\ & H_v = (dr - da) / (dr - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

D'après les relations (1) et (2) : $V_s = (da - 1) / (dr - 1)$

$$\text{et} \quad ps = dr \cdot (da - 1) / (dr - 1)$$

Dans une retenue, la densité apparente peut varier énormément ; elle est fonction non seulement de la nature du sédiment (comme dr), mais aussi de l'état de consolidation. La prise d'échantillons pour son évaluation peut poser de difficiles problèmes techniques.

L'évolution du mélange solide - eau - air montre bien les difficultés qu'il y a à comparer les lames ou les volumes érodés, les poids transportés et les volumes déposés.

2.5. INFILTRATION

En arrivant sur le sol, la pluie suit deux chemins bien distincts : stagnation et écoulement en surface d'une part, pénétration dans les horizons pédologiques d'autre part. Bien que ces deux systèmes soient physiquement bien séparés, une interaction très complexe les régit. En outre, l'infiltration ne peut être considérée comme l'unique lien entre les eaux atmosphériques et les eaux dans le sol, les remontées par évaporation (prise dans son sens le plus large) jouant également un rôle important.

La capacité d'un sol à laisser pénétrer l'eau dépend de nombreux facteurs, dont certains varient sensiblement en fonction du temps : taux d'humidité, couverture végétale (dont le rôle de protection contre l'impact des gouttes de pluie peut avoir un rôle déterminant), systèmes racinaires, texture, structure, etc. Abstraction faite du facteur d'échelle, l'étude du phénomène d'infiltration doit donc, excepté pour des applications particulières (agronomiques ou hydrogéologiques, par exemple), s'appuyer sur des mesures réalisées dans des conditions parfaitement définies, aussi proches que possible des conditions naturelles.

2.5.1. INFILTROMETRES AVEC SIMULATION DE PLUIE

La recherche d'une meilleure compréhension des phénomènes de ruissellement a amené les hydrologues travaillant en Afrique francophone à tenter de quantifier, par des mesures in-situ, les caractéristiques hydrodynamiques des sols. Les premiers appareils utilisés dans les années 60 (732-733) présentaient l'inconvénient majeur de fonctionner dans des conditions très différentes des conditions naturelles (infiltromètre à double anneau, par exemple) : aire de mesure restreinte, absence de ruissellement, charge hydraulique importante, destruction au moins partielle de la croûte superficielle lors de l'installation de l'appareil (paragraphe 2 5.2.).

Les études sur parcelles ayant montré, malgré leurs imperfections, l'intérêt de tels dispositifs dans l'analyse des phénomènes d'érosion et de ruissellement, les recherches, dans ce domaine, se sont intensifiées. Les limitations des mesures sur parcelles soumises aux pluies naturelles résidaient, alors essentiellement, dans la durée nécessaire à l'obtention d'échantillons statistiquement fiables pour la détermination des nombreux paramètres explicatifs du ruissellement et de l'infiltration, ainsi que dans la nécessité de multiplier le nombre de sites d'observation pour assurer une extension spatiale satisfaisante des résultats. Le recours à la simulation de pluie, à l'aide d'un appareillage facilement mobilisable sur le terrain, semblait répondre à ces diverses contraintes. Les premiers travaux, menés entre autres par A. Lafforgue dans les années 70 (739-740), s'appuyaient sur un dispositif relativement lourd (simulateur de pluie type "Swanson", parcelle de 50 m² de superficie - photo 38). Aussi, la collaboration entre pédologues et hydrologues de l'Orstom aboutit, quelques années plus tard, à la mise au point d'un mini-simulateur de pluie fiable, relativement facile à utiliser et à transporter (704).

2.5.1.1. APPAREILLAGE

Un système d'aspersion permet de modifier l'intensité des pluies au cours des mesures (705). Il est fixé au sommet d'une tour en forme de tronc de pyramide de 4 mètres de haut, sur laquelle peut être fixée une bâche de protection contre le vent (fig. 72 et photo 42). Il se compose essentiellement d'un gicleur calibré, monté sur un bras mobile et alimenté en eau à débit constant de manière que les gouttes de pluies produites aient sensiblement la même taille et la même énergie cinétique que celles des gouttes de pluie naturelles. Calé lors des mesures à 3,6 mètres du sol, il est animé d'un mouvement de balancement par un moteur électrique. La possibilité de modifier, à l'aide d'un bras de levier, l'angle de balancement permet de faire varier l'intensité au sol, dans une gamme comprise entre 30 et 150 mm/h. Bien qu'un dispositif permette de préprogrammer les intensités, il est prudent d'effectuer des contrôles à l'aide d'une parcelle d'étalonnage constituée d'un cadre, dont le fond en tôle assure un ruissellement intégral.

La parcelle de mesure est matérialisée par un cadre métallique de 1 m², enfoncé dans le sol sur environ 5 cm (photo 43). Sur la face aval, une série de trous permet de recevoir les eaux de ruissellement dans un canal collecteur qui débouche, à l'aide d'un tuyau d'amenée, dans une cuve réceptrice calibrée, de façon à ce qu'une élévation d'eau de 1 mm corresponde à une lame ruisselée de 1 cm. Un limnigraphe de précision (permettant d'apprécier une variation de hauteur d'eau de 1 mm) et à rotation rapide (précision de l'ordre de 10 s) enregistre les variations en continu des hauteurs d'eau et donc des débits (photo 44).

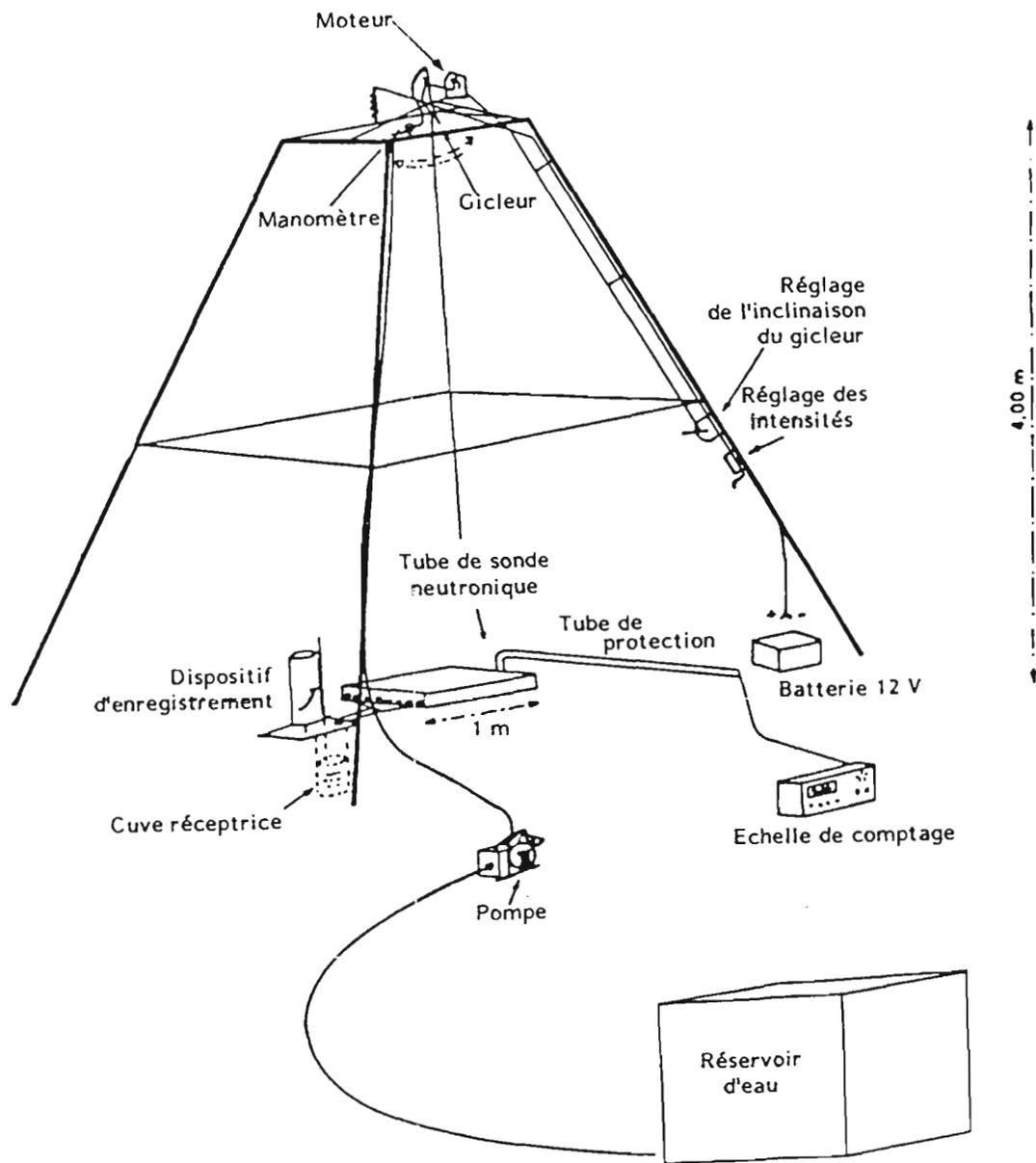


Fig- 72 - SCHEMA DU MINI SIMULATEUR DE PLUIE (D'APRES A.CASENAVE ET C.VALENTIN)



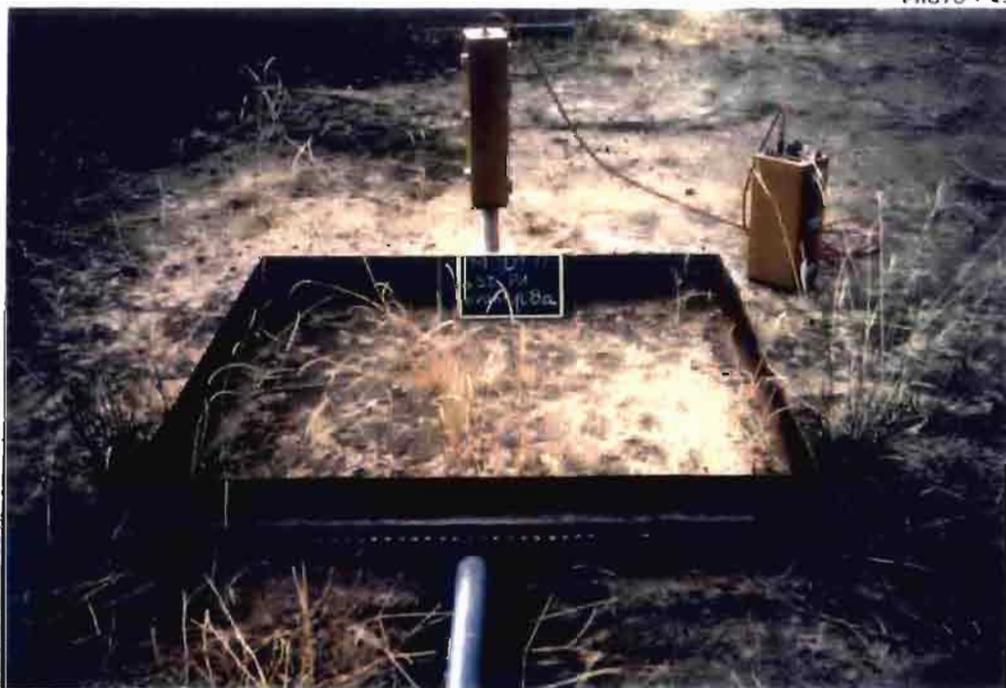
CLICHÉ: B. THÉBÉ

Mini simulateur de pluie type "Orstom"
- Maroua - (Cameroun)



CLICHÉ: B. THÉBÉ

Limnigraphe de précision - Mouda - (Cameroun)



CLICHÉ: B. THÉBÉ

Mini parcelle de 1m² - Mouda - (Cameroun)

2.5.1.2. PRECAUTIONS D'INSTALLATION

Le cadre métallique de la parcelle est enfoncé dans le sol, soit à la masse (une matrice renforcée s'encastant sur la cadre lui-même permet de le protéger), soit, lorsque le terrain est très dur, en creusant une rainure et en assurant une parfaite étanchéité avec de l'argile ou du goudron. Les trous d'évacuation doivent aplanir la surface du sol.

Lors de l'installation, comme durant les diverses manipulations, il faut prendre garde de ne pas piétiner l'intérieur de la parcelle.

Le fond de la cuve réceptrice de l'eau de ruissellement doit être parfaitement horizontal, alors qu'une légère inclinaison (3 à 5 ‰) est donnée au tuyau qui la relie au collecteur.

Le gicleur d'aspersion est centré au-dessus de la parcelle et calé à la hauteur standard. Enfin, en cours de fonctionnement, la pression de l'eau doit être ajustée et contrôlée, et la protection contre le vent assurée (voir le schéma d'organisation de fonctionnement fig. 73).

2.5.1.3. PROCESSUS OBSERVÉS

A. Lafforgue (739) a réalisé un inventaire et un examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration observés sur petites parcelles. Il distingue quatre phases (fig. 74) :

1. Phase d'imbibition

Du début de l'averse jusqu'au temps t_i , aucun ruissellement n'est observé. Si on néglige la pluie interceptée par la végétation I_{int} , la hauteur d'eau infiltrée W est totale et correspond à une hauteur de pluie $P(t_p)$. Une partie de l'eau est tout de même retenue dans des flaques et représente le stockage superficiel immobilisé S .

Ainsi $P(t_p) = W(t_p)$ et $P(t_i) = W(t_i) + S(t_i)$

2. Régime transitoire

Au temps t_i , quelques flaques commencent à déborder, de l'eau se met en mouvement et parvient à l'exutoire.

On observe :

- une diminution continue de l'intensité d'infiltration,
- une augmentation de la lame d'eau en mouvement sur la parcelle (détention superficielle mobilisable D_m),
- une augmentation, jusqu'au temps t_s , du stockage dans les flaques.

Si L est la lame ruisselée à un instant t , le bilan s'écrit :

$$P(t) = L(t) + W(t) + D_m(t) + S(t)$$

en dérivant par rapport au temps, et sachant que $I(t) = I$

$$I = R(t) + F(t) + dD_m / dt + dS / dt$$

- I intensité de la pluie
- R intensité du ruissellement
- F intensité de l'infiltration

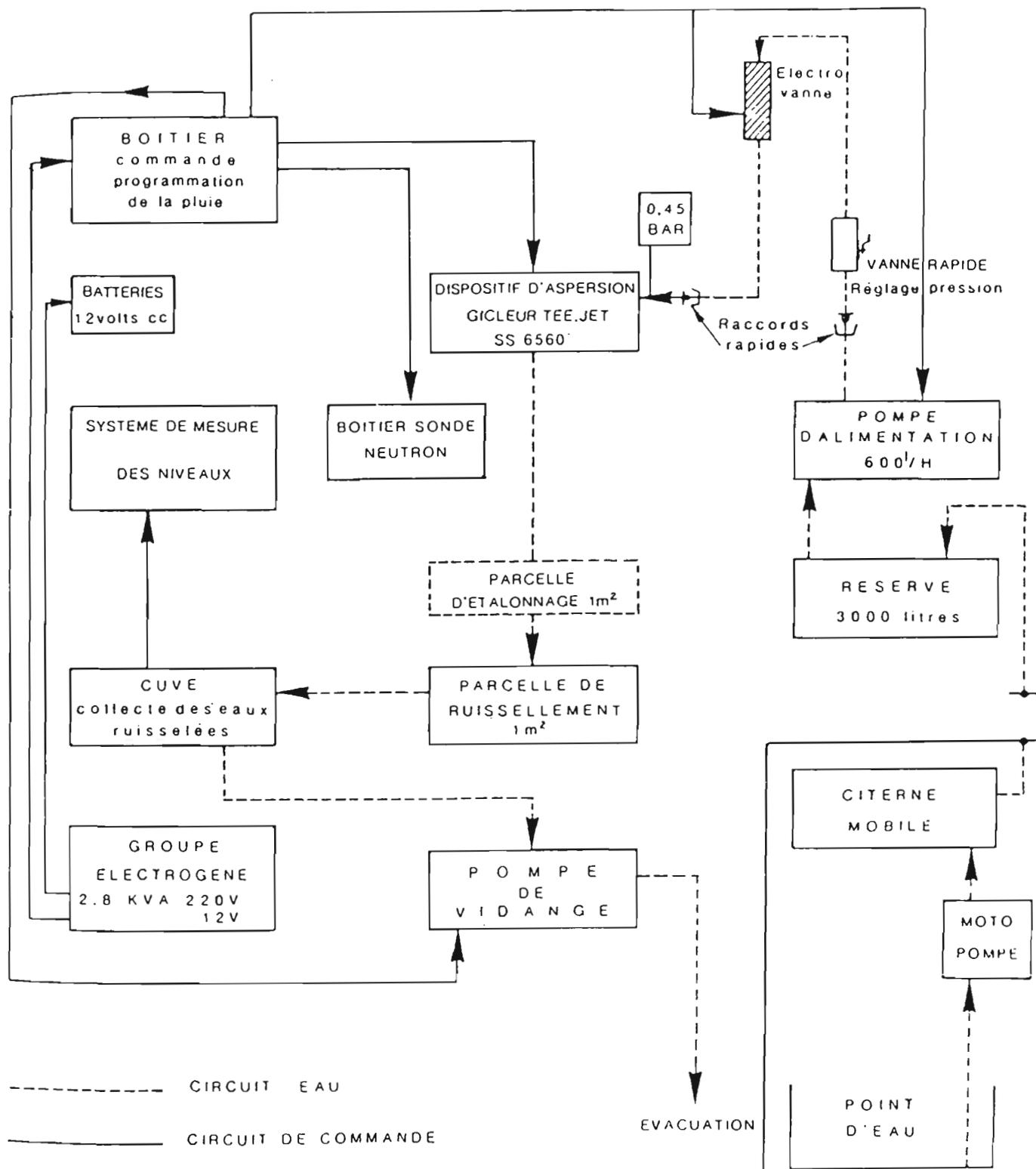


Fig-73 - SCHEMA D'ORGANISATION DE FONCTIONNEMENT DU MINI SIMULATEUR DE PLUIE

ORSTOM, 2ème GENERATION (D'APRES A.BERNARD)

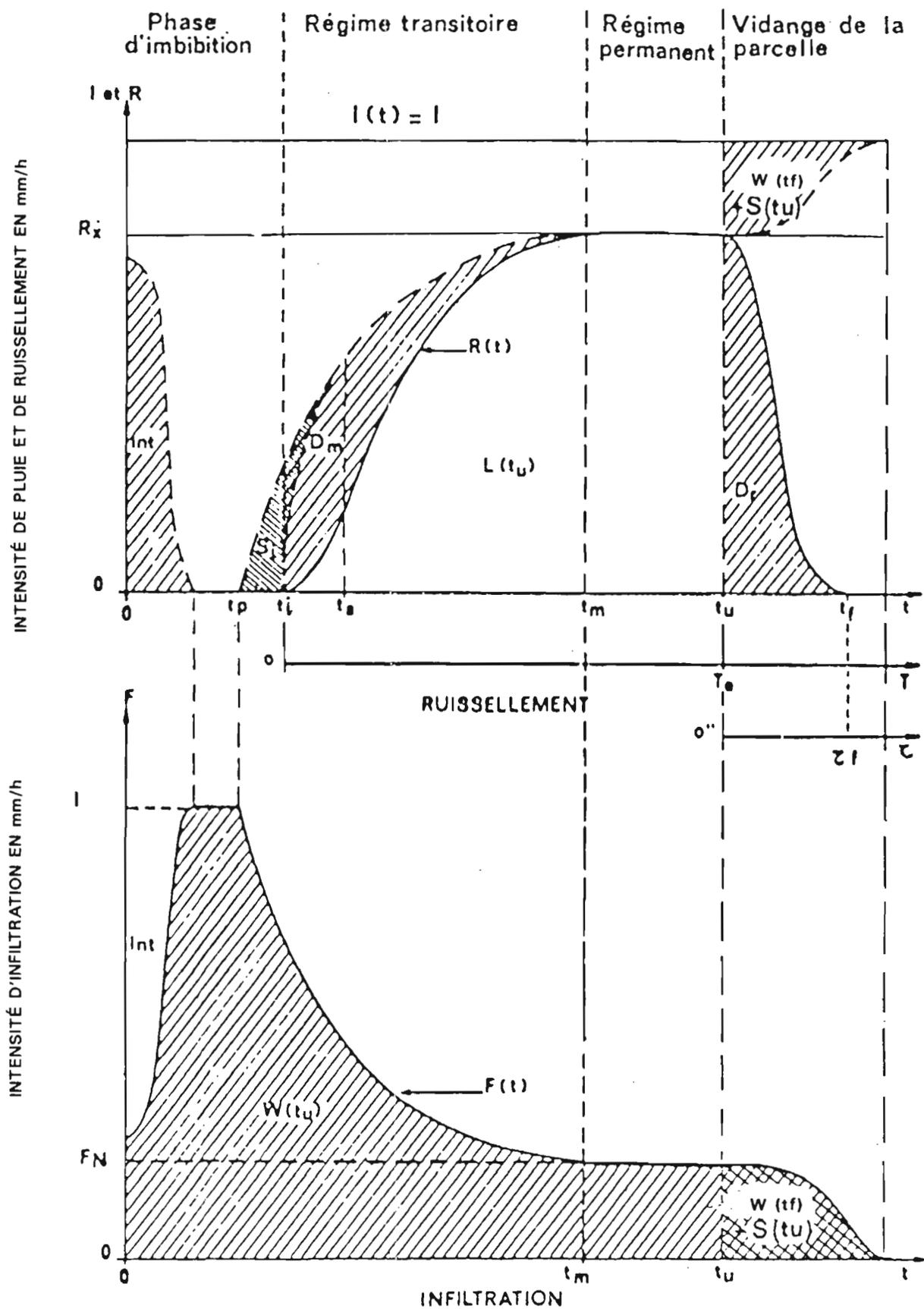


Fig - 74 - RUISSELLEMENT ET INFILTRATION SOUS INTENSITÉ D'AVERSÉ CONSTANTE (D'APRES A.LAFFORGUE)

3. Régime permanent

A partir du temps t_m , l'infiltration atteint une valeur FN et prend un régime quasi permanent. L'hydrogramme de ruissellement présente alors un palier qui correspond à une valeur maximale R_x qui se maintient jusqu'à la fin de la pluie.

Alors $R(t) = R_x = I - FN$

et $L(t) = L(t_m) + (I - FN) \cdot (t - t_m)$

La lame L ruisselée est une fonction linéaire du temps et de la hauteur de pluie.

4. Phase de vidange

Au-delà de l'instant t_u , qui correspond à l'arrêt de la pluie, le ruissellement et l'infiltration alimentés par les réserves superficielles décroissent progressivement avant de s'annuler.

La quantité d'eau qui s'écoule hors de la parcelle pendant la phase de vidange est donnée par la relation :

$$L(t_f) - L(t_u) = D_m(t_u) + S(t_u) - S(t_f) + W(t_u) - W(t_f)$$

Elle correspond à une lame d'eau D_r , appelée détention superficielle récupérable par le ruissellement.

Ainsi, chaque pluie simulée correspond à une lame infiltrée :

$$W = P - (L + D_r)$$

Tous les paramètres étant exprimés en millimètres, avec :

- W la lame infiltrée durant la durée de la pluie
- P la hauteur totale de la pluie simulée
- L la lame ruisselée durant la durée de la pluie
- D_r la détention superficielle récupérable.

A cette lame infiltrée correspond un coefficient d'infiltration exprimé en % : $K_i = 100 \cdot W / P$.

Pour une parcelle déterminée, ce coefficient dépend de l'averse génératrice (hauteur totale, intensité), mais aussi de l'état d'humectation du sol. La capacité d'infiltration des sols pourrait donc être caractérisée par un coefficient d'infiltration calculé pour une averse et un état d'humectation précis ou, ce qui est équivalent, pour une succession d'averses, parfaitement définie, tombant sur un sol sec. Alors,

$$K_i = 100 \cdot \sum W / \sum P$$

J. Albergel et al. (750) définissent un coefficient d'infiltration à saturation K_s , en reportant, dans un système de coordonnées cartésiennes, l'intensité d'infiltration en régime permanent FN , en fonction de l'intensité de la pluie I , pour différents états d'humectation du sol. Ils obtiennent un faisceau de droites dont l'intersection avec la première bissectrice représente l'intensité minimale de pluie nécessaire à l'apparition du ruissellement. La droite inférieure caractérise la pluie survenue sur un sol dont l'état d'humectation est proche de la saturation. Son intersection avec la première bissectrice définit donc le coefficient d'infiltration K_s , exprimé en mm/h, qui représente l'intensité minimale d'infiltration à saturation (fig. 75).

2.5.1.4. PROTOCOLE DE MESURES

Les sites de mesures sont choisis en fonction de leur représentativité : type de sol, état de surface, pente, couvert végétal, etc.

Le dispositif proposé permettant un travail d'analyse et pas seulement le simple calcul d'un coefficient d'infiltration (K_i ou K_s), il est important de définir un protocole précis de mesures à partir desquelles seront

quantifiés les principaux facteurs explicatifs du ruissellement et de l'infiltration : hauteur et intensité de la pluie, état d'humectation du sol. Par sécurité, toutes les mesures seront triplées, la valeur retenue étant la médiane ou la moyenne des différents résultats.

L'influence de l'humidité du sol sera évaluée à partir d'une série de pluies simulées, séparées par des temps de ressuyage plus ou moins longs. Pour une gamme d'humidité donnée, le rôle de l'intensité de la pluie sera quantifié en simulant des averses constituées d'une séquence d'épisodes d'intensités différentes, déterminées à partir des caractéristiques des pluies naturelles de la région étudiée. Le nombre d'averses et de hauteurs pluviométriques simulées devra être suffisant pour disposer d'une gamme de temps de ressuyage assez large, et pour avoir la possibilité de définir la relation liant la pluie au ruissellement. Il faudra tout de même veiller à ce que le total pluviométrique reçu par la parcelle reste inférieur au total annuel moyen.

Le protocole adopté a retenu les hyétogrammes des averses de fréquences annuelle et décennale. Les mesures sont effectuées en saison sèche, un mois après les dernières pluies, afin d'avoir la certitude de rencontrer un sol sec et de ne pas être incommodé par des pluies naturelles.

A la lumière des nombreuses expérimentations menées par l'Orstom dans différentes régions de l'Afrique de l'Ouest et du Centre, A. Casenave (725) a renoncé, après avoir testé différentes méthodes (gravimétrique, neutronique, choc thermique), à mesurer directement l'humidité du sol. Il préconise d'évaluer l'état d'humectation par un indice qui tient compte de la hauteur des précipitations antérieures et de leur répartition dans le temps. Cet indice présente l'avantage de pouvoir être calculé à partir d'une chronique pluviométrique d'un poste de référence, proche du site à étudier :

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{n-1}) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

où :

IK_n est la valeur de l'indice avant la pluie n

IK_{n-1} la valeur de l'indice avant la pluie n-1

P_{n-1} la hauteur de la pluie n-1 (égale à la pluie utile compte tenu des intensités simulées)

t le temps, en jours et fraction de jour, séparant la fin de la pluie n-1 du début de la pluie n

α coefficient d'ajustement pris égal à 0,5

Pour un site de mesure donné, et strictement dans le cadre du protocole décrit ci-dessus, il existe une relation linéaire entre la lame ruisselée L et l'indice IK :

$$L = a \cdot IK + b \quad (1)$$

Les coefficients a et b, qui varient de façon linéaire avec la hauteur de pluie P, peuvent être déterminés expérimentalement.

En introduisant dans l'équation (1) les valeurs a(P) et b(P), la lame ruisselée est donnée par l'expression :

$$L = A \cdot P + B \cdot IK + C \cdot P \cdot IK + D \quad (2)$$

Cette lame ruisselée correspond à une lame infiltrée :

$$W = P - (L + Dr)$$

où, Dr correspond à la détention superficielle récupérable (paragraphe 2.5.1.3.).

Ainsi, la relation caractérisant l'aptitude à l'infiltration s'écrit :

$$W = P - (A \cdot P + B \cdot IK + C \cdot P \cdot IK + D + Dr) \quad (3)$$

Afin de pouvoir comparer différentes surfaces élémentaires, définies comme des ensembles homogènes quant à leur comportement hydrodynamique, A. Casenave et C. Valentin (725) définissent pour la zone sahélienne les valeurs $Ki0$ et $Ki20$ qui sont les coefficients d'infiltration ($Ki = 100 \cdot W / P$) calculés pour une pluie de 50

mm et deux états d'humectation :

- IK = 0 correspondant à des sols très secs
IK = 20 à des sols très humides

Les auteurs donnent pour les différentes unités rencontrées les coefficients A, B, C et D des équations (2) et (3).

2.5.2. INFILTROMETRES A ANNEAUX

Bien que plusieurs chercheurs (Lafforgue et Naah - 740 - ou Valentin, 1981) aient montré que les intensités d'infiltration observées dans les conditions naturelles de ruissellement ne peuvent être déduites de mesures effectuées à l'aide d'infiltromètres de type "Muntz", il semble difficile de faire abstraction d'une méthode dont les résultats figurent dans de nombreuses publications.

Depuis l'établissement du premier appareil de ce type par Muntz, Faure et Laine, divers expérimentateurs ont repris, modifié et amélioré le dispositif initial.

Le principe de base consiste à maintenir, à l'intérieur d'un cylindre enfoncé dans le sol et délimitant une certaine surface, une charge hydraulique constante par addition de volumes d'eau mesurés en fonction du temps. L'influence des caractéristiques de l'appareil sur les résultats obtenus incite à la plus grande prudence quant à la possibilité de comparer les vitesses d'infiltration fournies par des essais menés à l'aide de dispositifs différents.

Quatre caractéristiques sont à considérer :

- la charge d'eau à maintenir constante,
- l'enfoncement de l'infiltromètre dans le sol,
- le diamètre intérieur de l'appareil,
- le diamètre intérieur de l'anneau de garde dont le but est d'assurer une infiltration verticale.

L'appareil de ce type, proposé en 1970 par J. Colombani et Al. (729) de l'Orstom, présentait les caractéristiques suivantes (fig. 76) :

- diamètre de l'anneau de mesure : 112 mm ;
- diamètre de l'anneau de garde : 320 mm (rapport des sections d'infiltration 1 à 8) ;
- charge hydraulique : 3 cm ;
- enfoncement dans le sol : 6 cm.

Il permettait de déterminer une intensité maximale d'infiltration, appelée également coefficient de perméabilité, exprimée en m/s (fig. 77).

2.5.3. INFILTROMETRE "PORCHET"

L'infiltromètre "Porchet", qui a été le premier utilisé par les hydrologues de l'Orstom pour tenter de caractériser l'hydrodynamique des sols, n'est cité que pour mémoire (732).

Dans son principe, cette méthode peut tout de même présenter un intérêt pour certaines applications hydrogéologiques. Elle consiste à creuser dans le sol, à l'aide d'une tarière, un trou d'un certain diamètre jusqu'à une profondeur déterminée, la mesure s'effectuant généralement par horizon pédologique. Ce trou est ensuite rempli d'eau et le suivi de la baisse de niveau, en fonction du temps, permet de déterminer la vitesse d'infiltration par application de la loi de Darcy :

$$Q = K \cdot S \cdot I$$

Q étant le débit, K le coefficient de perméabilité, S la surface d'infiltration et I la pente motrice, voisine de 1.

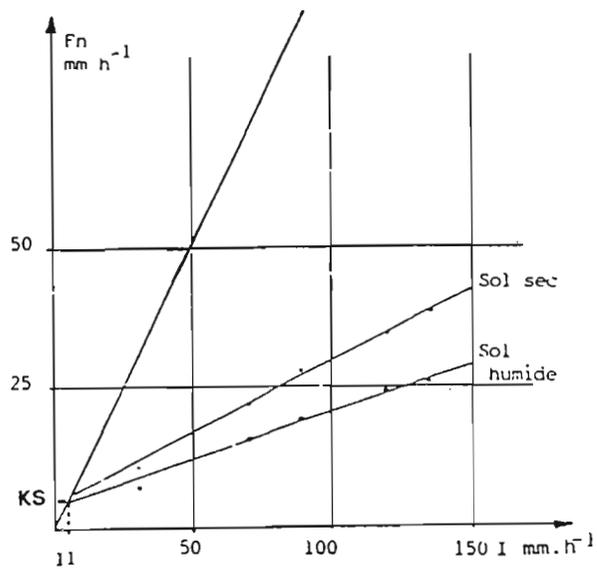


Fig-75 - DETERMINATION DU COEFFICIENT D'INFILTRATION KS
 EXEMPLE DE BOULSA, PARCELLE 1 (D'APRES ALBERGEL 1987)

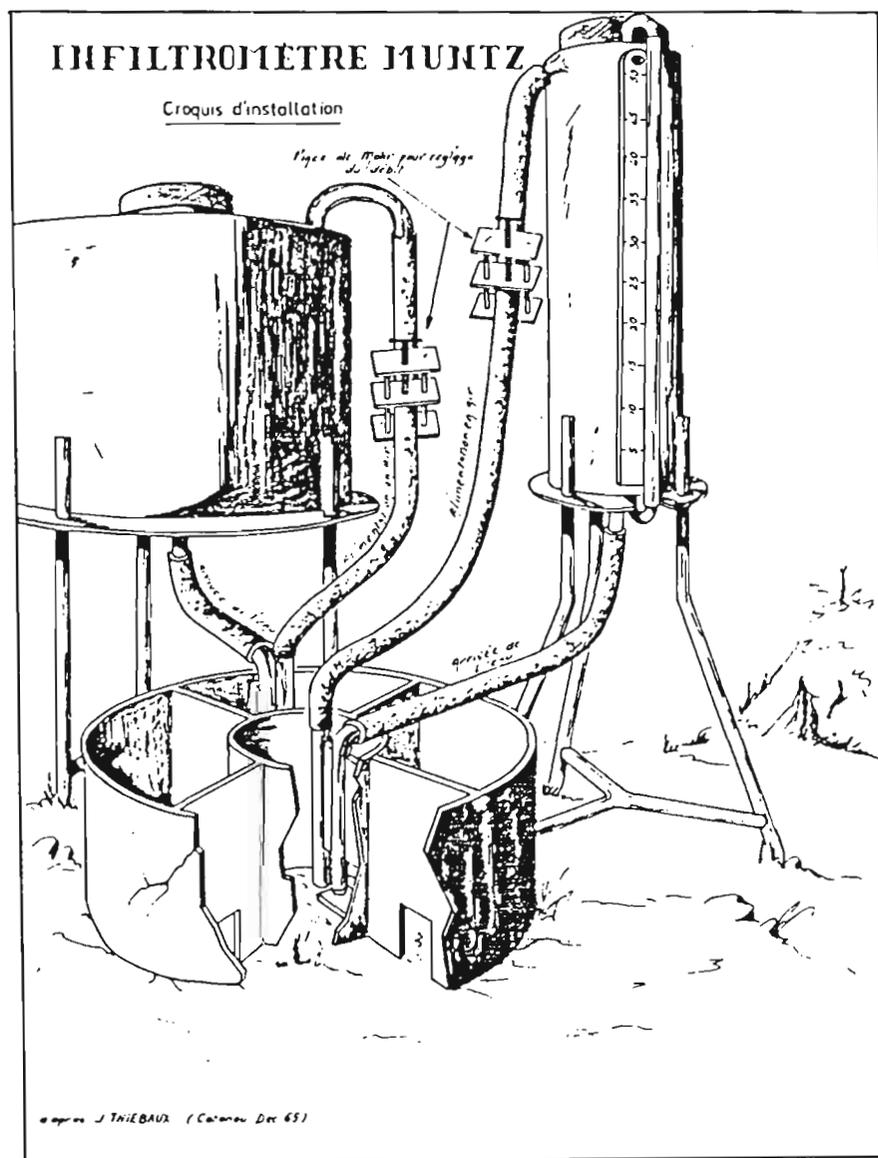


Fig-76 - INFILTROMÈTRE ORSTOM TYPE "MUNTZ"

Si R est le rayon du trou et h la hauteur d'eau :

$$S = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h + \pi \cdot R^2$$

(surface des parois augmentée de celle du fond du trou)

et

$$Q = 2 \cdot K \cdot \pi \cdot R \cdot (h + R / 2)$$

Pendant l'intervalle de temps dt , l'eau s'abaisse d'une hauteur dh et $Q = -\pi \cdot R^2 \cdot dh / dt$.

Ainsi

$$\begin{aligned} 2 \cdot K \cdot \pi \cdot R \cdot (h + R / 2) &= -\pi \cdot R^2 \cdot dh / dt \\ (2 \cdot K / R) \cdot dt &= -dh / (h + R / 2) \end{aligned}$$

Soit, en intégrant : $(2 \cdot K / R) \cdot t = -\text{Ln}(h + R / 2) + c$

Pour $t = 0$, on a $h = h_0$ (hauteur d'eau initiale)

d'où $c = \text{Ln}(h_0 + R / 2)$

$$\text{Ln}(h + R / 2) = \text{Ln}(h_0 + R / 2) - (2 \cdot K / R) \cdot t$$

Equation de la forme : $y = A - B \cdot t$ qui permet de déterminer K .

Il est généralement nécessaire d'effectuer plusieurs remplissages (souvent 2 suffisent) pour obtenir une vitesse d'infiltration stable.

2.6. L'EAU DANS LA ZONE NON SATURÉE

L'étude des mouvements de l'eau dans la zone non saturée, c'est-à-dire entre la surface du sol et la nappe souterraine (lorsqu'elle existe), est d'un grand intérêt pour de nombreuses applications :

- Evaluation de l'aptitude des sols au ruissellement.
- Mesure de l'infiltration réelle et de la recharge des nappes souterraines.
(Ces deux aspects ont été abordés dans le chapitre 2.5. essentiellement sous l'angle météorologique des manifestations superficielles).
- Caractérisations pédologiques.
- Mesure directe de l'évaporation réelle, terme important du bilan hydrique utilisé entre autres dans de nombreuses applications agronomiques : estimation des besoins en eau des plantes, évaluation de l'efficacité des façons culturales ou des traitements des sols (lessivage des terres salées, par exemple).

Les observations et mesures au champ sont relativement complexes, contraignantes et souvent délicates, elles ne se justifient donc, que si elles sont indispensables aux objectifs à atteindre. Nous avons déjà souligné comment A. Casenave (chercheur Orstom) avait dû renoncer, par manque de fiabilité des résultats, à utiliser les mesures "in situ" de l'humidité des sols lors des expérimentations à l'aide du mini-simulateur de pluie (paragraphe 2.5.1.4.).

2.6.1. QUELQUES DEFINITIONS

Un terrain non saturé renferme à la fois de l'eau et de l'air, ce dernier pouvant contenir de la vapeur d'eau.

Très schématiquement, il faut différencier les eaux liées (eaux hygroscopiques, eau pelliculaire, eau capillaire isolée) des eaux libres (eau capillaire continue et eau gravifique). Seules ces dernières subissent l'action de la gravité.

On définit :

- la teneur en eau volumique : $H_v = V_e / V_s$

V_e étant le volume d'eau et V_s le volume du sol en place contenant V_e .

- la teneur en eau pondérale : $H_p = P_e / P_s$

P_e étant le poids de l'eau et P_s le poids du sol contenant P_e , desséché à 105°.

Si d_a est la densité apparente du sol sec, et en considérant que la densité de l'eau est égale à l'unité :

$$H_p = V_e / V_s / d_a = H_v / d_a$$

soit $H_v = H_p \cdot d_a$

- la pression effective de l'eau ou succion :

C'est la différence h , entre la pression de l'eau dans le sol et la pression atmosphérique (ce qui suppose que l'air contenu dans les pores est effectivement à la pression atmosphérique).

La mesure de H_v et de h (fonction de H_v) permet de définir l'écoulement de l'eau : la variation de H_v donne la valeur absolue du flux et la mesure de h , le sens de ce flux.

Si Z représente la cote d'un point par rapport à la surface du sol sur un axe vertical OZ orienté positivement vers le bas, la charge hydraulique en ce point est définie par : $H = h - Z$.

INFILTROMETRE MUNTZ

(Type COLOMBANI - LAMAGAT - THIEBAUX)
 ESSAI SUR SOL PEU PERMEABLE

$K = 38,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (STABILISATION APRES 17 mn ENVIRON)

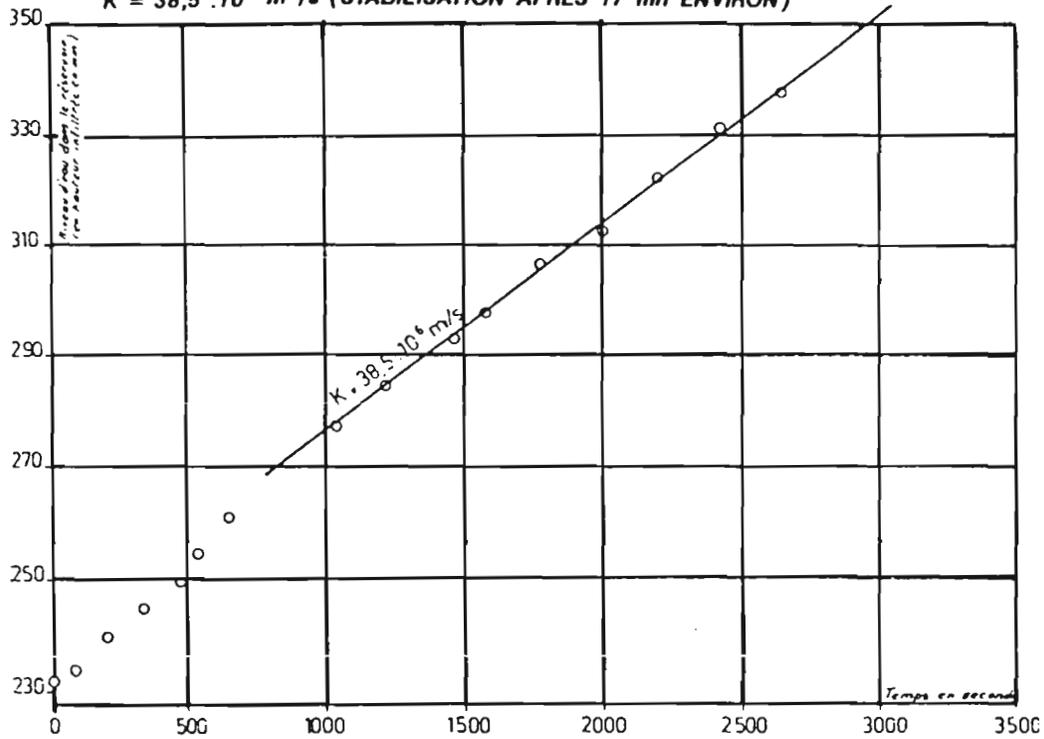


Fig-77 - CALCUL DU COEFFICIENT DE PERMEABILITE

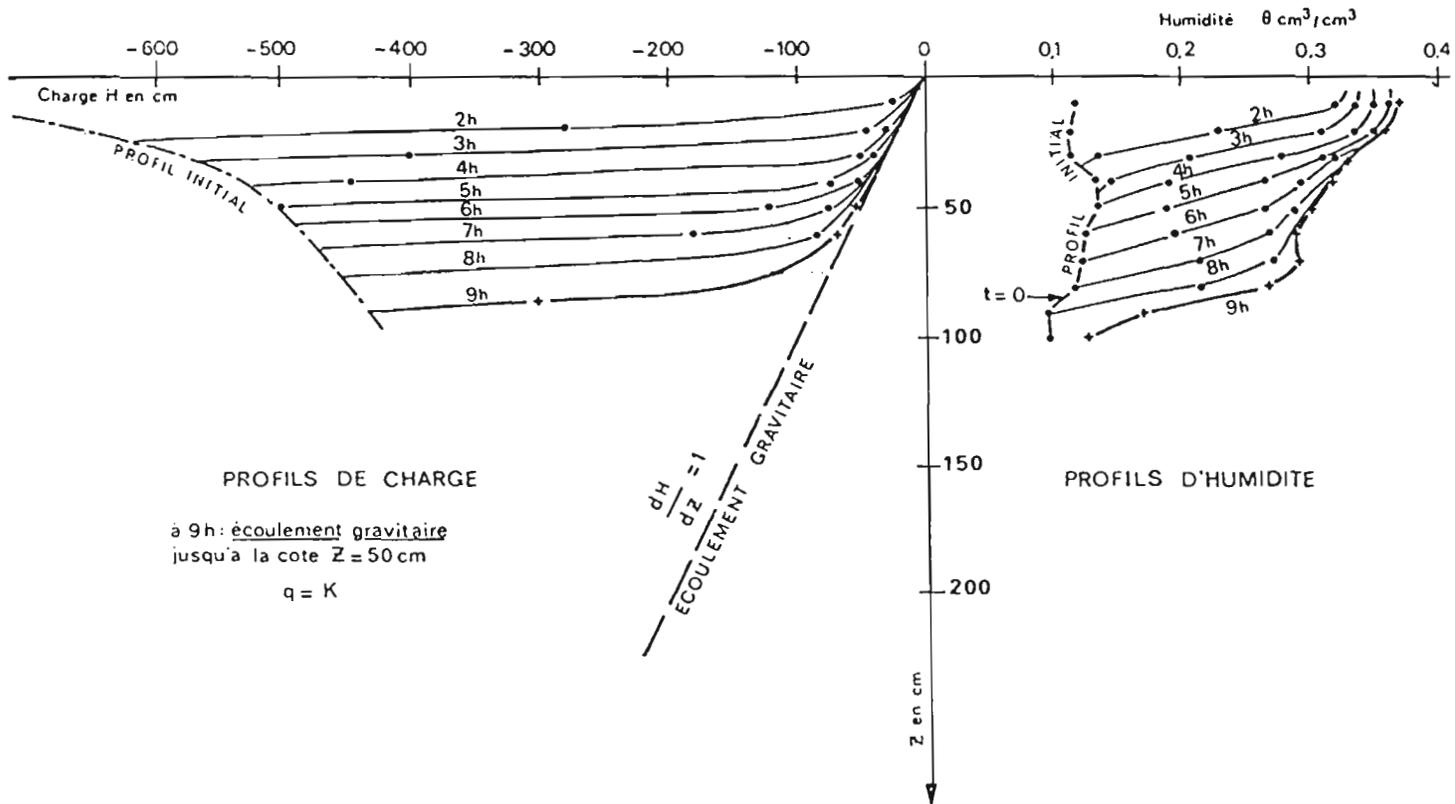


Fig-78 - VARIATION DE LA CHARGE HYDRAULIQUE ET DES PROFILS D'HUMIDITE EN COURS D'INFILTRATION (D'APRES J.COLOMBANI)

Si H varie d'un point à un autre, il y a écoulement des points à forte charge (énergie potentielle par unité de poids) vers les points à faible charge. Le flux d'écoulement est régi par la loi de Darcy généralisée (728) qui, pour un écoulement vertical, s'écrit :

$$q = - K(H_v) \cdot \Delta H / \Delta Z$$

- . $K(H_v)$ est la conductivité hydraulique (fonction de l'humidité du sol), elle représente la facilité, plus ou moins prononcée, de passage de l'eau dans le sol.

Certains auteurs réservent l'appellation de "conductivité hydraulique" aux sols saturés. Il s'agit du coefficient de perméabilité qui est alors une constante caractéristique du milieu. Pour les sols non saturés, $K(H_v)$ est alors appelée conductivité capillaire ou perméabilité relative.

- . $\Delta H / \Delta Z$ est le gradient de charge, ou gradient hydraulique, entre deux sections séparées par la distance ΔZ .
- . q est la vitesse de Darcy qui représente un flux volumique à travers une section unitaire du sol.

La connaissance de $K(H_v)$ et de H, donc de $h(H_v)$, permet de définir la dynamique de l'eau dans le sol (fig. 78).

Les hydrogéologues (807) réservent la notion de conductivité hydraulique aux milieux discontinus (terrains fissurés), celle de perméabilité étant appliquée aux milieux continus (paragraphe 2.7.1.).

2.6.2. CHOIX DES SITES DE MESURE

Le choix des sites de mesures doit être guidé par la connaissance que l'on peut avoir des formations pédologiques, de la végétation et des états de surface. Il dépend aussi des objectifs de recherche.

Que l'étude soit limitée à la tranche superficielle du sol (jusqu'à 2 mètres de profondeur, par exemple) pour une meilleure compréhension des échanges hydriques (évapotranspiration, ruissellement, etc.), ou qu'elle ait pour but l'étude de l'alimentation de la nappe souterraine, l'implantation d'un site de mesures sur chaque type de complexes "sol-végétation" correspond à un dispositif minimum. Il est possible toutefois de regrouper certains complexes présentant des caractéristiques hydrodynamiques assez proches. En cours d'étude, une analyse statistique des variations spatiales des résultats peut permettre d'améliorer le dispositif initial.

2.6.3. MESURE DE L'HUMIDITE DU SOL

Les appareils et les méthodes permettant de déterminer l'humidité du sol peuvent être séparés en deux groupes :

- **1er groupe** - les mesures, dites destructrices, nécessitant le prélèvement d'échantillons de sol :
 - . Méthodes basées sur l'extraction de l'eau par la chaleur ou d'autres liquides, ou par réactions chimiques.
 - . Méthodes utilisant la différence de densité des particules solides et de l'eau : mesure de la poussée hydrostatique à l'aide d'un picnomètre à eau ou d'un picnomètre à air.
 - . Méthodes fondées sur l'absorption de divers rayonnements : résonance magnétique nucléaire, hyperfréquences, réflexion des rayons infra-rouges, rayons gamma.
 - . Méthodes utilisant les ultra-sons.
- **2ème groupe** - les mesures "in situ" utilisant des dispositifs placés temporairement ou en permanence dans le sol :
 - . Méthodes nucléaires : neutronique, gammascopique, radio-activité naturelle.
 - . Méthodes fondées sur la mesure de la variation de tension de l'eau du sol : tensiométrie,

- hygrométrique ou méthodes utilisant un matériau poreux placé au contact du sol.
- . Méthodes basées sur les propriétés électriques du sol : variation de la résistivité ou de la permittivité.
- . Méthodes thermique, optique, hygrographique, mécanique ou lysimétrique.

Parmi ces nombreux appareils et méthodes utilisés, principalement en hydraulique agricole (747), ont été retenus uniquement ceux qui ont fait l'objet d'applications concrètes dans le cadre d'études hydrologiques menées en Afrique francophone.

La périodicité des mesures dépend en premier lieu de leur objectif, mais aussi de l'appareillage utilisé, de la saison et du personnel disponible.

2.6.3.1. METHODE GRAVIMETRIQUE

La méthode gravimétrique, dite aussi de la pesée, consiste à prélever un échantillon de sol et à le peser avant et après dessiccation. C'est la méthode la plus précise, qui sert de référence pour étalonner les autres dispositifs. Elle ne peut, évidemment, être utilisée lorsque le relevé en continu de l'humidité du sol est nécessaire.

Les échantillons sont généralement prélevés à l'aide d'une tarière de 80 mm de diamètre (photo 45). La structure du sol est alors perturbée, ce qui ne représente pas un inconvénient majeur pour le calcul de la teneur en eau massique W , exprimée par rapport à la masse de terre sèche. Par contre, ce système ne permettant pas de prélever un volume de sol précis, il ne peut être utilisé pour le calcul de la teneur en eau volumique.

Si le sol est riche en graviers, le volume prélevé devra être plus important que pour un sol constitué de matériaux fins.

Le terrain subissant toujours une certaine compression lors de l'enfoncement de la tarière, il peut perdre une partie de son humidité, surtout s'il contient de l'eau gravifique, c'est-à-dire si son taux d'humidité est élevé.

Lorsqu'un sol est humide en surface et plus sec en profondeur, l'humidité des échantillons prélevés dans les couches inférieures peut être modifiée au passage de la couche superficielle. Pour limiter les erreurs, la tarière doit toujours être soigneusement essuyée entre les prélèvements effectués à différentes profondeurs.

Au fur et à mesure de leur extraction, les échantillons sont placés dans des boîtes fermées par un couvercle rendu étanche par un ruban adhésif. Les manipulations des échantillons à l'air libre doivent être réduites au minimum. Ainsi, de l'eau provenant des échantillons peut se condenser sur les parois des boîtes, source d'erreur dans le cas de transvasement. Sur la boîte, sont notées : le numéro de la parcelle ou du site de mesure, le numéro du trou, la profondeur de la prise et la date (heure, jour, mois, année).

Les prélèvements ne pouvant être effectués deux fois en un même point, le suivi dans le temps de l'humidité du sol ne peut se faire que sur un site d'une certaine superficie. Une parcelle de 10 m x 10 m, composée de 100 mailles de 1 m² numérotées en nombre croissant de la droite vers la gauche et de l'amont vers l'aval, peut par exemple être délimitée (fig. 79). Chaque mesure représente la moyenne ou la médiane de trois échantillons dont les points de prélèvements (centres de mailles élémentaires) auront été tirés au sort. Les mesures étant généralement rattachées à un profil donnant la variation de l'humidité avec la profondeur, les trois séries de valeurs obtenues sont portées sur un même graphique, afin de pouvoir tracer un profil médian ou moyen (fig. 80).

Les échantillons sont pesés humides, puis séchés à l'étuve à environ 105°C jusqu'à poids constant. Le temps de dessiccation peut varier de 4 heures pour des sables, à 48 heures pour des matériaux fins. La règle souvent adoptée est de laisser les échantillons 24 heures dans une étuve réglée à 105°C. Pour certains sols (gypseux, par exemple) très sensibles à l'action de la chaleur, il ne faut pas dépasser 80°C. A la sortie de l'étuve, les boîtes sont rebouchées, avant d'être de nouveau pesées.

Si t est le poids de la boîte vide, Ph le poids de la boîte et de son contenu avant dessiccation, Ps le résultat de la seconde pesée (boîte + échantillon sec), l'humidité pondérale H_v est donnée par la relation :

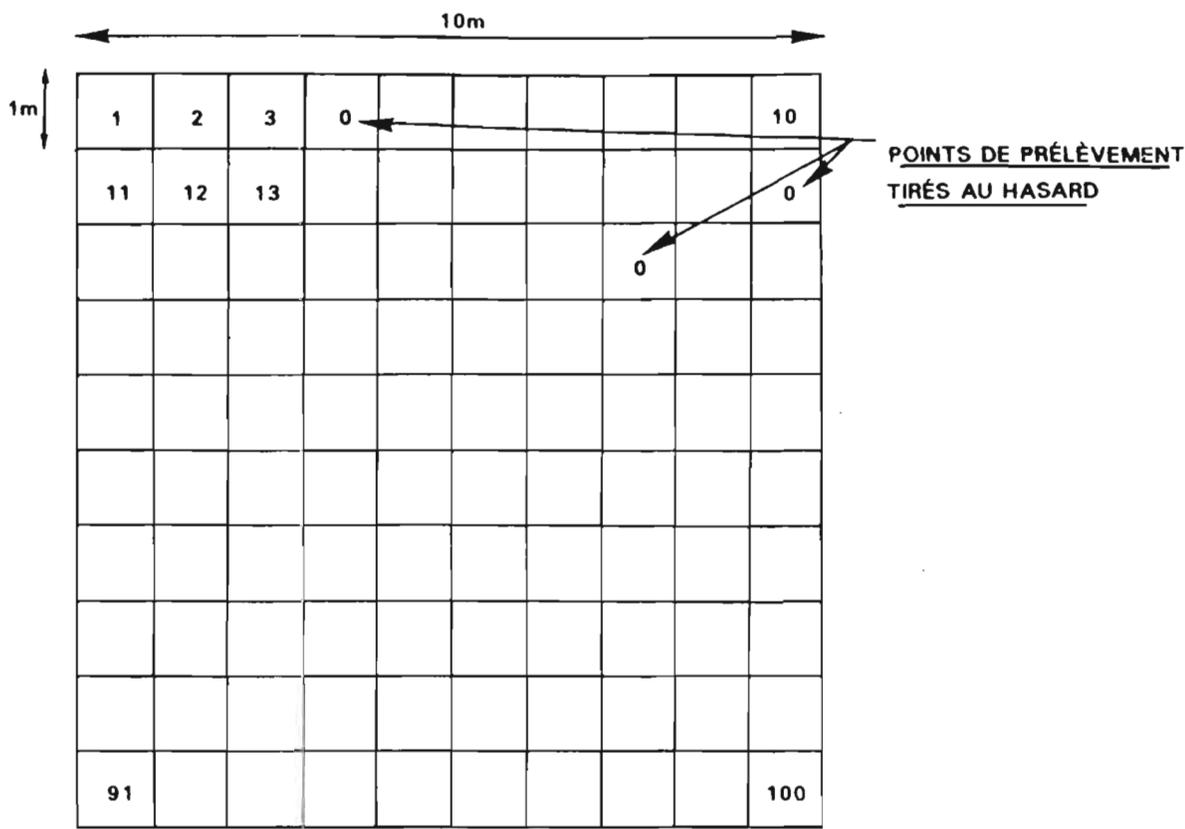


Fig-79 - PARCELLE POUR LA MESURE DE L'HUMIDITE DU SOL

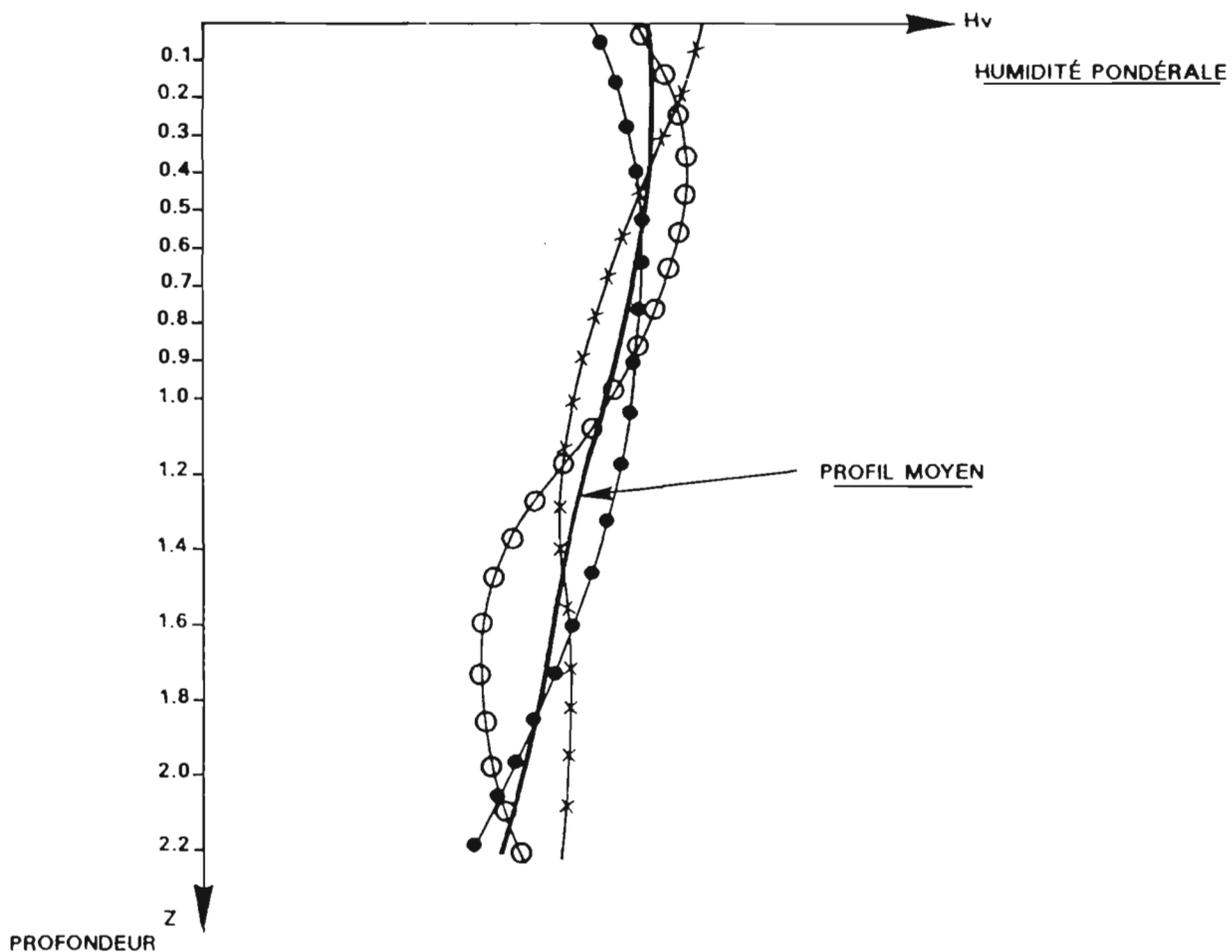


Fig-80 - ESTIMATION DE L'HUMIDITE PONDÉRALE MOYENNE SUR UN PROFIL

$$H_v = 100 \cdot (P_h - P_s) / (P_s - t) \quad \text{en \%}$$

Les erreurs sur la mesure proviennent du prélèvement de l'échantillon, de la dessiccation et des pesées.

Si l'erreur e sur une pesée est considérée comme constante et égale à la sensibilité de la balance, l'erreur relative sur H_v , due aux trois pesées, est donné par l'expression :

$$\Delta H_v / H_v = 2 \cdot e / (P_h - P_s) + 2 \cdot e / (P_s - t)$$

$$\Delta H_v / H_v = 2 \cdot e \cdot (P_h - t) / (P_h - P_s) / (P_s - t) = 2 \cdot e \cdot (100 + H_v) / P' \cdot H_v$$

avec $P' = P_s - t$ poids de l'échantillon sec.

Ainsi, avec une balance sensible au dixième de gramme, pour un échantillon de 100 g et une humidité pondérale $H_v = 10 \%$, la précision est voisine de 2 %. Elle est meilleure pour des humidités plus élevées.

2.6.3.2. METHODE NEUTRONIQUE

La méthode neutronique est basée sur le principe du ralentissement des neutrons émis dans le sol par une source composée d'un mélange intime de Beryllium avec du Radium ou de l'Américium : une succession de chocs transforme ces neutrons rapides et de haute énergie, en neutrons lents situés dans la zone d'énergie thermique. La perte d'énergie est beaucoup plus forte dans la collision avec des atomes de faible poids atomique, tels que les atomes d'hydrogène.

La méthode repose sur deux hypothèses de base :

- l'hydrogène est l'élément qui participe le plus activement au ralentissement des neutrons rapides,
- l'hydrogène est présent dans le sol essentiellement comme composant de la molécule d'eau.

Le taux d'humidité volumique du sol peut être ainsi relié à la densité de neutrons lents présents autour de la source de neutrons rapides. Le volume concerné a la forme d'une ampoule de 15 à 40 cm de rayon, selon la teneur en eau, la densité du sol et l'intensité de la source émettrice.

Le système de détection, qui permet d'effectuer le comptage, utilise le Bore 10 ou l'Hélium 3. Cependant, l'hydrogène n'étant pas le seul élément susceptible de pouvoir ralentir les neutrons, la nature des sels dissous dans l'eau et surtout la composition chimique du sol compliquent la théorie de la mesure, ce qui explique qu'un étalonnage de l'appareil soit toujours indispensable.

La sonde de mesure, composée d'un émetteur et d'un compteur, est descendue dans le sol par l'intermédiaire d'un tube généralement métallique (en duralumin, par exemple), plus rarement en chlorure de polyvinyle, installé au préalable. Son diamètre intérieur doit être légèrement supérieur à celui de la sonde. Lors de sa mise en place, il est important de creuser le plus verticalement possible et de ne pas trop évaser le bord supérieur du trou, de manière à assurer un étroit contact avec le terrain (fig. 81). Ce trou doit avoir un diamètre égal, ou à peine supérieur, au diamètre extérieur du tube. Il faut prendre garde de piétiner le moins possible ses abords immédiats, tant au moment de sa mise en place que lors des différentes mesures.

En règle générale, la pose des tubes n'entraîne pas de difficultés particulières jusqu'à 3 ou 4 mètres de profondeur, excepté si le sol est très dur. Pour des profondeurs supérieures à 6 mètres, il est nécessaire de raccorder deux tubes, en assurant une solidité et surtout une étanchéité parfaites. Il est alors commode d'utiliser une chèvre.

Le tubage doit être obturé hermétiquement à sa base. Un embout conique, à pointe arrondie, peut être soudé pour faciliter la pose. Une partie aérienne, de quelques dizaines de centimètres, devra être préservée. La découpe doit être faite proprement, en évitant que des copeaux tombent à l'intérieur du tube ; de plus, toute trace d'eau sera éliminée en utilisant un chiffon sec absorbant au bout d'une baguette ou d'un fil lesté. Entre les mesures, le tube est fermé hermétiquement à l'aide d'un bouchon (photo 46).

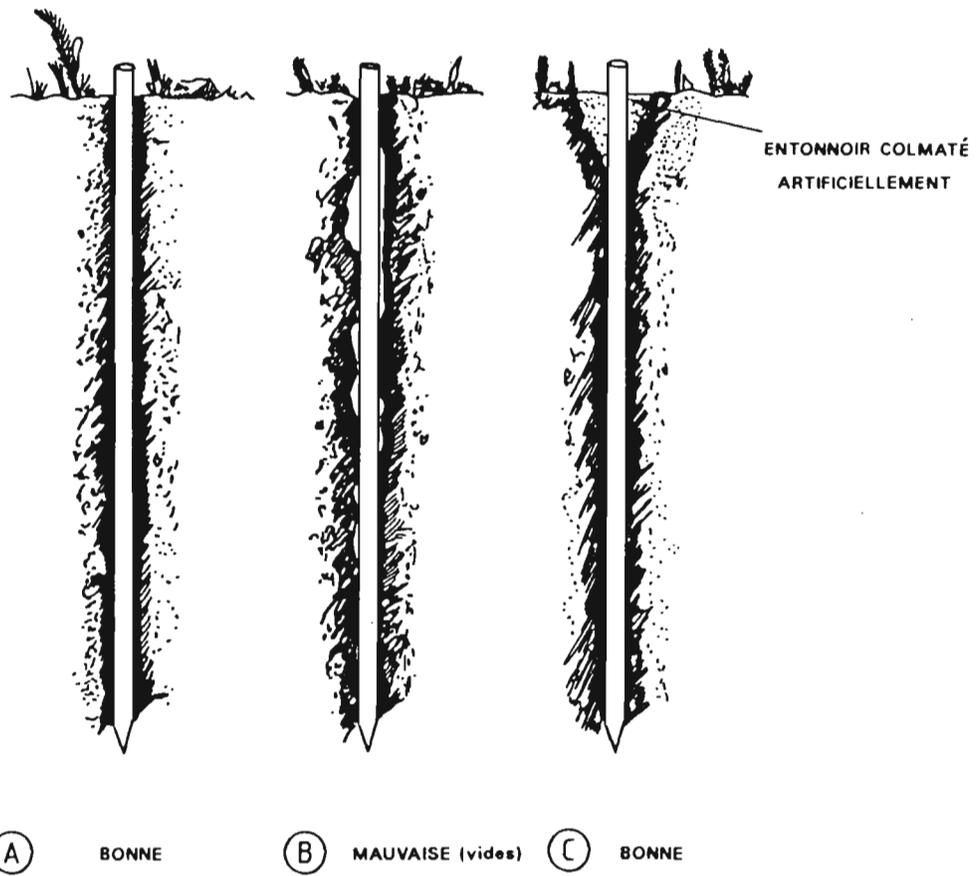


Fig-81 - IMPLANTATION DE TUBAGES POUR MESURES NEUTRONIQUES DE L'HUMIDITE DU SOL (D'APRES H-CAMUS)

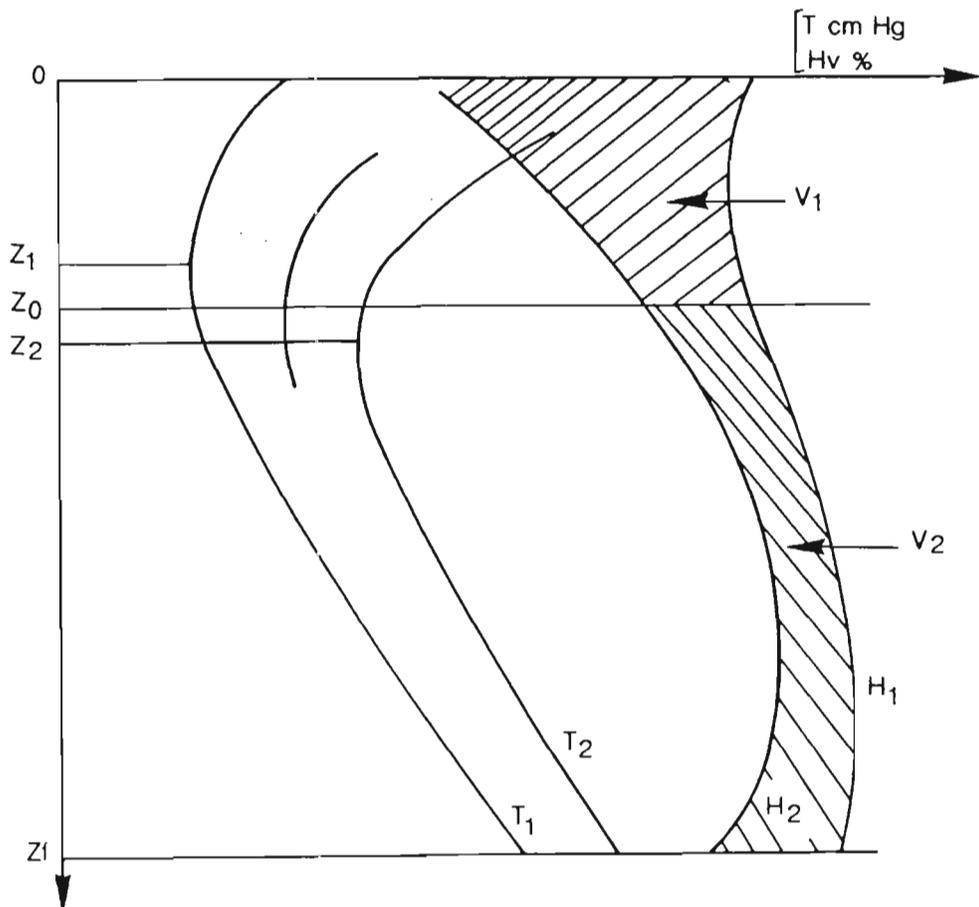


Fig-82 - EXPLOITATION DES PROFILS HYDRIQUES ET DES PROFILS DE TENSION DE L'EAU DANS LE SOL

Les sondes les plus couramment utilisées, dites "sondes de profondeur" (photo 43), ne donnent pas de mesures correctes à proximité de la surface du sol (sur 20 à 30 cm). Le dispositif peut être amélioré en utilisant un réflecteur à neutrons, calotte demi-sphérique en Téflon, percée d'un trou de même diamètre que le tube, qui se pose à plat sur le sol au-dessus du forage. Les mesures sont alors correctes à partir de 10 cm de profondeur (photo 47). Si des observations de surface sont absolument indispensables, des dispositifs spéciaux, dits "à pointe", doivent être utilisés.

Quel que soit l'appareillage choisi, chaque unité pédologique doit faire l'objet d'un étalonnage qui peut être de différentes natures :

1. Etalonnage expérimental utilisant comme référence la méthode gravimétrique

Un tube d'étalonnage est mis en place sur chaque type de sol. L'opération consiste ensuite à comparer, pour une gamme d'humidité la plus large possible, les mesures effectuées à l'aide de la sonde à celles réalisées, aux mêmes instants et aux mêmes profondeurs, par la méthode gravimétrique. Les prélèvements sont faits à la tarière, tous les 10 cm jusqu'à 1 mètre de profondeur et tous les 20 cm au-delà, dans quatre trous situés à proximité du tube d'étalonnage dans deux plans perpendiculaires.

Pour chaque série et chaque niveau de mesures, la valeur retenue est la médiane des taux d'humidité calculés sur les quatre profils. La mesure faite à la sonde, à la même profondeur, est la moyenne de deux comptages.

Les mesures gravimétriques permettent de calculer l'humidité pondérale H_p (paragraphe 2.6.3.1.), alors que les sondes neutroniques mesurent l'humidité volumique H_v . Le rapport de ces deux grandeurs (H_v / H_p) représente la densité apparente sèche du sol ρ_a qui est donc égale au rapport de la masse de terre sèche m_s au volume du sol en place V (paragraphe 2.6.1.).

V est mesuré dans une fosse, soit à l'aide d'un cylindre calibré, soit à l'aide d'un densitomètre à membrane, puis l'échantillon recueilli est passé à l'étuve à 105°, afin de calculer m_s .

Fort heureusement, l'étalonnage des sondes neutroniques est généralement linéaire, ce qui limite le nombre de points expérimentaux à déterminer :

$$K = a \cdot H_v + b = a \cdot H_p \cdot \rho_a + b$$

K étant le taux de neutrons.

Il y a donc grand intérêt à effectuer des mesures dans des situations très contrastées : sol sec - sol très humide. Les mesures peuvent être échelonnées tout au long de l'année ou, plus rapidement, en faisant varier artificiellement par arrosage l'humidité du sol. Dans ce dernier cas, la méthode utilisée par B. Thébé sur les BVRE de Mouda au Cameroun donne de bons résultats. Elle consiste à enfoncer dans le sol, autour du tube d'étalonnage, un cylindre en tôle de 2 mètres de diamètre et de 30 à 50 cm de haut, puis à le remplir d'eau de manière à atteindre les différents horizons pédologiques et obtenir des taux d'humidité élevés. L'arrosage, pour être suffisant, s'échelonne souvent sur plusieurs heures. Divers prélèvements permettent ensuite de suivre le ressuyage (photo 48).

2. Etalonnage calculé

Les constructeurs proposent, à titre onéreux, un étalonnage "théorique" fonction de la densité apparente sèche et de la composition chimique du sol.

2.6.3.3. METHODE TENSIOMETRIQUE

Un tensiomètre se compose d'une aiguille ou d'une coupelle poreuse (généralement en céramique) reliée par un tube à un appareil de mesure de pression. Le système étant rempli d'eau, un point d'équilibre avec l'humidité du terrain avoisinant est atteint : l'eau sort de la coupelle si le terrain s'assèche, engendrant ainsi une tension plus grande, ou, au contraire, l'eau pénètre dans la coupelle si le terrain s'humidifie, faisant alors baisser la tension. Ces variations de pression sont enregistrées par un manomètre à dépression de type Bourdon ou un manomètre à mercure. Un enregistreur, ou un transducteur électronique de pression, peut être utilisé de façon à obtenir un enregistrement continu de la mesure. Des tensiomètres multiples permettent des mesures simultanées

à différentes profondeurs (photo 49).

L'appareil est mis en place, à la profondeur choisie, dans un trou préalablement foré à la tarière. La coupelle ou l'aiguille devant être en contact étroit avec le sol, une boue confectionnée avec le sol provenant du trou est versée dans le fond, afin de colmater les vides au moment d'enfoncer le tensiomètre. Le terrain est ensuite soigneusement tassé autour du tube pour éviter les écoulements préférentiels. La présence de bulles d'air étant une cause rédhibitoire de dysfonctionnement, le remplissage des tensiomètres se fait avec de l'eau distillée et désaérée par ébullition prolongée. Il faut s'assurer, par plusieurs purges successives, que la paroi de la coupelle poreuse est bien saturée et que le manomètre ne contient plus d'air.

La détermination du taux d'humidité ne peut se faire sans un étalonnage préalable (par la méthode gravimétrique, par exemple). Il faut souligner que le domaine d'utilisation est réduit à la zone 0 - 0,8 bar et que, même dans les meilleures conditions d'utilisation, les données sur l'humidité sont seulement approximatives, en raison de l'hystérésis existant entre la phase d'assèchement et la phase d'humidification dues à la variation du volume d'eau capillaire. La méthode est particulièrement mal adaptée aux zones sèches.

Si les tensiomètres ne sont pas de bons appareils de mesure de l'humidité, ils permettent par contre d'établir les profils de pression de l'eau dans le sol. Les relevés simultanés de ces profils et des profils d'humidité volumique (à l'aide de mesures neutroniques, par exemple) représentent, alors, un excellent moyen d'analyse de la dynamique de l'eau. Dans l'exemple de la figure 82, où sont tracés les profils d'humidité volumique H1 et H2 établis au début et à la fin d'une période où les mouvements de l'eau sont supposés uniformes, les profils de tension T1 et T2 accusent un sommet dont l'ordonnée varie peu. Après avoir déterminé l'ordonnée Z_0 du sommet du profil moyen (point de flux nul), le volume représentant la variation du stock d'eau dans le sol, entre H1 et H2, peut être divisé en deux termes :

- le volume ayant migré vers le haut, c'est à dire ayant généralement été repris par évaporation,
- le volume ayant migré vers le bas pour alimenter la nappe souterraine.

2.6.3.4. METHODE PAR CHOCS THERMIQUES

La méthode par chocs thermiques, mise au point par B. Pouyaud (755-756), utilise la capacité calorifique des sols dont la variation peut facilement s'exprimer en fonction du taux d'humidité.

La sonde comprend une résistance chauffante qui, sous l'impulsion de chocs électriques, émet des chocs thermiques, et un thermocouple qui mesure la température du sol à 1,5 cm de l'élément chauffant. L'humidité volumique est inversement proportionnelle au maximum de température mesuré après une période de chauffe.

Pour des problèmes d'ordre technologique, cette méthode qui s'avérait très prometteuse, particulièrement pour les mesures effectuées près de la surface du sol (domaine mal couvert par les autres méthodes), n'a pu dépasser le stade expérimental.

PHOTO 46



CLICHÉ B. THÈBE

Tube de sonde à neutrons
- Mouda - (Cameroun)

PHOTO 45



CLICHÉ B. THÈBE

Prélèvement d'échantillons de sol à l'aide d'une tarière
- Mouda - (Cameroun)

PHOTO 48



CLICHÉ B. THÈBE

Dispositif d'étalonnage d'une sonde neutronique
- Mouda - (Cameroun)

PHOTO 49

PHOTO 47



CLICHÉ B. THÈBE

Sonde neutronique pour mesurer l'humidité du sol
- Mouda - (Cameroun)

CLICHÉ J.F. NOUVELOT



Dispositif de mesures tensiométriques et neutroniques
- Djigoum - (Sénégal)

2.7. EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines comprennent, au sens strict, l'ensemble des eaux se trouvant au-dessous de la surface du sol. Il est commode, cependant, de distinguer la zone non saturée, objet des chapitres 2.5. et 2.6., de la zone de saturation dans laquelle l'eau occupe complètement les interstices du sol ou des roches.

La zone non saturée se caractérise par divers phénomènes dans lesquels la présence d'air joue un rôle important : infiltration, ascension capillaire, évaporation, évapotranspiration. Elle est d'ailleurs parfois qualifiée de zone d'aération. La zone de saturation est au contraire le domaine de l'eau gravifique (fig. 83).

Comme cela a déjà été précisé au paragraphe 2.6.1., l'extraction d'eau de la zone d'aération nécessite une certaine force de succion, et le gradient de charge i de la loi de Darcy généralisée ($V = -K \cdot i$) comporte donc un élément de pression de signe négatif. Ainsi, alors que dans la zone saturée l'eau se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression, dans la zone d'aération, elle se déplace des zones de faible force de succion vers les zones de forte succion qui correspondent généralement à des zones plus sèches.

2.7.1. QUELQUES DEFINITIONS

- La pénétration des eaux en profondeur dépend, essentiellement, de la nature des terrains qui peuvent être classés en quatre catégories :
 - **Terrains imperméables**, constitués de roches compactes et cohérentes, sans fissures importantes : roches éruptives, métamorphiques ou sédimentaires non fracturées (granites, gneiss, grès, calcaires compactes, etc.). Les terrains hygroscopiques caractérisés par une grande finesse de grains se rattachent à cette catégorie (argiles, marnes etc.).

- **Terrains poreux**, appelés également finement perméables, comportant des vides interstitiels interconnectés, assimilables à un milieu continu et caractérisables par un coefficient de perméabilité (coefficient de Darcy). Ils sont constitués de sables, graviers, grès poreux, certains calcaires (craie), tufs volcaniques, etc. C'est dans ces milieux que l'on rencontre à la fois de l'eau pelliculaire qui résulte des phénomènes d'absorption, de l'eau capillaire retenue sur les grains et entre les grains par les forces de tension superficielle, et de l'eau gravifique qui s'écoule par infiltration ou percolation, sous l'effet de la pesanteur.

L'alimentation des nappes résulte presque exclusivement de l'eau gravifique, l'écoulement se faisant, soit en régime laminaire, soit en régime turbulent.

La faculté d'un terrain à laisser passer l'eau diminue en même temps que le diamètre des grains ; à partir d'un certain diamètre l'écoulement devient impossible, c'est pourquoi les sables très fins et les poudres sont pratiquement imperméables.

- **Terrains fissurés**, appelés également perméables en grand, dans lesquels l'eau s'écoule essentiellement à travers un réseau souvent anisotrope de fissures ouvertes, diversement connectées. Ne pouvant être assimilés à un milieu continu et homogène, ils se caractérisent par les conductivités hydrauliques des fissures et conduits, et non par un coefficient de perméabilité. Ils sont constitués par des roches compactes tectonisées : grès, granites, basaltes et surtout calcaires.

Certaines roches (schistes, granites, grès) laissent un résidu solide important qui a tendance à colmater les fissures. Ces terrains présentent alors des caractéristiques intermédiaires entre les terrains poreux et les terrains fissurés.

- **Terrains karstiques**, formés d'un ensemble de conduits, chenaux et cavités connectés dans lesquels l'eau circule de façon temporaire ou permanente. Caractérisés par une très grande hétérogénéité, ils se rencontrent essentiellement dans les formations calcaires où un phénomène chimique s'ajoute à l'action mécanique des eaux (le gaz carbonique qu'elles transportent attaquant le carbonate de calcium des roches).

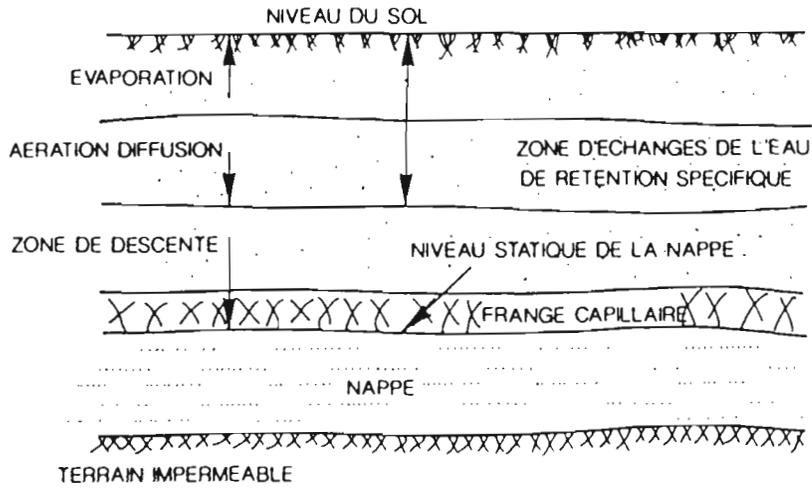


Fig- 83 - ZONALITÉ SOL / EAUX SOUTERRAINES

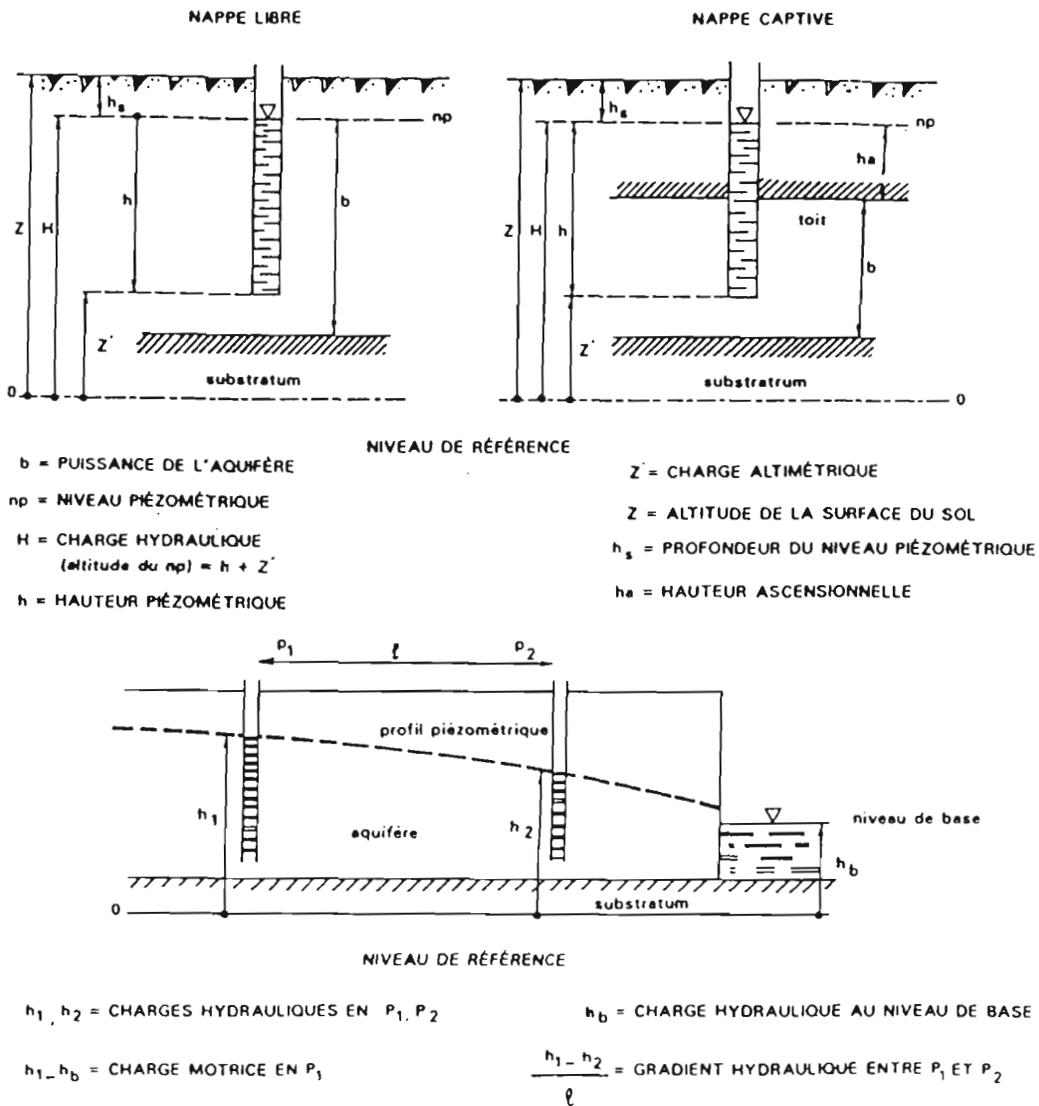


Fig-84 - NIVEAUX ET CHARGES DES NAPPES SOUTERRAINES (d'après J.MARGAT)

- Nappe libre : nappe comprise dans un aquifère qui comporte une zone non saturée et une zone de fluctuation. Elle est alimentée par toute sa surface.
- Nappe captive : nappe couverte par un terrain moins perméable (appelé toit) que le terrain encaissant. Son alimentation ne se fait donc pas sur toute sa surface, et elle est soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique.
- Nappe phréatique : terme souvent employé abusivement pour définir une nappe libre. C'est au sens stricte une nappe atteinte et exploitée par les puits ordinaires. Il s'agit donc d'une nappe peu profonde à surface libre, ce qui explique l'abus de langage.
- Niveau piézométrique : niveau supérieur de la colonne d'eau statique qui équilibre la pression hydrostatique au point auquel elle se rapporte (fig. 84). Il est matérialisé par le niveau libre de l'eau dans un tube vertical (piézomètre). Son élévation est définie, soit par rapport au niveau de l'ouverture inférieure du tube piézométrique (hauteur piézométrique h), soit par rapport à un niveau de référence (charge hydraulique H) :

$$H = h + Z'$$

Z' étant la charge altimétrique.

- Surface piézométrique : lieu des niveaux piézométriques. Elle représente la distribution dans l'espace des charges hydrauliques. Elle est figurée par un ensemble de lignes équipotentielles de charges équidistantes, appelées parfois improprement "isopièzes".

La surface d'une nappe libre, surmontée d'une frange capillaire saturée d'épaisseur négligeable, est confondue avec sa surface piézométrique. Dans le cas d'un aquifère captif, la surface de la nappe est délimitée par le toit.

L'écoulement d'une nappe libre n'est généralement pas uniforme, la surface piézométrique présentant une forme parabolique ou hyperbolique. Très fréquemment, la vitesse augmente dans la même direction que l'écoulement. Au contraire, les nappes captives se caractérisent souvent par un écoulement uniforme, en tous points duquel, direction et débits unitaires sont identiques. De nombreuses théories et formules utilisées en hydrogéologie reposent sur de telles hypothèses.

- Perméabilité d'une formation aquifère : aptitude d'un milieu continu à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique. Elle s'exprime quantitativement par le coefficient de perméabilité de Darcy (de dimension LT^{-1}).
- Conductivité hydraulique : aptitude d'un milieu aquifère discontinu à permettre le mouvement de l'eau sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique dont la direction diffère, en général, de celle de l'écoulement (de dimension LT^{-1}) (807).
- Porosité : propriété d'un milieu de comporter des vides interconnectés ou non. Elle s'exprime quantitativement par le rapport du volume de ces vides au volume total. Elle équivaut généralement à la teneur en eau volumique du milieu saturé. C'est une valeur sans dimension.
- Transmissivité : produit, en milieu isotrope, du coefficient de perméabilité de Darcy par la puissance de l'aquifère. C'est donc un paramètre qui régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu et par unité de gradient de charge hydraulique. Elle a pour dimension $L^2 T^{-1}$. Le concept a parfois été étendu aux milieux discontinus, il est alors nommé coefficient de débit.
- Coefficient d'emmagasinement : rapport du volume d'eau libéré (ou emmagasiné) par unité de surface d'un aquifère à la variation de charge hydraulique correspondante.

Dans un aquifère libre, il équivaut à la porosité efficace (porosité diminuée du volume de rétention). Il peut atteindre 30 à 40 % dans des alluvions grossiers. Dans un aquifère captif, ce paramètre est lié à la compressibilité et à l'expansibilité de l'eau et de l'aquifère, ainsi qu'à la puissance de ce dernier. Les valeurs rencontrées sont sensiblement plus faibles que dans un aquifère libre. C'est un coefficient sans dimension.

- Capacité d'emmagasinement d'un bassin : volume d'eau souterraine contenu, à un instant donné, dans le sous-sol d'un bassin versant et disponible, par vidange des aquifères, à l'exutoire de ce bassin (débit de base).

- Indice d'emmagasinement d'un bassin : rapport de la capacité d'emmagasinement d'un bassin à sa surface. Il est équivalent à une lame d'eau.

2.7.2. CONTRAINTES DES ETUDES HYDROGEOLOGIQUES SUR BVRE

Parmi les nombreuses études effectuées sur BVRE en Afrique francophone, peu disposaient des moyens nécessaires à la compréhension du rôle du milieu souterrain dans le fonctionnement du système hydrique complexe que représente un bassin versant. Il est vrai que la quantification des écoulements souterrains (hormis la partie constituant le débit de base des cours d'eau) est rarement indispensable à l'estimation ou à l'analyse des crues ou, plus généralement, à la connaissance de l'écoulement superficiel, d'autant que les dispositifs de mesure nécessaires sont souvent onéreux et lourds à mettre en place. Ils requièrent, de plus, un matériel spécifique ainsi que la présence de spécialistes.

L'étude des eaux souterraines ne doit pas être une fin en soi. Elle est superflue sur les bassins ne comptant pas d'aquifère notable, ou renfermant quelques petites nappes temporaires dans les thalwegs ou dans certaines zones très fracturées, sans influence significative sur le bilan hydrique. C'est le cas de nombreux bassins de la zone sahélienne, où une grande partie de l'eau qui s'infiltré dans le sol est reprise par évaporation ou évapotranspiration. Elle se justifie par contre pleinement, si les relations nappes-cours d'eau ou nappes-ruisselement revêtent une certaine importance, ou si les écoulements souterrains représentent un terme non négligeable du bilan hydrique. Il est certain que le dispositif de mesures à mettre en place pourra être très différent suivant l'objectif à atteindre. Par exemple, l'étude du ruissellement sur les zones d'affleurement des nappes souterraines ne demande pas une infrastructure aussi complexe que celle nécessaire à l'étude de l'effet "piston" dans la genèse "souterraine" de certaines crues.

Pour obtenir des résultats suffisamment fiables, sans moyens démesurés, certaines conditions doivent être réunies :

- l'aire d'alimentation de l'aquifère ne doit pas être trop différente de celle du bassin versant : la différence ne doit pas excéder $\pm 10\%$.
- La nappe doit être contrôlée à l'exutoire du bassin, ce qui suppose l'existence de conditions naturelles favorables (seuil rocheux, par exemple), ou la nécessité d'aménagements particuliers (un contrôle artificiel avec un voile d'étanchéité). Idéalement, l'ensemble aquifère-bassin versant doit former un système suffisamment étanche.

Les études de bassins non étanches posent des problèmes méthodologiques et techniques. Elles peuvent tout de même être envisagées pour répondre à certaines préoccupations : processus d'alimentation des nappes régionales, localisation des zones de recharge, rôle des eaux souterraines dans les écoulements de surface, etc., sans que toutefois tous les termes du bilan hydrologique puissent être quantifiés.

2.7.3. INVENTAIRE HYDROGEOLOGIQUE PREALABLE

Pour juger de l'opportunité d'entreprendre des études hydrogéologiques et pour évaluer ensuite le degré d'étanchéité du bassin retenu, un certain nombre de documents devront être consultés :

Documents cartographiques : topographiques, pédologiques, géologiques et surtout hydrogéologiques. Ces derniers peuvent fournir non seulement les caractéristiques lithologiques des diverses formations ainsi que la localisation des accidents tectoniques, mais également les isobathes (lignes d'égale profondeur de la surface de la nappe et/ou du substratum imperméable), les lignes équipotentiels (d'égale charge hydraulique) confondues parfois avec les hydroisohypses (lieu des points d'égale altitude de la nappe), les isotaches (lignes d'égale vitesse d'écoulement), la localisation des puits, sources, forages ou piézomètres, plus certaines caractéristiques des aquifères (perméabilité, transmissivité, qualité des eaux).

Documents techniques : permettant de préciser les informations extraites des documents précédents. Il s'agit des inventaires des points de mesure, d'observation ou de prélèvement, souvent accompagnés de profils géologiques, de diagrammes, de carottages électriques, de résultats d'essais de pompage ou d'injection ; de données géophysiques (procédés électriques ou sismiques) ; de données sur la physico-chimie des eaux des puits, des sources et des cours d'eau.

Toutes ces informations devront permettre la localisation et la délimitation des aquifères, ainsi qu'une connaissance, même sommaire, de leurs caractéristiques et de leur type d'alimentation.

Une prospection de terrain devra compléter ce travail préparatoire. Elle consistera, dans une première phase, en une recherche systématique des puits et sources, avec mesure de la profondeur de la nappe, évaluation du débit et prises d'échantillon d'eau pour des analyses physico-chimiques, ainsi qu'en la localisation des zones humides, des barres et seuils rocheux, principalement dans les thalwegs, et des grands accidents géologiques. Si l'information recueillie s'avère insuffisante, des mesures préliminaires pourront faire l'objet d'une deuxième phase. Ainsi, des procédés géophysiques, bien connus des hydrogéologues, peuvent permettre d'éviter des erreurs grossières dans l'orientation des études et faciliter ultérieurement l'élaboration du plan d'implantation des réseaux d'observation et de mesure, voire l'interprétation des résultats au terme des travaux.

La présence d'eau souterraine peut se déceler par des méthodes sismiques, mais les mesures électriques, et en particulier les mesures de résistivité, conviennent mieux à ce type de recherche. Si la résistance qu'apporte un terrain au passage du courant électrique dépend de sa nature propre, elle est liée surtout à la quantité d'eau qu'il contient et au degré de salinité ou d'ionisation de cette eau. En prenant le cas concret de mesures électriques à profondeur croissante dans un milieu poreux, la résistivité baissera quand la surface de la nappe sera atteinte. De la même manière, la limite inférieure de l'aquifère correspond, le plus souvent, à une couche imperméable de résistivité différente. Très schématiquement, le dispositif de mesure le plus couramment employé est constitué de deux circuits. L'un comprend une source d'énergie permettant d'envoyer du courant, et un ampèremètre ; il est fermé par le sol, par l'intermédiaire de deux piquets. L'autre est un appareil de mesure des potentiels, également fermé par le sol à l'aide de deux piquets ou d'électrodes impolarisables. Le volume de terrain prospecté est lié, de façon approximative, aux dimensions du dispositif. La profondeur d'investigation est réglée en faisant varier l'écartement des prises d'envoi du courant. Bien évidemment, l'emploi et l'interprétation des résultats de tels dispositifs requièrent l'intervention d'un spécialiste.

2.7.4. DISPOSITIF DE MESURES ET D'OBSERVATIONS

Le dispositif de mesures et d'observations des aquifères est complémentaire de celui qui permet d'étudier les mouvements de l'eau dans le sol (zone non saturée).

Il a pour but :

- de suivre les variations spatiales et temporelles des hauteurs et des niveaux piézométriques,
- d'estimer les paramètres hydrauliques de l'aquifère,
- de quantifier les entrées-sorties du système.

Le réseau de base est constitué de puits d'observation et éventuellement de sources. La répartition des points de mesure doit tenir compte du fait que le niveau mesuré en un point est soumis à l'influence de l'ensemble des conditions imposées au système aquifère, ce qui facilite les extrapolations, tant dans l'espace que dans le temps. De plus, les informations rassemblées lors de la phase préliminaire (paragraphe 2.7.3.) permettent de s'appuyer sur la connaissance que l'on a de la structure de la nappe et des caractéristiques physiques du bassin.

D'une manière générale, les observations se feront sur une série de transects amont-aval perpendiculaires aux grands axes de drainage (fig. 85 - photo 50). Ces transects peuvent dépasser les limites du bassin topographique, surtout en cas de doute sur l'extension de la nappe. Il sera prudent de prévoir un transect à hauteur de l'exutoire, voire même à l'aval.

Afin de minimiser le coût des installations, les puits existants (puits villageois, par exemple) seront si possible utilisés comme puits d'observation. Ceci suppose que les prélèvements qui peuvent y être effectués ne perturbent pas sensiblement le niveau naturel de la nappe, que leur profondeur soit suffisante pour suivre la fluctuation maximale de ce niveau et que le colmatage des parois ne soit pas excessif.

Parmi les puits creusés spécialement pour l'étude, il est souhaitable que certains atteignent la couche inférieure imperméable, afin de connaître avec suffisamment de précision l'épaisseur de l'aquifère. Lorsque les eaux souterraines sont très près de la surface du sol, de simples fouilles peuvent suffire. Pour des profondeurs ne dépassant pas une douzaine de mètres, ce qui est fréquemment le cas sur les BVRE, au moins dans leur partie aval, le fonçage à l'aide de tarières de 50 à 200 mm (le diamètre de 80 mm étant le plus utilisé) est une méthode pratique et peu onéreuse, si le terrain présente une cohésion suffisante (argile, limons, limons sableux, sables

humides). Pour des aquifères plus profonds ou si les terrains rencontrés sont relativement durs, le forage de puits de petits diamètres (50 à 150 mm) nécessite l'emploi de moyens techniques plus importants. Dans les formations sédimentaires, la méthode par rotation est généralement plus rapide que celle par percussion. Elle est toutefois consommatrice d'eau (boues ou eau claire), ce qui dans certaines régions peut présenter un inconvénient non négligeable. La méthode par percussion est préférable dans les formations fissurées ou composées de matériaux très perméables. Certains appareils de forage utilisent à la fois rotation et percussion.

Dans certaines régions d'Afrique, le creusement par des puisatiers, suivant des techniques ancestrales, de petits puits de moins de 1 mètre de diamètre peut présenter une solution intéressante. Ainsi, le dispositif d'investigation des eaux souterraines du bassin de Korhogo (Côte d'Ivoire) comprenait 28 puits de 80 cm de diamètre, foncés manuellement selon la technique des orpailleurs de la région.

Quelle que soit la solution adoptée, des échantillons des formations géologiques traversées doivent être prélevés à intervalles réguliers au cours du forage. Ils serviront à préciser la lithologie et les caractéristiques du terrain encaissant. Avant d'être transportés au laboratoire, ils seront stockés dans des sacs en plastique, sur lesquels seront portées toutes les références nécessaires (numéro du trou, profondeur, date, etc.). Les mêmes précautions seront prises, si un carottage est effectué.

Les puits de petit diamètre, principalement en terrains meubles, sont tubés après nettoyage par pompage ou puisage. Des tubes en plastique, plus faciles à manier, transporter, coller ou scier, et surtout sans incidence sur la composition chimique de l'eau, sont utilisés de préférence à des tubes métalliques. La libre circulation de l'eau, entre l'aquifère et le puits, est assurée par une crépine. On peut se contenter de perforer le tubage dans sa partie inférieure en sciant des fentes sur une certaine longueur, ou en forant des trous de quelques millimètres. Un fil de 3 mm de diamètre (en cuivre ou mieux en plastique dur) est ensuite enroulé autour de cette partie, avec un pas d'environ 5 centimètres. Lorsque le terrain se compose d'éléments fins, il est conseillé d'entourer la partie crépinée d'un treillis plastique de type "moustiquaire", le fil en spirale préservant une circulation satisfaisante de l'eau. Pour faciliter les diverses mesures, une partie aérienne de tubage, d'une longueur de 30 à 50 centimètres, est conservée, avec à sa base un dé de béton dont le but est de stabiliser le dispositif et d'éviter les infiltrations préférentielles qui peuvent être une source d'erreurs importante dans les études physico-chimiques de l'eau. Sachant qu'un piézomètre obstrué est très rarement récupérable, la fermeture du tube doit être assurée à l'aide d'un système efficace : bouchon nécessitant une clé spéciale, système à serrure, etc. (photo 51).

Les puits de plus grande ouverture (fouilles ou puits profonds) peuvent être laissés en l'état, lorsqu'ils sont creusés dans des terrains suffisamment durs et résistants. Si des risques d'éboulements apparaissent, ils peuvent être équipés d'un tube de petit diamètre (50 à 100 mm) ou, pour préserver leur volume initial, d'un couvillage de buses en béton. Dans tous les cas, une margelle en ciment sera construite afin d'empêcher les eaux superficielles de pénétrer à l'intérieur. Ces dispositifs sont évidemment plus difficiles à protéger des déprédations, mais, fort heureusement, plus faciles à nettoyer.

L'étude de nappes superposées impose que lors du forage des puits les différents aquifères soient isolés par un procédé de colmatage ou d'obturation (mortier d'argile ou de ciment). Il s'agit de techniques délicates qui sont de la compétence de spécialistes. Le puits doit alors avoir un diamètre suffisant pour permettre l'installation de plusieurs tubes piézométriques (autant de tubes que de nappes).

2.7.5. MESURES ET OBSERVATIONS

La mesure du niveau d'eau dans les puits d'observations peut être effectuée périodiquement à l'aide d'appareils de mesures instantanées, ou de façon continue en utilisant des appareils automatiques enregistreurs.

La périodicité des mesures instantanées dépend de la rapidité des fluctuations du niveau. Un puits foré dans une nappe peu profonde, ou dans la nappe alluviale d'un cours d'eau, réagira très rapidement à une pluie ou à une crue : les observations pourront être alors quotidiennes. En saison sèche, en l'absence d'alimentation, les mesures seront sensiblement espacées (hebdomadaires, voire bimensuelles). Dans tous les cas, l'installation d'appareils enregistreurs est très souhaitable pour améliorer la connaissance des fluctuations et assurer un contrôle des observations : un transect et un profil longitudinal peuvent, par exemple, être équipés.

L'étude spatiale d'un aquifère n'est possible que si toutes les observations sont rattachées au même système de nivellement, matérialisé par un repère de cote arbitraire ou de préférence absolue (un rattachement au système de nivellement général est alors nécessaire).



PHOTO - 50

Suivi piézométrique d'un transect
- Bidi - (Burkina-Faso)

CLICHÉ J.F. NOUVELOT

CLICHÉ J.F. NOUVELOT



PHOTO - 51

Partie aérienne d'un piézomètre
- Bidi - (Burkina-Faso)

CLICHÉ J.F. NOUVELOT



PHOTO - 53

Piézographe - Bidi - (Burkina-Faso)

CLICHÉ J.F. NOUVELOT



PHOTO - 52

Puits équipé d'un limnigraphe - Bidi - (Burkina-Faso)

CLICHÉ J.F. NOUVELOT

CLICHÉ J.F. NOUVELOT



PHOTO - 54

Bougies poreuses servant aux prélèvements d'échantillons
d'eau dans le sol - Djiguinoum - (Sénégal)

Chaque mesure étant effectuée depuis le rebord du tubage ou de la margelle du puits, celui-ci tient lieu de point de référence. La partie aérienne du dispositif pouvant être détruite ou endommagée (flux de ruissellement, accidents, malveillance, etc.), ce point sera nivelé à partir d'un repère fixe et stable, installé à proximité (une pointe métallique plantée sur une borne en béton, par exemple).

2.7.5.1. APPAREILS DE MESURES INSTANTANÉES

Les appareils de mesures instantanées sont très nombreux :

Câble lesté

L'appareil le plus simple consiste à lester, à l'aide d'une masse métallique d'un poids minimum de 1 kg, un ruban d'acier souple ou un ruban plastifié centimétrique, ou plus simplement un câble gradué.

Pour mesurer à la fois le niveau de la surface de la nappe et la hauteur d'eau dans le puits, il suffit de descendre le lest jusqu'au fond et de relever la longueur du ruban ou du câble qui a été submergée, en recouvrant sa partie inférieure de craie. On peut également apprécier le moment où le lest touche la surface de l'eau, soit par le bruit produit, soit par la différence de tension du câble.

Câble à flotteur

Également de conception très simple, le câble à flotteur mesure uniquement la profondeur du niveau d'eau : il suffit d'effectuer le relevé au moment où le flotteur fixé au bout du câble gradué rentre en contact avec l'eau.

Appareil à sifflet

Un sifflet, formé d'un cylindre creux ouvert à son extrémité inférieure et percé d'un petit orifice dans sa partie supérieure, est attaché à un ruban gradué. Lorsqu'il atteint la surface de l'eau, l'air expulsé par l'orifice supérieur émet un sifflement. Quelques tâtonnements sont nécessaires, et l'erreur de mesure peut atteindre plusieurs centimètres.

Appareils électriques

Les appareils électriques peuvent être construits par les utilisateurs, mais sont également disponibles à la vente.

La mesure consiste à faire descendre, jusqu'au niveau de la nappe, une ou plusieurs électrodes connectées à un circuit électrique dont la fermeture par l'eau est signalée par une lampe témoin, une sonnerie ou l'aiguille d'un cadran (voltmètre ou ampèremètre). Les dispositifs à une seule électrode utilisent une mise à la masse extérieure. Pour éviter l'emploi d'une source d'énergie (piles ou petites batteries), les propriétés électrochimiques d'un ensemble de deux métaux (magnésium-laiton, par exemple) sont parfois utilisées.

Les électrodes peuvent être remplacées par un poids tenseur creux, dans lequel est logé un flotteur vertical cylindrique dont la face supérieure est métallique. Lors de l'immersion dans la nappe, le flotteur s'élève et ferme le circuit.

Ces divers appareils assurent une précision de l'ordre du centimètre.

Appareils à inertie

Les appareils à inertie permettent de mesurer à la fois la profondeur du niveau de la nappe et la profondeur totale du puits.

Un poids fixé à l'extrémité d'un câble descend à une vitesse constante sous l'effet de la gravité. Dès qu'il atteint la surface de l'eau, un mécanisme de freinage arrête automatiquement la chute. La longueur de câble déroulé est donnée par un compte-tours. Le système peut être ensuite remis en route pour descendre jusqu'au fond du puits. Ces appareils demandent une parfaite verticalité des puits. La précision de la mesure est voisine du demi centimètre.

2.7.5.2. ENREGISTREURS AUTOMATIQUES

Les systèmes enregistreurs, appelés également piézographes, fonctionnent sur les mêmes principes que les limnigraphes utilisés pour l'enregistrement du niveau des cours d'eau. Les limnigraphes à flotteur peuvent d'ailleurs être utilisés dans les puits de grand diamètre (photo 52).

Dans les puits de faible ouverture, des systèmes à flotteur spéciaux sont nécessaires, afin de concilier la recherche d'une précision satisfaisante et la nécessité d'utiliser des flotteurs de petit diamètre (un diamètre de 70 mm représente une limite inférieure qu'il sera prudent de ne pas dépasser - photo 53).

Une meilleure précision peut être obtenue en couplant de petits flotteurs à un servomoteur. Lorsque le niveau d'eau baisse dans le puits, le flotteur reste dans sa position initiale, mais l'augmentation de poids entraîne un léger mouvement, provoquant un contact électrique qui actionne un petit moteur qui dévide du câble jusqu'à une nouvelle position d'équilibre. Le principe reste le même lorsque l'eau monte. Des systèmes identiques fonctionnent avec des sondes électriques.

On peut citer, également, les piézographes pneumatiques ou des appareils faisant appel à des techniques plus sophistiquées : transducteurs de pression, jauges de contrainte, sondes à ultrasons, sondes à capacitances.

Tous ces dispositifs, comme d'ailleurs les appareils à flotteur équipés de codeurs, permettent d'enregistrer l'information recueillie (niveau d'eau en fonction du temps) sur support informatique, de préférence statique.

2.7.6. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES AQUIFERES

La détermination des caractéristiques des aquifères fait appel à différentes mesures et techniques qui peuvent être utilisées complémentaires :

- les essais de pompage,
- les observations piézométriques,
- les courbes de tarissement des cours d'eau.

2.7.6.1. ESSAIS DE POMPAGE

Les techniques d'essais de pompage, bien connues des hydrogéologues (412, 802, 803, 805, 806), devant être menées et interprétées par un spécialiste, seules sont données ci-après quelques notions d'ordre général.

Un essai de pompage consiste à extraire à débit constant l'eau d'un puits et à mesurer, dans le puits lui-même et/ou dans un ou plusieurs piézomètres situés à une certaine distance, le rabattement qui traduit l'abaissement du niveau piézométrique par rapport au niveau naturel.

Si dans un système de coordonnées rectangulaires, on porte en ordonnées les rabattements mesurés et en abscisses les temps, on obtient une courbe dite "de rabattement". De la même manière, à partir du moment où cesse le pompage, il est possible de suivre la remontée du niveau piézométrique en fonction du temps et tracer la courbe de remontée (fig. 86).

1. Méthode Porchet

Dans la méthode Porchet (412, 802), les courbes de rabattement et de remontée, relevées dans un puits de section S où est pompé un débit constant q , permettent de calculer son débit spécifique qui est le débit correspondant à un rabattement d'un mètre :

$$q_s = Q / Y \quad (\text{en m}^3/\text{h/m})$$

Q étant le débit du puits pour le rabattement Y.

Durant un intervalle de temps dt_1 , on observe une baisse de niveau dy :

$$S \cdot dy = (q - Q) dt_1$$

Après arrêt du pompage, le niveau d'eau mettra un temps dt_2 pour remonter d'une hauteur dy :

$$S \cdot dy = q \cdot dt_2$$

Soit
$$Q = q \cdot (dt_1 / dy) [(dt_1 / dy) + (dt_2 / dy)]$$

dt_1 / dy et dt_2 / dy représentent la pente des tangentes aux courbes de rabattement et de remontée qui se coupent en I (fig. 86), et $dt_1 / dy = MP / PI$ et $dt_2 / dy = NP / PI$.

Donc,
$$Q = q \cdot MP / MN$$

et
$$qs = q \cdot MP / MN / Y$$

2. Méthode de Theis

L'équation de Theis s'applique à un écoulement transitoire (mouvement non permanent) d'une nappe captive non réalimentée, d'extension infinie, homogène, isotrope, d'épaisseur constante, initialement au repos, captée sur toute sa hauteur et soumise à un débit de pompage constant. Bien que toutes ces conditions ne puissent être satisfaites dans la nature, la relation de Theis peut, malgré tout, dans de nombreux cas être appliquée. Deux points méritent cependant d'être soulignés :

- Le respect de la condition, qui impose que la nappe étudiée soit initialement au repos, ne peut être assuré dans tous les cas. Cependant, le principe de superposition des écoulements suppose que les perturbations causées par le pompage sont indépendantes de l'état antérieur de la nappe. Il suffit donc de définir cet état, et de travailler ensuite par différence. De plus, les pompages d'essais étant de courte durée, les nappes peuvent être considérées, durant cette période, comme infinies et non réalimentées.
- Il est impératif que la nappe soit captive : l'extension de l'équation aux nappes libres imposerait, entre autres, que celles-ci soient d'épaisseur constante et que l'écoulement soit horizontal.

Ces diverses contraintes limitent en théorie l'application de la méthode, surtout si les mesures piézométriques sont faites uniquement dans le puits de pompage. Dans la pratique, il est admis que les conditions d'application sont respectées si les variations relatives de la surface piézométrique n'excèdent pas 2 % par rapport à l'épaisseur de la nappe.

L'équation de Theis s'écrit :

$$Y / q = 0,183 / T \cdot \log(2,25 \cdot T \cdot t / S / R^2) \quad (1)$$

avec

$$0,183 = 2,3 / (4 \cdot \pi)$$

q débit constant de pompage, en m^3/s ;

R distance séparant l'axe du puits et un piézomètre d'observations, en mètres ;

Y rabattement mesuré dans le piézomètre d'observations, en mètres ;

t temps écoulé depuis le début du pompage, en secondes ;

T transmissivité, en m^2/s ;

S coefficient d'emmagasinement.

Elle est de la forme : $y = a \cdot x + b$

avec $a = 0,183 / T$

$$y = Y / q \quad \text{et} \quad x = \log t \quad (\text{fig 87})$$

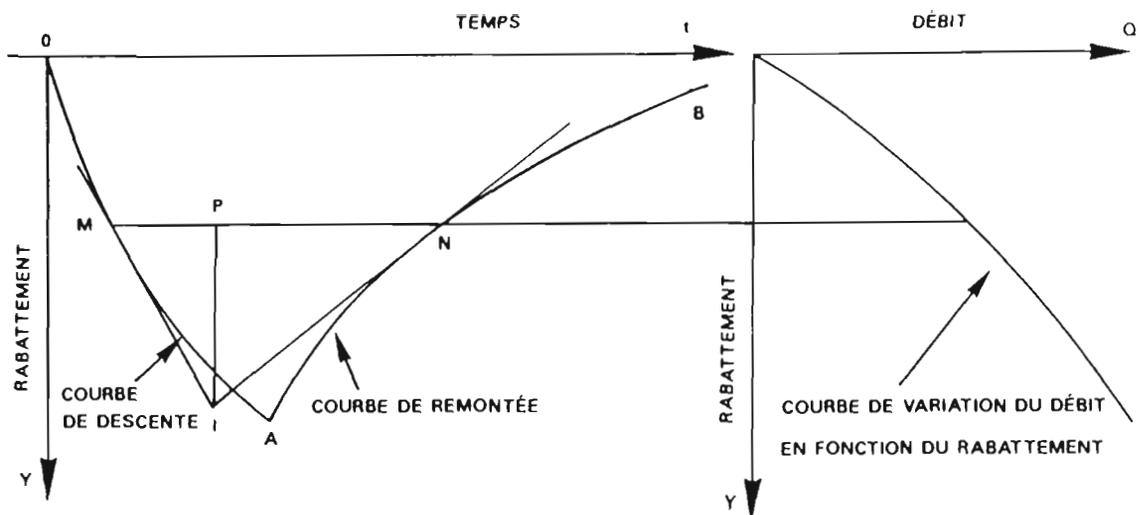


Fig-86 - RABATTEMENTS ET DEBITS D'UN PUIS

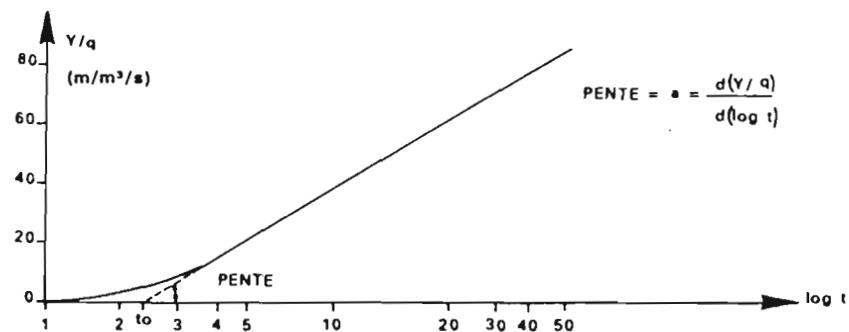


Fig-87 - FIGURE REPRESENTANT, QUEL QUE SOIT q, L'ÉCOULEMENT TRANSITOIRE D'UNE NAPPE EN TOUS POINTS DE LA ZONE INFLUENCÉE PAR LE POMPAGE (D'APRES R.BREMOND)

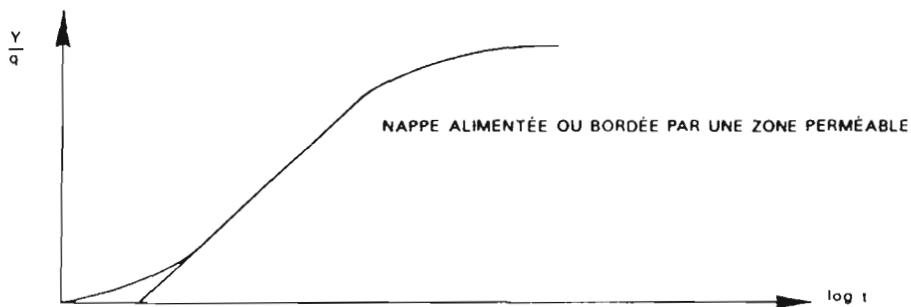
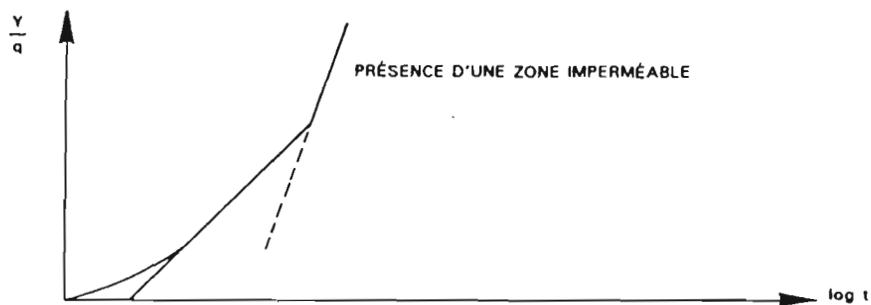


Fig-88 - CAS OU L'APPLICATION DE L'EQUATION DE THEIS N'EST PAS POSSIBLE

$$a = d(Y / q) / d(\log t) = 0,183 / T$$

et

$$T = 0,183 \cdot (\log t) / d(Y / q)$$

Si on définit i comme l'incrément de Y / q pour un module logarithmique, la transmissivité est donnée par la relation :

$$T = 0,183 / i$$

Si l'épaisseur e de la nappe est connue, on peut en déduire la perméabilité K , puisque par définition :

$$T = K \cdot e$$

Si la droite de la figure 87 est prolongée jusqu'à son intersection avec l'axe des abscisses, le point t_0 correspond à $Y / q = 0$ et $\log t_0 = -\log(2,25 \cdot T / S / R^2)$

soit

$$S = 2,25 \cdot T \cdot t_0 / R^2$$

L'équation (1) permet également de calculer le rabattement observé à une quelconque distance du puits, lorsqu'un débit q est pompé durant un temps t .

La figure 88 montre deux cas particuliers pour lesquels l'équation de Theis ne peut s'appliquer.

Si les variations de la surface piézométrique, relativement à l'épaisseur de la nappe, restent inférieures à 25 %, les coefficients de perméabilité K , de transmissivité T et d'emmagasinement S peuvent encore être calculés avec une bonne approximation en remplaçant, dans la formule (1), le rabattement Y par :

$$Y - Y^2 / 2 \cdot e$$

Dans tous les cas, l'estimation de la perméabilité, souvent caractérisée par une forte variabilité, est moins précise que celle de la transmissivité ou du coefficient d'emmagasinement. Il sera donc prudent d'utiliser au moins deux piézomètres d'observations, situés à des distances différentes du puits de pompage, et diverses estimations pourront être faites pour des débits différents. En général, on prend pour valeur de K , la valeur moyenne des différentes mesures.

Pour l'étude des nappes captives, les écartements des piézomètres peuvent être assez grands (20, 100, 200 mètres, par exemple). Pour les nappes libres, les distances sont plus courtes et diminuent si K est petit. Ainsi, pour un sable fin, on pourra prendre : 2, 5 et 10 mètres.

La figure 89 donne un plan théorique d'implantation de piézomètres d'essais, étant entendu qu'en pratique le dispositif peut être allégé.

3. Théorie élémentaire de Dupuit

La théorie de Dupuit permet d'estimer la perméabilité de nappes cylindriques par la relation :

$$K = 2q \cdot (R_1 - R_2) / (h_1^2 - h_2^2)$$

R_1 et R_2 étant les distances de deux piézomètres d'observations par rapport à l'axe du puits.

h_1 et h_2 la hauteur de la nappe mesurée dans ces mêmes piézomètres (fig. 90).

4. Méthode de Thiem

Elle s'applique aux nappes à filets convergents. La perméabilité est donnée par l'équation :

$$K = q \cdot \text{Log}(R_1 / R_2) / [2 \cdot \pi \cdot h' \cdot (Y_2 - Y_1)]$$

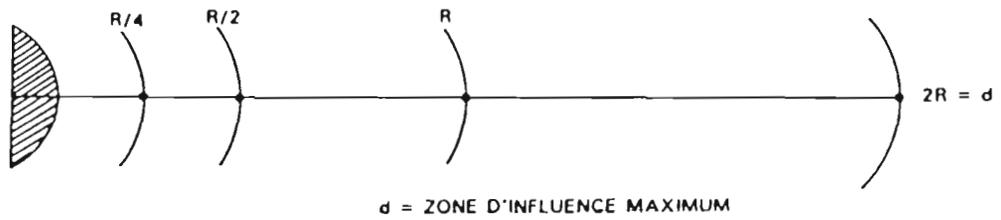


Fig- 89 - IMPLANTATION THEORIQUE DES PIEZOMETRES POUR DES ESSAIS DE POMPAGE

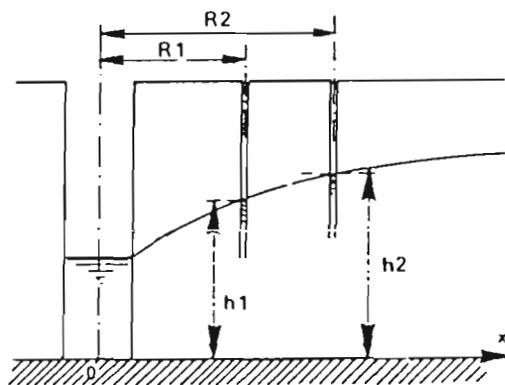


Fig-90 - CALCUL DU COEFFICIENT DE PERMEABILITE
A L'AIDE DE DEUX PIEZOMETRES D'OBSERVATIONS

avec
$$h' = (h_1 + h_2) / 2$$

Y_1, Y_2 étant les rabattements mesurés dans les deux piézomètres.

R_1, R_2, h_1, h_2 ayant la même signification que dans l'équation de Dupuit [3].

5. Remarque

Les précédentes méthodes exposées sommairement ne sont données qu'à titre indicatif pour montrer l'intérêt des essais de pompage dans l'estimation des caractéristiques hydrauliques des aquifères. Ce sont des opérations lourdes et délicates qui s'échelonnent sur plusieurs heures, voire plusieurs jours, et qui demandent la présence d'un spécialiste, ainsi que l'utilisation d'un matériel important : pompe, appareils d'enregistrement ou de mesure des niveaux d'eau, système de contrôle des débits pompés (capacités jaugées, déversoirs, compteurs d'eau ou tubes à diaphragme). Un système d'évacuation des eaux doit être aménagé pour éviter une réalimentation artificielle de la nappe, principalement lors d'essais de longue durée.

2.7.6.2. OBSERVATIONS PIEZOMETRIQUES

Les observations piézométriques permettent de cartographier les lignes équipotentiels qui représentent l'état de l'aquifère à un instant donné. Les principaux axes d'écoulement et la direction des flux peuvent alors être tracés, et les gradients hydrauliques i (pente entre deux lignes équipotentiels) calculés. Ainsi, sur la carte de la figure 91, on note une croissance de i de l'amont vers l'aval, et il apparaît nettement que les limites hydrauliques de la nappe souterraine se trouvent à l'extérieur du bassin topographique, sauf au voisinage de l'exutoire. On observe également que dans la partie amont du bassin, le drain principal des eaux souterraines n'est pas confondu avec le thalweg principal.

Si ΔY représente la différence de hauteur entre deux lignes équipotentiels séparées par une distance Δl , l'écoulement par unité de longueur de ligne équipotentielle est donné par l'équation :

$$q = T \cdot \Delta Y / \Delta l$$

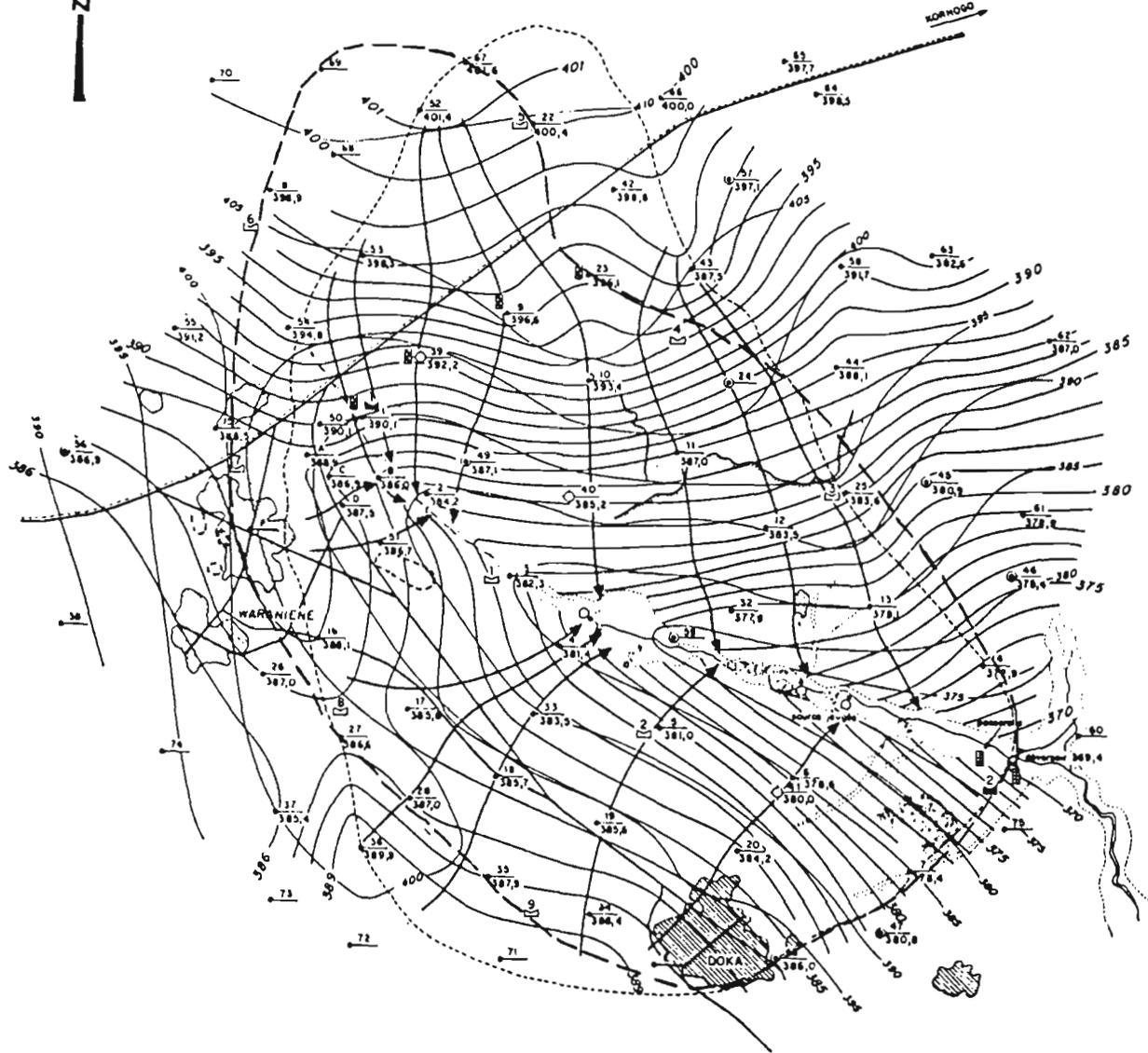
T étant la transmissivité.

Si la nappe considérée est cylindrique et en régime permanent, une surface piézométrique concave (à gradient décroissant vers l'aval) indique, en théorie, une transmissivité croissante d'amont en aval. Inversement, une surface piézométrique convexe caractérise une décroissance de la transmissivité vers l'aval. L'utilisation des cartes piézométriques permet aussi de préciser les limites des zones de plus ou moins forte transmissivité (fig. 92). Il est donc très utile de cartographier la surface piézométrique pour différentes périodes de l'année, principalement en fin de saison sèche (hauteur minimum) et en fin de saison des pluies-début de saison sèche (hauteur maximum).

Une carte des puissances aquifères minimales peut être tracée en soustrayant les altitudes du substratum, de celles de la surface piézométrique dans sa position la plus basse (fig. 93). Le volume de terrain aquifère minimal V_m peut alors être calculé par planimétrie. Pour calculer le volume d'eau correspondant W_m , il est indispensable d'avoir une estimation de la valeur moyenne du coefficient d'emmagasinement S , puisque $W_m = V_m \cdot S$ (dans un aquifère libre, S équivaut à la porosité effective). Le même travail peut être fait pour déterminer le volume maximal de l'aquifère W_M , à partir des hauteurs maximales de la surface piézométrique.

La différence $R = W_M - W_m$ s'appelle la réserve régulatrice. Il s'agit d'une réserve d'eau éventuellement exploitable.

Lors de l'étude du BVRE de Korhogo (Côte d'Ivoire), R. Degallier a proposé une méthode intéressante de détermination des paramètres hydrodynamiques des nappes souterraines, d'après les seules variations naturelles du niveau piézométrique. On pourra s'y reporter avec profit (808, 809).



Carte de la surface piézométrique

Etat au 20 juillet 1964

LEGENDE

- Localités
- Rivières
- Pluviomètres
- Pluviographe
- Echelle limnigraphique
- Limnigraphes
- Puits : altitude surface piézométrique N°
- Courbe de niveau du sol et altitude en mètres
- Courbe hydroisohypse et altitude en mètres (équidistance = 1 m)
- Ligne de courant
- Ligne de partage des eaux souterraines
- Limite du bassin versant hydrologique

ECHELLE



Fig- 91 - BASSIN D'INVESTIGATION DE KORHOGO (COTE D'IVOIRE)

BASSIN DE KORHOGO

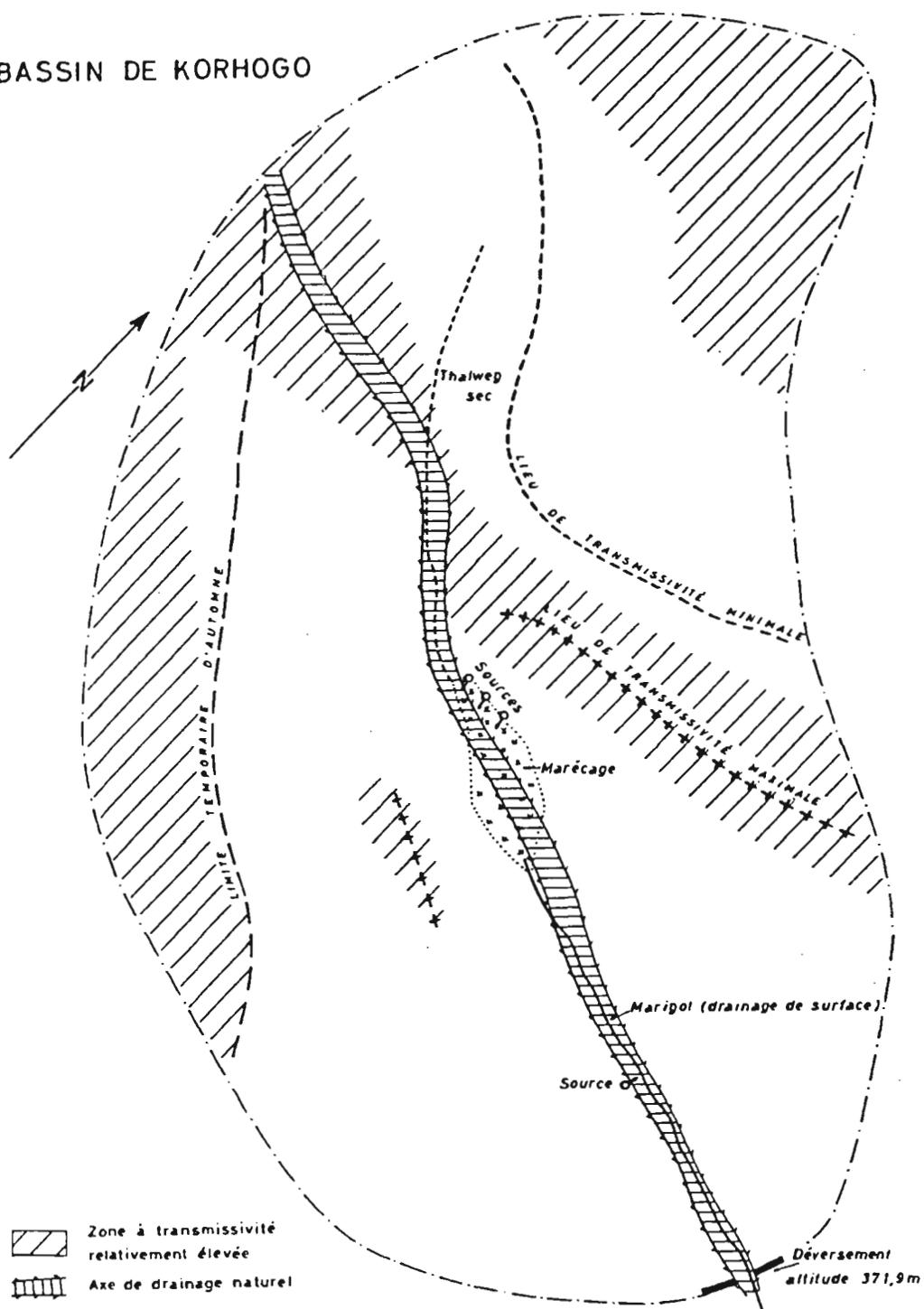


Fig-92 - PRINCIPAUX CARACTERES DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

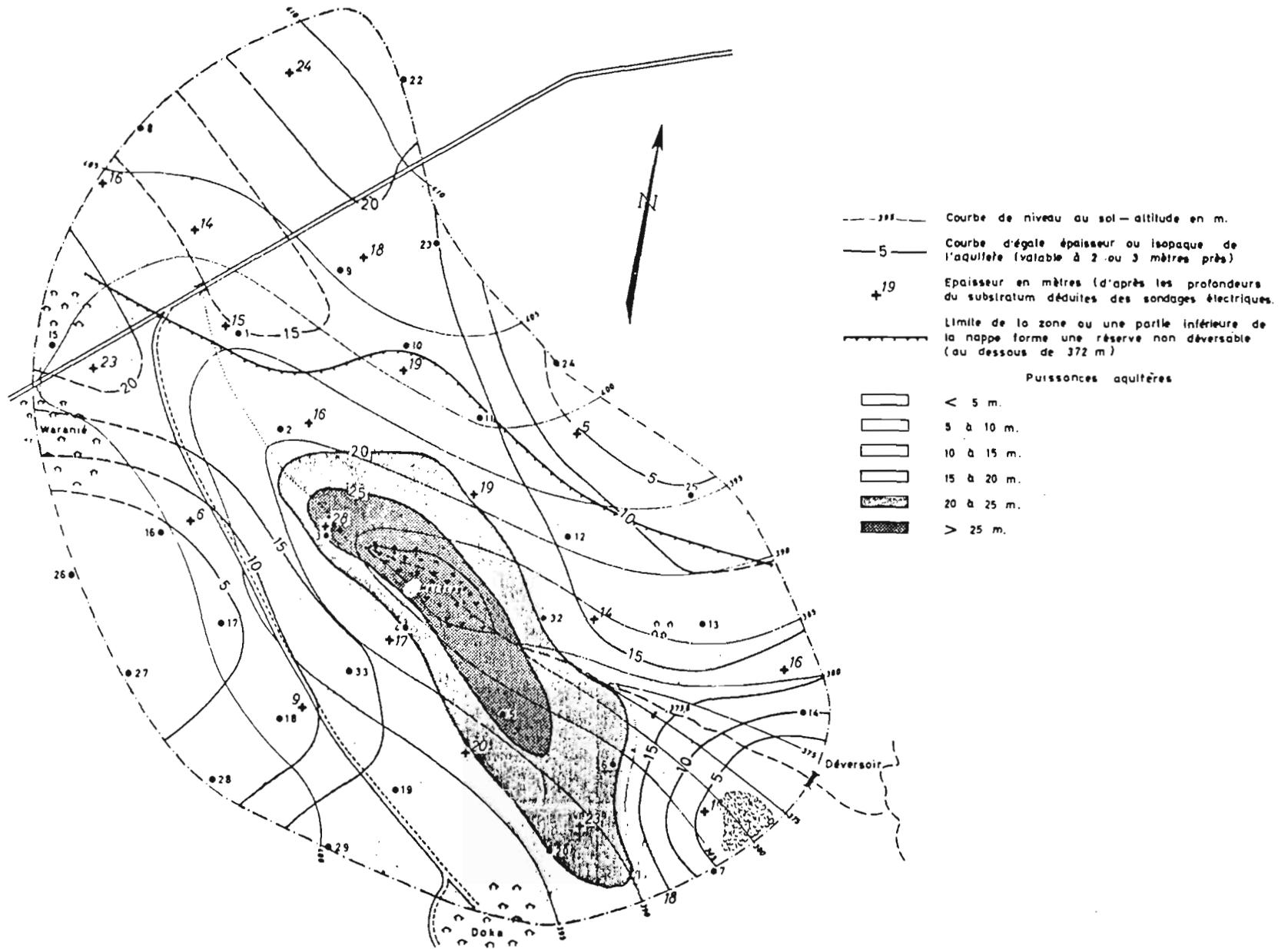


Fig-93 - EPAISSEUR DE L'AQUIFERE DU BASSIN DE KORHOGO LE 15 AVRIL 1962

2.7.6.3. TARISSEMENT DES COURS D'EAU

En l'absence de précipitations, donc en régime non influencé, un cours d'eau, ou une source, est alimenté par les eaux souterraines correspondant aux réserves régulatrices, stockées dans les aquifères durant les périodes de recharge (saison des pluies). La décroissance du débit au cours du temps est donc liée à la baisse du niveau des nappes, conséquence de la diminution des réserves non réalimentées. Il est d'usage de représenter analytiquement cette décroissance, appelée également tarissement, par des lois dont la justification théorique s'appuie sur des hypothèses beaucoup trop simplistes pour être observées dans la nature, compte tenu de l'hétérogénéité des milieux physiques et climatiques (entre autres, de la variabilité des répartitions spatiales et temporelles des précipitations). Il s'avère, cependant, qu'il n'est pas rare d'observer des tarissements de forme assez stable, particulièrement dans les régions caractérisées par une saison sèche bien marquée et une alimentation de saison des pluies suffisamment abondante et relativement homogène sur l'ensemble du bassin versant. Ils se ramènent, le plus souvent, à deux lois réglées chacune par un seul paramètre :

- *Formule de Maillet (1905) :*

Maillet a proposé une formule de la forme :

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot d}$$

avec :

- Q_0 le débit à l'instant t_0 , en m^3/s ;
- Q le débit à l'instant t , en m^3/s ;
- d le temps séparant les instants t et t_0 ($d = t - t_0$), en jours ;
- α le coefficient de tarissement, de dimension T^{-1} .

En pratique, α est le coefficient angulaire de la droite de représentation semi-logarithmique du tarissement, les débits étant portés en ordonnées logarithmiques et les temps en abscisses arithmétiques (fig. 94).

- *Loi de Tison (1960)*

D'usage moins répandu, la loi de Tison s'écrit :

$$Q = Q_0 / (1 + \alpha \cdot d)^2$$

Tous les paramètres ont la même signification que dans la formule de Maillet.

Dans les bassins caractérisés par une nappe relativement peu profonde, la vidange des réserves n'est pas provoquée par un simple mécanisme de gravité et de drainage de l'aquifère, elle peut être fortement liée à l'évaporation et à la transpiration des végétaux. La principale manifestation de ce mécanisme est une oscillation des débits au cours de la journée (fig. 95). J. Callède (1011) a proposé une analyse harmonique, pour montrer que les heures de maximum et de minimum des débits dépendent de la longueur du cours d'eau affectée par le phénomène.

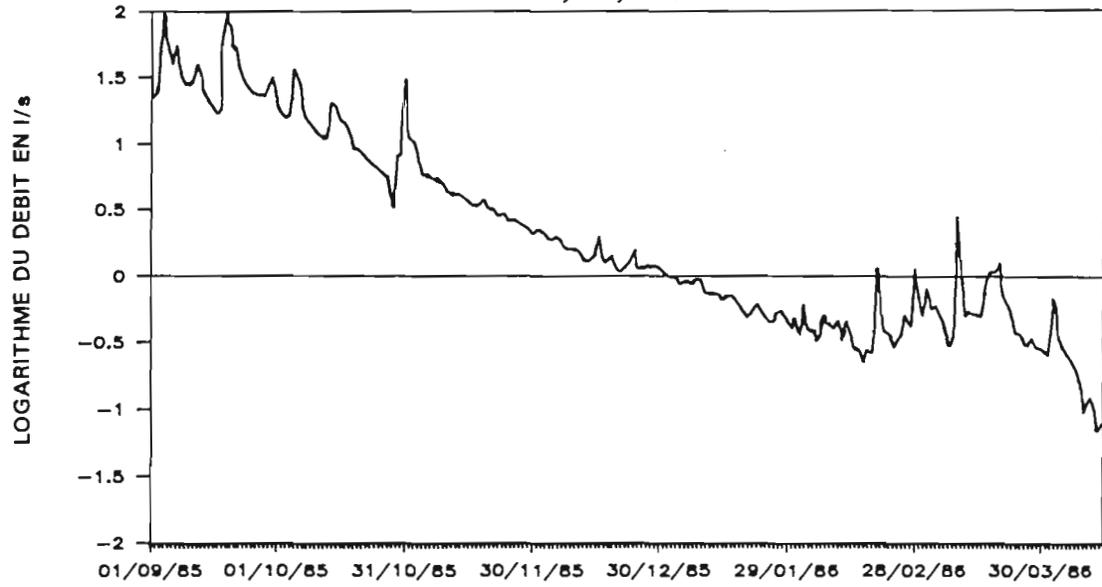
Les courbes de tarissement sont tracées le plus souvent à partir des débits moyens journaliers, bien qu'en présence d'oscillations, il serait préférable, en toutes régions, d'utiliser le débit maximum observé chaque jour. Se pose, alors, le problème de la précision des observations et des mesures pour les faibles débits.

En travaillant à une échelle suffisamment fine, on s'aperçoit, plus particulièrement sur les bassins de faible superficie, que le coefficient de tarissement présente une assez grande variabilité. Les causes sont de deux types :

- une variabilité liée à la loi de vidange du réservoir, en relation avec les caractéristiques physiques du bassin,
- une variabilité liée à la dynamique phyto-climatique du milieu.

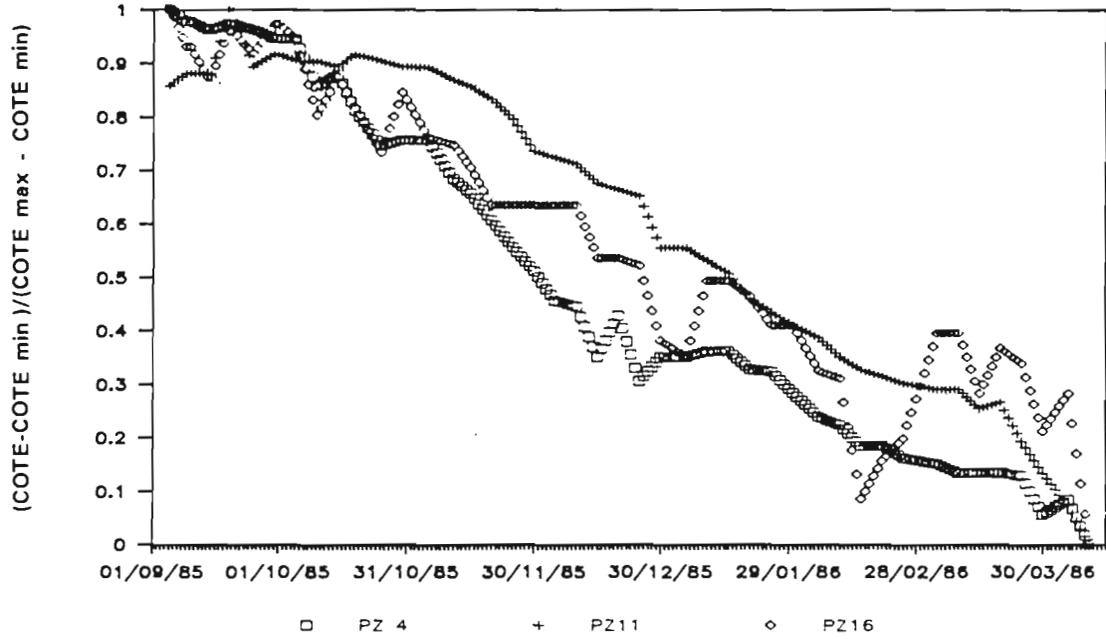
Tarissement 1985-86

Débits moyens journaliers



Variations piézométriques

en échelle adimensionnelle



Pluviométrie journalière

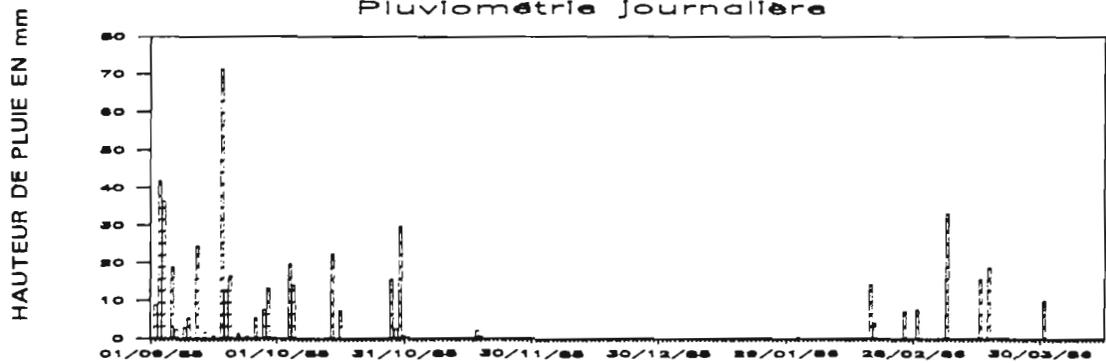


Fig-94 - BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU (COTE D'IVOIRE) 1,36 km²

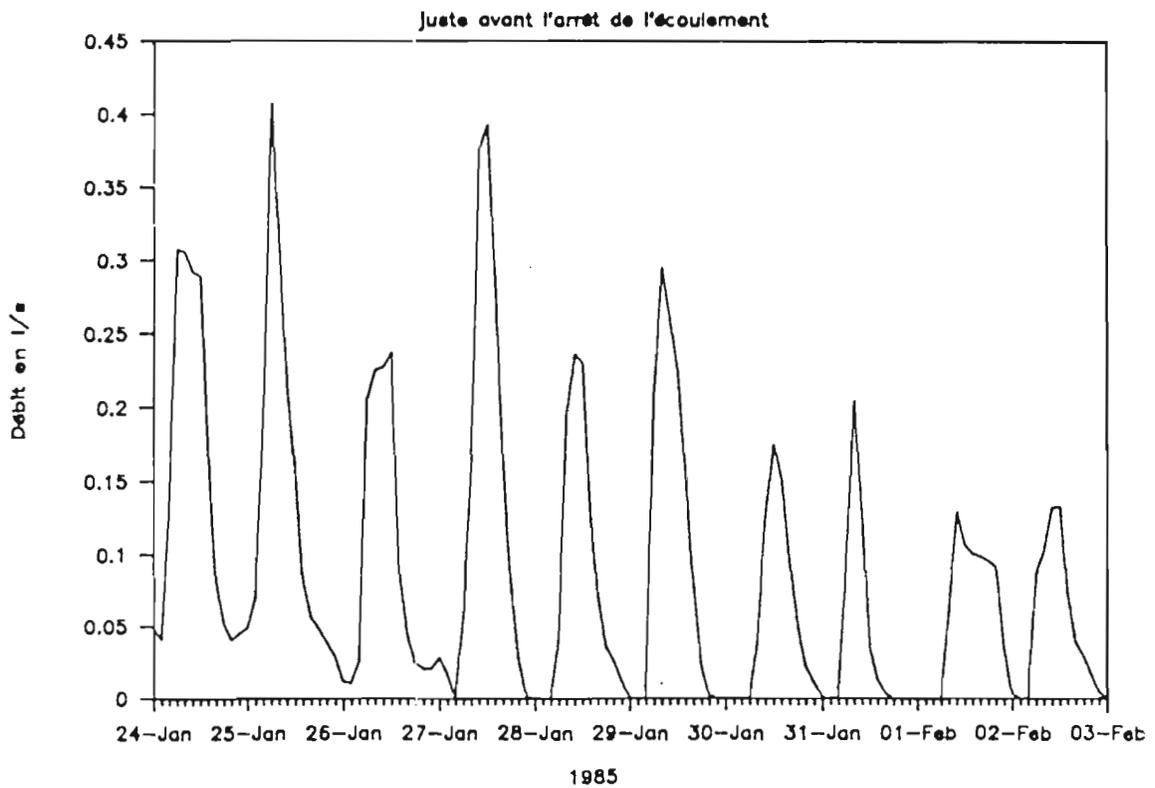
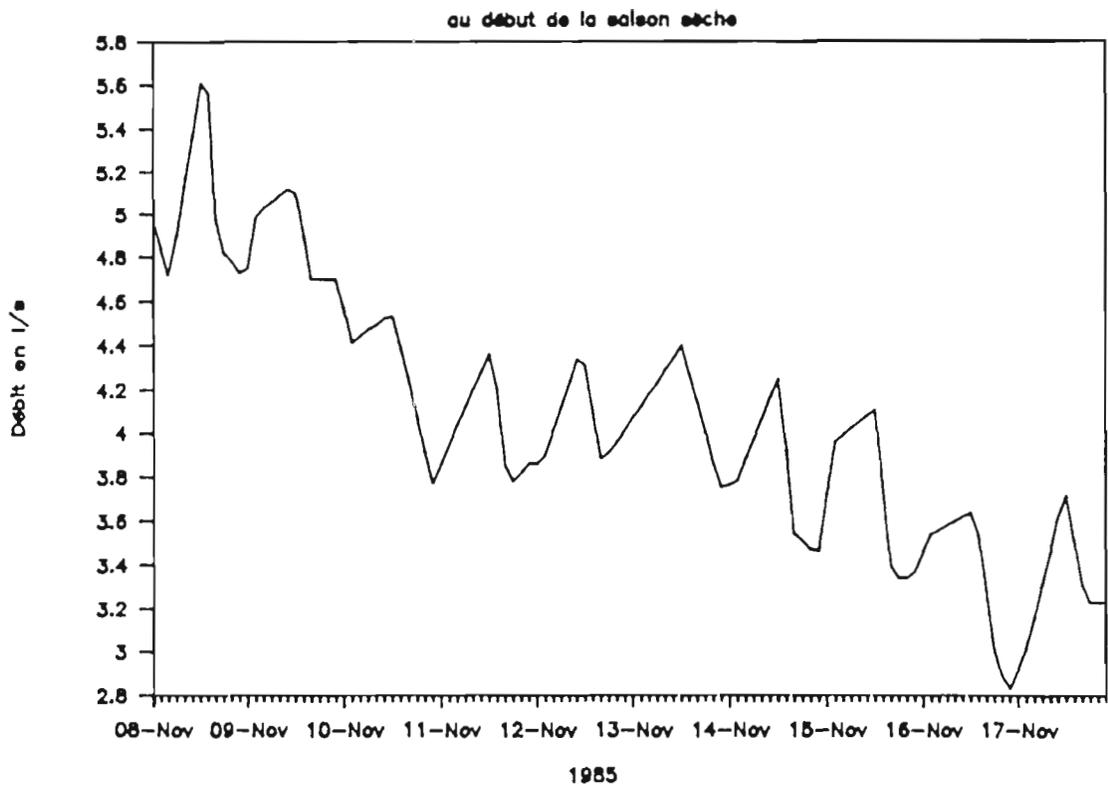


Fig-95 - OSCILLATIONS JOURNALIERES DES DEBITS
BASSIN DE BOORO BOROTOU (COTE D'IVOIRE)

Si Q_0 marque le début du (ou des) tarissement(s) (la droite semi-logarithmique de décroissance pouvant présenter un ou plusieurs changements de pente), on pourra rechercher si la valeur de α est liée à celle de Q_0 , ou à la date d'apparition de ce dernier (instant initial du tarissement).

Dans la pratique, il est souvent difficile de caler une relation simple sur la courbe de tarissement. Aussi, la loi de Tison peut se généraliser en adoptant l'expression :

$$Q = Q_0 / (1 + \alpha \cdot d)^n$$

avec, $n > 1$ pour garantir la convergence de l'intégrale : $\int_{t_0}^{\infty} Q(t) \cdot dt$.

D'une manière générale, il semble que la formule de G. Tison soit mieux adaptée aux terrains perméables, la formule de Maillet convenant davantage aux cours d'eau ne disposant pas de réserves souterraines très importantes (socle cristallin, par exemple).

Lorsque la loi de tarissement reste relativement stable d'une année à l'autre, et représente donc une caractéristique du bassin, elle permet d'évaluer le stock d'eau V disponible dans les réserves souterraines à un instant t_0 , lorsque le débit observé à l'exutoire du bassin est Q_0 :

$$V = \int_{t_0}^{\infty} Q(t) \cdot dt$$

Ce volume représente la réserve de tarissement, parfois appelée capacité d'emmagasinement du bassin (paragraphe 2.7.1.). Considéré à l'instant initial du tarissement, il représente le volume d'eau maximal naturellement "écoulable" en régime non influencé, sans limitation de temps.

Avec la formule de Maillet :

$$V = \int_{t_0}^{\infty} Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot (t-t_0)} \cdot dt = Q_0 / \alpha$$

Si Q_0 est exprimé en m^3/s et $1/\alpha$ en jours,

$$V = 86400 \cdot Q_0 / \alpha \quad \text{en } m^3$$

En intégrant la formule de Tison :

$$V = \int_{t_0}^{\infty} Q_0 / [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]^2 \cdot dt = Q_0 / \alpha \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)]$$

Soit, avec les mêmes unités,

$$V = (86\,400 \cdot Q_0 / \alpha) \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)] \quad \text{en } m^3$$

En ramenant ce volume à la surface du bassin A (en km^2), on obtient l'indice d'emmagasinement :

$$\Delta V = V / 1000 / A \quad \text{en } mm$$

Dans la couche aquifère, l'indice d'emmagasinement est en relation avec l'amplitude moyenne Δh de la variation du niveau de la surface piézométrique au cours de la vidange de la roche-réservoir, pendant le temps $t-t_0$.

Le coefficient d'emmagasinement étant défini par la relation :

$$S = (dV / dh) \cdot 100$$

en % (paragraphe 2.7.1.)

le rapport $(\Delta V / \Delta h) \cdot 100$ représente donc le coefficient d'emménagement moyen S_m ou, pour une nappe libre, la porosité efficace moyenne.

Pour des évaluations globales telles que celles proposées ci-dessus, il peut être utile, lorsque la saison sèche est suffisamment longue (au moins trois à quatre mois), de définir la courbe de tarissement à partir des débits (ou des lames écoulées) moyens mensuels (fig. 96), plutôt qu'à partir des débits moyens journaliers.

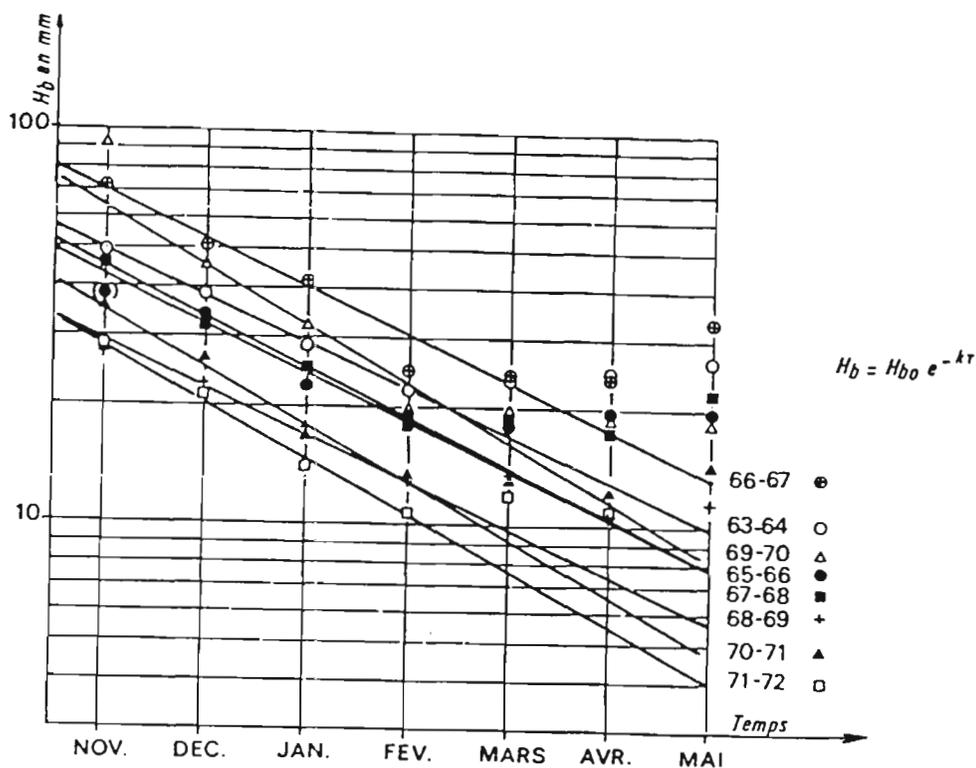


Fig-96 - COURBES DE TARISSMENT A PARTIR DES LAMES ECOULEES MENSUELLES
 BASSIN VERSANT DE KORHOGO (COTE D'IVOIRE) 3,63 km²

2.8. QUALITE DES EAUX

2.8.1. HYDROCHIMIE

Un bassin versant représente un système de drainage dans lequel peuvent être appréciés, non seulement les variations de la composition chimique de l'eau au cours des différentes phases du cycle hydrologique, mais également les flux des différents composés entrant et sortant, ainsi que les variations des stocks internes. Le suivi hydrochimique d'un bassin peut donc contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes naturels, et à préciser les risques de dysfonctionnement liés à certaines interventions anthropiques.

Compte tenu des conditions initiales que représente l'eau de pluie, les composés en solution dans les eaux naturelles sont caractéristiques, au moins partiellement, des sols et des roches sur lesquelles elles s'écoulent ou stagnent, ou à travers lesquelles elles s'infiltrent plus ou moins rapidement. Pour appréhender l'ensemble du cycle hydrologique, le suivi hydrochimique doit donc porter à la fois sur les précipitations, l'écoulement superficiel, les eaux stagnantes, l'eau dans le sol et enfin les eaux souterraines, si la présence d'un aquifère le justifie.

2.8.1.1. QUELQUES DEFINITIONS

- **Ions** : lorsqu'un sel est dissous dans l'eau, sa molécule se dissocie en ions électropositifs ou cations, et en ions électronégatifs ou anions.
- **Equivalent chimique** : anions et cations ne peuvent se dissocier ou se combiner qu'en unité de masse bien déterminée, appelée équivalent chimique E_c :

$$E_c = \text{masse volumique} / \text{valence}$$

Par exemple, pour le Magnésium de masse atomique 24 et de valence 2 : $E_c = 24 / 2 = 12$.

- **Ph** : il est égal au logarithme de base 10 de l'inverse de la concentration en ions hydrogène.

Un ph de 7 correspond à la neutralité ; une solution est d'autant plus acide que son Ph est inférieur à 7 et d'autant plus basique qu'il lui est supérieur.

En théorie, il varie entre 0 et 14, mais en pratique dans les eaux naturelles, il se situe souvent entre 5 et 9.

- **Conductivité électrique** : c'est la conductance du volume d'eau compris entre deux électrodes métalliques planes d'une surface de 1 cm^2 et écartées de 1 cm. L'unité de base est le Siemens par mètre (S.m^{-1}).

Variante avec la température, les mesures sont normalisées à 20°C (25°C dans certains pays). Certains appareils affichent automatiquement la conductivité électrique normalisée.

- **Turbidité** : caractérise l'absorption et/ou la dispersion de la lumière causées par les matières en suspension et les matières colloïdales. Les unités ont évolué au cours du temps, mais on utilise actuellement l'unité FTU (Unité de turbidité à la formazine).
- **Couleur** : elle s'exprime en unité standard Hazen ou degré Hazen ($^\circ$ Hazen) qui est définie comme la couleur produite par 1 mg/l de platine sous la forme d'acide chloroplatinique en présence de 2 mg/l d'hexahydrate de chlorure cobaltéux.

Les échantillons sont comparés à des étalons, visuellement ou photométriquement, en utilisant une courbe d'étalonnage.

- **Dosages** : les résultats des différents dosages ioniques sont donnés en milligrammes par litre (mg.l^{-1}) ou en parties par million (ppm).

$$1\text{mg} / 1 = 1\text{ppm}$$

On définit, également, l'équivalent par litre qui est le nombre d'équivalents chimiques contenu dans le poids de l'élément, exprimé en grammes, dissous dans un litre d'eau. Pour éviter les nombreuses décimales on utilise son millième, appelé milliéquivalent par litre (mé/l). Par exemple, si une solution renferme 120 mg/l d'ion Mg^{++} :

$$\text{mé} / 1 = 120 / 12 = 10$$

2.8.1.2. PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS ET FREQUENCE DES MESURES

L'opération de prélèvement des échantillons doit être menée avec beaucoup de soin. Les récipients utilisés, généralement en plastique, doivent être propres et rincés abondamment avec l'eau à prélever (trois rinçages sont souhaitables). Les récipients en verre présentent l'inconvénient d'être lourds et fragiles.

Suivant les cas, les échantillons sont prélevés : au seau, par pompage, à l'aide de préleveurs manuels ou automatiques, ou simplement en plongeant le flacon de stockage dans l'eau. Dans ce dernier cas, le récipient est descendu à la profondeur voulue, ouverture vers le bas, puis retourné rapidement pour être rempli.

Quelle que soit la méthode de prélèvement utilisée, le flacon ne doit plus contenir d'air au moment du rebouchage. Certains récipients disposent, pour cela, d'un double système : une capsule de sécurité percée d'un trou permet à l'air de s'échapper lors de la fermeture par simple pression, et un bouchon à vis assure une seconde fermeture hermétique. Pour les flacons non équipés de capsule, une simple petite feuille de plastique peut être utilisée. Chaque échantillon doit être, ensuite, clairement identifié : lieu de prélèvement, numéro, date, éventuellement profondeur, largeur, etc.

1. Précipitations

L'eau de pluie est recueillie dans un récipient en verre ou en plastique (seau de pluviomètre, jerrican ou dame-jeanne relié au conduit de vidange d'un pluviographe).

Il est rare (marquage pour l'étude du ruissellement, par exemple) qu'un suivi de la composition chimique de l'eau de pluie soit nécessaire à l'échelle de l'averse : on se contente souvent d'un échantillon représentatif des pluies cumulées mensuelles ou bimensuelles, plus rarement hebdomadaires.

Les BVRE ayant des superficies relativement réduites, il est inutile, sauf dans le cas d'études particulières (bassins à fortes dénivelées, par exemple), de multiplier le nombre de sites d'échantillonnage.

2. Ecoulement superficiel

Les prélèvements dans les écoulements superficiels sont effectués à hauteur des stations hydrométriques contrôlant les exutoires de bassins versants ou de parcelles.

Lors des crues, les systèmes de prélèvements utilisés sont les mêmes que ceux servant à la mesure du transport solide en suspension : soit des prises d'échantillons manuelles échelonnées dans le temps en fonction de la cote limnimétrique (montée, pic, décrue), soit un préleveur automatique permettant d'extraire un échantillon moyen.

Entre les crues, si un écoulement de base est observé, les prélèvements peuvent être effectués à intervalles fixes (de l'ordre de 8 à 15 jours).

Les prélèvements manuels ou, plus généralement, les prélèvements discrets permettent de suivre l'évolution des solutés en fonction du temps. Ces "chéomogrammes" sont les répliques chimiques des hydrogrammes. Comme pour l'évaluation des poids de matières solides transportées en suspension (paragraphe 2.4.2.4.1.1.), une double intégration de ces deux courbes permet de calculer les flux massiques de matières dissoutes.

Si la station est équipée d'un préleveur automatique délivrant des échantillons moyens, les flux seront calculés en multipliant les concentrations moyennes C_m par le débit moyen Q_m correspondant à la période d'échantillonnage : $F_e = C_m \cdot Q_m$.

Lorsque la section du cours d'eau dans lequel sont effectués les prélèvements atteint plusieurs m^2 , voire

plusieurs dizaines de m², une étude des répartitions bidimensionnelles (verticales et horizontales) des mesures pourra être envisagée. Toutefois, à l'exception de cas très particuliers (section située à l'aval immédiat de la confluence de deux cours d'eau issus de bassins de natures très différentes), un mélange suffisamment homogène est très souvent assuré, contrairement à ce qu'on observe pour les matières en suspension.

3. *Eaux stagnantes*

Les eaux piégées dans les dépressions naturelles, et surtout dans les réservoirs artificiels dont le nombre tend à croître rapidement en Afrique de l'Ouest (alimentation en eau des populations et du bétail, besoins agricoles et énergétiques, etc.), sont soumises à une forte évaporation qui en saison sèche peut entraîner une salinisation plus ou moins intense. Une étude de l'évolution, souvent complexe, de l'hydrochimie de ces réservoirs doit permettre d'identifier et si possible de hiérarchiser les facteurs intervenants dans ce processus : le climat (répartition des précipitations, évaporation, etc.), la géomorphologie et la pédologie du bassin versant, les caractéristiques morphométriques et l'âge de la retenue, le mode de gestion, les types de sédiments déposés.

La représentativité des échantillons sera analysée en effectuant une étude de la répartition tridimensionnelle des points de prélèvements. Il n'est, cependant, pas rare de rencontrer dans les petites retenues (de profondeur moyenne inférieure à 5 mètres, par exemple) un milieu suffisamment homogène, pour qu'un seul prélèvement, effectué à quelques décimètres au-dessous de la surface de l'eau, puisse être considéré comme représentatif de l'ensemble du réservoir. Il faut tout de même éviter les zones fréquentées par les hommes ou les animaux, ainsi que les débouchés des tributaires.

Si une étude de la variation des concentrations en fonction de la profondeur s'avère nécessaire, différents types d'appareils pourront être utilisés : préleveurs instantanés, ou préleveurs intégrateurs identiques à ceux employés pour les études de transports solides en suspension dans les cours d'eau (paragraphe 2.4.2.4.1.1. [1]).

Les eaux stagnantes pouvant contenir de fortes proportions de matières organiques, les échantillons devront être rapidement filtrés sur le terrain, avant d'être envoyés au laboratoire.

Lorsque l'étude ne porte que sur les problèmes de salinisation en saison sèche, la périodicité des prélèvements peut être mensuelle ou bimensuelle. Si elle prend en compte l'influence des apports de saison des pluies, les prélèvements doivent être plus fréquents.

4. *L'eau dans le sol*

L'étude de la qualité de l'eau dans le sol n'appartient pas au seul domaine de l'agronomie. Si, effectivement, le suivi hydrochimique des sols en zones cultivées doit, en liaison avec les études des apports en engrais et des rendements, permettre d'effectuer des choix rationnels d'exploitation et d'aménagement, il représente aussi, d'une manière plus large, un moyen d'analyse des mécanismes régissant les flux d'éléments chimiques, liés au transit de l'eau, tant vers les aquifères souterrains que vers les végétaux (accroissement de la biomasse) ou la surface du sol (reprise par évaporation).

Le dispositif de prélèvement consiste à implanter à différentes profondeurs (15, 30, 60, 90 et 120 cm, par exemple) des bougies poreuses (photo 54), en des sites représentatifs des principaux types de sols, souvent organisés en toposéquences.

Il est important de contrôler que le passage de l'eau à travers les bougies ne modifie pas la représentativité de l'échantillon. Pour que le mode opératoire perturbe le moins possible la circulation de l'eau dans le sol, la succion doit être modulée en fonction de la charge hydraulique naturelle : plus le sol est sec et plus la bougie est profonde, plus la succion imposée sera forte.

La fréquence des prélèvements sera liée à la distribution temporelle des précipitations, ou mieux, si des mesures d'accompagnement le permettent, au potentiel capillaire du sol (paragraphe 2.6.1.).

5. *Eaux souterraines*

Les prélèvements d'eau dans les nappes souterraines demandent certaines précautions. En premier lieu, il est indispensable de s'assurer que l'eau du puits n'a pas été polluée au moment du forage (boue ou eau). Si tel est le cas, un nettoyage par pompage ou puisage est nécessaire. En cours d'étude, chaque prélèvement sera précédé d'un pompage suffisant pour assurer un renouvellement complet de l'eau du puits ou du piézomètre. Lorsqu'un BVRE est équipé d'un réseau piézométrique, une méthode pratique et efficace consiste à effectuer, la

veille des prises d'échantillons, une tournée de pompages passant par chacun des puits, afin d'être assuré d'une récupération totale des niveaux piézométriques. Les prélèvements peuvent être, de la même manière, réalisés par pompage. Toutefois, lorsque des prises doivent être faites à différentes profondeurs, cette méthode ne présente pas toujours une précision suffisante, et il est préférable d'avoir recours à des préleveurs identiques à ceux utilisés dans les retenues ou les cours d'eau. Les plus communément employés sont des échantillonneurs munis de clapets à ressort. Le tube de prélèvement est attaché à un câble qui permet de mesurer la profondeur à l'aide d'un compteur. Au cours de la descente, le tube est ouvert aux deux extrémités, permettant ainsi la libre circulation de l'eau à travers l'appareil. A la profondeur choisie, un poids coulissant le long du câble de suspension vient déclencher, sous le choc, un mécanisme qui ferme la chambre de prélèvement. De tels appareils permettent d'extraire des échantillons dans des piézomètres de 50 mm de diamètre seulement.

La fréquence des prélèvements sera liée aux variations des niveaux piézométriques, mais ne devrait pas, dans tous les cas, être inférieure à un prélèvement par mois. La répartition spatiale des dispositifs de mesures sera suffisamment dense pour suivre, sur l'ensemble du bassin, les variations hydrochimiques liées à la circulation dans les différentes couches aquifères. Elle devra pour cela tenir compte, à la fois, des différentes formations encaissantes et des grands axes de drainage (paragraphe 2.7.6.2.).

2.8.1.3. MESURES ET ANALYSES

Les opérations de mesures et d'analyses varient en fonction de l'objectif des études, mais certaines d'entre elles doivent être systématisées :

- Mesure du Ph, à l'aide d'un Ph-mètre.
- Mesure de la conductivité, à l'aide d'un conductivimètre.
- Dosage de l'alcalinité, en mesurant par volumétrie la teneur en carbonates et bicarbonates (CO_3^{2-} et HCO_3^-) à partir d'une solution titrée d'acide sulfurique en présence de phénolphthaléine, de méthylorange ou d'hélianthine.

La mesure sur le terrain de ces différents paramètres, effectuée immédiatement après les opérations de prélèvement, doit permettre de vérifier que l'altération des échantillons en fonction du temps reste faible. Si des dérives sont mises en évidence, des corrélations pourront être établies entre les mesures de terrain et les mesures de laboratoire (fig. 97 et 98).

Des mesures de la turbidité (par colorimétrie, absorptiométrie ou néphélométrie), des poids de matière en suspension (par pesées) et de la couleur (par colorimétrie) peuvent être également effectuées, si elles n'entrent pas, par ailleurs, dans le cadre d'autres travaux (études des transports solides, par exemple).

- Dosage des ions, dits "majeurs", effectué en laboratoire sur des échantillons filtrés :
 - . anions : en plus des carbonates et bicarbonates déjà cités,
 - * les Chlorures (Cl^-), par colorimétrie (spectrocolorimétrie automatique, par exemple) ou volumétrie ;
 - * les Sulfates (SO_4^{2-}) par colorimétrie ou volumétrie également.
 - . cations :
 - * Calciums (Ca^{++}) et Magnésium (Mg^{++}), par absorption atomique ;
 - * Sodium (Na^+) et Potassium (K^+), par photométrie de flamme (spectrophotométrie de flamme en émission, par exemple).

Suivant le milieu étudié, d'autres composés ou d'autres ions pourront être dosés :

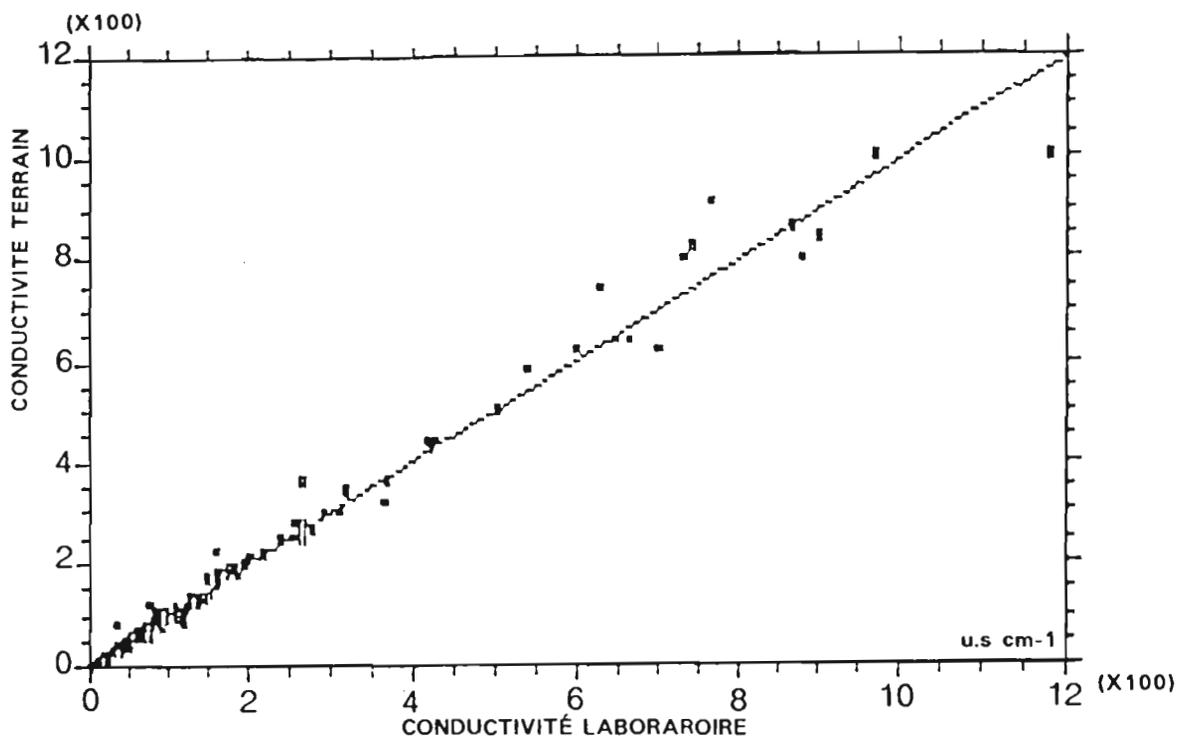


Fig-97 - RELATION ENTRE CONDUCTIVITE TERRAIN ET CONDUCTIVITE LABORATOIRE
(D'APRES J.L.GUYOT ET AL. 1987)

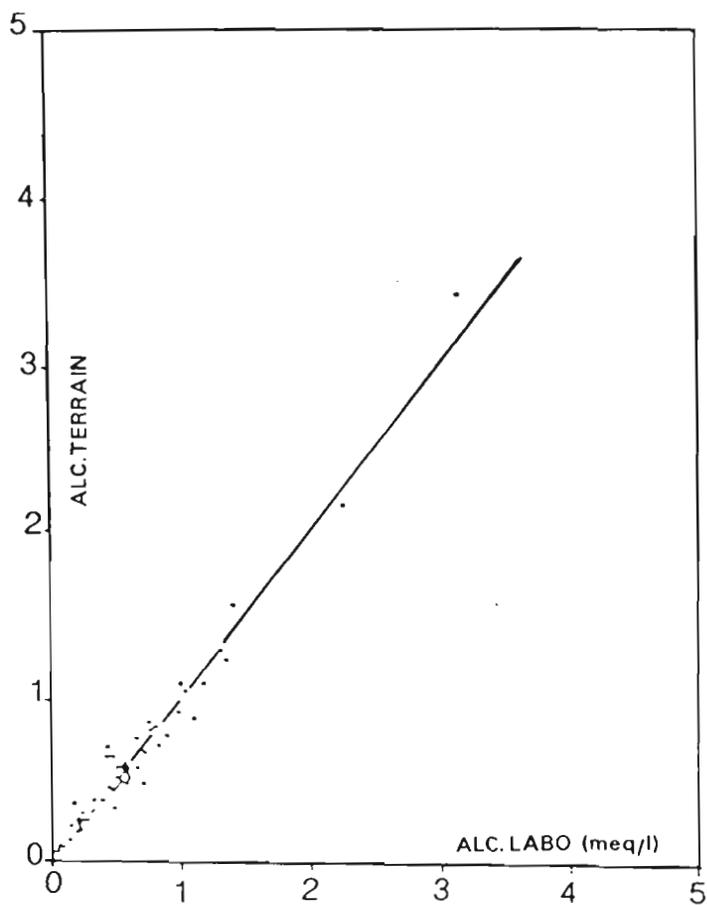


Fig-98 - RELATION ENTRE ALCALINITE TERRAIN ET ALCALINITE
MESUREE AU LABORATOIRE - $n = 51$ $r = 0.983$
(D'APRES M.A.ROCHE ET AL. 1986)

- * la Silice (SiO₂), par colorimétrie ;
- * le Fer ou le Manganèse, par absorption atomique.

L'étude de la pollution des eaux demande des dosages supplémentaires :

- . *L'Oxygène dissous* : vital pour le maintien de la vie aquatique et la capacité d'auto-épuration des milieux hydriques. Ces mesures relativement délicates doivent de préférence être effectuées sur le terrain.
- . *L'Amoniac* : lié au processus de décomposition biochimique des protéines et des engrais chimiques.
- . *Les Nitrates* : terme de l'oxydation biochimique de l'Amoniac.
- . *Les Phosphates* : liés fréquemment à la présence d'engrais.

Fort heureusement, excepté dans certaines régions à forte pression démographique où le développement agricole connaît un essor important, ou dans les zones de grandes cultures industrielles, ces problèmes touchent encore peu le milieu rural africain.

A toutes ces analyses, peut s'ajouter la mesure du résidu sec RS, exprimé en milligrammes et obtenu par dessiccation à 105° à l'étuve. Représentant la minéralisation totale de l'eau, il est étroitement lié à la conductivité (fig. 100).

Le volume des échantillons collectés dépend du protocole d'étude, mais un prélèvement de 500 ml est généralement suffisant pour l'ensemble des analyses. Toutefois, des contrôles périodiques doivent être réalisés pour s'assurer de l'homogénéité et de la précision des résultats. Ce peut être également l'occasion d'effectuer des analyses complémentaires. Des échantillons de 1 000 ml, voire 2 000 ml, sont alors nécessaires quel que soit le domaine étudié : précipitations, eaux superficielles, eaux dans le sol ou eaux souterraines. L'information apportée par ces diverses analyses peut avantageusement être complétée par des mesures plus simples, qu'il est alors possible de multiplier, dans le temps comme dans l'espace (conductivité, Ph ou turbidité). Des prélèvements de 60 ml sont pour cela suffisants.

2.8.1.4. PRESENTATION DES RESULTATS

L'interprétation des mesures et des analyses demande nécessairement l'intervention d'un spécialiste. Néanmoins, certains calculs ou traitements standards pourront être réalisés en utilisant des logiciels spécifiques (des chercheurs de l'Orstom en ont développé un certain nombre) ou en ayant recours à des progiciels du marché qui permettent d'effectuer des traitements statistiques et des tracés graphiques :

- dépouillement des résultats d'analyses, pour le calcul des teneurs ;
- calcul de divers paramètres et impression de tableaux (fig. 99) ;
- tracé des courbes de variation dans le temps des teneurs ou d'autres paramètres plus élaborés (fig. 99a) ;
- calcul de corrélations entre minéralisation et conductivité (fig 100), ou entre matières en suspension et turbidité ;
- tracé d'isolignes : minéralisation, concentration de certains sels ou ions ;
- recherche de faciès chimiques au niveau spatial, ou suivi de l'évolution hydrochimique saisonnière d'un site :
 - . présentations triangulaire de type Piper (fig. 100a) ;
 - . analyse factorielle : analyse en composantes principales (ACP), ou analyse de correspondances (AFC) bien adaptée aux études de profils.

Date	Auteur	Temp. (° C.)	pH	Cd. ter. (µS/cm)	Cd. lab. (µS/cm)	Coul. pt/co	Turb. (FTU)	M.E.S. (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Cl (mg/l)	SO4 (mg/l)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Fe (mg/l)	SiO2 (mg/l)	Minér. (mg/l)	
22/05/82	MAR	23.3			627				95.8	12.8	184.0	35.1	30.0	39.1	10.0	38.0			
24/08/86	JLG	21.0		800	731	0	1280	2755.3	80.7	10.6	107.5	27.2	17.0	52.0	8.4	0.0	4.3	307.7	
06/03/87	JLG	23.2	8.3	652	620	40	4500	2189.2	185.4	28.4	48.0	23.2	9.8	29.8	7.5	1.3	11.6	345.0	
15/05/88	JLG	21.3	8.9	689	778	30	2950		123.2	5.0	362.8	44.0	20.0	50.0	5.9	0.0	11.0	621.9	
17/06/88	NC	16.7	9.2	742	790	75	875	1261.0	122.0	8.5	382.1	36.4	37.6	44.8	4.0	0.0	14.0	649.4	
02/03/89	JLG	21.5		443	489	30	7125	15666.2	102.5	4.7	43.4	31.2	17.6	30.4	4.7	0.0	7.5	242.0	
27/05/89	JB				640	35	170	545.6	117.1	6.1	29.2	32.3	28.2	33.4	3.8	0.0	7.7	257.8	
7																			
Minimum		16.7	8.3	443	489	0	170	545.6	80.7	4.7	29.2	23.2	9.8	29.8	3.8	0.0	4.3	242.0	
Maximum		23.3	9.2	800	790	75	7125	15666.2	185.4	28.4	382.1	44.0	37.6	52.0	10.0	38.0	14.0	649.4	
Moyenne		21.2	8.8	665	668	35	2817	4483.5	118.1	10.9	165.3	32.8	22.9	39.9	6.3	5.6	9.4	404.0	
Nombre		6	3	5	7	6	6	5	7	7	7	7	7	7	7	7	6	6	

Fig-99 - RESULTATS D'ANALYSES HYDROCHIMIQUES

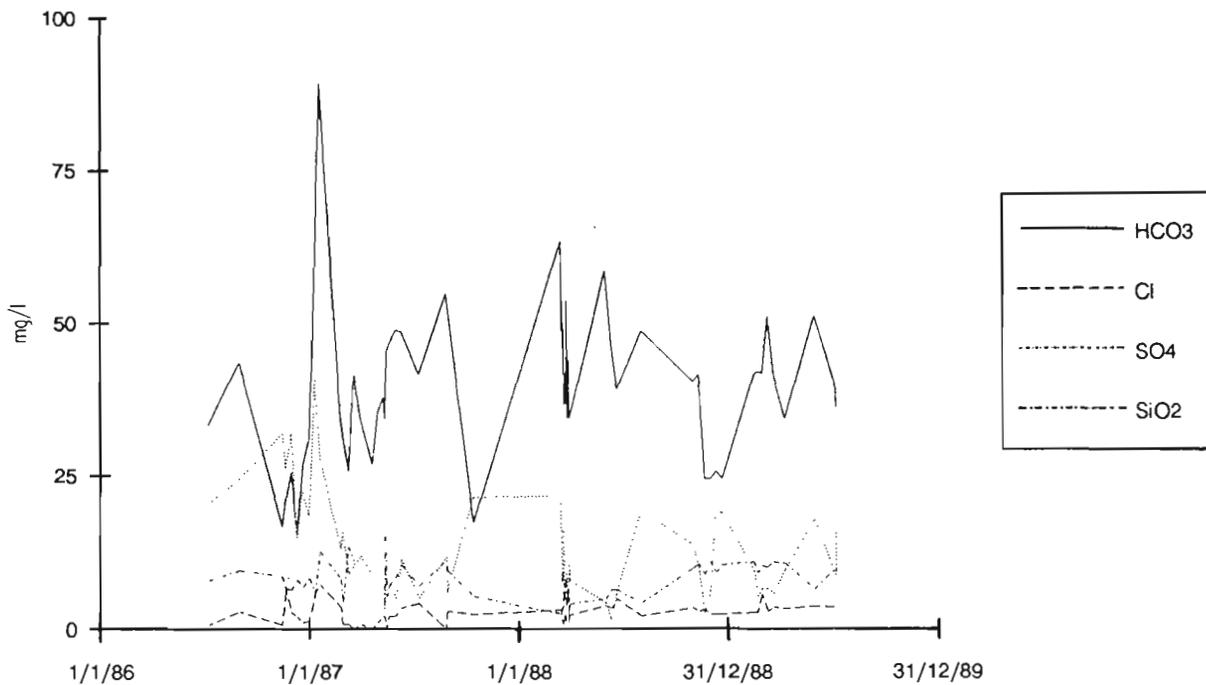


Fig-99a - VARIATION DANS LE TEMPS DES PARAMETRES HYDROCHIMIQUES

(D'APRES J.L.GUYOT)

2.8.2. HYDROCHIMIE ISOTOPIQUE

Les ions majeurs en solution dans l'eau peuvent servir de marqueurs naturels pour l'étude des différentes phases du cycle hydrologique : ions Chlore, Sodium, Magnésium ou bicarbonates, par exemple. La conductivité peut également apporter dans ce domaine des informations utiles.

A ces différentes méthodes conventionnelles, s'ajoutent des méthodes fondées sur la composition isotopique des eaux naturelles qui fournissent d'intéressantes indications, dans des domaines très variés : origine et mode de formation des précipitations, phénomènes de mélange des eaux superficielles, bilans de retenues, décomposition des hydrogrammes de crue, infiltration et relation eaux superficielles-eaux dans le sol, évapotranspiration, recharge des nappes souterraines et relation eaux de surface-eaux souterraines, mélanges entre aquifères, mécanismes de salinisation, estimation du temps de transit, etc..

Ces techniques reposent sur des analyses qui ne peuvent être effectuées que par des laboratoires spécialisés.

2.8.2.1. QUELQUES DEFINITIONS

- Les isotopes stables constitutifs de l'eau sont le Deutérium ^2H et l'oxygène ^{18}O .
- Le rapport d'abondance isotopique est le rapport de l'abondance en isotope lourd à l'abondance en isotope léger :

$$R = {}^{18}\text{O} / {}^{16}\text{O} \quad \text{ou} \quad R = {}^2\text{H} / {}^1\text{H} \quad (1)$$

- La notation δ , exprimée en ‰, est définie par la relation :

$$\delta \text{ échantillon} = [(R_{\text{éc}} / R_{\text{ét}}) - 1] \cdot 1000 \quad (2)$$

Réc étant le rapport d'abondance isotopique de l'échantillon et Rét le rapport d'abondance isotopique d'un étalon.

Par définition les étalons ont une composition isotopique égale à 0 ‰ dans l'échelle δ .

Pour ^{18}O et ^2H l'étalon est fourni par un échantillon appelé SMOW (Standard Mean Ocean Water) qui a la composition isotopique moyenne de l'eau de mer :

$$R^{18}\text{O} = 1,99934 \times 10^{-3} \quad (\text{Craig, 1961})$$

$$R^2\text{H} = 0,15576 \times 10^{-3} \quad (\text{Hageman et al., 1970})$$

- Le facteur de fractionnement isotopique entre deux corps A et B est le rapport :

$$\alpha_{A/B} = R_A / R_B \quad (3)$$

ou

$$\alpha_{A/B} = (\delta_A + 1) / (\delta_B + 1) \quad (4)$$

Lorsque δ_B est très petit devant 1 :

$$1 / (\delta_B + 1) \approx 1 - \delta_B ;$$

de plus, le produit $\delta_A \cdot \delta_B$ est très petit devant δ_A , δ_B et 1.

Ainsi

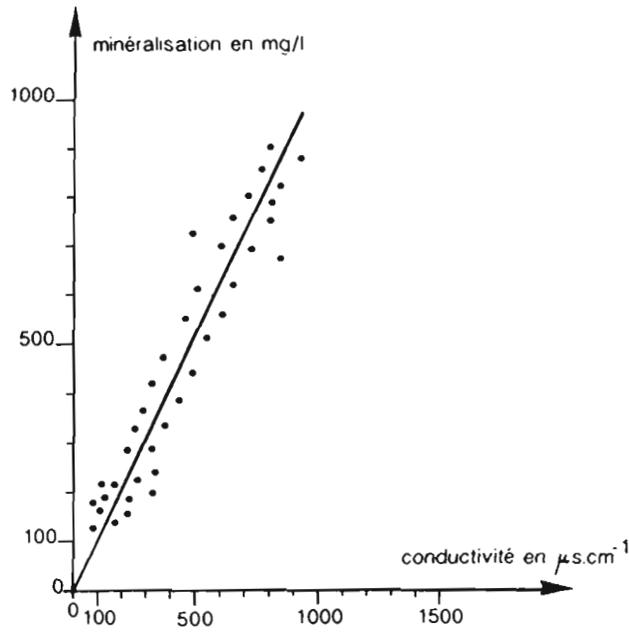


Fig-100 - RELATION: MINÉRALISATION - CONDUCTIVITÉ

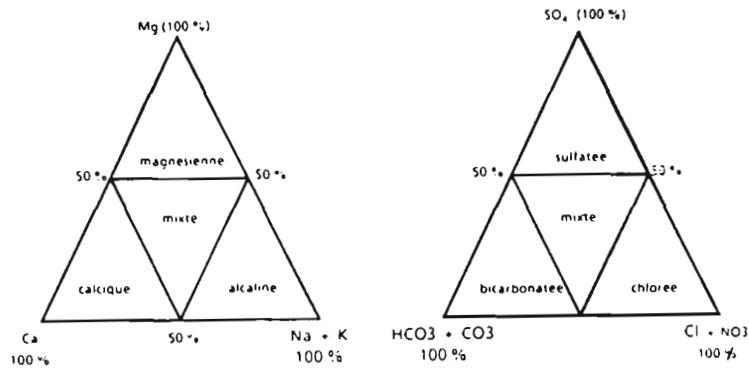


Fig-100 a - DIAGRAMME DE PIPER POUR ÉCHANTILLON D'EAU

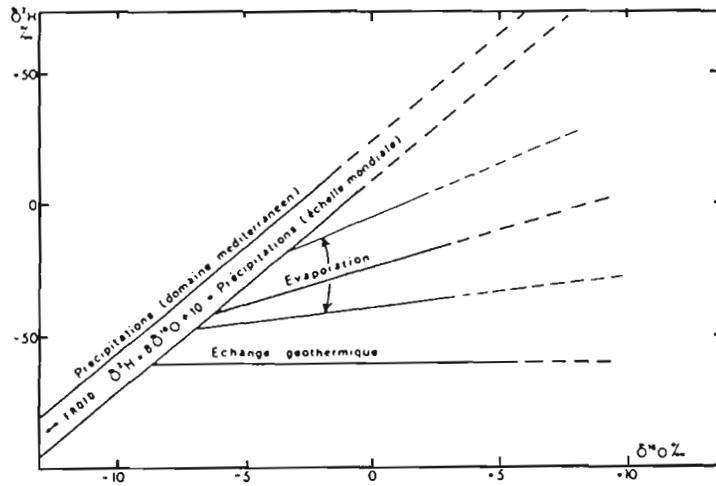


Fig-101 - RELATION OXYGENE 18 - DEUTERIUM DANS LES EAUX NATURELLES

(D'APRES J.C.FONTES.1976)

$$\delta A - \delta B = \alpha_{A/B} - 1 \quad (5)$$

Par commodité d'écriture, on définit le facteur d'enrichissement :

$$\epsilon_{A/B} = \alpha_{A/B} - 1 \quad (6)$$

ou en ‰

$$\epsilon_{A/B} = (\alpha_{A/B} - 1) \cdot 1000$$

Lorsque δB , ou $\epsilon_{A/B}$, est très petit devant 1 : $\epsilon_{A/B} \approx \delta A - \delta B$

l'équation (6) permet d'écrire : $\text{Ln}(\alpha_{A/B}) = \text{Ln}(\epsilon_{A/B} + 1)$

et quand ϵ est très petit devant 1 : $1000 \cdot \text{Ln}(\alpha_{A/B}) \approx \epsilon_{A/B} \text{ ‰}$

- Dans le cycle de l'eau, les deux phénomènes essentiels qui interviennent dans le fractionnement des isotopes sont : la condensation (changement de phase vapeur-liquide), c'est-à-dire les précipitations, et l'évaporation (changement de phase liquide-vapeur).

2.8.2.2. TECHNIQUES UTILISEES

2.8.2.2.1. MARQUAGE DES PRECIPITATIONS

Les teneurs isotopiques en ^{18}O ou ^2H , mesurées dans les précipitations, obéissent à des tendances fondamentales (origine des pluies, conditions locales, variations saisonnières et altitudinales liées aux variations de température) au sein desquelles une grande variabilité temporelle et régionale peut être observée. Il importe donc d'ajuster la représentativité de l'échantillon au phénomène étudié : pour analyser le ruissellement, les prélèvements seront faits à l'échelle de l'averse, alors que pour l'étude de l'alimentation d'un aquifère, un échantillon moyen hebdomadaire, voire mensuel, peut être suffisant.

Il a été démontré qu'à l'échelle mondiale, la majeure partie des précipitations présente une corrélation linéaire de pente 8 entre $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$, l'ordonnée à l'origine pouvant varier d'une région à l'autre (fig.101).

2.8.2.2.2. MARQUAGE DE L'EVAPORATION

L'évaporation, qui correspond logiquement à un enrichissement en isotopes lourds, conduit, comme les précipitations, à des corrélations linéaires entre les teneurs en ^2H et ^{18}O des fractions liquides restantes. Cependant, bien que pour ces deux isotopes, les fractionnements obéissent aux mêmes lois, leur importance relative est différente, et les droites d'ajustement obtenues ont des pentes variables qui sont liées aux paramètres climatiques locaux. La valeur de ces pentes diminue avec l'intensité du processus, mais reste toujours inférieure à la pente de la droite des précipitations. Une eau évaporée se repère donc aisément. L'intersection des droites d'évaporation avec celles des eaux météoriques locales permet de déterminer la composition originelle de l'eau d'alimentation du système (fig. 101).

2.8.2.2.3. CONDITIONS D'APPLICATION

Les teneurs en ^{18}O et ^2H peuvent être déterminées à partir d'un échantillon de 20 ml seulement. Toutefois, pour obtenir un traçage satisfaisant, une différence significative de signal (teneur en isotopes exprimée en ‰) est nécessaire entre les échantillons représentatifs des différents domaines susceptibles de contribuer à l'alimentation du milieu étudié. Par exemple, l'étude des crues, qui porte sur des temps relativement courts, impose la connaissance des ‰ d'un ou plusieurs isotopes mesurés : dans les précipitations (pour caractériser les eaux ruisselantes), le cours d'eau avant la crue (débit de base alimenté par les eaux souterraines), les horizons supérieurs du sol (avant et pendant la crue) et enfin le cours d'eau durant la crue. De la même manière, l'étude de l'alimentation des nappes souterraines demande de disposer d'échantillons prélevés : dans les pluviomètres, dans les différents puits à diverses profondeurs, dans les sources et dans les cours d'eau, à l'intérieur et à proximité du

bassin pour éventuellement localiser des alimentations extérieures. L'interprétation des résultats, tout en restant souvent qualitative, peut révéler des mécanismes insoupçonnés qui pourront faire l'objet d'études complémentaires.

Dans certains cas, une approche quantitative est possible. Si, par exemple, un système R est alimenté par deux systèmes R_1 et R_2 , entre deux instants t_1 et t_2 , en appelant $A\delta$ la teneur en isotope A, l'équation de mélange s'écrit :

$$VI \cdot A\delta_I + \int_{t_1}^{t_2} q_1 \cdot dt \cdot A\delta_1 + \int_{t_1}^{t_2} q_2 \cdot dt \cdot A\delta_2 = VF \cdot A\delta_F \quad (1)$$

avec,

- VI volume d'eau initial dans R
- $A\delta_I$ teneur isotopique initiale dans R
- q_1 débit sortant de R_1 vers R, entre les instants t_1 et t_2
- $A\delta_1$ teneur isotopique mesurée dans R_1 , entre t_1 et t_2
- q_2 débit sortant de R_2 vers R, entre t_1 et t_2
- $A\delta_2$ teneur isotopique mesurée dans R_2 , entre t_1 et t_2
- VF volume d'eau final mesuré dans R
- $A\delta_F$ teneur isotopique finale dans R.

Si on utilise deux isotopes, la relation (1) permet de déterminer q_1 et q_2 connaissant les teneurs δ_I , δ_F , δ_1 et δ_2 de chacun d'entre eux, ainsi que les volumes VI et VF. On dispose en effet de deux équations à deux inconnues.

2.8.2.2.4. AUTRES METHODES

L'utilisation d'isotopes radioactifs, tels que le tritium et le carbone 14 qui prennent naissance dans la haute atmosphère par action des rayons cosmiques sur l'azote, est mal adaptée aux études sur BVRE qui concernent des phénomènes de durées relativement courtes. Les temps de transit ou de renouvellement, y compris dans les retenues ou les nappes souterraines, sont généralement inférieurs à l'année et sortent du domaine des techniques de datation absolue ou relative, très utiles dans l'étude des grandes retenues ou des nappes profondes.

2.9 RELEVES COMPLEMENTAIRES

Une part des études sur BVRE consiste à rechercher les relations pouvant exister entre les caractéristiques physiques et hydrologiques des bassins, l'objectif étant alors de transposer les résultats à d'autres bassins non ou peu instrumentés, ou d'évaluer l'impact, à plus ou moins long terme, des modifications naturelles ou artificielles du milieu étudié. L'emploi de méthodes statistiques ou mathématiques impose de définir le contexte physique, que représente un bassin, par une série de paramètres, de préférence quantitatifs, dont la détermination ne peut se faire qu'à partir de documents cartographiques suffisamment précis.

2.9.1. DOCUMENTS TOPOGRAPHIQUES

Le document de base, nécessaire à la détermination des caractéristiques physiographiques, est la carte topographique.

Les limites d'emploi des documents cartographiques d'échelle déterminée ont été données au paragraphe 1.2.2.2.1., en fonction de la surface des bassins versants étudiés. Ce classement est basé sur la détermination de paramètres physiques très généraux tels que la surface ou le périmètre des bassins, les altitudes caractéristiques (maximale, minimale ou médiane) ou un indice de pente global relativement simple. Par contre, l'élaboration de documents thématiques demande généralement de disposer de cartes d'échelles supérieures. Ainsi, les relevés phytographiques, géologiques et hydrogéologiques, ou pédologiques devront être réalisés à une échelle qui, suivant la surface du bassin, ne devrait pas être inférieure à celle donnée dans le tableau ci-après :

Echelle	Surface de bassin	Equidistance des courbes de niveau (en m)
1/1 000	1 ha	0,5
1/5 000	25 ha	1
1/10 000	1 km ²	2
1/25 000	5 km ²	5
1/50 000	25 km ²	10 - 20
1/100 000	100 km ²	20
1/200 000	400 km ²	20 - 40

Dans les régions à fortes déclivités, des équidistances supérieures devront être utilisées, alors que dans les zones planes, elles pourront être inférieures aux valeurs données.

Les pays d'Afrique francophones disposent d'une couverture complète de cartes topographiques au 1/200 000^{ème}, les cartes au 1/50 000^{ème} étant beaucoup plus rares et localisées à certaines régions. Le recours aux photographies aériennes d'axe vertical est donc souvent indispensable. Elles sont généralement disponibles à l'échelle du 1/50 000^{ème}, plus rarement au 1/20 000^{ème}. Des agrandissements aux 1/25 000^{ème} ou 1/10 000^{ème} peuvent facilement être réalisés. La restitution cartographique au moyen de procédés photogrammétriques demande un équipement spécialisé que possèdent les instituts géographiques nationaux, certains services publics, ou certaines sociétés de services. Pour que le document élaboré ait une précision suffisante, pour une exploitabilité altimétrique et planimétrique correcte, la connaissance de l'altitude d'un certain nombre de points de référence est nécessaire. Il est possible, pour cela, d'utiliser une base arbitraire qui pourra ultérieurement être rattachée au système général de nivellement.

Pour des surfaces de quelques km² à quelques hectares pour lesquelles l'altimétrie doit être appréciée avec une bonne précision (étude de nappes souterraines ou du stockage de l'eau dans des zones d'expansion, par exemple), un relevé topographique précis est indispensable. Des appareils très perfectionnés, utilisant un système laser et faisant appel à l'électronique, sont actuellement disponibles (géodimètres - photo 55). Seul leur coût peut être un obstacle à leur utilisation.

Quelle que soit l'échelle adoptée, le document de base devra comprendre : les repères de nivellement, les courbes de niveau, les limites de partage des eaux ainsi que le réseau hydrographique (thalwegs, zones déprimées, zones humides, bas fonds, retenues artificielles ou naturelles). Seront portés les routes et chemins, les villages, ou tous autres points ou sites caractéristiques (ouvrages hydrauliques, par exemple). Ce document servira, en premier lieu, au repérage des emplacements de toutes les installations hydroclimatiques (fig. 102). Il doit permettre également le calcul des paramètres morphométriques des bassins, même si souvent un retour aux photographies aériennes, ou parfois aux images satellitaires, est nécessaire.

Les photographies aériennes seront utilisées pour préciser la ligne de partage des eaux des bassins : lors de l'observation stéréoscopique de deux clichés, l'impression de relief est en effet accentuée du fait de l'augmentation artificielle de l'écartement des points de vue (les pentes peuvent être multipliées par un facteur variant entre 2 et 5). Pour d'autres applications, il pourra être indispensable de contrôler l'échelle de la prise de vue qui varie avec la position de l'avion. On utilise pour cela, soit le document de base restitué en choisissant des points caractéristiques facilement repérables (confluences de thalwegs, angles de routes, reliefs, etc.), soit une base au sol. Dans les régions à relief peu marqué, un contrôle par bande de clichés correspondant à une ligne de vol est suffisant ; en zone montagneuse il est nécessaire de procéder par tranches d'altitude.

2.9.2. CALCUL DES PARAMETRES MORPHOMETRIQUES

Pour des explications détaillées du calcul manuel des paramètres morphométriques des bassins, on consultera les travaux de P. Dubreuil (211, 212).

Si les techniques modernes actuellement disponibles (les systèmes d'information géographique, par exemple) peuvent faciliter le calcul de certains de ces paramètres, elles impliquent, malgré tout, que les documents cartographiques nécessaires aient été au préalable numérisés.

- *Superficie d'un bassin versant : A*

Après un tracé minutieux de la ligne de partage des eaux, la superficie du bassin est mesurée par planimétrie. Avec les appareils classiquement utilisés, la précision de la mesure peut atteindre 2 % si l'aire n'est pas inférieure à 5 cm². Dans tous les cas, la mesure doit être répétée plusieurs fois.

- *Périmètre : P*

La mesure du périmètre est effectuée à l'aide d'un curvimètre, sur un contour stylisé, en éliminant dentelures et festons qui n'ont aucune influence sur les temps d'écoulement et accroissent la valeur du résultat. Les difficultés de stylisation élève l'erreur de mesure à 5 %.

- *Indice de compacité de Gravelius*

L'indice de compacité ou de forme est établi en comparant le périmètre du bassin à celui d'un cercle qui aurait même superficie :

$$C = P / 2 \cdot (\pi \cdot A)^{1/2} \approx 0,28 \cdot P \cdot A^{-1/2}$$

Pour un bassin de forme circulaire, C est égal à l'unité et la valeur de l'indice croît à mesure qu'augmente la déformation.

- *Rectangle équivalent*

L'assimilation d'un bassin à un cercle étant peu réaliste, M. Roche a proposé de le comparer plutôt à un rectangle (1035). Ainsi, le rectangle équivalent au bassin a même superficie, même périmètre (donc même indice de compacité) et même hypsométrie que celui-ci. Bien que des exceptions puissent être observées (bassins en éventail très ouvert), les courbes de niveau deviennent des droites parallèles aux petits côtés du rectangle et l'exutoire un de ces côtés.

Si L est la longueur et l la largeur du rectangle :

$$L \cdot l = A \quad \text{et} \quad 2 \cdot (L + l) = P$$

($L = 1$ quand le bassin à la compacité d'un carré, c'est-à-dire quand $C = 1,12$).

$$L = A^{1/2} \cdot C / 1,12 \cdot [1 + (1 - (1,12 / C)^2)^{1/2}]$$

$$1 = A^{1/2} \cdot C / 1,12 \cdot [1 - (1 - (1,12 / C)^2)^{1/2}]$$

- Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique est obtenue en portant, dans un système d'axes rectangulaires, les altitudes en abscisses, et en ordonnées la superficie du bassin, ou la fraction en % de la surface totale, située au-dessus de chacune de ces altitudes (fig. 103).

Les superficies sont mesurées par planimétrage, et l'abscisse moyenne de la courbe donne l'altitude moyenne du bassin.

- Profil en long des thalwegs

Le profil en long d'un cours d'eau est déterminé en portant en abscisses, la distance à l'exutoire (obtenue par curvimétrage) et en ordonnées, l'altitude correspondante.

Les profils des principaux cours d'eau du bassin sont tracés sur le même graphique (fig. 104).

- Indice de pente de Roche

L'indice de pente proposé par M. Roche est une approche de la pente moyenne du bassin. Il est défini par la relation :

$$I_p = L^{-1/2} \cdot \sum_{i=1}^n (a_i \cdot d_i)^{1/2}$$

dans laquelle :

- L est la longueur du rectangle équivalent,
- a_i représente la fraction, en %, de la surface A comprise entre les courbes de niveau voisines c_i et c_{i-1} ,
- $d_i = c_i - c_{i-1}$ est la dénivelée entre ces deux mêmes courbes.

- Indice de pente global

L'indice de pente global est défini par la relation :

$$I_g = D / L$$

où, D est la dénivelée qui sépare les altitudes ayant 5 % et 95% de la superficie du bassin au-dessus d'elles :

$$D = H_5 - H_{95}$$

- Dénivelée spécifique

L'indice I_g , comme l'indice I_p , variant en fonction de la surface du bassin (il diminue quand l'aire augmente), il a été établi, à partir d'une division logarithmique de leurs valeurs correspondant à un bassin d'environ 25 km², une répartition arbitraire du relief en sept classes :

R_1 Relief très faible	$I_g < 2$ m/km	
R_2 Relief faible	$2 < I_g < 5$ m/km	$I_p < 0,07$
R_3 Relief assez faible	$5 < I_g < 10$ m/km	$0,07 < I_p < 0,10$

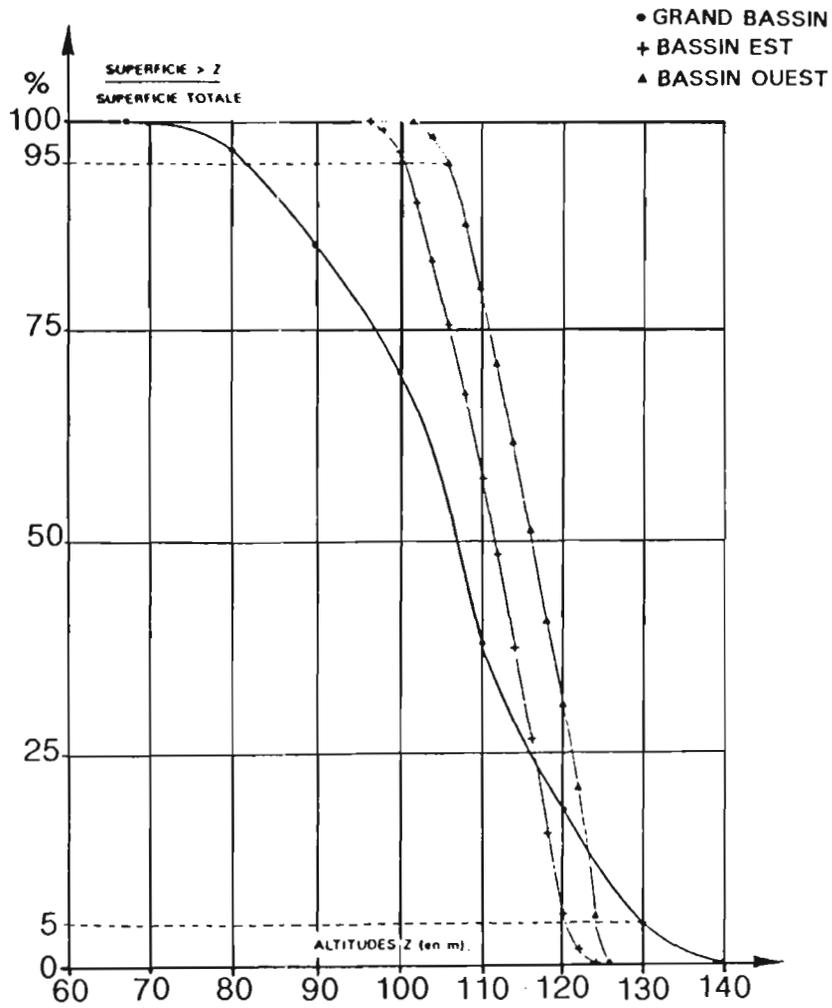


Fig-103 - BASSIN VERSANT DE SAKASSOU : COURBES HYSOMETRIQUES

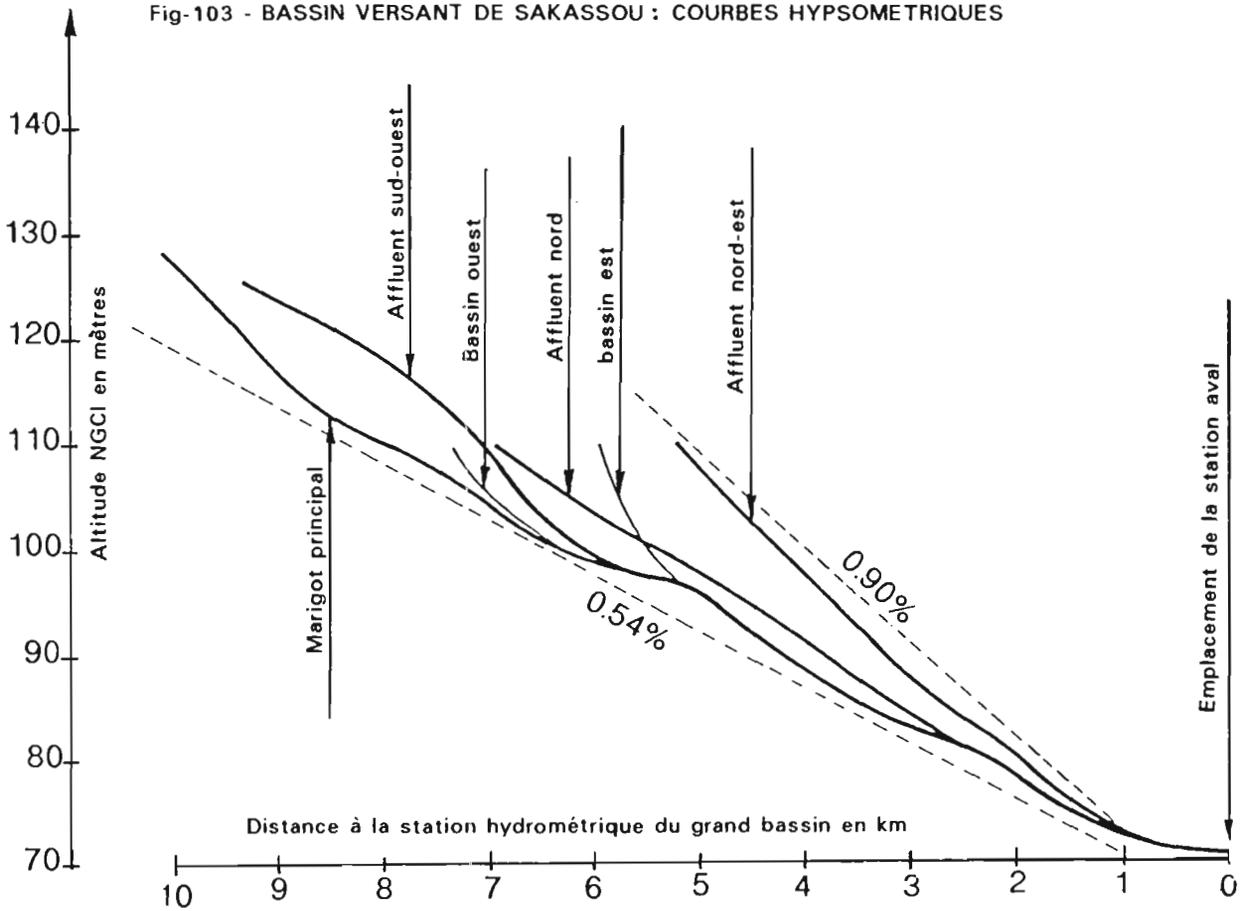


Fig-104 - BASSIN DE SAKASSOU : PROFILS EN LONG DES COURS D'EAU PRINCIPAUX

R ₄ Relief modéré	10 < I _g < 20 m/km	0,10 < I _p < 0,14
R ₅ Relief assez fort	20 < I _g < 50 m/km	0,14 < I _p < 0,23
R ₆ Relief fort	50 < I _g < 100 m/km	0,23 < I _p < 0,34
R ₇ Relief très fort	I _g > 100 m/km	I _p > 0,34

Pour les bassins compris entre 5 et 500 km², on se ramène au tableau précédent, à l'aide d'une table de conversion, en multipliant I_g ou I_p, par K ou K'.

A km ²	K (I _g)	K' (I _p)
5	0,5	0,66
10	0,66	0,80
25	1	1
50	1,33	1,20
100	2	1,40
250	2,85	1,80
500	4	2,20

Pour s'affranchir de l'effet de superficie, J. Guiscafré et P. Dubreuil proposent une classification basée sur le calcul de la dénivelée spécifique, définie par la relation : $D_s = I_g \cdot A^{1/2}$.

R ₁ Relief très faible	D _s < 10 m
R ₂ Relief faible	10 < D _s < 25 m
R ₃ Relief assez faible	25 < D _s < 50 m
R ₄ Relief modéré	50 < D _s < 100 m
R ₅ Relief assez fort	100 < D _s < 250 m
R ₆ Relief fort	250 < D _s < 500 m
R ₇ Relief très fort	D _s > 500 m

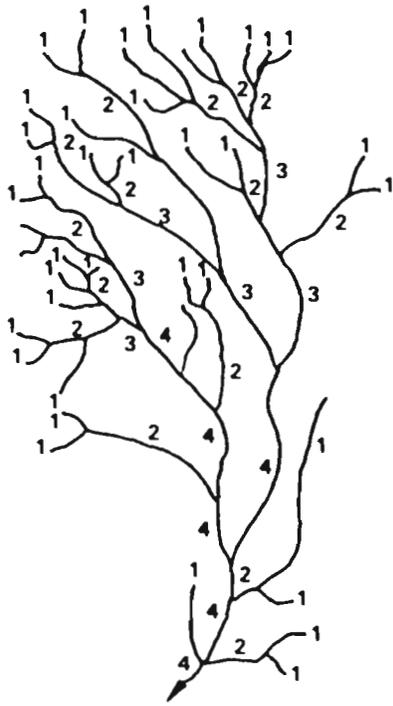
- *Pentes longitudinale et transversale*

Pour calculer la pente longitudinale d'un bassin, J. Rodier (1045) suggère de mesurer la longueur du cours d'eau principal de l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, et de calculer la dénivelée en éliminant les 20 % de chaque extrémité (amont et aval). La pente longitudinale est donc calculée sur 60 % du profil en long.

Pour la pente transversale, on procède de façon analogue en considérant des demi-profil en travers (ligne de plus grande pente des versants) partant du lit du cours d'eau principal (bord supérieur des berges) et rejoignant la limite du bassin versant, les 20 % amont et les 20 % aval étant ensuite éliminés. La valeur de la pente transversale est prise égale à la moyenne de quatre à six valeurs calculées sur des profils transversaux différents.

- *Paramètres morphométriques*

Les paramètres morphométriques ont pour but essentiel de quantifier les caractéristiques du drainage superficiel. Ce sont :



CLASSIFICATION DES THALWEGS SELON SCHUMM

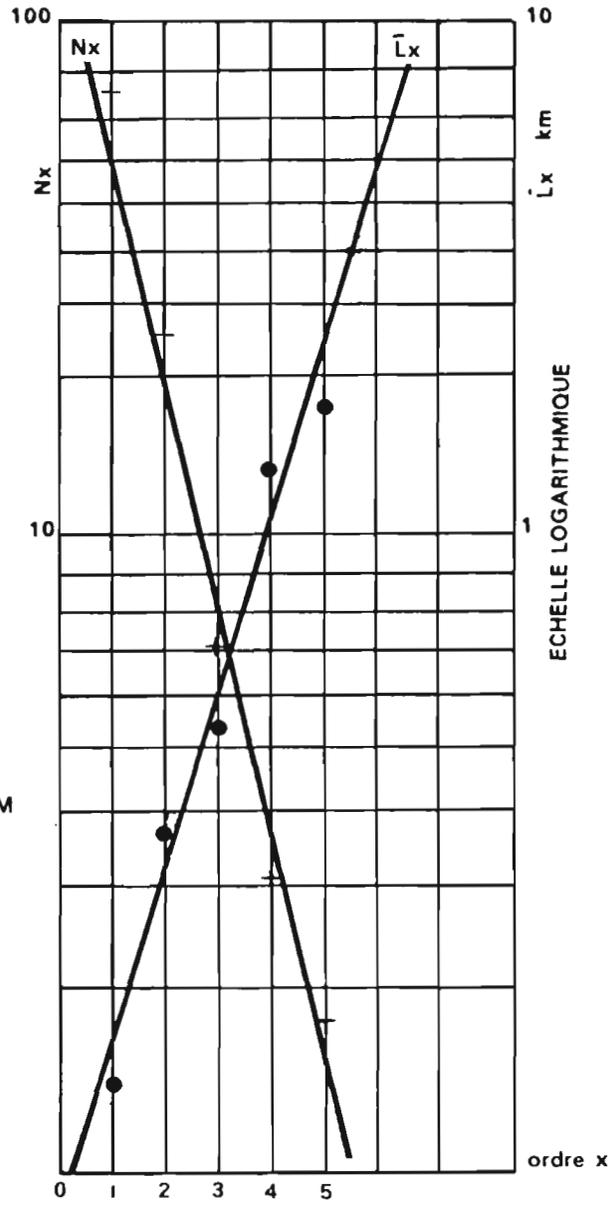


Fig-105 - CALCUL DES COEFFICIENTS DE CONFLUENCE (RC) ET DE LONGUEUR (RL)

- . la longueur du thalweg principal L_p , compté de l'exutoire à la source ;
- . la densité de drainage : D_d ;
- . le rapport de longueur : R_l ;
- . le rapport de confluence : R_c .

Pour ces trois derniers paramètres, P. Dubreuil a proposé des règles de calcul précises (211-212). Il recommande que la détermination de l'ordre des thalwegs soit faite à partir de la classification de Schumm, jugée plus simple que celle de Horton : est d'ordre $x + 1$, tout tronçon de thalweg formé par la réunion de deux thalwegs d'ordre x (fig. 105).

La classification de Schumm ne modifie en rien la densité de drainage, mais présente l'inconvénient de modifier les lois de Horton sur les confluences et les longueurs.

La détermination de ces paramètres doit être faite à partir de photographies aériennes dont la mise à l'échelle aura été effectuée comme expliqué au paragraphe 2.9.1.

Densité de drainage

La densité de drainage d'un bassin est le rapport de la longueur totale des thalwegs à sa surface :

$$D_d = \sum L_x / A, \quad (\text{en km}^{-1})$$

L_x étant la longueur des thalwegs d'ordre x .

Rapport de confluence

Le rapport de confluence d'un bassin est le quotient du nombre de cours d'eau d'ordre x par le nombre de cours d'eau d'ordre $x + 1$:

$$R_c = N_x / N_{x+1}$$

Le calcul du nombre de cours d'eau d'un certain ordre se fait par simple décompte. Dans un bassin, les nombres de thalwegs d'ordres successifs croissants forment une série géométrique inverse.

La valeur moyenne de R_c est estimée à partir de son logarithme qui est la pente de la droite, ajustée à l'ensemble des points N_x, x portés sur un graphique semi-logarithmique (fig. 105).

Rapport de longueur

Le rapport de longueur d'un bassin est le quotient de la longueur moyenne des thalwegs d'ordre $x + 1$ par celle des thalwegs d'ordre x :

$$R_l = \bar{l}_{x+1} / \bar{l}_x$$

Le calcul des longueurs se fait par curvimétrage.

Dans un bassin, les longueurs moyennes des thalwegs d'ordres successifs croissants forment une série géométrique directe. La valeur moyenne de R_l est, comme celle de R_c , estimée à partir de son logarithme, représenté par la pente de la droite, ajustée à l'ensemble des points \bar{l}_x, x portés sur papier semi-logarithmique (fig. 105).

2.9.3. DOCUMENTS PEDOLOGIQUES

La classification pédologique, fondée sur des critères morphogénétiques, s'avère, dans bien des cas, peu pertinente. L'hydrologue a besoin d'une représentation cartographique des sols basée sur l'hydrodynamique

superficielle. Partant de ce constat, et en utilisant les résultats acquis lors des nombreuses mesures d'infiltration sous pluies simulées, effectuées le long d'un transect climatique allant de la forêt tropicale humide jusqu'au Sud du Sahara, C. Valentin a proposé une hiérarchisation des facteurs intervenant sur les phénomènes hydrodynamiques de surface (725) :

- En zone de forêt tropicale, où la pluviométrie moyenne annuelle P_a est supérieure à 1600 mm, l'influence des propriétés hydrodynamiques internes des sols est prépondérante.
- En zone de savane humide, où $800 \text{ mm} < P_a < 1600 \text{ mm}$, interviennent, comme dans la zone précédente, les organisations pédologiques internes, mais aussi les états de surface sujets à des variations saisonnières importantes.
- En zone de savane sèche, avec $400 \text{ mm} < P_a < 800 \text{ mm}$, seuls les états de surface, caractérisés essentiellement par le pourcentage de couverture végétale, l'activité mésofaunique et les réorganisations de surface, sont déterminants.
- En zone sahélienne, où $200 \text{ mm} < P_a < 400 \text{ mm}$, avec un couvert végétal peu dense, les organisations pédologiques superficielles jouent un rôle prépondérant.
- En zone subdésertique, avec $P_a < 200 \text{ mm}$, où le couvert graminéen est limité dans le temps comme dans l'espace, interviennent exclusivement les réorganisations superficielles des sols.

Sans que la délimitation des différentes catégories de sols soit écartée, les documents pédologiques pourront revêtir un caractère différent suivant la zone climatique concernée : organisation interne de la couverture pédologique et/ou états de surface. Les méthodes cartographiques restent dans tous les cas, dans leurs grands principes, assez semblables : soit une approche systématique basée sur un maillage rigide, soit une approche par échantillonnage, plus souple, requérant toutefois une certaine technicité.

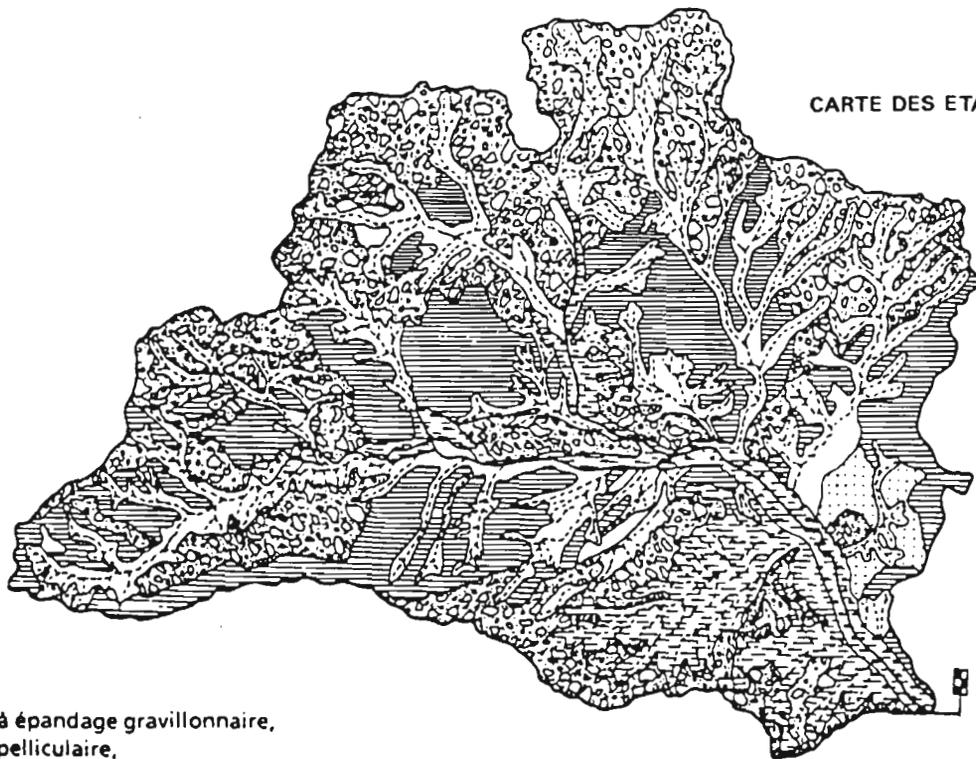
Il faut tenir compte également du fait que les états de surface obéissent à une dynamique évolutive qui peut être naturelle et marquée par des variations saisonnières ou une évolution à plus long terme en relation avec l'irrégularité pluviométrique ; ou au contraire artificielle, sous la pression de l'occupation des sols par l'homme (pratiques culturales, déboisement) ou par les animaux (pâturages).

L'utilisation de photographies aériennes est indispensable dès que le bassin atteint une certaine surface, elle est recommandée dans tous les cas (fig. 106).

2.9.4. DOCUMENTS PHYTOGRAPHIQUES

La cartographie des états de surface intègre les caractéristiques du couvert végétal qui peut être caractérisé par :

- *Les différentes strates :*
 - . strate arborée, où les troncs sont distincts et de grande taille (plus de 5 à 8 mètres de haut) ;
 - . strate arbustive, avec des troncs inférieurs à 5-8 mètres de hauteur ;
 - . strate herbacée ou culturale, où les plantes ne présentent pas de structure ligneuse pérenne ;
 - . tapis végétal, composé d'herbes ou de mousses.
- *Le recouvrement*, estimé visuellement, des différentes strates (pourcentage de surface occupée par leur projection verticale) et des résidus secs ;
- *Le type de formation végétale*, défini à partir de la combinaison des strates et de leur densité.



- (1) surface à épandage gravillonnaire,
- (2) surface pelliculaire,
- (3) surface à taches nues pelliculaires à microbuttes,
- (4) surface verticale à voile sableux,
- (5) surface hydromorphe de terrasse alluviale,
- (6) surface hydromorphe de bas-fond.

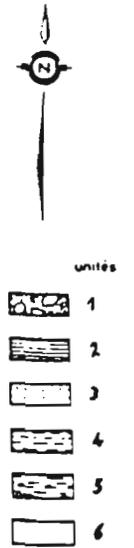
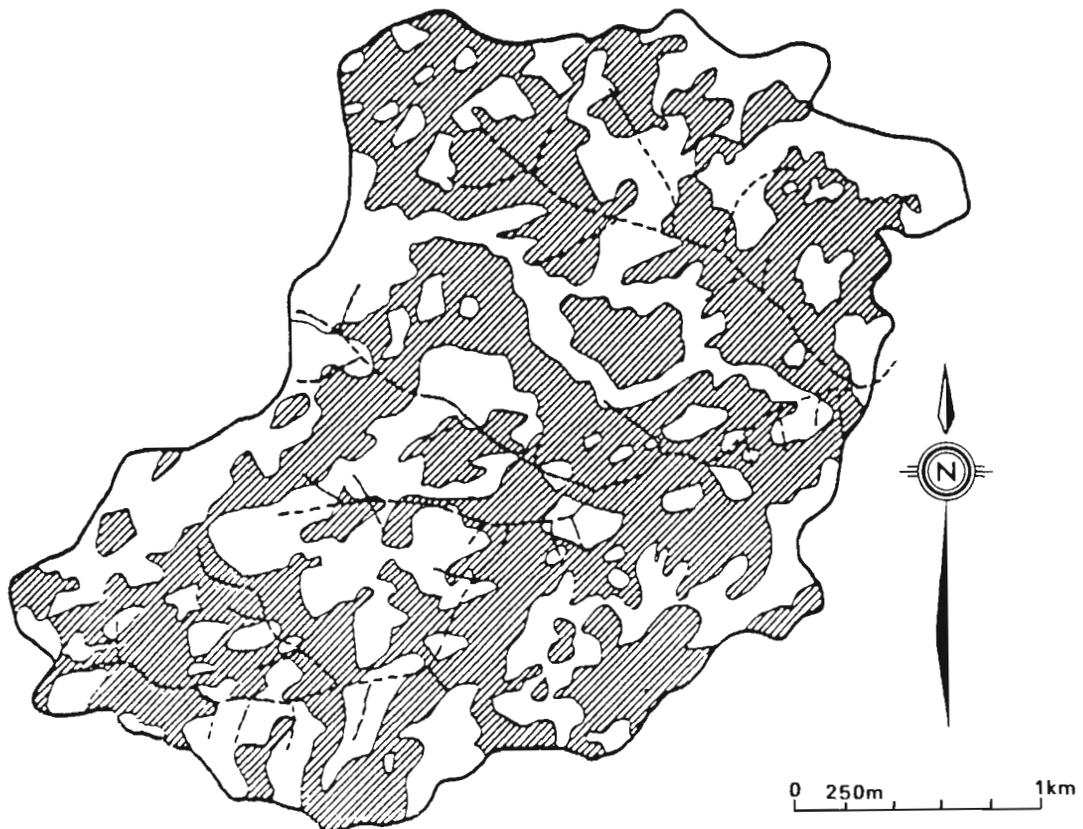


Fig- 106 - BASSIN VERSANT DE KAZANGA (D'APRES VALENTIN)



- SURFACES NUES OU CULTIVEES
- SURFACES EN JACHERE OU EN VEGETATION NATURELLE

Fig-107 - BASSIN VERSANT DE BINNDE - OCCUPATION DES SOLS

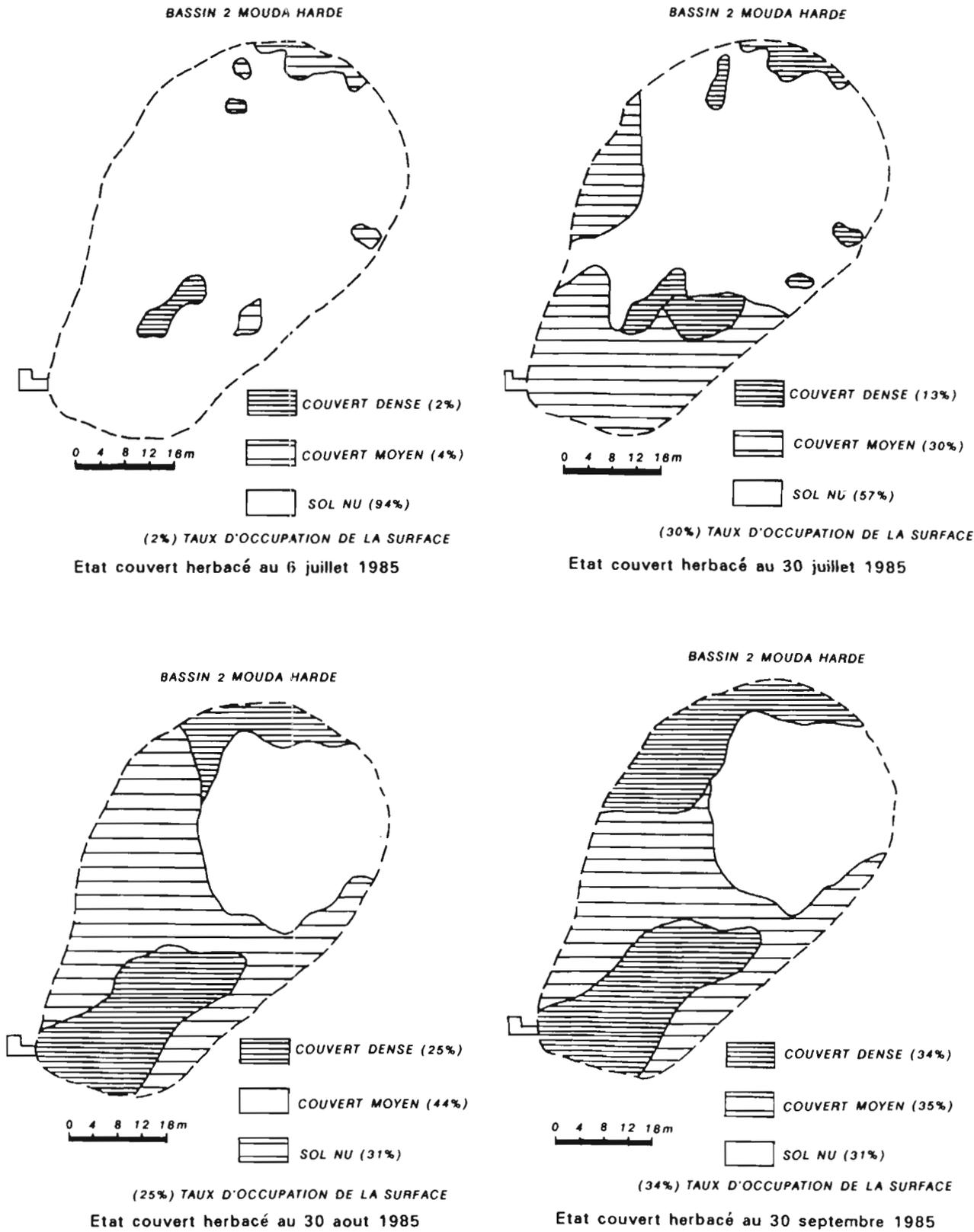


Fig-108 - EVOLUTION DU COUVERT VEGETAL AU COURS DU TEMPS
BASSIN DE MOUDA (D'APRES B.THEBE)

Quelle que soit la zone climatique étudiée, une carte du couvert végétal, complétée dans les zones cultivées d'informations sur l'utilisation des sols, est toujours indispensable (fig. 107). Si les cycles végétatifs l'imposent, des cartes saisonnières peuvent être dressées (fig. 108) en s'appuyant, suivant la surface concernée, sur des images satellitaires, ou sur des photographies aériennes d'axe vertical ou oblique réalisées à partir d'avions légers. Il est également important de suivre l'évolution à plus long terme de l'occupation des sols (fig.109). Un suivi sur parcelle de la biomasse peut enfin compléter ces études en utilisant une méthode destructrice (coupe de la végétation), ou à l'aide d'un système à aiguilles mobiles qui permet de mesurer la hauteur des végétaux.

Il ne faut pas non plus négliger l'influence des feux de brousse, encore fréquents aujourd'hui dans de nombreuses régions.

2.9.5. CARTES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

L'importance que peut revêtir parfois l'étude des eaux souterraines, dans la compréhension des divers processus hydrologiques, a déjà été soulignée (chapitre : 2.7.). Afin de prévoir les actions complémentaires à entreprendre : forages, prospections géophysiques, localisation des sources et des puits, etc., un inventaire préalable de toutes les informations hydrogéologiques disponibles devra être établi (paragraphe 2.7.3.).

Cela signifie nullement que le contexte géologique puisse être totalement négligé dans les bassins dépourvus de nappes souterraines. Les facteurs géologiques qui exercent une influence sur l'écoulement des eaux de surface sont de deux natures différentes : les facteurs lithologiques et les facteurs structuraux. Les premiers comprennent : la nature, la texture et la succession stratigraphique des différents types de roches. Les seconds peuvent être définis par les directions des axes tectoniques (failles, plissements et même diaclases) ou des différentes couches lithologiques.

Toutes ces informations pourront être portées sur différents documents cartographiques (carte structurale, carte d'isopaches, carte géophysique, carte des faciès, etc.), mais une carte synthétique devra être dressée (fig. 110).

2.9.6. TECHNIQUES NOUVELLES

L'apparition de puissants moyens de calcul et de traitement de l'information, y compris en micro-informatique, alliée au grand développement de l'imagerie satellitaire, tend à transformer sensiblement les outils et les méthodes d'analyse employés par l'hydrologue dans la recherche des facteurs explicatifs des mécanismes de l'écoulement et, plus particulièrement, dans l'étude du rôle du milieu physique. L'intérêt de tels moyens pour la réalisation de différentes cartes thématiques (pédologiques, géologiques, phytologiques ou des états de surface) n'est plus à démontrer. Toutefois, l'image satellite qui est fournie sous forme de bande magnétique CCT (Computer Compatible Tape), ou simplement sous la forme d'un tirage sur papier, est coûteuse et ne permet pas, même si elle provient d'un satellite à haute résolution (tel Spot), une vision très fine des détails. Cet inconvénient est tout de même compensé par de nombreux avantages : aspect multi-spectral, possibilités offertes par les techniques de traitement automatique (localisation précise, cartographie, statistiques...), possibilité de prendre en compte le facteur temps en recevant des clichés correspondant à des situations instantanées obtenues séquentiellement. De tels outils sont parfaitement adaptés à une extrapolation au niveau régional des résultats d'observations de terrain, en nombre nécessairement limité. Pour cela, les points de référence, qui assurent la vérité terrain, doivent être choisis avec beaucoup de soin afin que l'étalonnage des images soit satisfaisant. Pour être exploitable efficacement, l'image satellitaire demande donc un matériel spécifique (écran graphique perfectionné, mini-ordinateur, ou micro-ordinateur compatible PC) et un logiciel de traitement approprié.

Les techniques de télédétection ne se limitent pas à l'utilisation d'images satellitaires. Les photographies aériennes, pour leur part, permettent une approche peu onéreuse, avec une précision suffisante pour discerner sans ambiguïté : ravines, implantations humaines, chemins, etc. Le relief peut aussi être abordé par la stéréoscopie. Néanmoins, l'aspect fastidieux des opérations d'exploitation de ces documents ne peut être évité.

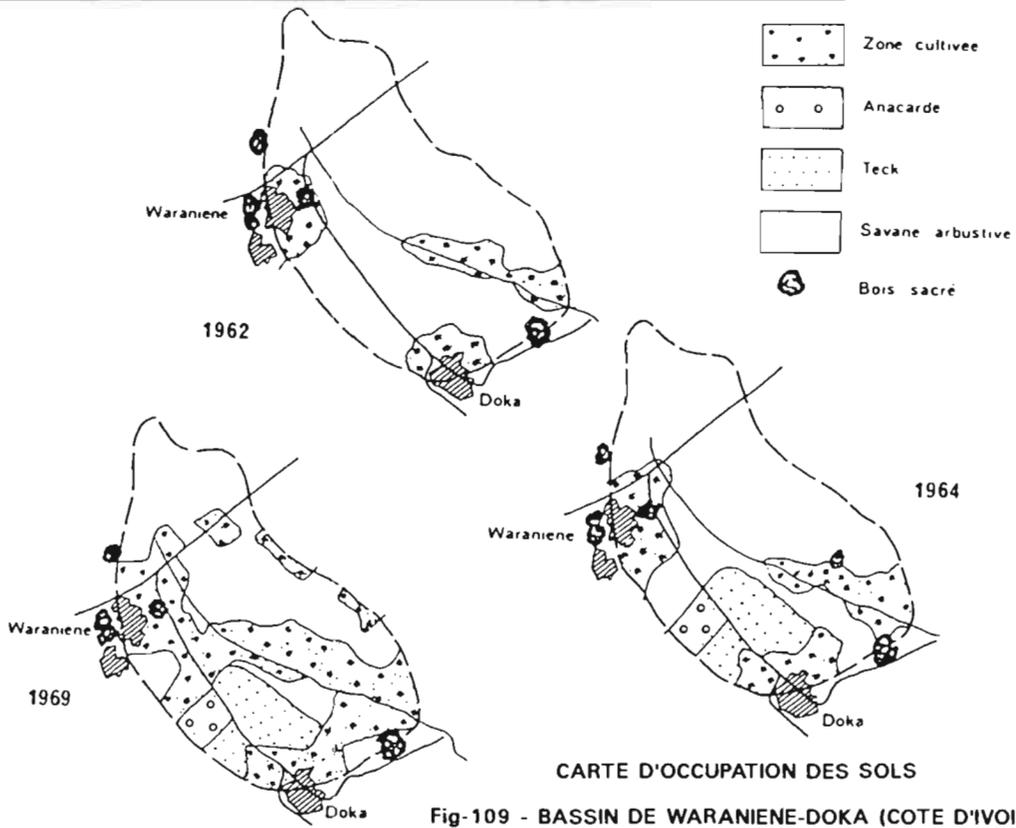


Fig-109 - BASSIN DE WARANIENE-DOKA (COTE D'IVOIRE)

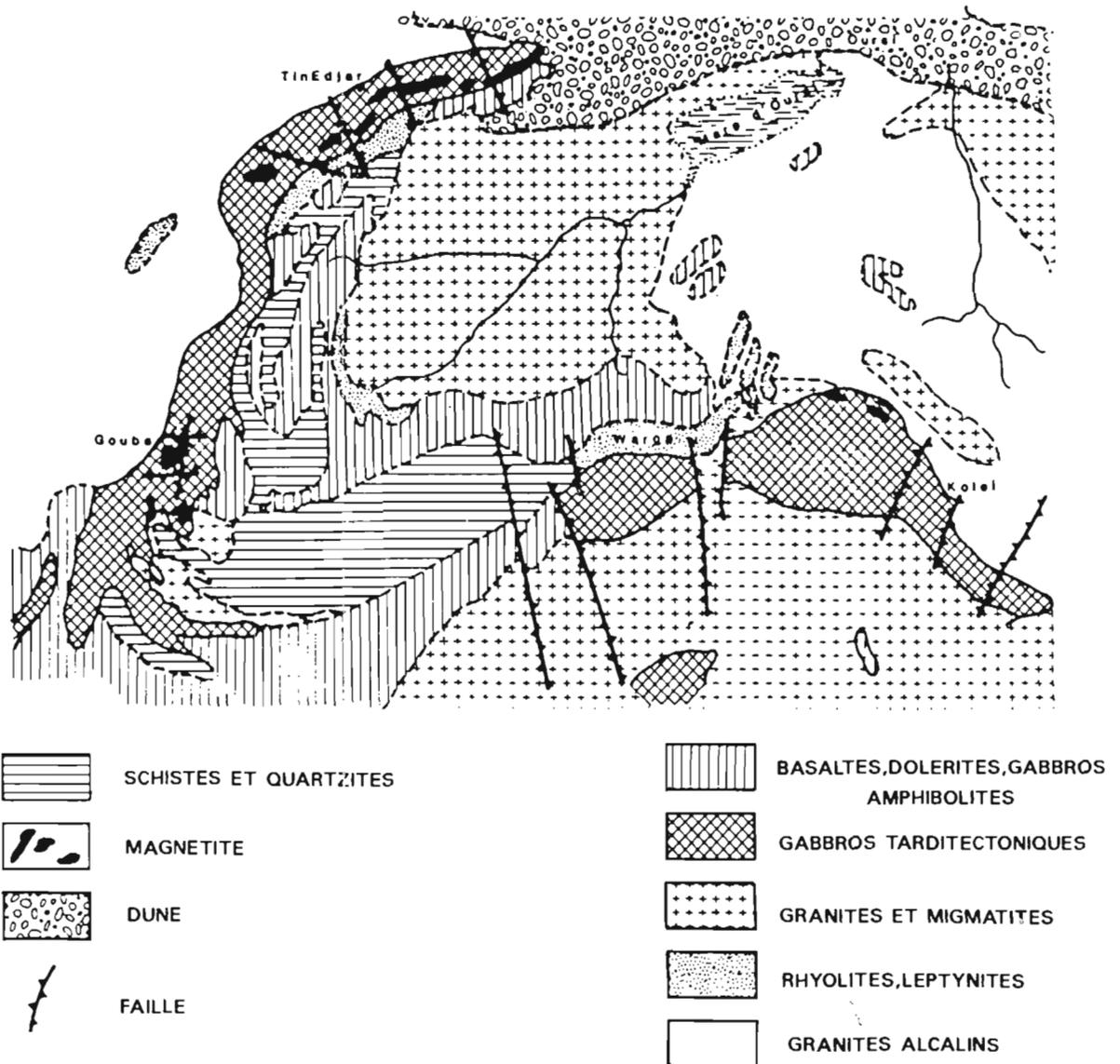


Fig-110 - ESQUISSE GEOLOGIQUE DES ALENTOURS DE LA MARE D'OURSIS (D'APRES NEYBERG-1970)

Les paramètres physiques et morphologiques des bassins versants peuvent, pour la plupart, faire l'objet de détermination assistée par ordinateur, à condition toutefois que l'information topographique nécessaire soit facilement accessible (paragraphe 2.9.21.). Cette information peut être archivée sous diverses formes : un semis de points, des courbes de niveau (représentation en mode "vecteur") ou des grilles (représentation en mode dit "raster"). L'usage tend à réserver le terme, modèle numérique de terrain (MNT), à ce dernier mode. L'Orstom, par exemple, dispose de logiciels qui permettent non seulement de transformer les différents modes d'archivage de l'information topographique en modèle numérique de terrain, mais également d'effectuer diverses représentations graphiques du milieu physique, ainsi que le calcul de nombreux paramètres morphométriques (logiciels Orolog, Lamont ou Démiurge - 208).

PARTIE 3

TRAITEMENT DES DONNEES ET PUBLICATION DES RESULTATS

3.1. ARCHIVAGE ET TRAITEMENT DES DONNEES

L'archivage et le traitement des données collectées sur de petits bassins se font à divers niveaux : sur le terrain, au bureau et éventuellement au laboratoire. Cependant, ils peuvent revêtir des caractères sensiblement différents suivant les moyens humains et techniques disponibles. Il est certain que l'emploi de moyens entièrement manuels impose, dès la collecte des données, une approche sensiblement différente de celle imposée par des méthodes faisant une large place à l'informatique. On peut penser, malgré tout, que la vulgarisation rapide et les coûts très abordables des matériels informatiques et des logiciels rendront leur utilisation quasi générale en hydrologie.

En annexe 3, figurent un certain nombre de fiches-types utilisées pour l'archivage et le traitement des différentes données recueillies. Certaines d'entre elles ne devront être utilisées que dans le cas d'un traitement entièrement manuel.

3.1.1. ARCHIVAGE DES DONNEES SUR LE TERRAIN

L'exploitation d'un bassin représentatif produit régulièrement, ou par à-coups, des données qui proviennent, d'une part d'observations ou mesures de routine, d'autre part d'opérations épisodiques prioritaires. Pour éviter toute perte d'information, il est indispensable de procéder à un archivage méthodique et continu de ces données, dans un cadre dont la mesure peut être l'année calendaire, l'année hydrologique, ou même, pour certaines données, la saison des pluies (régions à saisons tranchées). Pour faciliter les contrôles, le classement et les traitements ultérieurs, il est recommandé de procéder par unité mensuelle.

Au fur et à mesure de l'arrivée des informations, et au plus tard à terme mensuel échu, les opérations de rassemblement consisteront en l'élaboration des documents suivants :

- Fiche récapitulative des observations climatologiques journalières (sauf si un traitement informatique complet est effectué à partir de bordereaux de saisie journaliers - voir paragraphe 3.1.3.).
- Fiche récapitulative des précipitations journalières, pour laquelle il est conseillé d'utiliser une colonne par précipitation et une ligne par appareil, le contrôle par colonne étant plus aisé que celui par ligne. On y fera figurer également les relevés des seaux ou des récipients de contrôle des pluviographes.
- Fiche récapitulative des lectures d'échelles implantées dans les cours d'eau, dans les retenues artificielles ou dans des dépressions naturelles (une fiche par station).
- Fiche récapitulative des relevés des niveaux piézométriques effectués dans les puits ou piézomètres avec, comme pour les pluviomètres, une ligne par ouvrage et une colonne par jour.
- Groupement chronologique par appareil :
 - . des pluviogrammes ;
 - . des limnigrammes ;
 - . des enregistrements de thermographes, hygrographes, héliographes, etc.

Si les enregistrements sont faits sur mémoires informatiques, les supports devront être archivés méthodiquement.

- Groupement chronologique par station de mesures :
 - . des fiches de jaugeages ;
 - . des fiches des mesures du transport solide en suspension et/ou de la qualité des eaux (date, heure, cote à l'échelle limnimétrique, position du point de prélèvement dans la section, état de l'écoulement : crue, décrue, étale).
- Groupement chronologique par périmètre, parcelle ou appareil :

- . des fiches des mesures de l'humidité du sol ;
- . des fiches des mesures des transports solides (charriage et suspension) ;
- . des fiches d'observations de la couverture végétale ou des pratiques culturales ;
- . des fiches de prélèvements d'eau effectués dans les pluviomètres, le sol, la nappe souterraine ou les eaux superficielles ;
- . des fiches des mesures physico-chimiques effectuées "in situ" : conductivité, ph, alcalinité.

3.1.2. CONTROLE ET TRAITEMENT DES DONNEES SUR LE TERRAIN

Lorsque les travaux d'élaboration des données sont réalisés manuellement, une grande partie d'entre eux s'effectue sur le terrain, en association aux travaux d'archivage. Les mauvaises observations ou les erreurs peuvent être ainsi rapidement décelées, et des mesures appropriées être prises.

Bien que les facilités offertes par l'informatique rendent inutiles et caduques la plupart de ces tâches, un minimum de traitements manuels simples devra tout de même être préservé, et effectué rapidement, pour éviter certains déboires lors des traitements automatiques, ou semi-automatiques, faits ultérieurement au bureau.

Une solution intéressante consiste en l'utilisation d'un micro-ordinateur portable qui permet de réaliser le contrôle, l'archivage et le traitement de certaines données, et surtout de vérifier, dans les meilleurs délais, les informations enregistrées sur mémoire informatique. Une source d'énergie est alors indispensable (groupe électrogène, panneaux solaires), et certaines précautions doivent être prises (transport, agressivité du milieu ambiant, etc.).

Les études sur bassins représentatifs ruraux ne nécessitant pas de traiter les données en temps réel, et la présence sur le terrain d'un minimum de techniciens étant toujours indispensable, la télétransmission reste une solution onéreuse d'intérêt limité. Elle ne pourrait se justifier, grâce à des économies d'échelle, que dans le cadre de la gestion d'un véritable réseau de bassins représentatifs ou expérimentaux parfaitement équipés (nombreux enregistreurs, stations hydrométriques aménagées, etc.). Excepté pour les bassins situés à proximité de la station de réception, elle ne peut, d'aucune manière, servir de système d'alerte pour une rationalisation des interventions. Elle constitue, par contre, un excellent moyen de surveillance des appareils et permet un traitement rapide des données recueillies.

- *Etalonnage des stations hydrométriques*

Le calcul des débits par la méthode correspondant au procédé de jaugeage employé peut être fait, en l'absence de moyens informatiques, à l'aide d'une calculatrice programmable ou éventuellement d'une calculatrice de poche et d'un planimètre. Il s'agit là, d'une tâche prioritaire.

Pour chaque station, sera établi un dossier d'étalonnage comprenant :

- . une fiche des jaugeages portant indication de la date, de la cote à l'échelle, du débit et des conditions de la mesure (moulinet, flotteur, crue, décrue, etc.).
- . un sous-dossier regroupant des éléments d'extrapolation de l'étalonnage, généralement nécessaires pour les très hautes eaux qui ne peuvent que rarement être jaugées. Ce sont, essentiellement, les résultats d'opérations topographiques : profils en travers du cours d'eau, jusqu'au-dessus du niveau des plus hautes eaux connues, au droit de la section de jaugeages et à quelques dizaines de mètres en amont et en aval, suivant la morphologie du cours d'eau ; profil en long du thalweg, sur quelques centaines de mètres, de part et d'autre de la section de jaugeage.

Le contrôle de la mobilité du lit exige que le profil au droit de la section soit levé en diverses périodes de l'année : avant la saison des pluies, après chaque forte crue, à la fin de la saison des pluies.

- . un sous-dossier contenant la courbe d'étalonnage, avec tous les calculs d'extrapolation, ainsi que le barème de traduction des hauteurs d'eau en débits. Ce dernier, comme la courbe d'étalonnage, est généralement provisoire et doit porter mention de sa période de validité.

Si la station est équipée d'un dispositif de détermination directe du débit, la formule de calcul ou/et sa représentation graphique seront également jointes à ce sous-dossier.

- ***Contrôle des pluies journalières***

Le contrôle visuel, effectué sur la fiche récapitulative mensuelle des pluies journalières (paragraphe 3.1.1.), sera complété en portant, sur le fond de carte du réseau pluviométrique, les principales averses, ainsi que le total mensuel, calculé dès les premiers jours du mois suivant les observations. Ces différentes cartes pourront être enrichies par le tracé des courbes isohyètes, même si une cartographie automatique ultérieure est envisagée. Ce procédé reste un très bon moyen de vérification de la qualité des observations, les défaillances, tant humaines que matérielles, pouvant ainsi être rapidement diagnostiquées et localisées.

Si les pluviographes sont pourvus de système d'enregistrement graphique, un contrôle visuel du fonctionnement sera effectué en même temps que la comparaison, au moins pour les principales averses, de la hauteur totale enregistrée avec celle mesurée dans le récipient collecteur.

- ***Contrôle de la limnimétrie***

Le contrôle des données de hauteurs d'eau porte essentiellement sur la qualité des enregistrements limnigraphiques en s'appuyant sur les relevés faits par l'observateur (hauteurs d'eau, dates de pose et de retrait).

- ***Contrôle des observations climatologiques***

Les observations climatologiques se prêtent parfaitement au traitement informatique (paragraphe 3.1.3.). Seul le dépouillement des bandes héliographiques reste une opération manuelle qui peut, comme certains contrôles sommaires (comparaison des températures sèches et humides, comparaison des enregistrements et des relevés faits par l'observateur à heures fixes), être effectuée sur le terrain.

- ***Contrôle des observations piézométriques***

Pour être contrôlés plus aisément, les niveaux piézométriques devront être ramenés à une même base de nivellement. Pour les mêmes raisons que celles évoquées pour les précipitations, le tracé de quelques cartes représentant les lignes équipotentielles est conseillé.

- ***Dépouillements des prélèvements de transports solides***

Les dépouillements des mesures des transports solides conduisent à l'établissement d'une fiche par station, portant indication : de la date, de la cote du plan d'eau, du débit solide (en suspension et en charriage, s'il y a lieu), du débit liquide et de la situation de l'écoulement.

Ceci suppose l'installation, sur le bassin, d'un laboratoire de terrain.

- ***Dépouillements des données relatives à l'humidité du sol***

Quelle que soit la méthode de mesures adoptée, il n'est pas conseillé d'effectuer les dépouillements des mesures de l'humidité du sol sur le terrain. Le traitement par ordinateur s'avère être la meilleure solution, compte tenu de la multiplicité des calculs à effectuer, ainsi que de la nécessité de disposer de représentations graphiques pour faciliter les opérations de contrôle. Si la méthode gravimétrique est utilisée, sans que soit installé un laboratoire de terrain, les boîtes ou sacs d'échantillons seront fermés hermétiquement pour être expédiés dans de bonnes conditions.

3.1.3. TRAITEMENTS DE BASE DES DONNEES AU BUREAU

A l'issue de chaque campagne de saison des pluies, toutes les données brutes ainsi que les données traitées sur le terrain seront transférées au siège de l'organisme chargé des études. Le traitement définitif ne devrait pas être retardé au-delà d'un an, à partir de l'obtention des données.

- *Pluviométrie et pluviographie*

Chaque poste pluviométrique ou pluviographique sera identifié par son numéro, son nom, ses coordonnées géographiques, son altitude, son type (pluviométrique, pluviographique, climatologique, évaporométrique, etc.).

Les données pluviométriques journalières déjà critiquées, ainsi que les relevés des totalisateurs, seront saisis puis archivés, avec un code permettant de préciser la qualité de la mesure.

Les enregistrements pluviographiques sont de deux sortes : graphiques ou numériques. Les premiers doivent être préparés minutieusement, avant d'être numérisés à l'aide, dans la plupart des cas, d'une table à digitaliser (fig. 111) – l'emploi d'un scanner pose des difficultés de traitement qui restent sans solution –. Les seconds sont simplement mis en forme et réorganisés (mise au format standard et élimination des points redondants), avant d'être archivés. Les hauteurs pluviométriques relevées dans les seaux ou récipients de contrôle devront être saisies, pour que d'éventuelles corrections puissent être effectuées.

La figure 111b résume les différents modes d'acquisition et de traitement de l'information pluviographique.

La figure 112 présente, à titre d'exemple, les différentes données, traitées par le logiciel de banque de données pluviométriques Pluviom, mis au point par l'Orstom.

- *Hydrométrie*

Pour chaque station hydrométrique, l'information de base se compose :

- . de son identification : numéro et nom de la station, nom du cours d'eau, coordonnées géographiques, altitude, superficie du bassin versant,
- . des enregistrements limnigraphiques,
- . des jaugeages.

Les enregistrements limnigraphiques feront, si possible, l'objet d'un traitement informatique, afin d'élaborer le fichier* des cotes instantanées, constitué de couples temps-hauteur d'eau :

- . Comme en pluviographie, les enregistrements graphiques doivent être numérisés après un important travail de préparation. Pour éviter une dégradation de l'information, tous les points marquant un changement de pente du limnigramme sont sélectionnés ; si une montée rectiligne de forte amplitude est observée, il est prudent de retenir plusieurs points intermédiaires, car, dans ce cas, on ne peut être assuré qu'un accroissement linéaire de la hauteur d'eau correspond à un accroissement linéaire du débit (fig. 111a).
- . Les enregistrements sur mémoire demandent beaucoup moins de préparation, mais doivent subir un certain nombre de contrôles, une mise en forme et une réorganisation, afin d'éliminer les mesures aberrantes, les données inutiles (en cas de batillage par exemple) ou les données redondantes.

La liste des jaugeages est également archivée dans un fichier, alors que la ou les courbes de tarage, accompagnées de leur date de validité, permettent l'élaboration du fichier des étalonnages.

Les deux fichiers de base, des cotes instantanées et des étalonnages, alimentent automatiquement le fichier des débits instantanés à partir duquel est constitué le fichier des débits moyens journaliers.

Les différents modes d'acquisition et de traitement de l'information limnigraphique sont schématisés figure 111c.

* Le mot fichier est pris dans un sens très général, sans qu'il soit fait référence à un mode d'archivage précis.

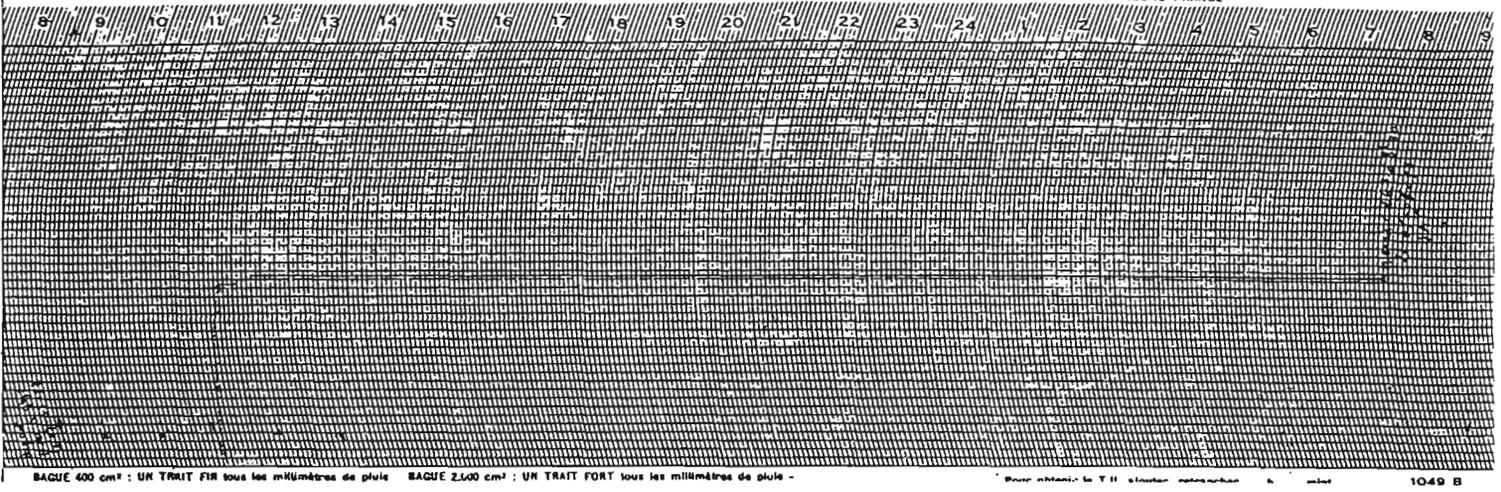


Fig- 111 - ENREGISTREMENT PLUVIOGRAPHIQUE

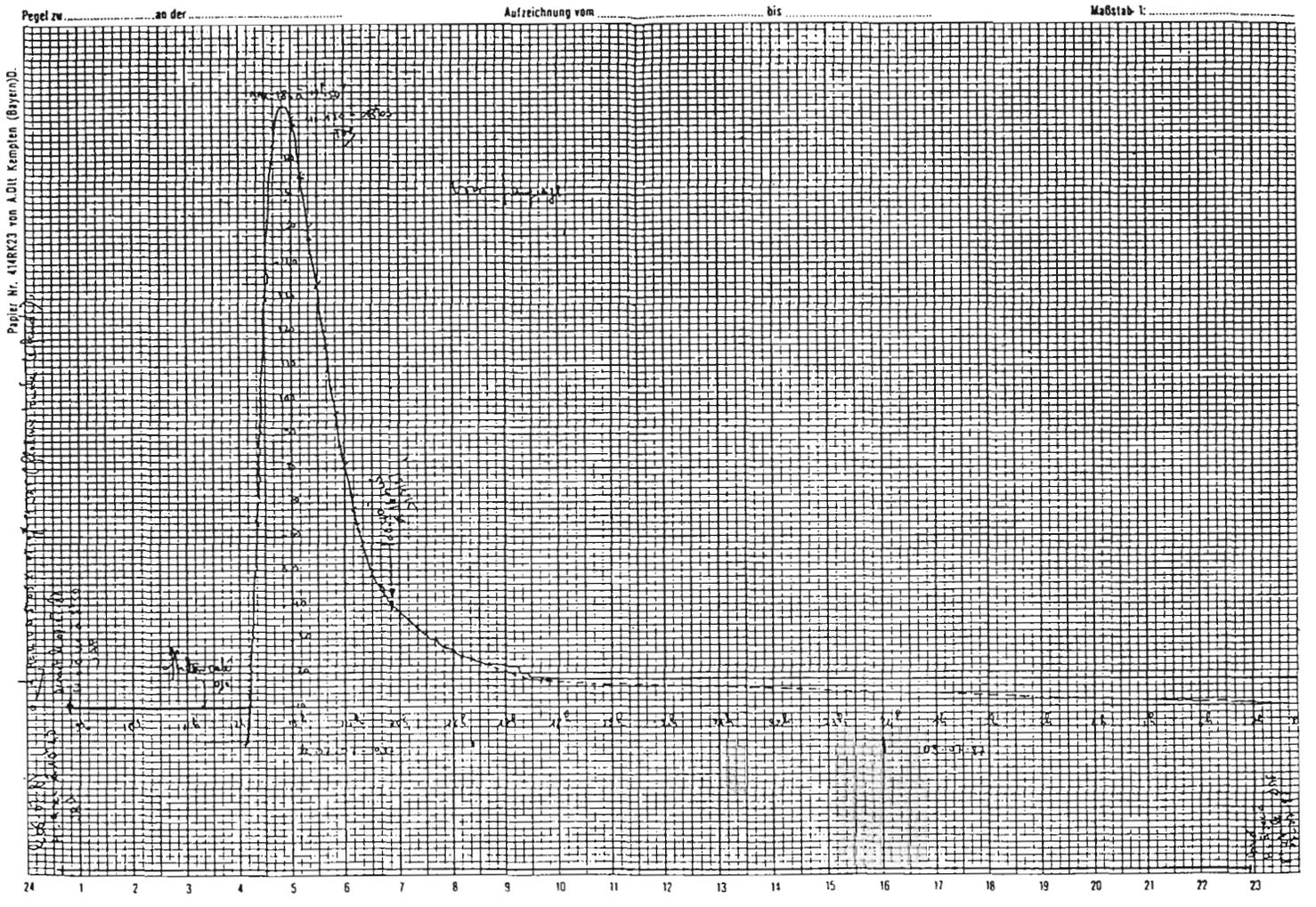


Fig- 111a - ENREGISTREMENT LIMNIGRAPHIQUE

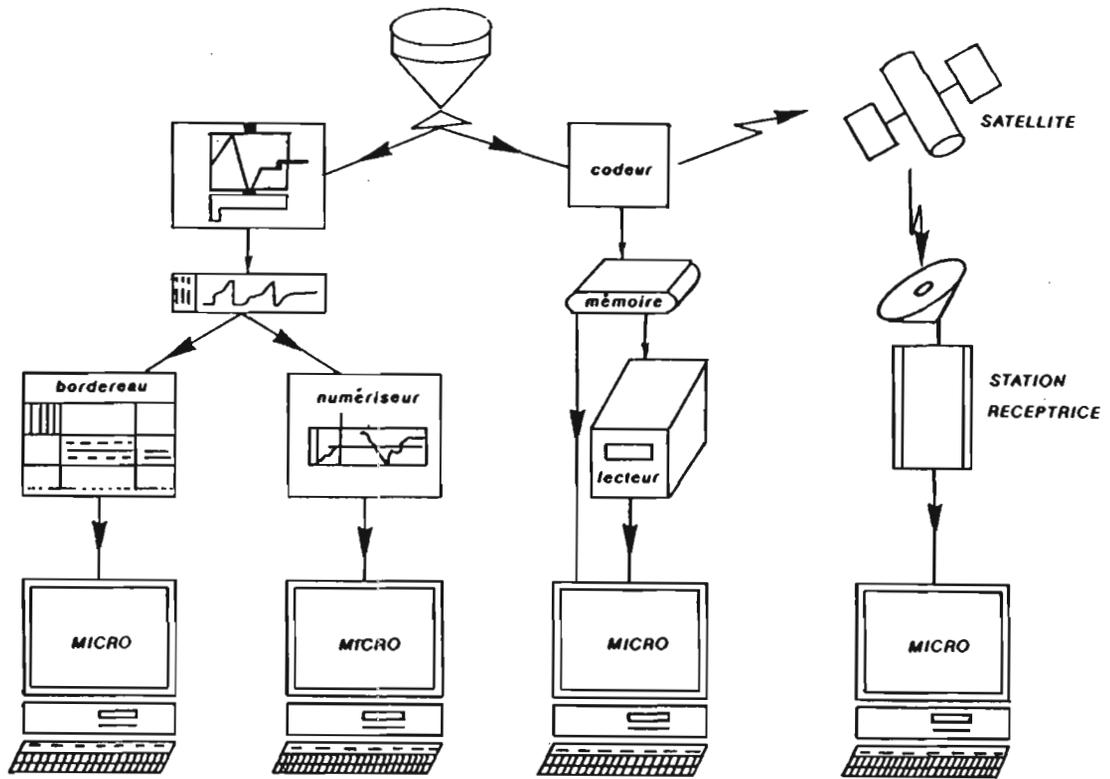


Fig- 111b - ACQUISITION ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION PLUVIOGRAPHIQUE

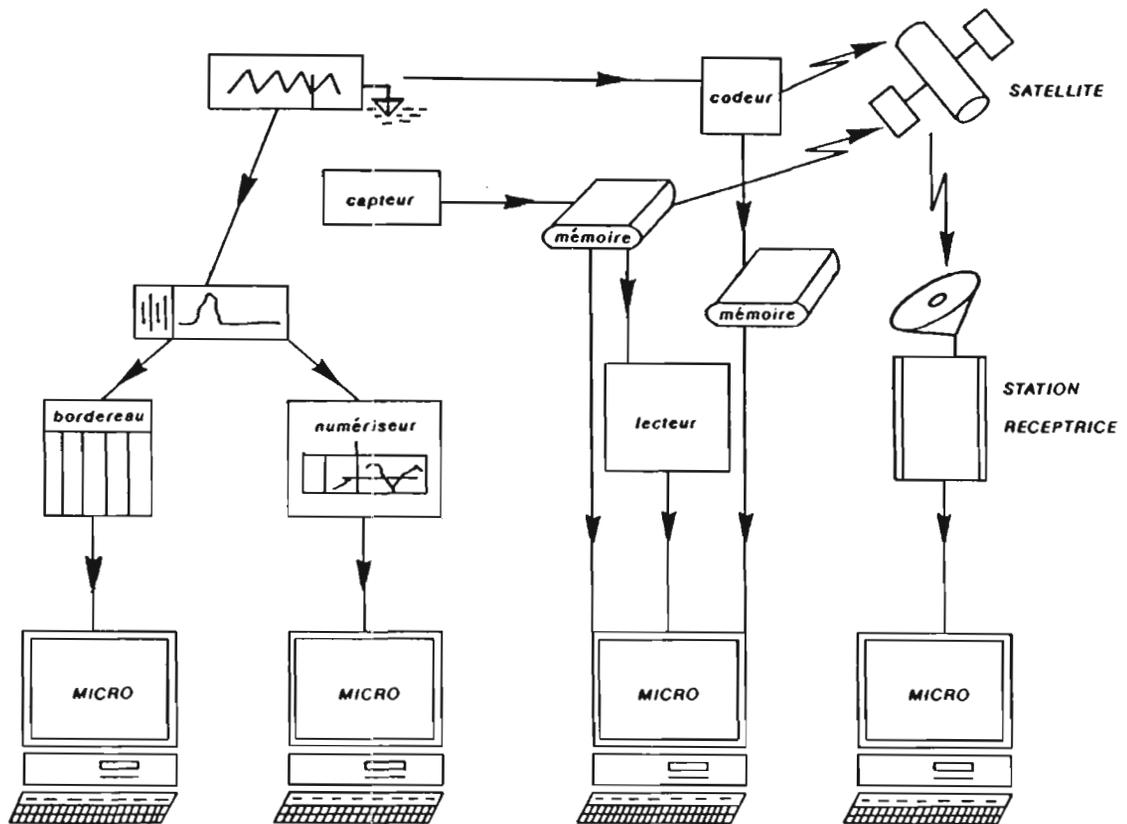


Fig-111c - ACQUISITION ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION LIMNIGRAPHIQUE

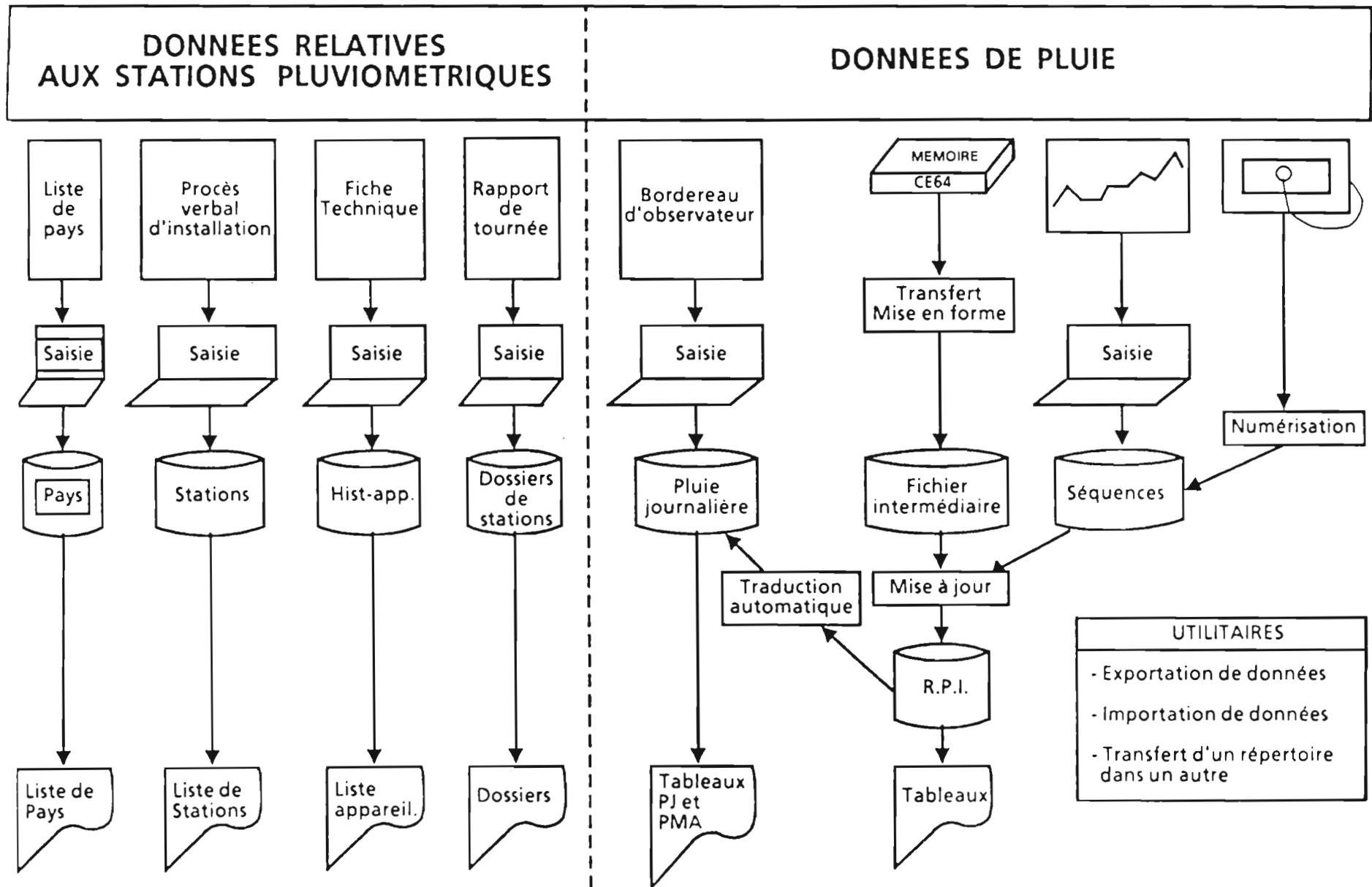


Fig-112 - LOGICIEL PLUVIOM

La figure 112a donne, à titre d'exemple, les différents fichiers gérés par le logiciel de banque de données hydrométriques Hydrom, élaboré par l'Orstom.

- *Observations climatologiques*

Pour faciliter leur traitement informatique, les observations climatologiques devront être portées sur un bordereau de saisie (graphique 113).

Les logiciels utilisés (progiciels ou programmes spécifiques) devront permettre, en plus de la saisie et de l'archivage des données, certains calculs statistiques (sommés, différences, moyennes et fréquences) ; l'extraction de valeurs extrêmes (minimales ou maximales) ; l'utilisation de formules (pour le calcul de l'humidité de l'air, de la tension de vapeur ou de l'évapotranspiration, par exemple) ; la comparaison de valeurs à des fins de contrôle ; le tracé de graphiques ; le dépouillement de diagrammes ; l'impression de tableaux (fig. 114).

- *Piézométrie*

Chaque puits ou piézomètre sera identifié par son numéro, ses coordonnées géographiques, l'altitude du sol et l'altitude du point de référence à partir duquel sont effectuées les observations piézométriques.

Les couples : temps-cote piézométrique relative constituent l'information de base qui sera saisie et archivée. Les piézogrammes seront numérisés, comme tout autre enregistrement. Un fichier opérationnel, où la cote piézométrique relative sera remplacée par la cote piézométrique absolue, devra être créé.

- *Humidité du sol*

Chaque point, ou pour le moins chaque périmètre de mesures (méthode gravimétrique), sera identifié par son numéro, ses coordonnées géographiques, son altitude, le type de sol ou d'état de surface.

L'information de base est constituée d'un triplet : temps-profondeur-valeur représentatif de l'humidité du sol. Cette dernière devra pouvoir être traduite indifféremment, suivant les applications, en taux d'humidité pondérale ou volumique (voir paragraphes 2.6.1. et 2.6.3.). Seule la méthode gravimétrique donne directement le taux d'humidité pondérale. Pour les autres méthodes, il sera nécessaire d'archiver la densité apparente sèche du sol, ainsi que la courbe d'étalonnage de l'appareil correspondant à chaque horizon pédologique.

- *Transports solides*

Les stations de mesure sont identifiées de la même manière que les stations hydrométriques. Le dépouillement des données peut être facilité par le développement de logiciels spécifiques. Les résultats seront archivés dans un fichier comprenant, pour chaque mesure relative à chaque station : la date, les heures de début et de fin, le débit liquide, le débit solide (en suspension et par charriage, ou les deux réunis), avec éventuellement la cote du plan d'eau et la situation de l'écoulement.

Pour les transports solides mesurés dans les fosses à sédiments, le mode d'archivage peut rester sensiblement le même, les débits liquide et solide étant remplacés par des volumes d'eau et des poids de sédiments. La date et les heures de début et de fin de la mesure présentent, dans ce cas, un caractère impératif.

- *Hydrochimie*

La diversité des mesures et des analyses hydrochimiques rend nécessaire le développement de logiciels pour le dépouillement et l'archivage des données.

L'identification sera fonction du site de prélèvement : pluviomètre, station hydrométrique, piézomètre, etc..

Le fichier des résultats des analyses contiendra impérativement, la date et l'heure de prise de l'échantillon ou de la mesure, ainsi que le débit pour les stations hydrométriques, la hauteur de pluies pour les pluviomètres, la cote piézométrique pour les piézomètres.

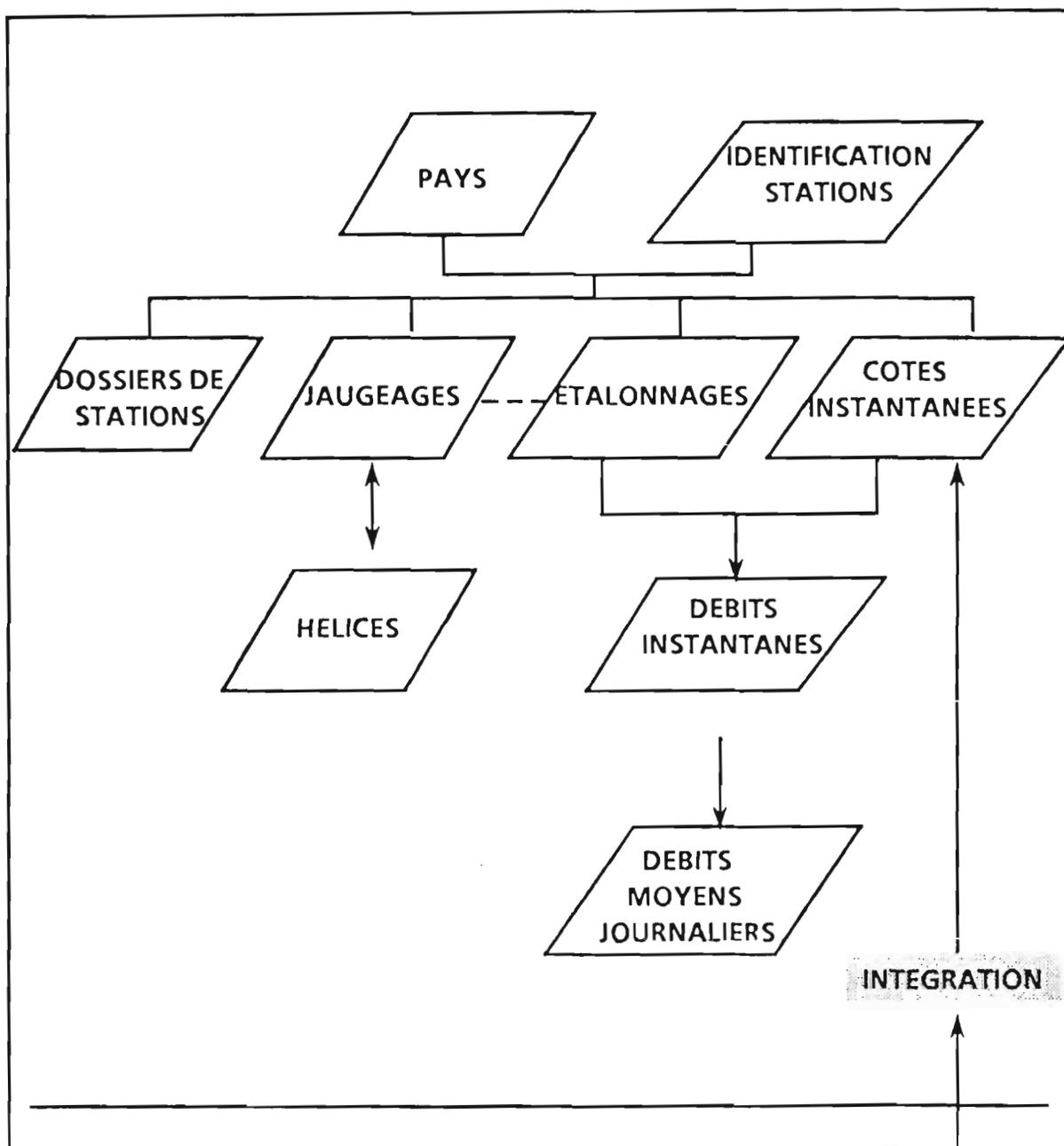


Fig-112a - FICHIERS 'ELABORES' DE LA BANQUE DE DONNEES HYDROMETRIQUES
 GEREE PAR LE LOGICIEL HYDROM

ORSTOM

*** CLIMATOLOGIE ***

LABORATOIRE D'HYDROLOGIE

Station : BOORO - BOROTOU
 Pays : COTE D'IVOIRE
 Mois de : NOVEMBRE 1986

Edition du 14/01/87 11h52
 Latitude : 08°28'40"N
 Longitude : 07°33'20"W
 Altitude : 0455 m

TS6 : Temperature seche a 6h en Degre Celsius
 TS12 : Temperature seche a 12h en Degre Celsius
 TS18 : Temperature seche a 18h en Degre Celsius
 TH6 : Temperature humide a 6h en Degre Celsius
 TH12 : Temperature humide a 12h en Degre Celsius
 TH18 : Temperature humide a 18h en Degre Celsius
 TX18 : Temperature maximale en Degre Celsius
 TN12 : Temperature minimale a 12h en Degre Celsius

DATE	TS6	TS12	TS18	TH6	TH12	TH18	TX18	TN12
01	19.4	27.6	26.4	19.2	25.0	24.6	30.2	19.2
02	18.6	28.6	24.6	18.4	24.8	23.4	30.0	18.4
03	20.0	31.0	22.0	19.8	26.2	21.4	31.8	19.6
04	20.0	30.2	27.0	19.6	26.2	25.6	31.4	19.3
05	20.6	26.3	26.7	20.3	23.2	24.3	29.9	19.8
06	21.2	28.4	26.6	20.0	25.0	24.3	29.6	20.5
07	20.6	29.2	26.5	20.0	25.0	25.4	30.7	21.0
08	19.5	29.8	27.0	19.0	24.0	24.0	30.6	19.2
09	19.0	30.7	27.6	18.8	25.0	25.4	31.6	18.7
10	18.3	32.0	26.2	18.0	25.6	22.8	32.0	18.0
11	18.2	31.6	28.0	18.0	24.2	25.8	32.2	18.0
12	18.8	31.0	27.2	18.4	24.6	24.4	31.8	18.4
13	18.3	30.6	26.8	18.0	23.8	24.2	30.8	18.0
14	16.8	30.4	26.4	16.6	22.4	24.0	31.6	16.5
15	15.4	30.6	26.2	15.2	23.0	23.2	32.0	15.0
16	16.2	31.0	27.4	16.0	22.8	24.6	32.4	15.8
17	18.7	31.0	27.9	18.3	24.0	25.7	32.8	18.6
18	19.8	31.4	27.3	19.6	23.2	25.3	32.4	19.3
19	20.2	31.3	26.4	19.8	24.2	24.0	32.4	19.5
20	20.3	31.0	28.0	20.0	24.6	24.0	32.4	20.0
21	20.0	30.4	27.6	19.6	24.0	24.4	32.4	19.5
22	18.6	27.2	24.6	18.0	18.8	22.4	28.8	18.4
23	16.4	24.8	23.0	14.0	17.2	19.8	27.0	15.7
24	14.0	29.0	24.4	13.2	18.4	23.0	31.8	13.5
25	13.6	29.6	24.6	13.0	19.0	22.8	32.0	13.4
26	12.6	30.6	26.2	12.3	19.8	24.0	32.2	12.5
27	14.0	29.8	26.6	13.6	20.2	23.4	31.8	13.5
28	13.4	30.8	26.0	12.8	19.2	23.4	31.4	12.8
29	15.7	31.0	27.2	15.2	21.2	22.6	32.8	15.5
30	14.6	31.6	27.6	14.2	23.8	23.2	32.8	14.5

Moyenne								
1 Dec	19.7	29.4	26.1	19.3	25.0	24.1	30.8	19.4
2 Dec	18.3	31.0	27.2	18.0	23.7	24.5	32.1	17.9
3 Dec	15.3	29.5	25.8	14.6	20.2	22.9	31.3	14.9

Mois	17.8	29.9	26.3	17.3	22.9	23.8	31.4	17.4

ORSTOM

*** CLIMATOLOGIE ***

LABORATOIRE D'HYDROLOGIE

Station : BOORO - BOROTOU
 Pays : COTE D'IVOIRE
 Mois de : NOVEMBRE 1986

Edition du 14/01/87 11h38
 Latitude : 08°28'40"N
 Longitude : 07°33'20"W
 Altitude : 0455 m

EO6 : Tension de vapeur de l'air a 6h en mb
 EO12 : Tension de vapeur de l'air a 12h en mb
 EO18 : Tension de vapeur de l'air a 18h en mb
 HR6 : Humidite relative a 6h en %
 HR12 : Humidite relative a 12h en %
 HR18 : Humidite relative a 18h en %

DATE	EO6	EO12	EO18	HR6	HR12	HR18
01	22.0	29.9	29.6	98.1	81.1	86.4
02	21.0	28.7	27.9	98.1	73.5	90.4
03	22.9	30.7	25.0	98.2	68.6	94.9
04	22.5	31.3	31.8	96.4	73.1	89.4
05	23.5	26.3	28.7	97.3	77.1	82.2
06	22.5	29.3	28.8	89.7	76.0	82.8
07	22.9	28.8	31.6	94.7	71.3	91.6
08	21.6	25.9	27.8	95.4	62.0	78.1
09	21.5	27.8	30.9	98.1	63.2	83.9
10	20.4	28.5	25.4	97.1	60.1	75.0
11	20.4	25.2	31.7	98.1	54.4	84.0
12	20.8	26.6	28.6	96.3	59.4	79.6
13	20.4	24.9	28.4	97.1	56.9	80.8
14	18.7	21.7	28.2	98.0	50.2	82.1
15	17.1	23.0	26.4	97.9	52.5	77.7
16	18.0	22.3	29.0	98.0	49.7	79.6
17	20.7	25.1	31.5	96.3	56.1	84.0
18	22.6	22.9	30.8	98.1	50.1	85.2
19	22.8	25.4	28.2	96.4	55.8	82.1
20	23.1	26.6	27.1	97.3	59.4	71.9
21	22.5	25.5	28.4	96.4	59.0	77.0
22	20.2	16.1	25.6	94.4	44.7	82.8
23	14.3	14.5	20.9	77.2	46.6	74.6
24	14.6	14.1	27.1	91.6	35.3	88.9
25	14.5	14.9	26.5	93.6	36.1	85.9
26	14.0	15.9	28.3	96.6	36.3	83.4
27	15.3	17.3	26.6	95.7	41.3	76.5
28	14.3	14.5	27.0	93.5	32.8	80.5
29	16.9	18.6	24.3	94.9	41.6	67.6
30	15.9	24.2	25.4	95.8	52.3	69.1

Moyenne						
1 Dec	22.1	28.8	28.8	96.4	70.6	85.5
2 Dec	20.5	24.4	29.0	97.4	54.5	80.7
3 Dec	16.3	17.6	26.0	93.0	42.7	78.7

Mois	19.6	23.6	28.0	95.6	55.9	81.6

Fig-114 - IMPRESSION DE DONNEES CLIMATIQUES

3.1.4. EXPLOITATION DES DONNEES

L'exploitation des données d'un bassin représentatif dépend du type d'observations et de mesures qui y sont faites, de l'objectif de l'étude et des moyens de traitement disponibles. Il est donc impossible de définir une méthodologie précise et rigoureuse pouvant prétendre à l'universalité. Tout au plus, peut-on recommander l'élaboration d'un certain nombre de données et la manière de parvenir à certains résultats indispensables dans de nombreux cas.

L'utilisation d'un minimum de moyens de calcul et de moyens graphiques est impérativement nécessaire.

- *Pluviométrie*

Il est tout d'abord important de pouvoir spatialiser à l'échelle du bassin versant, sur des pas de temps pouvant aller de quelques minutes (durée d'une averse ou tranche d'averse) à l'année, l'information pluviométrique mesurée ponctuellement. Si le réseau d'observations est assez dense, les méthodes les plus simples et les plus classiques consistent à calculer la moyenne arithmétique ou la moyenne pondérée (méthode des polygones de Thiessen, par exemple). Dans le cas de bassins à fortes déclivités, la méthode de Thiessen peut être améliorée en tenant compte du relief et de son exposition, après une analyse de la pluviosité en fonction de l'altitude. La méthode classique utilisant les isohyètes est longue et fastidieuse, lorsqu'elle est appliquée manuellement. Actuellement, les méthodes d'analyse géostatistique et les moyens cartographiques informatisés permettent d'effectuer, d'une manière automatique, des tracés d'isolignes et des calculs d'aires (méthode du Krigeage ou méthode des fonctions splines).

Compte tenu de la densité des réseaux pluviométriques généralement mis en place, le calcul des pluies moyennes pose relativement peu de difficultés à l'échelle de la journée, d'une séquence de plusieurs jours, du mois ou de l'année. Il en va différemment pour des intervalles de temps plus courts, à l'échelle de l'averse.

Seuls les pluviographes permettent une connaissance précise de la forme des précipitations dont dépendent les phénomènes de ruissellement et d'infiltration (donc de crues), ou les phénomènes d'érosion. Il est, pour cela, nécessaire de définir, au préalable, la notion d'averse. Les critères de séparation des pluies reposent généralement sur la définition de deux paramètres qui permettent d'explicitier le temps minimum durant lequel l'intensité observée doit rester inférieure à un certain seuil. Par exemple, pour les régions intertropicales, G. Girard et P. Chaperon considèrent que deux averses sont indépendantes, si les intensités les séparant ne dépassent pas 5 mm / h pendant au moins 120 mn.

Le calcul d'intensités moyennes sur l'ensemble d'un bassin n'a de sens que si la pluie est suffisamment homogène, dans le temps comme dans l'espace. Si tel est le cas, le hyétogramme moyen d'une averse peut être déduit du hyétogramme observé sur un pluviographe jugé représentatif, par une simple affinité de rapport : pluie moyenne sur le bassin calculée à l'aide de tous les appareils (pluviomètres et pluviographes) sur pluie observée au pluviographe. Certains chercheurs proposent d'utiliser les différents hyétogrammes disponibles et de calculer les intensités moyennes après calage des diagrammes sur le même axe des temps. La forme de l'averse peut alors, dans certains cas, être sensiblement altérée. Une autre méthode consiste à faire glisser les hyétogrammes les uns par rapport aux autres sur l'axe des temps, de manière à rechercher la position qui correspond à la valeur minimale de la somme des écarts des intensités. Plus simplement, on peut superposer les hyétogrammes en faisant coïncider la pointe d'intensité, ce qui présente l'avantage de conserver le mieux possible la forme de l'averse, en modifiant parfois, comme dans la méthode précédente, le synchronisme des pluies.

Il va de soi que la recherche d'un hyétogramme moyen n'a de sens que dans la perspective d'une analyse globale, à l'échelle du bassin versant, des mécanismes hydrologiques. Les modèles globaux de crues procèdent d'une telle démarche. Par contre, la prise en compte de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, fondement des modèles dits "distribués", rend inutile une telle approche (paragraphe 3.1.5.3.).

Pour certaines applications (étude du ruissellement, étude de l'érosion), il est important de pouvoir extraire, pour un appareil et une averse déterminés, l'intensité maximale observée durant un intervalle de temps choisi : par exemple, l'intensité maximale enregistrée en 10 minutes. Il peut être intéressant également (entre autres pour le calcul de la pluie utile) de pouvoir isoler la partie d'une averse tombée avec une intensité supérieure à un certain seuil : par exemple, calculer la hauteur de pluie dont l'intensité est supérieure à 20 mm/h.

Un certain nombre de logiciels permettent d'effectuer, d'une manière automatique, extractions, calculs ou tracés de données pluviométriques ou pluviographiques (les programmes Ares, Pluviograph ou Spatial développés par l'Orstom, en sont des exemples).

- Hydrométrie

Les traitements de base décrits au paragraphe 3.1.3. permettent de calculer les débits moyens journaliers, donc de déterminer également les apports mensuels et annuels. Une étude plus fine du ruissellement demande une analyse des hydrogrammes, sur des intervalles de temps beaucoup plus courts.

L'écoulement de crue peut être défini, d'une manière simple, comme étant la part de l'écoulement qui se superpose à l'écoulement de base consécutivement à des précipitations. De multiples méthodes, plus ou moins complexes, ont été proposées pour séparer ces différents écoulements. La plupart ne sont basées que sur des hypothèses faites, a priori, sur les mécanismes générant le ruissellement, dont la réalité physique n'a pas toujours été démontrée (schéma de HORTON du ruissellement de surface, par exemple). Il est néanmoins incontestable qu'un changement de cinématique de la décrue peut être mise en évidence en traçant l'hydrogramme observé dans un système d'axes semi-logarithmique (temps en abscisses arithmétiques et débit en ordonnées logarithmiques). Dans un souci de simplification des traitements et d'homogénéité des résultats, il sera admis que la première rupture de pente observée marque la fin du ruissellement (fig. 115). Les techniques automatiques peuvent faciliter, dans ce domaine, le travail de l'hydrologue, mais ne permettent pas de s'affranchir de son jugement.

Un certain nombre de caractéristiques de l'hydrogramme peuvent être définies et calculées :

- . *Temps de base* T_b : temps compris entre le début et la fin du ruissellement (temps entre a et c de la figure 115).
- . *Temps de montée* T_m : temps qui s'écoule entre le début de l'arrivée à l'exutoire du ruissellement apparent et le maximum de l'hydrogramme de ruissellement (temps entre a et b de la figure 115).
- . *Débit maximal absolu* Q_{mx} , ou *débit de pointe* : débit maximal instantané d'écoulement (point B de la figure 115).
- . *Débit maximal de ruissellement* Q_{mrx} : débit qui correspond à l'écart maximal entre le débit écoulé à l'exutoire et le débit de base (la variation de ce dernier durant la crue est supposée linéaire : droite AC de la figure 115).
- . *Volume écoulé* V_e : volume total d'eau qui est passé à l'exutoire entre le début et la fin de la crue, y compris l'écoulement de base.
- . *Lame écoulée* L_e : lame d'eau équivalente au volume V_e réparti uniformément sur toute la superficie S du bassin versant ($L_e = V_e / S$).
- . *Volume ruisselé* V_r : volume d'eau correspondant uniquement à l'écoulement rapide passé à l'exutoire entre le début et la fin de la crue (partie hachurée de la figure 115).
- . *Lame ruisselée* L_r : lame d'eau équivalente au volume V_r réparti uniformément sur toute la superficie S du bassin versant ($L_r = V_r / S$).

Le volume V_e est calculé par intégration de l'hydrogramme entre le début et la fin de la crue (aire délimitée par aABCc sur la figure 115).

Le volume V_r correspond à la différence entre le volume V_e et le volume V_b correspondant au débit de base écoulé durant la crue (aire aACc de la figure 115).

Certains logiciels, tels que Hydrom, permettent le calcul automatique de ces différents paramètres, après définition des points de début et de fin de crue.

La prise en compte des caractéristiques des épisodes pluvieux doit compléter l'étude des crues. Ainsi, seront calculés :

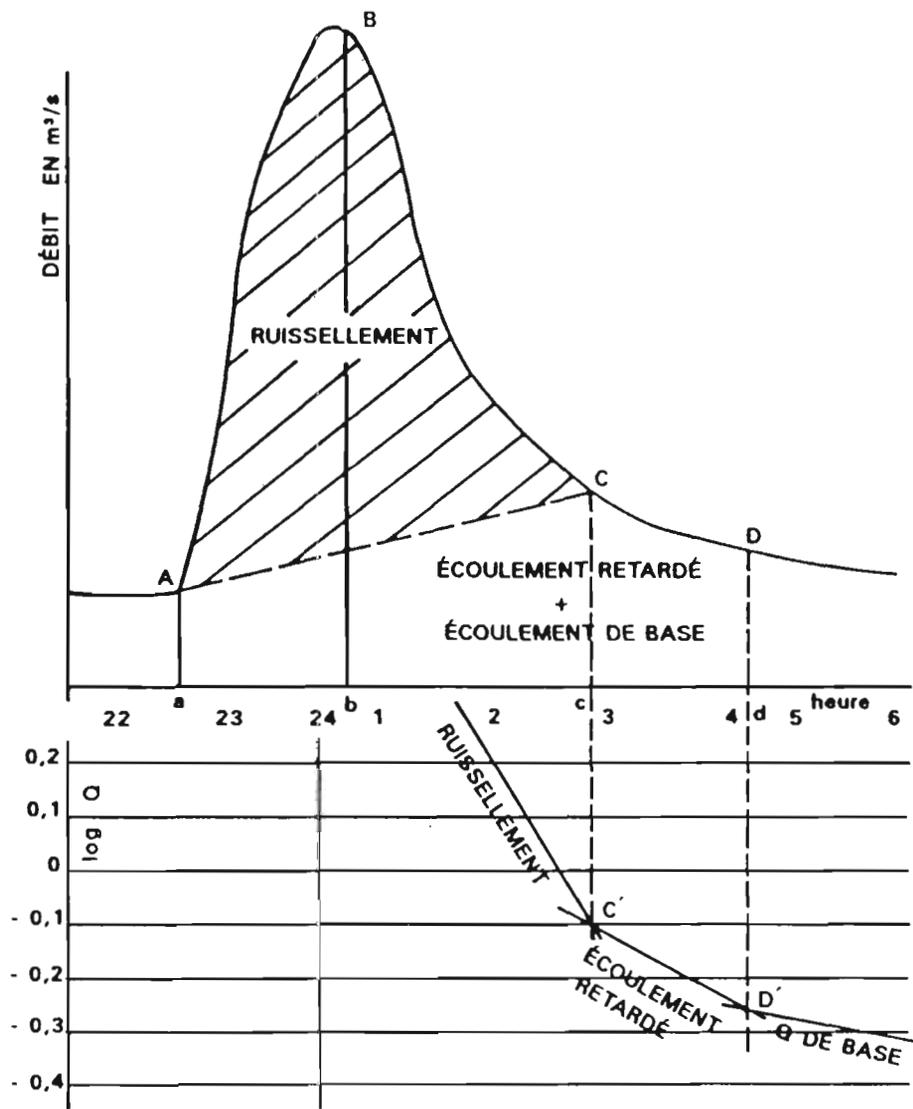


Fig- 115 - SEPARATION DES ECOULEMENTS

- . *Le coefficient de ruissellement* K_r (en %) : rapport entre la lame ruisselée L_r et la pluie moyenne P_m correspondante ($K_r = 100 \cdot L_r / P_m$).
- . *Le coefficient d'écoulement* K_e (en %) : rapport entre la lame écoulee totale L_e et la pluie moyenne P_m correspondante ($K_e = 100 \cdot L_e / P_m$).

Sont données pour mémoire, car elles sortent du domaine des caractéristiques générales, les définitions de certaines variables parfois rencontrées dans la littérature hydrologique (1035) :

- . *Pluie efficace* : partie de l'averse ayant donné lieu à du ruissellement.
- . *Pluie utile* : partie de l'averse ayant pu raisonnablement donner lieu à du ruissellement. Appelée parfois "corps de la pluie", on la définit comme étant la somme des tranches de l'averse dont l'intensité est supérieure à un certain seuil.
- . *Pluie excédentaire ou pluie nette* : partie de l'averse ayant ruisselée.
- . *Capacité d'absorption* : taux maximal d'eau que peut absorber, par infiltration ou par d'autres moyens, une surface de sol. On définit parfois la capacité apparente moyenne d'un bassin en reportant la valeur de la lame ruisselée sur la pointe du hétérogramme de l'averse (paragraphe 5.1.5.6.).
- . *Temps de concentration* : temps que met une particule d'eau provenant de la partie du bassin la plus éloignée de l'exutoire pour parvenir à celui-ci. On l'estime en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement.
- . *Temps de réponse* : temps qui sépare le centre de gravité de la pluie efficace de la pointe de l'hydrogramme.

Ces différents paramètres seront regroupés dans un tableau dit "des caractéristiques de crues" (fig. 116).

La séparation des écoulements de chaque épisode de crue permet également de comparer les hauteurs précipitées aux lames écoulées, ainsi qu'aux lames ruisselées, sur des intervalles de temps plus longs (mois ou année - fig. 117 et 118). Des bilans hydrologiques mensuels fortement négatifs (les écoulements sont alors supérieurs à la pluviométrie) traduisent une alimentation souterraine dont l'étude pourra être abordée par une analyse des tarissements (voir paragraphe 2.7.6.3.) ou, si le dispositif mis en place le permet, par une analyse hydrogéologique plus poussée.

- *Climatologie*

Les bilans mensuels et annuel (pluie, écoulement et ruissellement) pourront avantageusement être complétés par l'étude des variations saisonnières de l'évapotranspiration potentielle, calculée à partir des observations climatologiques (paragraphe 2.3.9.).

Si le bassin étudié constitue un système fermé qui, au terme d'un cycle hydrologique, retrouve ses conditions initiales, le déficit d'écoulement (pluie - lame écoulee) peut être assimilé à l'évapotranspiration réelle (fig. 117).

- *Transports solides*

Comme pour l'analyse des crues, il sera établi un tableau regroupant les caractéristiques des différents événements ayant fait l'objet de mesures du transport solide : date, hauteur de pluie, intensité maximale sur différents intervalles de temps (de 5 à 30 minutes), volume ruisselé, volume écoulee, poids transporté (suspension et/ou charriage), état du ruissellement (crue, décroue), état du couvert végétal. Des bilans mensuels et annuels devront également être calculés.

- *Hydrochimie*

Le tableau des caractéristiques hydrochimiques devra regrouper, en plus des résultats des analyses et des mesures, toutes les informations pouvant faciliter l'interprétation des résultats : date, nature du prélèvement, etc. (voir paragraphe 2.8.1.4.).

**CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES CRUES OBSERVEES
SUR LES DEUX PETITS BASSINS DE SAKASSOU EN 1974**

N°	Date	Heure	Averae			Ruissellement							Hydrogramme					Observations		
			P _m	P _u	t _u	V _r	H _r	K _r	K _{ru}	P _e	t _e	C _{av}	t _p	t _m	t _b	Q ₀	Q _{max}			
11	M:29-03	21h33	64,3	63,3	45	77	2550	4,05	6,3	6,4					85	35	360	0,0	233	U (H)
11	E:29-03	21h33	53,9	52,7	42	79	1224	2,22	4,1	4,2	22,0	15	95,0	97	50	543	0,0	123	U (R)	
12	M:31-03	20h00	16,5	5,0	5	118	108	0,17	1,0	3,4				360	350	810	0,2	4,4	G	
12	E:31-03	20h00	12,5	2,5	5	110											0,0		N	
13	M:1-04	20h10	21,0	18,5	30	122	358	0,62	3,0	3,4				118	135	640	1,2	25,9	S H	
13	E:1-04	19h45	18,7	17,1	25	117	180	0,33	1,8	1,9	(5,0)	5	(45,0)	275	75	1030	0,0	6,1	S H	
14	M:2-04	19h45	22,4	21,0	23	131	500	1,43	6,4	6,8				45	50	670	2,0	71,6	S R	
14	E:2-04	19h20	23,8	20,9	25	126	741	1,34	5,6	6,4	16,1	15	55,0	157	70	459	0,5	89,4	U H	
15	M:4-04	19h05	4,3	3,9	7	139	81	0,13	3,0	3,3				90	50	530	2,5	8,8	S H	
15	E:4-04	19h05	5,8	5,1	10	135	112	0,20	3,4	3,9	(2,0)	5	34,5	180	212		1,6	9,4	S H	
22	M:29-04	21h05	31,0	30,5	37	49	223	0,35	1,1	1,2				55	55	540	0,0	31,3	S (R)	
22	E:29-04	21h10	25,0	25,0	35	47	403	0,73	2,9	2,9	8,0	5	85,0	180	145	480	0,0	35,3	S H	
23	M:1-05	21h05	8,5	3,5	10	72								360			0,7	5,0	S G	
23	E:1-05	21h05	13,0	8,5	35	68	278	0,50	3,8	5,9	4,0	10	21,5	220	180	780	2,0	15,0	S H	
24	M:6-05	19h25	13,0	12,0	15	51								300			0,0	1,5	U G	
24	E:6-05	19h34	8,0	6,9	9	51								332			0,04	2,8	S G	
25	M:6-05	20h05	22,0	14,5	15	60	568	0,90	4,1	6,2				185	185	1175	0,5	22,7	S H	
25	E:6-05	20h05	24,5	11,0	20	53	629	1,14	4,7	10,4	4,5	5	42,0	299	162	1172	0,9	29,4	S H	
27	M:9-05	15h15	10,9			65								285	130		1,3	4,7	G	
27	E:9-05	15h15	12,0	1,0		61													G	
31	M:22-05	19h40	28,3	22,8	30	24								220	125		0,05	3,1	G	
31	E:22-05	19h40	21,5	16,0	39	24	139	0,25	1,2	1,6	3,4	5	39,0	375	160	930	0,05	5,5	S H	
37	M:15-06	12h45	14,4	12,0	40	21	62	0,10	0,7	0,8				50	45	220	0,0	12	S (R)	
37	E:15-06	12h55	12,2	9,4	23	37	171	0,32	2,6	3,3	(2,5)	5	55,0	167	184		0,2	11,7	S H	
39	M:18-06	12h50	23,1	18,1	25	46	402	0,64	2,8	3,5				145	140	770	0,4	21,5	S H	
39	E:18-06	12h55	20,0	15,0	25	43	374	0,68	3,4	4,5	(3,0)	5	43,0	168	150	720	0,6	22,9	S H	
46	M:23-06	0h10	18,0	18,0	35	50	376	0,60	3,3	3,3				165	165	1005	0,7	19,6	U H	
46	E:28-06	0h15	16,3	14,5	30	49	297	0,54	3,3	3,7	3,7	5	39,0	188	180	920	1,6	15,0	U H	
52	M:13-07	7h20	50,6	25,7	120	20	1672	2,65	5,3	9,9				410	940	6,0	5,0	C (R)		
52	E:18-07	4h00	53,9	40,5		20	1359	2,46	4,2	6,1	15,0	30	21,5	335	690	0,0	11	C (A)		

- Colonnes 1 à 3 : n° de référence, date et heure du début de l'averse ayant donné naissance à la crue. Le numérotage des crues, initialisé à 1 chaque année civile, est ainsi le même que celui des averaes. Deux crues résultant de la même averse portent le même numéro sur les petits bassins, la distinction s'opérant selon l'indice (M pour le B.V. Ouest et E pour le B.V. Est).
- Colonne 4, P_m : hauteur moyenne de l'averse responsable de la crue (en mm).
- Colonnes 5 et 6, P_u et t_u : hauteur (en mm) et durée (en minutes) du corps de l'averse.
- Colonne 7, I_k : indice d'humidité (de KOHLER) préalable à l'averse.
- Colonnes 8 et 9, V_r et H_r : volume ruisselé en m³ et lame ruisselée en mm correspondant à la crue.
- Colonne 10, K_r : coefficient de ruissellement moyen de la crue, rapport de la lame ruisselée à la pluie moyenne (en %).
- Colonne 11, K_{ru} : Coefficient de ruissellement utile, rapport de la lame ruisselée au corps de la pluie (en %).
- Colonnes 12 et 13, P_e et t_e : hauteur (en mm) et durée (en minutes) de la partie efficace de l'averse (partie de l'averse ayant donné du ruissellement). Ces caractéristiques n'ont été établies que pour les plus fortes crues du bassin Est.
- Colonne 14, C_{av} : capacité apparente moyenne d'absorption, (en mm) du bassin obtenue en reportant la valeur de la lame ruisselée sur la pointe du hydrogramme de l'averse. Comme les deux précédentes, cette caractéristique n'a été déterminée que pour les crues du bassin Est.
- Colonnes 15 à 17, t_p, t_m et t_b : temps de réponse (en minutes) du bassin, temps de montée et temps de base (en minutes) de la crue.
- Colonne 18, Q₀ : débit de base au début de la crue (en litres par seconde).
- Colonne 19, Q_{max} : débit maximum de la crue (en l/s).
- Colonne 20 : observations diverses sur l'averse et la crue :
- S : averse simple (corps unique)
 U : averse unitaire (courte durée, intensité peu variable)
 C : averse complexe (longue durée et plusieurs pointes)
 N : écoulement négligeable
 G : simple gonflement du débit de base
 H : écoulement hypodermique prédominant
 R : ruissellement pur prédominant
 RP : ruissellement partiel
 () : caractère atténué.

Fig-116 - BASSIN DE SAKASSOU-COTE D'IVOIRE (D'APRES A.LAFFORGUE)

**RECAPITULATIF DES VALEURS MENSUELLES DES TERMES
DU BILAN HYDROLOGIQUE A BOORO-BOROTOU**

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar

1984-85												
P	96,4	113,0	218,1	165,8	225,5	151,7	147,5	14,2	0,0	1,7	11,0	16,5
ETP	175,5	149,6	133,0	104,4	124,6	115,3	129,3	121,7	96,5	154,2	147,8	165,1
E	0,1	0,7	6,2	5,2	9,5	21,3	11,9	2,8	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	2,0	0,5	1,1	4,1	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1985-86												
P	101,7	67,6	151,7	331,8	398,5	265,5	107,7	2,2	0,0	0,0	46,4	74,4
ETP	161,6	150,4	121,5	103,8	107,6	111,7	130,1	126,1	101,2	149,6	165,7	168,3
E	0,0	0,0	0,1	13,5	60,1	70,3	27,0	8,2	2,9	1,3	0,8	1,2
R	0,0	0,0	0,0	3,4	19,6	7,6	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1986-87												
P	66,0	128,0	112,8	157,1	129,1	207,3	152,3	24,8	0,0	1,1	35,4	58,7
ETP	159,3	148,4	137,8	99,8	108,7	103,5	120,7	115,4	97,0	149,0	163,6	169,3
E	1,3	1,9	2,8	1,9	2,9	8,0	5,8	4,6	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	3,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1987-88												
P	23,0	172,3	166,4	135,1	334,5	242,4	74,6	15,6	15,8	0,0	0,2	34,9
ETP	184,1	151,5	123,3	126,1	103,5	101,4	123,6	118,7	98,4	132,0	152,7	171,9
E	0,0	0,0	1,5	1,2	21,7	36,4	20,1	3,2	1,4	0,2	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,7	0,2	9,8	13,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

où :

- P, pluie moyenne sur le bassin versant ;
- ETP, évapotranspiration calculée par la formule de Penman ;
- E, écoulement total à l'exutoire ;
- R, écoulements de crues cumulés.

Bilan hydrologique annuel sur le bassin versant de Booro-Borotou (en mm)

Années	Précipitation	Écoulement	Ruissellement	ETP Penman	Déficit écoulement
1984-85	1161	59	10	1620	1102
1985-86	1528	205	33	1602	1323
1986-87	1073	31	6	1604	1042
1987-88	1244	85	26	1590	1158

Fig-117 - BILANS HYDROLOGIQUES MENSUELS/ANNUELS

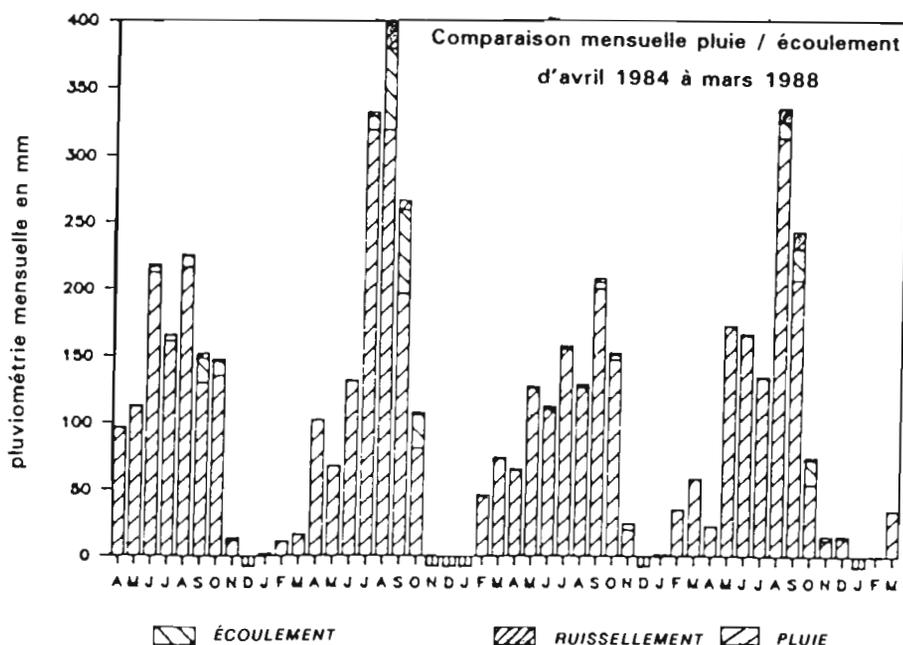


Fig-118 - BASSIN DE BOORO-BOROTOU - COTE D'IVOIRE (D'APRES P.CHEVALIER)

- *Eaux souterraines*

Les mesures d'humidité dans la zone non saturée ou des niveaux piézométriques dans les aquifères visent essentiellement à estimer, dans l'espace et dans le temps, les variations du stock d'eau (paragraphe 2.6. et 2.7.).

La variation de l'humidité volumique (produit de l'humidité pondérale par la densité apparente) selon la profondeur constitue un profil hydrique, représenté graphiquement par une courbe (fig. 119). Le stock hydrique, pour une tranche horizontale de sol, est l'intégrale de cette courbe limitée aux profondeurs choisies. Le calcul se fait par planimétrie. Si un certain nombre de mesures ont été réalisées au cours du cycle hydrologique, on peut de cette manière calculer non seulement le stock d'eau le long d'un profil, mais également ses variations en fonction du temps. L'étude des répartitions spatiales à partir des observations effectuées en différents sites fait appel aux méthodes classiques d'analyse géostatistique.

L'étude des écoulements dans les aquifères souterrains a été développée au paragraphe 2.7.6.

3.1.5. MODELISATION

3.1.5.1. GENERALITES

La modélisation appliquée aux observations et aux expérimentations hydrologiques sur de petits bassins versants est le complément logique à l'interprétation, voire à la compréhension, de leur fonctionnement. La modélisation d'aménagements hydrauliques a, quant à elle, une fonction supplémentaire qui est l'optimisation de la gestion de systèmes plus ou moins complexes.

Les modèles mathématiques utilisés en hydrologie peuvent être séparés, bien que la frontière ne soit pas toujours très franche, en modèles stochastiques et modèles déterministes (fig. 120).

Dans les *modèles stochastiques* intervient la notion de probabilité d'apparition d'un événement représentant, ou prenant en compte, l'aspect aléatoire de variables ou de systèmes. Le qualificatif "stochastique" est parfois réservé aux modèles dans lesquels la probabilité est fonction du temps, si elle en est indépendante, l'appellation de modèles "probabilistes" est préférée. Il est évident que dans une certaine mesure tous les processus hydrologiques présentent un caractère stochastique ou probabiliste (processus markoviens, par exemple).

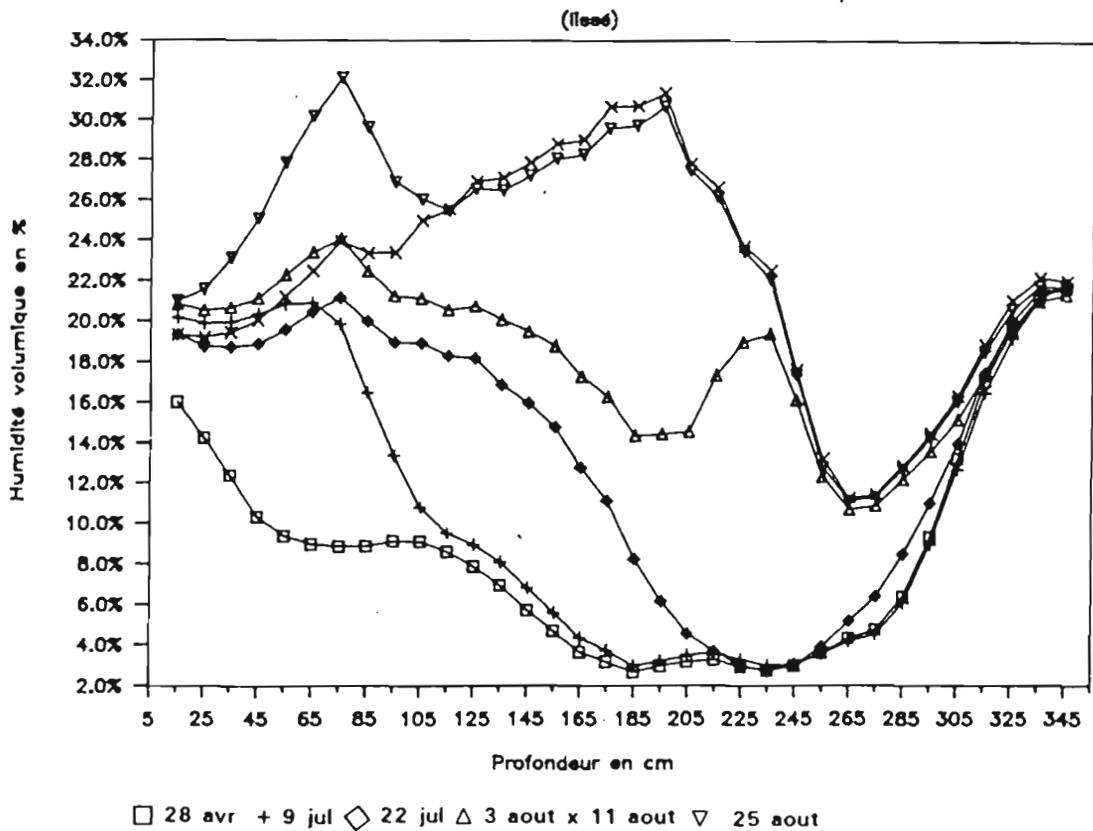
Les *modèles déterministes* sont des modèles paramétriques dans lesquels, contrairement aux précédents, les variables utilisées ne sont pas aléatoires. Ils sont basés sur des formulations mathématiques plus ou moins élaborées, dont les différents paramètres sont déterminés sur la base d'observations. Ils se situent entre deux pôles : les modèles conceptuels et les modèles empiriques.

Les *modèles conceptuels* s'attachent à représenter, de façon plus ou moins précise, les phénomènes physiques que l'on cherche à décrire. La compréhension du comportement du système étudié est donc indispensable pour formuler les relations fonctionnelles liant les sollicitations aux réponses, puis pour déterminer les paramètres intervenant dans ces relations (par exemple, les équations d'infiltration de l'eau dans le sol, d'évapotranspiration ou de restitution des nappes souterraines).

Les *modèles empiriques*, au contraire, proposent un schéma sans lien direct avec la réalité. Il importe seulement de simuler la réponse du système étudié, sans que son état interne soit pris en considération. Ce type de modèles est parfois appelé "boîte noire", sans donner à ce terme un caractère péjoratif puisqu'il permet l'analyse des paramètres importants des phénomènes, bien que les relations fonctionnelles du système ne soient pas exprimées.

L'amélioration du degré de conceptualité d'un modèle entraîne, nécessairement, une augmentation de sa complexité. C'est pourquoi de nombreux modèles représentent un moyen terme entre empirique et conceptuel.

Tube n°8 : Humidité volumique



Tube n°8 : Humidité volumique

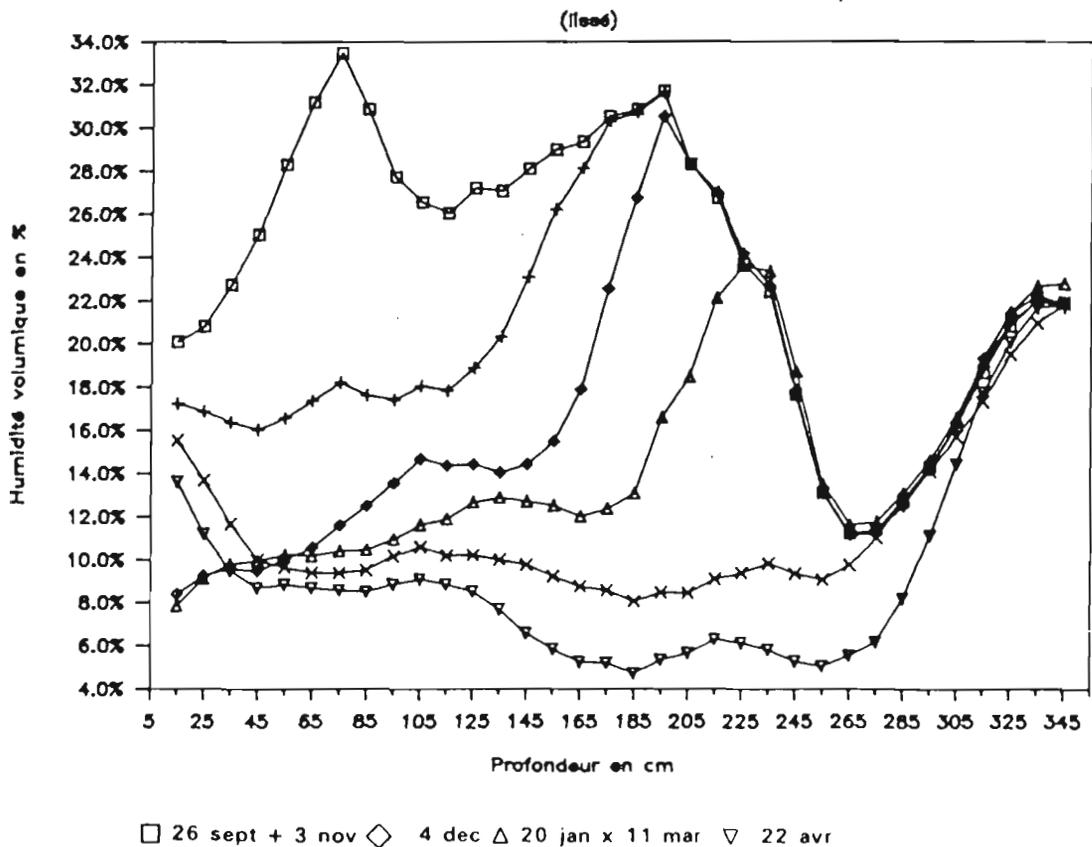


Fig-119 - VARIATION DE L'HUMIDITE VOLUMIQUE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR
BOORO - BOROTOU - COTE D'IVOIRE (D'APRES P.CHEVALLIER)

Une deuxième classification des modèles paramétriques se fonde sur l'échelle spatiale. Un modèle global assimile le bassin versant à une unité ponctuelle, en ne tenant compte d'aucune variabilité spatiale. Un modèle distribué (ou à discrétisation spatiale), au contraire, traite le bassin versant comme une juxtaposition de sous-modèles globaux entre lesquels s'effectuent des transferts. De tels modèles, que l'on peut qualifier de numériques, demandent des capacités de traitement et des temps de calcul qui peuvent, dans certains cas, être prohibitifs. Actuellement, certains chercheurs (Morel-Seytoux) orientent leurs travaux vers la définition de représentations analytiques utilisables, non seulement au niveau des unités de discrétisation "hydrologiquement homogènes", mais également au niveau des transferts entre unités.

Cette deuxième classification est parfois complétée en prenant en compte le niveau temporel (1118). On distingue, de cette façon, les modèles en continu, des modèles par événement (par exemple, la simulation des seuls événements de crues).

Pour enfin définir complètement un modèle, il est important de préciser le pas de temps utilisé en séquence chronologique, tant au niveau du calage, que du contrôle, ou de l'utilisation (voir paragraphe 3.1.5.2.).

3.1.5.2. MISE EN OEUVRE DES MODELES

Parmi les qualités que l'on peut attendre d'un modèle, C. Michel (1025) définit :

- la précision : comme qualité fondamentale,
- la robustesse : si une précision acceptable est conservée, même dans des conditions extrêmes,
- la généralité : si l'application convient aux valeurs faibles, comme aux valeurs les plus fortes,
- l'universalité : si la possibilité d'utilisation pour des systèmes très différents est assurée,
- la richesse : désignant l'intégration d'un grand nombre de caractéristiques qui permettent une grande différenciation des comportements d'un système à l'autre,
- l'adaptabilité : pour définir la possibilité de corriger un modèle, afin de tenir compte de nouvelles données.

Pour pouvoir exprimer les qualités et les caractéristiques souhaitées, il est important de définir l'objectif à atteindre, c'est-à-dire de préciser l'utilisation qui sera faite du modèle. Une fois le choix effectué, la mise en oeuvre s'appuiera sur un processus itératif qu'il est possible de séparer en cinq phases : formulation du système, détermination des paramètres objectifs, calage, validation et exploitation.

- 1- La formulation symbolique du système n'est possible qu'à partir d'une schématisation, basée sur une série d'hypothèses simplificatrices (fig. 121).
- 2- La détermination des paramètres objectifs, c'est à dire ayant un vrai sens physique, ne peut se faire que par des mesures in situ dont la variabilité spatiale, voire temporelle, doit être analysée et éventuellement prise en compte. L'utilisation de lois physiques n'est pas aussi aisée qu'il peut paraître. Ces lois correspondent en effet à des conditions d'application bien précises. Par exemple, la loi d'infiltration n'est valable qu'au niveau ponctuel et ne peut être appliquée, en toute rigueur, à l'ensemble d'une surface, même de dimension modeste (parcelle ou versant), puisqu'alors interfèrent d'autres phénomènes (variabilité spatiale de l'humidité du sol et du ruissellement, par exemple). Non seulement les paramètres mesurés in situ ne peuvent pas, dans ce cas, être appliqués, mais la forme même de la loi peut être altérée.
- 3- Le calage consiste à déterminer les paramètres d'ajustement, c'est à dire n'ayant pas de sens physique, à partir d'un jeu de données d'entrée et de réponses, observées sur le système réel (fig. 122). Cette opération de réglage s'effectue en utilisant seulement une partie des données disponibles, le reste étant réservé pour l'étape suivante de validation. On préconise souvent d'affecter deux tiers des données au calage, le tiers restant servant à la vérification. Cette période de contrôle doit correspondre à des situations assez différentes de celles de la période de calage, afin de mieux faire apparaître les qualités et les défauts du modèle.

L'importance relative des différents paramètres (objectifs ou d'ajustement) est fonction du degré de conceptualité du modèle. Si le rôle des paramètres de calage est évident et important dans les modèles empiriques, il est plus limité dans les modèles à haut degré de conceptualité.

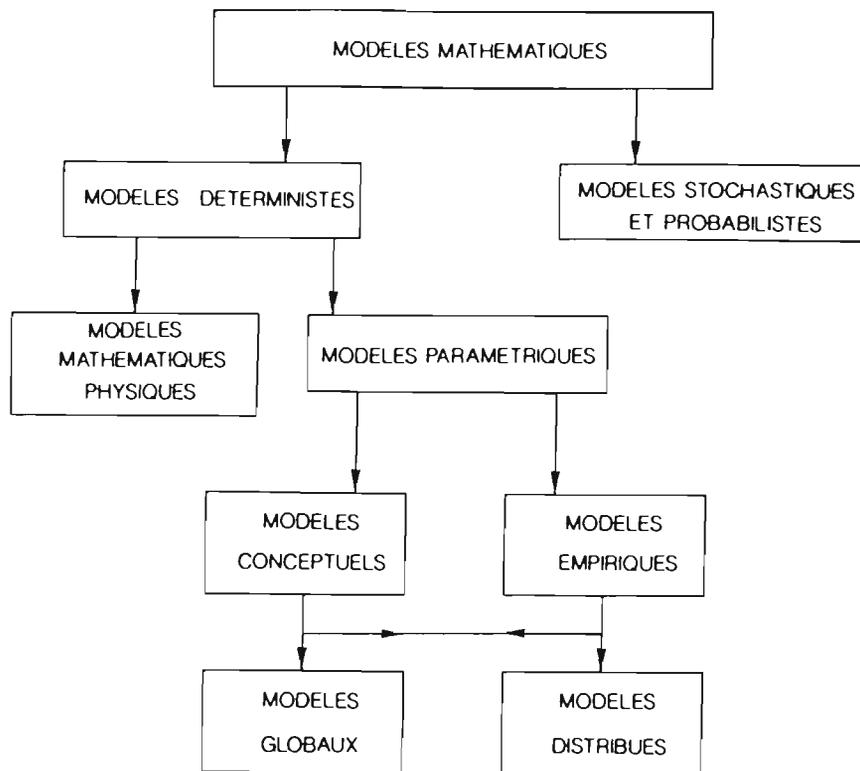


Fig-120 - CLASSIFICATION DES MODELES MATHÉMATIQUES HYDROLOGIQUES

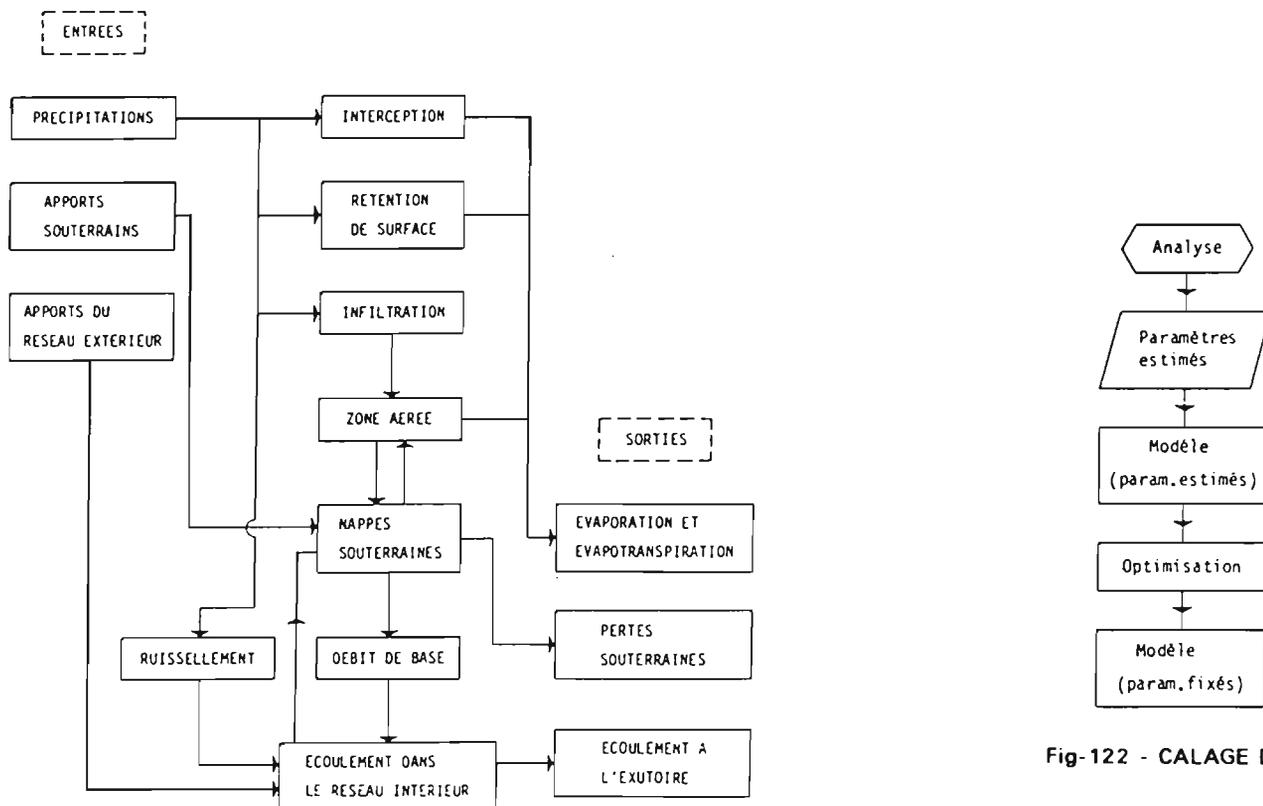


Fig-121 - SCHEMATISATION DES PROCESSUS INTERVENANT DANS LE BILAN HYDRIQUE D'UN BASSIN VERSANT (D'APRES J.F.JATON)

Fig-122 - CALAGE DU MODELE

En pratique, le calage consiste à trouver le jeu optimal de paramètres. Si l'on peut utiliser un assez grand nombre de critères de jugement pour permettre d'apprécier les performances d'un modèle relativement à des aspects particuliers, le calage, quant à lui, ne peut porter que sur la minimisation (ou maximisation) d'un seul critère. Généralement, ce critère mesure un écart entre la chronique des valeurs observées et celle des valeurs produites par le modèle. Deux approches sont possibles :

. *Critères numériques*

Parmi les nombreuses fonctions critères citées dans la littérature, on peut retenir, en appelant Q_o les valeurs observées, Q_c les valeurs calculées et N le nombre de couples (sans préjuger de la nature de ces valeurs) :

$$C_1 = \sum (Q_o - Q_c)^2$$

Pour permettre des comparaisons entre bassins, cette quantité peut être rendue adimensionnelle, en divisant par $\sum Q_o^2$

$$C_2 = (1/N) \cdot \sum (Q_c - Q_o) / Q_o \quad (\text{erreur relative})$$

$$C_3 = (1/N) \cdot \sum |Q_c - Q_o| / Q_o \quad (\text{erreur absolue})$$

$$C_4 = 1 - \sum (Q_o - Q_c)^2 / \sum (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \quad (\text{Nash et Sutchiffe - 1970})$$

$$C_5 = 1 - (1/N) \cdot \sum |(Q_c - Q_o) / Q_o| \cdot (\bar{Q}_o + |Q_o - Q_o| / \bar{Q}_o) \quad (\text{Fortin - 1971})$$

$$C_6 = (1/N) \cdot \sum |(Q_o - Q_c) / Q_o| \cdot (|Q_o - Q_o| / \bar{Q}_o) \quad (\text{Combes})$$

$$C_7 = (1/N) \cdot \sum [\text{Exp}(|Q_c - Q_o| / Q_o) \cdot (Q_o / \bar{Q}_o)] \quad (\text{SExpER})$$

Ce dernier critère (Somme des Exponentielles des Ecart Relatifs) est très sensible aux modifications de Q_c et le terme Q_o / \bar{Q}_o donne un poids plus important aux fortes valeurs (1125).

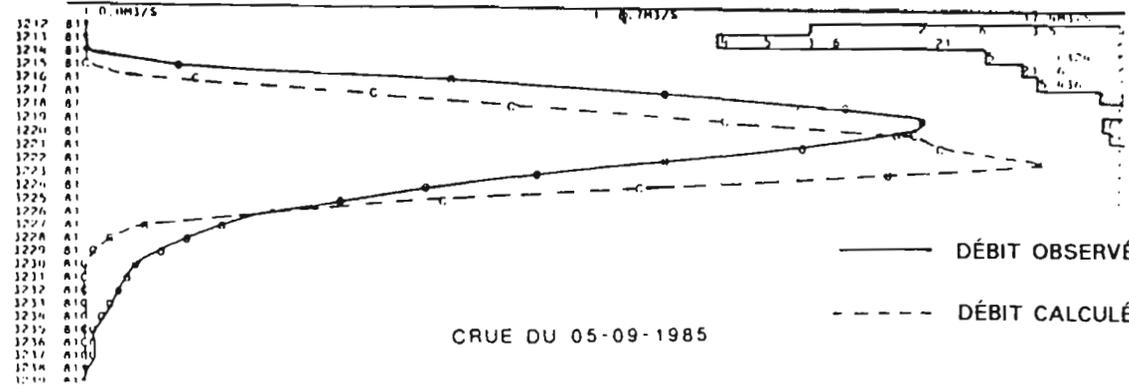
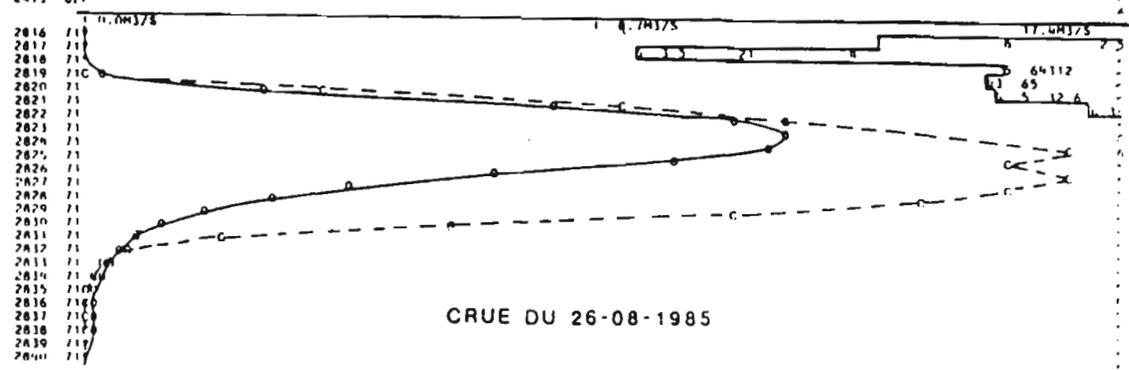
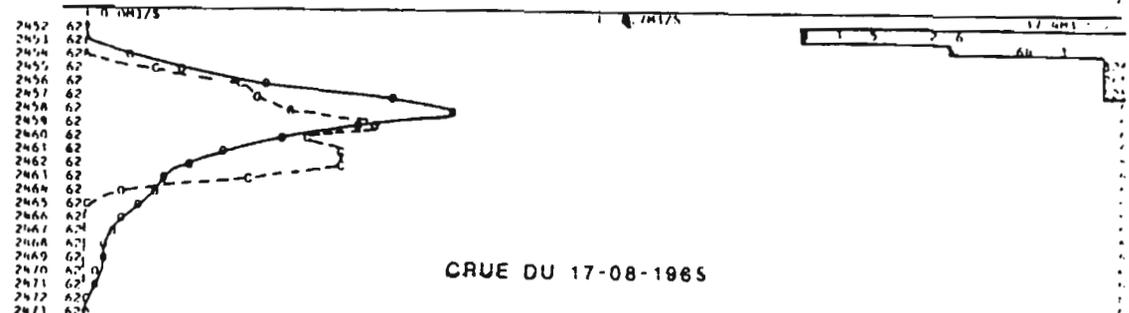
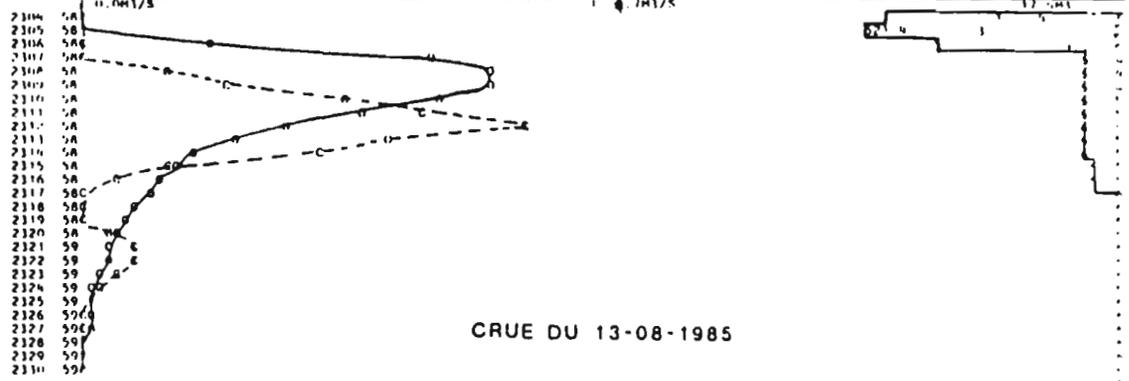
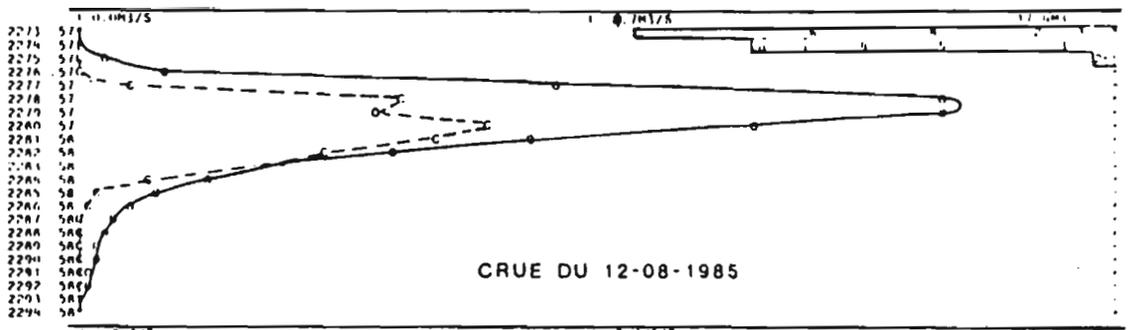
. *Critères graphiques*

Les critères graphiques font appel à des méthodes bien connues :

- * La représentation, dans le même système d'axes de coordonnées, des valeurs calculées et observées, bien que ne représentant pas un critère objectif, reste un très bon moyen pour porter un jugement sur une simulation (fig. 123).
- * Le tracé de la courbe de corrélation, liant ces mêmes valeurs (fig. 124), peut s'accompagner du calcul du coefficient de corrélation pour apprécier le degré de liaison.
- * Les valeurs cumulées peuvent être représentées en simple (fig. 125) ou double cumul, pour juger de la cohérence des deux séries.

Les méthodes numériques et graphiques peuvent être utilisées complémentaires, mais seule la détermination d'une fonction critère permet l'emploi de méthodes d'optimisation numérique (fig. 122). D'après Pickup, cité par P. Chevallier (1104), les méthodes les plus efficaces pour l'optimisation des modèles pluie-débit semblent être celles de Powell, de Rosenbrock et la méthode du Simplex.

- 4- La validation est une opération indispensable, bien que souvent oubliée ou négligée. Elle consiste à vérifier, sur un jeu de données différent de celui ayant servi au calage, l'aptitude du modèle à simuler la réalité (fig. 126). Elle représente actuellement le seul moyen objectif permettant de préciser l'ordre de grandeur des erreurs à attendre, lors de l'exploitation du modèle. Il en ira différemment lorsque les modèles basés uniquement sur des représentations analytiques, y compris au niveau spatial (paragraphe 3.1.5.1.), seront disponibles, un calcul d'erreurs étant alors possible.



— DÉBIT OBSERVÉ
 - - - DÉBIT CALCULÉ

BASSIN VERSANT DE GAGARA-EST

Fig-123 - REPRESENTATION DES HYDROGRAMMES OBSERVES ET CALCULES (D'APRES J.ALBERGEL)

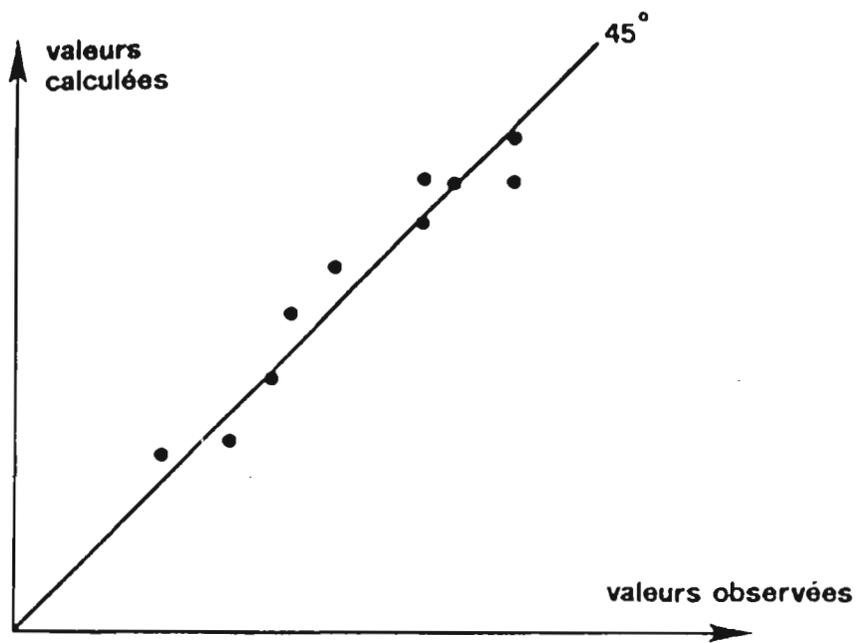


Fig-124 - CORRELATION LINEAIRE ENTRE DEBITS MAXIMAUX OBSERVES ET CALCULES

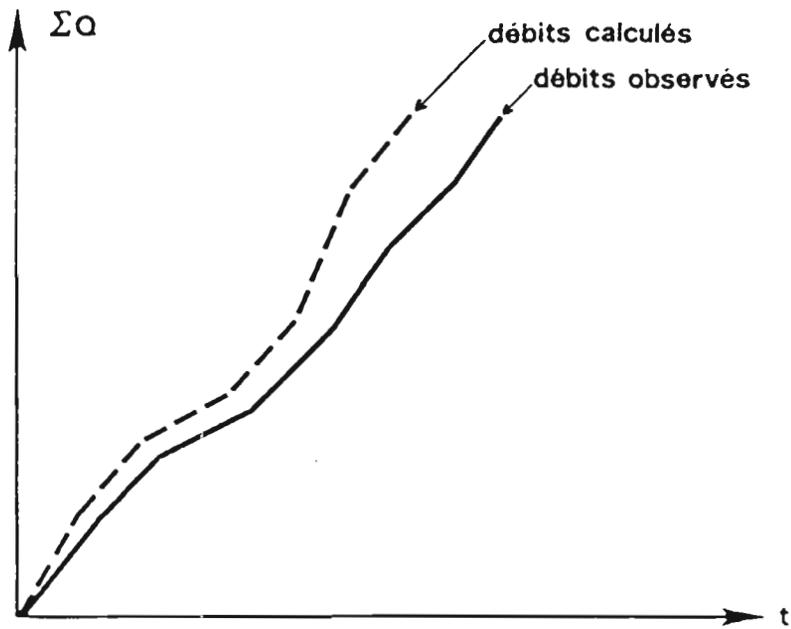


Fig-125 - COURBES DES DEBITS CUMULES EN FONCTION DU TEMPS (D'APRES J.F.JATON)

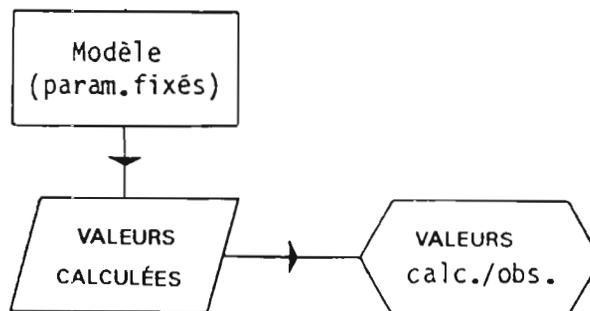


Fig-126 - VALIDATION DU MODELE

- 5- L'exploitation constitue la phase opérationnelle du processus décrit. Elle couvre des domaines très variés : prévision, prédétermination (crues, lames écoulées, ressource en eau, etc.), reconstitution ou extrapolation de données, prédétermination de l'impact des actions anthropiques sur le milieu naturel, etc.

3.1.5.3. MODELES DE TRANSFORMATION PLUIES-DEBITS

Le schéma général de transformation des pluies en débits peut être séparé en deux parties : un premier sous-modèle, ou fonction de production, qui transforme les pluies observées, ou brutes, en pluies nettes, c'est-à-dire susceptibles de ruisseler ; un second sous-modèle, ou fonction de transfert, qui permet de "modeler" les pluies nettes, de manière à obtenir un hydrogramme de ruissellement (fig. 127).

3.1.5.3.1. FONCTION DE PRODUCTION

La fonction de production peut être définie de nombreuses manières. Elle consiste à prendre en compte les pertes subies par une pluie avant de ruisseler : interception par la végétation, infiltration dans les couches superficielles du sol, stockage dans les flaques, reprise par évaporation, percolation vers les aquifères. La méthode de la capacité d'absorption moyenne (paragraphe 3.1.4.), la méthode du coefficient de ruissellement ou la méthode du Soil Conservation Service (SCS) utilisée en France par le Cémagref pour des études de régionalisation des crues (méthode Socose) ne constituent que quelques exemples. P. Ribstein (1118) en cite de nombreuses autres, dont celle mise au point par G. Girard pour un modèle distribué, basée sur un réservoir et deux paramètres (1111).

La représentation du type "à réservoirs" est très souvent utilisée (1104, 1119) : modèles de Stanford, de O'Donnel, Crec (Cormary), Modglo (Girard), Modibi (Ibiza), GR2 ou GR3 (Cémagref), etc. Il faut préciser que, dans tous les cas, les concepts mis en jeu ne sont valables que sur des intervalles de temps relativement longs, journaliers par exemple.

Une autre approche consiste à calculer la lame ruisselée à partir de la mesure de la pluie moyenne et/ou d'autres variables, comme l'intensité maximale de précipitation sur une durée donnée ou un indice des précipitations antérieures (indice de Kohler : $I = \sum P_i \cdot K^{t_i}$ avec $K < 1$, où t_i est le temps séparant chaque averse antérieure de l'averse étudiée P_i ; ou un indice d'autres formes, par exemple : $I = \sum P_i / (t_i)^n$). L'estimation est faite, soit par un procédé graphique très souple comme celui des déviations résiduelles (Brunet-Moret, Bassin de Boundjouk, Cameroun - 1965), soit en utilisant des régressions multiples qui se prêtent mieux à l'emploi du calcul automatique (Chevallier, Mare d'Oursi - Burkina-Faso 1985, 1122).

On peut penser également à caractériser un bassin par l'infiltrabilité de chacun des types de sol qui le compose, afin de définir son aptitude au ruissellement. C'est de cette démarche que procèdent les mesures d'infiltration, par les méthodes Muntz et Porchet, préconisées par P. Dubreuil (paragraphe 2.5.2. et 2.5.3.), et celles effectuées plus tard au simulateur de pluie (Lafforgue, Valentin, Casenave, paragraphe 2.5.1.). De ces dernières, est issu le modèle dit "simulateur" qui se réduit à la seule fonction de production et qui s'applique, pour chaque événement pluvieux, à la totalité du bassin en composant linéairement les résultats obtenus sur les différentes zones homogènes (1102). Le passage de mesures effectuées à l'échelle de la parcelle de 1 m², à celles du phénomène étudié à l'échelle du bassin, rend nécessaire l'estimation d'un coefficient de calage par comparaison des valeurs calculées et des valeurs observées. Excepté en zone forestière, où une fonction de calage unique a été proposée (1001), il n'est pas possible, dans l'état actuel des recherches, d'utiliser les résultats du simulateur de pluie en l'absence d'observations hydrologiques à l'exutoire du bassin étudié. Il faut rappeler, de plus, que les relations proposées par Casenave et Valentin ne sont utilisables que dans les conditions définies dans le cadre d'un protocole précis (averses de fréquence annuelle à décennale - paragraphe 2.5.1.4.).

On peut enfin citer la relation linéaire, proposée par G. Girard (1109), entre lame ruisselée et hauteur de pluie corrigée d'un terme qui caractérise essentiellement l'état de saturation préalable des terrains. Elle s'applique au Sahel africain, où l'écoulement se limite au seul ruissellement.

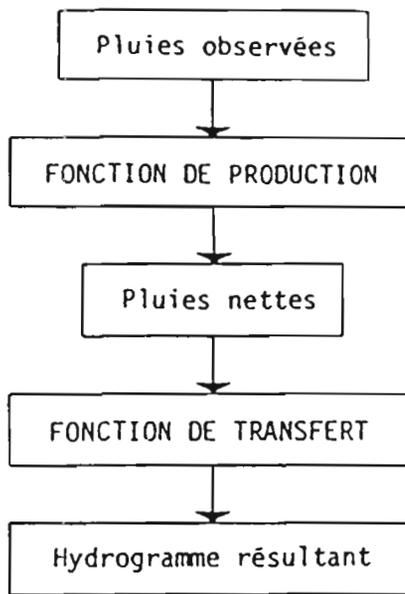


Fig- 127 - SCHEMA GENERAL DES MODELES DE TRANSFORMATION PLUIES / DEBITS

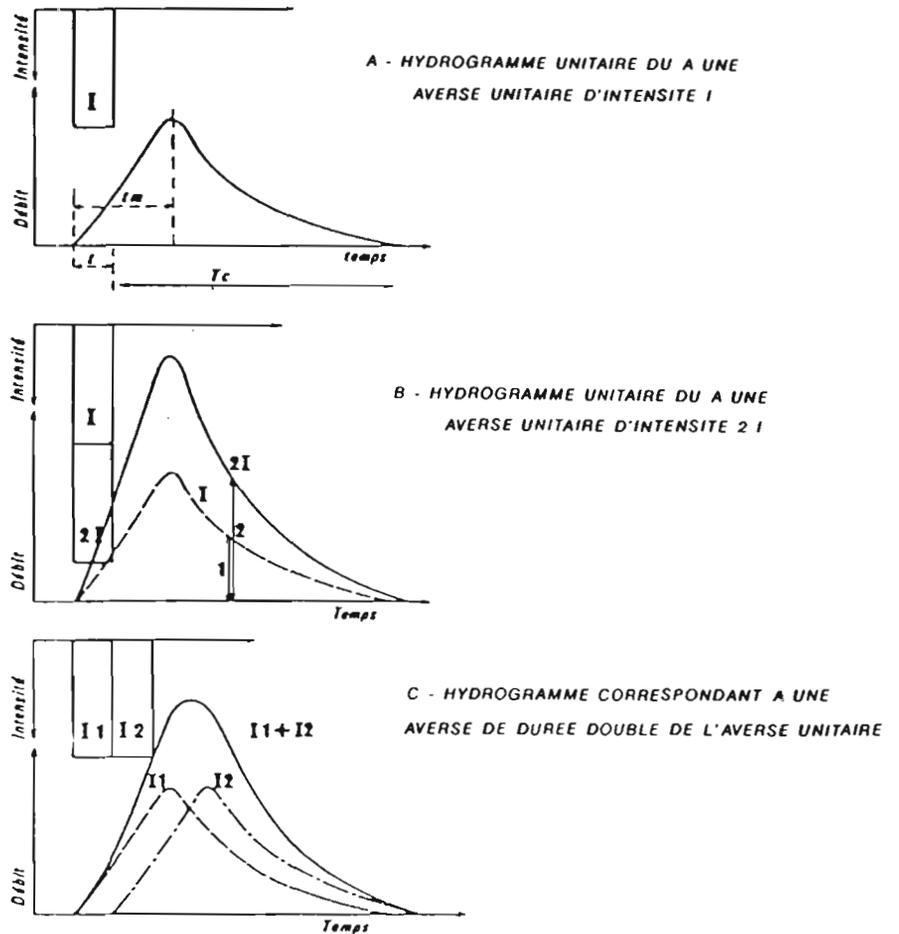


Fig- 128 - SCHEMA THEORIQUE DE L'HYDROGRAMME UNITAIRE (D'APRES P.DUBREUIL)

3.1.5.3.2. FONCTION DE TRANSFERT

Si de nombreuses fonctions de production, utilisées dans les modèles hydrologiques, tiennent compte de la non linéarité du processus de transformation des pluies en débits, les fonctions de transfert, ou de transformation des eaux superficielles, calculent généralement les débits en considérant les systèmes comme stationnaires et linéaires (ce qui est contraire aux lois de l'hydraulique). Il faut cependant souligner qu'à l'inverse de la fonction de production, les entrées de la fonction de transfert ne sont pas mesurées mais estimées (sortie du sous modèle de production), ce qui explique certaines approximations ou simplifications tolérées. Le choix de ces deux fonctions ne peut donc se faire sans une analyse de leur influence réciproque.

Parmi les modèles globaux de crues appliqués au petits bassins versants, les modèles de type "hydrogramme unitaire" sont certainement les plus utilisés, malgré certaines critiques faites aux hypothèses et aux concepts sur lesquels ils reposent.

La théorie de l'hydrogramme unitaire, formulée en 1932 par Sherman en analysant le ruissellement d'une pluie nette répartie uniformément sur l'ensemble d'un bassin, est fondée sur trois postulats :

- La durée du ruissellement est indépendante du volume ruisselé et elle est constante pour toute les pluies de même durée.
- Pour des pluies nettes de même durée que l'averse unitaire, les débits de pointes des hydrogrammes résultants sont proportionnels aux volumes ruisselés.
- Pour une pluie nette de durée n fois la durée de l'averse unitaire, l'hydrogramme résultant est la somme des hydrogrammes correspondant à chaque durée unitaire (fig. 128).

Les techniques d'identification de l'hydrogramme unitaire et les méthodes d'application ont été décrites par M. Roche (1035) et P. Dubreuil (1013). Il s'agit là de méthodes qui permettent de résoudre manuellement un problème relativement complexe de déconvolution : détermination de l'hydrogramme connaissant les entrées (pluie nette) et sorties (débit ruisselant). Certains ont suggéré, dans un souci de simplification difficilement tolérable dans de nombreuses applications, de représenter l'hydrogramme unitaire par un simple triangle. Les moyens de calculs actuellement disponibles ont permis à différents auteurs de proposer des solutions basées sur une définition analytique de la fonction de transfert. Dans son étude des modèles de crues appliqués aux petits bassins versants du Sahel africain, P. Ribstein (1118) analyse quatre expressions différentes :

- La DPFT (Différence Première de la Fonction de Transfert), proposée par Guillot et Duband, est une méthode directe, voisine de la méthode des moindres carrés, qui utilise les différences premières des débits. Le système à résoudre s'écrit :

$$[dq] = [Pn].[dh] \text{ en vecteurs,}$$

avec,

$$dq(k) = Q(k) - Q(k-1) \text{ la différence première de débit,}$$

P_n la pluie nette,

$$dh(k) = h(k) - h(k-1) \text{ la différence première de la fonction transfert.}$$

- Le modèle ARX de Bastin, dans lequel le transfert est représenté comme une cascade de réservoirs linéaires.
- l'hydrogramme de Nash, défini par les deux paramètres de la loi gamma incomplète dont la représentation conceptuelle est une cascade de réservoirs linéaires identiques, la pluie nette n'alimentant que le premier d'entre eux. Ce n'est qu'un cas particulier de l'équation aux différences obtenue par un modèle de type ARX.
- L'Hydrogramme Unitaire Géomorphologique (HUG) de Rodriguez - Iturbe et Valdès, basé sur l'identité entre l'Hydrogramme Unitaire Instantané (HUI) et la densité de probabilité des temps de parcours des particules d'eau injectées instantanément et uniformément sur tout le bassin. Le HUI s'exprime en fonction de la vitesse de ruissellement, ainsi que des rapports de longueur, de confluence et de surface définis par Horton. P. Ribstein, s'appuyant sur les travaux de Rosso, identifie le HUG à un hydrogramme de Nash dont les paramètres peuvent être reliés aux caractéristiques géomorphologiques

du bassin.

Dans les modèles distribués, le bassin versant est représenté par une juxtaposition de surfaces élémentaires ("mailles" ou sous-bassins) considérées, durant un certain intervalle de temps, comme un système indépendant (sous-modèle global ayant sa propre fonction de production et parfois même de transfert). Le transfert d'une surface élémentaire à une autre s'effectue en tenant compte de leurs caractéristiques physiographiques (altitude, structure du réseau hydrographique, etc.). Le principal inconvénient de ce type de modèles réside dans une mise en oeuvre assez lourde. Néanmoins, l'utilisation des techniques de télédétection (Mare d'Oursi - Burkina-Faso) alliée aux facilités offertes par les modèles numériques de terrain (MNT) devrait alléger, d'une manière sensible, les travaux essentiellement cartographiques de mise en pratique.

Parmi ces modèles, on peut citer celui mis au point en 1972 par Girard, Morin et Charbonneau, le modèle Jour de D. Ibiza, le modèle semi distribué Topmodel de K. Beven et P. Quinn, ou le modèle Swatch de H. Morel-Seytoux.

3.1.5.3.3. REMARQUES

Lorsque les bassins versants renferment des aquifères significatifs, les modèles de ruissellement ne permettent de simuler qu'une partie des débits observés aux exutoires. Le débit de base, voire le débit de ruissellement retardé, ne peut plus cependant, dans ce cas, être négligé. Si de nombreux modèles globaux, particulièrement les modèles à réservoirs, permettent de facilement prendre en compte ces apports, les modèles distribués demandent, quant à eux, une extension de la discrétisation spatiale dans le sens vertical en mettant en place la structure maillée du domaine superficiel sur les couches du domaine souterrain. Le modèle couplé de G. Girard, E. Ledoux et J.P. Villeneuve (1111) en est un exemple.

L'utilisation de modèles globaux, pour la prédétermination de phénomènes de faibles fréquences (les crues par exemple) ou l'extrapolation de données hydrométriques, s'appuie sur de longues séries pluviométriques observées en un, ou plusieurs, site(s) de référence. Se pose donc, pour l'estimation de la pluie moyenne sur le bassin, la difficulté de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations. En Afrique de l'Ouest, cet aspect a été abordé par la définition d'un coefficient d'abattement K qui permet de calculer, pour une fréquence donnée, la pluie moyenne Pm sur le bassin, à partir de la pluie ponctuelle P de même probabilité ($P_m = K \cdot P$).

G. Vuillaume (328) propose une équation dans laquelle le coefficient d'abattement dépend de trois variables explicatives : la hauteur pluviométrique annuelle moyenne P (mm), la superficie du bassin S (km²), et la période de retour choisie r (années). Cette formule empirique a été obtenue à partir des données recueillies sur plusieurs bassins africains, en se limitant toutefois aux pluies journalières :

$$K = 1 - (9 \cdot \log r - 42 \cdot 10^{-3} \cdot P + 152) \cdot 10^{-3} \cdot \log S.$$

3.2. RAPPORTS ET PUBLICATIONS

3.2.1. PROCES VERBAL D'INSTALLATION

Au terme des diverses installations effectuées sur l'ensemble du système de bassins étudiés, le responsable des études devra rédiger un véritable procès-verbal, dans lequel seront réunis tous les éléments descriptifs de la localisation des équipements, des caractéristiques des différents aménagements et du programme d'exploitation du bassin.

- **Une première partie** précisera :
 - . le pays : par exemple, Côte d'Ivoire ;
 - . la région administrative : sous-préfecture de Toumadi ;
 - . le bassin hydrographique : Bandama ;
 - . le sous bassin : N'zi ;
 - . le nom de l'ensemble de bassins représentatifs : Sakassou ;
 - . les coordonnées géographiques : encadrement ou barycentre ;
 - . la date de mise en service ;
 - . éventuellement, la durée de fonctionnement prévue.

Une carte à petite échelle situera le dispositif dans le contexte géographique national ou/et éventuellement régional (fig. 129 et fig. 183).

- **Une deuxième partie** contiendra l'inventaire de tous les documents cartographiques disponibles :
 - . photographies aériennes : référence, date, échelle approximative, qualité ;
 - . images satellitaires : mêmes commentaires ;
 - . cartes topographiques : référence, date, échelle ;
 - . levés topographiques effectués : zones ou installations relevées, moyens utilisés, échelle du plan établi, rattachement ou non au nivellement général ;
 - . autres documents : photoplans par exemple ;
 - . cartes thématiques.
- **Une troisième partie** concernera les réseaux de mesures et d'observations.

1. Réseau de stations hydrométriques

Le nombre total de stations sera indiqué, et pour chacune d'entre elles seront donnés :

- * sa désignation : nom et code ;
- * le nom du cours d'eau sur lequel elle est installée ;
- * sa position géographique : coordonnées et altitude ;
- * la surface du bassin versant qu'elle contrôle ;
- * sa localisation : en faisant référence à une confluence, un chemin d'accès, divers repères, des distances (un plan d'accès, éventuellement sommaire, sera fourni) ;
- * le type : écoulement naturel ou aménagé ;
- * le dispositif de contrôle : une description en sera faite et un plan coté joint ;

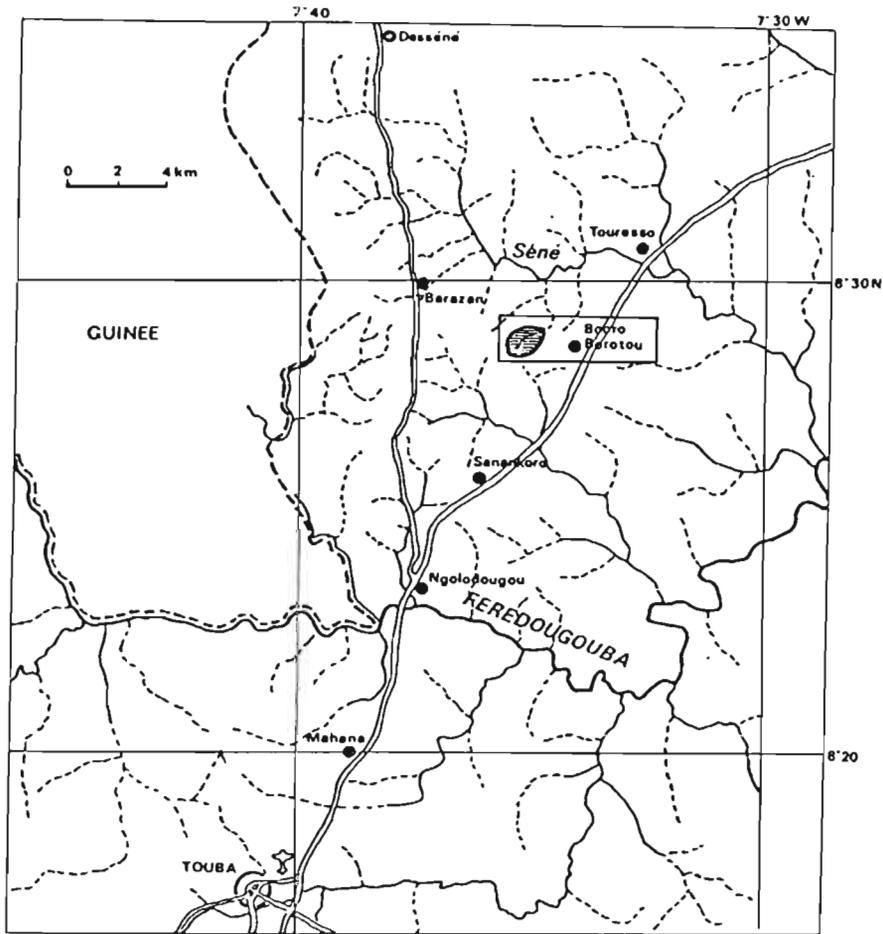


Fig-129 - CARTE DE SITUATION DU BASSIN DE BOORO-BOROTOU (COTE-D'IVOIRE)

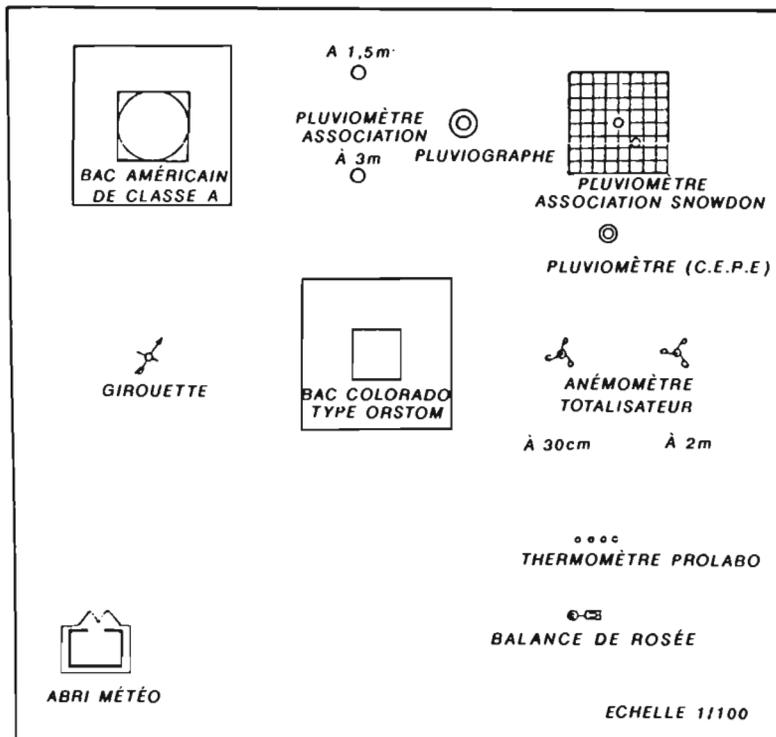


Fig-130 - STATION CLIMATOLOGIQUE (1-9-1974) ZITA-TELMAN (TUNISIE)

- * les échelles : nombre d'éléments métriques et/ou de réglés, lieu et dispositif d'installation, altitude (exacte ou relative) du zéro, altitude de la borne repère ;
- * le limnigraphe : type (capteur et enregistreur), installation, fonctionnement ;
- * la (ou les) station(s) de jaugeages : implantation, équipement, moyens de mesures utilisés : en étiage, en eaux moyennes et en crue ;

(L'ensemble du dispositif : échelles, limnigraphe et station(s) de jaugeages, devra faire l'objet d'un croquis où figurera, impérativement, la borne de rattachement du zéro de l'échelle. Un plan de repérage des verticales de mesures pourra également être établi. Ce plan est nécessaire si les jaugeages sont réalisés par la méthode des verticales indépendantes).

- * l'observateur : niveau de qualification (recrutement local ou non), activités (fréquences des lectures d'échelle, contrôle du limnigraphe), identité ;
- * la date de mise en service.

2. Réseau pluviométrique

Le nombre total de postes sera précisé ainsi que la répartition par bassin et sous-bassin. Pour chacun des postes seront indiqués :

- * sa désignation : nom et code ;
- * sa position géographique : coordonnées et altitude ;
- * le type : pluviographe ou pluviomètre (on donnera la hauteur au dessus du sol ainsi que l'aire de la surface de captation avec, éventuellement, le système de protection) ;
- * le fonctionnement :
 - . pour un pluviomètre : la fréquence des relevés,
 - . pour un pluviographe : son système de mesure (augets basculeurs, siphon, etc.) et son système d'enregistrement (diagrammes journaliers, hebdomadaires ou à bande, mémoire informatique) ;
- * la date de mise en service ;
- * l'observateur : identité, qualification et activités.

3. Station climatologique

Si plusieurs stations sont installées, il sera fourni pour chacune d'entre elles :

- * sa désignation : nom et code ;
- * sa position géographique : coordonnées et altitude ;
- * sa localisation : description sommaire (l'orientation par rapport aux vents dominant devra être précisée) ;
- * son équipement :
 - . appareillage sous abri,
 - . appareillage hors abri,

(pour chaque instrument, le type de capteur et éventuellement le type d'enregistrement seront précisés) ;

- * les observations : horaires des mesures complètes et partielles ;
- * la date de mise en service ;
- * l'observateur : qualification, identité.

Un plan des installations sera joint (fig. 130).

4. Réseau piézométrique

Nombre de puits ou piézomètres, avec leur répartition par bassin et sous-bassin. Pour chaque ouvrage figureront :

- * sa désignation : nom (éventuellement) et code ;
- * sa position géographique : coordonnées et altitude ;
- * le type : puits, piézomètre de petit diamètre, fouille, source ;
- * son aménagement : profondeur, diamètre ;
 - . pour les puits : cuvelés ou non, avec margelle (hauteur au-dessus du sol) ou sans margelle, altitude du repère,
 - . pour les piézomètres : type de tubage et de crépine, hauteur du tubage au-dessus du sol, altitude de la borne repère ;
 - . pour les fouilles et les sources : type d'aménagement, altitude du repère ;
- * ses caractéristiques : résultats d'essais de pompage, de sondages électriques, profils stratigraphiques ;
- * le fonctionnement :
 - . fréquence des relevés,
 - . enregistreur : type de capteur, type d'enregistrement (diagrammes ou mémoire) ;
- * la date de mise en service ;
- * l'observateur : identité, qualification, activités.

Pour les différents réseaux d'observations (hydrométriques, pluviométriques et piézométriques), des tableaux synthétiques et une carte d'implantation résumeront ces différentes informations (fig. 131 et 132).

5. Transport des matières solides et des matières dissoutes

Lorsque les mesures et prélèvements sont effectués à hauteur d'une station hydrométrique, il suffira de rappeler sa désignation. On précisera, également :

- * les mesures effectuées : transport en suspension, charriage, matières dissoutes ;
- * les dispositifs utilisés : fosse à sédiments, type de préleveur automatique, type de prélèvement manuel ;
- * le fonctionnement : fréquence des mesures complètes ou partielles ;
- * la date de mise en service ;
- * l'observateur : identité, qualification, activités.

Pour les mesures effectuées sur parcelles. Le nombre total de parcelles sera indiqué et pour chacune d'entre elles :

- * sa désignation : généralement un numéro ;
- * sa position géographique : coordonnées et altitude ;
- * ses caractéristiques : longueur, largeur, pente, lithologie, états de surface ;
- * les mesures effectuées : charriage, suspension, matières dissoutes ;
- * les observations connexes : humidité du sol, couvert végétal, pratiques culturales, pluviométrie ;

CARACTERISTIQUES DES STATIONS HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT NORD

NOM DES STATIONS	STATION AVAL	STATION AMONT	STATION ARGILES CALCAIRES	STATION DES EUCALYPTUS
Numéro de code	48359021	48359022	48359023	48359024
Coordonnées station en grades	41,2413 N 7,8411 E	41,2147 N 7,8518 E	41,2223 N 7,8625 E	41,2224 N 7,8362 E
Coordonnées station en degré	37°07'02" N 7°03'25" E	37°05'36" N 7°04'00" E	37°06'00" N 7°04'35" E	37°06'01" N 7°03'10" E
Coordonnées station en Lambert	423,810 (N) 454,765 (E)	421,135 (N) 455,570 (E)	421,890 (N) 456,450 (E)	421,515 (N) 454,320 (E)
Altitude en m	108	177	193	185
Surface du bassin versant	13,2 km ²	3,24 km ²	0,425 km ²	0,311 km ²
Date de mise en service	Septembre 73 - Oct. 1974	Octobre 1973	Octobre 1974	Octobre 1974
Type LIÉGNIAPHE et VITESSE	OTT X 24 h	OTT X 24 h	OTT X 24 h	OTT X 24 h
Réduction Hauteur	1/5	1/5	1/5	1/5
Type Station	Stabilisation du lit mineur	Canalisé et contrôlé	Canalisé et contrôlé	Canalisé et contrôlé
Équipement pluviométrique Nb et densité	32 1 par 0,5 km ²	6 1 par 0,6 km ²	3 1 par 0,14 km ²	2 1 par 0,16 km ²
Équipement pluviographique	4	2	1 à 500 m.	1 à 2000 m.
Coefficients de THIESSEN	TABLEAU III.2	TABLEAU III.2	TABLEAU III.2	TABLEAU III.2

RESEAU PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN EST

Désignation de l'appareil	Repérage sur le terrain			Coordonnées (degrés)		Altitude bague (m)	Hauteur du-dessus du sol (m)	Date de mise en service
	Piquet origine	Distance (m)	Azimut (gr)	lat. N	long. W			
P1	S 11	60,90	70,6	6° 33' 38"	4° 49' 21"	110,8	1,41	5.5.72
P2	Q 10	33,75	369,9	6° 33' 42"	4° 49' 33"	118,13	1,48	5.5.72
P3	Q 6	12,30	338,8	6° 33' 53"	4° 49' 35"	120,43	1,44	4.5.72
P4	Q 4	52,40	287,2	6° 33' 59"	4° 49' 36"	121,51	1,45	4.5.72
P5	S 3	38,00	33,5	6° 34' 04"	4° 49' 27"	121,36	1,43	4.5.72
P6	V 5	53,00	323,5	6° 33' 58"	4° 49' 19"	116,89	1,51	4.5.72
P7	X 7	18,40	252,0	6° 33' 51"	4° 49' 11"	115,30	1,52	4.5.72
P8	W 10	45,85	85,4	6° 33' 42"	4° 49' 12"	107,14	1,54	4.5.72
P9	U 7	32,45	126,2	6° 33' 51"	4° 49' 19"	108,73	1,49	4.5.72
P10	S 8	28,00	349,2	6° 33' 47"	4° 49' 28"	112,22	1,47	4.5.72
PE ₁ (Enr.)	T 10	47,65	53,6	6° 33' 41"	4° 49' 24"	102,55	1,01	4.5.72
PE ₂ (Enr.)	R 5	41,30	183,7	6° 33' 55"	4° 49' 30"	112,35	1,02	4.5.72

Fig-131 - RESEAUX HYDROMETRIQUE ET PLUVIOMETRIQUE
BASSIN DE SAKASSOU (COTE D'IVOIRE)

- * les dispositifs utilisés et leurs caractéristiques : fosse, partiteur, déversoir, préleveur automatique ;
- * le fonctionnement : fréquence des mesures ;
- * la date de mise en service ;
- * le responsable : identité, qualification, activités.

Un plan du (ou des) dispositif(s) sera fourni (fig. 133).

6. Humidité du sol

Nombre total de sites où sont effectuées les mesures, avec pour chaque site :

- * sa désignation : généralement un numéro ;
- * sa position géographique : coordonnées, altitude ;
- * le type de mesures : gravimétrique, neutronique, tensiométrique, choc thermique, autres ;
- * les caractéristiques du dispositif : profondeur totale, profondeur de chaque mesure ;
- * le fonctionnement :
 - . fréquence des mesures,
 - . enregistreur : diagramme ou mémoire ;
- * la date de mise en service.

3.2.2. PREPARATION DES RAPPORTS DE CAMPAGNES

Au cours de chaque campagne saisonnière de mesures, un volume important de données brutes d'observations est accumulé. Il doit être traité dans les meilleurs délais, afin de juger de l'état d'avancement des études et surtout de l'opportunité de prendre, ou modifier, certaines orientations. L'application d'un plan de travail ou d'expérimentation ne signifie pas, en effet, que l'exploitation d'un BVRE ne puisse être dynamique et évolutive.

Le bilan des activités ainsi que les résultats bruts ou peu élaborés de chaque campagne feront l'objet d'un rapport dont la structure générale peut varier au cours de l'avancement des études. Certaines parties du plan proposé ci-après ne figureront donc que dans un seul des rapports, elles sont marquées du symbole * :

- 1 - **Une introduction** où sont rappelés les motivations, antécédents et objectifs de l'étude.
- 2* - **Une première partie** permet de situer le bassin dans son contexte physico-climatique régional :
 - ***Situation géographique*** : coordonnées, proximité de certains centres urbains ou agricoles, principales voies de communications, etc.
 - ***Géologie*** : grandes unités stratigraphiques et lithologiques, les accidents tectoniques (failles, pendages principaux - fig. 134).
 - ***Pédologie*** : description des principaux sols (fig. 135).
 - ***Végétation*** : grands types de couvert végétal.
 - ***Relief et hydrographie*** : description des grandes unités géomorphologiques et du chevelu hydrographique (principales confluences, orientation générale, forme du chevelu). Le profil en long des principaux cours d'eau pourra être présenté.

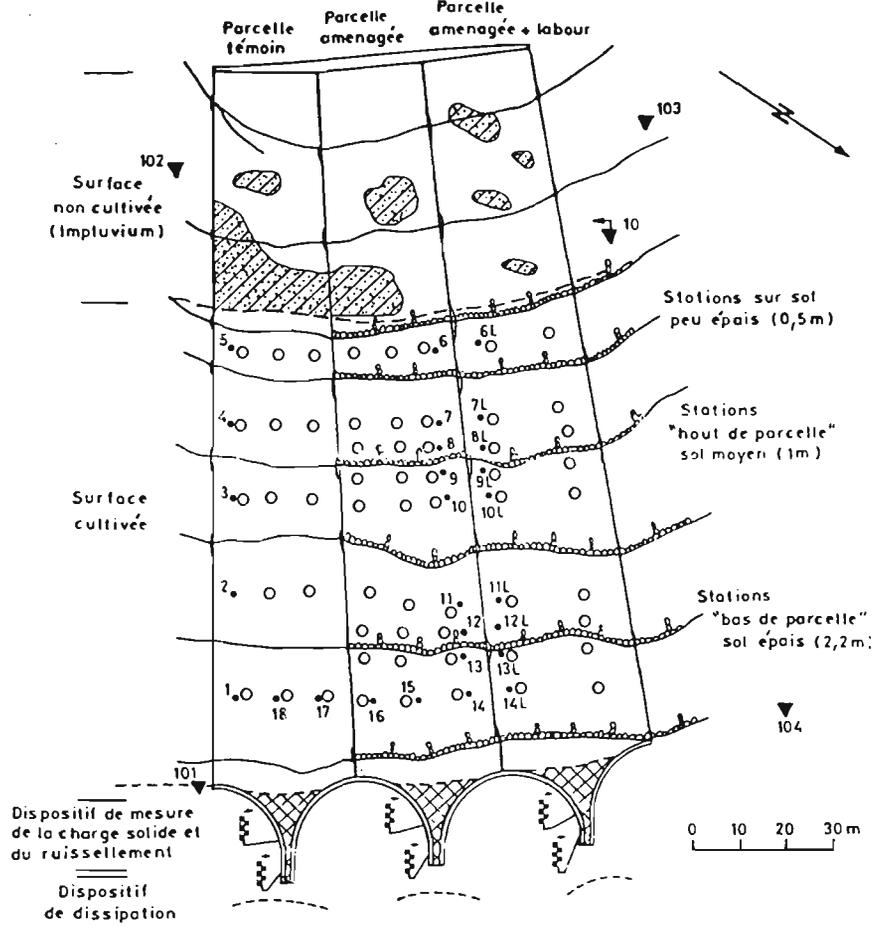


Fig-133 - PARCELLES D'ÉROSION - BASSIN DE BIDI — (BURKINA FASO-1985) —

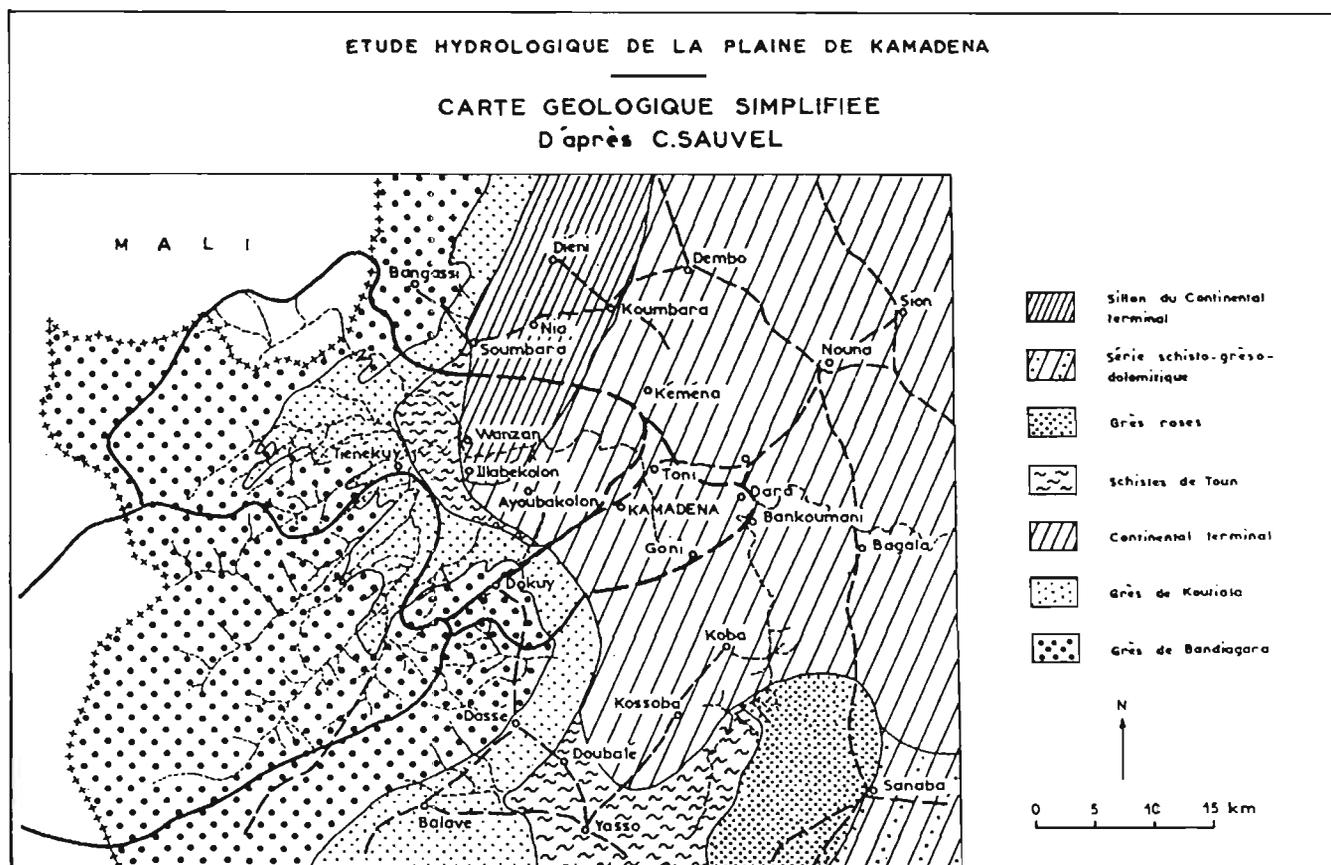


Fig-134 - ETUDE DE LA PLAINE DE KAMADENA (BURKINA FASO)

ESQUISSE PEDOLOGIQUE
D'APRES LEPRUN ET MOREAU

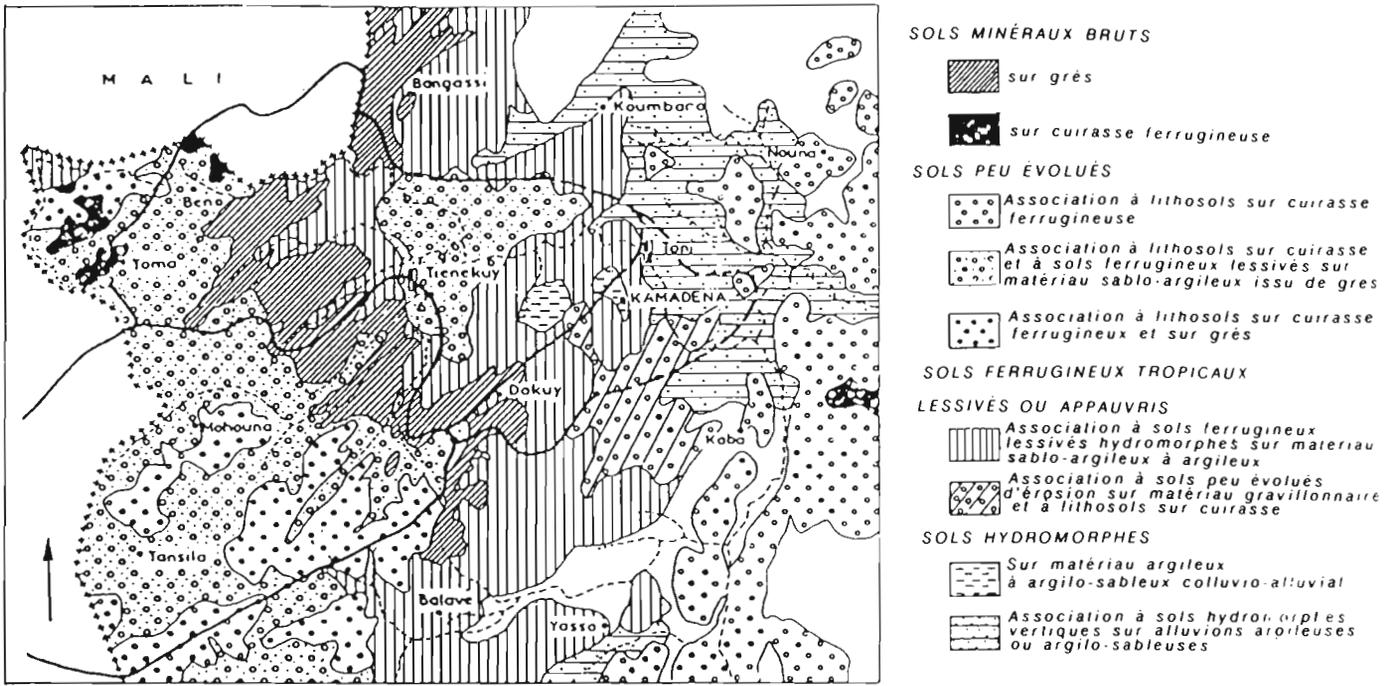


Fig-135 - ETUDE DE LA PLAINE DE KAMADENA (BURKINA FASO)

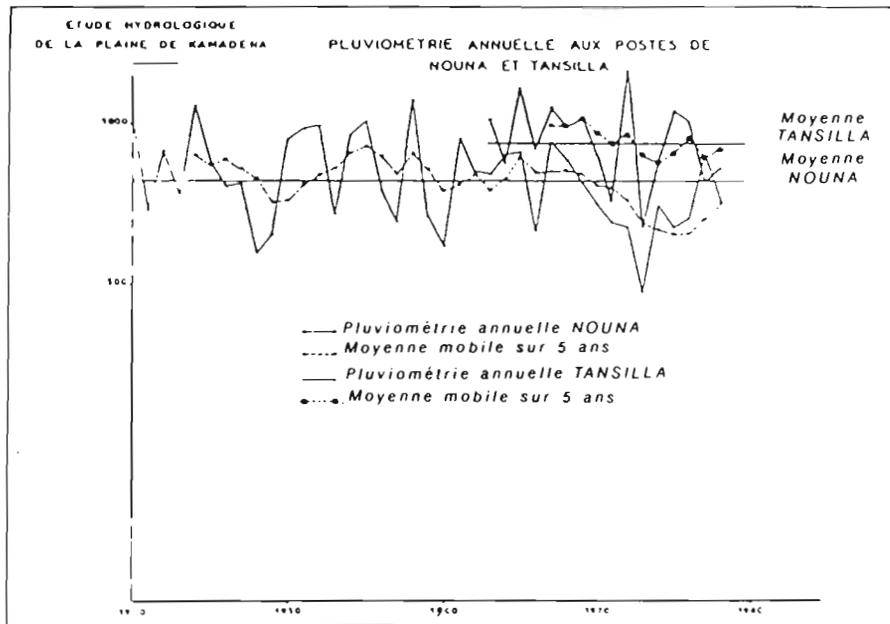
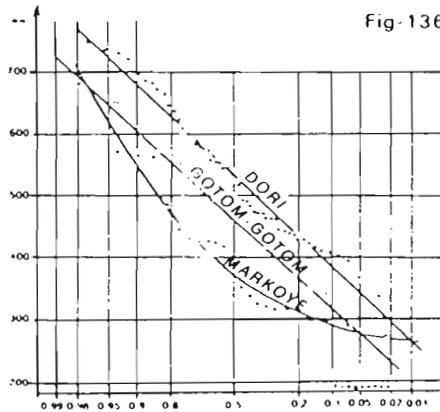


Fig-136 - ETUDE DE LA PLAINE DE KAMADENA



Période de retour	Décennale sèche	Annuelle	Décennale humide
Dori (53 années)	385	535	684
Gotom-Gotom (22 années)	317	462	606
Markoye (23 années)	288	375	551

Ajustement statistique des hauteurs de précipitation annuelles

Fig-137 - ETUDE DE LA MARE D'OURSIS

- **Climat** : défini tout d'abord d'une manière très générale (classification proposée par P. Dubreuil, par exemple - 113). Puis d'une manière plus précise, à partir des observations d'une ou de différentes stations du réseau synoptique.

* *Précipitations* :

- . hauteurs pluviométriques annuelles : étude des séquences chronologiques (fig. 136), étude statistique (fig. 137) pour l'estimation des totaux de différentes fréquences (l'ajustement à une loi statistique pourra être faite à l'aide d'un logiciel approprié, par exemple les logiciels Dixloi ou Safarhy développés par l'Orstom, ou d'autres logiciels commercialisés).
- . hauteurs des précipitations mensuelles dont la distribution au cours de l'année permet de définir le régime pluviométrique. Elles pourront également faire l'objet d'ajustements statistiques (fig. 138).
- . hauteurs pluviométriques journalières dont l'étude statistique fournit les valeurs de diverses fréquences qui seront souvent assimilées aux averses de mêmes fréquences (fig. 139). Une étude de la répartition du nombre de jours de pluie au niveau mensuel, saisonnier et annuel sera également faite.

Il est rare que l'on dispose au niveau régional de l'information nécessaire, sous une forme suffisamment pratique (sur support magnétique, par exemple), pour étudier la forme des averses. Par contre, il est souvent possible d'établir les relations : Intensité-Durée-Fréquence (fig. 140).

- * *Températures* : représentées par les moyennes mensuelles des valeurs maximales et minimales journalières, ainsi que par les moyennes mensuelles de leur demi-somme (représentatives des températures journalières - fig. 141).
- * *Humidité relative et tension de vapeur* : également représentées par les moyennes mensuelles (fig. 142).
- * *Vent* : défini par les vitesses moyennes mensuelles et la fréquence moyenne annuelle de la direction d'origine (fig. 143).
- * *Evaporation* : de préférence les hauteurs mensuelles et annuelles mesurées sur bac (fig. 144).
- * *Insolation et/ou radiations solaires* : lorsque ces données sont disponibles (fig. 145).

Remarque :

L'analyse des observations pluviométriques, d'une ou de plusieurs stations de référence, représente une phase importante des études, car c'est par l'intermédiaire de ces données que se fait l'extension dans le temps des observations hydrométriques. Les informations traitées devront donc avoir fait l'objet d'une critique minutieuse, qui ne peut souvent être réalisée qu'à l'échelle régionale. Ce travail a été accompli, de manière systématique par l'Orstom, pour certains Etats de l'Afrique de l'Ouest et du Centre (Côte d'Ivoire, Cameroun, Gabon, Togo, Bénin, par exemple).

Les autres paramètres climatologiques permettent non seulement de caractériser l'environnement climatique de la zone d'étude, mais aussi d'estimer l'évapotranspiration potentielle, souvent utilisée dans les modèles de simulation hydrologique (paragraphes : 2.3.9. et 3.1.5.3.).

- 3* - **Une deuxième partie** rassemble les caractéristiques physiques de chacun des bassins et sous-bassins (paragraphes : 2.9.2. et fig. 146) :

- Surface, périmètre, indice de compacité, caractéristiques du rectangle équivalent (Longueur - Largeur).
- Relief : courbe hypsométrique, profil en long des cours d'eau, indice de pente de Roche, indice de pente global, dénivelée spécifique, classe de relief, pente moyenne (si les moyens cartographiques et de traitement le permettent).

Poste de Touba

Totals pluviométriques mensuels

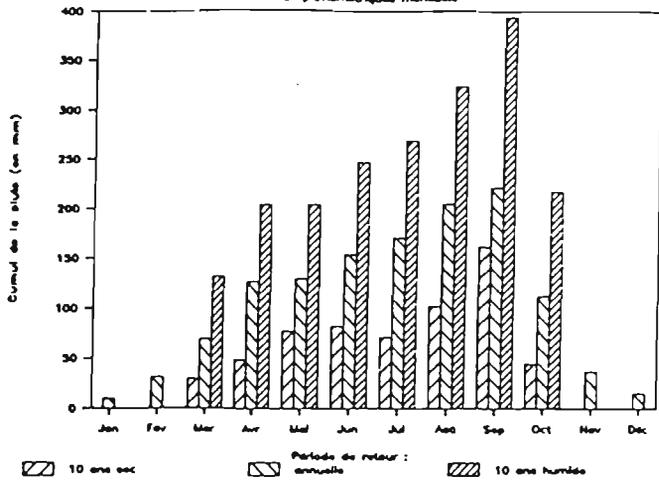


Fig-138 - ETUDE DE BOORO-BOROTOU

Fréquence au dépassement	NOUNA en mm	TANSILLA en mm
1/1 an	59	61
1/2 ans	70	73
1/5 ans	85	88
1/10 ans	96	100
1/20 ans	107	112
1/50 ans	123	(128)
1/100 ans	134	(140)

Fig-139 - PLUIES JOURNALIERES (PLAINE DE KAMADENA , BURKINA FASO)

Les courbes sont complétées par celles obtenues pour des durées de 24 heures et 72 heures au poste de Gorom-Gorom (1971-1980).

Nous avons également évalué les mêmes relations hauteurs-durée-fréquences à partir des abeques établies par BRUNET-MORET (1963) en les transposant pour les valeurs de pluies journalières à Gorom-Gorom (résultats en annexe). On observe des valeurs légèrement plus fortes qu'à Jalafanka. Rappelons à ce propos que les 6 années d'études de la Mare d'Oursi correspondent à une période de pluviosités faibles et qu'inversement le travail de BRUNET-MORET correspondait à une époque exorbitante.

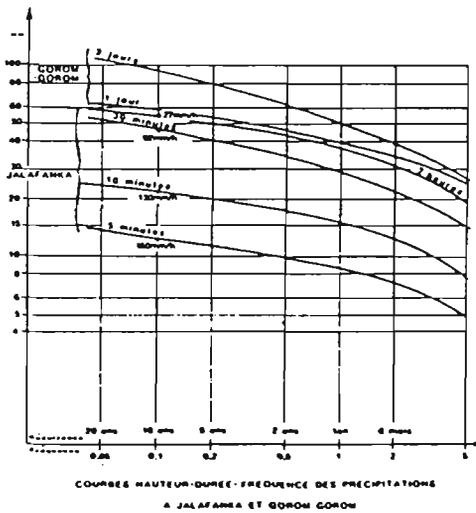


Fig-140 - ETUDE DE LA MARE D'OURSI (BURKINA FASO)

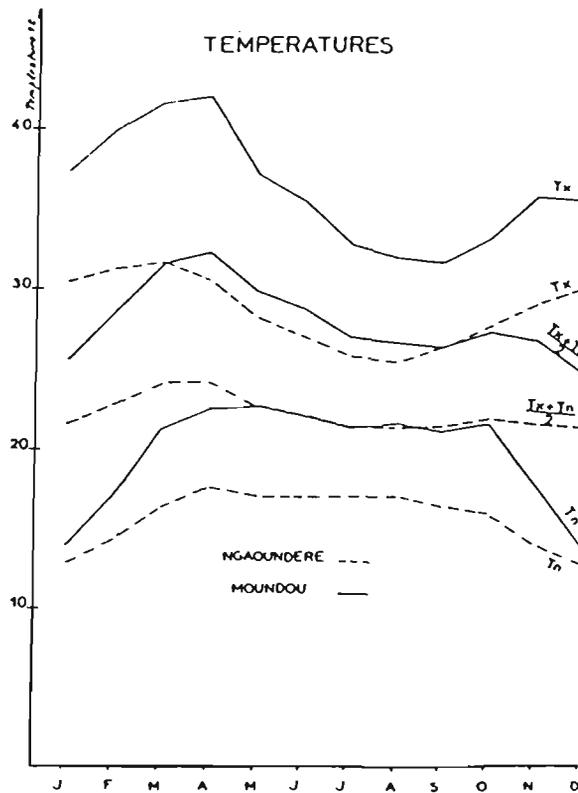


Fig-141 - ETUDE DE TOUBORO (CAMEROUN)

HUMIDITE - Tension de vapeur

NGAOUNDERE (période 1950 - 1960)

Humidité %	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
Max. absolu	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Moy. des max. journ.	60	57	78	96	98	99	100	99	100	99	91	74	88
Moy. des max. et min.	38	36	47	70	75	78	80	80	79	73	61	48	64
Moy. des min. journ.	17	15	25	45	52	56	61	60	57	48	30	22	41
Min. Absolu	9	9	9	12	14	38	44	42	34	27	12	12	9
Tension de vapeur moyenne	8,5	9,2	14,3	19,6	20,7	20,4	20,4	20,8	20,3	20,0	15,3	10,8	16,7

Fig-142 - ETUDE DE TOUBORO (CAMEROUN)

JALAFANKA

vitesse moyenne mensuelle et fréquence moyenne annuelle de la direction du vent

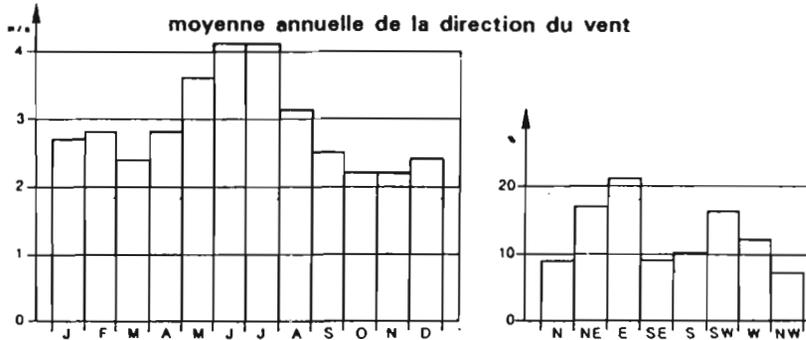


Fig-143 - ETUDE DE LA MARE D'OURSI (BURKINA FASO)

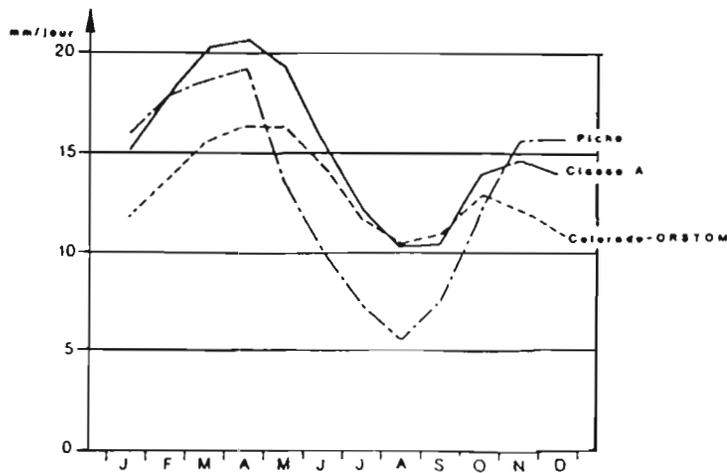


Fig-144 - EVAPORATION MENSUELLE, ETUDE DE LA MARE D'OURSI (BURKINA FASO)

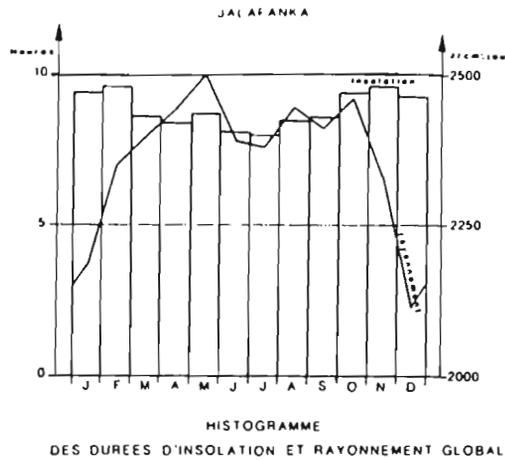


Fig - 145 - ETUDE DE LA MARE D'OURSIS (BURKINA.FASO)

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES ET
MORPHOLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS DE SAKASSOU

Bassin	Grand B.V.	B.V. Est	B.V. Ouest
N° Code recueil	IVO 14	IVO 14 A	IVO 14 B
N° Code mécanographique	09019141	09019142	09019143
Superficie A (km ²)	26,2	0,5525	0,6306
Périmètre P (km)	24,6	3,05	3,0
Indice de compacité k _c	1,33	1,13	1,07
Longueur du rectangle équivalent L	9,33	0,753	0,794
Largeur du rectangle équivalent l	2,64	0,754	0,794
Altitude maximale (m)	143,0	124,1	126,0
Altitude minimale (m) : cote du seuil	67,1	96,57	101,83
Altitude moyenne (m)	107,0	111,6	116,2
Indice de pente de ROCHE I _p	0,083	0,184	0,170
Dénivelée D (m)	48,0	20,0	18,0
Indice global de pente I _g	7,5	26,6	22,7
Dénivelée spécifique D _s	38,4	19,2	18,0
Longueur du thalweg principal L _x (km)	9,5	0,8	0,8
Pente moyenne du cours d'eau principal (%)	0,51	2,50	2,25
Densité de drainage D _d	2,21	2,30	2,03
Rapport de confluence R _c	3,16	-	-
Rapport de longueur R _l	2,51	-	-
Hypsométrie (%)			
60 m	100,0		
70 m	99,9		
80 m	96,7		
90 m	85,1		
95 m		100,0	
96 m		99,3	
100 m	69,9	95,4	100,0
102 m		90,2	99,8
104 m		82,9	96,1
106 m		75,4	94,8
108 m		67,0	87,5
110 m		57,4	79,8
112 m	37,8	48,3	70,8
114 m		37,3	61,6
116 m		25,6	51,0
118 m		15,7	40,5
120 m		6,1	30,6
122 m	18,5	1,6	21,0
124 m		0,3	5,6
130 m	4,7		
140 m			

Fig- 146 - ETUDE DE SAKASSOU (COTE D'IVOIRE)

Pluies moyennes sur les bassins
De THYSSE KAYMOR-Année 1968

DATE	S1	S2	S3	S4	S5
26-Mai	16,7	17,1	19,1	35	15,6
TOTAL-MAI	16,7	17,1	19,1	35	15,6
12-Jui				2,4	2,8
20-Jui				6,5	5
21-Jui	5,3	4,7	3,5	6,5	5
23-Jui	14,8	13,2	7,1	13	12
24-Jui	16,4	19,5	12,0	22	20
TOTAL-JUI	36,5	40,0	27,5	50,4	44,8
2-Jui	4,0	1,9	1,0	1,9	2
13-Jui	79,2	82,9	45,9	84	84
15-Jui	19,4	20,7	9,8	18	19,3
16-Jui	4,1	4,2	2,1	3,9	5
21-Jui	11,4	12,5	7,4	13,5	11,5
23-Jui	0,1	0,6	0,5	0,9	0,7
28-Jui	89,1	64,6	32,2	59	64
29-Jui	0,5	2,7	1,0	1,9	2,7
30-Jui	3,3	1,7	0,7	1,3	1,4
31-Jui	1,7	0,7	0,5	1	0,9
TOTAL-JUI	212,6	192,4	101,2	185,4	191,6
1-Aoû	64,3	31,1	16,9	31	32
2-Aoû	48,8	48,7	24,6	45	49
3-Aoû	1,1	1,8	0,8	1,5	2
4-Aoû	8,4	6,3	1,9	3,5	5,5
5-Aoû	2,8	6,7	3,8	7	8
8-Aoû	33,0	32,3	15,8	29	33
14-Aoû	7,6	27,7	15,0	27,5	41
15-Aoû	2,9	2,0	1,3	2,3	3
16-Aoû	13,6	11,3	6,6	12,1	11,2
17-Aoû	23,0	30,2	19,1	35	30,4
18-Aoû	24,3	28,1	15,8	28,9	22,5
19-Aoû	25,4	46,1	28,1	51,5	58,1
20-Aoû	6,6	11,0	5,9	10,8	13,1
21-Aoû	5,2	8,7	6,6	12	10
22-Aoû	26,0	23,9	13,7	25,1	25,2
24-Aoû	5,8	6,7	3,4	6,3	6,2
26-Aoû	43,0	48,6	26,8	49	49
27-Aoû	10,1	7,7	4,2	7,7	7,7
28-Aoû	4,1	4,2	2,6	4,8	5,7
29-Aoû	36,1	31,1	18,6	34	32
30-Aoû	4,6	5,6	3,3	6,1	5,9
31-Aoû	3,1	5,5	1,8	3,3	4,5
TOTAL-AOÛ	394,8	425,4	236,6	433,4	480
1-Sep	2,9	7,6	4,2	7,7	9,7
7-Sep	4,5	6,6	7,0	12,8	6,7
8-Sep	18,1	14,4	9,3	17	15,3
12-Sep	2,3	1,0	3,5	6,5	1,1
14-Sep	19,2	14,6	8,7	16	15
15-Sep	32,4	34,1	15,8	29	37
16-Sep	0,8	1,0	0,6	1,1	1,2
18-Sep	15,8	40,0	23,5	43	40,5
19-Sep	13,8	21,8	14,5	26,5	19,5
21-Sep	16,0	19,5	11,5	21	17
23-Sep	2,0	1,3	0,7	1,2	1,7
29-Sep	2,5	2,6	0,0		
TOTAL-SEP	132,1	164,9	99,3	181,8	164,7
3-Oct	23,4	30,6	21,8	40	32
4-Oct	0,6	2,2	1,4	2,5	2,6
TOTAL-OCT	23,9	32,9	23,2	42,5	34,6
TOTAL-1968	815,4	872,8	826,9	928,5	811,2

Fig-147 - PLUIES MOYENNES

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Bassin													
BV ₁ = 4,33 km ²	0	0	(17)	(157)	234	252	238	399	231	212	0	0	1 740
BV ₂ = 14,0 km ²	0	0	(17)	(157)	267	280	229	312	240	243	0	0	1 745
BV ₃ = 32,6 km ²	0	0	(17)	(157)	249	247	234	327	245	235	0	0	1 711
BV ₄ = 76 km ²	0	0	(17)	(143)	(245)	240	234	399	260	238	0	0	1 776
BV ₅ = 126 km ²	0	0	(17)	(143)	(245)	234	216	400	256	220	0	0	1 731

Fig-148 - PLUVIOMETRIES MOYENNES - BASSIN DU RISSO (CAMEROUN)

- Paramètres morphométriques (éventuellement) : rapports de longueur et de confluence, densité de drainage, longueur du plus long thalweg.
 - Aspect du réseau hydrographique : dendritique, en arêtes de poisson, en éventail, radial, etc.
- 4 - **Une troisième partie** regroupe tous les résultats des mesures et observations effectuées au cours de la campagne.

Des commentaires seront faits sur les difficultés rencontrées et la qualité des informations recueillies : relevés des observateurs, enregistrements (diagrammes ou mémoires), mesures particulières.

- **Pluviométrie**

Une carte du réseau pluviométrique, où figureront les limites des différents bassins, sera établie.

Tous les changements intervenus dans la distribution des sites d'implantation ou dans les équipements devront être signalés.

L'archivage informatique des enregistrements pluviographiques rend inutile leur publication, par contre des tableaux récapitulatifs des hauteurs pluviométriques journalières, mensuelles et annuelles seront joints.

Les relevés effectués à la station de référence permettront d'évaluer l'abondance pluviométrique de l'année ou de la saison écoulée en comparant, mois par mois par exemple, les hauteurs pluviométriques observées à une valeur de référence qui sera, généralement, la hauteur de fréquence médiane (de préférence à la moyenne, principalement dans les zones à faible pluviosité).

Sur chaque bassin, la hauteur pluviométrique moyenne sera calculée pour différents intervalles de temps (paragraphe 3.1.4.) :

- . hauteurs journalières (fig. 147) et averse supérieure à un certain seuil défini en fonction du contexte physico-climatique ;
- . hauteurs mensuelles (fig. 148) ;
- . hauteurs annuelles (fig. 148).

Des représentations cartographiques (isohyètes) pourront accompagner ces résultats (fig. 149).

Les événements pluviométriques exceptionnels observés au cours de la campagne seront décrits, et les intensités maximales, ainsi que les hyétogrammes, présentés sous la forme de tableaux (fig. 150).

- **Hydrométrie**

Avec les commentaires sur les observations limnimétriques et limnigraphiques, et une brève description des principales caractéristiques des écoulements (début et fin, hauteur maximale atteinte, etc.), le tarage des différentes stations hydrométriques constituera l'essentiel de ce paragraphe. Il comprendra une liste des jaugeages, ainsi qu'un tracé provisoire de la (ou des) courbe(s) de tarage (fig. 151).

Bien que les moyens informatiques permettent d'effectuer rapidement les transformations hauteur-débit à partir du fichier des hauteurs d'eau (généralement invariant pour une campagne donnée) et du fichier des tarages (susceptible d'être amélioré), il n'est pas souhaitable, sauf cas particuliers (changement des conditions hydrauliques rendant caducs les tarages réalisés, obligations contractuelles), d'effectuer le calcul des débits au terme de chaque campagne. Par contre, les principales difficultés rencontrées et les principales lacunes seront soulignées, afin de pouvoir être prises en compte lors de l'élaboration du plan d'action de la campagne suivante.

Si des retenues naturelles ou artificielles font l'objet d'observations limnimétriques, les résultats seront représentés graphiquement.

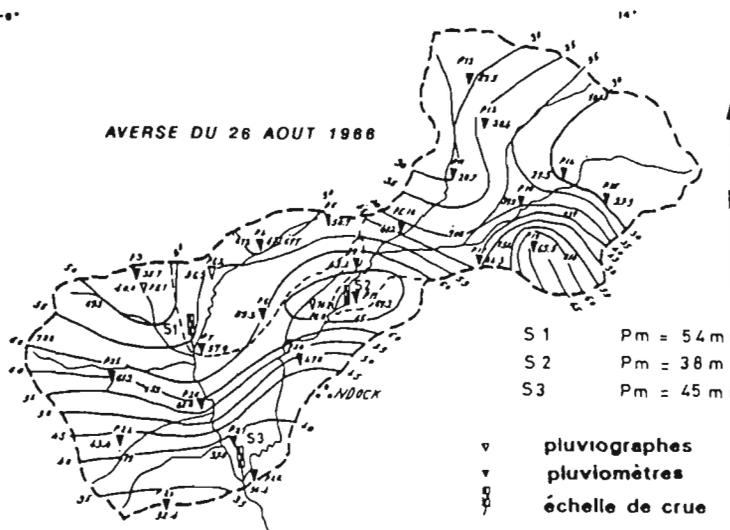


Fig-149 - BASSIN DU RISSO. TRACE DES ISOHYETES

pluviographie 1988
bassins de thyse kaymor

DATE	STATION P1						STATION P2					
	seau P1	mm/h l-5mn	mm/h l-10mn	mm/h l-15mn	mm/h l-30mn	mm/h l-60mn	seau P2	mm/h l-5mn	mm/h l-10mn	mm/h l-15mn	mm/h l-30mn	mm/h l-60mn
23-Jui	12,5	84	66	48	24	12	14,5	78,6	73	56,1	28,6	12
24-Jui	20,9	101,5	89,6	62,2	34,8	18,5	22,1	101,6	70,5	48,9	33,4	19,3
13-Jui	81,1	127,7	127,7	118,4	107,9	78,3	79,7	153,5	121	110,2	99,4	76,3
15-Jui	18,2	29,5	26,6	23,6	18,4	12,8	22,6	25,4	25,4	22,6	19,1	16,5
21-Jui	12,7	56,4	29,4	20,4	11,4	9,6						
28-Jui	59,1	65,6	56,6	57,6	45,7	31,8	77,2	61,5	55,9	50,3	48,4	42,1
1-Aoû	29,8	52,8	41	41	33,2	22,5	31,5	80,2	63	59,2	44,9	28,4
2-Aoû	47,7	89,4	74,5	61,6	50,7	33,6	55,2	129	79,1	66,2	57,6	41,1
8-Aoû	29,3	59,6	59,6	57,6	44	26,3	32,8	68,5	65,6	58,9	47,5	29,5
14-Aoû	41,1						3,5					
16-Aoû	11,3						17,5	51,1	45,4	38,8	22,9	12,5
17-Aoû	35,4	35,9	28,4	25,9	22,3	15,5	24,6	34,7	28,9	25,1	16,9	11,5
18-Aoû	26,5	60	34,5	26	26	21,5	33,7	45,6	42,7	38,9	36,1	28,7
19-Aoû	57,6	102,2	93,2	78,1	54,1	36	21,3	28,4	21,3	18,9	15,1	8,5
22-Aoû	23,3	29,1	23,3	21,4	18,4	13,6	21,8	27,5	23,3	22	19,2	14,6
26-Aoû	46	77,9	74,2	67,7	46,5	23,5	44,2	72,3	69,3	66,3	45,5	24,1
29-Aoû	36,2	84,5	84,5	80,4	70,4	36,2	27,3	62,1	56,5	56,5	45,2	26
8-Sep	15,8	53,3	53,3	43,5	28,4	15,8	34,9	128	122,2	120,2	65,9	34,5
14-Sep	16	42	39	32	20,2	12,5	15,2	39,9	34,2	28,7	21,2	12,7
15-Sep	30	41,3	32,5	27,5	20,7	15,7	26,1	34,3	21,4	19,1	16,8	15,2
18-Sep	36,8						27					
19-Sep	20,8	65,4	56,5	41,6	24,9	14,6	16,8					
21-Sep	21,9	85,6	64,2	57	40,7	20,4	11,7	48,6	40,5	34,2	20,5	11,2
3-Oct	35,7	75,5	59,9	52,8	40,1	33,1	23,3	55,7	50,1	46,4	37,6	23,5

hyétogramme moyen de la pluie du 13/07/88
bassin du bas-fond de NDIBA S1

	P1	P2	P3	lmoy	lmoy	H
	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm/h	mm
	21,3%	41,5%	37,2%		K=1,02	
18h15-25	11,8	0	0	2,5	2,6	0,4
18h25-40	0	14,9	8	9,2	8,4	2,3
18h40-45	0	0	0,6	0,2	0,2	
18h45-19h25	0	0	0,6	0,2	0,2	
19h25-30	0	0	0,6	0,2	0,2	
19h30-35	0	0	47,8	17,8	18,1	1,5
19h35-40	59	17,8	167,1	82,2	83,8	6,9
19h40-45	153,5	142,7	191	162,9	166,1	13,8
19h45-50	88,6	142,7	53,7	98,1	100,0	8,3
19h50-55	88,6	59,5	77,6	72,5	73,9	6,1
19h55-20h	88,9	107	71,6	89,9	91,6	7,6
20h00-05	76,7	95,1	83,6	86,8	88,5	7,7
20h05-10	100,4	65,4	47,8	66,3	67,6	5,6
20h10-15	88,6	65,4	41,8	61,5	62,7	5,2
20h15-20	53,1	53,5	23,9	42,4	43,2	3,6
20h20-25	53,1	41,6	23,9	37,5	38,2	3,2
20h25-30	47,2	35,7	23,9	33,7	34,4	2,9
20h30-35	17,7	29,7	23,9	25	25,5	2,1
20h35-40	17,7	11,9	12,8	13,5	13,7	1,1
20h40-42	0	11,9	12,8	9,7	9,9	0,5
20h42-45	0	11,9	0	4,9	5,0	0,3
Total mm	79,7	75,8	77,1			78,6

Le calcul des hyétogrammes moyens a été facilité par la bonne concordance des temps aux différents postes pluviographiques. Chaque pluie a été relevée le jour même ou au plus tard le lendemain. Une montre à quartz a été installée dans chaque appareil pour être sûr des mouvements d'horloger.

Fig-150 - INTENSITES MAXIMALES ET HYETOGRAMMES DES PLUIES
BASSIN DE THYSSE KAYMOR. SENEGAL (D'APRES J.ALBERGEL)

LISTE DES JAUGEAGES

Capteur : 1381299001-2 S1 Latit. 13.44.00
 Rivière : NDIBA Longit. -15.32.00
 Pays : SENEGAL
 Bassin : THYSSE Aire 16.2000 Km2

Ordre chronologique

N0	Date	Heure	Cote	Débit	Auteur
1	19/03/1985	05H12	30 CM	0,7 M3/S	FLORY
2	11/05/1985	11H38	16 "	0,162 "	FLORY
3	18/07/1985	07H25	10 "	0,072 "	FLORY
4	18/07/1985	07H35	11 "	0,074 "	FLORY
5	18/07/1985	07H40	11 "	0,085 "	FLORY
6	19/07/1985	20H13	111 "	19,8 "	FLORY
7	19/07/1985	20H40	100 "	16, "	FLORY
8	19/07/1985	21H00	87 "	12,7 "	FLORY
9	19/07/1985	21H20	76 "	8, "	FLORY
10	19/07/1985	21H35	62 "	2,37 "	FLORY
11	23/07/1985	17H25	16 "	0,129 "	FLORY
12	23/07/1985	17H35	18 "	0,219 "	FLORY
13	23/07/1985	17H40	16 "	0,179 "	FLORY
14	23/07/1985	17H45	14 "	0,161 "	FLORY
15	11/08/1985	08H35	13 "	0,108 "	FLORY
16	11/08/1985	11H35	14 "	0,142 "	FLORY
17	11/08/1985	11H45	17 "	0,19 "	FLORY
18	11/08/1985	11H48	19 "	0,273 "	FLORY
19	11/08/1985	11H53	19 "	0,273 "	FLORY
20	19/08/1985	05H00	34 "	0,903 "	FLORY

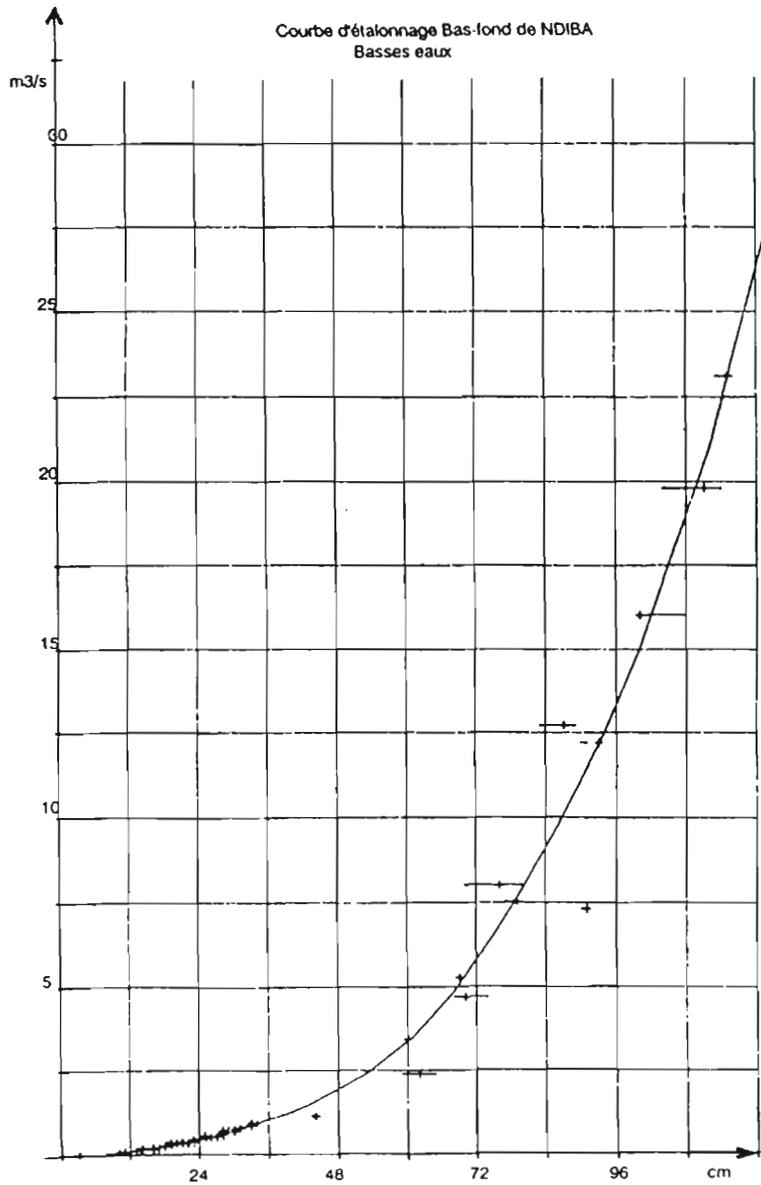


Fig-151 - TARAGE D'UNE STATION HYDROMETRIQUE, BASSIN DE THYSSE KAYMOR SENEGAL (D'APRES J. ALBERGEL)

- ***Climatologie***

Les observations climatologiques seront présentées d'une manière synthétique, sous la forme de tableaux et de graphiques où seront portées les moyennes mensuelles ou les moyennes décennales (fig. 152).

- ***Piézométrie***

Les observations piézométriques seront également regroupées dans des tableaux et graphiques et, si possible, des cartes de lignes équipotentielles seront tracées pour différentes périodes de l'année : au début, au coeur et à la fin de la saison des pluies, ainsi qu'en milieu de saison sèche (paragraphe 2.7.1. - fig.153 et fig. 154).

- ***Transports de matières solides et dissoutes***

Les résultats des mesures d'érosion sur parcelle (fig. 155) et des transports solides en rivière (fig. 156), ou des mesures de matières dissoutes (fig. 157), seront rassemblés dans des tableaux, de la même manière que les mesures de débits.

- ***Humidité du sol***

Les étalonnages des appareils (sonde à neutrons, tensiomètres, par exemple) seront présentés sommairement.

Les résultats des mesures d'humidité seront donnés par profils (graphiques du paragraphe 2.6.3.), de même que les variations du stock d'eau qui pourront être comparées à l'évolution des hauteurs pluviométriques et aux variations du niveau de la nappe phréatique (fig. 158).

5. **Une quatrième partie** présente toutes les activités non répétitives effectuées au cours de la campagne. Il s'agit, essentiellement, de tous les relevés complémentaires réalisés pour pallier le manque d'informations nécessaires au bon déroulement des mesures, ainsi qu'à l'interprétation des résultats (paragraphe 2.9.).

Ce peut être différents relevés : topographiques, pédologiques, phytographiques, des états de surface, géologiques ou hydrogéologiques. Mais aussi, des mesures d'infiltration (paragraphe : 2.5.), des mesures géophysiques (paragraphe 2.7.3.), des essais de pompage (paragraphe 2.7.6.1.) ou des mesures de la densité apparente des sols (paragraphe 2.6.1. et 2.6.3.2.). Ça peut être enfin, la réalisation de certains aménagements qui se sont avérés indispensables en cours de campagne.

6. **La conclusion** doit faire le bilan des diverses activités en soulignant, à la fois, les points positifs et les difficultés rencontrées. Par ailleurs, elle doit dégager les principales orientations de la prochaine campagne.

3.2.3. ORGANISATION ET CONTENU DE LA PUBLICATION DE SYNTHÈSE

Les différents traitements ou méthodes utilisés ayant été développés dans les chapitres antérieurs, seul est donné le plan général de la publication.

De nombreux exemples et illustrations figurent dans le chapitre 5, réservé à la présentation de cas-types.

1. Introduction

L'introduction permet de présenter dans une première partie : les objectifs, les antécédents, les moyens en personnel et en matériel mis en jeu, ainsi que le déroulement des travaux. Une deuxième partie met l'accent sur les principaux points clés abordés dans l'étude.

-2- humidité de l'air

-1- Température

		TEMP °C					
		MINI	MAXI	MOY.	06 H	12 H	18 H
MARS	1 ^{er} D	14.6		(28.4)	19.2	36.6	35.4
	2 nd D	14.5		(30.0)	22.6	36.6	34.5
	3 rd D	14.5		(30.1)	22.3	37.1	36.4
	MOY.	14.5		(29.5)	21.4	36.8	35.4
AVRIL	1 ^{er} D	12.8		(31.7)	26.9	35.8	33.9
	2 nd D	25.2	59.7	31.5	25.6	38.2	35.8
	3 rd D	25.7	35.4	29.6	24.3	33.7	32.8
	MOY.	29.2		30.9	25.6	35.3	34.2
MAY	1 ^{er} D	25.2	27.8	31.2	26.2	35.2	33.2
	2 nd D	24.1	37.5	30.7	24.9	34.1	32.1
	3 rd D	25.1	36.4	30.8	25.4	34.7	33.0
	MOY.	24.8	37.0	30.9	25.5	34.7	32.8
JUIN	1 ^{er} D	23.8	32.8	29.5	24.8	33.1	32.8
	2 nd D	24.5	36.3	30.4	25.1	35.9	32.7
	3 rd D	22.8	33.3	27.8	24.1	30.7	30.0
	MOY.	23.5	34.8	29.2	24.7	32.6	31.8
JUILLET	1 ^{er} D	22.8	32.7	27.8	24.0	30.6	30.4
	2 nd D	22.1	30.1	26.1	22.7	29.0	28.8
	3 rd D	21.0	28.8	25.2	23.0	26.8	26.9
	MOY.	21.5	30.5	26.4	23.2	28.8	28.7
AOÛT	1 ^{er} D	22.2	31.0	27.6	24.0	31.0	29.1
	2 nd D	22.5	31.9	27.2	23.1	29.5	29.2
	3 rd D	21.2	31.2	26.2	22.3	30.0	27.6
	MOY.	22.0	31.4	26.7	22.7	30.2	28.6
SEPTEMBRE	1 ^{er} D	20.7	32.7	26.8	22.2	30.4	30.4
	2 nd D	20.0	31.0	25.5	21.8	29.4	25.7
	3 rd D	22.2	31.7	27.0	22.0	29.8	28.2
	MOY.	21.0	31.9	26.4	22.0	29.9	28.1
OCTOBRE	1 ^{er} D	21.1	33.4	27.2	21.8	32.3	28.1
	2 nd D	21.1	35.2	28.2	21.5	33.6	30.0
	3 rd D	19.4	34.4	26.9	20.2	32.5	28.2
	MOY.	20.5	34.3	27.4	21.2	32.8	28.8
NOVEMBRE	1 ^{er} D	18.0	37.1	27.6	18.8	35.1	29.7
	2 nd D	12.7	35.6	24.2	13.6	34.1	26.8
	3 rd D	13.3	33.8	23.6	14.0	32.5	26.2
	MOY.	14.7	35.5	25.1	15.5	33.9	27.6
DECEMBRE	1 ^{er} D	12.5	35.4	24.0	13.5	33.7	27.4
	2 nd D	10.5	32.0	22.2	11.2	32.4	22.7
	3 rd D	12.6	35.1	23.9	13.7	33.1	27.1
	MOY.	11.8	32.6	23.5	12.6	33.1	25.7

		TENSION DE VAPEUR en hPa			HUMIDITE RELATIVE en %		
		06 H	12 H	18 H	06 H	12 H	18 H
MARS	1 ^{er} D	12.2	10.5	15.7	55.7	19.9	24.0
	2 nd D	11.9	15.7	17.4	53.1	26.0	24.5
	3 rd D	12.5	20.3	16.7	56.7	32.3	31.3
	MOY.	14.2	15.5	16.4	55.8	26.0	29.9
AVRIL	1 ^{er} D	25.2	22.9	22.9	71.6	39.5	43.6
	2 nd D	19.2	10.0	14.4	46.2	15.1	26.6
	3 rd D	23.3	22.0	22.4	75.7	45.8	48.6
	MOY.	21.2	18.3	19.9	64.5	33.3	39.6
MAY	1 ^{er} D	26.5	23.4	22.1	77.3	41.6	44.2
	2 nd D	28.1	26.5	25.2	89.2	49.9	56.3
	3 rd D	26.4	25.6	25.5	87.5	48.6	51.2
	MOY.	27.0	25.2	24.5	82.7	46.1	50.6
JUIN	1 ^{er} D	25.8	24.8	23.5	82.9	49.5	47.3
	2 nd D	26.0	25.4	24.7	82.0	48.2	50.2
	3 rd D	28.8	26.8	26.7	93.6	62.7	61.8
	MOY.	26.2	25.7	25.0	85.2	53.5	54.1
JUILLET	1 ^{er} D	25.3	26.5	25.9	85.1	61.9	62.1
	2 nd D	26.2	27.6	26.9	84.8	69.6	66.4
	3 rd D	25.3	26.8	27.7	89.7	77.3	80.2
	MOY.	25.6	27.0	26.8	85.0	69.6	70.2
AOÛT	1 ^{er} D	26.0	28.5	28.6	88.2	67.0	71.5
	2 nd D	26.5	29.0	27.5	93.7	72.2	68.4
	3 rd D	25.7	28.9	28.2	92.6	68.3	76.8
	MOY.	26.1	28.8	28.1	92.2	69.2	72.2
SEPTEMBRE	1 ^{er} D	25.4	28.5	29.3	94.3	67.9	67.6
	2 nd D	25.5	28.0	27.2	97.0	68.5	82.7
	3 rd D	26.9	28.1	30.9	93.8	68.4	80.6
	MOY.	25.3	28.2	29.1	95.0	68.3	77.0
OCTOBRE	1 ^{er} D	25.1	26.9	29.4	95.6	55.9	77.4
	2 nd D	25.9	26.0	29.4	92.7	50.4	69.4
	3 rd D	23.8	19.6	26.9	91.0	41.3	70.3
	MOY.	25.6	24.2	28.6	93.1	49.2	72.4
NOVEMBRE	1 ^{er} D	18.5	16.2	20.5	85.2	28.6	30.0
	2 nd D	12.6	8.8	15.3	75.2	16.5	25.4
	3 rd D	13.2	9.3	14.9	75.8	19.2	26.4
	MOY.	14.8	11.4	16.9	80.1	21.4	25.0
DECEMBRE	1 ^{er} D	12.2	9.1	15.2	78.2	17.4	26.4
	2 nd D	9.7	8.9	15.1	73.0	18.2	26.7
	3 rd D	10.6	7.6	11.7	69.0	15.2	22.7
	MOY.	10.9	8.5	12.8	73.4	16.9	25.3

-3- Vent (vitesse moyenne journalière en m/s)

	MARS	AVRIL	MAY	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
1 ^{er} Dec	0.79	1.42	1.61	1.45	1.27	0.85	0.77	0.71	0.53	0.71
2 nd Dec	0.91	1.04	1.12	1.19	1.20	0.77	0.67	0.52	0.55	0.55
3 rd Dec	1.09	1.40	1.55	1.51	1.25	0.74	0.58	0.49	0.67	0.60
MOY.	0.95	1.30	1.43	1.56	1.51	0.79	0.61	0.57	0.58	0.63

-4- Durée d'insolation (en heure et dixième d'heure).

	MARS	AVRIL	MAY	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
1 ^{er} Dec	10.3	8.0	8.5	7.5	8.0	9.7	10.5	8.7	9.5	9.4
2 nd Dec	9.2	8.2	9.8	9.6	7.4	8.2	7.6	9.0	9.6	9.9
3 rd Dec	9.3	8.4	8.5	9.0	6.0	8.4	8.2	9.3	8.3	9.8
MOY.	9.6	8.2	8.9	8.7	7.1	9.0	8.8	9.0	9.1	9.7

-5- Evaporation au bac et au piche (en mm et dixième de mm)

Les mesures de l'évaporation sur le bac colorado n'ont commencé qu'à partir du 10 mai 1978.

	MARS	AVRIL	MAY	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
1 ^{er} D	B/C	19.9	12.4	8.2	8.1	7.2	7.1	7.6	7.2	
2 nd D	PICHE	9.0	7.3	5.9	6.0	4.0	2.1	2.5	2.7	5.4
	B/C		10.5	14.4	7.7	6.7	5.8	6.4	7.6	6.4
3 rd D	PICHE	8.3	10.4	4.9	6.5	2.1	1.9	1.6	2.9	6.5
	B/C		13.0	8.7	5.7	6.0	5.5	6.3	7.9	2.5
MOY.	PICHE	9.9	6.1	5.7	4.0	1.8	1.7	1.7	3.7	6.7
	B/C		12.5	11.8	7.2	6.9	6.2	6.6	7.1	8.7

-6- Fluviométrie : valeur décadaire du pluviomètre situé à 1,50m du sol en mm

	MARS	AVRIL	MAY	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
1 ^{er} D	0.0	0.0	7.2	1.7	29.0	54.2	15.0	30.8	0.0	0.0
2 nd D	0.0	0.0	5.0	17.6	156.4	51.7	71.7	1.7	0.0	0.0
3 rd D	0.0	40.2	1.5	30.6	108.9	62.7	62.2	9.1	0.0	0.0
TOTAL	0.0	40.2	13.7	70.3	274.3	166.6	146.9	41.6	0.0	0.0

2-7- Rayonnement global (moyennes décadaires en J/m²/jour)

Le rayonnement global a été calculé à partir de la durée d'insolation en utilisant la corrélation d'Aströmberg déterminée par JP OUEZOUKO et CH BACDY à la station météo de BOBO DIULASSO

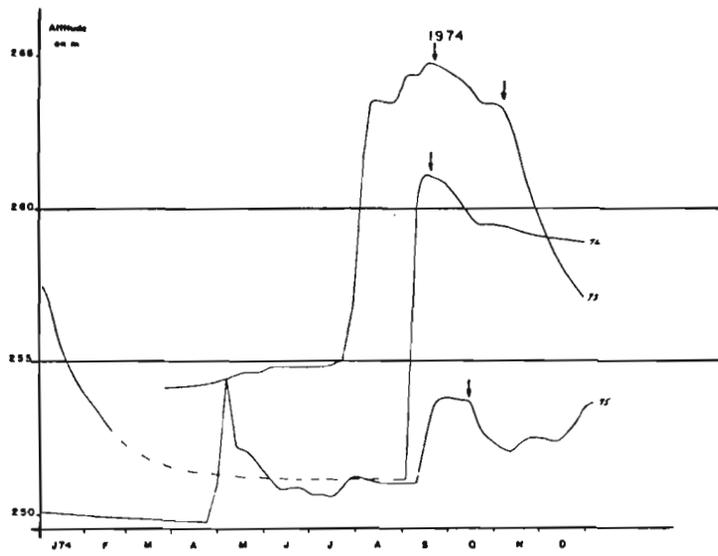
$$G = G_0 (0.5 + 0.5 \frac{S}{S_0})$$

avec

G₀ : rayonnement solaire reçu à l'entrée de l'atmosphère. On trouve dans l'annexe climatologie les valeurs utilisées
S = nombre d'heures d'insolation
S₀ = nombre d'heures du jour.

	MARS	AVRIL	MAY	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
1 ^{er} Dec	2587	2332	2103	2224	2288	2583	2678	2319	2284	2119
2 nd Dec	2460	2365	2332	2528	2293	2352	2226	2323	2252	2177
3 rd Dec	2507	2394	2515	2434	2110	2503	2297	2315	1992	2185
MOY.	2518	2363	2503	2395	2230	2479	2400	2319	2176	2159

Fig-152 - ETUDE DE LA PLAINE DE KAMADENA (BURKINA FASO)
OBSERVATIONS CLIMATOLOGIQUES DE L'ANNEE 1978 (D'APRES L.LE BARBE)

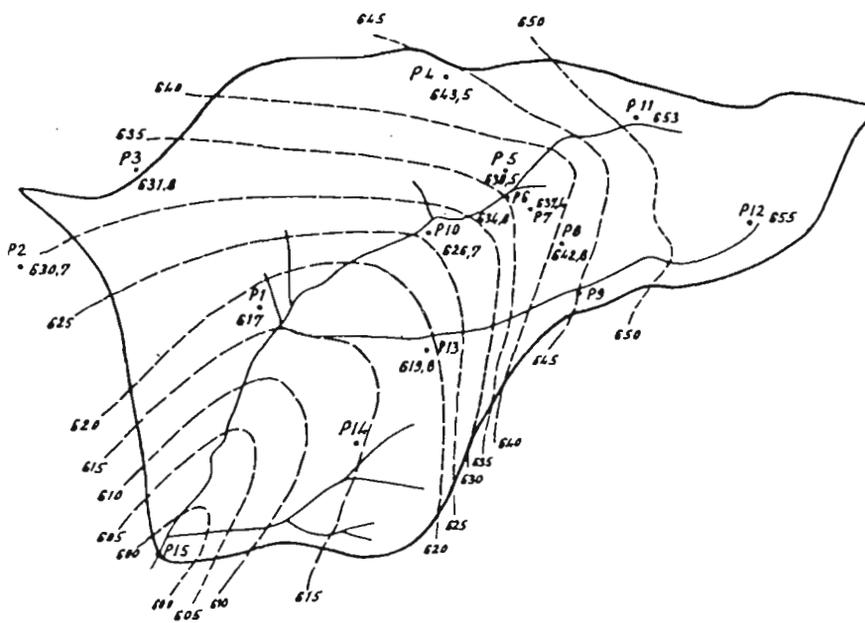


Variations du niveau de la nappe en aval de S3, 1974

Fig-153 - BASSIN DE SANGUERE (CAMEROUN)

BASSINS DU RISSO (BASSIN 1)

Surface piezométrique (période de crue)



(10 Septembre 1970)

--- COURBES EQUIPOTENTIELLES

ECHELLE 1/20000

Fig-154 - BASSIN DU RISSO (CAMEROUN)

PARCELLE D'EROSION

Date	P mm	HRA		HRC		Pu mm
		RA %	TA g	RC %	TC g	
20-8-66	19,4	20	1 325	28	700	10
22-8-66	27,5		650		650	10
23-8-66	20,0		340			17
24-8-66	9,6	11	230	9,5	132	5
25-8-66	9,7	22	480	20	570	8
26-8-66	71,2		13 800		10 900	65
30-8-66	21,8	12	142	14	260	7
31-8-66	11,6	19	600	16	600	8
2-9-66	13,2	8	550	9	565	9
5-9-66	79,3		8 550		6 200	54
7-9-66	19,0	42	920	41	1 150	14
11-9-66	10,6	10	455	10	240	6
17-9-66	34,9	25	1 400	23	2 700	20
6-10-66	21,2	43	3 600	42	6 800	18
10-10-66	31,8	17	4 800	28	5 800	25
15-10-66	12,3	22	520	35	1 800	10
14-10-66	10,5	40	860	35	1 340	9
21-10-66	10,8	18	550	32	1 300	10
25-10-66	37,5	12	1 000	22	1 500	12
26-10-66	27,5	18	2 500	21	2 600	19

- 1 - la date de la mesure,
- 2 - la hauteur de l'averse, en mm, au pluviographe P_g, situé à proximité des parcelles,
- 3 - le coefficient de ruissellement RA en %, sur la parcelle n° 1,
- 4 - le poids de terre érodée TA, en g, sur la parcelle n° 1
- 5 - le coefficient de ruissellement Rc, en %, sur la parcelle n° 2,
- 6 - le poids de terre érodée Tc, en g, sur la parcelle n° 2,
- 7 - la pluie utile Pu, en mm.

Fig-155 - MESURE DE L'EROSION SUR PARCELLES - BASSIN DU RISSO (CAMEROUN)

PRELEVEMENTS EFFECTUES DURANT LA CAMPAGNE 1973
ET DEBITS CORRESPONDANTS A BOCO.

Date	Cmg.l	Qm ³ /s	Qe	H	Date	Cmg.l	Qm ³ /s	Qe	H
22.8	0,526	32,00	16,83	80	11.9	0,984	29,75	29,27	75 ⁵
23.8	0,482	27,50	13,26	75	11.	1,483	37,50	55,61	85
23.	0,592	35,30	20,90	83	12.	0,954	25,00	21,94	70
23.	0,365	24,80	9,05	72	13.	0,351	16,35	5,74	63
24.	1,250	57,25	71,56	101 ⁵	13.	0,774	25,25	19,54	72 ⁵
24.	2,145	71,50	153,37	111	14.	0,698	21,60	15,08	68 ⁵
24.	1,378	51,40	70,82	97	14.	0,770	25,70	19,79	73
25.	0,490	32,00	15,68	80	15.	0,339	15,40	5,22	62
26.	0,285	21,10	6,01	68	16.	0,219	12,65	2,77	59
26.	0,442	23,90	10,56	71	17.	0,159	10,95	1,74	57
27.	0,958	30,70	29,41	78 ⁵	18.	0,820	27,50	22,55	75
28.	0,307	19,20	5,89	66	19.	0,405	17,30	7,00	64
29.	0,245	14,45	3,54	61	20.	0,156	10,10	1,58	56
30.	0,311	12,65	3,93	59	21.	0,123	8,40	1,03	54
30.	2,602	69,25	180,19	109 ⁵	22.	0,095	6,70	0,63	52
30.	2,479	108,85	269,84	135 ⁵	23.	0,129	8,40	1,08	54
30.	2,570	105,15	265,10	132	24.	0,085	5,85	0,50	51
31.	1,220	44,80	54,66	91 ⁵	25.	0,168	8,40	1,41	54
1.9	0,294	23,00	6,76	70	26.	0,069	3,80	0,26	48
2.	0,114	13,50	1,54	60	27.	0,059	3,20	0,19	47
3.	0,281	15,40	4,33	62	28.	0,124	6,70	0,83	52
4.	0,244	13,50	3,29	60	29.	0,081	4,40	0,36	49
5.	0,156	11,80	1,84	58	30.	0,077	3,80	0,29	48
5.	1,546	43,00	66,48	90	1.10	0,135	8,40	1,13	54
5.	2,118	68,50	145,08	109	2.	0,108	5,85	0,63	51
6.	1,290	44,80	57,79	90 ⁵					
6.	0,746	37,50	27,98	85					
7.	0,445	26,60	11,84	74					
8.	0,339	17,30	5,86	64					
9.	0,238	16,35	3,89	63					
10.	0,231	13,50	2,48	60					

- C = CONCENTRATION SOLIDE
- Q = DEBIT
- Qs = DEBIT SOLIDE
- H = HAUTEUR D'EAU

Fig-156 - MESURE DU TRANSPORT SOLIDE EN RIVIERE - BASSIN DE BOGO (CAMEROUN)

Composition ionique des eaux évacuées (mg/l)

Date	Cl-	SO4=	Ca++	Mg++	K+	Na+
4-Jul	147.6	50.6	12	33	2.2	149
14-Jul	170	54	13	41	3	164
24-Jul	115	34	9.4	29	2.4	130
28-Jul	59	21	5.8	17	1.4	60
30-Jul	40	15	3.5	10	1	41
5-Aoû	42	16	3.9	11	1	44
20-Aoû	100	21.7	6.2	23	2.2	113
25-Aoû	88	19.4	5.6	20	1.9	84
28-Aoû	62	15.6	4.3	13	1.3	59
29-Aoû	46	12.1	3.3	10	1	46
30-Aoû	41	11.6	3	9	0.9	36
31-Aoû	36	11	2.8	8.2	0.8	33
3-Sep	36	11.4	2.8	12	0.8	33
5-Sep	23	6.9	1.7	5.4	0.5	22
6-Sep	20	6.9	1.6	4.3	0.5	17
11-Sep	17	6.5	1.4	3.7	0.4	15
18-Sep	12	6.2	1.2	2.8	0.3	10
24-Sep	9.9	6.3	1	2.4	0.3	8.7
8-Oct	14.8	7.6	1.2	3.6	0.4	13
13-Oct	17.4	8.2	1.3	3.9	0.4	15
21-Oct	19.1	8.4	1.6	4.3	0.4	16
29-Oct	15.4	8.2	1.4	3.6	0.3	14

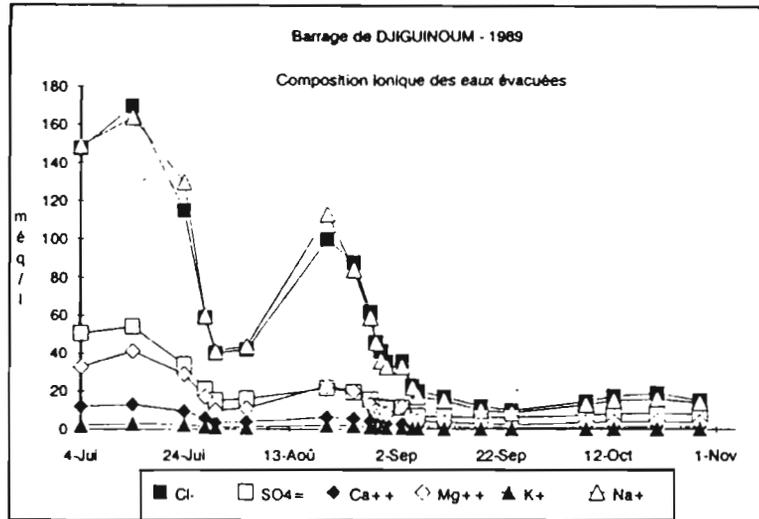
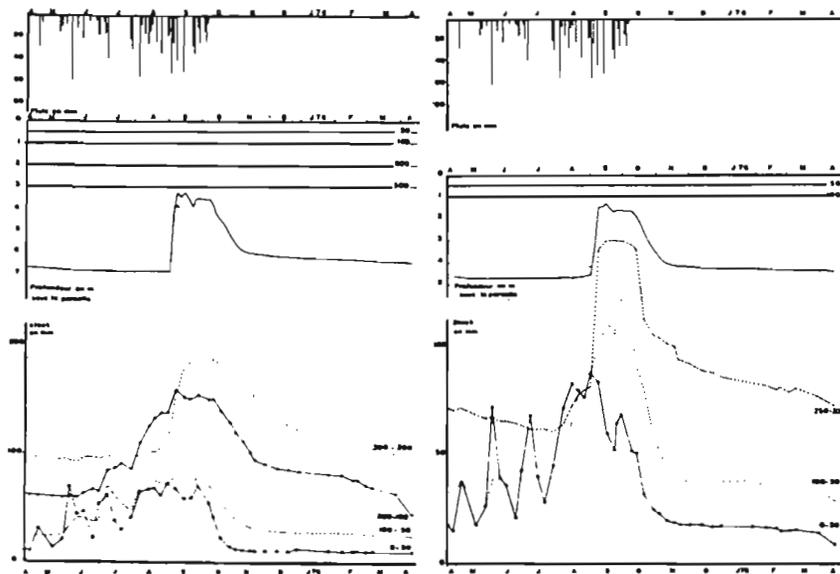


Fig- 157 - BASSIN DE DJIGUINOUM - SENEGAL - (D'APRES J.ALBERGEL)



— Evolution comparée du stock en eau des sols, du niveau de la nappe et de la pluviométrie. Parcelle D, puits 63, pluviomètre D

— Evolution comparée du stock en eau des sols, du niveau de la nappe et de la pluviométrie. Parcelle E, puits 62, pluviographe 24

Fig-158 - BASSIN VERSANT DE SANGUERE - CAMEROUN - (D'APRES A.CASENAVE)

2. Contexte physico-climatique régional

Ce chapitre reprend sous forme synthétique les résultats publiés dans les rapports de campagne, en insistant particulièrement sur l'étude des précipitations.

3. Caractéristiques physiques du bassin

3.1. Caractéristiques topographiques et morphologiques

Ce sous-chapitre est une synthèse des informations publiées dans les rapports de campagne.

3.2. Géologie :

- . contexte général
- . les différentes formations
- . relation entre ces formations
- . relation avec les sols
- . étude structurale (déformations, tectonique)
- . étude géophysique (éventuellement)

3.3. Pédologie :

- . contexte général
- . les différents systèmes : extension et évolution, pédogenèse, géomorphologie
- . les états de surface

3.4. Végétation :

- . les grandes zones végétales
- . la couverture du sol
- . les pratiques culturales (éventuellement)
- . suivi de la biomasse (éventuellement)

4. Observations de base

4.1. Observations climatologiques :

- . le dispositif d'observation
- . températures
- . humidité relative
- . vent
- . durée d'insolation et rayonnement solaire
- . évaporation : Piche, évaporation sur bacs, évapotranspiration potentielle (calculée généralement par la formule de Penman)

4.2. Précipitations :

- . la statistique régionale est traitée dans le chapitre 2 : hauteurs annuelles, mensuelles, journalières et intensités
- . le dispositif de mesure
- . les observations : avec calcul des pluies moyennes sur les différents bassins, pour différents pas de temps (année, mois, jour ou averse)

- . variabilité temporelle et spatiale : individualisation et forme des averses, géostatistique

4.3. Écoulements :

- . description sommaire des stations hydrométriques
- . étalonnages
- . débits écoulés moyens journaliers, mensuels et annuels
- . volumes ruisselés : pour chaque épisode de crue après séparation des écoulements, puis aux niveaux journalier, mensuel et annuel (paragraphe 3.1.4.)

4.4. Stockages souterrains :

4.4.1. *Zone non saturée* :

- . dispositif de mesure
- . analyse des profils
- . variations du stock d'eau

4.4.2. *Zone saturée* :

- . dispositif de mesure
- . caractéristiques de l'aquifère
- . variation du stock d'eau

5. *Etudes spécifiques*

5.1. Simulation de pluie :

- . appareillage utilisé
- . dispositif de mesure
- . protocole de mesure
- . résultats et interprétation
- . applications possibles

5.2. Transports solides et érosion :

- . dispositif de mesure : cours d'eau ou parcelles
- . protocoles de mesure
- . résultats
- . facteurs explicatifs
- . applications possibles

5.3. Composition chimique de l'eau et matières dissoutes :

- . dispositif de mesure : pluie, cours d'eau, retenues, parcelles, eaux souterraines
- . protocoles de prélèvements
- . types d'analyses
- . applications possibles

5.4. Mesures de l'humidité et tensiométriques des sols :

- . dispositif de mesure
- . protocoles
- . analyse des profils
- . résultats : eau évaporée, eau migrant vers les aquifères, autres

5.5. Autres études : ruissellement en nappe, inféro-flux, etc.

6. *Interprétation*

L'interprétation devra prendre en compte, le cas échéant, les facteurs anthropiques analysés dans le cadre des études sur bassins expérimentaux.

6.1. Bilans hydrologiques :

- . bilan annuel
- . bilans mensuels : pluie, écoulement total, ruissellement, évapotranspiration potentielle, déficit d'écoulement

6.2. Les crues :

- . description des caractéristiques des événements pluvieux et du ruissellement induit
- . étude des lames d'eau ruisselées et de leurs facteurs explicatifs
- . forme des crues : différents types, facteurs explicatifs, hydrogrammes médians
- . relations inter-stations
- . prédétermination d'événements exceptionnels : averses, lames ruisselées, débits maximaux, temps caractéristiques (de montée et de base)

Les périodes de retour choisies (1-2-5-10 ans ou plus) seront fonction des objectifs de l'étude.

6.3. Écoulement de base :

- . importance dans l'écoulement global
- . variations saisonnières : les facteurs explicatifs
- . variations journalières : les causes
- . tarissement des aquifères : facteurs explicatifs, formulation, prédétermination

7. *Modélisation (chapitre optionnel)*

Il est impossible de donner, dans ce domaine, un plan détaillé (paragraphe 3.1.5). Néanmoins, pour chaque modèle utilisé, devront figurer :

- la description du système
- la détermination des paramètres ayant un sens physique
- le calage, pour la détermination des paramètres d'ajustement (fonctions critère et méthodes d'optimisation utilisées, pas de temps)
- la validation, pour l'estimation de la précision des résultats (pas de temps utilisé)
- l'utilisation qui en est faite et les résultats obtenus

Il sera prudent d'utiliser plusieurs modèles et d'en comparer les résultats.

Interprétation et modélisation ont été séparées par commodité, mais elles sont étroitement liées.

8. Conclusion

Elle permet de dégager les résultats saillants de l'étude.

9. Annexes

De nombreux documents nécessaires à la compréhension de l'étude pourront être regroupés en annexes, afin de ne pas alourdir inutilement le texte. Ce sont généralement des cartes, graphiques, figures ou tableaux.

Remarque : la publication devra comporter un sommaire détaillé, avec pagination.

PARTIE 4

ORGANISATION LOGISTIQUE ET ÉVALUATION DES COÛTS

4.1. ORGANISATION LOGISTIQUE ET HUMAINE DES OBSERVATIONS ET MESURES

Le mode d'exploitation d'un bassin représentatif peut varier sensiblement suivant les objectifs de l'étude, les conditions locales de travail, et les appareils de mesures et d'observations utilisés. Il est donc impossible de formuler dans ce domaine une méthodologie précise et d'en recommander la stricte application. D'une manière générale, l'exploitation d'un bassin représentatif comprend un ensemble d'opérations qui répondent à deux impératifs essentiels :

- La réalisation et l'archivage de mesures et d'observations qu'il s'agit d'organiser de la manière la plus efficace : il faut rassembler le plus de renseignements possible, avec un maximum de précision.
- La nécessité de faire face à des imprévus qui viennent perturber le déroulement régulier des opérations.

Il est donc important de mettre l'accent sur l'organisation générale du fonctionnement qui ne peut être efficace sans la préparation d'un plan d'opérations établi, par l'hydrologue responsable, avant le début de la première campagne. Ce plan doit assurer la coordination entre les opérations classiques ou de routine, et les opérations extraordinaires, sporadiques et prioritaires.

4.1.1. ORGANISATION GENERALE

Les études sur bassins représentatifs faisant fréquemment appel à diverses disciplines, il est important d'obtenir une coordination des travaux dans les différents domaines scientifiques ou techniques intéressés. La solution la plus efficace consisterait à confier toutes les observations et mesures, sinon à un seul service, du moins à un même organisme, ce qui supposerait que toutes les compétences nécessaires y soient réunies. Dans tous les cas, pour que les actions entreprises atteignent une efficacité et une cohérence suffisantes, la direction des études doit être assurée d'une certaine pérennité.

Le personnel nécessaire, pour mener à bien les travaux et les mesures de terrain, est très lié au programme d'étude, aux moyens et aux équipements disponibles, ainsi qu'aux conditions générales du milieu. Il est essentiel que l'hydrologue responsable des opérations de terrain réside sur le bassin, ou à proximité, tant au moment des installations, que lors des campagnes de mesures et d'observations. Les stations, parcelles, ou périmètres de mesures doivent pouvoir être atteints dans des délais raisonnables, y compris lors de fortes averses. L'emplacement du camp de base, qui servira à la fois de résidence, de bureau, de magasin, voire de laboratoire, pourra être également un site d'observations privilégié. Il sera donc choisi avec soin, en tenant compte des voies d'accès et de communication (photo 56). Ces dernières pourront parfois être très précaires et nécessiter certains aménagements, aussi est-il particulièrement recommandé de retenir, a priori, au moment de l'implantation du chantier, les bassins dont l'accès et la viabilité sont les meilleurs, toutes conditions étant égales par ailleurs. Il faudra tout de même veiller à ce que les chemins, qui peuvent rapidement se transformer en drains artificiels, évitent les très petits bassins.

En plus d'une situation géographique privilégiée, le camp de base disposera d'un minimum de facilités, afin que l'ensemble du personnel puisse vivre et travailler dans des conditions satisfaisantes. Chaque fois que ce sera possible, une alimentation en eau (bac équipé d'une pompe, placé sur une tour construite en tubes métalliques) et une alimentation électrique (groupe électrogène, panneaux solaires) seront installées. La salle faisant office de bureau devra être équipée de moyens d'archivage et de travail suffisamment pratiques. La quantité de matériel qui sera stocké (papier, carnets, crayons, stylos, fiches standards, etc.) correspondra à la consommation d'une campagne complète. Le matériel de travail : machines à calculer, planimètre, voire micro-ordinateur portable, sera en parfait état de marche, bien protégé et doté des équipements lui assurant une autonomie suffisante et un bon fonctionnement (piles, batteries). Le matériel scientifique de rechange, les pièces détachées et le matériel consommable (diagrammes, systèmes inscripteurs, cartouches informatiques, liquide de nettoyage et lubrifiant, etc.) seront stockés dans une pièce séparée, et feront l'objet d'un inventaire tenu à jour. Un magasin-atelier permettra d'entreposer l'outillage, le matériel et les produits (carburants, huiles, graisses, etc.) nécessaires au fonctionnement, à l'entretien et à la réparation du matériel non scientifique : véhicules, groupe électrogène, pompes, treuils, tirfor, crics, etc. Le cas échéant, un laboratoire de campagne sera installé dans un local suffisamment bien éclairé et aéré. Il devra disposer d'un minimum de matériel et de produits (voir paragraphe 4.2.1.5.). Il est important de prévoir suffisamment d'espace pour que les opérations et manipulations puissent être aisément effectuées (paillasse, réserve d'eau) et que le stockage des échantillons (étagères, caisses en bois ou cantines compartimentées) soit assuré dans de bonnes conditions. Une liste des différents matériels est donnée chapitre 4.2.



CLICHÉ: J.F. NOUVELOT

Levé topographique - Djiguioum - (Sénégal)



CLICHÉ: J.F. NOUVELOT

Camp de base - Bidi - (Burkina-Faso)



CLICHÉ: J. M. DELFIEU

Piste de saison des pluies - Bidi - (Burkina-Faso)

L'hydrologue de terrain doit connaître parfaitement les observations et mesures à effectuer. Il doit être capable de faire, sur les divers appareils, pour les pannes les plus courantes, les réparations nécessaires. Il doit, lors d'événements exceptionnels, être à même de prendre des initiatives pour obtenir le maximum d'informations, malgré les difficultés rencontrées. Il doit, enfin, faciliter le travail d'interprétation des résultats en effectuant de bonnes observations qualitatives (sur la genèse du ruissellement, par exemple).

Pour un bassin représentatif d'une centaine de km², incluant un sous-bassin de quelques dizaines de km² et un sous-bassin de quelques km², le personnel de terrain présent en saison des pluies pourra comprendre :

- 1 hydrologue,
- 2 assistants (dont un sera plus particulièrement responsable du matériel hydrométrique, l'autre du véhicule tout terrain),
- 4 à 6 observateurs pour les pluviomètres, la station climatologique et les stations limnimétriques,
- 2 manoeuvres permanents (en cas de besoin, des manoeuvres temporaires doivent pouvoir être recrutés).

Si l'étude comporte un programme important de mesure d'humidité du sol, de piézométrie ou d'érosion (en rivière ou sur parcelles), le nombre d'assistants, d'observateurs et de manoeuvres pourra être augmenté de 50 %.

4.1.2. OPERATIONS DE ROUTINE

Les opérations périodiques ou de routine peuvent être facilement programmées et n'admettent aucune lacune, excepté en cas d'extrême urgence quand certaines opérations exceptionnelles, sporadiques et prioritaires l'exigent. Pour que les diverses informations recueillies soient cohérentes, il est indispensable de définir une heure de référence pour l'ensemble du bassin. Lorsque les observateurs et les appareils sont équipés de montres ou d'horloges à quartz, la synchronisation recherchée pose peu de difficultés. Il en va différemment pour les appareils équipés d'horloges classiques à ressort et balancier. Les contrôles devront être alors fréquents et rigoureux, l'heure de référence pouvant être fournie tous les matins par l'hydrologue responsable.

- *Pluviométrie*

Les observations pluviométriques seront faites au moins quotidiennement, ou mieux après chaque averse, principalement sur les petits bassins. L'observateur prendra soin de porter sur un carnet, l'heure de début et de fin de l'événement sur le site où il se trouve, surtout si aucun appareil enregistreur n'est installé à proximité.

Si un observateur est chargé de relever plusieurs pluviomètres, il devra effectuer sa tournée de mesures le plus rapidement possible. Pour chaque appareil, l'heure d'observation sera portée à côté de la hauteur pluviométrique mesurée. Suivant la longueur du parcours, des moyens de mobilisation adéquats devront être fournis : bicyclette, cyclomoteur, motocyclette tout terrain.

Les observations ne devront jamais être faites durant une pluie. La tournée de mesures sera dans ce cas retardée.

Une sage précaution sera d'imposer aux observateurs de porter sur leur carnet de terrain le détail de chaque mesure, surtout lorsque le volume d'eau recueilli demande de totaliser le contenu de plusieurs éprouvettes.

L'hydrologue responsable des travaux de terrain effectuera des tournées périodiques pour contrôler la qualité des observations et vérifier le bon fonctionnement des appareils : site d'implantation non perturbé (par la croissance de la végétation en saison des pluies, par exemple), horizontalité des bagues réceptrices, état des éprouvettes et des récipients collecteurs. L'implantation de pluviomètres totalisateurs, relevés périodiquement et placés à proximité de certains pluviomètres journaliers, représente un bon moyen de contrôle.

Si une éprouvette est endommagée, il faut s'assurer que celle qui la remplace correspond bien au pluviomètre auquel elle est destinée. L'utilisation d'un appareillage homogène à l'échelle du bassin, ou mieux à l'échelle régionale, doit éviter ce type d'erreur.

Tout changement, pour diverses raisons, de l'emplacement d'un pluviomètre (ce qui dans la mesure du possible doit être évité) sera mentionné sur la fiche d'installation.

- *Pluviographie*

La plupart des recommandations faites pour l'observation des pluviomètres s'appliquent aux pluviographes. Néanmoins, s'agissant d'un appareil équipé d'un système de mesure et d'enregistrement, des précautions particulières devront être prises pour s'assurer de la qualité de l'information qui doit être la plus complète possible.

Pour cela, le récipient collecteur des pluies enregistrées doit être relevé fréquemment, de préférence au cours de chaque tournée de relevés des pluviomètres. Ces mesures permettront de corriger les erreurs systématiques dues à un mauvais réglage de l'appareil (cas des pluviographes à augets basculeurs) ou au principe même de son fonctionnement. La propreté des entonnoirs collecteurs devra être fréquemment vérifiée pour éviter de ne mesurer qu'une loi de vidange plus ou moins rapide de l'appareil et non les variations d'intensité de la pluie.

Les appareils équipés d'un système d'enregistrement graphique peuvent être facilement contrôlés sur le terrain. L'analyse des diagrammes permet de relever rapidement les dysfonctionnements, soit du système de mesure (dissymétrie des augets, siphonnage défectueux, entonnoir obstrué, etc.), soit du système d'enregistrement (verticalité de l'axe du tambour, réglage du stylet inscripteur, réglage de l'horloge, etc.). Il importe donc que chaque enregistrement soit suffisamment bien documenté : numéro du pluviographe, éventuellement nom du site, dates de pose et de retrait du diagramme matérialisées par un repère, hauteur de pluie mesurée dans le récipient collecteur et tout incident pouvant être constaté.

Les systèmes d'enregistrement électroniques sur mémoires informatiques, amovibles ou fixes, facilitent énormément le traitement de l'information recueillie. Les contrôles sur le terrain ne peuvent être toutefois que sommaires (encombrement de la mémoire, état de la source d'énergie, informations globales), et le traitement des enregistrements se limite à un bon archivage des supports de stockage : cartouches, cassettes ou disquettes. Toute panne étant généralement rédhibitoire, au moins un appareil de rechange devra être gardé en stock. Si le campement de base est alimenté en énergie électrique, des contrôles plus précis des données pourront être effectués à l'aide d'un micro-ordinateur portable.

- *Limnimétrie*

L'observation d'une échelle limnimétrique est une opération simple, qui ne demande aucune manipulation particulière, mais qui doit être faite avec beaucoup de soin et d'assiduité. Les différentes stations étant, dans la plupart des cas, équipées d'un appareil enregistreur, une seule observation quotidienne est suffisante en dehors d'événements exceptionnels (voir paragraphe 4.1.3.1.). Afin d'éviter les erreurs de lecture (de parallaxe par exemple), l'observateur ne devra pas hésiter à s'approcher le plus près possible de la station, surtout s'il s'agit d'un réglé millimétrique, placé à l'amont d'un déversoir ou d'un seuil jaugeur. Il devra veiller à ce que la station se maintienne bien dégagée et chaque élément d'échelle, propre et lisible. C'est lui, également, qui veillera à ce que des perturbations d'origine humaine (extraction de sable, barrage à poissons, etc.) ou naturelle (croissance de la végétation ripicole, accumulation de sédiments ou de matériaux flottants, etc.) n'entravent pas le bon fonctionnement des installations.

Le technicien chargé des travaux de terrain vérifiera périodiquement le nivellement des différentes mires limnimétriques, particulièrement après de fortes crues.

- *Limnigraphie*

De la même manière que les enregistrements pluviographiques, les enregistrements limnigraphiques peuvent être stockés sur diagramme ou sur mémoire informatique, avec les avantages et inconvénients déjà mentionnés pour chacun de ces systèmes.

Les règles générales de gestion restent les mêmes pour tous les types de capteurs utilisés (paragraphe 2.2.2.2.) :

- Lors d'enregistrements sur mémoire informatique, bien noter les paramètres d'échantillonnage (intervalle de temps, seuil de sensibilité). Pour les enregistrements graphiques, la vitesse de défilement et l'échelle de réduction des hauteurs d'eau seront précisées.
- A chaque changement de support d'enregistrement (diagramme ou mémoire), noter le numéro et éventuellement le nom de la station, la cote lue à l'échelle, la date de pose et de retrait, toutes les anomalies constatées dans le fonctionnement du capteur ou de l'enregistreur, toutes les interventions effectuées.

- Si un décalage est observé entre la hauteur d'eau lue à l'échelle et celle affichée par l'enregistreur, l'observateur pourra, en fonction de ses capacités, être habilité ou non à effectuer le rattrapage nécessaire.

- *Climatologie*

Les observations climatologiques seront effectuées aux mêmes heures que sur les réseaux synoptiques nationaux. Trois relevés quotidiens sont généralement suffisants (6, 12 et 18 H TU).

Suivant le type d'appareil, les diagrammes ou les bandes d'enregistrement des appareils enregistreurs sont changés, une fois par jour ou une fois par semaine, lors des observations du matin. Les recommandations faites pour les pluviographes s'appliquent d'une manière générale à tous les enregistreurs. L'emploi d'appareils équipés de mémoires informatiques est encore peu fréquent (chapitre 2.3. et paragraphe 2.3.1.1.).

L'observateur devra être installé à proximité de la station et disposer d'un stock de matériel consommable suffisant (diagrammes, systèmes inscripteurs, pastilles pour évaporomètre, carnets, fiches d'observation). Il veillera à maintenir une réserve d'eau propre pour l'alimentation du bac d'évaporation. Il y a donc avantage à installer la station climatologique à proximité du camp de base, à condition toutefois que les normes d'exposition soient respectées.

- *Jaugeages de basses eaux*

La fréquence des jaugeages de basses eaux dépend non seulement du régime climatique et du contexte hydrogéologique, mais aussi de la stabilité et de la sensibilité de la station ainsi que de son équipement. En envisageant les pires conditions : cours d'eau à fond sableux avec un lit mineur très large, sans contrôle naturel ou artificiel, alimenté par un aquifère relativement important, les jaugeages devront être suffisamment nombreux pour suivre, de manière satisfaisante, la décroissance du débit tout au long du tarissement.

Les stations équipées de déversoirs, de seuils ou de canaux jaugeurs feront l'objet de jaugeages périodiques de contrôle, particulièrement sur les cours d'eau affectés, en saison sèche, par des variations non négligeables de débit en cours de journée. Ces oscillations peuvent être très supérieures à l'intervalle de précision recherché pour les mesures (5 % au maximum).

Si des jaugeages volants sont effectués en différents points d'un cours d'eau ou de ces affluents, ou même sur certaines sources, il sera important de noter la date et l'heure de chaque mesure. De telles observations peuvent s'avérer très intéressantes pour des bassins caractérisés par un contexte hydrogéologique hétérogène (systèmes karstiques, seuils imperméables, accidents tectoniques importants, etc.).

Quelle que soit la méthode utilisée (moulinet, micro-moulinet, capacité calibrée) et malgré les précautions qui peuvent être prises, la mesure des débits de basses eaux est souvent plus imprécise que celle des débits de moyennes ou même hautes eaux.

- *Humidité du sol*

En l'absence de précipitations, l'humidité du sol sera contrôlée avec une fréquence hebdomadaire ou bi-mensuelle.

Ces mesures demandent, impérativement, la présence du technicien responsable des travaux de terrain. Si des prélèvements sont faits à la tarière, il devra s'entourer d'une équipe de manoeuvres. Les nombreux échantillons, référencés et datés, seront conservés dans des boîtes métalliques ou des sacs en plastique, fermés hermétiquement par un ruban adhésif. Ils seront ensuite stockés dans des caisses ou des cantines compartimentées. Le traitement sur le terrain des prélèvements demande l'installation d'un laboratoire et la présence d'un technicien formé à ces diverses manipulations : dessiccation, filtration, pesées, etc. Une étuve à température stabilisée (avec les difficultés d'alimentation énergétique que cela induit), plusieurs dessiccateurs pour assurer le refroidissement des échantillons en atmosphère sèche et une balance de précision sont nécessaires (paragraphe 4.2.1.5.6.). De telles contraintes incitent à ne conseiller ce type d'installations que dans le cas d'opérations lourdes et de durée suffisante pour justifier un tel investissement.

Les sondes à neutrons contenant une source radio-active de très forte activité, certaines dispositions doivent être prises, tant pour leur stockage et leur transport, que pour leur utilisation. Bien que placées dans un boîtier de protection, les risques d'irradiation demeurent. Au repos, les sondes doivent rester dans leur étui, verrouillées et stockées dans leur caisse de transport qui doit être entreposée dans un local suffisamment isolé

et sûr, équipé d'un dosimètre. Seul un technicien habilité devrait être autorisé à effectuer les mesures. Le corps de la sonde ne doit jamais être pris à pleine main et la maintenance ne peut être assurée que par le constructeur. Le port par la poignée sera, dans tous les cas, très court. Les tubes de mesure auront une hauteur aérienne aussi faible que possible, de manière à éviter l'irradiation lors du passage de la sonde. L'opérateur et ses aides devront porter un dosimètre personnel, et se tenir le plus loin possible de l'appareil. A la fin de chaque série de mesures, la sonde sera remontée dans son boîtier de protection. Si la source vient à se coincer dans le tube, il est nécessaire de laisser l'appareil en place et d'extraire l'ensemble du sol. La position de la sonde est alors donnée par le compteur de profondeur. Les travaux de terrassement seront effectués en entourant le tube, au fur et à mesure du creusement, de deux demies coquilles de paraffine ou de polyéthylène de quinze centimètres d'épaisseur et trente centimètres de haut.

- *Piézométrie*

Excepté dans le cas particulier de nappes souterraines peu profondes, en liaison étroite avec des cours d'eau ou des zones d'expansion, la mesure des variations du niveau piézométrique des aquifères, y compris en période de pluies, entre dans la catégorie des opérations de routine. Des observations quotidiennes sont rarement nécessaires, surtout si certains puits sont équipés de piézographes. Une fréquence hebdomadaire, voire bi-mensuelle, est souvent suffisante, particulièrement en saison sèche. Par commodité (nécessité de transporter une sonde de mesure et de respecter une certaine périodicité), les observations seront faites au cours de tournées dont le parcours et éventuellement le calendrier (si la fréquence n'est pas quotidienne) auront été définis par le responsable des mesures.

- *Transports solides et hydrochimie*

En basses eaux, les variations de la charge solide et de la composition chimique de l'eau des cours d'eau sont lentes et généralement monotones. Des prélèvements hebdomadaires sont suffisants dans la majorité des cas. Ils peuvent être faits par les observateurs chargés des stations hydrométriques. Par contre, les prélèvements d'eau effectués dans les puits, les piézomètres ou le sol, comme les mesures complètes de transport des matières en suspension ou dissoutes, demandent l'intervention d'un technicien. Ce dernier effectuera également sur le terrain les mesures de résistivité, Ph et alcalinité qui sont plus fréquentes que les prélèvements devant servir à l'analyse chimique complète de l'eau.

Comme pour la mesure de l'humidité du sol par la méthode gravimétrique, des dispositions devront être prises pour référencer et dater les échantillons au moment des prélèvements, puis pour les stocker et les transporter commodément. Des flacons en plastique seront utilisés, de préférence à des récipients en verre.

Si la détermination sur le terrain du transport solide en suspension peut, avec quelques précautions (balance de précision, étuve à température suffisamment stabilisée, dessiccateurs, personnel entraîné), être envisagée, il ne semble pas réaliste de vouloir y effectuer l'ensemble des analyses hydrochimiques.

- *Mesures diverses*

Les mesures et observations nécessaires à la détermination des caractéristiques physiques du sol ou du sous-sol influant sur le cycle hydrologique sont faites une fois pour toutes, et n'appartiennent pas aux opérations de routine. Par contre, certaines observations périodiques, sortant du domaine purement hydrologique, pourront être effectuées complémentaires aux autres actions : suivi des variations des surfaces cultivées ou déboisées, suivi des cycles végétatifs ou des pratiques culturales, contrôle des quantités d'eau consommées par les populations, le bétail ou l'agriculture, etc.

4.1.3. OPERATIONS EPISODIQUES ET PRIORITAIRES

Les opérations occasionnées par des phénomènes imprévisibles, si ce n'est dans des délais de quelques minutes à quelques heures, bénéficient de la priorité sur les opérations de routine. Chacun de ces phénomènes épisodiques doit, a priori, être considéré comme susceptible de ne pas pouvoir se reproduire pendant la durée d'existence du bassin représentatif qui, dans bien des cas, reste très limitée.

Les mesures et observations doivent pouvoir débiter à n'importe quel moment (de nuit comme de jour) et dans les meilleurs délais. Il importe donc que le matériel ou les dispositifs nécessaires soient disponibles, rapidement mobilisables et en parfait état de marche. Un plan d'opérations, conciliant la rapidité des mesures, liée au caractère épisodique de l'événement, avec le désir d'information maximale, doit être établi. L'ordre d'urgence

d'intervention tiendra compte des diverses possibilités d'apparition des phénomènes, en laissant tout de même aux responsables des opérations une marge de manoeuvre suffisante pour parer à l'imprévu. Dans ce cas, les décisions doivent être rapides et sûres.

Le plan d'intervention n'est pas figé, il doit sans cesse être réajusté, tant au cours d'une même campagne, que d'une année sur l'autre. Les expériences et les résultats acquis peuvent conduire à modifier certains dispositifs ou certaines méthodes de mesures, ainsi que les ordres d'urgence.

La rapidité d'intervention ne peut être garantie que si le camp de base occupe sur le bassin une position telle que soient réduits au minimum, malgré les mauvaises conditions atmosphériques, les délais comme les difficultés d'accès aux divers périmètres ou aux stations de mesures. Dans les régions faiblement développées, la viabilité des chemins est souvent problématique, particulièrement après une forte pluie. L'entretien des voies d'accès fait donc partie des tâches prioritaires. Malgré ces précautions, il est rare que l'utilisation de véhicules tout terrain, équipés de matériel de désembourbage (treuils, crics, planches, tirfor, plaques métalliques, etc.), ne soit pas nécessaire (photo 57).

4.1.3.1. EVENEMENTS AVERSE-CRUE

Les mesures exceptionnelles, nécessaires à la compréhension du phénomène "averse-crue", comportent essentiellement :

- les jaugeages qui permettent le calcul des débits de hautes et moyennes eaux,
- additionnellement, la prise d'échantillons pour la mesure du transport solide et le suivi hydrochimique,
- plus rarement, le suivi de l'humidité du sol et des niveaux piézométriques.

Ces opérations prioritaires ne doivent pas faire oublier que les pluviomètres devront, dans la mesure du possible, être relevés avant que ne survienne une nouvelle averse.

- *Hydrométrie*

Diverses options doivent être prises, en fonction des moyens humains et matériels disponibles :

- . choix de l'ordre d'intervention de l'équipe (ou des équipes) de jaugeurs sur les différentes stations, compte tenu du temps de réponse des bassins, du temps d'accès aux stations et des résultats déjà acquis,
- . choix des méthodes de mesures (jaugeages complets au moulinet ou par verticales indépendantes, point par point ou par intégration, jaugeages chimiques ou aux flotteurs, etc.), en fonction de la rapidité de variation de la hauteur d'eau, de la vitesse du courant, de la présence d'objets flottants.

En zones intertropicales, les fortes pluies survenant fréquemment en fin de journée ou durant la nuit, un système commode d'éclairage devra être prévu : projecteurs alimentés par batteries, lampes au néon, lampes de tête, etc. (photo 18).

L'hydrologue doit être prêt à mesurer les écoulements de débordement en nappe et éventuellement, si les conditions l'exigent, à changer de section, ou de méthode de mesure (utilisation de flotteurs, ou choix d'une section plus large, en cas de fortes vitesses par exemple). Ces interventions se font souvent au détriment de la précision, mais il est évident qu'une mesure imprécise est toujours préférable à une absence de mesure.

Si le limnigraphe vient à être emporté par le flot, l'échelle devra être lue avec une fréquence qui sera fonction des variations du plan d'eau. Si l'échelle est également détruite, des piquets repères seront plantés dans les berges pour suivre ces mêmes variations. Ces palliatifs seront transitoires, les travaux de restauration devant être engagés dans les meilleurs délais.

- *Transport solide et hydrochimie*

Les mesures de matières solides et dissoutes consistent essentiellement à effectuer des prélèvements dans les eaux superficielles (cours d'eau, parcelles). Toutefois, les quantités de matières transportées en suspension ou

en solution n'étant pas reliées de manière univoque au débit (elles varient au cours d'une crue et au cours des saisons), chaque événement devra être suivi du début à la fin, ce qui, en l'absence de système de prélèvement automatique, demande des moyens en personnel et des moyens de stockage importants (le système d'identification des échantillons devra donc être clair et précis).

Si une étude de la répartition des concentrations dans la section de mesure s'avère nécessaire, elle sera réalisée lors de la mesure des débits.

- *Humidité du sol et piézométrie*

Il est rare que les mesures d'humidité du sol ou des niveaux piézométriques fassent partie des opérations à effectuer durant un événement averse-crue. Néanmoins, dans le cadre d'études spécifiques visant à une meilleure connaissance des mécanismes et des facteurs explicatifs du ruissellement, le calcul des variations du stock d'eau dans le sol, correspondant aux phases de réhumectation et de ressuyage durant une pluie et peu après, peut s'avérer nécessaire. L'utilisation d'appareils équipés d'un système d'enregistrement sur diagramme ou sur mémoire informatique est alors hautement souhaitable. Dans le cas contraire, des mesures périodiques, suffisamment rapprochées dans le temps, compte tenu de la forme de l'averse, de la nature du sol ou de l'état de surface, demanderont la présence d'un technicien.

De la même manière, des aquifères peu profonds, ayant d'étroites relations avec les eaux de surface, peuvent répondre très rapidement à une averse. L'installation d'appareils enregistreurs est dans ce cas conseillée.

4.1.3.2. ETIAGES EXCEPTIONNELS

Bien que ne présentant pas le même caractère d'urgence que les jaugeages de crues, les mesures de basses eaux ne doivent pas être négligées, particulièrement dans les bassins pourvus de réserves souterraines. En période de forte sécheresse, elles seront classées comme prioritaires, la détermination des caractéristiques des étiages pouvant revêtir la même importance que celle des caractéristiques des crues.

La mise au point d'un programme d'intervention s'appuiera sur la connaissance, plus ou moins qualitative, que l'on peut avoir du tarissement des cours d'eau, dans le temps comme dans l'espace. C'est pour cela qu'il est recommandé d'effectuer des jaugeages, non seulement à hauteur des stations hydrométriques, mais également sur l'ensemble du bassin, principalement le long des cours d'eau les plus importants.

4.1.4. COORDINATION DES OPERATIONS

Le responsable des études, chercheur ou ingénieur, doit impérativement effectuer des visites périodiques sur le bassin. Ces tournées sont indispensables au bon déroulement des travaux, comme à une bonne interprétation des mesures que facilite une parfaite connaissance du terrain. Divers parcours à pied du bassin, lors d'une averse, sont toujours riches d'enseignements.

A chaque visite, des instructions précises seront laissées par écrit à l'hydrologue chargé des travaux et des opérations de terrain. Ce dernier devra tenir à jour des archives suffisamment documentées, dans lesquelles seront consignés :

- l'emploi du temps de tout le personnel,
- les difficultés, anomalies ou perturbations rencontrées dans l'exécution du plan d'interventions, et les mesures immédiates prises pour y pallier,
- toutes les observations qualitatives, faites lors de phénomènes épisodiques exceptionnels.

4.2. EVALUATION DES COUTS

4.2.1. ELEMENTS A PRENDRE EN COMPTE

Les éléments à prendre en compte pour le calcul du prix de revient des études sur BVRE sont examinés, en fonction des différentes phases d'avancement, et en séparant le fonctionnement de l'équipement. Ils sont donnés pour un bassin représentatif englobant trois sous-bassins sur lesquels sont effectuées des mesures hydropluviométriques et climatologiques, toutes les autres mesures ou observations étant considérées comme optionnelles. La durée de fonctionnement est prise arbitrairement égale à trois ans.

4.2.1.1. PHASE PREPARATOIRE

La phase préparatoire, qui s'effectue à la fois au bureau et sur le terrain, a pour but essentiel de sélectionner l'ensemble de BVRE à étudier.

4.2.1.1.1. TRAVAIL DOCUMENTAIRE

- **Fonctionnement :**

- . 1 technicien supérieur : 1 semaine ;
- . matériel consommable : cartes topographiques et thématiques, photographies aériennes (images satellitaires éventuellement), matériel de dessin.

4.2.1.1.2. PROSPECTION DE TERRAIN

- **Fonctionnement :**

- . 1 ingénieur responsable : 1 semaine ;
- . 1 technicien supérieur : 1 semaine ;
- . 1 aide (chauffeur) : 1 semaine ;
- . 1 véhicule tout terrain avec le carburant : 1 semaine ;
- . petit matériel (boussole, stéréoscope, décamètre, curvimètre, etc.).

4.2.1.2. PHASE D'INSTALLATION

La phase d'installation comprend :

- la construction et l'équipement d'un campement ;
- l'aménagement d'accès ;
- le débroussaillage des sites de station : essentiellement pour les stations hydrométriques et la station climatologique ;
- l'aménagement des stations hydrométriques, comprenant pour chacune d'entre elles : l'installation d'un limnigraphe, la construction d'une passerelle et la construction d'un seuil ou d'un déversoir ;
- l'aménagement de la station climatologique : installation d'un abri météorologique, des appareils et d'une clôture ;

- l'installation du réseau pluviométrique : pluviomètres et pluviographes.

Optionnellement, pourront être installés (voir paragraphe 4.2.1.5.) :

- des parcelles d'érosion et/ou des fosses à sédiments ;
- un réseau piézométrique (puits et/ou piézomètres de petit diamètre) ;
- des préleveurs d'échantillons d'eau ;
- des parcelles pour des études sous pluie simulée ou naturelle ;
- des sites de mesure de l'humidité du sol (tubes de sonde neutronique, par exemple) ;
- des sites de mesures tensiométriques.

1. Fonctionnement :

- . 1 ingénieur responsable : 15 jours ;
- . 1 technicien supérieur : 2 mois ;
- . 1 technicien de terrain : 4 mois ;
- . 1 aide (chauffeur) : 4 mois ;
- . main d'oeuvre diverse (maçons, menuisiers, manoeuvres) : 18 mois x hommes ;
- . 1 véhicule tout terrain avec le carburant et l'entretien : 4 mois ;
- . 1 véhicule pour transport du matériel avec le carburant et l'entretien : 2 mois ;
- . matériel consommable : papier, stylos, carnets, bordereaux, diagrammes ou cartouches d'enregistreurs, pétrole, essence, etc.

2. Matériel technique et scientifique

- . 5 limnigraphes (dont 1 en réserve) et pièces détachées ;
- . 30 pluviomètres (dont 3 en réserve), avec support et éprouvette ;
- . 5 éprouvettes de rechange ;
- . 7 pluviographes (dont 1 en réserve), avec pièces détachées ;
- . matériel climatologique comprenant :
 - * 1 abri météorologique ;
 - * 1 ensemble psychrométrique : 3 thermomètres (dont 1 en réserve) ;
 - * 2 thermomètres à maxima (dont 1 en réserve) ;
 - * 2 thermomètres à minima (dont 1 en réserve) ;
 - * 1 thermo-hygrographe (en option), avec pièces détachées ;
 - * 1 évaporomètre Piche (en option) ;
 - * 1 anémomètre totalisateur et 1 girouette (ou un anémographe directionnel) ;
 - * 1 héliographe (avec bandes) ;
 - * 2 bacs d'évaporation (suivant le type de fonctionnement, les deux appareils seront installés ou l'un d'entre eux sera gardé en réserve).
- . matériel topographique : niveau ou théodolite ;
- . matériel de construction : ciment, bois , ferrailage, tubes métalliques, pierres, sable, etc.

3. Matériel divers

- . équipement du campement : mobilier domestique, bureau, groupe électrogène, pompe, citerne ;

- . outillage : pelles, pioches, barres à mine, outillage de mécanique, etc. ;
- . 1 remorque.

4.2.1.3. PHASE D'EXPLOITATION

Chacune des trois années d'exploitation se subdivise en trois périodes.

4.2.1.3.1. EXPLOITATION DE SAISON DES PLUIES

Bien que dans certaines zones climatiques la (ou les) saison(s) des pluies puissent s'étendre sur plus de six mois, la campagne de mesures intensives, durant laquelle des opérations sporadiques prioritaires peuvent être menées, ne devrait pas dépasser sensiblement cette durée. En revanche, il est inutile de garder, dans les régions plus sèches, un dispositif important d'intervention, au-delà de trois ou quatre mois.

1. *Fonctionnement* :

- . 1 ingénieur responsable : 15 jours ;
- . 1 technicien supérieur : 3-6 mois ;
- . 1 technicien de terrain : 3-6 mois ;
- . 1 aide (chauffeur) : 3-6 mois ;
- . 5 observateurs : 3-6 mois ;
- . 2 manoeuvres permanents : 3-6 mois ;
- . manoeuvres temporaires : 6-12 mois x hommes ;
- . 1 véhicule tout terrain avec le carburant et l'entretien : 3-6 mois ;
- . 5 bicyclettes, cyclomoteurs ou motocyclettes avec le carburant et l'entretien : 3-6 mois ;
- . petit matériel consommable : équipements de protection contre la pluie (imperméables, grands parapluies), piles, batteries, etc.

2. *Equipement* :

- . *matériel de jaugeage* :
 - * 2 moulinets, avec hélices de pas différents et pièces détachées ;
 - * 3 compte-tours ;
 - * 1 micro-moulinet, avec hélices de pas différents, micro-perche et pièces détachées ;
 - * 1 perche pour jaugeages à gué ;
 - * 2 perches pour jaugeages depuis une passerelle ;
 - * 2 supports de perche ;
 - * 1 système de mesure au bateau, avec porte à faux, saumon, treuil électro-porteur (en option, suivant la topographie des sections de jaugeages).
- . *Matériel divers* :
 - * équipement pour désembourbage : treuils, câbles, crics, tirfor, plaques métalliques etc. ;
 - * équipement d'éclairage pour travaux de nuit : lampes, phares, etc. ;
 - * micro-ordinateur portable (en option), recommandé principalement si certains appareils enregistreurs sont équipés de mémoires informatiques.

4.2.1.3.2. EXPLOITATION DE SAISON SECHE

Excepté en cas d'étiage exceptionnel sur des cours d'eau pérennes, cette phase d'exploitation ne compte pas d'actions sporadiques prioritaires. Les mesures se limitent donc à quelques jaugeages périodiques (pour les écoulements prolongés ou pérennes), à quelques relevés pluviométriques, et surtout aux relevés climatologiques. Par contre, des travaux d'entretien et de contrôle sont toujours nécessaires (appareils de mesure et d'observation, matériel divers, voies d'accès, campement, etc.). C'est également durant cette période que s'effectuent les relevés complémentaires (paragraphe : 4.2.1.4.).

- *Fonctionnement* :

- . 1 ingénieur responsable : 1 semaine ;
- . 1 technicien supérieur : 15 jours ;
- . 1 technicien de terrain : 1 mois ;
- . 1 aide (chauffeur) : 1 mois ;
- . 2 observateurs : 6-9 mois ;
- . manoeuvres temporaires : 3-6 mois x hommes ;
- . 1 véhicule avec le carburant et l'entretien : 1 mois ;
- . 2 bicyclettes, cyclomoteurs ou motocyclettes avec le carburant et l'entretien : 6-9 mois ;
- . petit matériel consommable.

4.2.1.3.3. TRAVAUX DE BUREAU

Les travaux de bureau comprennent tous les dépouillements, les contrôles et les traitements qui n'ont pu être effectués sur le terrain, ainsi que la rédaction des différents rapports et publications : procès verbal d'installation, rapports de campagne et publication finale.

Les estimations données, ci-après, correspondent à des valeurs moyennes, ramenées à un an.

1. *Fonctionnement* :

- . 1 ingénieur responsable : 1 mois 1/2 ;
- . 1 technicien supérieur : 2 mois ;
- . 1 technicien (dessinateur, saisie informatique, etc.) : 2 mois ;
- . matériel consommable ;
- . tirage des publications.

2. *Equipement* :

- . 1 micro-ordinateur PC compatible IBM, avec un disque dur d'au moins 40 Mo et divers périphériques : imprimante, table à numériser, traceur ou imprimante graphique, lecteur de cartouches (si nécessaire) ;
- . logiciels ou progiciels de saisie, de traitement, de calcul, de tracés graphiques et d'impression ;
- . matériel à photocopier.

4.2.1.4. RELEVES COMPLEMENTAIRES

Il est très rare que tous les documents, essentiellement cartographiques, nécessaires aux études soient

disponibles. Des relevés topographiques, pédologiques, géologiques ou phytologiques complémentaires doivent souvent être effectués, la période la plus favorable à leur réalisation se situant en saison sèche (paragraphe 4.2.1.3.2.).

4.2.1.4.1. RELEVES PEDOLOGIQUES

Il s'agit de cartographier les différents types de sol et/ou les états de surface (y compris le couvert végétal).

1. *Fonctionnement* :

- . 1 pédologue : 15 jours de terrain et 15 jours de bureau ;
- . 1 technicien : 15 jours de terrain ;
- . 1 manoeuvre : 15 jours de terrain ;
- . 1 véhicule tout terrain avec le carburant : 15 jours ;
- . petit matériel consommable : photographies aériennes, sacs plastiques, etc. ;
- . tirage du rapport.

2. *Equipement* :

- . petit matériel pédologique : tarières, topofil, boussole, stéréoscope, etc..

4.2.1.4.2. RELEVES GEOLOGIQUES

Des relevés géologiques ne sont effectués que si une étude des eaux souterraines a été programmée (paragraphe 4.2.1.5.1.). Dans le cas contraire, les documents existants (à échelle moyenne) et les observations pédologiques (y compris les états de surface) suffisent généralement.

4.2.1.4.3. LEVES TOPOGRAPHIQUES

Pour les seules études hydro-climatologiques, les levés topographiques se limitent aux stations hydrométriques (profils en long et profils en travers de thalwegs, rattachement du 0 de l'échelle limnimétrique), et parfois aux bassins de faible déclivité pour lesquels il est indispensable de préciser la limite de partage des eaux.

1. *Fonctionnement* :

- . 1 technicien de terrain : 15 jours de terrain et 15 jours de bureau ;
- . 1 aide : 15 jours de terrain ;
- . 1 véhicule avec le carburant : 15 jours ;
- . petit matériel consommable.

2. *Equipement* :

- . 1 niveau ou théodolite (paragraphe 4.2.1.2.).

4.2.1.5. MESURES ET OBSERVATIONS OPTIONNELLES

Les mesures optionnelles correspondent aux mesures effectuées, en complément des observations hydro-

climatologiques, pour répondre à une problématique particulière. Les équipes hydrologiques doivent alors être majorées de 50 % (temps x hommes).

4.2.1.5.1. EAUX SOUTERRAINES

L'installation et l'exploitation d'un réseau piézométrique demandent des moyens spéciaux (les chiffres donnés ci-après ont été calculés pour un réseau d'une vingtaine de puits).

1. *Fonctionnement* :

- . 1 hydrogéologue : 15 jours de terrain et 30 jours de bureau (y compris l'interprétation des données et la rédaction d'un rapport) ;
- . 1 technicien : 3 mois ;
- . 1 aide (chauffeur) : 3 mois ;
- . 2 manoeuvres : 3 mois ;
- . 1 véhicule tout terrain avec le carburant et l'entretien : 3 mois ;
- . tirage du rapport.

(Cette équipe intervient essentiellement pendant la phase d'installation du réseau piézométrique, les observations de routine étant effectuées par le personnel chargé des observations hydro-climatiques).

- . 1 campagne de géophysique (en option) : 15 jours ;
- . 1 sondeuse (en option et en location) : 1 mois ;
- . 1 système de mesure des débits pour les essais de pompage : 15 jours ;
- . matériel consommable : ciment, sable, sacs plastiques, diagrammes, etc. ;

Si les puits profonds sont creusés par des puisatiers, le nombre de manoeuvres devra être majoré : 15 mois x hommes.

2. *Equipement* :

- . 6 tarières avec rallonges ;
- . 200 m de tubes plastique de 50 à 150 mm, avec 20 crépines et systèmes de fermeture ;
- . 6 piézographes avec pièces détachées ;
- . 1 pompe et tuyaux ;
- . 1 groupe électrogène.

4.2.1.5.2. TRANSPORTS SOLIDES

L'évaluation est faite pour trois parcelles d'érosion et deux stations en cours d'eau.

1. *Fonctionnement* :

- . installation : 4 mois x manoeuvres ;
- . exploitation : 3-6 mois x manoeuvres ;
- . les autres personnels sont pris en compte dans la majoration de 50 % des activités ;
- . matériel de construction pour les fosses à sédiments et les parcelles ;
- . petit matériel consommable.

2. Equipement :

- . 1 laboratoire de terrain comprenant le matériel de prétraitement et de stockage des échantillons (l'installation d'un véritable laboratoire équipé d'une étuve, de dessiccateurs et d'une balance de précision n'est pas prise en considération - voir paragraphe 4.2.1.5.6.) :
 - * 100 jerricans de 10 litres ;
 - * 30 dames-jeannes de 10 litres ;
 - * 500 flacons plastiques de 0,5 litre ;
 - * 5 seaux plastiques ;
 - * 10 litres de HCL ou de sulfate d'alumine ;
 - * petit matériel : tuyaux plastiques, pipettes, bechers, entonnoirs, filtres, crayons marqueurs, etc.
- . 5 caisses en bois (ou cantines métalliques) compartimentées pour le stockage et le transfert des flacons de prélèvement ;
- . 1 pompe à main (en option) ;
- . 1 moto pompe (fait double emploi avec la pompe utilisée pour les eaux souterraines) ;
- . 3 préleveurs automatiques (en option).

4.2.1.5.3. HYDROCHIMIE

Les prélèvements d'eau seront effectués dans deux pluviomètres, sur quatre stations hydrométriques, dans dix piézomètres (en option) et sur six sites représentatifs de l'eau dans le sol (en option).

1. Fonctionnement :

- . la phase d'installation est quasi nulle (seule la pose des bougies de prélèvement de l'eau dans le sol et de préleveurs automatiques est à considérer).
- . la phase d'exploitation est prise en compte dans la majoration de 50 % des activités, avec en plus :
 - * 1 hydrochimiste : 1 semaine de terrain, et 30 jours de laboratoire et de bureau pour l'interprétation des données et la rédaction d'un rapport ;
 - * petit matériel consommable ;
 - * tirage du rapport.

2. Equipement :

- . Le laboratoire de terrain équipé pour la mesure des transports solides doit être complété par du matériel de prélèvement et de stockage, et des appareils de mesures :
 - * 500 flacons plastiques de 0,5 litre ;
 - * 200 flacons plastiques de 1 litre ;
 - * 1000 flacons plastiques de 60 ml ;
 - * 1 ph-mètre portable ;
 - * 1 conductivimètre portable ;
 - * 2 thermomètres (dont 1 électronique) ;
 - * 1 matériel pour la mesure par volumétrie de l'alcalinité.

4.2.1.5.4. HUMIDITE DU SOL

Les estimations données correspondent à six sites de mesures.

1. *Fonctionnement* :

- . La phase d'installation et d'étalonnage est importante :
 - * 1 ingénieur responsable : 1 semaine ;
 - * 1 technicien supérieur : 1 mois ;
 - * 1 technicien de terrain : 2 mois ;
 - * 1 aide (chauffeur) : 2 mois ;
 - * 2 manoeuvres : 2 mois ;
 - * 1 véhicule et carburant : 2 mois ;
 - * petit matériel consommable : sacs plastiques, etc..
- . La phase d'exploitation de saison des pluies fait partie des opérations de routine (paragraphe 4.1.2.). Elle se prolonge en saison sèche, avec des fréquences de mesures plus faibles.

2. *Equipement* :

- . 1 humidimètre ;
- . 50 mètres de tubes métalliques ;
- . 6 tarières avec rallonges ;
- . 500 boîtes métalliques ;
- . 6 cylindres de prélèvement ;
- . 1 densitomètre à membrane (en option) ;
- . 2 cylindres métalliques de 2 mètres de diamètre et 40 cm de hauteur (en option) ;
- . 6 caisses en bois (ou cantines métalliques) compartimentées pour le transport des échantillons.

4.2.1.5.5. MINI-SIMULATEUR DE PLUIE

Les mesures au mini-simulateur de pluie s'effectuent généralement en saison sèche.

Les estimations proposées correspondent à une douzaine de sites représentatifs (soit $3 \times 12 = 36$ points de mesures).

1. *Fonctionnement* :

- . 1 ingénieur responsable : 15 jours ;
- . 1 technicien supérieur : 2 mois ;
- . 1 technicien de terrain : 2 mois ;
- . 1 aide (chauffeur) : 2 mois ;
- . 1 manoeuvre : 2 mois ;
- . 1 véhicule tout terrain avec le carburant et l'entretien : 2 mois ;
- . petit matériel consommable : diagrammes, papier, etc..

2. *Équipement* :

- . 1 mini-simulateur avec support ;
- . 1 limnigraphe à rotation rapide ;
- . 12 cadres de 1 m² et cuves ;
- . 1 citerne de 500-1000 litres, sur remorque ;
- . 1 humidimètre et tubes (en option) ;
- . 1 moto-pompe et pompe (pour mémoire) ;
- . 1 groupe électrogène 2,5 KVA (pour mémoire).

4.2.1.5.6. LABORATOIRE

La plupart des mesures, dites optionnelles, demandent des analyses ou des travaux complémentaires de laboratoire. Ce dernier doit permettre d'effectuer les mesures et les analyses hydrochimiques classiques, les analyses particulières (isotopiques, par exemple) étant réalisées par des laboratoires spécialisés.

Il comprendra essentiellement :

- . 1 étuve ;
- . 1 plaque chauffante ;
- . 1 ph-mètre ;
- . 1 conductivimètre ;
- . 1 balance de précision ;
- . 2 dessiccateurs ;
- . du petit matériel classique de laboratoire : capsules, bechers, pipettes, tuyaux, filtres, pompe à vide, etc. ;
- . tout le matériel et les produits nécessaires pour des mesures volumétriques, colorimétriques, photométriques et d'absorption atomique.

4.2.2. ESTIMATION D'UN BUDGET-TYPE

Les coûts, tant en personnel qu'en matériel, pouvant varier sensiblement d'un pays à l'autre, seules sont données une estimation des temps de travail par catégories de personnel (temps moyennés sur 3 ans et exprimés en nombre de mois/an), ainsi qu'une évaluation des principaux postes d'équipement dont les valeurs ne sont que des ordres de grandeur qui présentent un intérêt essentiellement comparatif.

Les temps et les coûts fournis correspondent à un ensemble formé d'un bassin et de trois sous-bassins, situé dans une région caractérisée par une saison des pluies dont la durée est voisine de quatre mois, et sur lequel ne sont effectuées que des mesures et observations hydro-pluvio-climatologiques classiques.

Les frais de personnel devront comprendre les coûts salariaux et les indemnités de subsistance sur le site. Les frais de véhicules, et autres engins, seront calculés sur la base d'un kilométrage incluant les frais de carburants, d'entretien (huiles et pièces détachées) et de provision pour l'amortissement. Les coûts de l'équipement scientifique incluent l'achat des instruments, les frais d'installation sur site, et les coûts des consommables pendant une saison. Le budget sera allégé si les instruments installés ont été acquis à l'occasion d'études antérieures.

Le tableau ci-après regroupe les différents postes budgétaires à prendre en considération.

**Budget type pour l'installation et l'exploitation
d'un ensemble de petits bassins versants ruraux**

	Bureau (N mois/an)	Terrain (N mois/an ou coût)
1. Personnel : - Ingénieur responsable - Technicien supérieur - Technicien de terrain - Aide (chauffeur) - Technicien de bureau - Observateur - Manoeuvre - Pédologue	1 mois 1/2 2 mois 2 mois 1/2 mois	1 mois 5 mois 7 mois 7 mois 36 mois 26 mois 1/2 mois
2. Véhicules : - Véhicule tout terrain - Véhicule lourd - Bicyclettes, cyclomoteurs, motos		8 mois 1 mois 36 mois
3. Equipement - Installation : 3.1 Equipement scientifique : - 1 limnigraphe - 1 pluviographe - 10 pluviomètres - 1 passerelle - 1 déversoir avec canal - Matériel de jaugeage - Station climatologique - 1 niveau chantier + mires 3.2 Campement - autres matériels : - bâtiments - mobilier et matériel de campement - petit équipement domestique - outillage et consommable - petit matériel et consommable de bureau		1,5 MF CFA 0,3 MF CFA 0,2 MF CFA 0,2 MF CFA 0,3 MF CFA 2,0 MF CFA 1,5 MF CFA 0,5 MF CFA 1,5 MF CFA

PARTIE 5

PRESENTATION DE CAS-TYPES

Sept cas-types ont été retenus, cinq correspondent à des bassins naturels, deux à des bassins installés dans des zones dotées d'infrastructures hydrauliques. Ils sont soumis à des conditions physico-climatiques suffisamment diversifiées pour couvrir de nombreuses situations susceptibles d'être rencontrées en Afrique de l'Ouest et du Centre.

Principales caractéristiques des bassins sélectionnés

ETAT	NOM DU BASSIN	SUPERFICIE (km ²)	Pm ANNUELLE (mm)
BASSINS NATURELS			
Cameroun	Sanguéré	86,5	1 034
Côte d'Ivoire	Booro-Borotou	1,36	1 359
Cameroun	Mouda	18,1	778
Burkina-Faso	Mare d'Oursi	263	400
Côte d'Ivoire	Sakassou	26,2	1 204
BASSINS AMENAGES			
Sénégal	Djiguinoum	26,5	1 424
Burkina-Faso	Bidi	150	450

5.1. BASSINS NATURELS

Les cas-types choisis permettent, de par leur spécificité, d'illustrer les différents principes énoncés dans les chapitres antérieurs. La présentation qui en est faite ne recherche pas l'exhaustivité, l'accent étant mis sur les points particulièrement intéressants et originaux. Pour une meilleure compréhension, les présentations sont accompagnées de nombreuses cartes, graphiques, tableaux ou figures. On pourra également consulter la bibliographie jointe en annexe.

5.1.1. BASSINS DE SANGUERE - CAMEROUN

5.1.1.1. THEME DE L'ETUDE

L'étude de Sanguéré avait pour objet de mettre en évidence les processus de l'alimentation du système aquifère du bassin gréseux de la Bénoué, situé dans le Nord du Cameroun.

Les mesures et observations ont porté sur quatre campagnes : 1972-1976.

5.1.1.2. CONTEXTE PHYSICO-CLIMATIQUE

Le bassin du mayo Ain Dala (9°06' - 9°14' N et 13°26' - 13°31' E, fig. 159) dont la superficie est de 86,5 km² constitue l'ensemble des bassins de Sanguéré. Situé à une douzaine de kilomètres au Sud de la ville de Garoua, il appartient au grand bassin hydrographique de la Bénoué, important affluent du Niger. Il est formé exclusivement de formations gréseuses du Crétacé supérieur, souvent recouvertes d'un mince placage d'alluvions quaternaires (fig. 160). Les différentes formations pédologiques sont constituées principalement de sols ferrugineux tropicaux de texture sableuse et de sols peu évolués d'érosion (fig. 161). La végétation, très homogène, est formée d'une savane arborée dont le degré de recouvrement est moyen.

Le climat est de type tropical pur, caractérisé par l'alternance d'une saison sèche (de novembre à mars) et d'une saison humide (de mai à septembre).

Les différents paramètres climatologiques mesurés à la station de Garoua peuvent se résumer ainsi :

- Précipitations :

- . Hauteur moyenne annuelle : 1034 mm (écart-type 177 mm).
- . Répartition mensuelle (moyenne et écart-type), en mm :

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
P	0	0,4	4	42	122	152	184	239	215	72	1	1	1 034
σ	0	2	8	35	55	53	72	92	65	47	5	6	177

- . Le nombre moyen annuel de jours de pluies est de 81.

Les pluies tombent généralement sous la forme d'averse simple. La hauteur journalière ponctuelle de fréquence annuelle est de 69 mm, celle de fréquence décennale de 118 mm.

- Température :

Les symboles suivants ont été utilisés sur la figure 162 :

- . Température maximale observée au cours du mois T_{xa} (moyenne pour la période).
- . Moyenne mensuelle des températures maximales journalières \bar{T}_x .
- . Moyenne mensuelle des températures minimales journalières \bar{T}_n .
- . Température minimale observée au cours du mois T_{na} (moyenne pour la période).
- . Température moyenne mensuelle $(\bar{T}_x + \bar{T}_n) / 2$.
- . Ecart diurne moyen mensuel $\bar{T}_x - \bar{T}_n$.
- . La température maximale du mois pour toute la période d'observation, maximum maximorum T_{xx} .
- . La température minimale du mois pour toute la période d'observation, minimum minimorum T_{nn} .

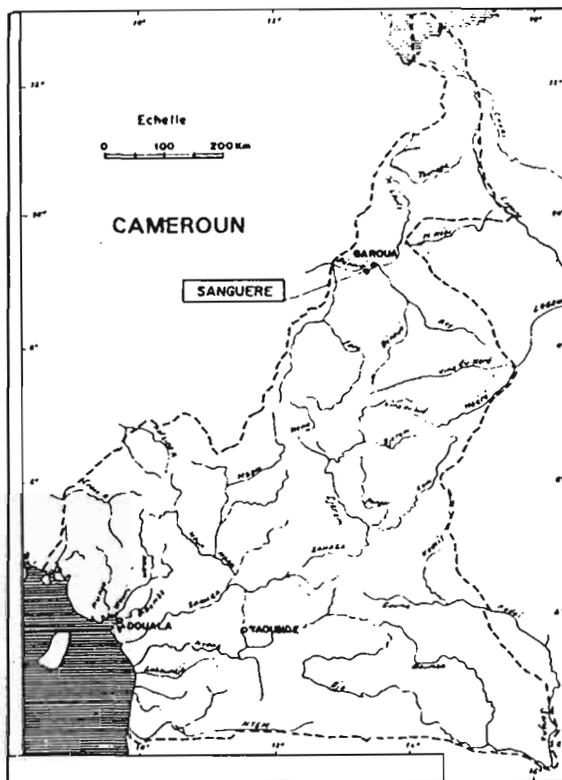
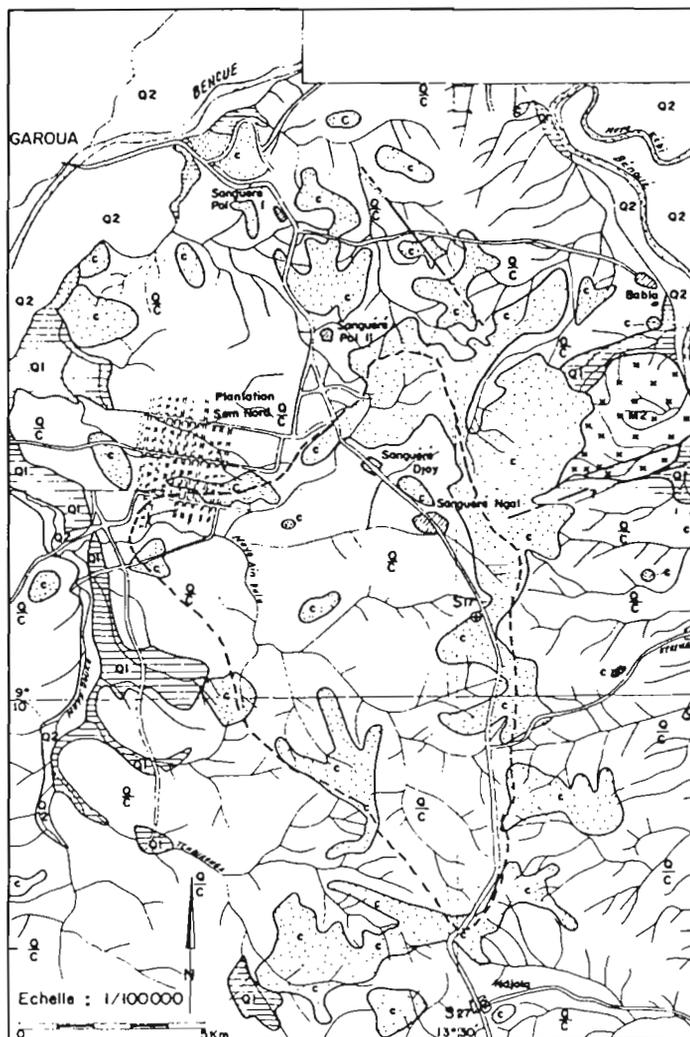


Fig-159 - SANGUERÉ : CARTE DE SITUATION

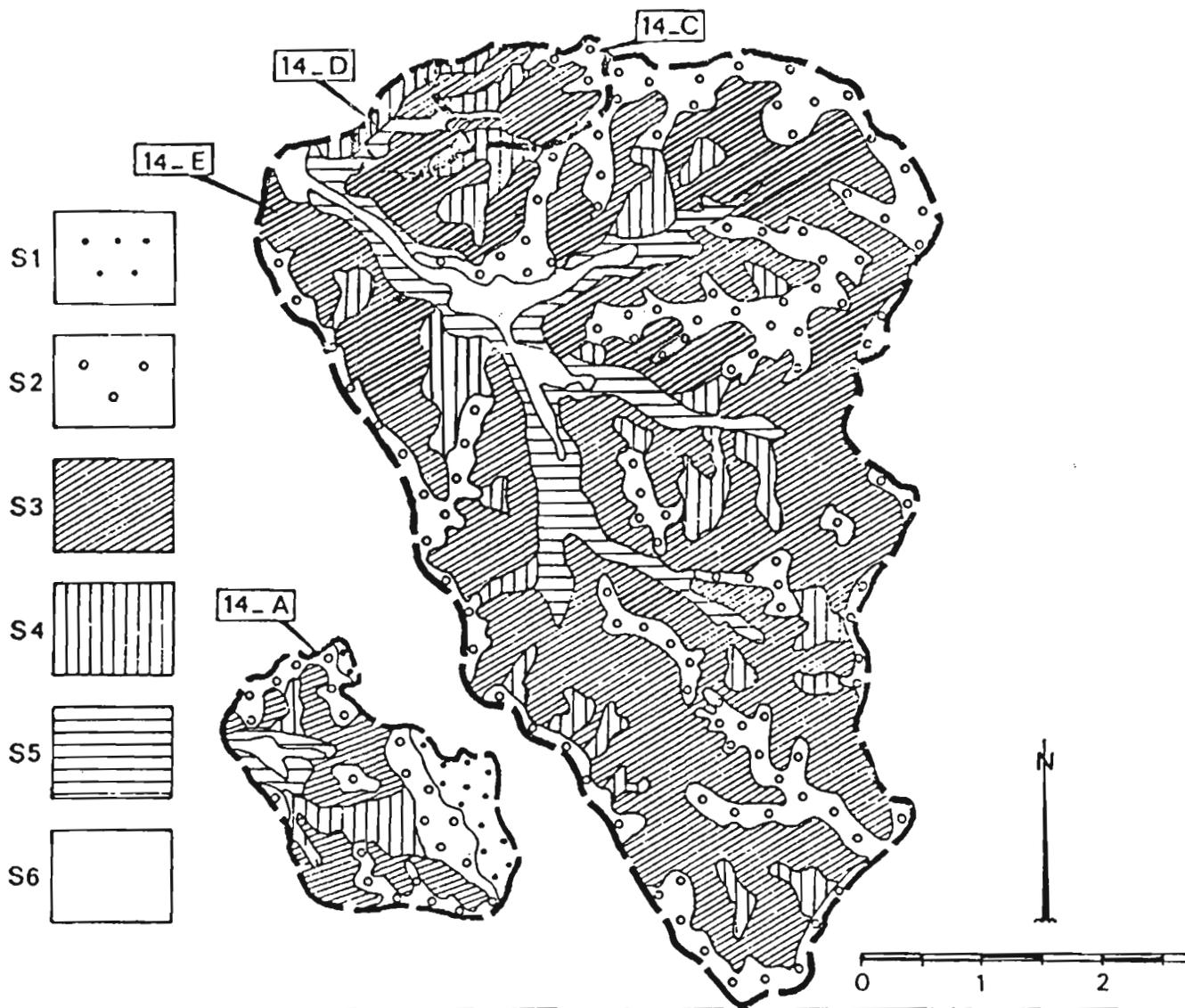


- Q2 Quaternaire récent (Alluvions modernes)
- Q1 Quaternaire ancien (terrasse fluviales, argile et gravier)
- Q/C Grès crétacé sous faible couverture quaternaire
- C Grès crétacé
- M2 Gneiss (embrechites)
- Faille
- - - - - Faille supposée
- ==== Routes et pistes principales
- Réseau hydrographique
- - - - - Limites du bassin versant
- ▨ Village

Fig-160 - CARTE GEOLOGIQUE (D'APRES RAPPORT WAKUTI)

6-CARTE DES SOLS

Source: P. BRABANT ORSTOM



6-1 UNITÉS DE SOL

Définitions

S 1 Solo minéraux bruts

S 2 Sols peu évolués d'érosion

S 3 Sols ferrugineux tropicaux, sans concrétion

S 4 Sols ferrugineux tropicaux, à taches et concrétion

S 5 Sols lessivés hydromorphes

S 6 Sols hydromorphes

Importance en % :

-/15/-/0/0/0/-/-

-/31/-/21/16/25/-/-

-/32/-/55/47/52/-/-

-/13/-/21/29/12/-/-

-/6/-/3/8/8/-/-

-/3/-/0/0/3/-/-

Fig-161 - CARTE PEDOLOGIQUE

- **Humidité de l'air** (fig. 162)

Le maximum d'humidité s'observe en cours de saison de pluies (août ou septembre), alors que le minimum est toujours en février.

- **Evaporation** (fig. 162)

La lame évaporée annuellement sur un évaporomètre Piche est de 2 880 mm, avec un maximum très prononcé en mars. L'évaporation sur bac serait de 2 800 mm.

- **Insolation** (fig. 162)

La durée d'insolation annuelle atteint 2 974 heures.

- **Vents**

Les vents dominants sont variables suivant la saison :

- . en saison sèche, ils viennent de l'Est et du Nord-Est, parfois de l'Ouest.
- . en saison des pluies, soufflent des vents d'Ouest.

5.1.1.3. CARACTERES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES

L'ensemble compte sept bassins et sous-bassins dont tous les paramètres morphométriques sont regroupés dans le tableau de la fig. 163.

Les bassins 1 et 2 ont fait l'objet d'une cartographie au 1/10 000^{ème} à partir d'une photo-restitution, alors que pour les bassins 3 et 4, caractérisés par un relief peu marqué (fig. 164 et 165), un relevé topographique précis a été nécessaire.

5.1.1.4. EQUIPEMENTS DE MESURES ET D'OBSERVATIONS

5.1.1.4.1. EQUIPEMENT PLUVIOMETRIQUE

La liste des différents équipements est donnée dans le tableau ci-après :

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Pluviomètre Association	9	16	2	3	26	4	68
Pluviographe journalier	2	3	2	2	2	1	8
Pluviographe hebdomadaire	1	1			2	1	6
Totalisateurs	3	5	2	3	28	3	58
Densité d'appareils (totalisateurs non compris) : 1 ap. pour S km ²	0,27	0,36	0,25	0,32	0,90	0,54	1,05

Des totalisateurs, relevés tous les quinze jours, doubleraient certains pluviomètres, afin d'en assurer le contrôle.

On peut noter la forte densité des équipements, y compris pour le bassin de 86,5 km² (fig. 166).

Caractéristiques	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Superficie (km ²)	3,4	7,1	1,12	1,66	27,1	3,2	86,5
Périmètre (km)	7,7	11,5	4,0	5,1	23,3	7,9	44,3
Indice de forme	1,19	1,22	1,13	1,15	1,26	1,25	1,34
Longueur rectangle équivalent (km)	2,6	4,1	1,2	1,6	8,5	2,9	17,3
Largeur rectangle équivalent (km)	1,3	1,7	0,8	1,0	3,1	1,1	4,9
Altitude maximale (m)	425	425	312	312	342	485	485
Altitude minimale (m)	266	249	265	259	247	263	193
Hypsométrie (%)							
> 480 m						0,1	0,01
460 à 480 m						0,2	0,04
440 à 460 m						0,2	0,03
420 à 440 m	0,2	0,1				0,8	0,02
400 à 420 m	1,6	0,8				2,1	0,2
380 à 400 m	3,1	1,5				3,7	0,3
360 à 380 m	3,8	2,0				5,4	0,4
340 à 360 m	2,6	1,5			0,2	7,0	0,5
320 à 340 m	5,5	3,5			7,7	18,4	3,4
300 à 320 m	21,7	14,3	10,2	6,9	24,5	23,7	13,7
290 à 300 m	22,9	20,7	29,4	19,8	24,3	7,6	13,4
280 à 290 m	19,2	18,6	36,8	28,4	19,7	9,1	12,1
270 à 280 m	15,2	11,1	19,3	21,3	11,1	15,3	9,5
260 à 270 m	4,2	18,9	4,3	21,9	7,1	6,4	8,5
250 à 260 m		6,7		1,7	4,5		8,6
240 à 250 m		0,3			0,9		7,1
230 à 240 m							4,6
220 à 230 m							6,5
210 à 220 m							6,7
200 à 210 m							3,6
< 200 m							0,8
Altitude moyenne (m)	300	292	292	285	297	320	279
Indice de pente Roche	0,210	0,169	0,190	0,177	0,100	0,231	0,098
Indice de pente global (m/km)	44	23	27	24	8,0	44	5,7
Dénivelée spécifique (m)	81	61	29	31	42	79	53
Classe de relief	R4	R4	R3	R3	R3	R4	R4
<hr/>							
Densité de drainage	3,44	3,02	3,26	3,27	2,56	4,35	2,62
Rapport de confluence	4,03	5,87	—	—	4,03	4,41	3,87
Rapport de longueur	1,85	2,03	—	—	1,86	1,68	2,01
Pente moyenne en %	24	15	28	18	8,9	29	7,2

Les rapports de confluence et de longueur des bassins 1 et 2 déterminés à partir de 3 ordres de thalwegs seulement ont peu de signification.

Fig-163 -CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES DES BASSINS DE SANGUERE (D'APRES A.CASENAVE)

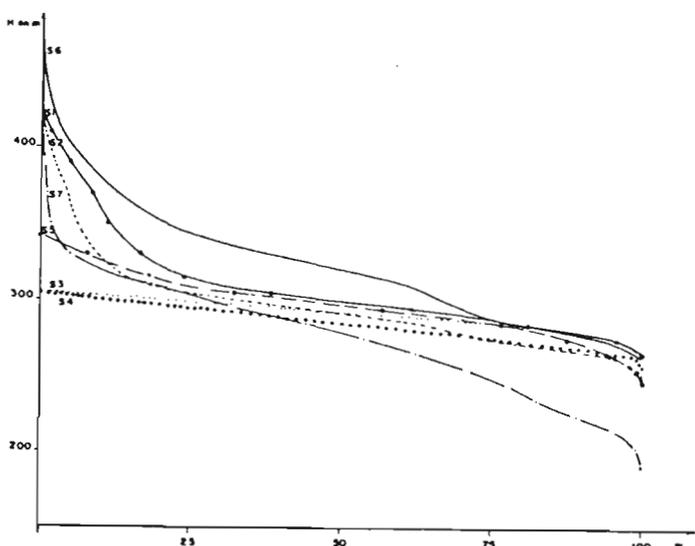


Fig-164 - SANGUERE : COURBES HYPSONOMETRIQUES

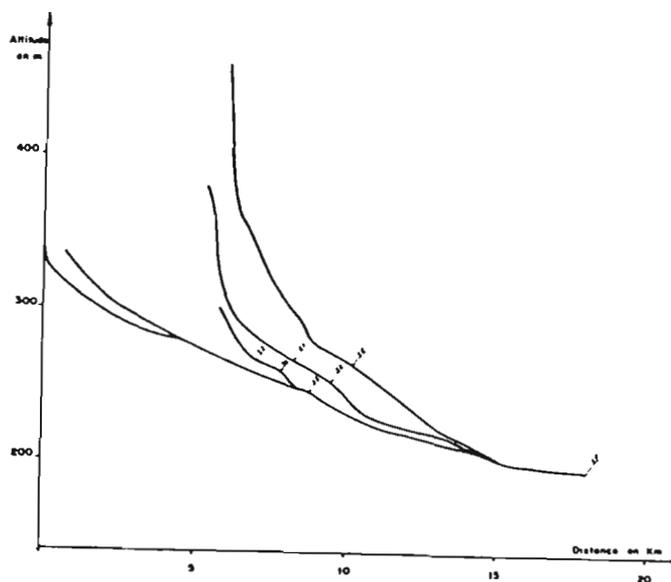


Fig-165 - SANGUERE : PROFILS EN LONG

BASSIN REPRESENTATIF de SANGUERE

CARTE TOPOGRAPHIQUE ET D'EQUIPEMENT

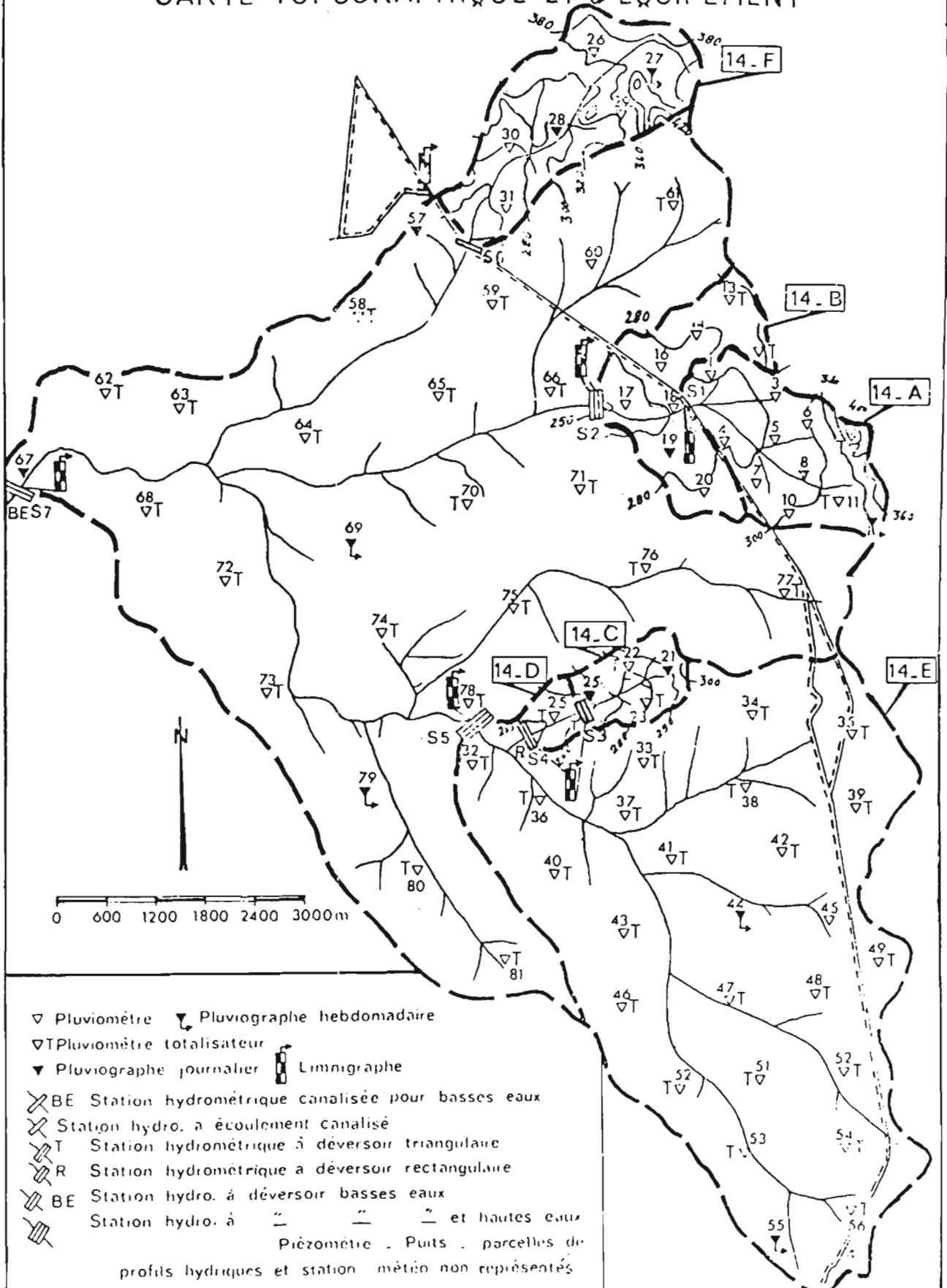


Fig-166 - EQUIPEMENTS : HYDROMETRIQUES ET PLUVIOMETRIQUES

5.1.1.4.2. EQUIPEMENT HYDROMETRIQUE

Les sept stations étaient équipées d'un limnigraphe à flotteur et d'une échelle, avec des installations additionnelles :

- Station S1 : un radier avec une goulotte.
- Station S2 : un déversoir rectangulaire et un déversoir triangulaire pour les basses eaux.
- Station S3 : un déversoir triangulaire et un canal cimenté pour la mesure des hautes eaux.
- Station S4 : une digue de 300 m et un déversoir rectangulaire.
- Station S5 : un déversoir rectangulaire et un déversoir triangulaire pour les basses eaux.
- Station S6 : un canal avec passerelle.
- Station S7 : un radier plat avec une passerelle d'une portée de 10 mètres et un déversoir triangulaire pour la mesure des basses eaux.

5.1.1.4.3. EQUIPEMENT PIEZOMETRIQUE

L'étude de la nappe a été menée sur les bassins 1-2 et 3-4 grâce à 64 puits ou piézomètres : 42 sur les bassins 1-2 ; 21 sur les bassins 3-4 et 1 sur le bassin 5 (fig. 167 et 168).

Les piézomètres ont été forés à la tarière ou à l'aide d'une sondeuse montée sur camion, alors que les puits ont été foncés par une équipe de manoeuvres.

5.1.1.4.4. EQUIPEMENT CLIMATOLOGIQUE

La station installée à proximité du camp de base comprenait :

- un abri météo équipé d'un psychromètre, d'un thermomètre à maxima-minima, d'un thermographe, d'un barographe et d'un évaporomètre Piche ;
- un bac d'évaporation enterré Colorado, type "Orstom", avec thermomètre ;
- un pluviographe journalier ;
- deux pluviomètres "Association", l'un au sol, l'autre à 1,5 m de hauteur ;
- un thermomètre pour la mesure des températures à 10 cm de profondeur dans le sol ;
- un anémomètre totalisateur, installé à partir d'avril 1973 ;
- un héliographe Campbell-Stokes.

L'équipement a été complété, en février 1974, par un bac d'évapotranspiration installé sur le bassin 3.

5.1.1.4.5. HUMIDITE DES SOLS

Les mesures d'humidité des sols ont été faites sur six parcelles représentatives de deux toposéquences de sol : trois sur le bassin 1 (A, B, C), trois sur le bassin 3 (D, E, F). Chaque parcelle était équipée d'un pluviomètre ou d'un pluviographe, et se trouvait à proximité d'un puits ou d'un piézomètre (fig. 167 et fig. 168).

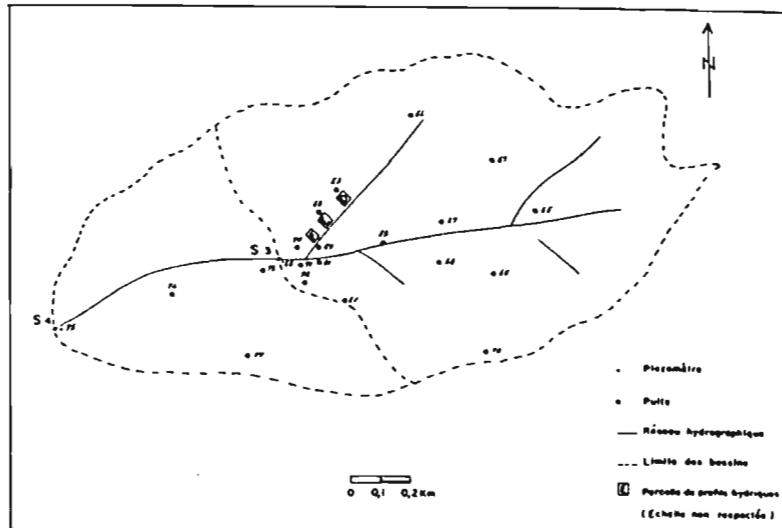
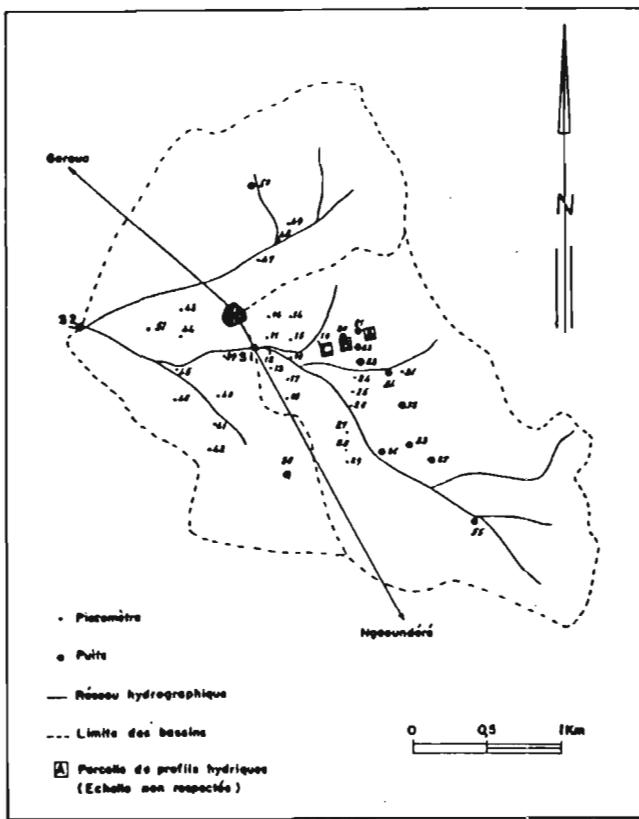


Fig-167 - BASSINS 1 ET 2 - EQUIPEMENT PIEZOMETRIQUE

Fig-168 - BASSINS 3 ET 4 - EQUIPEMENT PIEZOMETRIQUE

BASSIN 2

		A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
1972-73	Pm	19,4	163,0	132,7	210,2	161,9	122,5	34,2	0	0	0	0	0
	E	0,61	2,43	2,32	7,73	9,36	7,67	4,30	1,02	0,46	0,32	0,24	0,20
	%	3,14	1,49	1,75	3,68	5,78	6,26	12,57	—	—	—	—	—
	Hr	0,00	0,76	0,68	2,38	2,03	1,11	0,32	0	0	0	0	0
	%	—	0,47	0,51	1,13	1,25	0,91	0,94	—	—	—	—	—
	HB	0,61	1,67	1,64	5,35	7,33	6,56	3,98	1,02	0,46	0,32	0,24	0,20
	%	3,14	1,02	1,24	2,55	4,53	5,35	11,63	—	—	—	—	—
	DE	18,8	160,6	130,4	202,5	152,5	114,8	29,9	-1,02	-0,46	-0,32	-0,24	-0,20
	%	97	99	98	96	94	84	87	—	—	—	—	—
	1973-74	Pm	25,8	69,8	220,8	195,5	161,9	207,7	40,3	0	0	0	0
E		0,14	0,35	7,26	6,22	10,11	22,82	6,15	1,31	0,59	0,30	0,25	0,22
%		0,54	0,50	3,29	3,18	6,24	10,99	15,26	—	—	—	—	—
Hr		0	0	5,77	1,91	0,72	7,94	0,34	0	0	0	0	0
%		—	—	2,61	0,98	0,44	3,82	0,84	—	—	—	—	—
HB		0,14	0,35	1,49	4,31	9,39	14,88	5,81	1,31	0,59	0,30	0,25	0,22
%		0,54	0,50	0,68	2,20	5,80	7,17	14,42	—	—	—	—	—
DE		25,7	69,5	213,5	189,3	151,8	184,9	34,2	-1,31	-0,59	-0,30	-0,25	-0,22
%		100	100	97	97	94	89	85	—	—	—	—	—
1974-75		Pm	93,8	164,7	54,4	269,1	251,9	225,5	56,2	0	0	0	0
	E	0,53	2,34	0,53	8,60	28,18	37,97	17,47	3,49	1,66	0,94	0,56	0,38
	%	0,57	1,42	0,97	3,20	11,19	16,84	31,09	—	—	—	—	—
	Hr	0,08	0,49	0	2,84	14,61	13,49	1,98	0	0	0	0	0
	%	0,09	0,30	—	1,06	5,80	5,98	3,52	—	—	—	—	—
	HB	0,45	1,85	0,53	5,76	13,57	24,48	15,49	3,49	1,66	0,94	0,56	0,38
	%	0,48	1,12	0,97	2,14	5,39	10,86	27,57	—	—	—	—	—
	DE	93,3	162,4	53,9	260,5	223,7	187,5	38,7	-3,49	-1,66	-0,94	-0,56	-0,38
	%	99	99	99	97	89	83	69	—	—	—	—	—
	1975-76	Pm	10,9	102,6	133,6	161,6	276,1	276,9	72,0	0	0	0	0
E		0,23	0,40	1,89	2,64	16,75	52,21	28,93	5,18	1,90	0,96	0,44	0,28
%		2,11	0,39	1,41	1,63	6,07	18,86	40,18	—	—	—	—	—
Hr		0	0	0,70	0,55	6,62	20,78	4,59	0	0	0	0	0
%		—	—	0,52	0,34	2,40	7,50	6,38	—	—	—	—	—
HB		0,23	0,40	1,19	2,09	10,13	31,43	24,34	5,18	1,90	0,96	0,44	0,28
%		2,11	0,39	0,89	1,29	3,67	11,36	33,80	—	—	—	—	—
DE		10,7	102,2	131,7	159,0	259,4	224,7	43,1	-5,18	-1,90	-0,96	-0,44	-0,28
%		98	100	99	98	94	81	60	—	—	—	—	—

Fig-169 - BILANS MENSUELS (D'APRES A.CASENAVE)

BASSIN VERSANT DE SANGUERE

5.1.1.5. OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES

Seuls les résultats obtenus sur le bassin 2 sont donnés intégralement à titre d'exemple.

5.1.1.5.1. DONNEES DE BASE

Dans les tableaux des figures 169 et 170 sont portées les valeurs des paramètres suivants :

- Pm : Pluie moyenne mensuelle ou annuelle sur le bassin, en mm.
- E : Lamé totale écoulée mensuelle ou annuelle (en mm) et rapport (en %) à Pm.
- Hr : Lamé ruisselée mensuelle ou annuelle (en mm) et rapport (en %) à Pm.
- HB : Lamé correspondant à l'écoulement de base mensuel ou annuel (en mm) et rapport (en %) à Pm.
- DE : Déficit d'écoulement (en mm) et rapport (en%) à Pm.
- Ke : Coefficient d'écoulement (en %).
- Kr : Coefficient de ruissellement (en %).
- KB : Coefficient d'écoulement de base (en %).

L'écoulement est limité aux mois les plus pluvieux (juin - octobre), le débit de base augmentant régulièrement au cours de la saison des pluies, pour passer par un maximum en septembre.

5.1.1.5.2. ANALYSE DU RUISSELLEMENT

L'étude du ruissellement a été faite sur les crues individualisées lors du traitement informatique des relevés limnigraphiques. Le ruissellement est considéré comme la somme du ruissellement pur et du ruissellement retardé.

Les facteurs explicatifs choisis sont :

- la pluie utile Pu, somme des tranches d'averse ayant une intensité supérieure à 12 mm/h.

Si Pm est la hauteur moyenne de l'averse :

$$Pu = (Pu1 + Pu2 + \dots + Pun) \cdot Pm / (P1 + P2 + \dots + Pn).$$

Pu1, Pu2, etc. et P1, P2, etc. correspondent aux pluies utiles et aux pluies totales mesurées aux différents pluviographes.

- L'état de saturation du sol, représenté par un indice de la forme :

$$IK_i = IK_{i-1} \cdot e^{-\alpha \cdot t_j}$$

i indice du jour étudié,

j nombre de jours sans pluie, avant l'averse du jour i,

α coefficient variant entre 0,01 et 0,03 suivant les bassins.

Le tableau des caractéristiques des crues du bassin 2 est donné figure 171, les relations pluie - lame ruisselée étant présentées figure 172.

Année		S1 amont reconstitué	S2	S3	S4	S5	S6	S7
1972-73	Pm		843,9	871,2		935,6		
	F		36,7			20,0		
	Ke		4,3		0,3	2,1		
	Hr		7,3		1,1	9,4		
	Kr		0,9		0,1	1,0		
	HB		29,4		1,6	10,6		
	KB		3,4		0,2	1,1		
	Hr/HB		0,2		0,7	0,9		
	DE		807,2		868,5		915,6	
	%		95,7		99,7		97,9	
1973-74	Pm	922,6	921,8	977,7	964,4	970,4		973,2
	E	19,6	55,7	7,3	0,3	20,6		52,7
	Ke	2,1	6,0	0,7	0,0	2,1		5,4
	Hr	6,7	16,7	2,4	0,3	8,6		21,2
	Kr	0,7	1,8	0,2	0,0	0,9		2,2
	HB	12,9	39,0	4,9	0,0	12,0		31,5
	KB	1,4	4,2	0,5	—	1,2		3,2
	Hr/HB	0,5	0,4	0,5	—	0,7		0,7
	DE	903,0	866,1	970,4	964,1	949,8		920,5
	%	97,9	94,0	99,3	100,0	97,9		94,6
1974-75	Pm	1 088,6	1 115,6	1 055,1	1 051,3	1 118,3	1 129,7	1 114,3
	E	25,5	102,7	13,1	0,1	43,8	83,0	74,7
	Ke	2,3	9,2	1,2	0,0	4,0	7,3	6,7
	Hr	11,8	33,5	4,1	0,1	17,4	38,7	22,4
	Kr	1,1	3,0	0,4	0,0	1,6	3,4	2,0
	HB	13,7	69,2	9,0	0,0	26,4	44,3	52,3
	KB	1,2	6,2	0,8	—	2,4	3,9	4,7
	Hr/HB	0,9	0,5	0,5	—	0,7	0,9	0,4
	DE	1 063,1	1 012,9	1042,0	1051,2	1 074,5	1 046,7	1 039,6
	%	97,7	90,8	98,8	100,0	96,0	92,7	93,3
1975-76	Pm	1 041,9	1 033,7	964,4	960,1	963,7		964,2
	E	52,7	111,8	15,5	0,8	29,2		56,8
	Ke	5,1	10,8	1,6	0,1	3,0		5,9
	Hr	13,7	33,2	4,9	0,8	9,3		13,0
	Kr	1,3	3,2	0,5	0,1	1,0		1,3
	HB	39,0	78,6	10,6	0,0	19,9		43,8
	KB	3,7	7,6	1,1	—	2,0		4,6
	Hr/HB	0,4	0,4	0,5	—	0,5		0,3
	DE	989,2	921,9	948,9	959,3	934,5		907,4
	%	94,9	89,2	98,4	99,9	97,0		94,1

Fig-170 - BASSIN VERSANT DE SANGUERE. BILAN ANNUEL (D'APRES A.CASENAVE)

N°	Date	Pm (mm)	Pu (mm)	Ik (mm)	Hr (mm)	Vr (m³)	Kr (%)	Kru (%)	TM (h mn)	TB (h mn)	Q _{mr} (l/s)	Q _{max} (l/s)
1	31. 5.1972	59,0	51,4	81,4	0,76	5 410	1,29	1,48	2,58	6,08	679	719
2	6. 7.	39,6	23,7	183,0	0,23	1 619	0,58	0,97	2,30	7,45	97	114
3	12. 7.	22,3	13,6	243,8	0,33	2 367	1,49	2,43	2,12	5,40	251	288
4	24. 7.	45,3	45,3	241,6	1,28	9 101	2,83	2,83	1,25	7,53	865	885
5	13. 8.	43,2	30,8	237,9	1,00	7 070	2,31	3,25	2,15	7,40	592	628
6	5. 9.	35,0	27,7	237,2	0,67	4 768	1,92	2,42	1,50	9,05	341	362
7	30. 9.	25,0	16,4	215,4	0,14	1 016	0,57	0,85	3,23	7,16	71	106
8	12. 6.1973	93,1	88,0	101,1	8,06	57 230	8,66	9,16	1,10	6,05	9 092	9 180
9	25. 7.	50,9	30,0	204,0	0,61	4 353	1,20	2,03	4,45	10,07	328	354
10	31. 7.	30,6	24,6	230,7	0,27	1 931	0,89	1,10	2,11	6,19	235	263
11	14. 8.	28,8	19,0	231,4	0,39	2 736	1,34	2,05	2,17	8,02	220	243
12	1. 9.	20,1	11,6	258,9	0,26	1 816	1,27	2,24	3,00	8,45	130	160
13	2. 9.	20,6	14,0	273,5	0,45	3 160	2,16	3,21	2,55	11,17	184	216
14	11. 9.	21,3	4,8	270,5	0,36	2 544	1,68	7,50	3,10	9,10	146	192
15	12. 9.	39,7	36,2	286,1	2,38	16 892	5,99	6,57	1,32	8,32	2 151	2 190
16	14. 9.	21,7	16,1	313,0	1,82	12 902	8,37	11,30	1,30	8,33	1 306	1 361
17	19.10.	29,6	26,6	205,6	0,30	2 114	1,01	1,13	0,50	6,35	230	243
18	25. 4.1974	20,7	19,9	62,6	0,08	566	0,39	0,40	0,45	6,50	43	47
19	5. 5.	31,5	23,6	103,6	0,10	708	0,32	0,42	3,20	9,15	35	41
20	16. 5.	29,1	26,7	144,2	0,15	1 096	0,53	0,56	0,50	4,45	160	173
21	11. 7.	49,2	36,1	121,2	0,12	850	0,24	0,33	1,07	4,42	107	122
22	13. 7.	40,5	38,1	163,7	0,36	2 584	0,90	0,94	1,40	6,40	274	288
23	16. 7.	59,3	55,0	192,3	1,63	11 549	2,74	2,96	1,05	6,10	1 442	1 466
24	4. 8.	66,9	49,5	269,9	4,35	30 892	6,50	8,79	1,40	9,30	3 107	3 139
25	25. 8.	28,3	22,8	252,5	0,54	3 868	1,93	2,37	2,05	7,10	372	407
26	28. 8.	92,0	70,9	264,5	9,08	64 467	9,87	12,81	1,55	10,05	6 949	7 004
27	7. 9.	24,2	21,5	310,2	0,84	5 939	3,46	3,91	1,55	5,33	699	778
28	11. 9.	79,0	61,1	308,9	5,54	39 326	7,01	9,07	4,40	11,55	7 271	7 382
29	24. 9.	47,2	41,5	325,1	4,10	29 112	8,69	9,88	1,55	7,10	3 709	3 790
30	3. 6.1975	61,9	48,7	78,3	0,52	3 676	0,84	1,07	1,52	4,04	622	683
31	6. 7.	38,7	28,6	151,6	0,23	1 657	0,60	0,80	2,21	6,27	143	164
32	28. 7.	41,3	38,1	140,8	0,10	741	0,25	0,26	0,51	2,44	187	222
33	30. 7.	28,6	12,8	175,0	0,13	902	0,44	1,02	2,13	5,13	85	114
34	4. 8.	71,0	55,2	184,2	1,62	11 531	2,29	2,93	1,44	7,10	1 096	1 125
35	12. 8.	31,2	23,9	233,6	0,71	5 059	2,28	2,97	1,49	3,45	723	849
36	24. 8.	55,7	45,5	254,4	2,70	19 191	4,85	5,93	1,31	8,15	2 534	2 569
37	31. 8.	25,2	15,1	291,6	0,77	5 461	3,05	5,10	2,28	8,07	408	458
38	4. 9.	32,1	27,2	324,9	1,90	13 467	5,91	6,99	1,45	6,48	1 727	1 801
39	7. 9.	49,3	46,3	344,2	5,38	38 192	10,91	11,62	1,15	10,09	5 932	6 046
40	13. 9.	61,3	57,4	349,0	5,43	38 570	8,86	9,46	1,33	6,51	6 285	6 397
41	21. 9.	30,4	28,9	352,2	2,28	16 156	7,49	7,89	1,38	5,56	2 175	2 278
42	28. 9.	28,8	17,1	360,3	2,13	15 128	7,40	12,46	2,48	8,25	1 153	1 262
43	4.10.	45,5	39,9	358,6	3,67	26 085	8,07	9,20	2,21	7,17	2 980	3 097

BASSIN VERSANT DE SANGUERE

Pm pluie moyenne sur le bassin

Kr coefficient de ruissellement

Pu pluie utile correspondant à Pm

Kru coefficient de ruissellement utile

Ik indice d'humidité du sol

TM temps de montée

Hr lame ruisselée

TB temps de base

Vr volume ruisselé

Q_{mr} débit maximum de ruissellement

Q_{max} débit maximum total

Fig- 171 - CARACTERISTIQUES DES CRUES : BASSIN 2 (D'APRES A.CASENAVE)

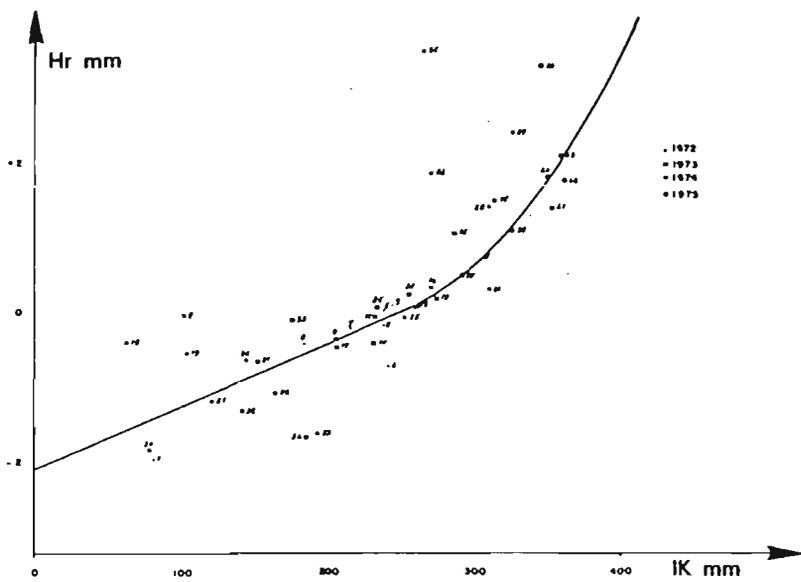
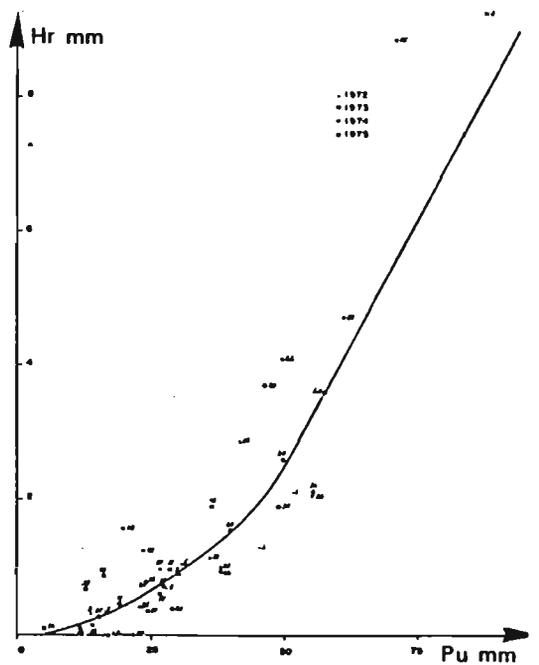
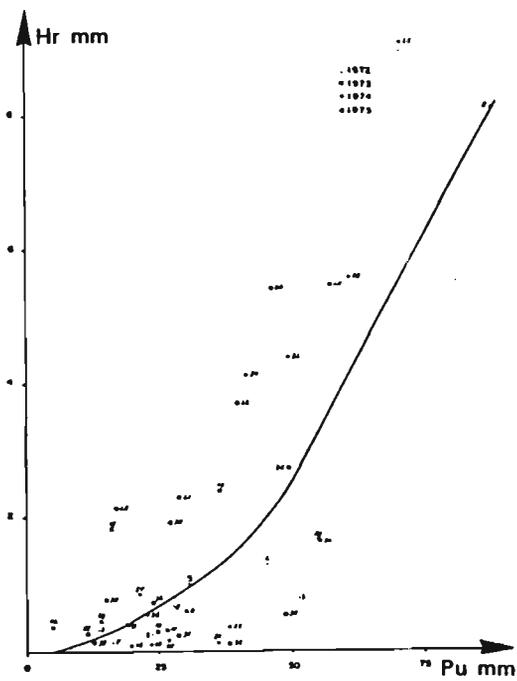


Fig- 172 - BASSIN VERSANT DE SANGUERE

RELATION LAME RUISSELEE - PLUIE UTILE. BASSIN 2 (D'APRES A.CASENAVE)

L'estimation des crues exceptionnelles a été faite à l'aide d'un modèle global, basé sur la méthode de l'hydrogramme unitaire. Les critères de sélection des crues ont été les suivants :

- Averse unitaire ayant pu ruisseler sur l'ensemble du bassin.
- Durée de la pluie utile sensiblement inférieure au temps de montée de la crue.
- Coefficient de forme de la crue, ni trop fort (crue résultant d'une averse centrée sur l'aval du bassin), ni trop faible (crues complexes).
- Temps de montée de l'ordre de 1 heure à S1, 1 h 30 à S2, 35 mn à S3, 6 heures à S5, 40 mn à S6 et 5 heures à S7.
- Temps de base compris entre 3 h 30 et 4 heures à S1, 6 et 7 heures à S2, 2 heures et 2 h 30 à S3, 13 et 15 heures à S5, 1 h 30 et 2 heures à S6, 20 et 24 heures à S7.

Le but de cette analyse étant de reconstituer les événements de fréquence rare, seules, parmi les crues répondant aux conditions précédentes, ont été retenues celles ayant la forme des plus fortes crues, particulièrement pour le bassin 7. Ce sont généralement des crues de fin de saison des pluies, ou des crues engendrées par des averses de forte intensité.

Les figures 173 et 174 donnent les formes et les caractéristiques des crues unitaires des différents bassins, le tableau 175 présentant le détail du calcul de l'hydrogramme médian du bassin 2.

On admet qu'une crue de récurrence donnée est générée par une averse de même récurrence, le passage de la pluie ponctuelle à la pluie moyenne sur le bassin se faisant à l'aide de la formule de G. Vuillaume (paragraphe 3.1.5.3.3. - 328). Toutefois, étant donnée la forte hétérogénéité de la capacité au ruissellement des différents bassins en fonction de l'état de saturation des sols, les estimations ont d'abord été faites pour des conditions moyennes de saturation préalable, puis pour des conditions très favorables au ruissellement (fin de saison des pluies). Les principales caractéristiques des crues calculées sont regroupées dans les tableaux de la figure 176.

5.1.1.5.3. ETUDE DE LA NAPPE

5.1.1.5.3.1. Observations piézométriques

Durant les campagnes 1972 et 1973, les mesures du niveau hydrostatique ont été faites à une cadence journalière pendant la saison des pluies, et à une cadence hebdomadaire en saison sèche. En 1974 et 1975, une cadence hebdomadaire a été adoptée en toutes saisons (fig. 177).

Les figures 178 et 179 montrent les mouvements de la nappe des bassins 1 et 2 au cours des années 1974-1975, ainsi que les surfaces piézométriques en périodes d'étiage et de crue. La figure 179 indique que ces mouvements se font de façon identique et à la même date dans tous les piézomètres, mettant ainsi en évidence une homogénéité certaine de la nappe.

5.1.1.5.3.2. Tarissement

La loi de décroissance des débits en période de tarissement est de forme exponentielle et s'exprime par la relation :

$$Q = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot (t - t_0)}$$

- Q_0 est le débit à l'instant t_0 ;
- $t - t_0$ est le temps, exprimé en jours, séparant les débits Q et Q_0 ;
- α le coefficient de tarissement.

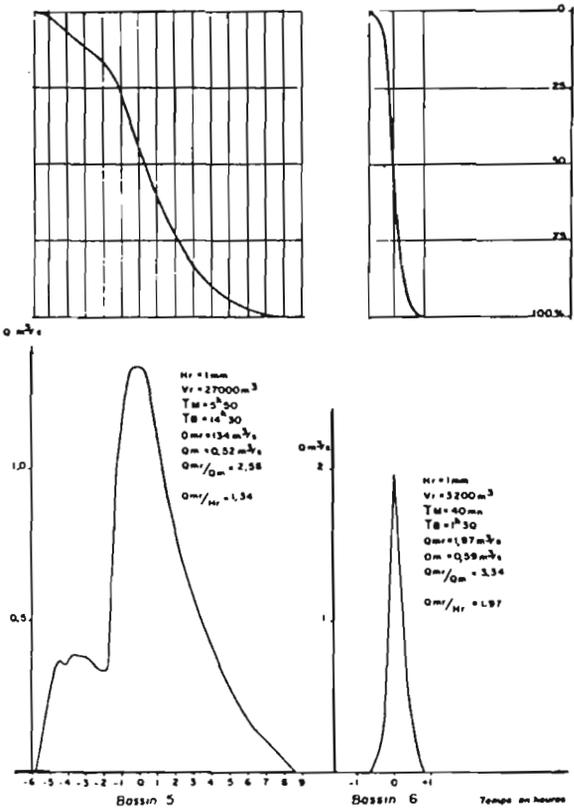
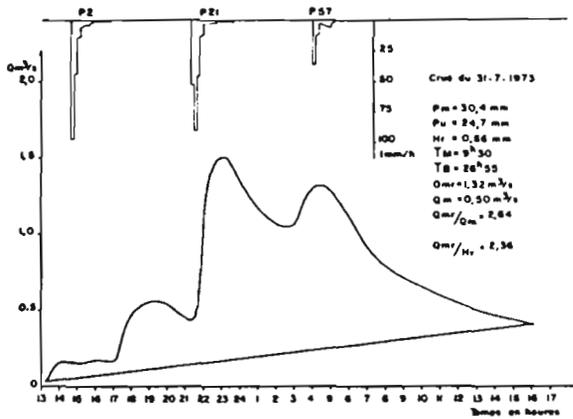
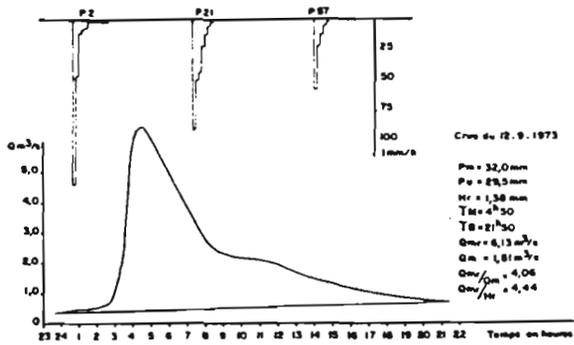
Les droites caractéristiques du tarissement ont été tracées, sur papier semi-logarithmique, à partir des points représentatifs des débits moyennés par quinzaine.

Bassin	Date	Pm (mm)	Pu (mm)	Tpu (mn)	Hr (mm)	TM (mn)	TB (mn)	Qm (m ³ /s)	Qmr (m ³ /s)	Qmr/Qm	Qmr/Hr
1 amont	7. 9.1975	50,1	47,1	37	1,73	60	236	0,39	1,16	2,97	0,67
2	16. 7.1974	59,3	55,0	51	1,63	65	370	0,52	1,44	2,77	0,88
	24. 9.1974	47,2	41,5	65	4,10	115	430	1,13	3,71	3,28	0,90
	4. 9.1975	32,1	27,2	39	1,90	105	408	0,55	1,73	3,15	0,91
	13. 9.1975	61,3	57,4	67	5,43	93	411	1,56	6,29	4,03	1,16
	21. 9.1975	30,4	28,9	29	2,28	98	356	0,76	2,18	2,87	0,96
3	6. 7.1973	18,3	15,5	23	0,03	35	125	0,0045	0,0107	2,36	0,36
	16. 9.1973	15,1	12,3	19	0,14	35	151	0,0171	0,0517	3,02	0,37
	16. 8.1974	22,4	16,5	16	0,05	28	142	0,0069	0,0206	3,00	0,41
	26. 9.1974	11,5	11,5	18	0,17	30	145	0,0214	0,0670	3,13	0,39
5	4. 8.1975	54,2	42,9	57	0,70	400	758	0,41	0,85	2,07	1,21
	13. 9.1975	58,7	55,7	86	1,21	345	895	0,61	1,62	2,66	1,34
	4.10.1975	38,9	29,1	43	1,67	341	857	0,88	2,26	2,57	1,35
6	7. 9.1974	26,9	25,8	25	1,50	40	90	0,92	2,95	3,21	1,97
7	12. 9.1973	32,0	29,5	34	1,38	290	1 310	1,51	6,13	4,06	4,44
	24. 9.1974	31,3	26,0	63	1,51	290	1 506	1,44	7,47	5,19	4,95
	7. 9.1975	37,3	34,2	40	1,67	301	1 187	2,02	8,43	4,17	5,05
	13. 9.1975	51,4	47,7	76	2,22	232	1 185	2,70	9,75	3,61	4,39

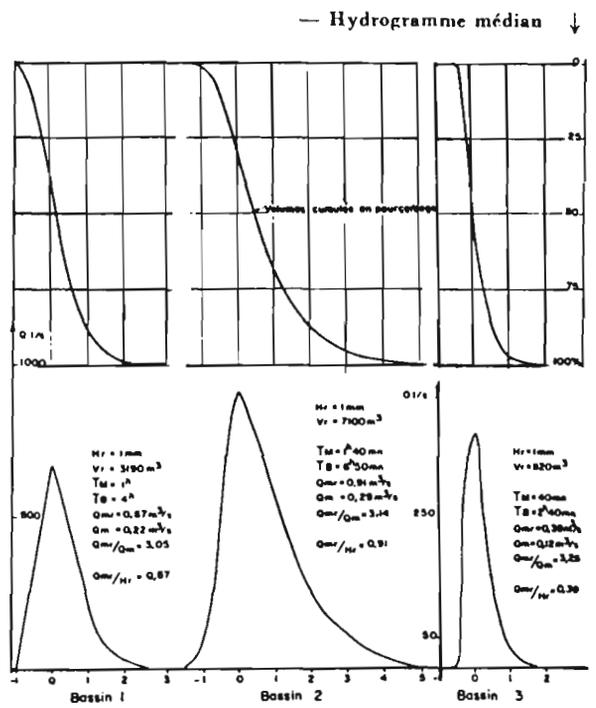
Pm : Pluie moyenne sur le bassin.
 Pu : Pluie utile.
 Tpu : Durée de la pluie utile.
 Hr : Lane ruisselée.
 TM : Temps de montée de la crue.
 TB : Temps de base de la crue.
 Qm : Débit moyen de la crue = volume ruisselé / temps de base.
 Qmr : Débit maximal ruisselé = débit maximal de la crue — débit de base.
 $\frac{Qmr}{Qm}$ et $\frac{Qmr}{Hr}$: Rapports de forme de la crue.

Fig-173- CARACTERISTIQUES DES CRUES UNITAIRES

BASSIN VERSANT DE SANGUERE (D'APRES A.CASENAVE)



— Formes des crues du bassin 7



— Hydrogramme médian

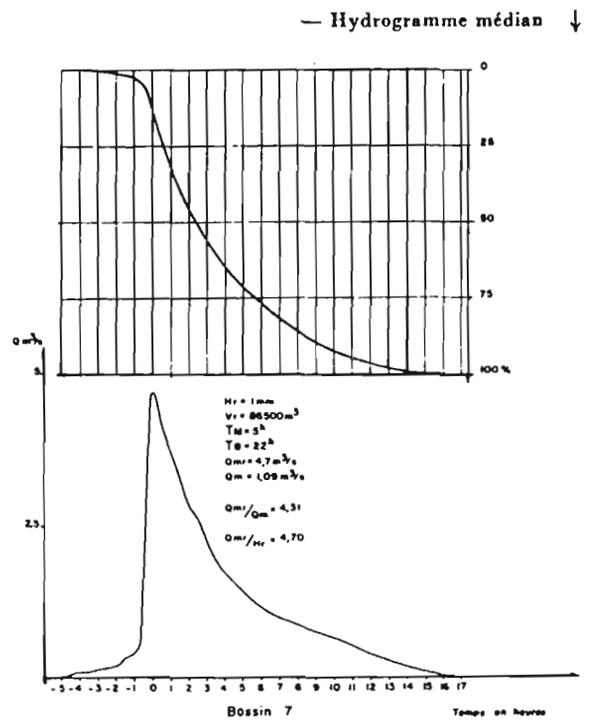


Fig-174 - FORME DES CRUES ET HYDROGRAMMES MEDIANS

BASSIN DE SANGUERE (D'APRES A.CASENAVE)

	-2 h	-50	-40	30	-20	-10	-1 h	-50	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20
16.7.74	0	0	0	0	0	0	17	63	288	536	797	880	890	862	816
24.9.74	0	5	15	31	63	105	220	312	415	566	707	859	905	854	788
4.9.75	0	0	5	39	97	181	274	361	453	581	711	855	911	866	747
13.9.75	0	0	0	1	3	13	37	88	155	286	519	939	1 157	1 009	847
21.9.75	0	0	0	11	31	57	103	182	257	338	581	857	954	899	829
Médian		0	0	11	31	57	103	182	288	536	707	859	911	866	816
Vol. cumulé en %			0	0,1	0,1	0,8	1,7	3,3	5,7	10,3	16,3	23,6	31,4	38,8	45,7

	+30	+40	+50	+1 h	+10	+20	+30	+40	+50	-2 h	+10	+20	+30	+40	+50
16.7.74	779	752	696	626	561	485	405	331	270	233	207	187	172	152	138
24.9.74	720	654	585	532	478	422	373	322	278	249	215	185	159	137	120
4.9.75	637	521	471	434	403	376	353	326	295	274	247	218	189	166	147
13.9.75	766	703	641	567	508	419	398	350	309	269	236	206	173	151	131
21.9.75	807	785	761	689	614	535	456	379	316	263	215	175	143	121	99
Médian	766	703	641	567	508	449	398	331	295	263	215	187	172	151	131
Vol. cumulé en %	52,2	58,2	63,7	68,5	72,8	76,7	80,1	82,9	85,4	87,6	89,5	91,0	92,5	93,8	94,9

	+3 h	+10	+20	+30	+40	+50	+4 h	+10	+20	+30	+40	+50	+5 h	+10
16.7.74	120	104	93	83	71	58	49	40	34	25	15	9	3	0
24.9.74	102	90	76	66	56	49	39	32	24	20	12	9	5	2
4.9.75	132	118	100	87	73	61	51	41	32	21	15	8	3	0
13.9.75	110	92	77	63	52	44	37	32	28	22	17	13	7	4
21.9.75	83	68	53	42	31	20	11	4	0	0	0	0	0	0
Médian	110	92	77	66	56	49	39	32	28	21	15	9	3	0
Vol. cumulé en %	95,9	96,6	97,3	97,9	98,3	98,7	99,1	99,4	99,6	99,8	99,9	99,9	100,0	100,0

Débits en l/s pour Hr = 1 min.
Temps en h et min de part et d'autre du maximum (T = 0).

BASSIN VERSANT DE SANGUERE

Fig-175 - CALCUL DES HYDROGRAMMES UNITAIRES ET MEDIAN - BASSIN 2 (D'APRES A-CASENAVE)

CONDITIONS DE SATURATION MOYENNES

Bassin	Pluie décennale					Pluie moyenne 100 mm				
	Pu (mm)	Hr (min)	Kru (%)	Q max (m³/s)	Q max (l/s/km²)	Pu (mm)	Hr (min)	Kru (%)	Q max (m³/s)	Q max (l/s/km²)
1	84,5	4,6	5,4	3,09	910	82,4	4,2	5,1	2,79	820
2	83,0	7,3	8,8	6,65	940	82,4	7,2	8,7	6,56	920
3	84,5	0,7	0,9	0,28	250	82,4	0,7	0,8	0,27	240
5	71,0	3,0	4,2	4,02	150	82,4	6,0	7,3	8,03	300
6	84,5	10,5	12,4	20,7	6 470	82,4	10,0	12,1	19,7	6 160
7	67,0	4,2	6,3	19,7	230	82,4	6,2	7,5	29,1	340

CONDITIONS DE SATURATION FAVORABLES

Bassin	Pluie décennale				Pluie moyenne 100 mm				Crue maximale observée			
	Hr (min)	Kru (%)	Q max (m³/s)	Q max (l/s/km²)	Hr (min)	Kru (%)	Q max (m³/s)	Q max (l/s/km²)	Pu (min)	Hr (min)	Kru (%)	Q max (m³/s)
1	5,8	6,9	3,89	1 140	5,4	6,6	3,60	1 060	88,7	4,22	4,8	(5,0)
									63,3	2,06	3,3	1,56
2	9,5	11,4	8,65	1 220	9,4	11,4	8,56	1 210	88,0	8,06	9,2	9,18
									61,1	5,54	9,1	7,38
3	1,2	1,4	0,46	410	1,2	1,5	0,45	400	72,3	1,11	1,5	0,17
5	3,8	5,4	5,09	190	6,8	8,3	9,11	340	72,2	6,52	9,0	10,8
6	10,5	12,4	20,7	6 470	10,0	12,1	19,7	6 160	91,7	12,5	13,6	7,57
7	5,2	7,8	24,4	280	7,2	8,7	33,8	390	69,9	9,71	13,9	(165)
									71,1	5,64	7,9	26,2

Fig-176 - CARACTERISTIQUES DES CRUES EXCEPTIONNELLES (D'APRES A-CASENAVE)
BASSIN VERSANT DE SANGUERE

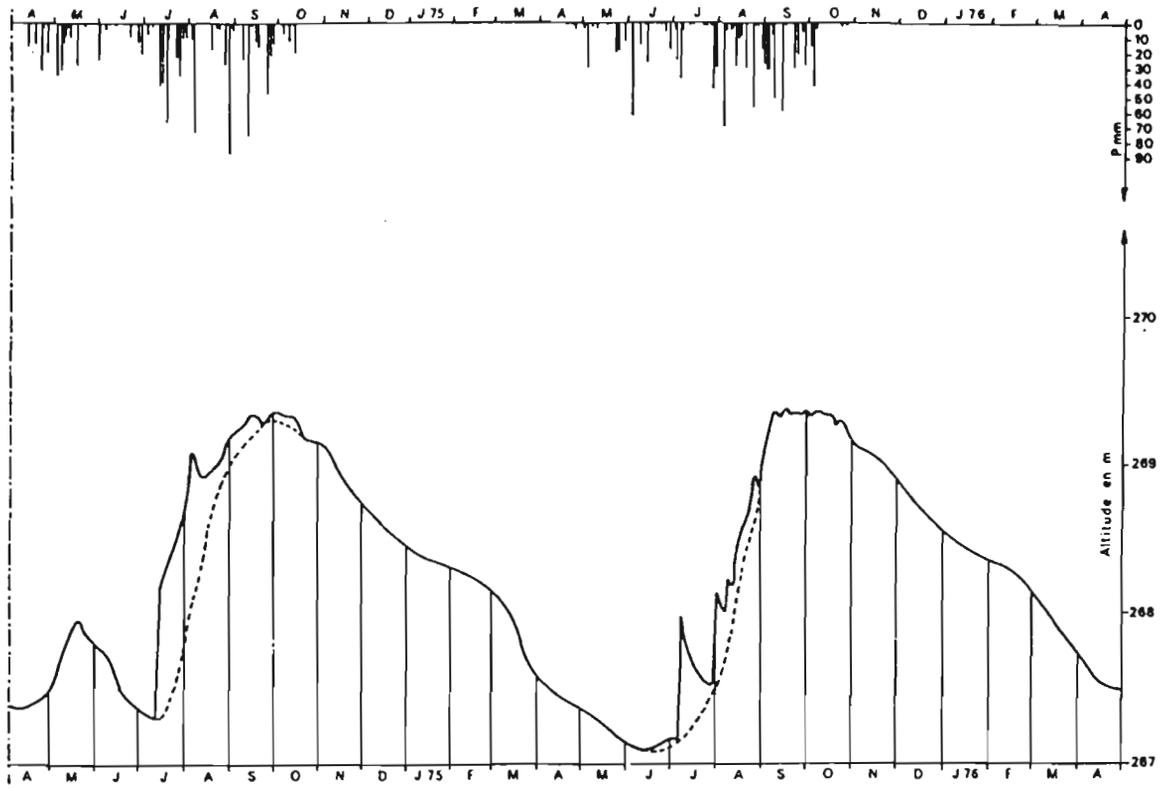


Fig-177 -VARIATIONS PIEZOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE SANGUERIE. BASSIN 2 (D'APRES A.CASENAVE)

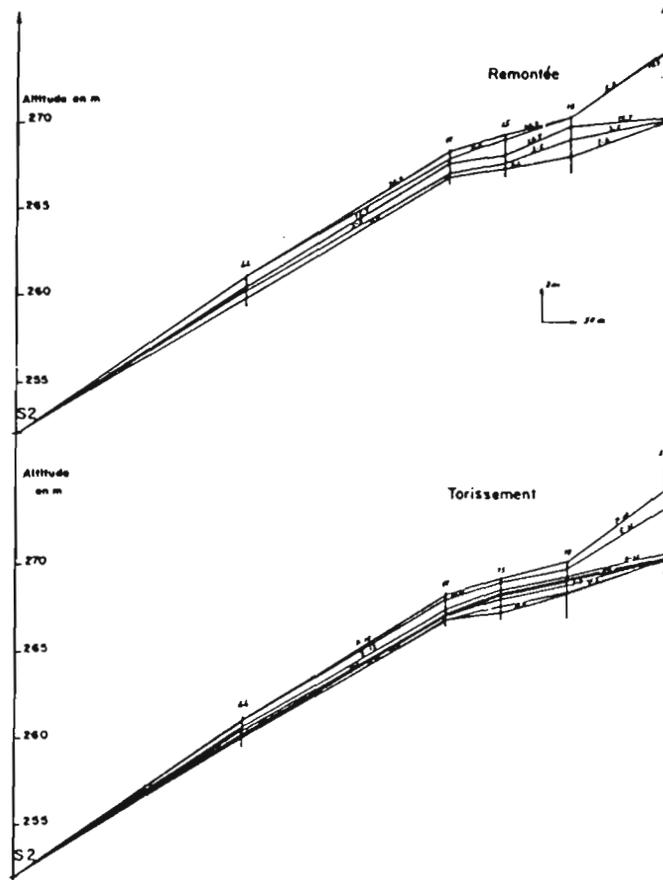
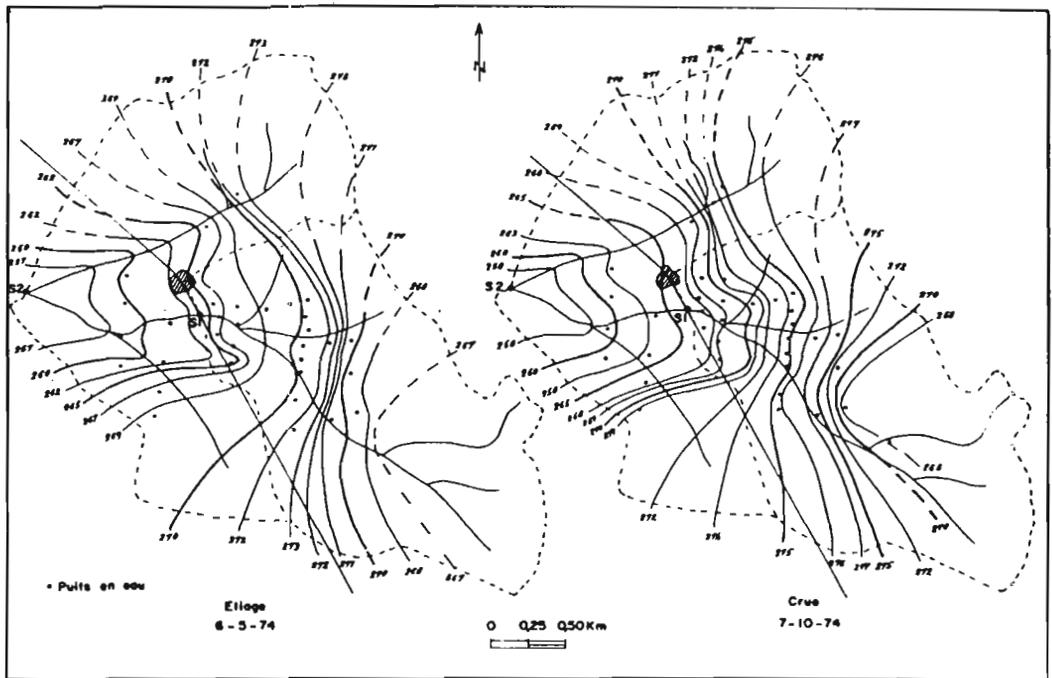
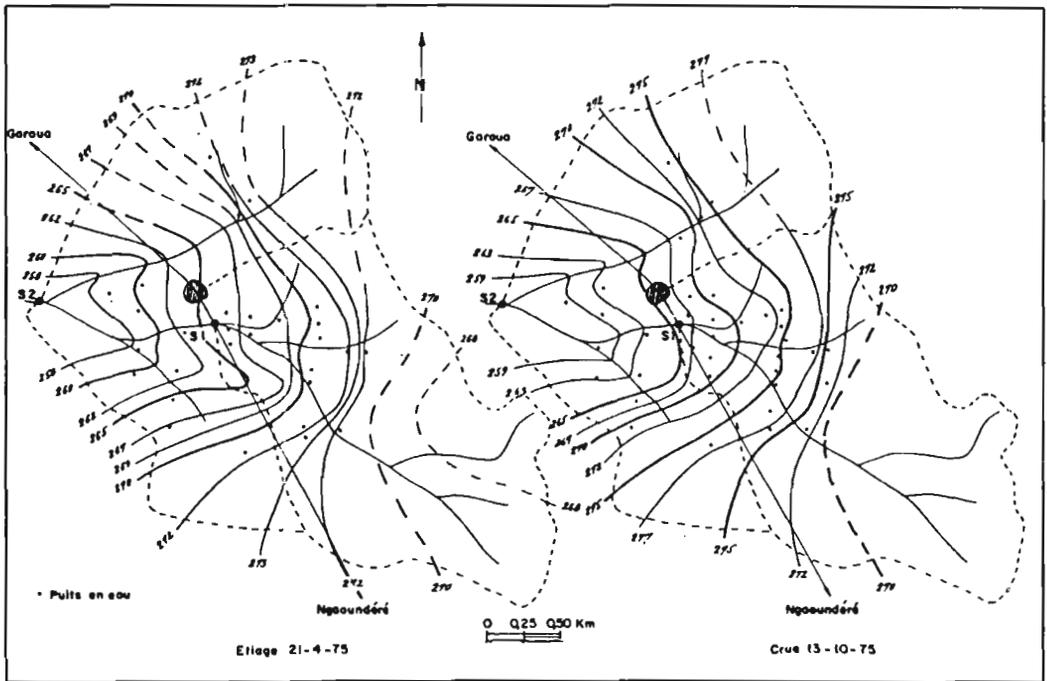


Fig-178 - PROFILS PIEZOMETRIQUES. BASSIN VERSANT DE SANGUERIE. BASSIN 1 (D'APRES A.CASENAVE)



— Bassins 1 et 2 : surface piézométrique 1974



— Bassins 1 et 2 : surface piézométrique 1975

Fig-179 - SURFACES PIEZOMETRIQUES EN PERIODE D'ETIAGE ET DE CRUE
BASSIN VERSANT DE SANGUERE (D'APRES A.CASENAVE)

Des différences importantes sont observées, d'une année à l'autre, sur le bassin 2. Il a toutefois été possible de mettre en évidence la présence de deux nappes, ou de deux portions de la même nappe présentant des caractéristiques hydrodynamiques différentes (partie superficielle et partie profonde).

5.1.1.5.4. REGIME HYDRIQUE DES SOLS

De juillet 1972 à avril 1976, une cinquantaine de profils hydriques ont été réalisés, sur chacune des six parcelles, en utilisant la méthode gravimétrique : prélèvement à la tarière de trois échantillons pour chaque profondeur, dessiccation à l'étuve à 105°C et calcul de l'humidité pondérale moyenne. L'humidité volumique a été obtenue, ensuite, en multipliant l'humidité pondérale par la densité apparente de chaque niveau, mesurée au densitomètre à membrane sur un profil représentatif de chaque parcelle.

Cette méthode présente de nombreux inconvénients, car la profondeur atteinte est très variable, suivant la date de la mesure, du fait de la présence ou non de la nappe, ou à cause des matériaux rencontrés (l'horizon B de la parcelle F, constitué d'un sable farineux très fin, est facilement traversé lorsqu'il est humide, mais pratiquement impossible à pénétrer en saison sèche). La comparaison entre les différents profils est donc rendue délicate. De plus, la présence d'horizons indurés et surtout du grès provoque, lors des prélèvements, un échauffement de la tarière qui altère les mesures. Enfin, l'hétérogénéité, tant horizontale que verticale, des sols entraîne une dispersion non négligeable des valeurs. Le principal inconvénient réside cependant dans l'itérativité très insuffisante de ce type de mesures.

Ces problèmes ont été en grande partie résolus par la mise en service, en avril 1975, d'un humidimètre à neutrons sur cinq des parcelles étudiées. Le point le plus délicat de cette technique réside dans l'étalonnage de l'appareil. La méthode utilisée est celle dite de " l'étalonnage au champ".

Entre avril 1975 et avril 1976, sur chacune des parcelles, 14 mesures neutroniques ont été doublées par des mesures classiques à la tarière. Les corrélations entre les valeurs neutroniques (rapport du nombre d'impulsions mesuré dans le sol et dans l'étui) et la moyenne de trois prélèvements à la tarière ont permis d'établir les courbes d'étalonnage de chaque niveau (tous les 10 cm jusqu'à 1 m, puis tous les 20 cm jusqu'au fond du tube). Ces doubles mesures, effectuées environ une fois par mois en saison sèche comme en saison des pluies, couvrent, pour chaque profondeur, toute la gamme des humidités.

Bien que longue, cette méthode est préférable à celle souvent utilisée qui consiste à établir un étalonnage unique, à partir d'une seule mesure doublée, et valable pour tout le profil. Elle permet, en effet, l'obtention de relations beaucoup plus serrées. C'est particulièrement vrai pour des sols à horizons très différenciés. Ceci est dû au fait que le ralentissement des "neutrons rapides" ne dépend pas uniquement de la teneur en eau, mais aussi de la nature physico-chimique du niveau de mesure. Sur l'ensemble des parcelles, la dispersion des points représentatifs autour des droites d'étalonnage de chaque niveau est très faible (les coefficients de corrélation sont presque toujours supérieurs à 0,9 et souvent supérieurs à 0,95).

Le tableau de la fig. 180 regroupe les caractéristiques des différents réservoirs de chacune des parcelles, et la figure 181 montre les variations du stock d'eau sur la parcelle A, en fonction de la pluviométrie IK.

5.1.1.5.5. BILAN HYDROLOGIQUE

L'équation du bilan hydrique d'un bassin s'écrit :

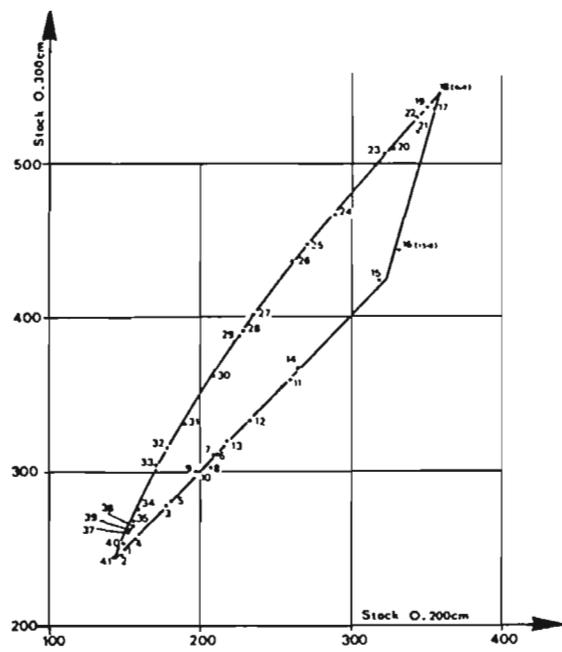
$$VP = Vr + Ve + Vi + Vs$$

- VP volume de la pluie sur le bassin correspondant à la hauteur de pluie P
- Vr volume ruisselé correspondant à la lame ruisselée Hr
- Ve volume repris par évapotranspiration correspondant à la lame évapotranspirée He
- Vi volume infiltré correspondant à la lame infiltrée Hi
- Vs volume restitué ou emmagasiné par le sol correspondant à la lame Hs.

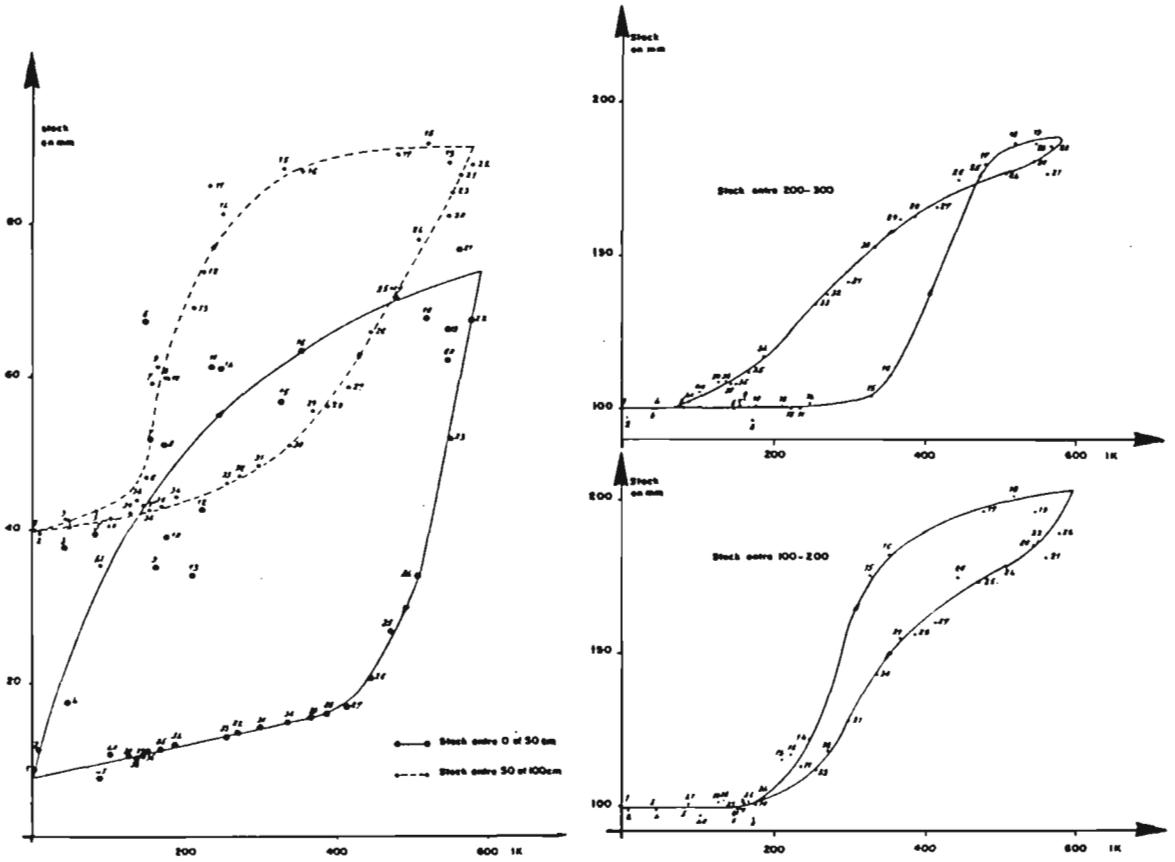
Parcelle	Limites du réservoir (en cm)	Stock minimum (en mm)	Stock maximum (en mm)	Stock maximum emmagasinable (en mm)	Valeur de I_k^* au début de la montée du stock	Stock à partir duquel le réservoir laisse passer l'eau dans le réservoir sous-jacent (en mm)
A	0-50	8	73	65	0	45
	50-100	40	90	50	150	70
	100-200	100	200	100	200	180
	200-300	100	190	90	340	—
B	0-50	10	100	90	0	40
	50-100	35	120	85	120	45
	100-160	60	120	60	120	—
C	0-50	15	125	110	0	50
	50-100	30	105	75	100	35
	100-200	145	185	40	100	—
	200-300	175	175	0	—	—
D	0-50	10	70	60	0	40
	50-100	25	80	60	80	55
	100-200	65	160	95	110	140
	200-300	95	185	90	180	—
E	0-50	15	90	75	0	65
	50-100	35	100	65	150	—
	200-250	60	150	90	170	—

* Parcelle A, B et C : I_k calculé avec $\alpha = 0,01$ à partir des relevés du pluviographe 2.
Parcelle D et E : I_k calculé avec $\alpha = 0,03$ à partir des relevés du pluviographe 24.

Fig-180 - STOCKS D'EAU DANS LE SOL. BASSIN VERSANT DE SANGUERE (D'APRES A.CASENAVE)



Relation entre les stocks des réservoirs
0-2 m et 0-3 m



Evolution du stock en eau du sol en fonction
de la pluviométrie. Parcelle A, 1975-76

Evolution du stock en eau du sol en fonction
de la pluviométrie. Parcelle A, 1975-76

Fig-181 - EVALUATION DU STOCK D'EAU SUR LA PARCELLE A (D'APRES A.CASENAVE)

BASSIN BASSIN VERSANT DE SANGUERE

VP et Vr sont connus avec une assez bonne précision, Vs est plus imprécis, enfin Vi et Ve constituent les deux inconnues de l'équation pour lesquelles un certain nombre d'hypothèses ont été faites :

- entre le 22-04 et le 16-06-1975, les variations du niveau de la nappe étant nulles ou très minimales, l'infiltration est nulle. La fraction de la pluie non reprise par l'évapotranspiration sert uniquement à reconstituer les stocks en eau des sols. On a pendant cette période :

$$V_i = 0 \quad \text{et} \quad V_e = VP - V_s - V_r$$

- du 17-06 au 15-07-1975, on observe les premières variations notables du niveau de la nappe qui correspondent au début de l'infiltration. L'évapotranspiration reste cependant très prédominante. On peut considérer que pendant cette période :

$$V_e = 3/4 \cdot (VP - V_s - V_r) \quad \text{et} \quad V_i = 1/4 \cdot (VP - V_s - V_r)$$

- pour la période allant du 16-07 au 13-10-1975, la pluviométrie semble suffisante pour que l'évapotranspiration potentielle (calculée par la formule de Turc) soit satisfaite. On a donc :

$$V_e = ETP$$

$$V_i = VP - V_r - V_e - V_s$$

- enfin, entre le 14-10-1975 et le 13-04-1976, les pluies étant terminées, l'infiltration est nulle :

$$V_i = 0 \quad \text{et} \quad V_e = VP - V_s - V_r$$

avec, à partir du 17.11 : $V_p = 0$ et $V_r = 0$, l'évapotranspiration est alors alimentée uniquement par le déstockage des sols : $V_e = -V_s$.

Le tableau de la figure 182 donne, pour l'année hydrologique 1975-1976, les valeurs, à l'échelle mensuelle, des différents termes du bilan du bassin 2.

5.1.1.6. BILAN DE L'ETUDE

L'étude des bassins de Sanguéré aura permis :

- de faire un bilan climatologique assez complet de la région.
- de montrer la très faible aptitude au ruissellement de cette zone, du fait de la perméabilité importante des sols et du relief peu marqué.
- de mettre en évidence, en comparant les différents bassins, l'influence prépondérante de l'état de saturation des sols et surtout de la nappe phréatique sur le ruissellement. Cette influence est sensible non seulement sur l'ampleur mais aussi sur la forme des crues.
- de calculer les crues exceptionnelles à partir d'hydrogrammes-types caractéristiques de chacun des bassins.
- de donner une interprétation cohérente des mouvements des différentes nappes, mettant en évidence les interconnexions qui existent entre nappe superficielle et nappe profonde.
- d'analyser le régime hydrique des sols, montrant qu'ils se comportent comme des réservoirs superposés, dont les communications mutuelles sont liées à la pluviométrie.
- de proposer un bilan hydrique à pas de temps sensiblement mensuel. La méthode utilisée, malgré ses imperfections, conduit à des valeurs acceptables de l'évapotranspiration et de l'infiltration qui serait de l'ordre de 15 à 20 % de la pluviométrie annuelle, mettant ainsi en évidence un bilan largement positif de l'alimentation des nappes. Ceci est d'autant plus vrai que les restitutions de la nappe mesurées à Sanguéré (écoulement de base en saison sèche aux stations 2 et 5) ne sont que provisoires, cet écoulement se réinfiltrant, en grande partie, à l'aval de ces stations (absence d'un écoulement permanent à la station 7). On peut donc estimer, avec une bonne marge de sécurité, que la nappe des grès peut être exploitée jusqu'à concurrence de 15 % de la pluviométrie annuelle, sans entamer les réserves. Cette ressource facilement accessible peut être précieuse pour le développement de la région.

Date	P (mm)	VP (10 ³ m ³)	SAN _A (mm)	VA (10 ³ m ³)	SAN _B (mm)	VB (10 ³ m ³)	SAN _C (mm)	VC (10 ³ m ³)	VS (10 ³ m ³)	HS (mm)	Vr (10 ³ m ³)	Hr (mm)	Ve (10 ³ m ³)	He (mm)	Vi (10 ³ m ³)	Hi (mm)
22.4.1975	55,7	395,5	+7,0	+24,8	+13,0	+5,3	-8,0	-5,3	+24,8	+3,5	0	0	370,7	52,2	0	0
19.5.1975	157,8	1 120,4	+46,0	+163,0	+69,0	+28,3	+106,0	+70,1	+261,4	+36,8	5,0	0,7	854,0	120,3	0	0
16.6.1975	107,2	761,1	+30,0	+106,3	-5,0	-2,1	+12,0	+7,9	+112,1	+15,8	2,2	0,3	485,1	68,3	161,7	22,8
15.7.1975	218,2	1 549,2	+110,0	+389,8	+29,0	+11,9	+40,0	+26,4	+428,1	+60,3	19,2	2,7	869,8	122,5	232,1	32,7
15.8.1975	329,2	2 337,3	+94,0	+333,1	+123,0	+50,4	0	0	+383,5	+54,0	134,1	18,9	887,5	125,0	932,2	131,3
15.9.1975	157,6	1 119,0	-30,0	-106,3	+6,0	+2,5	0	0	-103,8	-14,6	75,4	10,6	932,2	131,3	215,2	30,3
13.10.1975	4,3	30,5	-116,0	-411,1	-183,0	-75,0	0	0	-486,1	-68,5	0	0	516,6	72,8	0	0
17.11.1975	0	0	-75,0	-265,8	-18,0	-7,4	-20,0	-13,2	-286,4	-40,3	0	0	286,4	40,3	0	0
23.12.1975	0	0	-40,0	-141,8	-21,0	-8,6	-45,0	-29,7	-180,1	-25,4	0	0	180,1	25,4	0	0
29.1.1976	0	0	-15,0	-53,2	-7,0	-2,9	-40,0	-26,4	-82,5	-11,6	0	0	82,5	11,6	0	0
24.2.1976	0	0	-7,0	-24,8	-6,0	-2,5	-31,0	-20,5	-47,8	-6,7	0	0	47,8	6,7	0	0
31.3.1976	0	0	-9,0	-31,9	-2,4	-1,0	-18,0	-11,9	-44,8	-6,3	0	0	44,8	6,3	0	0
13.4.1976																
Total	1 030,0									-3,0		33,2		782,7		217,1
% de la pluviométrie										-0,3		3,2		76,0		21,1

BASSIN VERSANT DE SANGUERE

P hauteur de pluie sur le bassin
VP volume de la pluie sur le bassin

SAN_A variation du stock d'eau entre 0-3m sur la parcelle A ramenée à l'ensemble du bassin
VA volume correspondant à SAN_A

SAN_B variation du stock d'eau entre 0-1,6m sur la parcelle B ramenée à l'ensemble du bassin
VB volume correspondant à SAN_B

SAN_C variation du stock d'eau entre 0-10m sur la parcelle C ramenée à l'ensemble du bassin
VC volume correspondant à SAN_C

Vr volume ruisselé
Hr lame ruisselée

Ve volume repris par évapotranspiration
He lame reprise par évapotranspiration

Vi volume infiltré
Hi lame infiltrée

Vs volume restitué ou emmagasiné par le sol
Hs lame restituée ou emmagasinée par le sol

Fig-182 - BILAN MENSUEL DU BASSIN 2. ANNEE 1975 - 1976 .(D'APRES A.CASENAVE)

5.1.2. BASSIN DE BOORO-BOROTOU - COTE D'IVOIRE

5.1.2.1. THEME DE L'ETUDE

L'objectif de l'étude de Booro-Borotou, réalisée dans le cadre du programme Hydro-Pédologique de Recherche sur Bassin Versant (Hyperbav), était d'analyser la complexité hydrologique d'un petit bassin versant situé en zone de savane humide. Les principales voies de recherche devaient être :

- relation entre état de surface et infiltration (dans le temps et dans l'espace) ;
- lois de l'infiltration et de la filtration, en fonction de la différenciation verticale des sols ;
- relation entre pluviométrie et stock en eau, pour chaque type de sol ;
- incidence des variations du stock en eau sur le ruissellement et l'infiltration ;
- relation entre les caractéristiques physiques des sols (porosité, structure) et l'hydrodynamique interne ;
- modélisation de l'écoulement.

Les mesures et observations ont porté sur quatre campagnes, de 1984 à 1988.

5.1.2.2. CONTEXTE PHYSICO-CLIMATIQUE

Le bassin de Booro-Borotou (1,36 km²) est situé dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, à 25 km au Nord de la ville de Touba (fig. 183). Il appartient à la zone tropicale humide, caractérisée par une saison sèche durant laquelle les précipitations sont rares (de novembre à mars), et une saison des pluies (d'avril à octobre). La hauteur médiane annuelle observée au poste de Touba est de 1 359 mm (fig. 184).

La pluie journalière de fréquence annuelle est de 74,4 mm et celle de fréquence décennale, de 126 mm.

Le sous-sol est formé essentiellement de roches métamorphiques (gneiss, quartzites, amphibolo-pyroxènes). Une campagne de sondages électriques et de profils de résistivité a permis d'avoir une indication sur l'alternance des différents horizons, la profondeur du manteau d'altération et la position de la roche mère.

Les plateaux cuirassés qui bordent le bassin sont les reliques d'une formation pédologique ancienne, au détriment de laquelle se sont formés les sols du bassin. C'est le domaine ferrallitique. Trois systèmes pédogénétiques ont contribué à la formation de ces sols : un système ferrugineux, un système cuirassé et un système hydromorphe.

Six grandes zones de végétations ont été différenciées essentiellement sur des critères de densité et de hauteur des ligneux (fig. 185) : forêt galerie (7,4 %), savane boisée (31,3 %), savane arborée (21,7 %), savane arbustive (28 %), savane herbeuse (3,9 %) et les champs (7,7 %).

5.1.2.3. CARACTERES PHYSIQUES ET MORPHOLOGIQUES

Les caractéristiques des trois bassins étudiés sont regroupées dans le tableau de la figure 186.

5.1.2.4. EQUIPEMENTS DE MESURES ET D'OBSERVATIONS

L'ensemble des équipements est porté sur la carte de la figure 187.

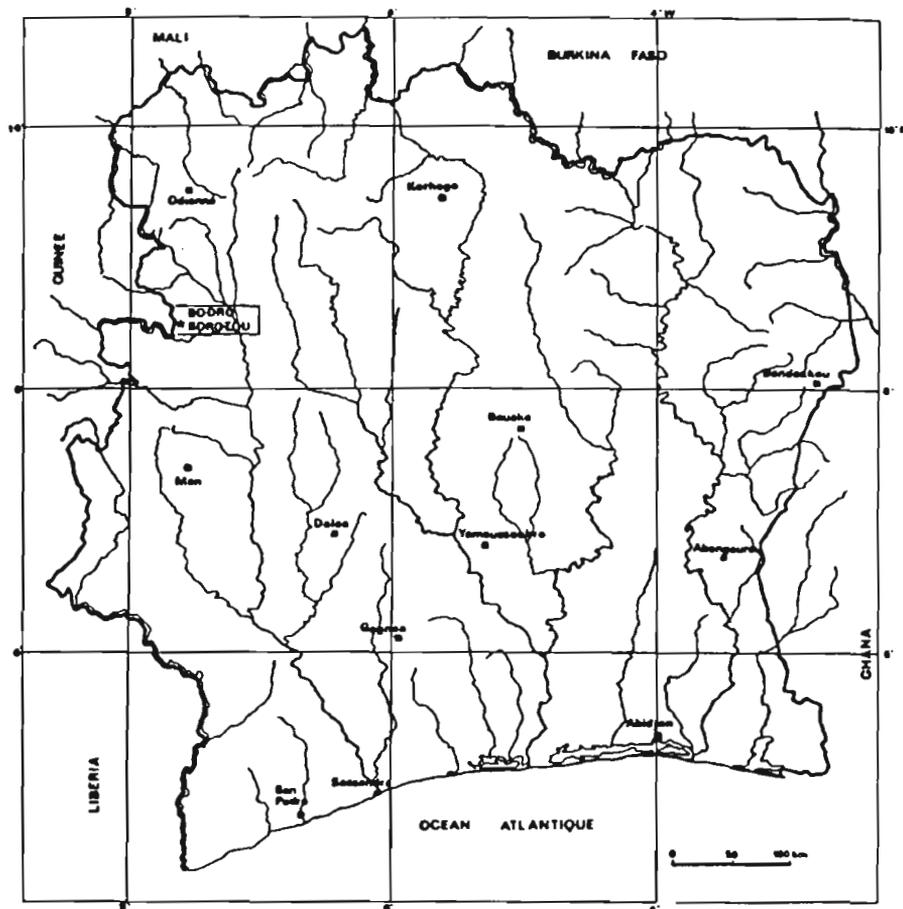


Fig-183 - CARTE DE SITUATION DE BOORO-BOROTOU (COTE D'IVOIRE)

PLUVIOMETRIE ANNUELLE ET MENSUELLE A TOUBA POUR DIFFERENTES RÉCURRENCES (en mm)

récurrence	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Ncv	Déc	Ann
sec : 100 ans													840
50 ans													901
20 ans				21	34	67	66	51	78	153	30		992
10 ans				30	49	78	82	71	102	162	44		1073
5 ans													1171
2 ans	10	31	70	127	130	154	171	206	222	112	37	15	1359
hum : 5 ans													1546
10 ans				132	205	205	248	269	324	394	218		1644
20 ans				156	219	229	278	289	357	485	259		1725
50 ans													1816
100 ans													1877
loi utilisée	moy.	moy.	Gum.	Fui.	Pe1	Gum.	Pe1	Gum	Pe1	Gum.	moy.	moy.	Gau.
	moy. = moyenne		Gum. = Gumbel	Fui. = Fuites			Pe1 = Pearson I						Gau. = Gauss

Fig-184 - PRÉCIPITATIONS ANNUELLES ET MENSUELLES A TOUBA (D'APRES P.CHEVALLIER)

Biomasse verte dressée (tonne/ha) sur parcelles représentatives

Date	Pn1 S.boisée basse	Pn2 S.boisée hygroph.	Pr3 S.arbust. claire	Pn4 S.boisée haute	Pn6 S.herb. haute	J12 S.arbust. dense
mar 87	0,7	0,5	3,1	0,8	1,6	3,0
aoû 87	2,1	1,9	7,6	2,3	11,2	5,7
oct 87	4,1	2,4	7,9	2,6	16,1	6,6

Nombre de contacts avec parties vivantes (points quadrats) pour 100 aiguilles

Date	Pn1 S.boisée basse	Pn2 S.boisée hygroph.	Pn3 S.arbust. claire	Pn4 S.boisée haute	Pn6 S.herb. haute	J12 S.arbust. dense
fév 87	10	2	33	16	45	36
mar 87	28	46	54	49	141	76
avr 87	41	54	75	46	100	32
mai 87	92	72	111	72	149	96
jun 87	165	145	190	162	238	124
jul 87	182	210	245	160	256	175
aoû 87	168	203	265	195	259	195
sep 87	164	194	268	191	178	223
oct 87	154	161	287	172	137	170
nov 87	101	130	165	102	132	111
déc 87	39	81	89	50	95	66

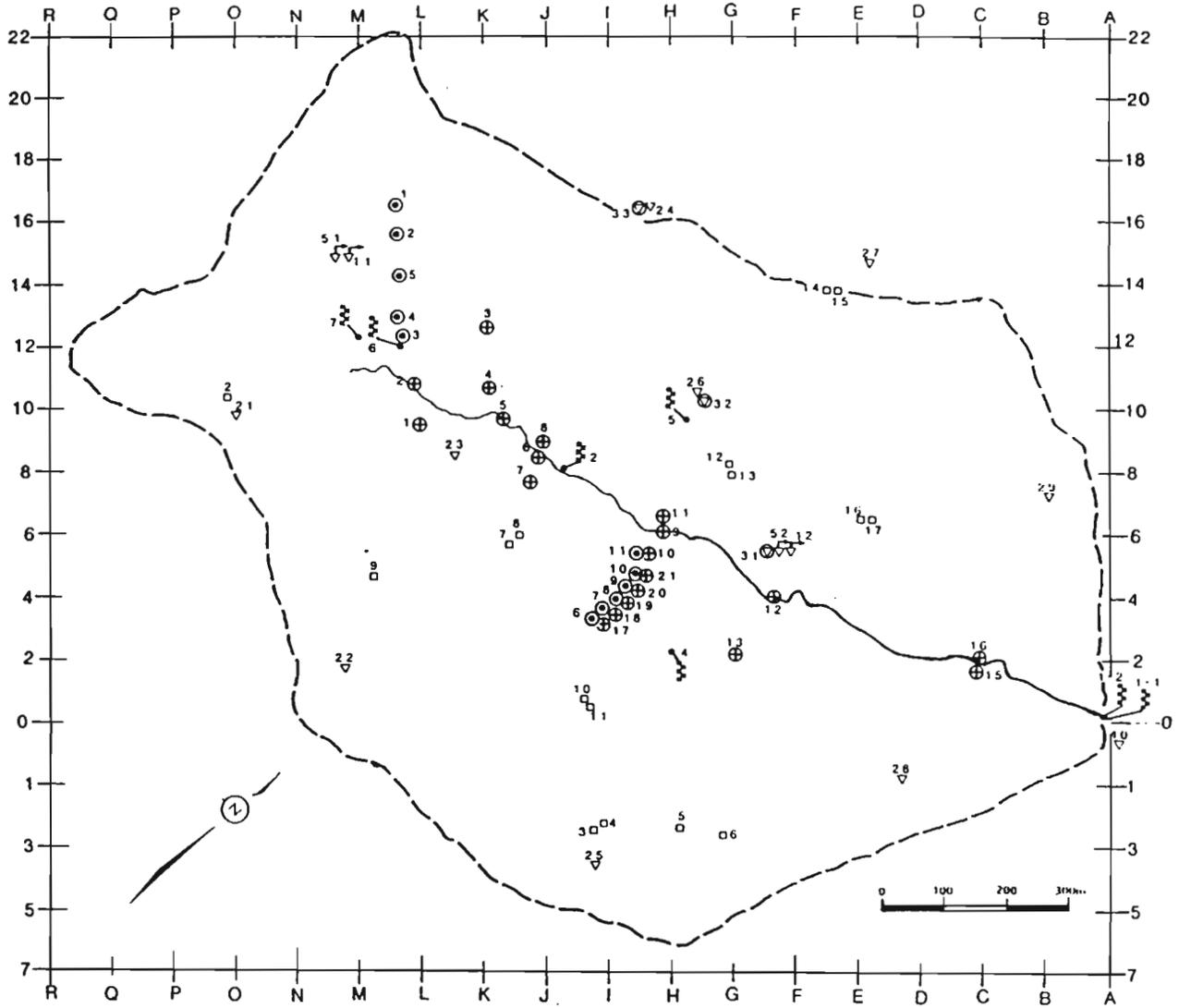
- Les pourcentages de recouvrement mesurés par excès sont :
- savane arborée basse : 29 %
 - savane arbustive dense : 35 %
 - savane boisée haute : 65 %
 - savane arbustive claire : 15 %
 - savane boisée hygrophile : 79 %
 - savane boisée basse : 74 %
 - savane arborée haute : 41 %
 - savane herbeuse et champs : moins de 10 %
 - forêt galerie : plus de 90 %

Fig-185 - ETUDE DE LA VEGETATION (D'APRES P-CHEVALIER)

	Booro-Borotou Principal	Booro-Borotou Amont	Séné à Touresso
Code inform.	1092599171	1092599172	1092599173
Coordonnées géographiques exut.	08° 28' 53" N 07° 34' 43" W	08° 28' 35" N 07° 35' 07" W	08° 30' 19" N 07° 32' 28" W
Surface (km ²)	1,36	0,455	111
Périmètre (km)	4,92	3,00	48,2
Indice de compacité	1,18	1,25	1,28
Longueur rect. équivalent (km)	1,62	1,08	17,9
Altitude max. (Niv. Gén. en m)	474,5	474,5	913
Altitude exutoire (Niv. Gén. en m)	426,5	439,2	394,5
Indice global de pente (m/km)	22,2	26,6	7,54
Indice de pente de Roche (1963)	0,180	0,179	0,106

Fig-186 - CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES (D'APRES P.CHEVALLIER)

BASSIN VERSANT DE BOORO - BOROTOU



- | | | | |
|---|---------------------|---|--------------------------------|
| ⌋ | Limnigraphe | □ | Parcelles simulation de pluies |
| ∇ | Pluviographe | ⊕ | Piézomètres |
| ∇ | Pluviomètre | ⊙ | Sites tensio - neutroniques |
| ⊙ | Pluviomètre SNOWDON | | |

Fig- 187 - EQUIPEMENT HYDRO - PLUVIOMETRIQUE DE BOORO_BOROTOU
(D'APRES P.CHEVALLIER)

5.1.2.4.1. EQUIPEMENT PLUVIOMETRIQUE

- Sur le bassin de *Booro-Borotou* :

2 pluviographes ;

10 pluviomètres, dont 3 sont associés, sur une toposéquence, à des pluviomètres au sol de type "Snowdon".

- Sur le bassin de la *Séné* des observations sont effectuées en quatre postes supplémentaires :

3 postes pluviographiques ;

1 poste pluviométrique.

5.1.2.4.2. EQUIPEMENT HYDROMETRIQUE

- *Station de Booro-Borotou principal*

Installée sur un seuil rocheux, la station principale comprend un canal bétonné de 8 mètres de long et 3,5 mètres de large, où les écoulements sont concentrés par des digues en terre compactée, suivi d'un bassin de tranquillisation qui conduit à un déversoir triangulaire en mince paroi. Après la première saison des pluies, le canal a été équipé de deux "trottoirs" qui reconcentrent les écoulements des moyennes eaux. Deux limnigraphes à flotteurs et à déroulement journalier enregistrent les hauteurs d'eau : l'un est installé sur le déversoir pour les écoulements de basses eaux et les faibles crues, l'autre dans le canal pour les écoulements de moyennes et hautes eaux.

- *Station de Booro-Borotou amont*

Située sur un bouchon argileux, la station amont comprend une passerelle posée sur deux culées bétonnées, le lit du cours d'eau ayant été seulement dés herbé. Elle ne dispose donc pas de contrôle aval. Un limnigraphe à flotteur et rotation journalière enregistre les hauteurs d'eau.

- *Station de la Séné*

La station de la Séné est installée sur un pont routier, formé de deux passes de 3,5 mètres de large, pour un tirant d'air de 4 mètres. Un radier bétonné déborde assez largement à l'amont et à l'aval. Un limnigraphe à flotteur et à rotation hebdomadaire enregistre les hauteurs d'eau.

5.1.2.4.3. RESEAU PIEZOMETRIQUE

Le réseau piézométrique se compose de 20 dispositifs, installés à la tarière jusqu'à une profondeur maximum de 4 mètres. Ils sont constitués de tubes en PVC de 80 mm de diamètre, ouverts au fond et crépinés (fentes horizontales faites à la scie, réparties sur une hauteur de 1 mètre à 1,50 mètre à partir du fond). Les sites d'implantations sont tous dans le bas fond et sur la partie inférieure des versants (fig. 187).

5.1.2.4.4. ZONE NON SATUREE

L'évaluation des stocks hydriques dans la zone non saturée est faite sur deux transects équipés de dispositifs de mesures tensio-neutroniques.

Le premier transect, installé sur les sols rouges et ocres, comporte cinq sites équipés d'un dispositif de mesure de l'humidité dans le sol (sonde neutronique) et d'une batterie d'une douzaine de bougies tensiométriques, installées à diverses profondeurs et reliées par des capillaires à un système de manomètres à mercure qui permet de

mesurer les potentiels de succion.

Le deuxième transect est installé sur les sols jaunes et de bas fond. Il compte six sites de mesure comportant un dispositif identique à celui du transect amont (fig. 187).

5.1.2.4.5. OBSERVATIONS CLIMATOLOGIQUES

La station climatologique est équipée :

- d'un dispositif complet de mesure des précipitations avec : un pluviographe à augets basculeurs, un pluviomètre à 1 m du sol, un pluviomètre au sol du type "Snowdon", modifié Orstom et un pluviomètre totalisateur ;
- d'un abri météorologique contenant un psychromètre à ventilation naturelle, et des thermomètres à maximum et minimum ;
- un anémographe directionnel ;
- deux bacs Colorado enterrés de type "Orstom".

5.1.2.5. EXPERIMENTATIONS

5.1.2.5.1. SIMULATION DE PLUIES

L'appareil de simulation de pluies utilisé est le mini-simulateur mis au point par l'Orstom qui permet de reproduire des averses sur une parcelle de sol de 1 m².

Dix-sept sites ont été testés. Ils intéressent huit types d'états de surface sur les dix cartographiés (fig. 188).

Les hyétogrammes d'averses simulées sont calqués sur les pluies de projet de récurrences annuelle et décennale, évaluées à l'échelle régionale (fig. 189).

Trois campagnes ont été réalisées : une, en saison sèche, semblable à toutes celles effectuées par l'Orstom sur d'autres bassins depuis 1977 ; une autre, en pleine saison des pluies (les parcelles étant alors protégées des averses naturelles) ; une dernière, ne concernant que les parcelles installées dans les champs, réalisée également durant la saison des pluies.

Le modèle "simulateur" proposé utilise les résultats de la campagne de saison sèche : la fonction de production moyenne sur le bassin versant donne la lame ruisselée comme la somme des fonctions de production obtenues sur les parcelles, pondérées par la surface de la zone du bassin dont elles sont représentatives :

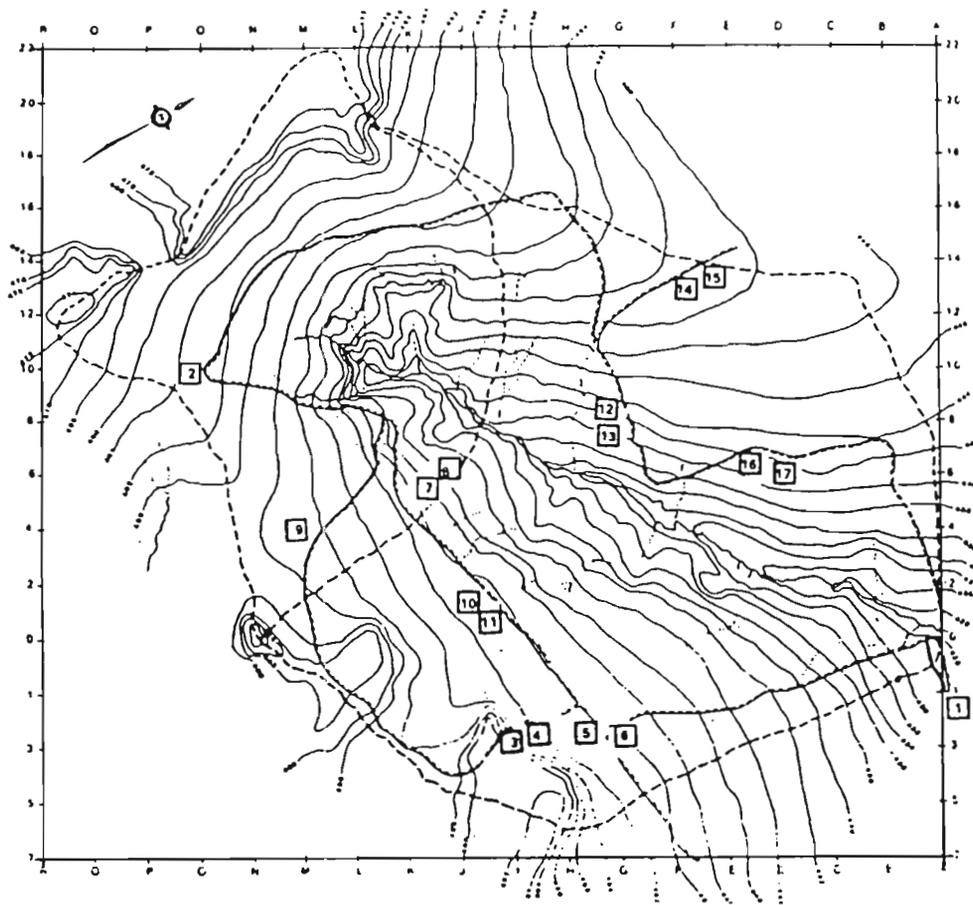
$$LRc = \sum_i (S_i / S) \cdot LRi$$

avec :

- LRc lame ruisselée calculée sur le bassin versant.
- LRi fonction de production de la parcelle i.
- Si surface contributive de la parcelle i.
- S surface du bassin versant.

LRi est de la forme :

$$LR = AA \cdot P + AB \cdot API + AC \cdot P \cdot API + AD$$



BASSIN VERSANT DE BOORO-BOROTOU

ZONES DES ETATS DE SURFACE

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1 forêt galerie | 10 champs |
| 2 savane arbustive claire | 11 champs |
| 3 flanc de cuirasse | 12 indices de ruissellement |
| 4 flanc de cuirasse | 13 indices de ruissellement |
| 5 jachère | 14 savane arborée dense |
| 6 savane arbustive dense | 15 savane arborée dense |
| 7 jachère | 16 savane arbustive claire |
| 8 jachère | 17 savane arbustive claire |
| 9 savane arbustive dense | |

Fig- 188 - LOCALISATION DES PARCELLES DE SIMULATION DE PLUIE (D'APRES P.CHEVALLIER)

Averse annuelle		Averse décennale	
durée (mn)	intensité (mm/h)	durée (mn)	intensité (mm/h)
10	40	30	40
10	60	10	60
10	120	10	140
10	90	10	105
10	75	10	90
10	40	10	75
		15	40

Fig-189 - HYETOGGRAMMES - TYPES D'AVERSSES SIMULEES (D'APRES P.CHEVALLIER)

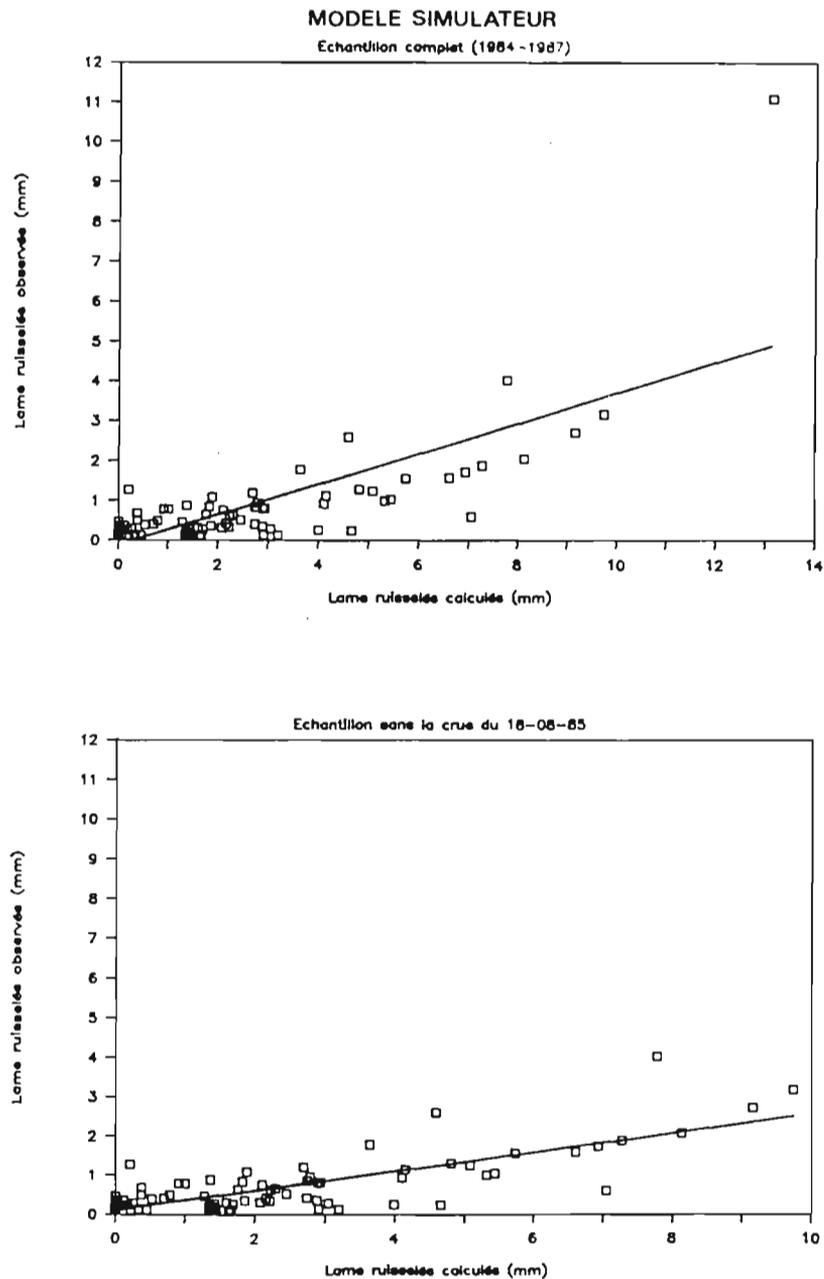


Fig-190 - LAME RUISSELEE CALCULEE / LAME RUISSELEE OBSERVEE (D'APRES P.CHEVALLIER)
BASSIN VERSANT DE BOORO.BOROTOU

avec :

- AA, AB, AC, AD constantes caractéristiques de la parcelle.
- P hauteur de l'averse simulée.
- API indice des précipitations antérieures.
- LR lame ruisselée.

La formule de calcul des précipitations antérieures étant :

$$API_n = (API_{n-1} + P_{n-1}) \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

- API_n indice des précipitations antérieures au début de l'averse n (en mm).
- P_{n-1} hauteur de l'averse n-1 (en mm).
- α coefficient pris égal à 0,5.
- t durée (en jours, avec une précision de 5 mn) séparant la fin de l'averse n-1 de l'averse n.

Pour chaque crue observée, il est possible de comparer la lame réelle ruisselée LRo à la lame calculée LRc. Cette comparaison se fait sous forme de régression linéaire des couples LRo - LRc, qui passe en général par l'origine. Elle donne un coefficient de calage K :

$$LRc = K \cdot LRo$$

L'estimation de la lame ruisselée d'une crue d'étude se fait en calculant LRo à partir de la pluie de récurrence décennale et d'un indice de précipitation antérieur moyen. Ainsi, sachant que la fonction de production moyenne du bassin versant est donnée par la relation :

$$LR = 0,12 \cdot P - 0,03 \cdot API + 0,0042 \cdot P \cdot API - 2,1$$

on calcule $LRo = 0,38 \cdot LRc - 0,1$

avec $R = 0,76$ pour 88 crues.

En supprimant la crue la plus forte on obtient :

$$LRo = 0,2 \cdot LRc + 0,1$$

avec $R = 0,79$ (fig. 190)

La crue de projet ainsi calculée (5,0 mm) ne paraît pas compatible avec les observations naturelles. Le modèle simulateur ne convient donc pas dans ce contexte, le fonctionnement réel du bassin faisant intervenir des processus plus complexes.

Le coefficient K pourrait assez bien représenter le pourcentage de la superficie du bassin qui ruisselle véritablement.

Les observations sous pluie simulée ont été confrontées avec les lois théoriques de l'infiltration, en utilisant le modèle de Green et Ampt qui s'exprime par la relation :

$$F(t) = Ks \cdot [h + Li(t)] / Li(t)$$

- F(t) intensité d'infiltration.
- Ks conductivité hydraulique.
- h déficit de pression capillaire entre la surface et le front d'humectation.
- Li(t) lame infiltrée.

Le calage du modèle a été réalisé à partir des différentes observations recueillies (fig. 191).

Les expérimentations de simulation ont été complétées par une évaluation de l'évolution, en cours de protocole, des profils hydriques des parcelles. Les mesures ont été faites par la méthode gravimétrique, la densité apparente en place étant mesurée à l'aide de cylindres calibrés, ou, dans les cas difficiles, au densitomètre à membrane. Ainsi, ont pu être confrontés les résultats de saison sèche à ceux de la saison des pluies. Plusieurs remarques peuvent être faites : les variations des états de surface ne sont pas aussi flagrantes qu'on aurait pu le penser, le stock hydrique maximal des horizons superficiels est plus important en saison des pluies, une diminution générale de la capacité d'infiltration des sols est observée entre saisons sèches et saisons pluvieuses, excepté sur les parcelles à infiltration totale.

5.1.2.5.2. PROFILS HYDRIQUES

L'étude de l'évolution du stock d'eau a permis de différencier le domaine amont, qui ne se sature jamais, et le domaine aval, directement influencé par la nappe. La variation du stock d'eau en fonction du temps est calculée comme étant la différence entre la teneur en eau initiale et la teneur en eau à la date choisie, toutes deux intégrées sur toute la hauteur du profil connu (fig. 192).

5.1.2.5.3. TRAÇAGE DES ECOULEMENTS

Pour mieux comprendre la genèse des crues, dans les ravines et à l'exutoire du bassin versant, quelques crues naturelles ont été suivies en utilisant un traceur (la Rhodamine WT). Aucune mesure quantitative n'a été faite lors des injections qui ont été réalisées dans des drains à écoulement concentré ou dans le bas fond à proximité du cours d'eau principal (fig. 193).

Il a pu ainsi être montré : que les crues moyennes avaient un comportement correspondant à une hypothèse hortonienne de fonctionnement ; que les crues faibles sur la partie amont pouvaient s'infiltrer totalement et que le faible écoulement rapide observé proviendrait d'un effet piston ; et qu'enfin, dans une situation équivalente, avec une averse plus importante, la nappe débordait dans le bas fond, l'écoulement rapide étant alors une combinaison du ruissellement hortonien, de l'effet piston et du ruissellement direct sur les zones saturées.

Il aurait été cependant plus intéressant que l'injection du traceur soit répartie sur une ligne de niveau en haut de versant, et surtout que soit effectué un nombre suffisant de répétitions.

5.1.2.6. OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES

5.1.2.6.1. BILAN HYDROLOGIQUE

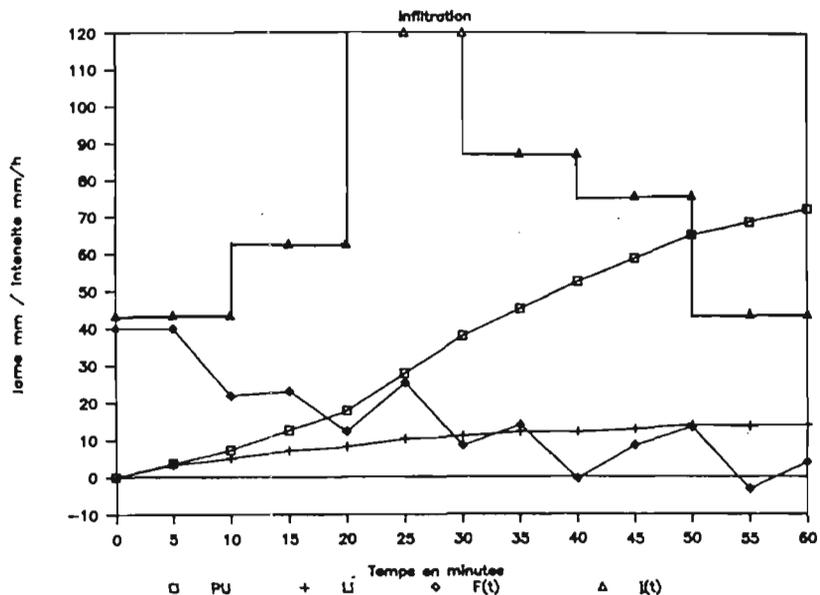
Le bilan a été calculé en années hydrologiques. Les valeurs mensuelles et annuelles sont reportées sur les tableaux de la figure 194 (Booro-Borotou principal).

5.1.2.6.2. LES CRUES

Une crue est définie comme une augmentation significative du débit à l'exutoire du bassin versant, consécutive à une averse ou à un train d'averses.

L'analyse présentée ne porte que sur la station principale. Son originalité réside dans le fait que les crues ne sont pas sélectionnées a priori. Toutes les crues simples, dont la lame ruisselée est supérieure à 0,5 mm, ont été retenues. Ce choix se justifie par le fait que le bassin est compact, que la variabilité spatiale des averses à l'échelle du bassin est très faible et qu'enfin on peut considérer les temps de concentrations comme supérieurs à la durée moyenne du corps d'averse.

Parcelle 14 : averse 9



- Pu(t), la hauteur cumulée de précipitation (mm) ;
- Li(t), la hauteur cumulée de l'infiltration (mm) ;
- I(t), l'intensité de précipitation (dPu/dt) (mm/h) ;
- F(t), l'intensité d'infiltration (dLi/dt) (mm/h).

Fig-191 - ETUDE DE L'INFILTRATION (D'APRES P.CHEVALLIER)

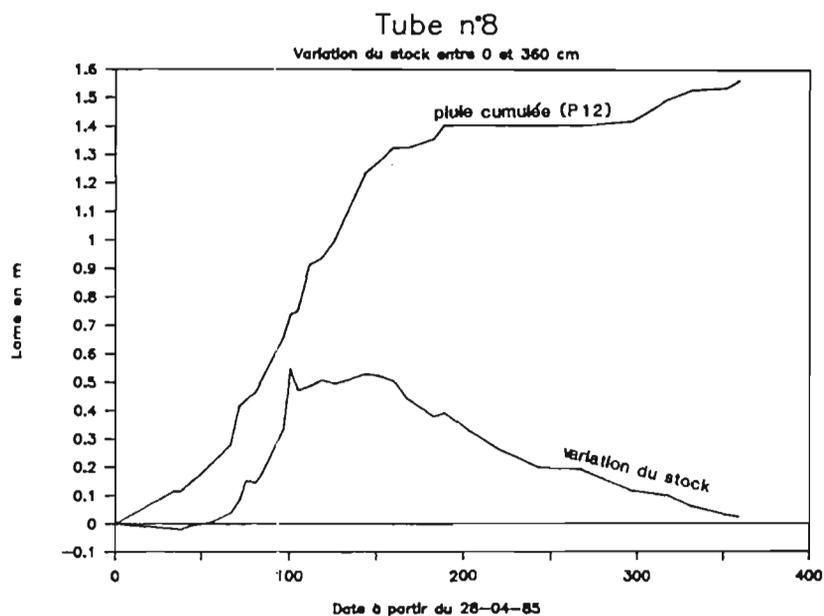
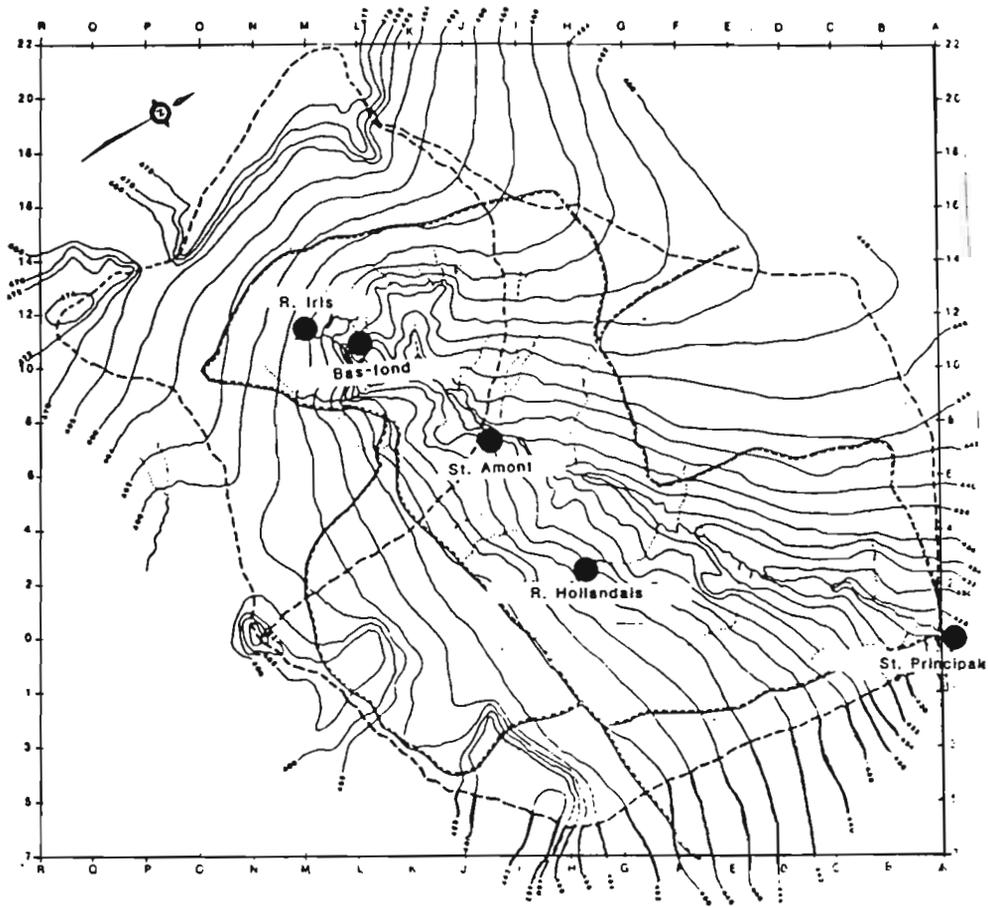


Fig-192 - VARIATION DU STOCK D'EAU DANS LE SOL (D'APRES P.CHEVALLIER)
BASSIN VERSANT DE BOORO_BOROTOU



POINTS D'INJECTION ET DE CONTROLE. BASSIN DE BOORO-BOROTOU

Crue du 18 septembre 1987

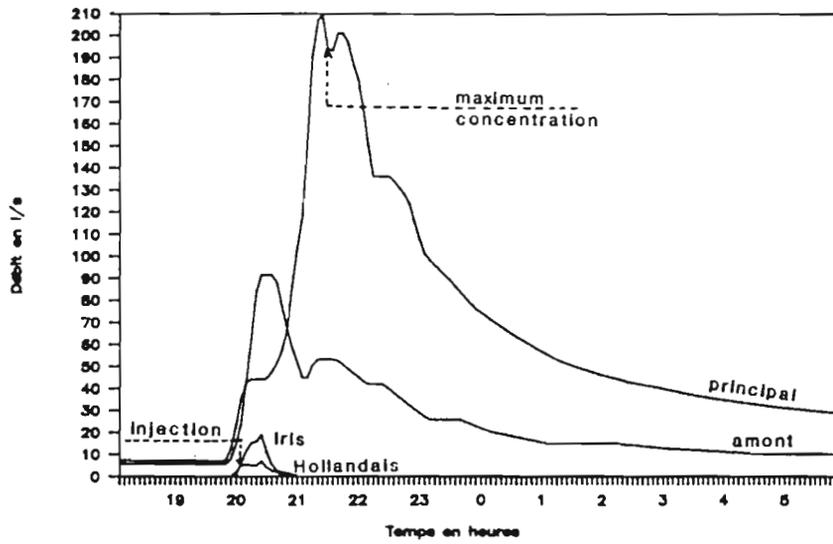


Fig-193 - TRAÇAGES DES ECOULEMENTS. BASSIN DE BOORO-BOROTOU (D'APRES P.CHEVALLIER)

Les hydrogrammes réduits à une lame écoulee de 1 mm permettent de différencier trois formes de crues :

Type	Lame écoulee (mm)	Temps de montée (min.)	Temps de base (min.)	Débit maximum (l/s)
1	1,0	115	385	282
2	1,0	325	1 325	51,5
3	1,0	155	630	134

Une étude statistique (tableau de contingence et analyse factorielle de correspondance) a permis de dégager les meilleurs descripteurs de crues : forme et conditions initiales. Elle a montré également la non-validité, dans le contexte étudié, des descriptions de type hydrogramme unitaire et l'ambiguïté de la définition statistique d'une crue d'étude. Cette dernière a tout de même été estimée en prenant la courbe enveloppe de l'échantillon : pluie moyenne-lame ruisselée (fig. 195) :

$$L_r = 0,000132 \cdot P_m^{2,57}$$

Elle correspond à des conditions initiales donnant lieu à des crues de type 1, ce qui permet de définir, en prenant un coefficient d'abattement égal à l'unité (compte tenu de la faible superficie du bassin versant), les caractéristiques du tableau de la figure 196.

L'étude des crues de la station amont montre, de la même manière, l'existence de trois formes d'hydrogramme, et permet d'établir des relations entre les débits de pointes et les lames ruisselées, observés aux deux stations.

5.1.2.6.3. TARISSEMENT

Le débit de base représente près de 80 % de l'écoulement total. En période de tarissement, des oscillations journalières, présentant un maximum aux environs de 14 h et un minimum entre 22 h et 0 h, peuvent provoquer un écoulement intermittent en cours de journée. Elles sont une manifestation des variations diurnes de l'évapotranspiration.

Le tarissement a été étudié en considérant les débits moyens et non les débits maximaux journaliers. Les coefficients de Maillet présentant une grande dispersion, il a été défini une courbe de tarissement optimale en rangeant tout d'abord l'échantillon de débits par ordre décroissant de débit initial, puis en traçant le premier segment de droite de Maillet en coordonnées semi-logarithmiques, en portant enfin le segment suivant en prenant appui sur le segment précédent pour caler le point d'origine (fig. 197).

La courbe enveloppe s'ajuste sur une loi de Tison :

$$Q = Q_0 \cdot (1 + 0,0095 \cdot T)^{-2} \quad \text{en l/s}$$

Il s'agit d'un tarissement idéal qui correspond aux conditions minimales d'intervention de la composante verticale.

BASSIN VERSANT DE BOORO.BOROTOU

Bilan hydrologique annuel sur le bassin versant de Booro-Borotou (en mm)

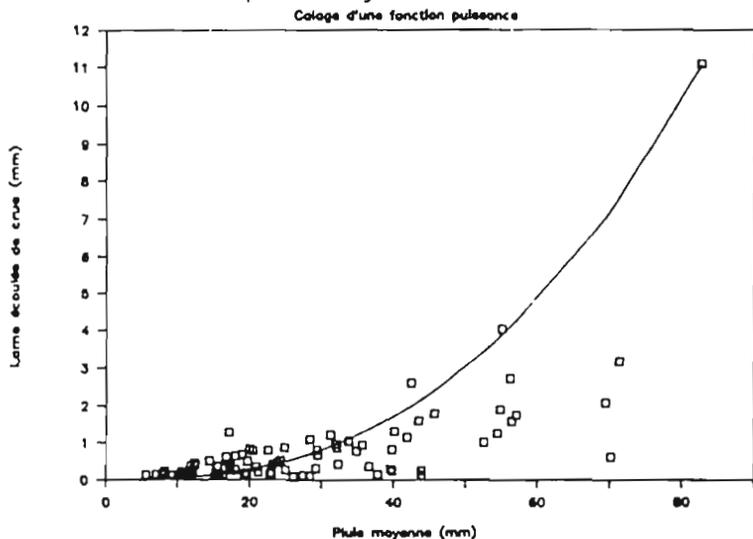
Années	Précipitation	Ecoulement	Ruissellement	ETP Penman	Déficit écoulement
1984-85	1161	59	10	1620	1102
1985-86	1528	205	33	1602	1323
1986-87	1073	31	6	1604	1042
1987-88	1244	86	26	1590	1158

Récapitulatif des valeurs mensuelles des termes du bilan hydrologique à Booro-Borotou

	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar
1984-85												
P	96,4	113,0	218,1	165,8	225,5	151,7	147,5	14,2	0,0	1,7	11,0	16,5
ETP	175,5	149,6	133,0	104,4	124,6	115,3	129,3	121,7	96,5	154,2	147,8	165,1
E	0,1	0,7	6,2	5,2	9,5	21,3	11,9	2,8	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	2,0	0,5	1,1	4,1	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1985-86												
P	101,7	67,6	131,7	351,8	398,5	265,5	107,7	2,2	0,0	0,0	46,4	74,4
ETP	161,6	150,4	121,5	103,8	107,8	111,7	130,1	126,1	101,2	149,6	165,7	168,3
E	0,0	0,0	0,1	13,5	80,1	70,3	27,0	8,2	2,9	1,3	0,8	1,2
R	0,0	0,0	0,0	3,4	19,6	7,6	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1986-87												
P	66,0	128,0	112,8	157,1	129,1	207,3	152,3	24,8	0,0	1,1	35,4	58,7
ETP	159,3	148,4	137,8	99,8	108,7	103,5	120,7	115,4	97,0	149,0	163,6	169,3
E	1,3	1,9	2,8	1,9	2,9	8,0	5,8	4,6	1,0	0,4	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,1	0,2	0,6	3,0	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1987-88												
P	23,0	172,3	166,4	135,1	334,5	242,4	74,8	15,6	15,8	0,0	0,2	34,9
ETP	184,1	151,5	123,3	126,1	103,5	101,4	123,6	118,7	98,4	132,0	152,7	171,9
E	0,0	0,0	1,5	1,2	21,7	36,4	20,1	3,2	1,4	0,2	0,0	0,0
R	0,0	0,0	0,7	0,2	9,8	13,1	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fig-194 - BILANS HYDROLOGIQUES. (D'APRES P.CHEVALLIER)

Relation pluie moyenne – lame ruisselée



**Fig-195 - COURBE ENVELOPPE DES COUPLES:
PLUIE MOYENNE / LAME RUISSELEE
(D'APRES P.CHEVALLIER)**

Période de retour années	Pluie moyenne mm	Lame de crue mm	Coeff. de crue %	Débit maximal m ³ /s
1	74,4	8,4	11,3 %	2,4
5	109	22,5	20,6 %	6,3
10	126	32,6	25,9 %	9,2
20	144	46,0	31,9 %	13,0
50	170	70,4	41,4 %	19,8
100	191	94,9	49,7 %	26,8

**Fig-196 - CARACTERISTIQUES DES CRUES D'ETUDE
DE DIFFERENTES PERIODES DE RETOUR
(D'APRES P.CHEVALLIER)**

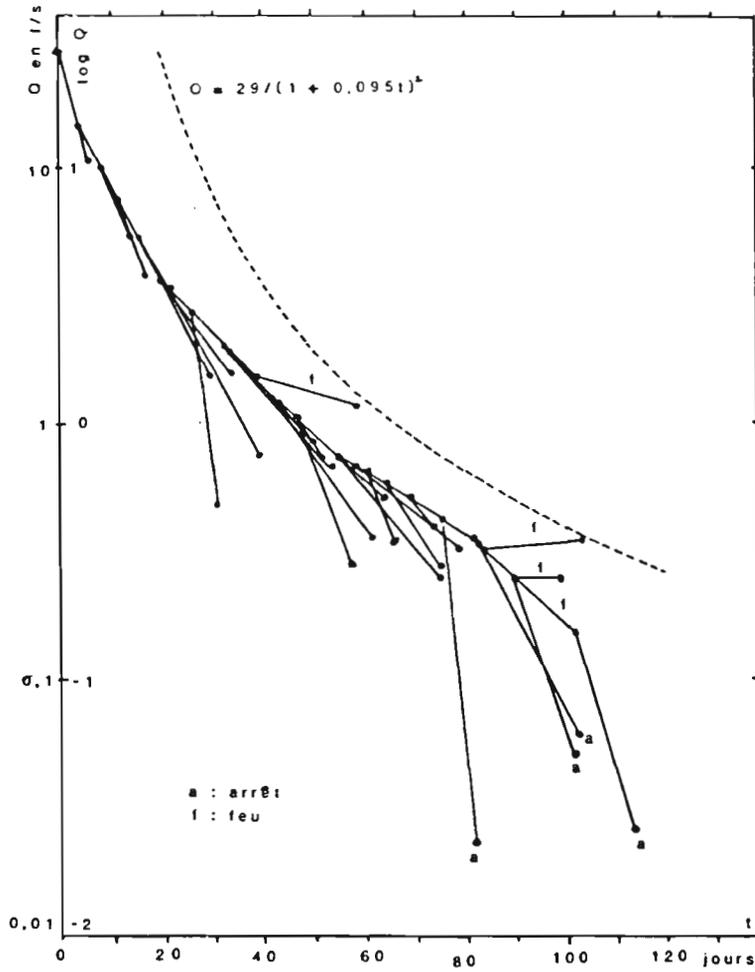


Fig-197 - TARISSEMENTS OBSERVES (D'APRES P.CHEVALLIER)
BASSIN VERSANT DE BOORO_BOROTOU

Année 1987 : comparaison des lames observées et calculées

1987	Pluie	Lame obs.	Lame CREC 5	Lame MODGLO	Lame MODIBI
Jan	1.1	0.4	0.0	0.3	0.0
Fév	35.4	0.0	0.1	0.0	0.0
Mar	58.7	0.0	0.2	0.0	0.0
Avr	23.0	0.0	0.1	0.0	0.0
Mai	172.3	0.0	0.2	0.0	2.0
Jun	166.4	1.5	0.6	1.0	4.0
Jul	135.1	1.2	1.1	0.8	3.0
Aoû	334.5	21.7	9.3	19.6	23.0
Sep	242.4	36.4	37.2	32.4	44.0
Oct	74.8	20.1	25.5	21.2	18.0
Nov	15.6	3.2	2.9	5.1	6.0
Déc	15.8	1.4	1.8	2.4	0.0
Année	1275.1	85.9	79.0	82.8	100.0

Fig-198 - COMPARAISON DES DIFFERENTS MODELES GLOBAUX UTILISES (D'APRES P.CHEVALLIER)
BASSIN VERSANT DE BOORO.BOROTOU

5.1.2.6.4. MODELISATION

Trois modèles globaux ont été testés : CREC 5 de Cormary et Guilbot (5 paramètres), MODGLO de G. Girard et Al. (20 paramètres) et MODIBI de D. Ibiza.

Le calage a été réalisé à partir des observations des années 1984, 1985 et 1986, la validation étant faite sur les données de l'année 1987 (fig. 198).

Les coefficients de corrélation sont respectivement :

$$R^2(\text{CREC}) = 0,893$$

$$R^2(\text{MODGLO}) = 0,990$$

$$R^2(\text{MODIBI}) = 0,974.$$

Les résultats sont bons pour les lames mensuelles et annuelles. Par contre, la confrontation entre débits journaliers observés et calculés reste assez décevante (sauf pour le modèle MODIBI qui se comporte plutôt bien). Toutefois, ce dernier a fait l'objet d'un calage manuel, beaucoup plus délicat et nécessitant l'expérience de son auteur.

Le modèle couplé à discrétisation spatiale MODCOU, de G. Girard et al., a également été testé en effectuant le calage sur les trois premières années, après avoir, comme pour les modèles globaux, utilisé deux années fictives, afin de s'assurer d'une parfaite initialisation.

Les résultats obtenus au niveau journalier n'ont pas été très satisfaisants, particulièrement pour la simulation des niveaux piézométriques. La qualité de la simulation des lames mensuelles est, par contre, comparable à celle des modèles globaux : $R^2 = 0,983$. De grosses difficultés sont apparues au niveau de la simulation des transferts souterrains, d'autant plus que la connaissance de cette zone était très succincte.

5.1.3. BASSINS DE MOUDA - CAMEROUN

5.1.3.1. THEME DE L'ETUDE

La forte pression démographique et les flux migratoires, qui caractérisent la province de l'extrême Nord du Cameroun, se traduisent par un abandon progressif des terroirs montagnards, une utilisation parfois inappropriée des terres des plaines et des plateaux, et un appauvrissement des sols. De telles pratiques ont des conséquences graves sur les ressources naturelles renouvelables : les savanes arborées disparaissent, les terres défrichées et dégradées sont soumises à une érosion intense, l'efficacité des pluies dans la recharge des réserves en eau du sol diminue. C'est dans ce contexte de déséquilibres biologiques que s'inscrit l'étude des facteurs conditionnels du ruissellement et de l'érosion menée, à trois niveaux d'échelle spatiale et deux niveaux d'échelle temporelle, sur le bassin versant de Mouda.

L'étude s'est étalée sur deux campagnes : 1984 et 1985.

5.1.3.2. CONTEXTE PHYSICO-CLIMATIQUE

Situés à 30 km au Sud de la ville de Maroua (fig. 199), les sites expérimentaux sont proches de la limite Sud du Sahel. Ils appartiennent à la zone de climat tropical pur qui se caractérise ici par une saison sèche qui dure près de sept mois, dont cinq ont une pluviométrie nulle.

La hauteur pluviométrique annuelle médiane est de 778 mm à la station de Maroua - Agro. Les mois de juillet et août concentrent 57 % des pluies de la saison humide (fig. 200).

La végétation est constituée de vestiges de savanes arborées denses. Cependant, la majorité des surfaces est soumise à une forte morphogénèse, du fait de l'érosion intense en nappes, rigoles et ravines qui tend à se généraliser sous l'effet des cultures et du front régressif d'érosion.

5.1.3.3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'un des objectifs de cette étude étant le transfert d'échelle, le dispositif comprenait un premier niveau constitué par le bassin versant naturel (quelques hectares à plusieurs km²), un deuxième niveau caractérisait le champ (quelques milliers de m²) et enfin un troisième niveau permettait des observations fines et répétées sur des parcelles élémentaires de 1 m². Deux échelles temporelles ont également été prises en compte : d'une part les simulations de pluies sur parcelles élémentaires, en saison sèche, correspondant à des périodes d'expérimentation relativement brèves, d'autre part le suivi de certaines parcelles tout au long de la saison des pluies, couplé avec le suivi des bassins versants.

5.1.3.3.1. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Le bassin versant 1, de 18,1 km² de superficie, est représentatif des zones de plaine.

Le bassin 2, de 3 000 m² de surface, délimité par une levée de terre, est situé à l'intérieur du bassin 1, à proximité du thalweg principal. Il est formé de vertisols dégradés et de sols "hardés" (étendues de terre non cultivables, stériles).

Le bassin 3, de 58 700 m², situé à proximité du village de Mouda, correspond au premier cirque de la ligne de collines.

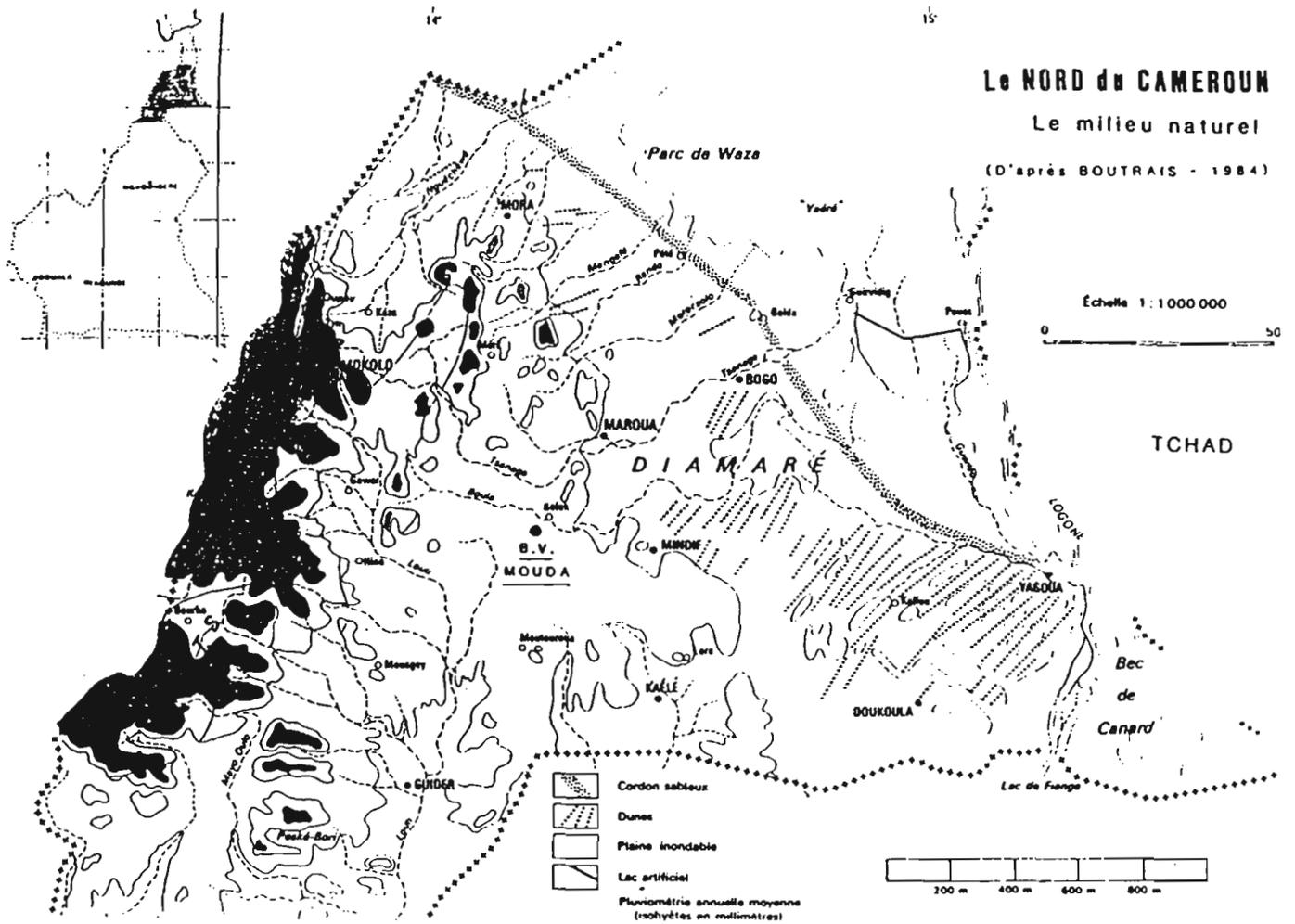


Fig-199 - CARTE DE SITUATION DU BRE DE MOUDA (CAMEROUN)

	Temperature Salak °C			Precipitation mm		Evaporation mm			Déficit hydrique (P - ETP) mm	Humid relative moyen de l'air %
	MAX	MIN	MOY.	Maroua	Salak	Piche	Bac Colorado	ETP PENMAN		
J	32.7	16.9	24.9	0	0	466	233	147	-147	27.5
F	35.3	18.6	27.0	0	0	541	252	160	-160	17.5
M	38.5	22.3	30.8	2	3	628	316	194	-192	22.5
A	39.2	24.9	31.9	16	22	510	351	190	-174	34.5
M	37.6	24.3	31.0	59	63	394	285	190	-131	52.0
J	34.0	22.2	28.2	105	131	213	195	145	-40	65.0
J	31.6	21.7	26.6	207	229	135	161	130	+77	74.0
A	30.0	21.2	25.6	255	233	89	124	110	+145	79.0
S	31.5	20.9	26.2	145	161	92	132	125	+20	75.0
O	34.6	20.5	27.7	27	33	230	186	156	-129	59.0
N	35.1	19.0	27.1	0	0	393	249	153	-153	36.0
D	33.6	17.1	25.3	0	0	436	254	132	-132	30.5
An			27.7	816	875	4117	2738	1832	-1016	48.0

Caractéristiques climatiques principales de la région de MAROUA (d'après SUCHEL, 1972; GUI5, 1972; METÉO, in PONTANIER et al., 1974)

Stations	Nb an	P max	P méd	P min	ET	Années Humides		Année moy.	IC 95%	Années Sèches	
						T = 20 ans	T = 10 ans			T = 20 ans	T = 10 ans
						MAROUA-AGRO	40			1120	778
MAROUA-SALAK	18	1119	850	617	123	1085	1040	877	61	678	719

Répartition statistique des pluies annuelles d'après J.C. OLIVRY (1984)

Station	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
MAROUA-AGRO												
Moyenne Ec. Type	0 0	0 0	1 3	15 23	59 41	105 48	193 58	260 68	145 66	27 30	0 0	0 0
MAROUA-SALAK												
Moyenne Ec. Type	0 0	0 0	3,7 7,4	20,6 15,8	62,9 34,0	134,3 59,6	215,9 70,7	241,3 69,4	156,9 52,4	30,1 28,9	0,35 1,4	0 0

Répartition statistique des pluies mensuelles d'après J.C. OLIVRY (1984)

	Averses journalières (en mm) de période de retour						
	1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
MAROUA-AGRO	65	76	91	105	117	130	146

Ajustement à une loi de PEARSON III aux hauteurs d'averses tombées en 24 heures

Fig-200 - CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA REGION DE MAROUA (CAMEROUN)

Caractéristiques physiques des bassins :

Paramètres	BV1	BV2	BV3
Surface S	18,1 km ²	3 000 m ²	58 700 m ²
Périmètre P	18,7 km	223 m	1 020 m
Indice de forme K	1,23	1,14	1,18
Longueur rectangle équivalent L	6,60 km	66,1 m	336 m
Largeur rectangle équivalent l	2,74 km	53,9 m	175 m
Ip Roche	0,096	0,24	0,582
Ig global (m/km)	5,30		
Pente moyenne (%)		3,1	35

5.1.3.3.2. EQUIPEMENT HYDROPLUVIOMETRIQUE

- *Bassin 1* (fig. 201A)

L'exutoire du bassin 1 est constitué d'un seuil rocheux, aménagé pour la mesure des débits d'étiage. Les mesures de hautes eaux sont faites à l'aide d'une station téléphérique. Un limnigraphe à flotteur à rotation journalière, 11 pluviomètres et 2 pluviographes complètent cet équipement.

Des jalons placés dans un certain nombre de ravines permettent une appréciation visuelle de l'érosion régressive durant la saison des pluies.

- *Bassin 2* (fig. 201B)

La mesure des hauteurs d'eau à l'exutoire du bassin 2 est assurée par un limnigraphe à flotteur à rotation rapide (durée de révolution 3 h 12 mn). Les débits sont contrôlés par un déversoir triangulaire, installé à la sortie d'une fosse à sédiments, doublé d'un seuil jaugeur "Neyrtec".

Le dispositif de mesure de l'érosion comprend : 4 placettes à aiguilles de 16 m² et une fosse à sédiments pour le piégeage des éléments grossiers à l'exutoire du bassin.

Le suivi de l'état hydrique des sols est mené grâce à six tubes de mesures neutroniques, répartis selon la nature des sols, les états de surface et le couvert herbacé

Le réseau pluviométrique comprend trois pluviomètres et un pluviographe journalier.

- *Bassin 3* (fig. 201C)

L'exutoire du bassin 3 est aménagé avec un seuil jaugeur "Neyrtec", un limnigraphe à flotteur à rotation journalière contrôlant les variations de hauteur d'eau à l'entrée du canal.

Six pluviomètres (dont un appartenant au réseau du bassin 1) et un pluviographe journalier sont répartis sur le bassin.

5.1.3.3.3. METHODES DE MESURES

- *Bassin 1*

- Le tarage de la station hydrométrique a fait l'objet de mesures classiques au moulinet.

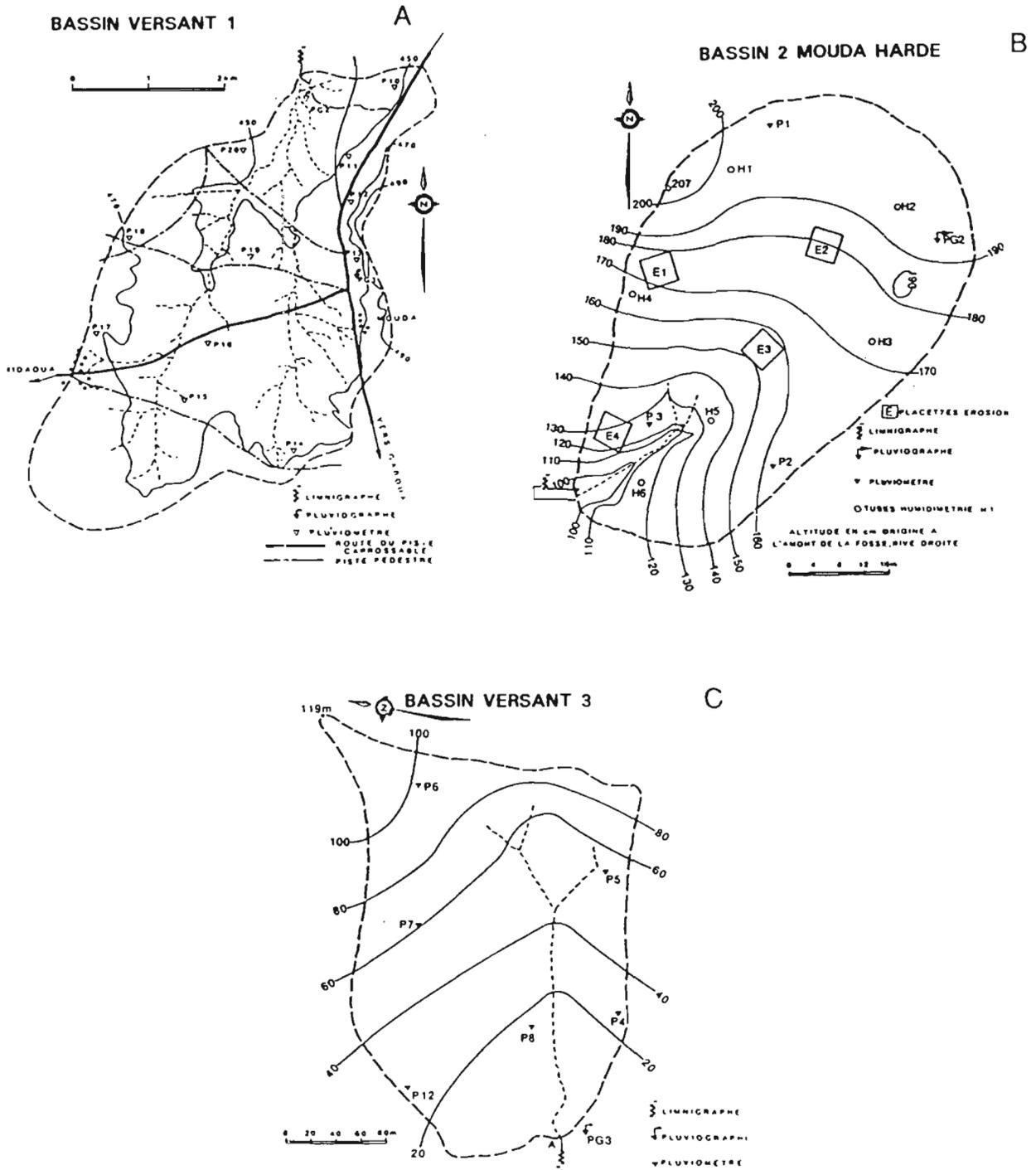


Fig-201 - EQUIPEMENT DU BASSIN DE MOUDA -CAMEROUN (D'APRES B.THEBE)

- . Au cours de chaque crue, 10 à 20 échantillons d'eau étaient prélevés pour suivre l'évolution des concentrations en matières solides.

- Bassin 2

- . A chaque phase de fonctionnement de la fosse à sédiments correspond une équation du débit d'entrée Q_e :

- * Pendant le remplissage, si Q_s est le débit de sortie et S la surface de la fosse :

$$Q_s = 0 \quad Q_e = S \cdot dh / dt$$

dh/dt étant la variation du plan d'eau pendant le pas de temps dt .

- * Quand le déversoir fonctionne :

$$Q_s = a \cdot h^n$$

avec $a = 0,0184$ $n = 2,47$

(n a été estimé à l'aide de 30 mesures).

Ainsi $Q_e = S \cdot dh / dt + a \cdot h^n$ (fig. 202)

- . Le couvert herbacé a été suivi pendant un an. Trois classes de densité de la végétation ont été différenciées :

- * couvert faible : 5 % de recouvrement au sol ;
- * couvert moyen : 30 % de recouvrement au sol ;
- * couvert dense : 60 % de recouvrement au sol.

Chaque mois, les surfaces correspondant à chacune des classes ont été délimitées par levé topographique. L'indice global de recouvrement est la moyenne pondérée par la surface des trois indices.

- . L'étalonnage de la sonde à neutrons a été réalisé en versant en 24 heures, sur chaque site retenu, $3,5 \text{ m}^3$ d'eau dans un anneau métallique de 30 cm de hauteur aérienne, enfoncé dans le sol de 5 cm et délimitant une surface de 5 m^2 environ, soit une lame d'eau de 700 mm. Dès la fin de l'infiltration, une série de quatre profils a été exécutée à la tarière, en même temps qu'un profil à la sonde à neutrons. D'autres profils ont été ensuite échelonnés dans le temps, avec des intervalles allant de trois jours à cinq mois.

Pour chaque niveau, était calculée la médiane des valeurs d'humidité obtenues sur quatre profils. Pour les mesures à la sonde à neutrons, la valeur retenue était la moyenne de deux comptages.

La densité apparente d_a était mesurée au cylindre pour transformer l'humidité pondérale H_p , mesurée à la tarière, en humidité volumique H_v .

- . Sur chacune des quatre placettes de 16 m^2 , représentatives des différents types de sol, un système, comprenant 81 aiguilles (maille de $50 \times 50 \text{ cm}$) mises en terre, permettait, en mesurant leur hauteur aérienne en début et fin de saison des pluies, d'apprécier l'érosion ou le comblement du terrain.

A l'exutoire, la fosse à sédiments était vidangée après chaque crue, des prélèvements d'eau étant faits également sur le déversoir tout au long de la phase de ruissellement.

- Parcelles élémentaires

Sept sites élémentaires (S1 à S7), comprenant chacun trois parcelles de 1 m^2 , ont été aménagés le long d'un transect représentatif de la répartition des sols du bassin 1 (fig. 203). Trois d'entre eux (S1, S2 et S6) étaient situés à la périphérie du bassin 2. Des tubes de mesure neutronique de l'humidité des sols étaient installés à l'amont des sites S1 et S5.

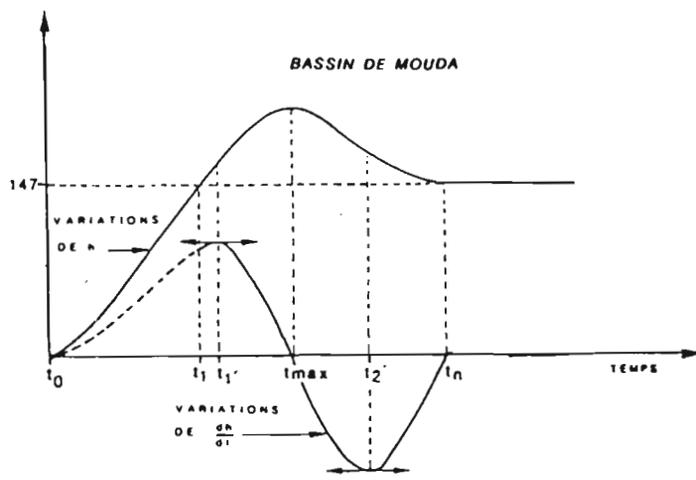


Fig-202 - COURBES THEORIQUES DES VARIATIONS DE HAUTEUR D'EAU DANS LA FOSSE (D'APRES B.THEBE)

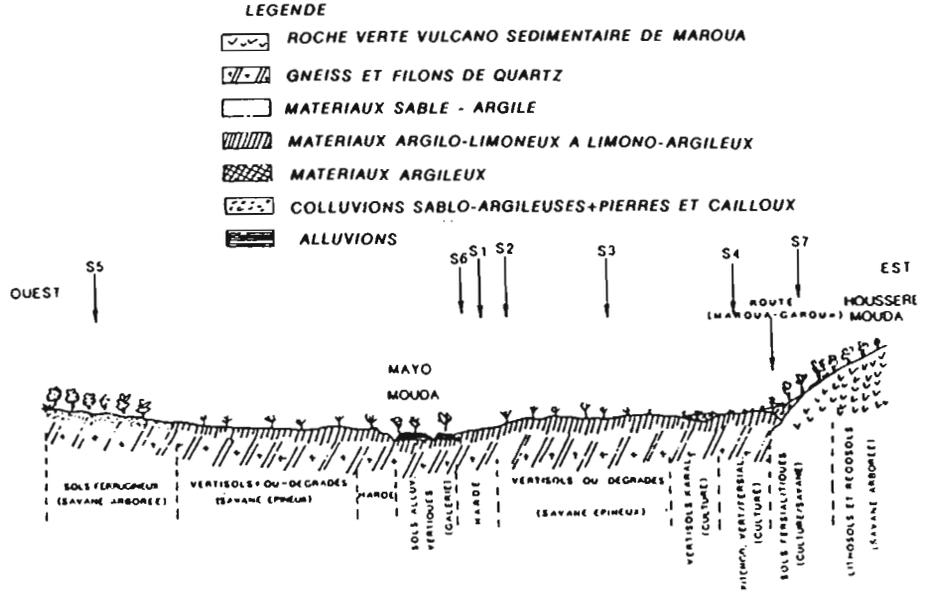


Fig-203 - LOCALISATION DES SITES DE SIMULATIONS DE PLUIE-MOUDA-COUPES SCHEMATIQUE (D'APRES R.PONTANIER)

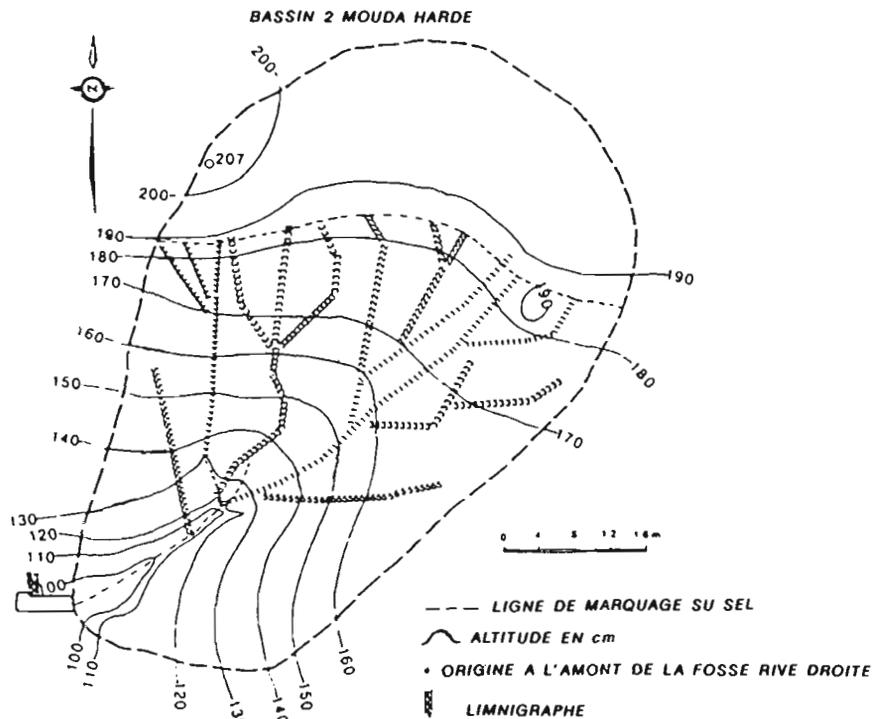


Fig-204 - TRACE DES RIGOLES DE RUISSELLEMENT (D'APRES B.THEBE)

Les mesures sous pluies simulées ont été effectuées selon le protocole défini par les chercheurs de l'Orstom (paragraphe 2.5.1.4.). Pour juger de la pertinence des résultats obtenus en mode synchrone, en particulier pour un état donné de la végétation dans le temps, neuf parcelles réparties sur trois sites (S1, S2 et S6) ont été suivies durant la saison des pluies en mode diachrone.

5.1.3.4. RESULTATS OBTENUS

5.1.3.4.1. HYDROPLUVIOMETRIE

- Les études sur *parcelles* montrent que l'hypothèse faite sur la fidélité de la reproduction des averses par le simulateur, ainsi que sur l'absence d'influence sur le ruissellement d'un couvert végétal faible, est vérifiée. Lorsque le couvert est plus dense, l'état physiologique de la végétation joue un rôle qui ne peut être appréhendé par les mesures faites en saison sèche. De plus, une étude en ACP (analyse en composantes principales) a montré que la variable la plus apte à expliquer la lame infiltrée sur l'ensemble des parcelles est le taux de pellicule de battance. Enfin, l'étude de l'évolution de l'eau dans le sol a mis en évidence l'importance du drainage oblique.

- Sur le *bassin 2*, toutes les pluies ayant donné lieu à du ruissellement ont également ruisselées sur parcelles.

La faible surface de ce bassin (3 000 m²) ne permettant pas d'appliquer la méthode de l'hydrogramme unitaire, un hydrogramme-type a été défini à partir d'un échantillon de crues. Cet hydrogramme présente deux pointes dont la provenance a été déterminée à l'aide d'une expérimentation qui a consisté à mettre en place une "ligne de sel" à l'aval de la zone de sols "hardés" (amont du bassin) et à mesurer la conductivité des eaux de ruissellement à l'entrée de la fosse. Une deuxième manipulation, réalisée sur la même zone, a permis de tracer le réseau de rigoles et hiérarchiser les écoulements en effectuant des marquages à la fluorescéine (fig. 204). Il a été ainsi montré que la première pointe de crue est provoquée par les eaux de ruissellement des sols hardés, situés à l'amont du bassin (fig. 205).

A partir des équations établies sous pluies simulées, les volumes ruisselés relatifs à chaque unité homogène ont pu être calculés et comparés à ceux des hydrogrammes observés (fig. 206).

Les valeurs des crues exceptionnelles sont regroupées dans le tableau de la figure 207 et celles du bilan hydrique sur la figure 208.

- Sur le *bassin 1*, les études hydro-pluviométriques ont été faites de manière classiques.

La lame ruisselée est déterminée à partir de la relation pluie moyenne-lame ruisselée, définie par l'expression :

$$Lr = (Pm^2 + a^2)^{1/2} - a$$

avec $a = 41,2 \text{ mm}$

a représente la quantité maximale de pluie perdue pour le ruissellement sur le bassin. La précision de sa valeur varie en fonction de Lr ou de Kr (coefficient de ruissellement) :

$$da = - (1 / 2) \cdot (1 + 1 / Kr^2) \cdot dLr$$

Pour l'étude des crues, un hydrogramme moyen a été défini et le coefficient d'abattement des précipitations a été estimé d'après la formule de Vuillaume (paragraphe 3.1.5.3.3. - 328). Il a été admis que la crue décennale est provoquée par une averse également décennale, qui peut être considérée comme unitaire :

- . $Pm \ 1/10 = 90,3 \text{ mm}$ (après abattement de 0,86)
- . $Lr \ 1/10 = 58,0 \text{ mm}$ $Kr \ 1/10 = 64 \%$
- . $Qmax \ 1/10 = 131 \text{ m}^3/\text{s}$
- . $tm \ 1/10 = 100 \text{ mn}$ $tb \ 1/10 = 300 \text{ mn}$.

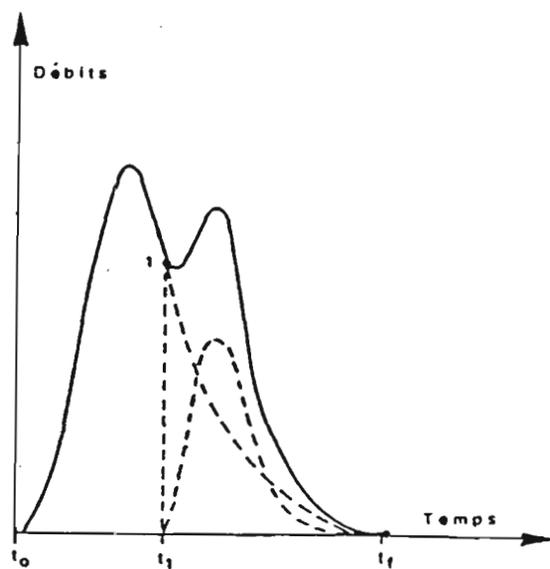


Fig-205 - BASSIN VERSANT DE MOUDA
SCHEMA DE SEPARATION DES HYDROGRAMMES (D'APRES B.THEBE)

Date	VOLUMES OBSERVES (m ³ s)		VOLUMES CALCULES (m ³ s)	
	Hydrogr. n°1 (S1 - SVI)	Hydrogr. n°2 (SII)	Hydrogr. n°1 (S1 - SVI)	Hydrogr. n°2 (S II)
04.05.85	38.1	9.6	39.3	13.3
14.06.85	15.5	4.2	12.7	4.3
10.07.85	24.3	4.7	20.2	7.5
14.07.85	31.2	6.9	29.0	9.9
17.07.85	39.6	9.8	32.8	11.9
21.07.85	29.5	12.1	22.7	6.7
25.07.85	27.3	3.3	15.9	3.1
14.08.85	38.4	8.3	21.1	4.3

Fig-206 - BASSIN VERSANT DE MOUDA - BASSIN 2 -
COMPARAISON HYDROGRAMMES OBSERVES ET CALCULES (D'APRES B.THEBE)

CARACTERISTIQUES		CRUE ANNUELLE	CRUE DECENNALE
Pluio-métrie	mm	65.0	105.
volumé ruisselé	m ³	136.	236.
lame ruisselée	mm	45.5	78.7
coeff. ruissellement	%	70.0	75.0
débit max. ruisselé	l/s	75.8	115.
débit moy. ruisselé	l/s	25.3	33.0

Fig-207 - BASSIN VERSANT DE MOUDA - BASSIN 2 -
CRUES EXCEPTIONNELLES (D'APRES B.THEBE)

du Périodes au	01-02 08-04	09-04 09-06	10-06 30-06	01-07 31-07	01-08 31-08	01-09 01-10	02-10 04-11	05-11 06-12
Pluviométrie (mm)	0 0	80 5	117	346	238	141	0 0	0 0
Lame écoulée (mm)	0 0	29.5	70.2	215	131	48.0	0.0	0.0
Δ stock (mm)	-2.9	+11.2	+14.1	+19.8	+11.5	-9.0	-34.2	-3.2
Étr (mm)	2.9	39.8	32.7	111.2	95.5	102	34.2	3.2
Étp (mm)	484	337	91.3	125	116	132	156	185

Bilan hydrique 1985

P : Pluviométrie (mm)
 Lr : lame ruisselée (mm)
 Kr : coefficient de ruissellement (%)
 De : déficit d'écoulement = P-Lr (mm)

Période	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	De (mm)
1 MAI	104.0	29.5	41	42.5
9 JUIN	50.6	10.5	35	33.1
8 JUILLET	244.0	132	54	112.0
4 AOÛT	154.0	70.8	46	83.2
SEPTEMBRE	71.5	24.4	34	47.1
1 MAI	78.4	26.5	34	51.9
9 JUIN	119.0	76.3	64	42.7
8 JUILLET	346.0	215	62	131.0
5 AOÛT	238.0	131	55	107.0
SEPTEMBRE	141.0	48.0	34	93.0

Bilan mensuel B.V. 2

Année	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	De (mm)
1984	624	274	44	350
1985	922	497	54	425

Bilan annuel B.V. 2

Fig-208 - BILANS HYDROLOGIQUES DU BASSIN 2 (D'APRES B.THEBE)

P : Pluviométrie moyenne en mm
 Lr : Lame ruisselée en mm
 Kr : Coefficient de ruissellement mensuel en %
 Le : Lame écoulée totale en mm
 Ke : Coefficient d'écoulement en %
 De : Déficit d'écoulement en %

Date	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	Le (mm)	Ke (%)	De (mm)
1 Mai	109	12.4	11.4	14.8	13.6	94.2
9 Juin	54.1	(0.60)	(1.10)	(0.72)	(1.3)	(52.8)
8 Juillet	288	(50.1)	(17.4)	(55.2)	(19.2)	(233)
4 Août	128	22.2	17.3	26.2	13.5	115
Sept.	81.7	6.72	8.2	9.61	11.8	72.1
1 Mai	93	4.22	4.5	6.95	7.47	86.1
9 Juin	110	15.4	14.0	22.2	20.2	87.8
8 Juillet	311	113	36.3	119	38.3	192
5 Août	289	71.4	24.7	95.0	32.9	194
Sept	111	19.4	17.5	32.9	29.6	78.1

(..): Mois pour lequel le volume de une ou deux crues a été reconstitué

Bilan hydrologique mensuel B.V. 1

Date	P (mm)	Lr (mm)	Kr (%)	Le (mm)	Ke (%)	De (mm)
1984	661	92	14	107	16	554
1985	914	223	24	276	30	638

Bilan hydrologique annuel B.V. 1

Fig-209 - BILANS HYDROLOGIQUES DU BASSIN 1 (D'APRES B.THEBE)

Le bilan hydrologique est donné dans les tableaux de la figure 209.

Le transfert d'échelle de la parcelle au bassin a été fait en utilisant la méthode de transposition communément admise par les utilisateurs du mini-simulateur de pluie :

- détermination d'une fonction de production du bassin, prise égale à la somme pondérée des fonctions de production de chaque unité cartographique, représentée par un site de simulation :

$$L_b = a \cdot L_1 + b \cdot L_2 + \dots + x \cdot L_n$$

(a, b, ... x représentant les fractions de superficies occupées par les unités 1, 2, ... n).

- estimation d'une fonction de calage qui représente, en particulier, les paramètres non pris en compte sur la parcelle.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- . Pour le bassin 2 (3 000 m²) :

$$L_r = 0,51 \cdot L_1 + 0,28 \cdot L_2 + 0,21 \cdot L_6$$

$$L_{ro} = 1,01 \cdot L_{rc} - 0,185$$

- . Pour le bassin 1 (18,1 km²) :

$$L_r = 0,30 \cdot L_2 + 0,31 \cdot L_3 + 0,11 \cdot L_4 + 0,16 \cdot L_5 + 0,05 \cdot L_6 + 0,07 \cdot L_7$$

$$L_{ro} = 1,16 \cdot L_{rc} - 0,691 \quad (r^2 = 0,96)$$

Les lames L_n ont été déterminées, lors des expérimentations au simulateur de pluie, en fonction de la pluie P_u , de l'indice d'antécédence des pluies IK, du couvert végétal CV (paragraphe 2.5.1.4.) :

$$L_n = a \cdot P + b \cdot IK + c \cdot CV + d$$

5.1.3.4.2. EROSION

- A l'échelle de la *parcelle* de 1 m², seule peut être mesurée la détachabilité du sol, c'est-à-dire son aptitude à être fractionné en particules susceptibles d'être transportées.

Le rôle de la végétation et l'impact du travail de la terre ont été ainsi étudiés : quand on fait varier le couvert de la parcelle de 100 à 0 %, l'érosion augmente dans un rapport de 1 à 200 ; le labour augmente la sensibilité des sols à l'érosion, même s'il représente un frein au ruissellement : des augmentations de 65 % ont pu être mesurées.

- A l'échelle du *champ*, l'action du ruissellement peut jouer pleinement. Les estimations faites sur les placettes recoupent bien les mesures faites à l'exutoire du bassin. Une analyse en régressions multiples a permis de montrer que les deux facteurs explicatifs principaux sont la lame ruisselée et le couvert végétal. L'érosion totale pour l'ensemble de la saison est donnée par la relation :

$$E_t = 7,84 \cdot L_r + 1,66 \cdot CV + 13,6$$

Et est exprimé en kg, L_r la lame ruisselée, en mm et CV le couvert végétal, en %.

avec $R^2 = 0,894$

- A l'échelle du *bassin* de 18,2 km², la pose de jalons dans certaines ravines a permis de constater que le front régressif peut fortement progresser (trois mètres en un an). Pour les matières en suspension, on observe qu'une grande partie de l'érosion annuelle est occasionnée par les plus fortes crues. Cependant, pour une crue donnée, la concentration tend vers une valeur limite que l'on peut considérer comme caractéristique du bassin.

L'équation donnant le poids des matières érodées s'écrit :

$$E_r = 1368 \cdot (1 - e^{-0,053 \cdot L_r})$$

avec E_r exprimé en tonnes et L_r la lame ruisselée, en mm.

5.1.4. MARE D'OURSIS - BURKINA-FASO

5.1.4.1 THEME DE L'ETUDE

L'étude de la Mare d'Oursi entre dans le cadre d'un vaste travail financé, à partir de 1976, par la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique Française, pour organiser la lutte contre l'aridité en milieu tropical. Le volet hydrologique est intéressant, car l'approche BVRE traditionnelle a bénéficié, ici, de nouvelles techniques d'investigation (simulation de pluie, télédétection satellitaire), ainsi que des énormes progrès faits dans le domaine de l'acquisition et du traitement de données.

5.1.4.2. CONTEXTE PHYSICO-CLIMATIQUE

La Mare d'Oursi est située dans le Nord du Burkina-Faso (fig. 210). Son bassin versant d'une superficie de 263 km² repose sur un socle précambrien, barré par un cordon dunaire orienté d'Est en Ouest, typique de la morphologie sahélienne du Niger. Le même phénomène d'endoréisme se retrouve pour les mares voisines.

Quatre grandes familles de paysages peuvent être différenciées : le système dunaire, les thalwegs et dépressions, les reliefs et buttes, les grands glacis.

La région est soumise au climat tropical semi-aride, caractérisé par une seule saison des pluies qui s'étend de mai à octobre, les mois de juillet et août représentant plus de 60 % du total pluviométrique (fig. 211). L'étude, qui a duré de 1976 à 1981, se situe dans un contexte d'années pluviométriques déficitaires (fig. 212).

Les résultats de l'analyse statistique des différentes hauteurs pluviométriques sont regroupés sur la figure 213.

5.1.4.3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS

Les caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau de la figure 214.

5.1.4.4. EQUIPEMENTS DE MESURES ET D'OBSERVATIONS

5.1.4.4.1. EQUIPEMENT PLUVIOMETRIQUE

Le réseau pluviométrique comprenait (fig. 215) :

- 25 pluviomètres journaliers : PJ ;
- 12 pluviographes à augets basculants, à rotation journalière ou à table déroulante (10 mm/h) : PGJ ;
- 4 pluviographes à augets basculants, à rotation hebdomadaire : PGH ;
- 20 pluviomètres totalisateurs, installés à 2 mètres du sol : PT ;
- 5 pluviomètres au sol du type "Snowdon" : PS.

Leur répartition par bassin est donnée figure 216.

Tous les pluviomètres journaliers et les pluviographes étaient relevés le plus tôt possible après chaque averse, c'est-à-dire au retour des opérations de jaugeages en cas d'écoulement, le lendemain matin pour les pluies n'ayant pas ruisselé.

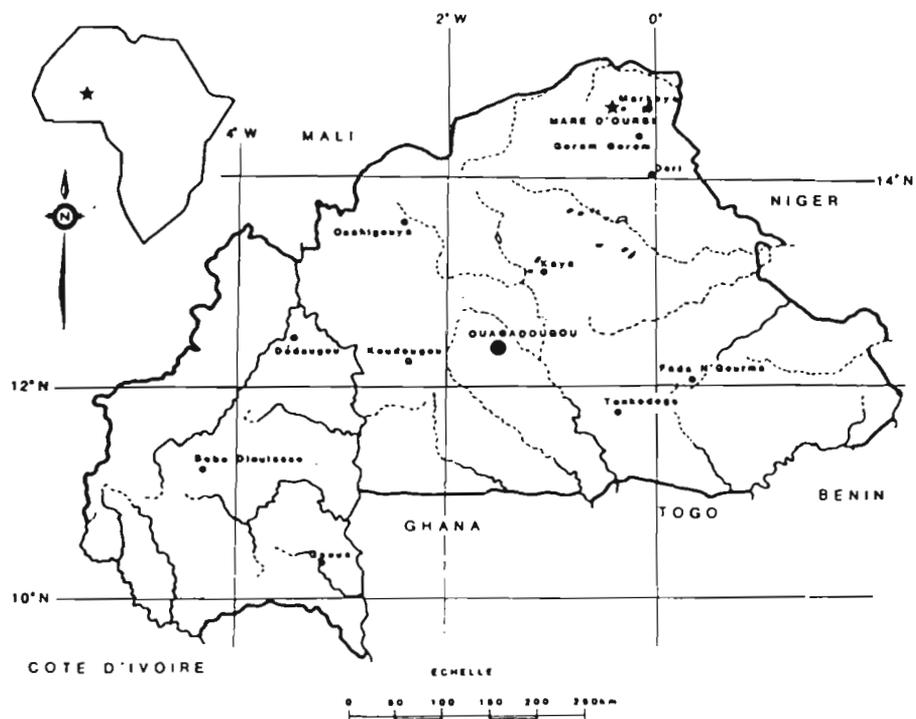


Fig-210 - SITUATION DE LA MARE D'OURSIS (BURKINA - FASO)

Poste	Année	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Gorom-Gorom (26 ans)	462 (100)	0 (0)	0 (0)	1 (0,3)	4 (0,8)	18 (4,0)	68 (15,0)	124 (27,4)	158 (34,9)	67 (14,8)	12 (2,6)	1 (0,1)	0 (0)
Markoye (26 ans)	402 (100)	0 (0)	0 (0)	1 (0,2)	4 (0,9)	12 (3,0)	59 (14,6)	106 (26,3)	143 (35,4)	64 (15,9)	14 (3,5)	0 (0)	0 (0)
Dori (61 ans)	535 (100)	1 (0,2)	1 (0,2)	1 (0,2)	5 (0,9)	25 (4,8)	64 (12,3)	139 (26,8)	177 (34,1)	88 (17,0)	17 (3,3)	1 (0,2)	0 (0)

Fig-211 - PLUVIOMETRIE DE LA REGION DE LA MARE D'OURSIS (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

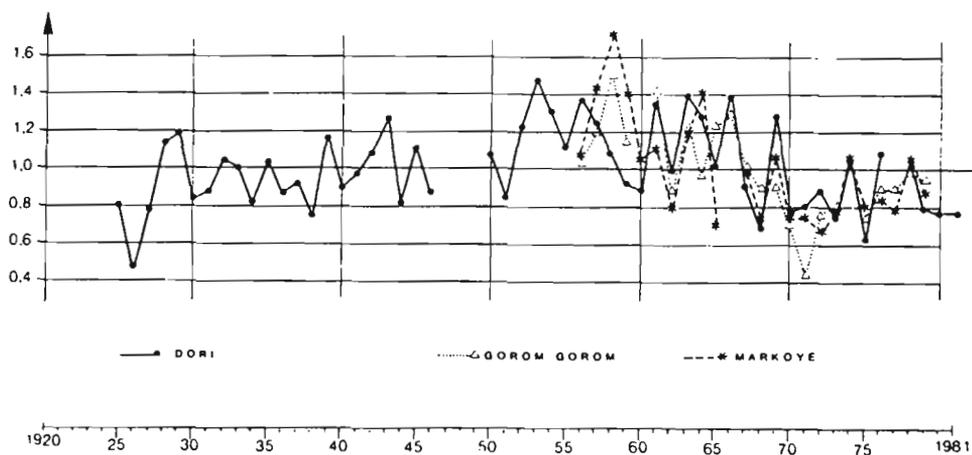
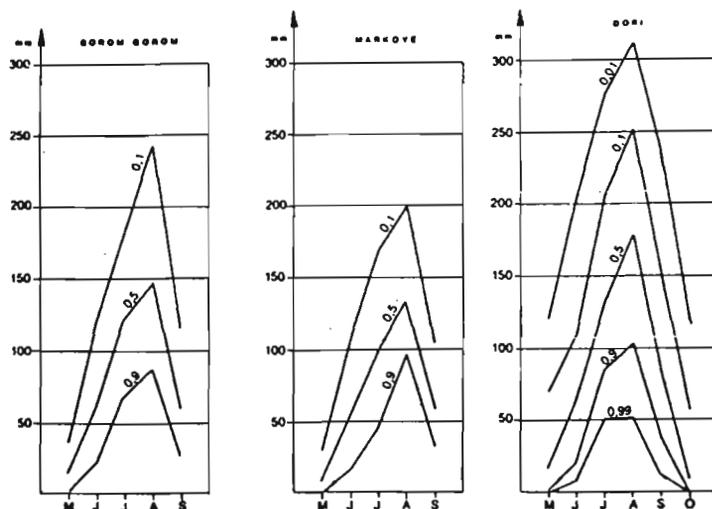


Fig- 212 - COEFFICIENT DE PLUVIOSITE (PLUIE ANNUELLE / PLUIE MOYENNE INTERANNUELLE)
MARE D'OURSIS (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

Période de retour	Décennale sèche	Annuelle	Décennale humide
Dori (53 années)	385	535	684
Gorom-Gorom (22 années)	317	462	606
Markoye (23 années)	288	375	551

PRECIPITATIONS ANNUELLES DE DIVERSES FREQUENCES



HAUTEURS ESTIMEES DES PRECIPITATIONS MENSUELLES POUR DIVERSES FREQUENCES

Nbre de jours de précipitations	> 0,1 mm	> 10,0 mm
Dori	47	18
Gorom-Gorom	34	16
Markoye	33	11

Période de retour	1 an	10 ans
Dori (51 ans)	49,2	79,3
Gorom-Gorom (19 ans)	45,7	73,2
Markoye (24 ans)	42,9	64,0

Période de retour	1 an	10 ans
Dori (9 ans)	47,5	74,2
Gorom-Gorom (8 ans)	40,4	56,9
Markoye (9 ans)	38,8	55,8

PRECIPITATIONS JOURNALIERES

Fig-213 - ANALYSE STATISTIQUE DES DIFFERENTES HAUTEURS PLUVIOMETRIQUES (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)
REGION DE LA MARE D'OURS

Nom du bassin	Mare d'Oursi	Outardes	Polaka	Tchalol	Taima	Jalafanka	Kolel	Gountouré
Période de fonctionnement	1976	1976/1980	76/80	76/80	76/80	1977/1981	76/81	1976/1980
Superficie (km ²)	263	16,5	9,14	9,28	105	0,809	1,05	24,6
Indice de compacité	1,36	1,30	1,19	1,38	1,31	1,24	1,19	1,20
Longueur du rectangle équivalent (km)	32,5	7,00	4,30	5,90	18,2	1,42	1,45	7,20
Altitude maxi (m)	501	448	402	402	414	322	451	345
Altitude exutoire (m)	295	303	339	332	305	310	334	304
Indice global de pente (m/km)	1,5	6,0	8,1	7,6	3,8	7,0	55	3,5
Indice de pente ROCHE	0,054	0,112	0,101	0,096	0,065	0,087	0,278	0,067
cl. de relief	R2	R3	R3	R3	R3/R2	R2	R4	R2

Fig-214 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

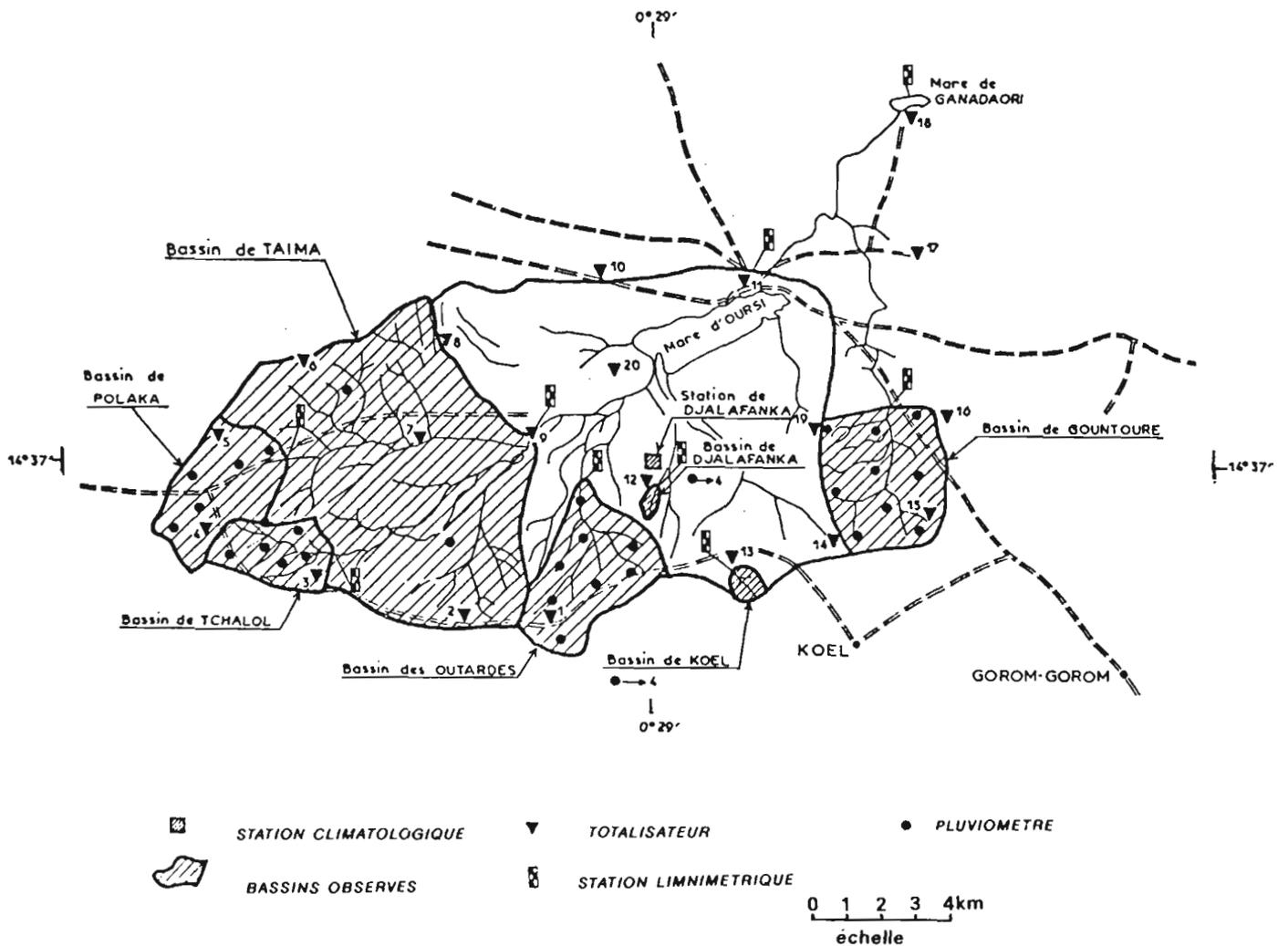


Fig-215 - DISPOSITIF DE MESURES HYDRO-CLIMATOLOGIQUES

BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURSIS

5.1.4.4.2. EQUIPEMENT HYDROMETRIQUE

L'exutoire des sept bassins versants (fig. 215) était contrôlé par une station hydrométrique dont l'équipement standard comprenait :

- 1 limnigraphe à flotteur, installé dans une guérite fixée sur une gaine en PVC (0,30 cm), à rotation journalière pour 6 appareils, hebdomadaire pour la station de Taïma.
- 1 passerelle de jaugeages enjambant le lit mineur, ancrée dans les berges et construite en profilés et tubes métalliques, avec un platelage en planches.
- 1 batterie d'échelles limnimétriques, en un ou plusieurs éléments, couvrant toute l'étendue possible des variations de hauteurs d'eau.

Pour un meilleur contrôle des écoulements, des aménagements de la section ont été réalisés aux stations de Kolel et de Jalafanka.

Des relevés topographiques ont été effectués à plusieurs reprises sur les sections de contrôle (profils en long et profils en travers) pour s'assurer de la stabilité des stations.

Un limnigraphe à flotteur de réduction 1/10 et rotation hebdomadaire (mensuelle en saison sèche), monté sur un échafaudage en tubes métalliques, a été installé sur la Mare d'Oursi.

5.1.4.4.3. EQUIPEMENT CLIMATOLOGIQUE

Installée à Jalafanka, à proximité du campement central, la station climatologique comprenait (fig. 215) :

- 1 abri météorologique équipé d'un psychromètre à ventilation naturelle, d'un évaporomètre Piche, de thermomètres à maximum et minimum, d'enregistreurs de température et d'humidité.
- 1 batterie de géothermomètres pour mesurer les températures dans le sol à 10, 20, 50 et 100 cm de profondeur.
- 1 héliographe de type Campbell.
- 1 anémographe directionnel de marque Lambrecht.
- 1 bac de classe A et 1 bac Colorado enterré de type "Orstom", avec un thermomètre pour mesurer la température de l'eau.
- 1 dispositif complet de mesure des précipitations : 1 pluviomètre à 1 mètre au-dessus du sol et 1 pluviomètre au sol de type "Snowdon".

Les relevés étaient effectués à 6 h, 12 h et 18 h. Les températures maximales et minimales, et les évaporations sur bac et au Piche n'étaient observées que le matin.

5.1.4.5. OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES DE BASE

5.1.4.5.1. PRECIPITATIONS MOYENNES

Les hauteurs pluviométriques annuelles et mensuelles, observées sur chaque bassin, ont été calculées par la méthode de Thiessen, les coefficients de chaque poste ayant été aménagés pour tenir compte des spécificités orogéniques locales. Cette méthode présente le gros avantage de pouvoir être automatisée. Les résultats obtenus sur le bassin des Outardes sont donnés à titre d'exemple (fig. 217).

Bassin	PJ	PG.J	PG.H	PT	PS
Outardes	5	1	2	1	1
Polaka	4	3	0	0	0
Tchalol	5	2	0	1	1
Taima	8	6	0	8	0
Kolel	3	1	0	1	1
Jalafanka	3	1	0	0	0
Gountouré	5	1	2	4	1
Station climatologique	1	1	0	1	1
Total appareils (*)	25	12	4	20 (**)	5 (***)

(*) Certains appareils servent pour plusieurs bassins et le total ne correspond pas à celui de la colonne.

(**) Un totalisateur (n° 91) supplémentaire a été installé en 1980 au sud de la Mare d'Oursi, et certains des totalisateurs (4) n'appartiennent pas aux 7 sous bassins cités ici.

(***) Le pluviomètre au sol de la station climatologique a été installé en 1977 (bague de 5 pouces) et les quatre autres pluviomètres au sol l'ont été en 1979 (bagues de 400 cm²)

Fig-216 - EQUIPEMENT PLUVIOMETRIQUE DE LA MARE D'OURSIS

	jan	fév	mars	avril	mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	déc	an
1976	-	-	-	-	-	(9,3)	110,7	130,9	58,5	48,6	0	0	(358,0)
1977	0	0	0	0	9,5	61,9	118,5	164,4	126,7	0,1	0	0	481,1
1978	0	0	0	17,5	2,8	20,6	138,8	116,7	57,1	0	0	0	353,5
1979	0	0	-	0	17,4	31,8	66,7	96,5	40,4	7,1	0	0	(259,9)
1980	0	0	0	0	3,6	61,5	108,8	126,6	17,2	0	0	0	317,7

L _r - mm K _c - %	avril	mai	juin	juillet	aout	sept	oct	total annuel
76 L _r K _c	-	-	-	25,9	26,5	8,8	3,8	65,0
	-	-	-	23,4	20,2	15,0	7,8	18,2
77	0 0	0 0	1,1 1,7	18,0 15,2	35,1 21,3	52,7 41,6	0 0	106,9 22,2
78	0 0	0 0	0 0	26,8 19,3	32,5 27,8	3,7 6,5	0 0	63,0 17,8
79	0 0	0,8 4,6	2,0 6,3	12,0 18,0	14,6 15,1	8,6 21,3	0 0	38,0 14,6
80	0	0	16,0	28,3	36,8	0	0	81,1

	S km ²	Ke %	Ordre	Lr mm
Taima	105	14,8	5	48,2
Gountouré	24,6	25,0	3	79,5
Outardes	16,5	20,0	4	70,8
Tchalol	9,28	26,5	2	92,8
Polaka	9,14	14,4	7	51,7
Kolel	1,05	12,6	6	44,9
Jalafanka	0,809	36,6	1	138,4

Fig- 217 - PRECIPITATIONS MOYENNES ET ECOULEMENTS SUR LE BASSIN DES OUTARDES.

BILANS INTERANNUELS SUR DIFFERENTS BASSINS VERSANTS DE LA MARE D'OURSIS
(D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

5.1.4.5.2. ECOULEMENTS MOYENS

Comme partout en zone sahélienne, l'essentiel de l'écoulement provient du ruissellement pendant la crue et l'immédiate après-crue. Les tableaux de la figure 217 regroupent les résultats obtenus sur la station des Outardes, ainsi que les moyennes interannuelles des lames écoulées et des coefficients d'écoulement annuels obtenus sur les différents bassins.

5.1.4.5.3. BILAN HYDROLOGIQUE DE LA MARE D'OURSIS

L'hydrologie de la Mare d'Oursi est typique de cette zone climatique sahélienne, dans laquelle l'estimation des termes du bilan hydrique est toujours délicate :

- Apports directs par ruissellement en nappe.
- Apports directs par les précipitations tombant sur la mare ou à proximité (ruissellement voisin de 1).
- Pertes par évaporation ne pouvant être mesurées in situ d'une manière très fiable, particulièrement en saison des pluies. L'utilisation de la formule de Penman, sous réserve de certaines adaptations, est alors préférable.
- Pertes par infiltration, d'autant plus importantes que le niveau d'eau est élevé, très difficiles à apprécier.

L'hypsométrie de la mare a pu être établie grâce à des nivellements topographiques, effectués lors de son assèchement complet (fig. 218). Les résultats ont été confirmés par un travail de télédétection, réalisé à partir de six images Landsat correspondant à six niveaux d'eau différents.

Les termes de bilan sont regroupés dans le tableau de la figure 219.

5.1.4.6. ANALYSE DU RUISSELLEMENT

L'analyse des crues a tout d'abord été menée d'une manière classique, en établissant, par bassin, un tableau des caractéristiques des différents événements : pluie moyenne de l'averse P_m calculée par la méthode de Thiessen, intensité maximale I_{mx} enregistrée en 5 mn sur le pluviographe du bassin qui a donné le plus fort résultat, temps de montée t_m , temps de base t_b , débit maximal Q_{mx} , volume ruisselé V_r , lame ruisselée L_r , coefficient de ruissellement K_r , hauteur de pluie tombée avec une intensité supérieure à 20 mm/h P_{20} (lorsqu'il y a deux pluviographes : $P_{20} = (0.5) \cdot (P_{20_1} \cdot P_m / P_1 + P_{20_2} \cdot P_m / P_2)$, indices des précipitations antérieures $IK = (IK_{n-1} + P_{n-1}) \cdot e^{-0.5 \cdot t_a}$ et $IV_n = (IV_{n-1} + P_{n-1}) \cdot e^{-0.05 \cdot t_a}$ (t_a étant le temps, en jours, séparant la fin de l'averse de rang $n-1$ et de hauteur P_{n-1} du début de l'averse de rang n).

L'analyse des facteurs du ruissellement a été faite sur les bassins de superficie suffisamment faible pour présenter une certaine homogénéité. La lame ruisselée L_r est prise comme variable à expliquer, les autres variables : P_m , P_{20} , I_{mx} , IK (état d'humectation) et IV (état de la végétation), comme variables explicatives, sans priorité particulière. Plusieurs méthodes d'analyse statistique descriptive (analyse en composantes principales, agrégation sur des centres variables, corrélation multilinéaire et analyse des coefficients de piste) permettent de dégager, pour chacun des bassins, les facteurs conditionnels principaux :

- Outardes : P_{20} et IK .
- Polaka : P_m et I_{mx} .
- Tchalol, peu perméable : P_m .
- Jalafanka, bassin de glacis : P_{20} et P_m .
- Kolel : P_{20} .
- Gountouré, peu perméable de glacis : P_m , IK .

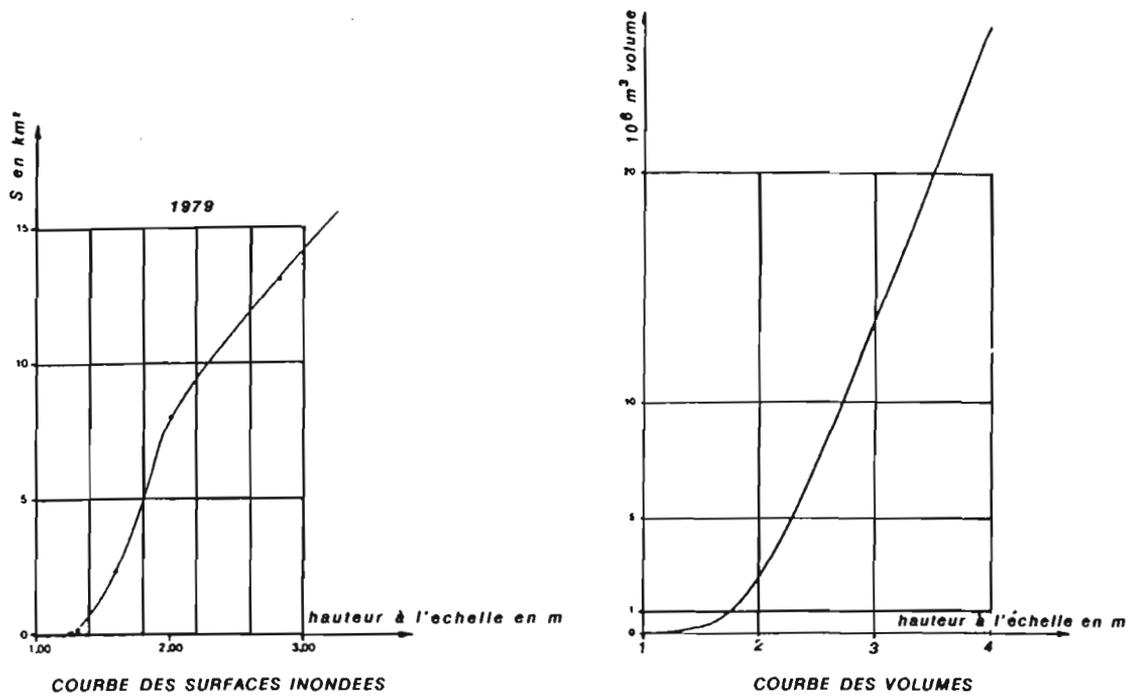


Fig-218 - HYPSONOMETRIE DE LA MARE D'OURSIS (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

	Ecoulements mensuels x 10 ⁶ m ³						Ecoulement annuel	Lr mm	Pm mm	P Jalafanka mm	Ke %	Kc %
	mai	juin	juil	aout	sept	oct						
1976	9,7	0	5,7	6,6	2,9	1,6	26,5	101	(400)	(456)	25.2	22.1
1977	0	1,3	6,1	9,2	9,4	0	26,0	98,9	424	481	23.2	22.1
1978	0	0	7,3	6,4	1,6	0	15,3	58,2	358	380	16.3	15.3
1979	0	0	4,2	3,7	2,9	0	10,8	41,1	322	373	13.0	11.0
1980	0	1,3	7,9	6,4	1,5	0	17,1	65,0	308	372	21.0	17.5
1981	0	4,0	5,7	8,7	1,2	0	19,6	74,5	337	379	22.1	19.7
1982	0	2,8	1,1	11,0	4,5	0	19,4	73,8	-	382	-	19.3
1983	0	0	0	4,6	2,7	0	7,3	27,8	-	204	-	13.6

Fig-219 - APPORTS, LAMES RUISSELEES ET COEFFICIENTS D'ECOULEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURSIS (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

Outardes	$Lr = 0,00436.Pm^{2,163}$, r	= 0,697	(55 valeurs)
Polaka	$Lr = 0,0109.Pm^{1,840}$, r	= 0,774	(61 valeurs)
Tchalol	$Lr = 0,0253.Pm^{1,788}$, r	= 0,692	(65 valeurs)
Taima	$Lr = 0,00798.Pm^{1,955}$, r	= 0,569	(53 valeurs)
Jalafanka	$Lr = 0,0177.Pm^{1,275}$, r	= 0,853	(52 valeurs)
Kolel	$Lr = 0,0266.Pm^{1,511}$, r	= 0,663	(53 valeurs)
Gountouré	$Lr = 0,00496.Pm^{2,248}$, r	= 0,872	(48 valeurs)

avec Pm et Lr exprimés en mm.

Fig-220 - RELATIONS : LAME RUISSELEE - PLUIE MOYENNE - (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

Le résidu non expliqué est de l'ordre de 30 %, sauf pour Gountouré où le résultat est bien meilleur.

D'une manière plus conventionnelle, une courbe de fonction puissance a été ajustée sur les couples : P/Lr , exprimés en mm (fig. 220). Elle caractérise le comportement moyen d'un bassin, avec en particulier un IK modeste.

La forme des crues a été étudiée sur chaque bassin (fig. 221 et 222) en définissant un hydrogramme standard, obtenu à partir des événements qui présentaient des tendances unitaires, c'est-à-dire des crues isolées à une pointe, provoquées par des averses à intensité régulière et de durée suffisamment courte (en théorie la durée de la pluie doit être inférieure au temps de concentration du bassin).

Pour les fortes crues, un hydrogramme moyen a été défini comme la moyenne, à chaque instant, des hydrogrammes obtenus après centrage du maximum de la crue à l'instant 0 et réduction des débits en coordonnées adimensionnelles - Q/Q_{mx} - (fig. 223). Une régression linéaire a pu être établie entre la lame ruisselée et le débit maximal de la crue, pour des pluies supérieures à 10 mm (fig. 224).

L'estimation de la crue décennale a été faite à partir d'un modèle global qui utilise comme données d'entrée les observations pluviométriques journalières d'un poste de référence (poste de Gorom-Gorom), considérant qu'en zone sahélienne il est relativement rare que plusieurs averses surviennent dans la même journée. La pluie ponctuelle de fréquence décennale a été corrigée par un coefficient d'abattement, calculé à l'aide de la formule de Vuillaume (paragraphe 3.1.5.3.3. - 328). Les conditions moyennes de ruissellement sur chacun des bassins ont été définies comme étant celles des équations du type $Lr = a \cdot Pm^b$ (fig. 220).

Les résultats sont regroupés dans le tableau de la figure 225.

5.1.4.7. MODELISATION

La modélisation du ruissellement concerne, d'une part, les crues à un pas de temps très court du bassin de Polaka et, d'autre part, le remplissage de la Mare d'Oursi.

Le modèle à discrétisation spatiale, dit modèle couplé, mis au point par l'Orstom et l'Ecole des Mines de Paris (1111), a été complété par l'introduction de deux techniques :

- la simulation de pluie, qui permet de calculer de nouvelles fonctions de production à partir des courbes caractéristiques de l'hydrodynamique des sols établies sur parcelles de 1 m^2 ;
- la télédétection satellitaire, qui permet de définir automatiquement, à partir du traitement numérique d'une image radiométrique, les caractères physiographiques de chacune des mailles du modèle.

Le calage a porté principalement sur les paramètres de la fonction de production. Les graphiques de la fig. 226 donnent quelques exemples de résultats obtenus pour les crues du bassin de Polaka.

Le modèle MODLAC, qui prend en compte les retenues naturelles ou artificielles, a été ensuite utilisé. Le passage du modèle couplé au modèle avec retenues est aisé puisque les modules de calcul des fonctions de production sont identiques. Des simulations de la limnimétrie de la Mare d'Oursi ont été réalisées en partant d'une cote initiale de 2,88 mètres qui est celle du 1er janvier 1978 (fig. 227).

Les deux modèles, couplé et MODLAC, ont été utilisés pour simuler différentes hypothèses de pluviométrie : crue décennale pour le premier ; hypothèses extrêmement humide, moyenne et extrêmement sèche pour le second.

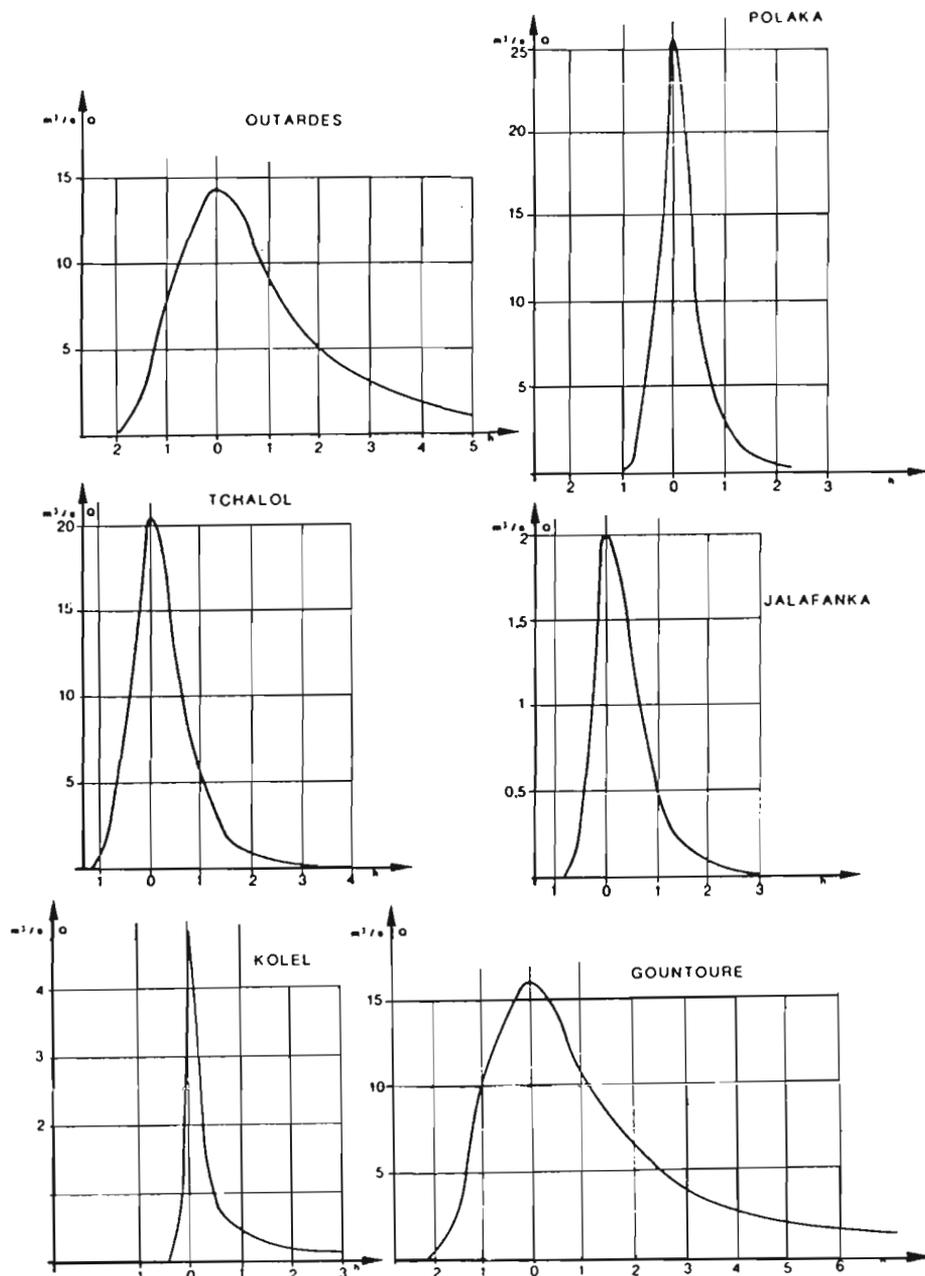


Fig-221 - HYDROGRAMMES STANDARDS POUR UNE LAME RUISSELEE DE 10 mm.
BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURS

bassins	tm (mn)	tb (mn)	Qmx (m³.s⁻¹)	Qmx/S (l.s⁻¹.km²)	Qmy (m³.s⁻¹)	$\frac{Qmx}{Qmy}$	Hr mm
Outardes	75	300	17,5	1055	8,35	2,1	9,0
Polaka	50	120	32,2	3550	11,35	2,8	8,2
Tchalol	50	150	18,6	2000	9,32	2,0	8,72
Jalafanka	32	200	2,78	3415	0,77	3,6	9,85
Kolel	13	58	8,85	8350	2,61	3,37	9,0
Gountouré	100	450	25,6	1083	8,55	3,0	9,4

Fig-222 - CARACTERISTIQUES CORRIGES DES HYDROGRAMMES STANDARDS

(D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

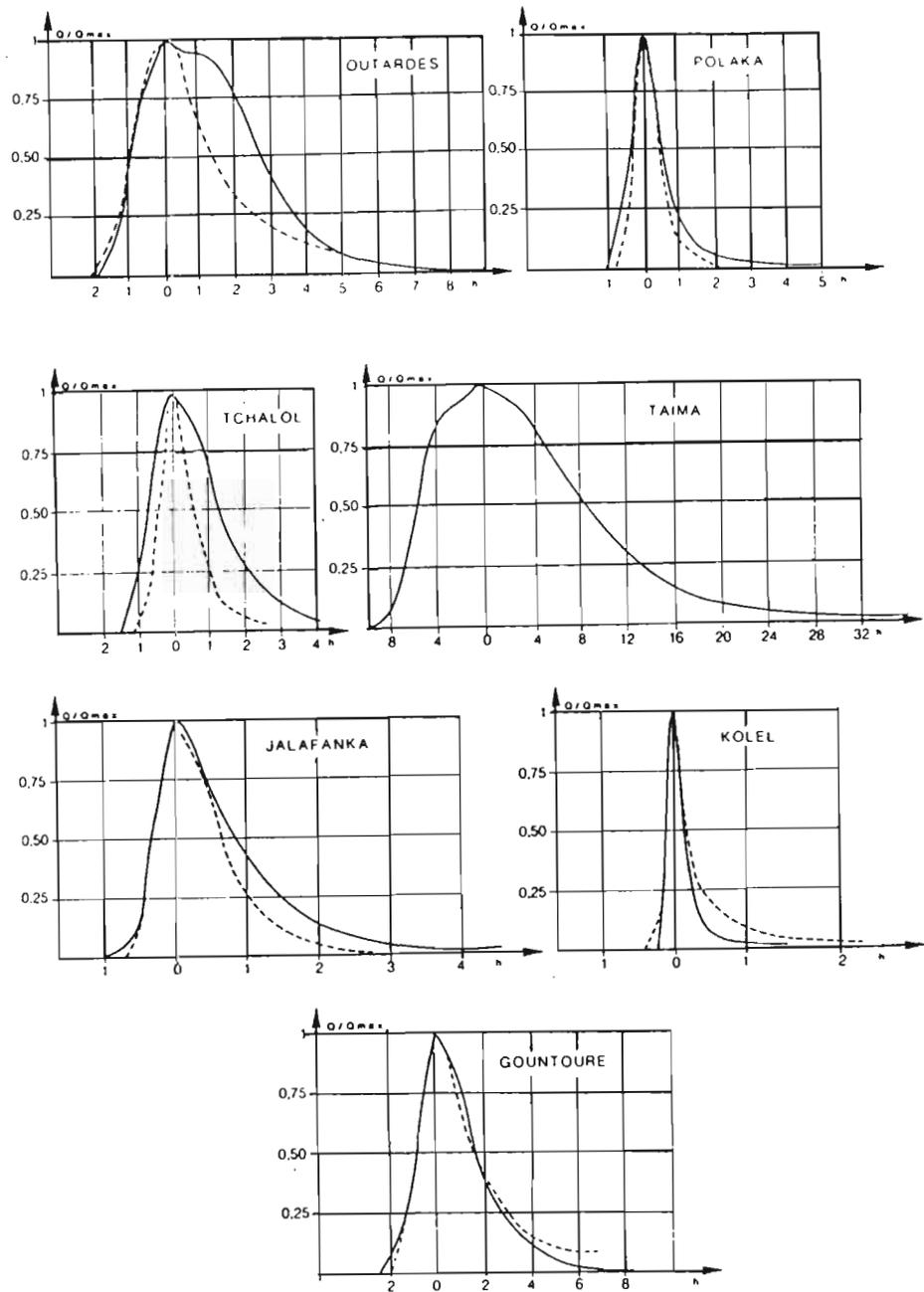


Fig-223 - HYDROGRAMMES MOYENS DES CINQ PLUS FORTES CRUES OBSERVEES
(D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

bassin	équation de régression	coeff. de corrélation
Outardes	$Q_{mx} = 1,10 \times Lr + 1,42$	$r = 0,96$
Polaka	$Q_{mx} = 1,98 \times Lr + 1,17$	$r = 0,92$
Tchalol	$Q_{mx} = 0,947 \times Lr + 1,98$	$r = 0,93$
Taima	$Q_{mx} = 1,82 \times Lr + 3,56$	$r = 0,92$
Jalafanka	$Q_{mx} = 1,61 \times Lr + 0,01$	$r = 0,89$
Kolel	$Q_{mx} = 1,00 \times Lr - 1,44$	$r = 0,96$
Gountouré	$Q_{mx} = 2,25 \times Lr - 0,77$	$r = 0,97$

Fig-224 - CORRELATIONS : DEBIT MAXIMAL - LAME RUISSELEE
(D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURSI

	Outardes	Polaka	Tchalol	Taima	Jalafanka	Kolei	Gountouré
Pm10 (mm)	60,8	63,0	63,0	51,3	73,2	73,2	58,6
Lr10 (mm)	35,0	22,2	41,7	36,0	42,1	19,3	40,1
Kr10 (%)	57,5	35,3 (33)	66,2	36,0	57,5 (62)	26,2	68,4
Qmx1 (m ³ /s)	39,9	45,1	41,5	69,1	6,79	17,9	89,5
Qmx2 (m ³ /s)	41,0	45,7	45,8	66,9	6,57	19,4	93,8
DQmx (%)	2,8	1,3	9,4	3,2	3,2	8,4	4,8
Qmx3 (m ³ /s)	40	46	44	68	6,7	19	92
Qs10 (l/s/km ²)	2420	5030	4740	648	8280	18100	3740

- avec Pm10 : hauteur de l'averse décennale corrigée par l'abattement,
Lr10 : lame ruisselée calculée par la fonction puissance établie sur le bassin,
Kr10 : coefficient de ruissellement décennal; les valeurs entre parenthèses sont celles obtenues avec le simulateur de pluie,
Qmx1 : débit maximal calculé à partir de la régression $Q_{mx} = f(Lr)$,
Qmx2 : débit maximal calculé à partir du hyétogramme moyen de forte crue,
DQmx : écart relatif entre Qmx1 et Qmx2,
Qmx3 : moyenne entre Qmx1 et Qmx2,
Qs10 : débit spécifique de pointe calculé à partir de Qmx3.

Fig-225 - CARACTERISTIQUES DES CRUES DECENNALES (D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

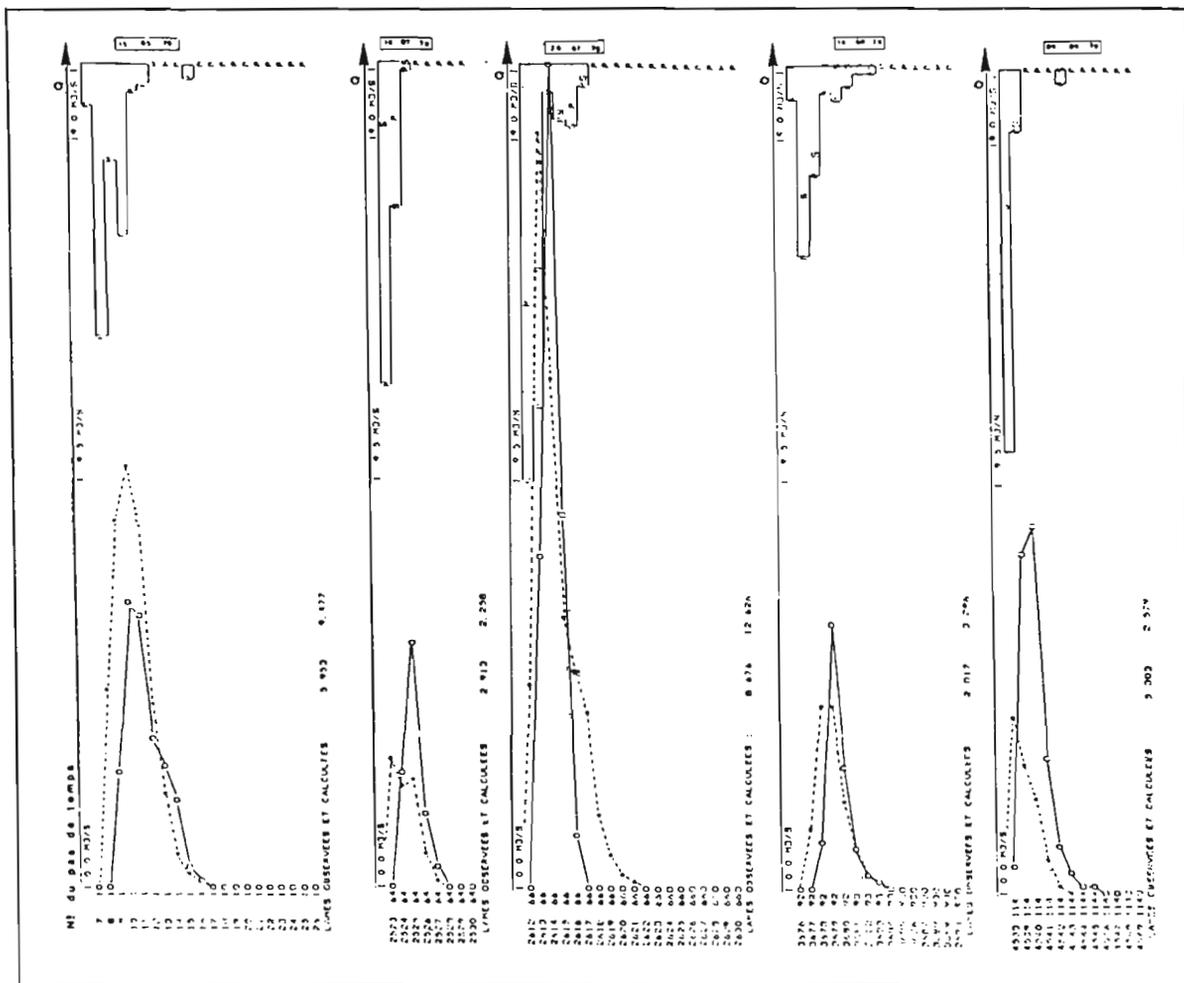


Fig-226 - POLAKA : CRUES OBSERVEES ET MODELISEES (1979)

(D'APRES P.CHEVALLIER ET AL.)

BASSIN VERSANT DE LA MARE D'OURS

NIVEAUX DE LA MARE D'OURSIS (1978 - 1980)

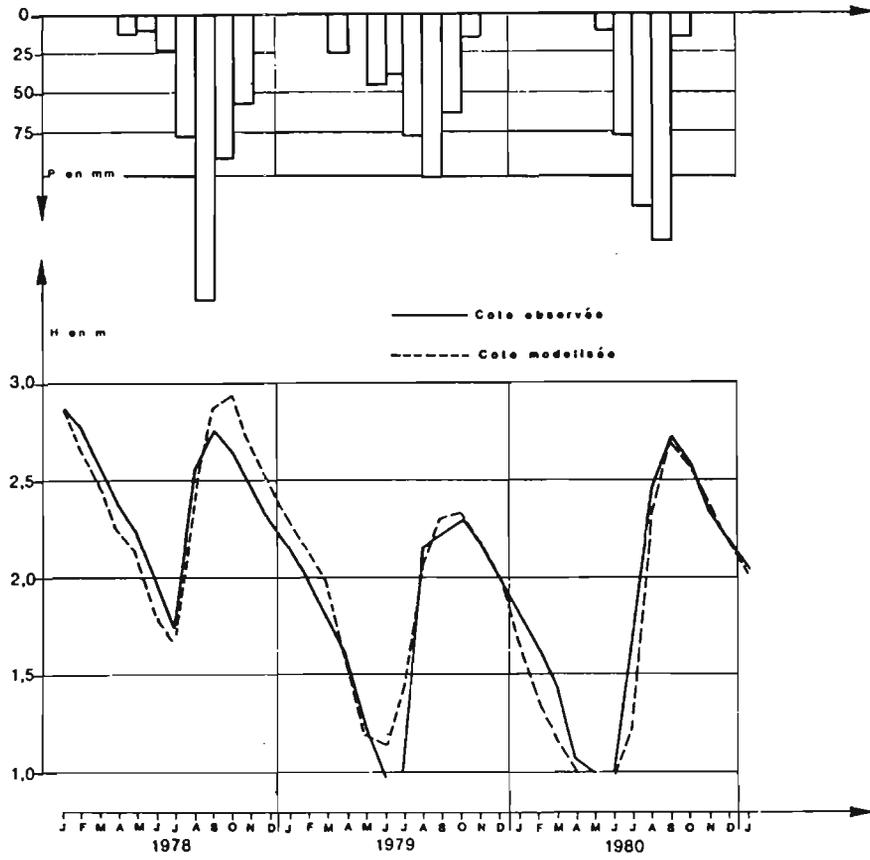


Fig-227 - COMPARAISON DE L'OBSERVATION ET DU RESULTAT DE LA MODELISATION
(D'APRES P.CHEVALLIER et AL.)

5.1.5. BASSINS DE SAKASSOU - COTE D'IVOIRE

5.1.5.1. THEME DE L'ETUDE

L'étude du bassin de Sakassou avait pour objectif d'aboutir à une meilleure compréhension des phénomènes hydrologiques observés dans la zone de contact forêt-savane. Les observations et les mesures se sont déroulées durant cinq campagnes ininterrompues, de 1972 à 1977.

5.1.5.2. CONTEXTE PHYSICO-CLIMATIQUE

Situé dans le Centre-Sud de la Côte-d'Ivoire par 6°33 N et 4°49 W (barycentre), le bassin de Sakassou (26,6 km²) est caractérisé par un sous-sol constitué de formations cristallines (granites principalement) dont l'altération est masquée par une couverture remaniée sur une épaisseur variable, de l'ordre d'un à quelques mètres. La végétation se compose d'une savane arbustive, mais aussi de forêt dense et de forêt ripicole. Le climat est du type équatorial de transition, défini par une saison sèche, de novembre à février-mars, au cours de laquelle peuvent se produire des averses isolées mais importantes, une saison des pluies de mars à juin, un ralentissement des précipitations en août et une deuxième saison des pluies, plus irrégulière, en septembre-octobre.

A la station pluviométrique de référence de Dimbokro, la pluviométrie moyenne annuelle est de 1 204 mm, pour un écart-type de 199 mm. Les hauteurs pluviométriques annuelles et mensuelles de différentes fréquences sont regroupées dans les tableaux de la figure 228.

Les températures moyennes journalières varient peu, et sont rarement inférieures à 25°C. L'humidité moyenne annuelle est de 75 %, le minimum étant atteint en janvier-février (68 %) et le maximum en août (79 %).

La durée moyenne d'insolation annuelle est d'environ 1 900 heures, alors que l'évaporation sur bac est voisine de 1 350 mm (58 % pour la part diurne, 42 % pour la nocturne).

5.1.5.3. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS

Les caractéristiques physiques des différents bassins sont regroupées dans le tableau de la figure 229.

5.1.5.4. EQUIPEMENTS DE MESURES ET D'OBSERVATION

5.1.5.4.1. EQUIPEMENT PLUVIOMETRIQUE

L'équipement pluviométrique était distribué de la façon suivante :

- Bassin Est : 10 pluviomètres, 2 pluviographes à augets basculants et rotation journalière.
- Bassin Ouest : 9 pluviomètres et 2 pluviographes.
- Grand bassin : outre les appareils précédents et ceux de la station climatologique (1 pluviomètre et 1 pluviographe), il comportait 2 pluviographes hebdomadaires et 6 pluviomètres.

5.1.5.4.2. EQUIPEMENT HYDROMETRIQUE

Les exutoires des trois bassins étudiés avait été aménagés :

F	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50	0,80	0,90	0,95	0,98
Hauteur annuelle (mm)	1611	1531	1459	1371	1204	1036	948	877	792

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
Maximum observé (mm)	197,7	137,0	264,4	325,0	323,9	358,8	286,8	191,0	329,0	360,6	180,4	101,1
Quartile supérieur (mm)	28,2	82,3	137,9	179,6	218,1	223,7	140,1	84,8	182,2	160,7	84,1	30,1
Médiane (mm)	10,8	43,6	110,5	137,1	166,3	178,2	86,6	52,2	122,2	123,6	56,9	11,7
Quartile inférieur (mm)	0,0	17,3	89,2	102,5	134,0	142,3	41,3	23,1	85,2	87,9	27,8	2,8
Minimum observé (mm)	0,0	0,0	38,8	38,2	58,6	61,3	3,8	0,4	6,9	16,9	0,8	0,0
Intervalle total de variation (mm)	97,7	137,0	225,6	286,5	265,3	297,5	283,0	190,6	322,1	243,7	179,6	101,1
Intervalle interquartile (mm)	28,2	65,0	48,8	77,1	84,1	81,4	98,9	61,6	97,0	72,8	56,3	27,4
Moyenne (mm)	16,4	49,8	119,6	148,3	173,6	186,6	98,2	62,9	138,8	127,6	60,1	19,4
Ecart-type (mm)	20,0	27,7	48,8	63,5	59,4	67,0	71,8	50,6	78,7	55,5	40,9	22,6
Coefficient de variation	1,222	0,758	0,408	0,428	0,338	0,359	0,731	0,804	0,567	0,435	0,681	1,167
Mode (mm)	-	41,4	77,4	107,2	167,8	164,9	56,0	23,0	115,7	119,2	35,3	-
Coefficient pluviométrique mensuel (σ/μ)	13,6	41,4	99,4	123,4	145,9	152,2	81,6	52,2	115,3	106,0	49,9	16,1

Fig-228 - STATISTIQUE DES PLUIES ANNUELLES ET MENSUELLES A LA STATION

DE REFERENCE DE DIMBOKRO (56ans) (D'APRES A.LAFFORGUE)

Bassin	Grand B.V.	B.V. Est	B.V. Ouest
N° Code recueil	IVO 14	IVO 14 A	IVO 14 B
N° Code mécanographique	09019141	09019142	09019143
Superficie A (km ²)	26,2	0,5525	0,6306
Périmètre P (km)	24,6	3,05	3,0
Indice de compacité k _c	1,33	1,13	1,07
Longueur du rectangle équivalent L	9,33	0,753	0,794
Largeur du rectangle équivalent l	2,64	0,754	0,794
Altitude maximale (m)	143,0	124,1	126,0
Altitude minimale (m) : cote du seuil	67,1	96,57	101,83
Altitude moyenne (m)	107,0	111,6	116,2
Indice de pente de ROCHE I _p	0,083	0,184	0,170
Dénivelée D (m)	48,0	20,0	18,0
Indice global de pente I _g	7,5	26,6	22,7
Dénivelée spécifique D _s	38,4	19,8	18,0
Longueur du thalweg principal L _x (km)	9,5	0,8	0,8
Pente moyenne du cours d'eau principal (%)	0,51	2,50	2,25
Densité de drainage D _d	2,21	2,30	2,03
Rapport de confluence R _c	3,16	-	-
Rapport de longueur R _l	2,51	-	-

Fig-229 - CARACTERISTIQUES TOPOGRAPHIQUES ET MORPHOLOGIQUES DES BASSINS DE SAKASSOU

(D'APRES A.LAFFORGUE)

- **Bassin Est** (fig. 51) : un seuil de contrôle était situé à l'extrémité aval d'un canal en ciment lissé, de 11 mètres de long sur 1,5 m² de section. Il était constitué par un déversoir en mince paroi, métallique, horizontal, de 117 cm de largeur, échancré en son centre par un V à 90° de 15 cm de hauteur. Un limnigraphe à flotteur, à durée de révolution de 32 heures et réduction de 1/5, était logé à la partie supérieure d'un puits communiquant avec le canal à 5 mètres en amont du déversoir.

Un dispositif de jaugeages par point indépendants, installé sur une passerelle au droit de l'échelle scellée dans le même puits que le limnigraphe, permettait le repérage très précis de la position d'un micro-moulinet dans la section de jaugeages.

Un récipient jaugeur parallélépipédique, d'une contenance de 108,8 litres, facilitait la mesure des débits inférieurs à 7 ou 8 l/s.

- **Bassin Ouest** : il était équipé de la même manière que le bassin Est.
- **Grand bassin** : la station hydrométrique était située à une trentaine de mètres en amont d'une succession de seuils rocheux. Elle se composait d'une batterie d'échelles 0 - 4 mètres, rattachée au nivellement général de la Côte-d'Ivoire, et d'un limnigraphe à flotteur de révolution hebdomadaire et de réduction 1/5. Les berges étaient occupées par une galerie forestière qui provoquait l'accumulation de corps flottants et entraînait des détarages. Un dispositif de jaugeages par verticales indépendantes avait été mis en place sur une passerelle de 20 mètres de portée (fig. 230). Enfin, sur chaque rive, des murettes en maçonnerie avaient été construites parallèlement aux berges, afin de canaliser d'éventuels débordements au cours de crues très importantes.

5.1.5.4.3. EQUIPEMENT CLIMATOLOGIQUE

La station climatologique, installée au centre du Grand bassin, entre les petits bassins Est et Ouest, disposait des équipements classiques déjà décrits pour d'autres BVRE (Sanguéré, Mare d'Oursi).

5.1.5.5. OBSERVATIONS HYDROLOGIQUES DE BASE

5.1.5.5.1. OBSERVATIONS PLUVIOMETRIQUES

Les hauteurs pluviométriques moyennes ont été calculées par la méthode de Thiessen.

Le graphique de la figure 231 donne les répartitions mensuelles de chacune des années d'observations en les comparant aux moyennes calculées au poste de référence.

L'étude des pluies moyennes journalières sur les petits bassins montre que le nombre de jours de pluies supérieures à 10 mm (fig. 232) rend mieux compte de la pluviométrie de l'année (fig. 231) que le nombre total de jours de pluies.

Le critère de séparation des averses est basé sur une durée minimale sans pluie ou avec une intensité très faible : ont été considérées comme distinctes, les averses séparées par des épisodes de durée supérieure à 60 minutes et pendant lesquels l'intensité n'a pas dépassée 2 mm/h. Une étude de la probabilité d'apparition d'une averse, à une heure donnée d'un jour de pluie, a été faite pour les averses supérieures à 2 mm (fig. 233). Elle est maximum entre 18 H et 20 H et minimum entre 6 H et 12 H. Il a été également montré que la probabilité d'avoir plus d'une averse entre deux relevés quotidiens croît avec leur hauteur (fig. 234), ce qui a amené à rechercher une corrélation entre la hauteur de l'averse la plus forte de la journée et la hauteur de la précipitation journalière correspondante. Il apparaît que la part de cette averse a tendance à croître avec la hauteur journalière (fig. 235).

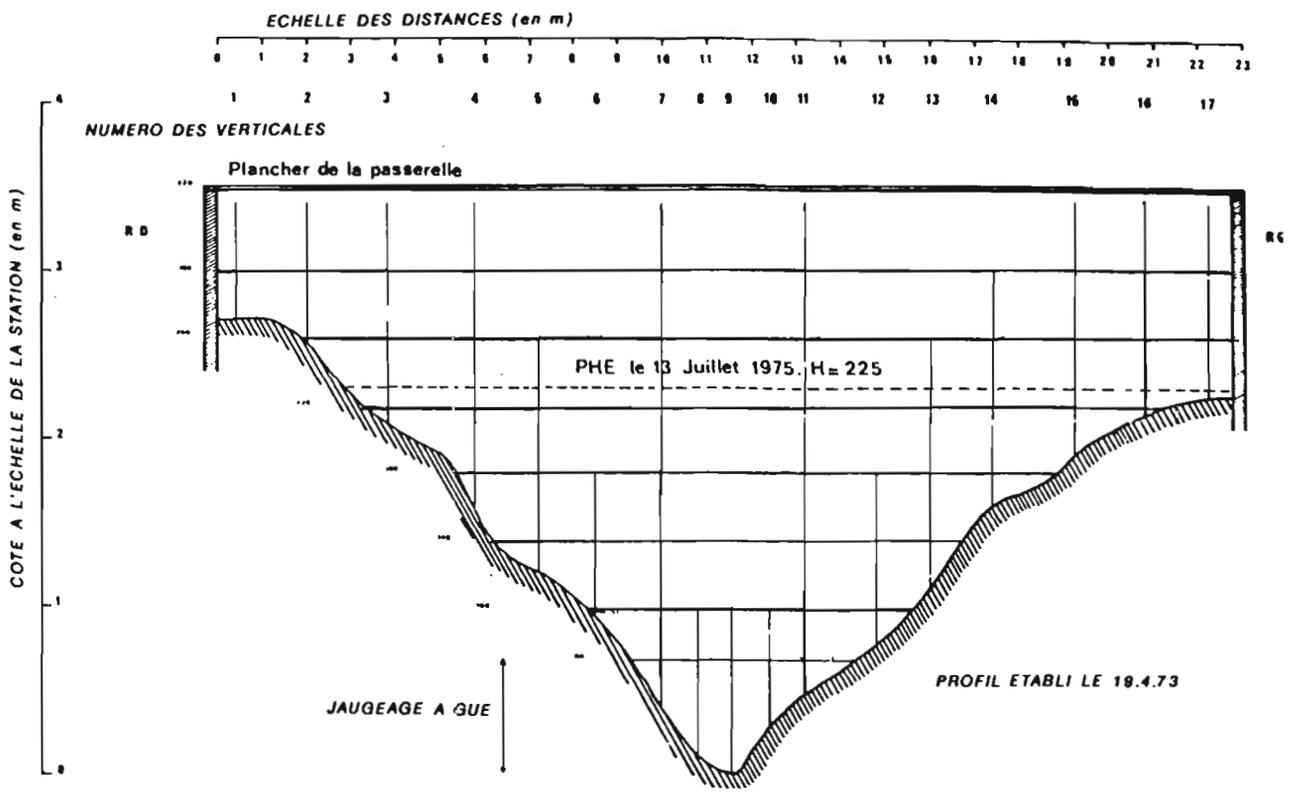


Fig-230 - STATION AVAL DE SAKASSOU : PROFIL EN TRAVERS AU DROIT DE LA PASSERELLE DE JAUGEAGE (D'APRES A.LAFFORGUE)

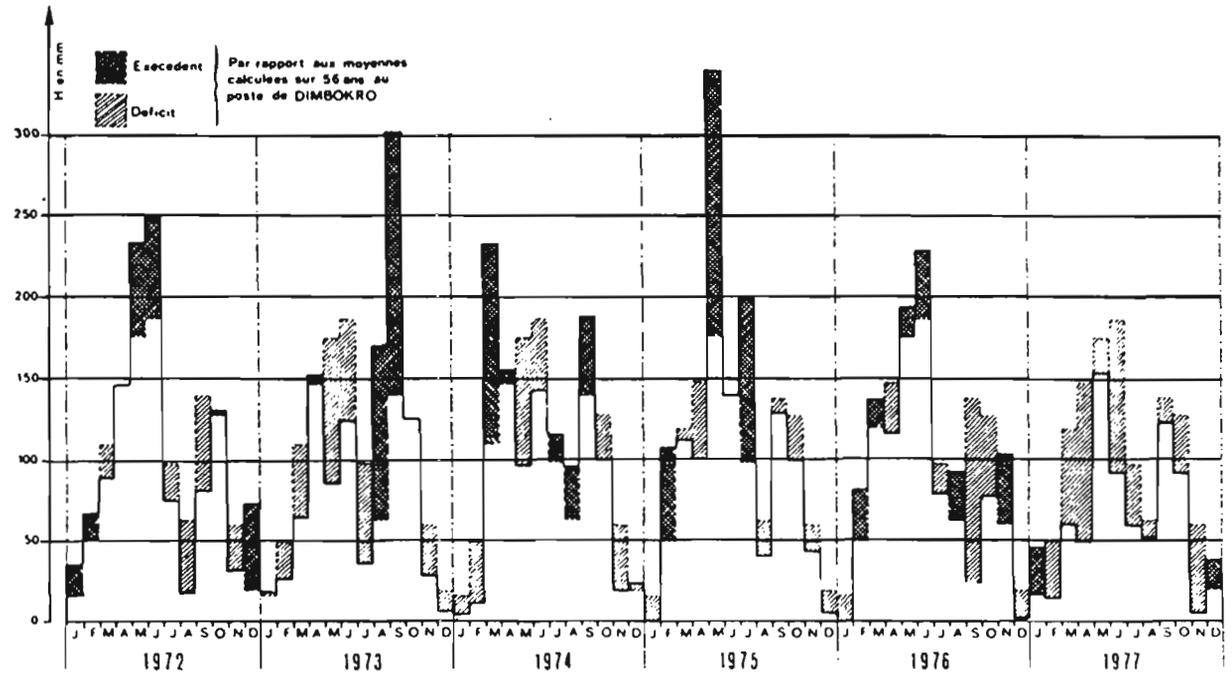


Fig-231 - DIAGRAMME DES PLUIES MENSUELLES SUR LE BASSIN DE SAKASSOU (D'APRES A.LAFFORGUE)

Tranches (mm)	1972	1973	1974	1975	1976	1977	Total	Moyenne
0,1 à 10:	71	64	44	47	49	67	342	57
10,1 à 20:	15	22	20	25	9	11	102	17
20,1 à 30:	6	6	9	7	11	7	46	7,7
30,1 à 40:	7	9	2	5	6	2	31	5,2
40,1 à 50:	3	:	3	4	:	1	11	1,8
50,1 à 60:	1	2	4	1	1	2	11	1,8
60,1 à 70:	1	1	1	:	2	:	5	0,8
70,1 à 80:	:	:	:	:	:	:	0	0,0
80,1 à 90:	1	:	:	:	:	:	1	0,2
90,1 à 100:	:	:	:	1	1	:	2	0,3
100,1 à 110:	:	:	:	:	:	:	0	0,0
110,1 à 120:	:	:	:	:	:	:	0	0,0
120,1 à 130:	:	:	:	:	:	:	0	0,0
130,1 à 140:	:	:	:	1	:	:	1	0,2
Total	105	104	83	91	79	90	552	92
> 10 mm	34	40	39	44	30	23	210	35

Fig-232 - CLASSEMENT DES PLUIES JOURNALIERES SUR LE BASSIN/EST DE SAKASSOU
(D'APRES A.LAFFORGUE)

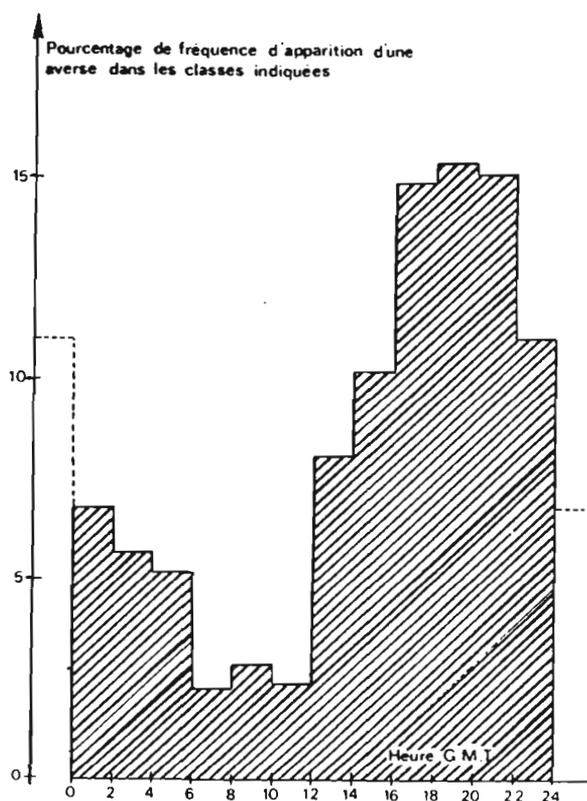


Fig- 233 - REPARTITION DES AVERSES SUPERIEURES A 2 mm AU COURS
DE LA JOURNEE SUR LES PETITS BASSINS DE SAKASSOU (D'APRES A.LAFFORGUE)

BASSIN VERSANT DE SAKASSOU

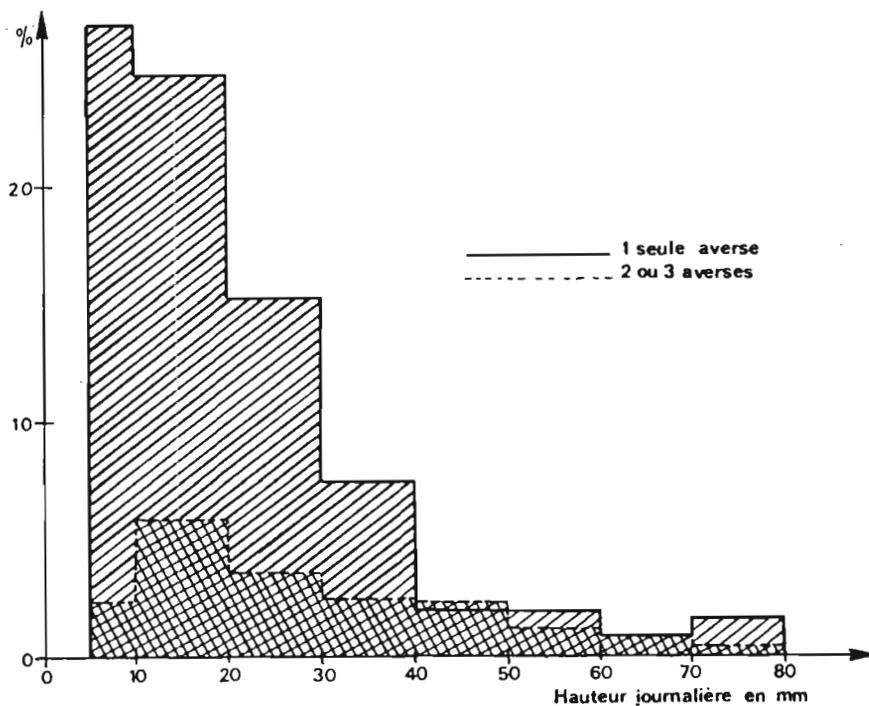


Fig-234 - POURCENTAGE DES FREQUENCES DES AVERSES
EN FONCTION DE LA HAUTEUR JOURNALIERE (D'APRES A.LAFFORGUE)

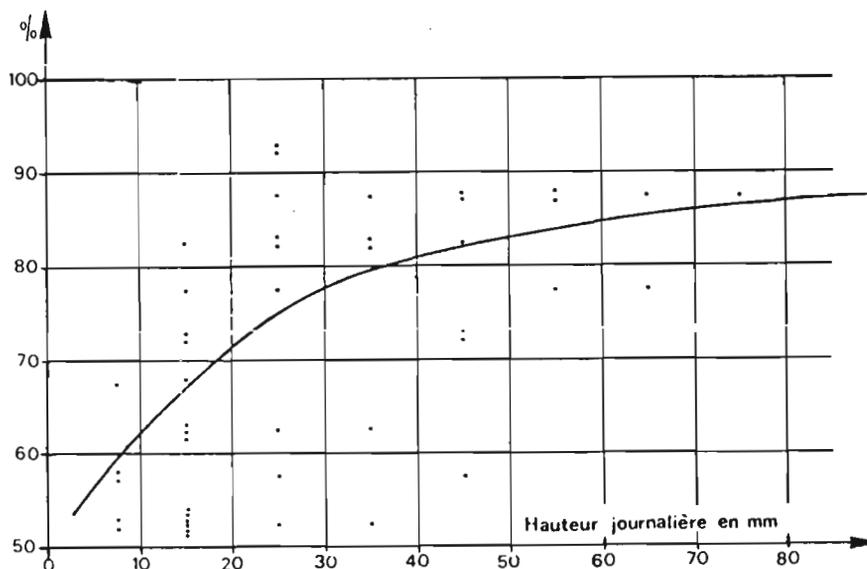


Fig-235 - POURCENTAGE DE HAUTEUR DE L' AVERSE LA PLUS FORTE
PAR RAPPORT A LA HAUTEUR DE PRECIPITATION JOURNALIERE
(D'APRES A.LAFFORGUE)

La pluie utile (ou corps de l'averse) a été définie comme étant la somme des tranches de l'averse dont l'intensité est supérieure à 10 mm/h. Sur le bassin Ouest, la relation entre pluies utiles et pluies moyennes est linéaire :

$$Pu = 0,89 \cdot Pm - 1,5$$

La durée est donnée par l'équation : $tu = 1,03 \cdot Pu + 10$

avec tu en mn et Pu en mm.

L'étude de la plus forte averse de la journée est résumée dans le tableau de la figure 236.

Les averses retenues pour l'étude des intensités devaient être telles que le hyétogramme classé comprenne une intensité supérieure aux valeurs minimales suivantes :

Durée en minutes	5	10	15	30	45	60	90	120	180
Seuil d'intensité (mm/h)	60	54	48	28	21	18	13,4	11	9

Pour chacune des averses sélectionnées, a été établi le hyétogramme des intensités maximales observées en 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 et 120 minutes. Les échantillons correspondant à chaque tranche ont fait l'objet d'un ajustement sur différentes lois de Goodrich (fig. 237). Il a été alors possible de tracer les courbes d'intensité-durée-fréquence et les hyétogrammes classés de fréquence déterminée (décennale par exemple - fig. 238).

5.1.5.5.2. OBSERVATIONS HYDROMETRIQUES

- *Distribution mensuelle des écoulements*

Le tableau de la figure 239 donne, à titre d'exemple, les résultats de l'année 1976. On observe que 40 à 70 % des écoulements sont concentrés en un seul mois et 60 à 90 %, sur deux mois. De plus, il apparaît que le débit de base ne croît pas régulièrement au cours de la saison des pluies, mais suit d'assez près les variations du débit de ruissellement, les nappes superficielles de versant étant les seules à pouvoir alimenter les marigots.

- *Répartition annuelle*

Il semble exister d'assez bonnes relations entre les différents écoulements (écoulement total, écoulement de base et ruissellement) et la pluviométrie annuelle (fig. 240). Si on admet que ces relations peuvent être assimilées à des droites ou des segments de droites, les coefficients d'écoulement K (ou de ruissellement) peuvent s'exprimer, en fonction de la hauteur de pluie annuelle Pm, par des relations homographiques de la forme :

$$K = a \cdot (1 - b / Pm)$$

Il est alors possible d'estimer les valeurs de coefficients auxquelles on peut s'attendre pour une pluviométrie annuelle de fréquence déterminée (fig. 241).

5.1.5.6. ANALYSE DU RUISSELLEMENT

L'étude du ruissellement a été faite sur l'ensemble des crues individualisées lors du traitement informatique des relevés limnigraphiques.

Les relations liant la lame ruisselée à ses facteurs explicatifs (pluie utile, conditions de saturation du sol) ont été établies par la méthode classique des résidus (voir dans les références bibliographiques les BVRE de Boundjouk au Cameroun, ou Korhogo en Côte-d'Ivoire).

Hauteur journalière P_m (mm)	Cas d'une seule averse			Cas de deux averses		
	Fréquence d'apparition	P_u mm	t_u min	Fréquence d'apparition	P_u mm	t_u min
10	90 %	7,5	18	10 %	4,5	14
20	82 %	16,5	27	18 %	11,3	21
30	75 %	25	35	25 %	18,8	29
40	69 %	34	45	31 %	26,9	37
50	63 %	43	54	37 %	35	46
70 (pluie annuelle)	53 %	60,5	72	47 %	51,4	61
90	(48 %)	78,5	91	52 %	68,6	81
115 (pluie décennale)	(42 %)	100	114	58 %	88,0	100

Fig-236 - CARACTERISTIQUES MEDIANES ESTIMEES DE LA PLUS FORTE
AVERSE DE LA JOURNEE (D'APRES A.LAFFORGUE)

Durée de la tranche (minutes)	F	r				
		0,5	0,9	0,95	0,98	0,99
		2 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
5		176	232	257	286	322
10		145	182	197	217	232
15		127	160	174	193	208
30		99	128	141	157	170
45		78	107	121	138	152
60		63	89	101	117	129,5
90		45	64	73	85	94
120		35	50	56	65	72
180		25	36	42	50	56

Fig-237 - INTENSITES MAXIMALES,(en mm/h),POUR DIFFERENTES DUREES
ET DIFFERENTES FREQUENCES F OU RECURRENCES r (D'APRES A.LAFFORGUE)

BASSIN VERSANT DE SAKASSOU

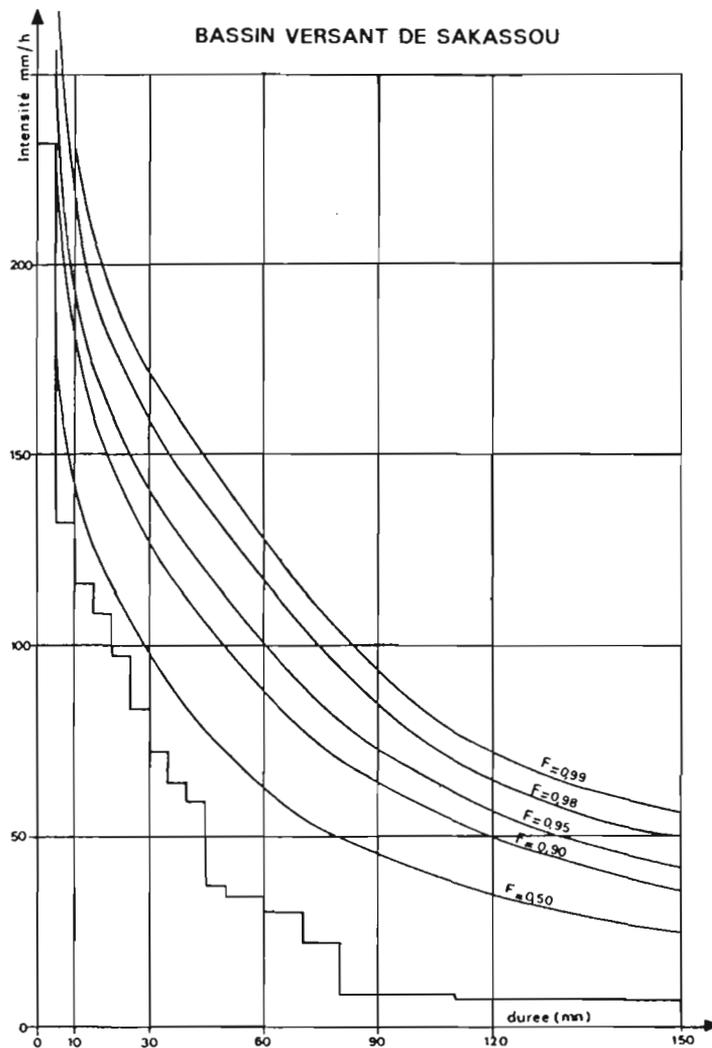


Fig-238 - COURBES : INTENSITE - DUREE - FREQUENCE ET HYETOGRAMME CLASSE DECENNAL (D'APRES A.LAFFORGUE)

GRAND B.V.	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
Precipitations (mm)	0,0	71,9	134,5	108,1	211,6	237,0	76,2	57,8	21,0	67,8	97,5	4,0	1097,2
Debit moyen (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	25	620	255	80	7	2	23	0,1	84 : K_p (%) : Q (l/s/km ²)
Lames écoulées (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	2,55	61,4	26,1	8,2	0,7	0,2	2,25	0,01	101,4 : 9,25 : 3,2
Ruisselement (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	11,3	232	60	11,3	-	-	-	-	26,1 : K_r (%) : Q_B (l/s/km ²)
Lames ruisselées (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,15	23,0	6,13	1,17	-	-	-	-	31,5 : 2,87 : 1,1
Debit de base (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	13,7	387	195	68,7	7	2	23	0,1	57,9 : K_B (%) : Q_R (l/s/km ²)
Debit de base (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,40	38,4	19,97	7,03	0,7	0,2	2,25	0,01	69,9 : 6,4 : 2,2

B.V. EST	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
Precipitations (mm)	0,0	82,2	138,6	116,8	194,7	230,2	79,0	93,4	23,7	78,2	104,0	1,1	1114,9
Debit moyen (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,249	15,9	6,62	3,78	0,596	0,826	1,82	0,010	2,56 : K_p (%) : Q (l/s/km ²)
Lames écoulées (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	79,3	32,1	18,3	2,8	4,0	8,5	0,05	146,3 : 12,8 : 4,6
Ruisselement (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,04	6,7	1,6	2,22	0,0	0,40	0,33	0,0	0,94 : K_r (%) : Q_B (l/s/km ²)
Lames ruisselées (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,16	31,52	7,78	10,76	0,0	1,92	1,52	0,0	53,7 : 4,7 : 1,70
Debit de base (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,21	10,18	5,02	1,56	0,60	0,429	1,49	0,01	1,62 : K_B (%) : Q_R (l/s/km ²)
Debit de base (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47,78	24,32	7,54	2,80	2,08	6,98	0,05	92,6 : 8,1 : 2,93

B.V. OUEST	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D	Année
Precipitations (mm)	0,0	82,4	116,4	127,7	167,3	230,0	85,6	77,8	16,0	62,9	95,0	1,8	1092,9
Debit moyen (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,053	0,551	6,61	3,03	1,13	0,016	0,065	0,638	0,0	1,00 : K_p (%) : Q (l/s/km ²)
Lames écoulées (mm)	0,0	0,0	0,0	0,2	2,35	27,2	12,9	4,8	0,47	0,3	2,6	0,0	50,4 : 4,6 : 1,59
Ruisselement (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,02	0,18	2,49	1,10	0,26	0,0	0,043	0,23	0,0	0,36 : K_r (%) : Q_B (l/s/km ²)
Lames ruisselées (mm)	0,0	0,0	0,0	0,1	0,77	10,23	4,71	1,10	0,0	0,21	0,57	0,0	18,0 : 1,6 : 0,57
Debit de base (l/s)	0,0	0,0	0,0	0,02	0,37	4,13	1,93	0,87	0,018	0,02	0,41	0,0	0,64 : K_B (%) : Q_R (l/s/km ²)
Debit de base (mm)	0,0	0,0	0,0	0,1	1,58	16,97	8,19	3,7	0,07	0,09	1,69	0,0	32,4 : 3,0 : 1,02

Fig-239 - CARACTERISTIQUES DES ECOULEMENTS EN 1976 (D'APRES A.LAFFORGUE)

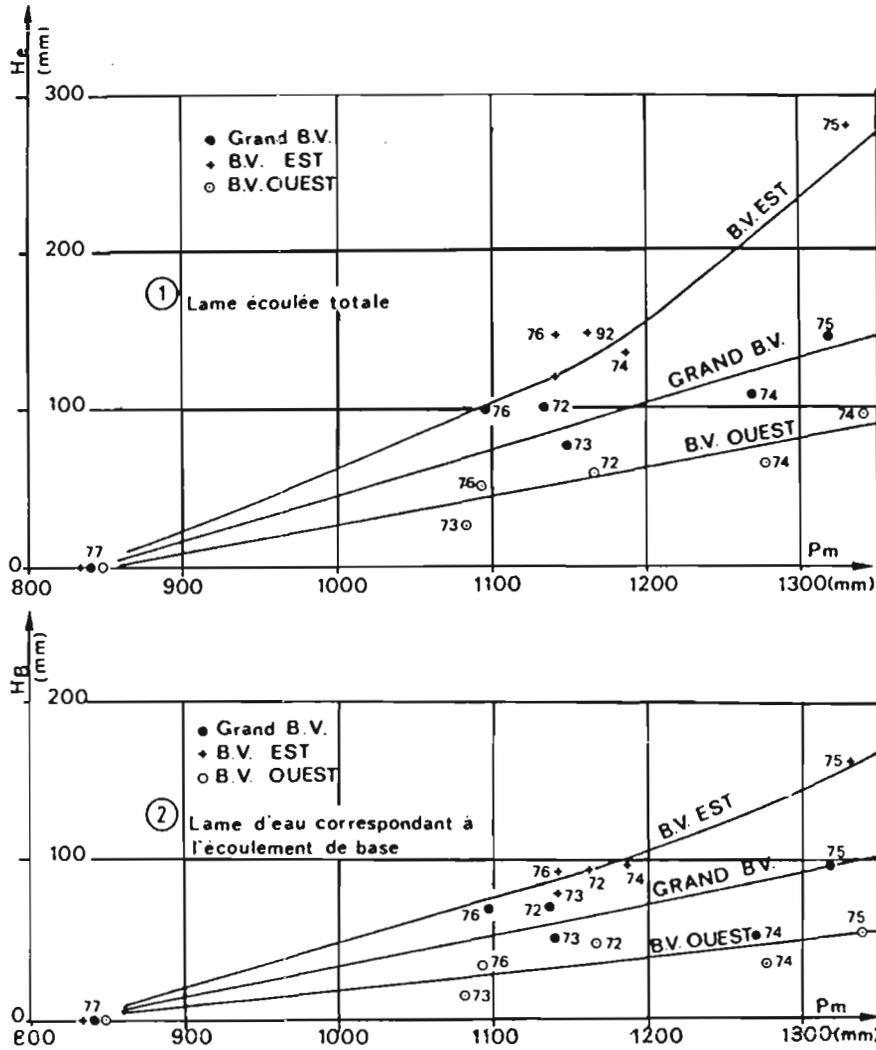


Fig- 240 - LAME D'EAU ECOULEE ET PLUIE MOYENNE SUR
LES TROIS BASSINS DE SAKASSOU (D'APRES A.LAFFORGUE)

	B.V. Est			B.V. Ouest			Grand B.V.		
Coefficients (%)	K_e	K_R	K_B	K_e	K_R	K_B	K_e	K_R	K_B
Décennale sèche	4,8	1,5	3,3	1,9	0,7	1,2	3,2	0,9	2,3
Moyenne	12,8	4,0	8,8	5,1	1,8	3,3	8,5	2,5	6,0
Décennale humide	28,0	15,7	12,3	7,2	2,5	4,7	11,9	3,4	8,5

Fig-241 - STATISTIQUE DES COEFFICIENTS D'ECOULEMENT, DE RUISSELLEMENT
ET DE BASE (D'APRES A.LAFFORGUE)

La capacité apparente moyenne d'absorption (en mm) a été obtenue en reportant la valeur de la lame ruisselée sur la pointe du hétérogramme de l'averse (fig. 242). Elle a ensuite, pour les différentes averses du bassin Est ayant donné lieu à des crues, été portée en fonction de l'indice d'humectation préalable de Kohler ($IK = IK_{i,j} \cdot e^{-\alpha \cdot j}$ avec j le nombre de jours sans pluie immédiatement avant l'averse du jour i et $\alpha = 0,10$).

Sur le même graphique, ont été portées, avec un figuré différent, les intensités maximales, en au moins cinq minutes, des plus fortes averses n'ayant pas produit de ruissellement (fig. 243). Trois domaines peuvent ainsi être définis :

- un domaine correspondant à un ruissellement certain (intensités et humectation relativement élevées) ;
- un domaine correspondant à un ruissellement possible ;
- un domaine correspondant à des conditions d'infiltration totale (intensités trop faibles ou humectation insuffisante).

Le seuil d'intensité, utilisé pour le calcul de la pluie utile, a été déterminé à partir de la courbe inférieure de la figure 243 (10 mm/h correspond à des conditions moyennes d'état d'humectation initiale : indice de Kohler $IK = 65$ mm).

L'étude des crues a permis, d'autre part, de différencier les écoulements correspondant uniquement à du ruissellement retardé qui est caractérisé par des temps de réponse, de montée et de base très longs. Pour les plus fortes crues observées sur le bassin Est, la part du ruissellement retardé ne représente guère plus de 7 à 10 % de la lame ruisselée totale. Sur le bassin Ouest elle peut atteindre 20 %.

En raison du caractère extrêmement hétérogène, dans l'espace et dans le temps, de leur aptitude au ruissellement, les bassins versants étudiés sortent du domaine d'application de la méthode de l'hydrogramme unitaire. Cependant, en sélectionnant les fortes crues associées à un bon état d'humectation ($IK > 50$ mm) et à des averses intenses de hauteurs supérieures à 30 mm, on obtient des hydrogrammes de forme assez stable. Ce qui permet de définir un hydrogramme médian. (fig. 244).

L'estimation de la crue décennale se fait en définissant tout d'abord les caractéristiques de l'averse génératrice (hauteur d'averse ponctuelle P_j et état d'humectation IK). On admet fréquemment qu'il s'agit d'une averse décennale survenant dans des conditions médianes d'humectation du sol ($F = 0,5$). Toutefois, sur les bassins de Sakassou, la valeur médiane de IK reste très faible. Aussi, pour obtenir une meilleure évaluation de la lame ruisselée, sans s'écarter de la probabilité composée résultant de la définition générale admise, on a recherché le maximum de la fonction $H_r [P_m (F_1), IK (F_2)]$ pour une probabilité $p = F_1 \cdot F_2 = 0,1 \cdot 0,5 = 0,05$, en supposant que P_m et IK sont des variables aléatoires indépendantes (fig. 245). On observe que parmi les événements équiprobables envisagés, les plus dangereux sur les petits bassins résultent d'une averse de récurrence sensiblement biennale ($P_m = 84$ mm), rencontrant une humectation préalable des sols dépassée en moyenne 1 fois sur 10 averses ($IK = 95$ mm).

Il faut rappeler que P_m s'obtient en appliquant à P_j un abattement dont la valeur peut être calculée par la formule de G. Vuillaume (paragraphe 3.1.5.3.3. - 328).

Le calcul de $H_r (P_u, IK)$ ne peut être fait qu'après avoir déterminé la pluie utile P_u à partir de la relation linéaire $P_u = f(P_m)$ donnée antérieurement (paragraphe 5.1.5.5.1.). L'hydrogramme de crue correspondant s'obtient ensuite en appliquant à l'hydrogramme médian une transformation affine de rapport H_r . Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau de la figure 246.

5.1.5.7. ECOULEMENT DE BASE

Les oscillations journalières observées sur le débit de base ont une amplitude d'autant plus élevée que le débit moyen journalier est lui-même plus fort, mais le rapport de cette amplitude au même débit moyen journalier varie en raison inverse de ce dernier. Le débit passe par un maximum entre 8 h et 11 h du matin, décroît très rapidement jusqu'à 18 h, puis croît un peu plus lentement.

Suivant les bassins, l'écoulement de base représente entre 65 % et 75 % de l'écoulement total. Il s'agit plutôt, à proprement parler, d'un écoulement retardé, les apports de base en provenance des nappes de versant très superficielles restant relativement modestes : les tarissements en l'absence de précipitations sont, en effet, extrêmement brefs (fig. 247).

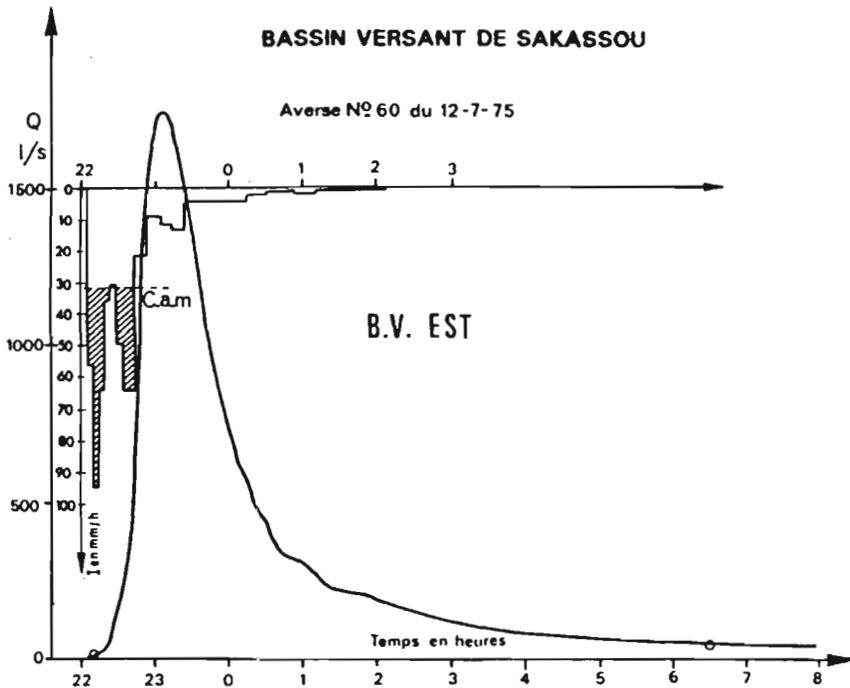


Fig-242 - CAPACITE D'ABSORPTION MOYENNE : C_{am} (D'APRES A.LAFFORGUE)

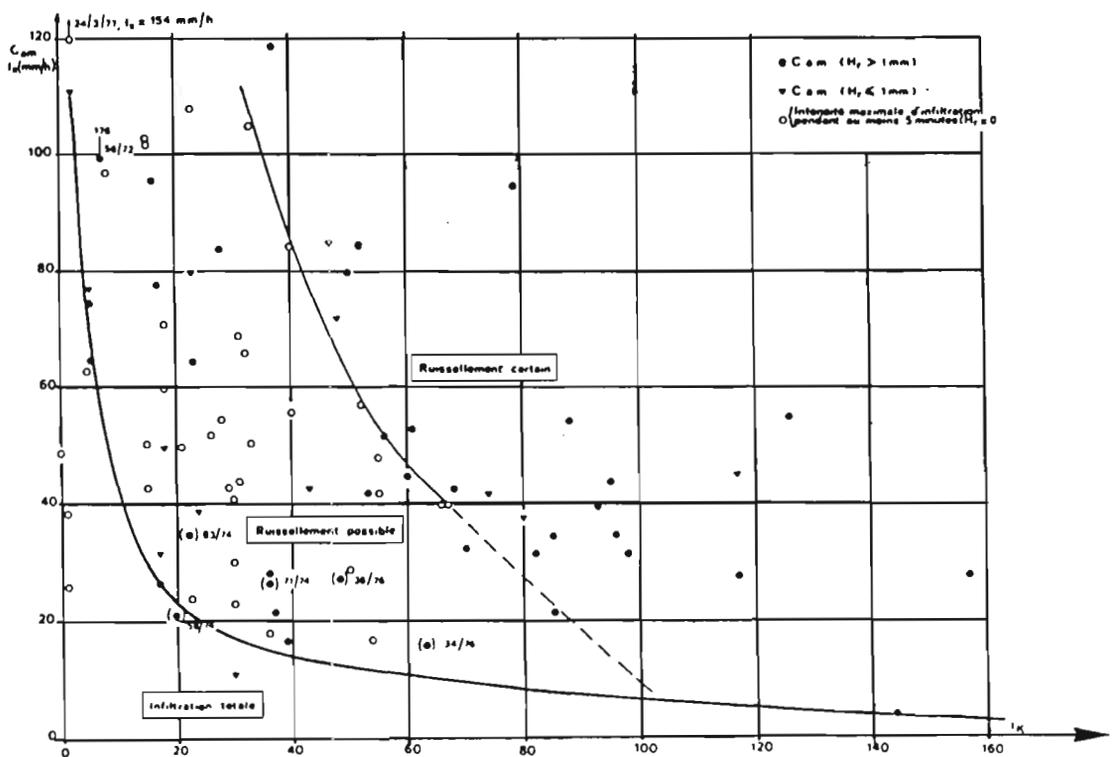


Fig-243 - INTENSITES D'AVERSSE, LIMITES DE RUISSELLEMENT ET D'INFILTRATION POUR DES AVERSES SUPERIEURES A 20 mm (D'APRES A.LAFFORGUE)

BASSIN VERSANT DE SAKASSOU

BASSIN VERSANT DE SAKASSOU

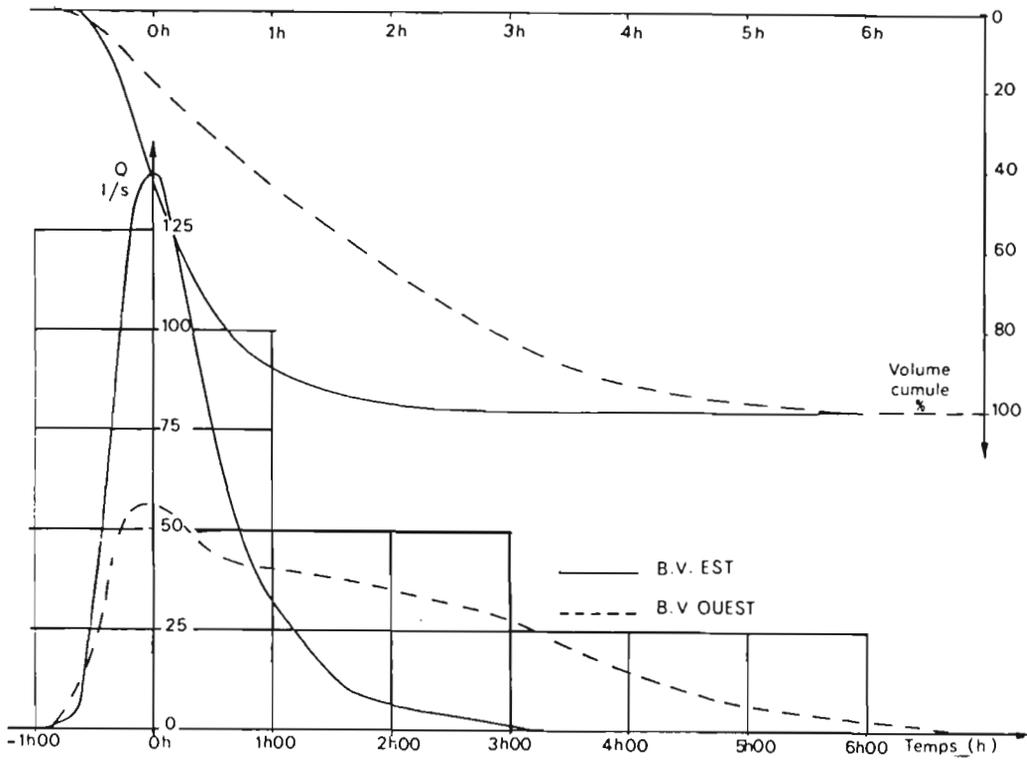
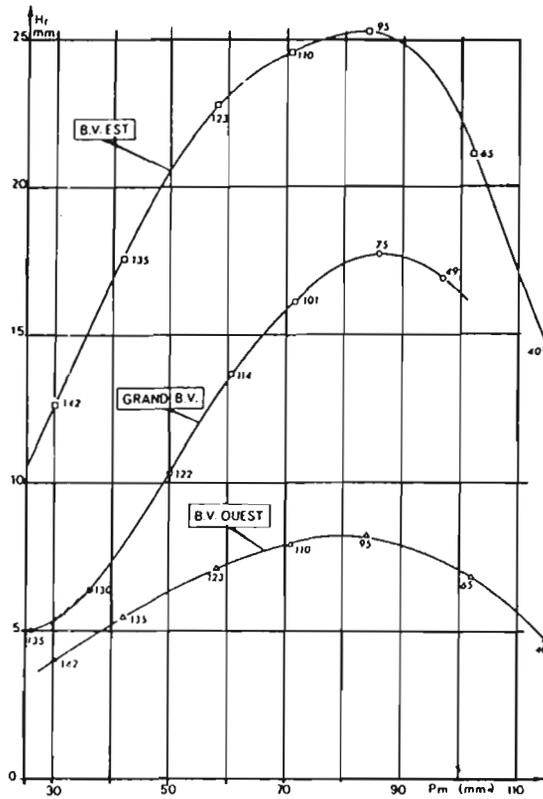


Fig-244 - HYDROGRAMMES MEDIANS DES PETITS BASSINS VERSANTS
 POUR UNE LAME D'EAU DE 1mm. (D'APRES A.LAFFORGUE)



GRAND BASSIN :

Averse			Humectation		Lame ruisselée (mm)
Fréquence annuelle	P_m (mm)	P_u (mm)	Fréquence au dépassement	I_K	
0,1	96,9	84,5	0,50	49	16,9
0,2	86,9	75,5	0,25	75	17,7
0,5	71,6	62,1	0,10	101	16,1
1,0	60,5	52,7	0,05	114	13,7
2,0	50,0	43,0	0,025	122	10,3
5,0	36,3	30,8	0,010	130	6,4
10,0	26,3	22,0	0,005	135	5,1

PETITS BASSINS VERSANTS :

Averse			Humectation		H_r (mm)	
Fréquence annuelle	P_m (mm)	P_u (mm)	Fréquence au dépassement	I_K	EST	OUEST
0,1	115	100	0,50	40	14,5	4,7
0,2	102	89	0,25	65	21,1	6,8
0,5	84	73	0,10	95	25,3	8,2
1,0	71	61	0,05	110	24,5	7,9
2,0	58	50	0,025	123	22,8	7,1
5,0	42	36	0,010	135	17,5	5,5
10,0	30	25	0,005	142	12,1	4,0

Fig-245 - LAMES RUISSELEES CORRESPONDANT A DES EVENEMENTS EQUIPROBABLES
DE FREQUENCE DECENNALE (D'APRES A.LAFFORGUE)

	P_m (mm)	H_r (mm)	H_r (%)	t_m	t_b	Q_{max} (m ³ /s)	Q_{max} (l/s/km ²)
Bassin Est	84	23,3	30,1	0h 55	4h 10	3,49	6 320
Bassin Ouest	84	8,2	9,8	0h 55	7h 40	0,46	720
Grand bassin	86,9	17,7	20,4	3h 15	14h 00	26,5	1 010

Fig-246 - CARACTERISTIQUES DE LA CRUE DE FREQUENCE DECENNALE (D'APRES A.LAFFORGUE)
BASSIN VERSANT DE SAKASSOU

	Date début	Date fin	Q début (l/s)	Q fin (l/s)	T (jour)	α (jour ⁻¹)
B.V. EST	14-08-72	25-08-72	0,44	0,058	12	0,170
	5-11-74	23-11-73	1,88	0,060	18	<u>0,191</u>
	9-11-74	4-12-74	2,48	0,010	25	0,221
	5-11-75	17-11-75	0,69	0,055	12	0,211
	7-12-75	30-12-75	0,06	0,001	23	0,179
	3-08-76	16-08-76	0,09	0,020	13	0,117
	22-11-76	3-12-76	0,04	0,001	11	0,335
B.V. OUEST	5-08-72	24-08-72	0,326	0,004	17	0,259
	4-11-74	15-11-74	0,740	0,003	11	0,500
	12-08-75	17-08-75	1,380	0,384	5	0,255
	31-10-75	9-11-75	0,435	0,002	10	0,538
	31-07-76	14-08-76	0,830	0,006	15	<u>0,329</u>
Grand B.V.	4-08-72	3-09-72	50,0	2,0	30	0,130
	11-11-73	6-12-73	36,0	1,0	24	0,149
	8-11-74	30-11-74	48,0	1,0	22	<u>0,175</u>
	1-11-75	17-11-75	48,0	2,0	16	0,198
	1-09-76	20-09-76	42,0	1,0	19	0,196

Fig-247 - CARACTERISTIQUES DES TARISSEMENTS (D'APRES A.LAFFORGUE)
BASSIN VERSANT DE SAKASSOU

5.2. BASSINS AMENAGES

Durant plusieurs décennies, les BVRE ruraux africains ont toujours, compte tenu de leurs objectifs (données complémentaires des réseaux hydrométriques de base, projets d'aménagement, recherche), été implantés dans des zones non aménagées. Il n'est pas exagéré de dire que l'hydrologue spécialiste des petits bassins tendait à fuir les zones dotées d'infrastructures hydrauliques où le contrôle des entrées-sorties et l'analyse des écoulements sont toujours rendus plus délicats. Il n'est pourtant plus possible de les ignorer, lorsque la gestion de la ressource en eau devient prioritaire et demande à s'appuyer sur des données suffisamment fiables.

Les quelques rares exemples proposés correspondent à des études non achevées actuellement. Les résultats des mesures et observations étant encore très incomplets, l'accent a été mis sur la présentation des aménagements et des équipements mis en place pour répondre à des problématiques précises.

5.2.1. BASSINS DE LA VALLEE DE DJIGUINOUM - SENEGAL

5.2.1.1. THEME DE L'ETUDE

La période de sécheresse 1969-1985 n'a pas eu de conséquences néfastes qu'au Sahel. Les zones tropicales plus arrosées, et en particulier les écosystèmes fragiles des régions côtières, ont également été durement éprouvés. En Casamance, la baisse de la pluviométrie et de l'écoulement a eu pour conséquences : l'invasion du réseau hydrographique par les eaux marines, la baisse généralisée des aquifères, la salinisation et l'acidification des vasières occupées par la mangrove qui a disparu sur de grandes étendues. Les activités liées à l'exploitation de cette dernière (ostréiculture, chasse, pêche, bois), comme celles liées à la production halieutique, ont sensiblement diminué. De nombreuses rizières, aussi bien salées (mangrove) que douces (vallées inondées), ont dû être abandonnées.

A côté des grands projets de barrages anti-sel (Affiniam et Guidel), de petits ouvrages ont été édifiés, à l'instigation des populations locales et des organismes de développement, pour arrêter l'entrée des eaux salées à l'intérieur des petites vallées alluviales.

L'étude de la vallée de Djiguinoum consiste à suivre un de ces aménagements dans le but d'aboutir à un modèle de gestion de l'eau pour la production rizicole dans les petites vallées dégradées.

5.2.1.2. CONTEXTE PHYSICO-CLIMATIQUE

La vallée de Djiguinoum se situe dans la zone méridionale du Sénégal, à 15 km au Nord-Est de Ziguinchor et à 60 km de l'embouchure du fleuve Casamance. La superficie du bassin versant est de 26,52 km² et celle de la vallée de 271 ha, dont 150 inondables.

Le climat est du type tropical, caractérisé par une saison sèche quasiment sans aucune précipitation de novembre à mai, et une saison pluvieuse qui s'étend de juin à octobre, avec un maximum en août.

La pluviométrie moyenne de Ziguinchor est de 1424 mm sur la période 1931-1988, mais seulement de 1161 mm pour les vingt dernières années.

Le sous-sol est constitué de formations sédimentaires du Continental Terminal. Les terrasses sableuses, situées en bordure de plateau, et les vasières, formées par des sédiments fins (mangroves et zones salées sans végétation), sont apparues au Quaternaire.

Les sols se divisent en deux grands ensembles : les sols sulfatés acides soumis, avant la construction du barrage, au balancement de la marée, et les sols hydromorphes situés en bordure de plateau et en tête de vallée.

Le bas fond, domaine de la riziculture inondée, est quadrillé par un réseau de diguettes délimitant des casiers parcourus de billons.

5.2.1.3. DISPOSITIF DE MESURES ET D'OBSERVATIONS, PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le dispositif complet de mesures et d'observations est présenté sur la figure 248.

5.2.1.3.1. BARRAGE

Le barrage anti-sel, édifié sur le site de Djilakoun en 1984, comprend une digue en latérite et, au niveau du lit principal, un petit édifice en béton présentant trois ouvertures munies de batardeaux. Aucune amélioration du dessalement des sols n'ayant été constatée, il est apparu indispensable d'initier une gestion rationnelle du barrage, qui permette d'évacuer les sels lessivés pendant toute la période de culture, en profitant des niveaux de marée basse. Dans ce but, le dispositif d'ouverture a été modifié pour faciliter la vidange par le fond des eaux de remplissage (fig. 249).

En amont du barrage, l'ancien bief soumis à la marée est transformé en retenue où s'accumulent les eaux du bassin versant. Elle s'assèche tous les ans. Son équipement se compose d'un limnigraphe à flotteur à rotation journalière, d'un limnigraphe à capteur de pression et d'un bac flottant pour la mesure de l'évaporation. Un autre limnigraphe à capteur de pression est installé à l'aval du barrage. Ces deux capteurs étant reliés à la même centrale d'acquisition, équipée d'une mémoire amovible, les variations des deux plans d'eau (amont et aval) sont enregistrées sur la même base de temps (horloge électronique). Les règles de gestion doivent répondre à quatre objectifs :

- éviter l'inondation de la piste qui relie le village de Djiguinoum à Ziguinchor, c'est-à-dire maintenir une cote inférieure à 90 cm à l'échelle située dans le drain principal du casier rizicole ;
- pouvoir étalonner les débits sortant du barrage, en fonction des hauteurs d'eau lues à l'échelle amont : des mesures ont montré qu'il est nécessaire d'avoir une différence de cotes amont-aval de 3 cm pour garantir une relation univoque (fig. 250) ;
- conserver une quantité d'eau suffisante pour la pratique du riz inondé ;
- évacuer le maximum de sel, en effectuant le plus possible de lâchers.

A chaque ouverture, les lâchers ont été jaugés en continu. Des mesures ont été réalisées à la fois à l'amont et à l'aval du barrage. Il s'est avéré que les variations du plan d'eau amont suivent plus fidèlement les variations de cote mesurées, une mise en vitesse de l'écoulement étant observée en aval des vannes (fig. 251). La section amont a donc été retenue comme section de jaugeage.

Un prélèvement d'eau est effectué au cours de chaque lâcher. La mesure du Ph est faite immédiatement sur le terrain, les mesures de la conductivité et de la teneur en aluminium et en fer étant réalisées plus tard en laboratoire.

5.2.1.3.2. STATIONS HYDROMETRIQUES

Deux stations hydrométriques installées sur des ponts routiers contrôlent des bassins de 20,85 km² et 3,5 km² (fig. 249). Elles ont pour finalité de mesurer les apports à la vallée.

La première (fig. 252) comporte une échelle limnimétrique de deux éléments et un limnigraphe à flotteur équipé d'une table déroulante.

La seconde, située dans la vallée Le Brusq, est équipée d'un élément d'échelle et d'un limnigraphe à flotteur, également à table déroulante. Le premier emplacement choisi s'étant avéré être influencé par les eaux de ruissellement du village de Djiguinoum, cette station a été déplacée légèrement vers l'amont.

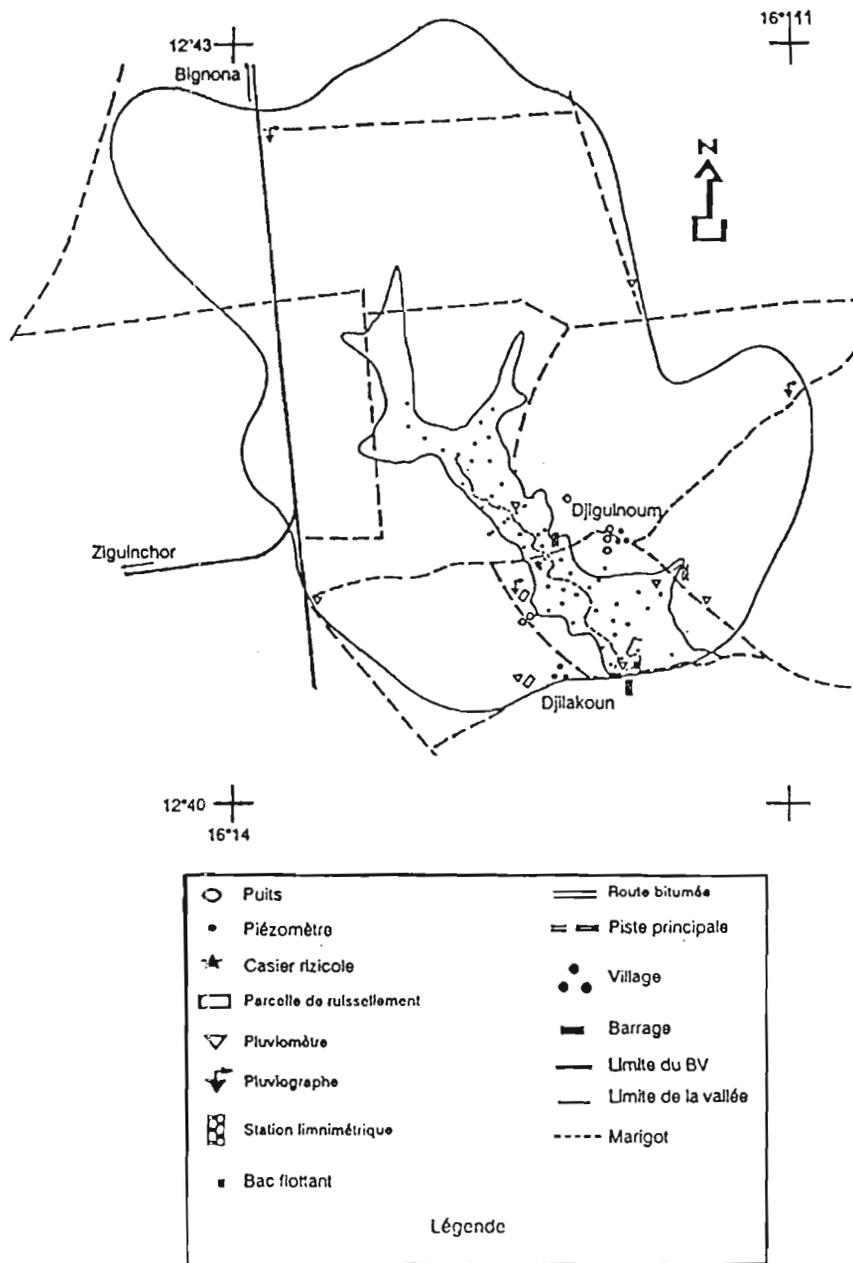


Fig-248 - SITE EXPERIMENTAL DE DJIGUINOUM (D'APRES J.ALBORGEL)

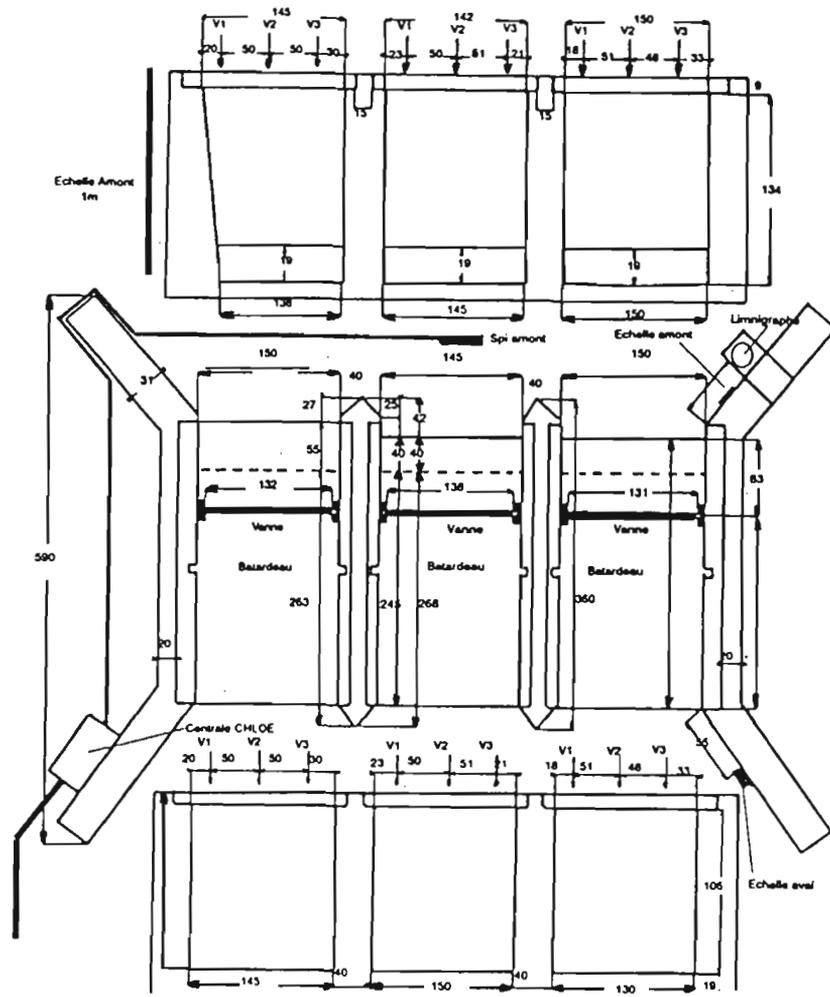


Fig-249 - BARRAGE DE DJILAKOUM _1989. (D'APRES J.ALBORGEL)

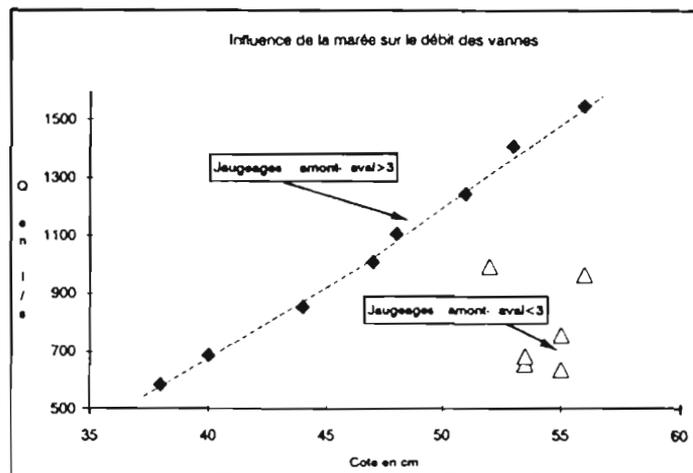


Fig-250 - JAUGEAGES AU BARRAGE EN FONCTION
DES COTES AMONT ET AVAL (D'APRES J.ALBORGEL)

RASSIN VERSANT DE DJIGUINOUM

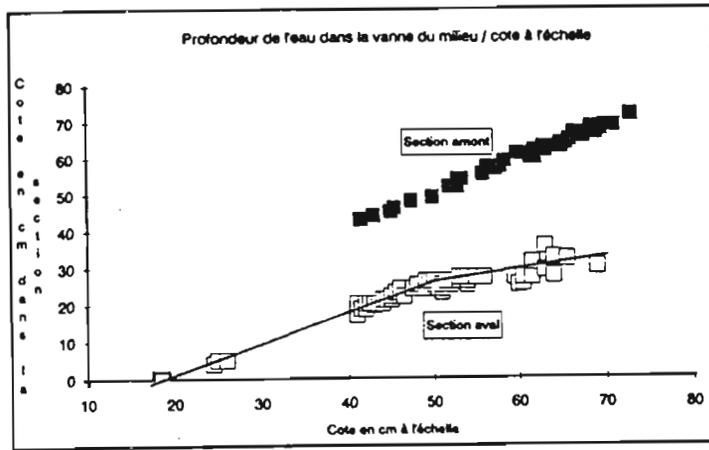


Fig- 251 - VARIATION DU PLAN D'EAU DANS LA SECTION DE Jaugeages ET A L'ECHELLE DU BARRAGE (D'APRES J.ALBERGEL)

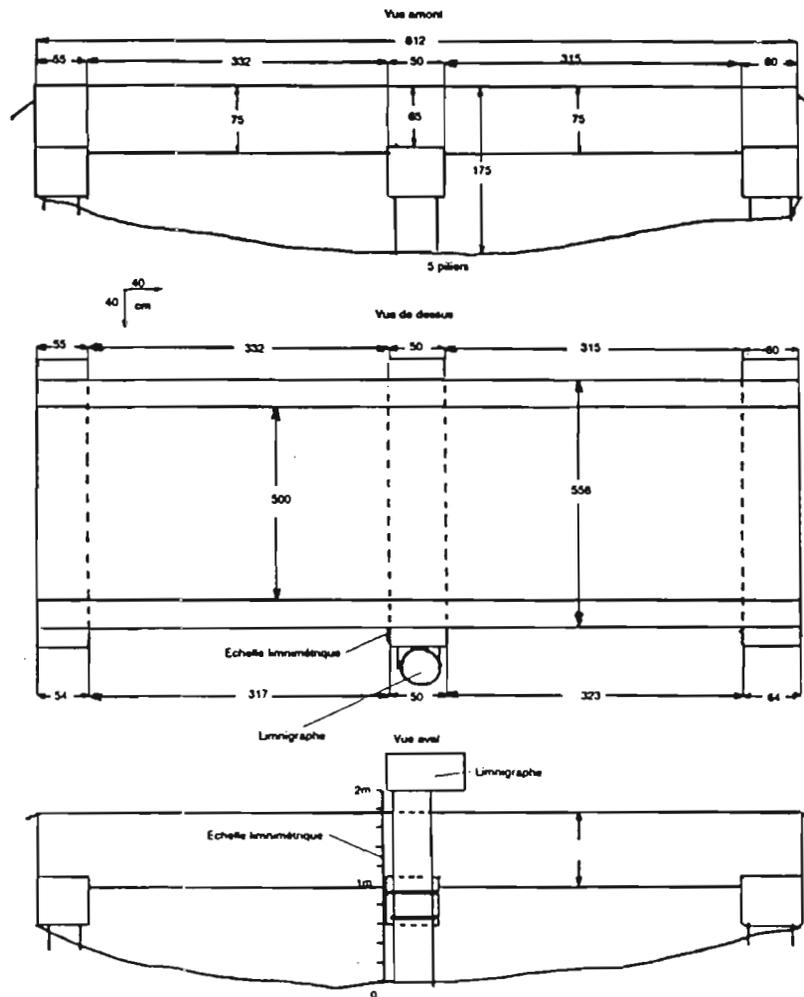


Fig-252 - STATION HYDROMETRIQUE DU PONT DE DJIGUINOUM (D'APRES J.ALBERGEL)

5.2.1.3.3. RESEAU PLUVIOMETRIQUE

Le dispositif pluviométrique comprend sept pluviomètres de 400 cm², trois pluviographes à augets basculants et deux pluviomètres au sol de type "Snowdon" (fig. 253).

5.2.1.3.4. RESEAU PIEZOMETRIQUE

Le réseau de suivi de l'aquifère est composé de 58 piézomètres en PVC de 80 mm de diamètre (fig. 254). Ils sont disposés sur l'ensemble de la vallée, en une dizaine de transects parallèles, implantés perpendiculairement à l'axe du marigot et distants d'environ 200 m. Ils sont profonds de deux à quatre mètres. Six puits villageois, installés sur le plateau, complètent le dispositif.

L'ensemble du réseau est suivi en début d'hivernage (mois de juin) et en fin d'hivernage (décembre). Des observations mensuelles sont effectuées sur les deux transects dont l'équipement est le plus complet. En même temps qu'est mesurée la profondeur de la nappe, la hauteur de la partie aérienne des piézomètres est contrôlée pour vérifier leur stabilité. Tous les appareils sont vidangés la veille de la tournée de mesures.

Au cours du nivellement général de la vallée, tous les piézomètres et puits ont été rattachés au zéro de l'échelle amont du barrage. Comme pour les eaux prélevées dans les lâchers, l'échantillon d'eau recueilli dans chaque piézomètre fait l'objet d'une mesure immédiate du Ph, celles de la conductivité et de la teneur en aluminium étant réalisées en laboratoire. Des analyses d'ions majeurs sont effectuées en début de saison des pluies et début de saison sèche.

5.2.1.3.5. RUISSELLEMENT SUR PARCELLE DE 50 m²

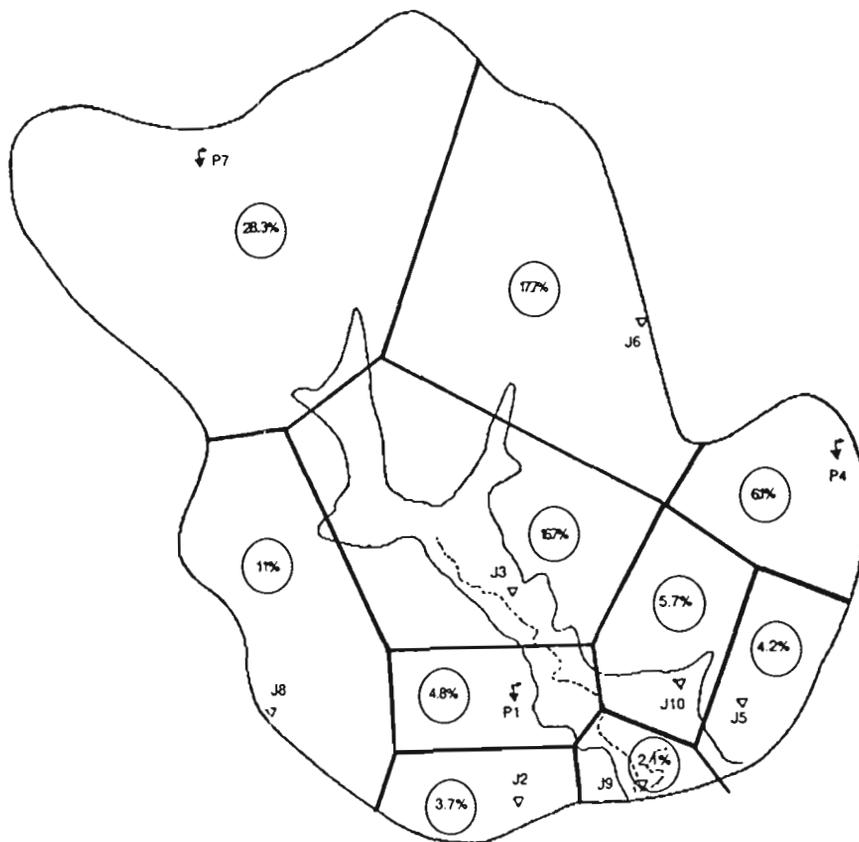
L'absence sur le plateau de réseau hydrographique net semble montrer que celui-ci contribue peu aux apports à la vallée par ruissellement direct. Néanmoins, il est apparu important de quantifier le ruissellement, ainsi que la sensibilité du sol à l'érosion, en dehors du bas-fonds, dans les zones où s'observe un début de défrichement.

Dans ce but, deux parcelles de 50 m² ont été installées : l'une sur les sols gris de versants, l'autre sur les sols rouges de plateaux. Ces deux formations représentent l'essentiel de la surface du bassin, hormis les bas-fonds inondables.

Chaque parcelle est installée dans le sens de la ligne de plus grande pente du terrain. Elle est délimitée, à l'amont et latéralement, par des demi-tôles ondulées enterrées sur 15 cm et maintenues verticalement par des piquets en bois. La partie aval est constituée d'une gouttière collectrice des eaux de ruissellement, faite de tôle de 25/10 mm et constituée de trois éléments (2 mètres pour la partie centrale et 1,50 mètre pour chaque partie latérale) boulonnés, l'étanchéité étant assurée par un joint en mastic (fig. 255). Elle est recouverte d'une tôle, également boulonnée, pour la protéger de la pluie. Les eaux de ruissellement sont recueillies dans 2 cuves de 1 m³ placées en série, dotées chacune d'une échelle de 1 mètre. La seconde cuve reçoit le 1/10^{ème} de l'excédent de la première cuve (fig. 256). Pour faciliter le calcul du bilan hydrique des parcelles et étudier la relation entre pluie mesurée à 1 mètre au-dessus du sol et pluie tombant sur le sol, le dispositif de mesures comprend également deux pluviomètres au sol de type "Snowdon" (paragraphe 5.2.1.3.3.).

5.2.1.3.6. AUTRES MESURES

L'étude hydrologique s'accompagne d'un volet agronomique important, mené par un spécialiste en riziculture.



-  PLUVIOGRAPHE
-  PLUVIOMETRE
-  COEFFICIENT DE THIESSEN

Fig-253 - RESEAU PLUVIOMETRIQUE DE DJIGUINOUM (D'APRES J.ALBERGEL)

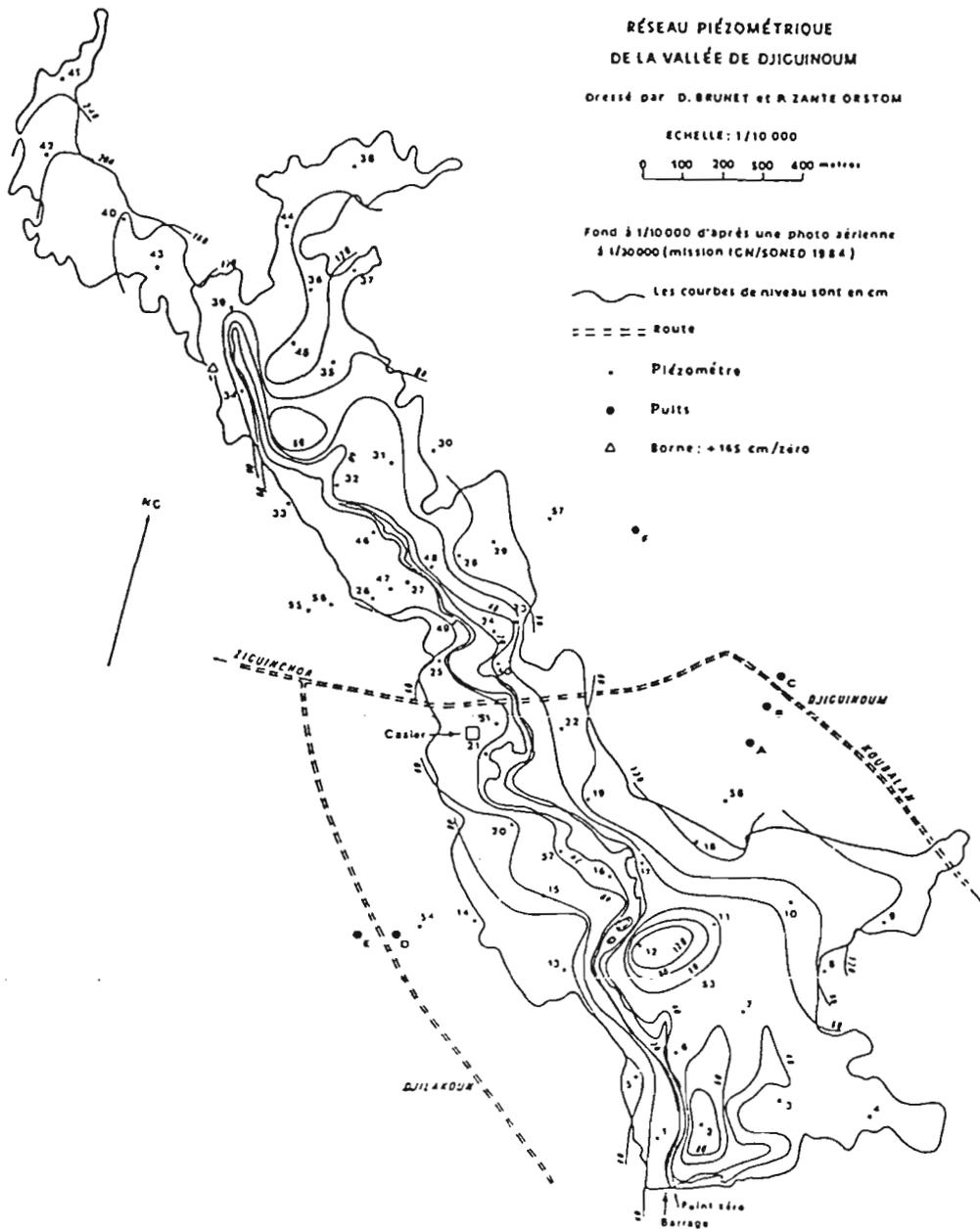


Fig-254 - RESEAU PIEZOMETRIQUE DE DJIGUINOUM

BASSIN VERSANT DE DJIGUINOUM

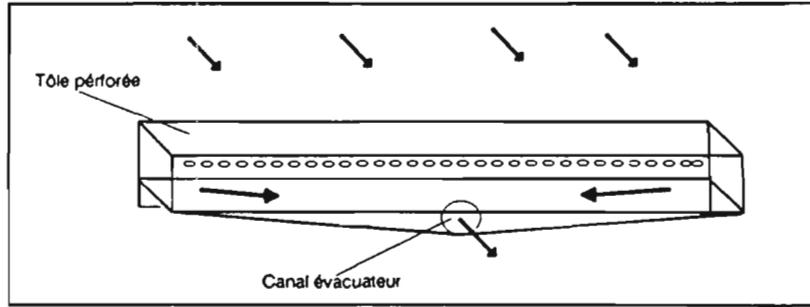


Fig-255 - GOUTTIERE AVAL D'UNE PARCELLE DE RUISSELLEMENT (D'APRES J.ALBERGEL)

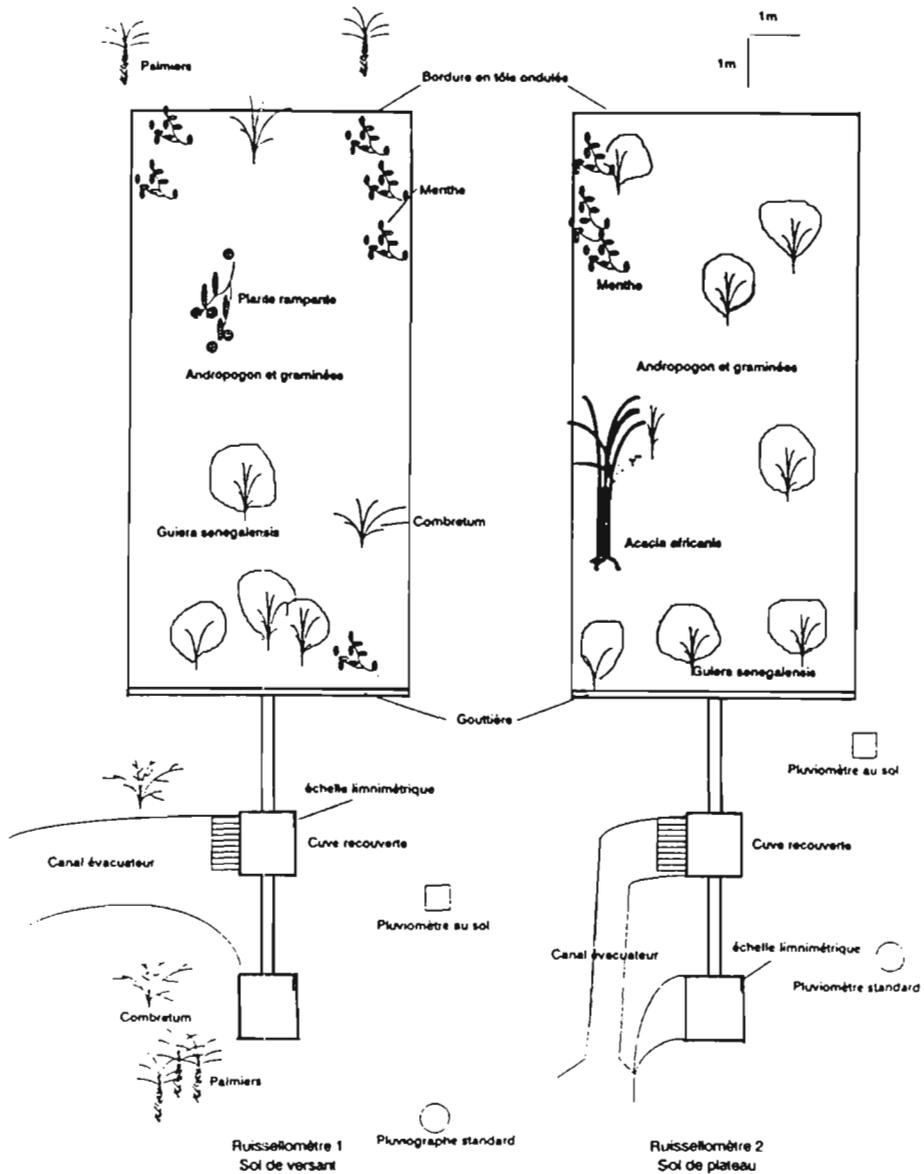


Fig- 256 - DISPOSITIF DE MESURE DU RUISSELLEMENT SUR PARCELLE DE 50 m² (D'APRES J.ALBERGEL)

5.2.2. BASSINS DE BIDI - BURKINA-FASO

La problématique posée et le dispositif de mesures et d'observations mis en place sont présentés sommairement, l'accent étant mis sur la méthode utilisée pour obtenir un bilan satisfaisant d'une petite retenue.

5.2.2.1. PROBLEMATIQUE

La province du Yatenga qui se situe au Nord-Ouest du Burkina-Faso subit, depuis près de vingt ans, une sécheresse importante et persistante. Avant 1966, la moyenne pluviométrique interannuelle calculée sur cinq ans restait supérieure à 650 mm. De 1972 à 1976, elle n'est plus que de 568 mm, et seulement de 424 mm, de 1982 à 1986. Cette situation inquiétante a amené les paysans et certaines organisations à modifier leur stratégie culturale. L'intérêt se porte, de plus en plus, sur la mise en valeur des bas-fonds en développant la culture du riz dans les zones régulièrement inondées (bas-fond de Sanga de la région de Thiou), les cultures de sorgho dans les zones temporairement submergées (bas-fond de Bidi), les cultures maraîchères en saison sèche. Il s'agit de cultures irriguées par prélèvement dans les aquifères superficiels (bas-fond de Bidi) ou par prélèvement dans des retenues artificielles (bas-fond de Gonhiré près de Ouahigouya).

Le bas-fond de Bidi a fait l'objet d'une étude détaillée qui entre dans le cadre d'un vaste projet intitulé "projet Yatenga".

Les objectifs affichés sont multiples :

- étudier le fonctionnement hydrologique des bassins pour une meilleure utilisation des réserves hydriques superficielles ;
- caractériser les nappes souterraines en évaluant leur potentiel et leur mode de réalimentation ;
- caractériser les sols du bas-fond et suivre l'évolution de leur fertilité ;
- étudier la mise en valeur du bas-fond par des suivis agronomiques et des enquêtes socio-économiques.

5.2.2.2. CONTEXTE PHYSICO-CLIMATIQUE

Le bassin de Bidi se situe entre 13° 50' et 14° de latitude Nord, et 2° 25' et 2° 40' de longitude Ouest. Il est soumis au climat tropical semi-aride, caractérisé par une seule saison des pluies qui s'étend de juin à septembre. Calculée sur les vingt dernières années, la hauteur pluviométrique annuelle de fréquence médiane ne dépasserait pas 450 mm, et la pluie ponctuelle journalière de fréquence décennale serait voisine de 85 mm.

Son substratum granitique forme une pénéplaine au relief peu marqué, dominée par des cuirasses tabulaires érodées. Des talus, hauts de deux à trois mètres, marquent la limite des cuirasses et dominant des glacis en pente faible (1 à 2%), couverts de dépôts éoliens ou colluviaux.

Une étude comparative de l'occupation des sols, réalisée entre 1952 et 1981, fait apparaître une augmentation de l'ordre de 20% des espèces cultivées et des zones dégradées sans végétation ligneuse, une stabilisation des jachères anciennes et une diminution de plus de 40% des zones à végétation arbustive dense.

5.2.2.3. DISPOSITIF DE MESURES ET D'OBSERVATIONS PLUVIO-HYDROMETRIQUES

L'ensemble de l'équipement hydrologique a été porté sur la carte de la figure 257 :

- Le réseau pluviométrique comprend vingt pluviomètres et six pluviographes répartis sur une superficie d'environ 150 km².
- Le réseau hydrométrique se compose de treize limnigraphes à flotteur, dont neuf ont été placés dans le bas-fond de Bidi.

BASSIN DE BIDI
 équipement hydropluviométrique
 1987 à 1990

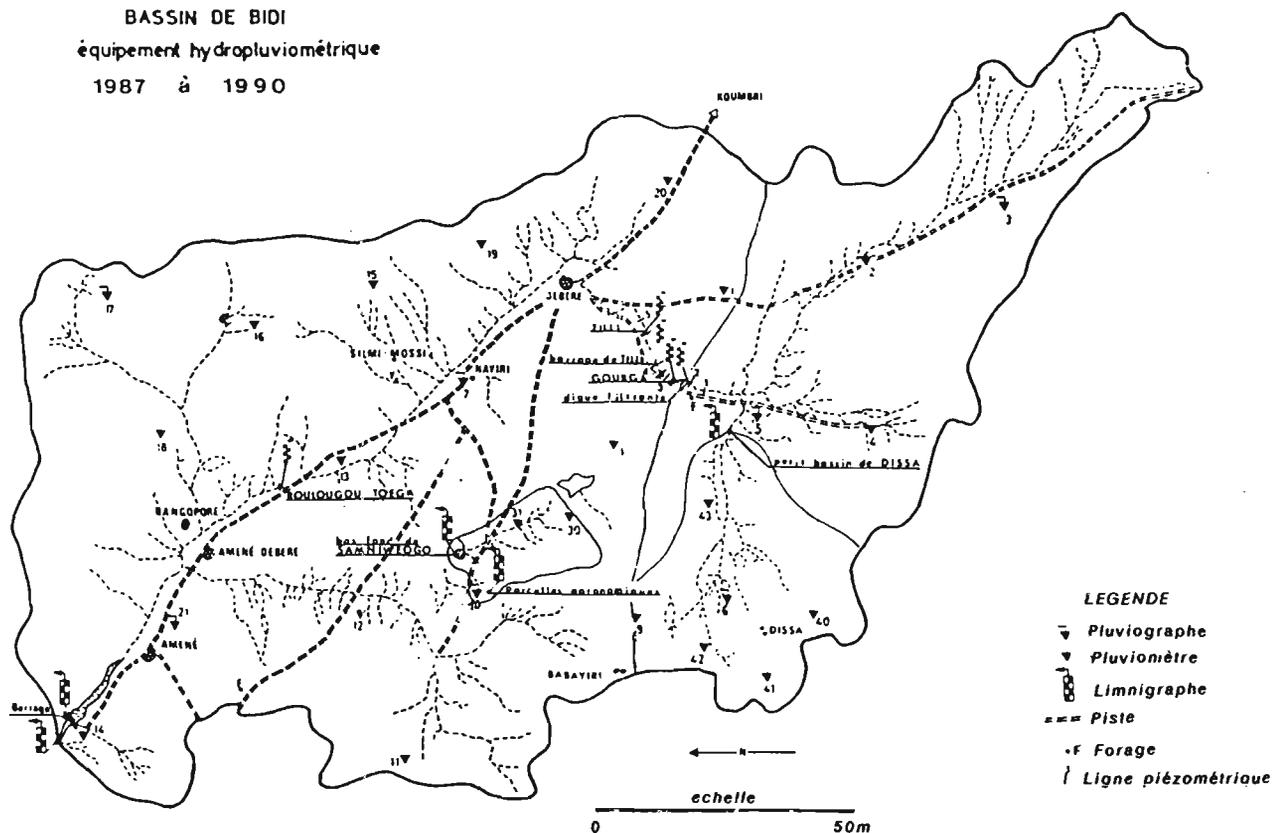


Fig-257 - EQUIPEMENT HYDRO-PLUVIOMETRIQUE DU BASSIN DE BIDI (D'APRES J.M.LAMACHERE)

1. Relation cote de remplissage/surface du plan d'eau

DIGUE		BARRAGES	
Cote (m)	Surface (ha)	Cote (m)	Surface (ha)
3.34	0	5.80	0
3.50	0.624	6.00	0.394
3.60	1.588	6.50	1.982
3.70	2.780	7.00	4.852
3.80	3.242	7.50	10.010
4.00	5.292		
4.20	7.200		

2. Relation cote de remplissage/volume d'eau stocké

DIGUE		BARRAGES	
Cote (m)	Volume (m3)	Cote (m)	Volume (m3)
3.34	0	5.80	0
3.50	450	6.00	250
3.60	1550	6.50	6150
3.70	3650	7.00	23500
3.80	6950	7.50	59850
4.00	15600		
4.20	28325		

Fig-258 - CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES HYDRAULIQUES DE BIDI (D'APRES J.M.LAMACHERE)

Les trois ouvrages hydrauliques existants (la digue filtrante de Gourga, le petit barrage de Tilli et le barrage d'Améné) ont été équipés d'un double dispositif d'enregistrement des niveaux d'eau, placé en amont et en aval des barrages. Les stations situées à l'aval des ouvrages servent également à la mesure des débits.

Une station supplémentaire a été installée à Roulougou Toega, à environ 5 km en amont du barrage d'Améné.

Le bas-fond de Gourga a fait l'objet d'un relevé topographique au 1/2 000^{ème} qui a permis de calculer les caractéristiques des ouvrages (fig. 258).

5.2.2.4. RESEAU PIEZOMETRIQUE

L'équipement du bas-fond de Bidi sur le bief Gourga-Tilli comprend (fig. 259) :

- 30 piézomètres, placés à proximité du bas-fond pour l'observation des nappes superficielles,
- 11 puisards traditionnels, situés à 500 mètres environ du marigot,
- 2 puits busés, installés pour l'observation de la nappe profonde, l'un en aval de la digue filtrante, l'autre en aval du barrage.

En saison des pluies, à partir du 1er juillet, la fréquence des observations piézométriques est d'un relevé tous les trois jours pour les piézomètres situés à proximité du bas-fond, et d'un relevé tous les quinze jours pour les autres.

Trois missions géophysiques, totalisant 10 jours de travail de terrain, ont permis de localiser les fractures et la profondeur du substratum.

5.2.2.5. BILANS DE LA RETENUE DE GOURGA

La retenue de Gourga, d'une capacité de 50 000 m³, a été équipée de manière que les différents termes du bilan hydrique puissent être estimés.

L'équation de ce bilan peut s'écrire (paragraphe 2.2.4.) :

$$\Delta V = V_{ec} + V_{ecs} + V_p - (V_{ev} + V_{id} + V_{if} + V_d + V_u) \quad (1)$$

ΔV étant la variation du stock d'eau dans la retenue

V_{ec} les apports en provenance des tributaires

V_{ecs} les apports souterrains

V_p les apports des précipitations tombant directement sur la retenue

V_{ev} le volume d'eau évaporé

V_{id} les pertes par infiltration à hauteur du barrage

V_{if} les pertes par infiltration dans le fond de la retenue

V_d le volume d'eau sortant de la retenue par déversements

V_u le volume d'eau prélevé pour divers usages (irrigation, alimentation des populations et du bétail, etc.).

- *Bilan sans ou faible écoulement superficiel*

La période choisie s'étend sur 109 heures.

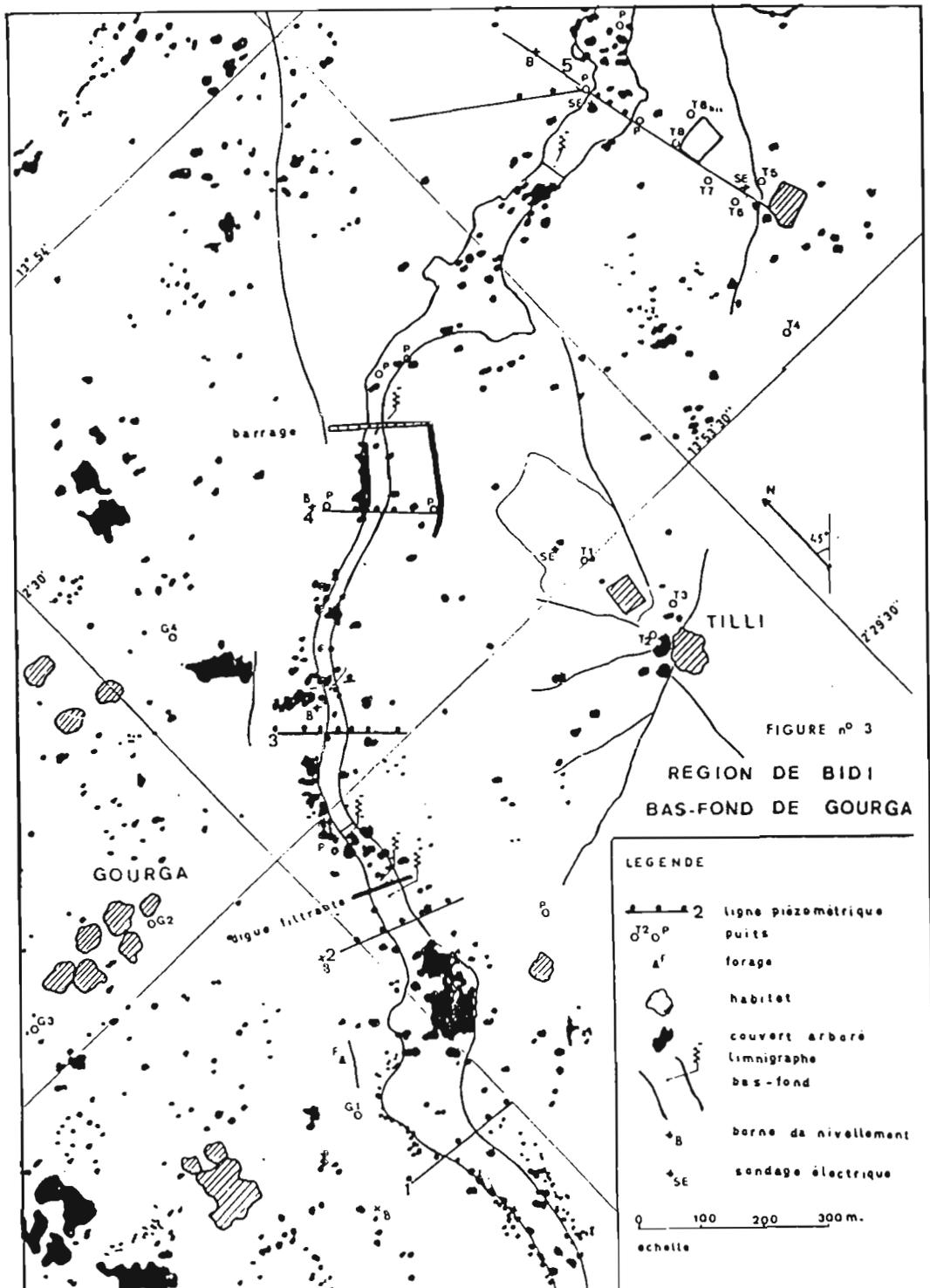


Fig- 259 - RESEAU PIEZOMETRIQUE DE BIDI (d'après J.M.LAMACHERE)

- Le volume V_s stocké est déterminé à partir de la courbe hauteur-volume (barème de la figure 261) obtenue à partir d'un nivellement précis de la retenue (fig. 260) :

Vs ₁ le 17 / 07 / 89, à 18 h à la cote 610 cm	1 000 m ³
Vs ₂ le 22 / 07 / 89, à 7 h à la cote 582 cm	- 20 m ³

soit ΔV :	980 m ³

- Le volume correspondant aux apports superficiels V_{ec} est faible. Il est obtenu à partir des enregistrements limnigraphiques et de la courbe de tarage de la station hydrométrique de Gourgaumont. L'intégration des débits en fonction du temps (109 heures) donne $V_{ec} = 225 \text{ m}^3$.
- Le volume dû aux apports souterrains est, compte tenu du contexte géologique, supposé nul durant toute l'année.
- Le volume pluviométrique correspond à une pluie de 7,7 mm, enregistrée le 20 juillet par un appareil situé à proximité du barrage. Le plan d'eau était alors à la cote 593 cm qui correspond, d'après le barème de la figure 262, à une surface de $2\,260 \text{ m}^2$:

$$V_p = 2\,260 \cdot 7,7 \cdot 10^3 = 17,4 \text{ m}^3$$

- Les débits prélevés V_u et déversés V_d sont nuls.
- Les pertes par infiltration sont mesurées à l'aide d'un canal jaugeur de 50 cm de largeur, installé à une vingtaine de mètres en aval de la digue. Jusqu'à la cote 590 cm les fuites sont nulles, puis croissent lentement pour atteindre 0,1 l/s à la cote 600 cm et 0,5 l/s à la cote 610 cm. L'intégration des débits mesurés en fonction du temps donne $V_{id} = 23 \text{ m}^3$.
- Le volume évaporé V_{ev} correspond au produit de la lame mesurée sur un bac flottant, installé dans la retenue, par la surface du plan d'eau. Le calcul à été fait à l'échelle de la journée, sachant que, durant la période choisie, l'évaporation était de 7 mm/jour :

Date	Cote moyenne (cm)	Surface moyenne (m ²)	Durée (jours)	Hauteur évaporée (mm)	Volume évaporée (m ³)
17 / 07 / 89	607	6 140	6 / 24	1,75	11
18 / 07 / 89	605	5 100	1	7	36
19 / 07 / 89	600	3 800	1	7	27
20 / 07 / 89	594	2 480	1	7	17
21 / 07 / 89	588	1 280	1	7	9
22 / 07 / 89	593	480	7 / 24	2	1
V _{ev} (en m ³) :					101

- Le bilan global s'écrit :

$$\Delta V = V_{ec} + V_{ecs} + V_p - (V_{ev} + V_{id} + V_{if} + V_d + V_u)$$

$$\text{soit,} \quad - 980 = 225 + 0 + 17 - (101 + 23 + V_{if} + 0 + 0)$$

Vif étant le seul terme inconnu, on en déduit :

$$V_{if} = 1\,098 \text{ m}^3$$

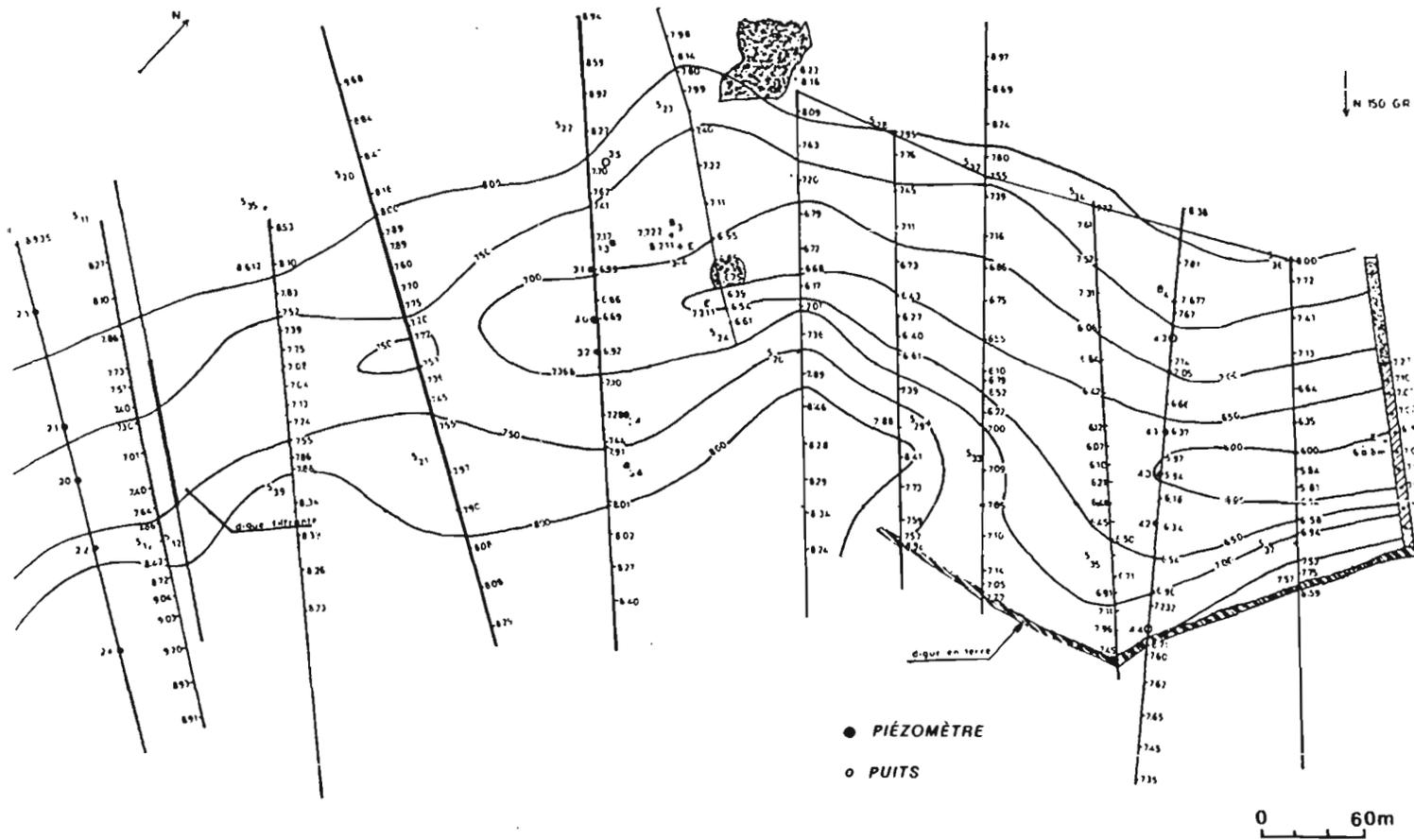


Fig- 260 - HYSOMETRIE DE LA RETENUE DU BARRAGE

- BIDI - GOURGA (D'APRES J.M.LAMACHERE)

Cette valeur correspond à une superficie moyenne du plan d'eau de 4 320 m² (cote moyenne de 602 cm).

L'infiltration moyenne dans la retenue peut donc être estimée à :

$$(1\ 098 / 4\ 320) \cdot (24 / 109) \cdot 1\ 000 = 56\ \text{mm/j}$$

- **Bilan en période de crue**

L'exemple sélectionné correspond à la crue des 30 et 31 juillet, observée sur le marigot Aoto qui alimente la retenue.

Long de 100 mètres, l'évacuateur de crues se situe dans la partie centrale de la digue. Sa partie amont est en terre compactée, recouverte d'un perré de pierres (cuirasse ferrugineuse). La partie aval est constituée de rangées de gabions disposés en escaliers. Une fosse de dissipation protège l'aval du déversoir des affouillements. L'estimation des débits déversés a nécessité l'installation d'une passerelle de jaugeages, à environ cent mètres à l'aval du barrage.

Des enregistrements limnigraphiques permettent en théorie de connaître les hydrogrammes de crues à l'entrée et à la sortie du plan d'eau. Toutefois, une application intéressante de l'équation du bilan hydrique est de pouvoir reconstituer les apports en amont du barrage à partir des seuls enregistrements effectués à hauteur du déversoir. Ceci implique que les autres termes du bilan soient connus avec une précision suffisante.

La période sélectionnée se situe, entre 7 et 8 heures, le 31 juillet 1989.

- Le volume déstocké ΔV est calculé à partir des cotes du plan d'eau et du barème hauteur-volume (fig. 261) :

Vs ₁ le 31 / 07 / 89, à 7 h à la cote 709 cm	28 820 m ³
Vs ₂ le 31 / 07 / 89, à 8 h à la cote 706 cm	- 27 080 m ³
	1 740 m ³
soit ΔV :	1 740 m ³

- Le volume pluviométrique V_p est nul, l'averse étant terminée.
- Le volume par apports souterrains Vecs est supposé nul toute l'année.
- Le volume déversé V_d est estimé à partir des enregistrements limnigraphiques qui permettent de connaître la charge sur le déversoir :

à 7 h le 31 / 07 / 89, le débit déversé est de 1,4 m³/s,

à 8 h il n'est plus que de 0,750 m³/s.

Les débits intégrés sur la période de 1 heure donnent un volume V_d = 3 870 m³.

- Le volume perdu par infiltration dans la digue Vid est estimé à partir de la cote du plan d'eau (entre 709 et 706 cm) et du tarage du canal jaugeur situé à l'aval du barrage, soit 7 l/s . 3600 = 25,2 m³.
- Le volume évaporé V_{ev} est également peu important, puisque l'évaporation journalière est en cette période de l'année de 3 mm seulement, soit de 3 / 24 = 0,125 mm en 1 heure. La surface du plan d'eau étant alors de 57 600 m² (cote de 707 cm), V_{ev} = 0,125 . 57 600 . 10⁻³ = 7,2 m³.
- En admettant que l'infiltration dans la retenue soit du même ordre de grandeur que celle évaluée en l'absence de débordements, le volume infiltré correspondant à une surface du plan d'eau de 57 600 m² est : Vis = (56 / 24) . 57 600 = 134 m³.
- Le volume des apports amonts est déduit de l'équation générale du bilan hydrique :

cotes	volumes	cotes	volumes	cotes	volumes	cotes	volumes
580	000	620	1 800	660	7 800	700	23 600
1	10	1	1 900	1	8 080	1	24 180
2	20	2	2 000	2	8 360	2	24 760
3	30	3	2 100	3	8 640	3	25 340
4	40	4	2 200	4	8 920	4	25 920
5	50	5	2 300	5	9 200	5	26 500
6	60	6	2 400	6	9 480	6	27 080
7	70	7	2 500	7	9 760	7	27 660
8	89	8	2 600	8	10 040	8	28 240
9	90	9	2 700	9	10 320	9	28 820
590	100	630	2 800	670	10 600	710	29 400
1	128	1	2 940	1	10 960	1	30 060
2	156	2	3 080	2	11 320	2	30 720
3	184	3	3 220	3	11 680	3	31 380
4	212	4	3 360	4	12 040	4	32 040
5	240	5	3 500	5	12 400	5	32 700
6	268	6	3 640	6	12 760	6	33 360
7	296	7	3 780	7	13 120	7	34 020
8	324	8	3 920	8	13 480	8	34 680
9	352	9	4 060	9	13 840	9	35 340
600	380	640	4 200	680	14 200	720	36 000
1	442	1	4 373	1	14 640	1	36 680
2	504	2	4 546	2	15 080	2	37 360
3	566	3	4 719	3	15 520	3	38 040
4	628	4	4 892	4	15 960	4	38 720
5	690	5	5 065	5	16 400	5	39 400
6	752	6	5 238	6	16 840	6	40 080
7	814	7	5 411	7	17 280	7	40 760
8	876	8	5 584	8	17 720	8	41 440
9	938	9	5 757	9	18 160	9	42 120
610	1 000	650	5 930	690	18 600	730	42 800
1	1 080	1	6 117	1	19 100	1	43 620
2	1 160	2	6 304	2	19 600	2	44 440
3	1 240	3	6 491	3	20 100	3	45 260
4	1 320	4	6 678	4	20 600	4	46 080
5	1 400	5	6 865	5	21 100	5	46 900
6	1 480	6	7 052	6	21 600	6	47 720
7	1 560	7	7 239	7	22 100	7	48 540
8	1 640	8	7 426	8	22 600	8	49 360
9	1 720	9	7 613	9	23 100	9	50 180
						740	51 000

Fig-261 - BAREME COTE - VOLUME DE LA RETENUE DE YATENGA

cotes	surfaces	cotes	surfaces	cotes	surfaces	cotes	surfaces
580	000	620	9 000	660	24 000	700	52 000
1	160	1	9 300	1	24 600	1	52 800
2	320	2	9 600	2	25 200	2	53 600
3	480	3	9 900	3	25 800	3	54 400
4	640	4	10 200	4	26 400	4	55 200
5	800	5	10 500	5	27 000	5	56 000
6	960	6	10 800	6	27 600	6	56 800
7	1 120	7	11 100	7	28 200	7	57 600
8	1 280	8	11 400	8	28 800	8	58 400
9	1 440	9	11 700	9	29 400	9	59 200
590	1 600	630	12 000	670	30 000	710	60 000
1	1 820	1	12 350	1	30 600	1	60 850
2	2 040	2	12 700	2	31 200	2	61 700
3	2 260	3	13 050	3	31 800	3	62 550
4	2 480	4	13 400	4	32 400	4	63 400
5	2 700	5	13 750	5	33 000	5	64 250
6	2 920	6	14 100	6	33 600	6	65 100
7	3 140	7	14 450	7	34 200	7	65 950
8	3 360	8	14 800	8	34 800	8	66 800
9	3 580	9	15 150	9	35 400	9	67 650
600	3 800	640	15 500	680	36 000	720	68 500
1	4 060	1	15 910	1	36 750	1	69 350
2	4 320	2	16 320	2	37 500	2	70 200
3	4 580	3	16 730	3	38 250	3	71 050
4	4 840	4	17 140	4	39 000	4	71 900
5	5 100	5	17 550	5	39 750	5	72 750
6	5 360	6	17 960	6	40 500	6	73 600
7	5 620	7	18 370	7	41 250	7	74 450
8	5 880	8	18 780	8	42 000	8	75 300
9	6 140	9	19 190	9	42 750	9	76 150
610	6 400	650	19 600	690	43 500	730	77 000
1	6 660	1	20 040	1	44 350	1	77 950
2	6 920	2	20 480	2	45 200	2	78 900
3	7 180	3	20 920	3	46 050	3	79 850
4	7 440	4	21 360	4	46 900	4	80 800
5	7 700	5	21 800	5	47 750	5	81 750
6	7 960	6	22 240	6	48 600	6	82 700
7	8 220	7	22 680	7	49 450	7	83 650
8	8 480	8	23 120	8	50 300	8	84 600
9	8 740	9	23 560	9	51 150	9	85 550
						740	86 500

Fig-262 - BAREME COTE - SURFACE DE LA RETENUE DE YATENGA

$$V_{ec} = \Delta V - V_p - V_{ecs} + V_{ev} + V_{id} + V_{if} + V_d + V_u$$

$$V_{ec} = -1\,740 - 0 - 0 + 7,2 + 25,2 + 134 + 3\,870 + 0 = 2\,296 \text{ m}^3$$

$$\text{Soit un débit } Q_{ec} = 2\,296 / 3\,600 = 0,638 \text{ m}^3$$

Les exemples proposés concernent des bilans calculés sur des intervalles de temps relativement courts. Toutefois, les mêmes principes peuvent s'appliquer au niveau mensuel ou annuel, et surtout à des retenues de capacité plus importantes.

A N N E X E S

(Réalisées avec la collaboration de Madame C. Maire)

Annexe 1

CARTE D'IMPLANTATION DES DIFFERENTS BASSINS REPRESENTATIFS ET EXPERIMENTAUX EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE FRANCOPHONE

Période : 1953 - 1990

Grandes zones climatiques cartographiées

- **EP Equatorial pur**

2 saisons des pluies

2 saisons sèches d'égale importance

Pan > 1 000 mm

8 mois avec P > 50 mm.

- **ET Equatorial de transition**

2 saisons sèches d'importance inégale, la plus sévère se situant en hiver.

- **TT Tropical de transition**

1 seule saison des pluies > 6 mois

1 seule saison sèche

6 à 7 mois avec P > 50 mm.

- **TP Tropical pur**

1 seule saison des pluies < 6 mois

700 < Pan < 1 000 mm

5 à 6 mois > 50 mm.

- **TSA Tropical semi-aride**

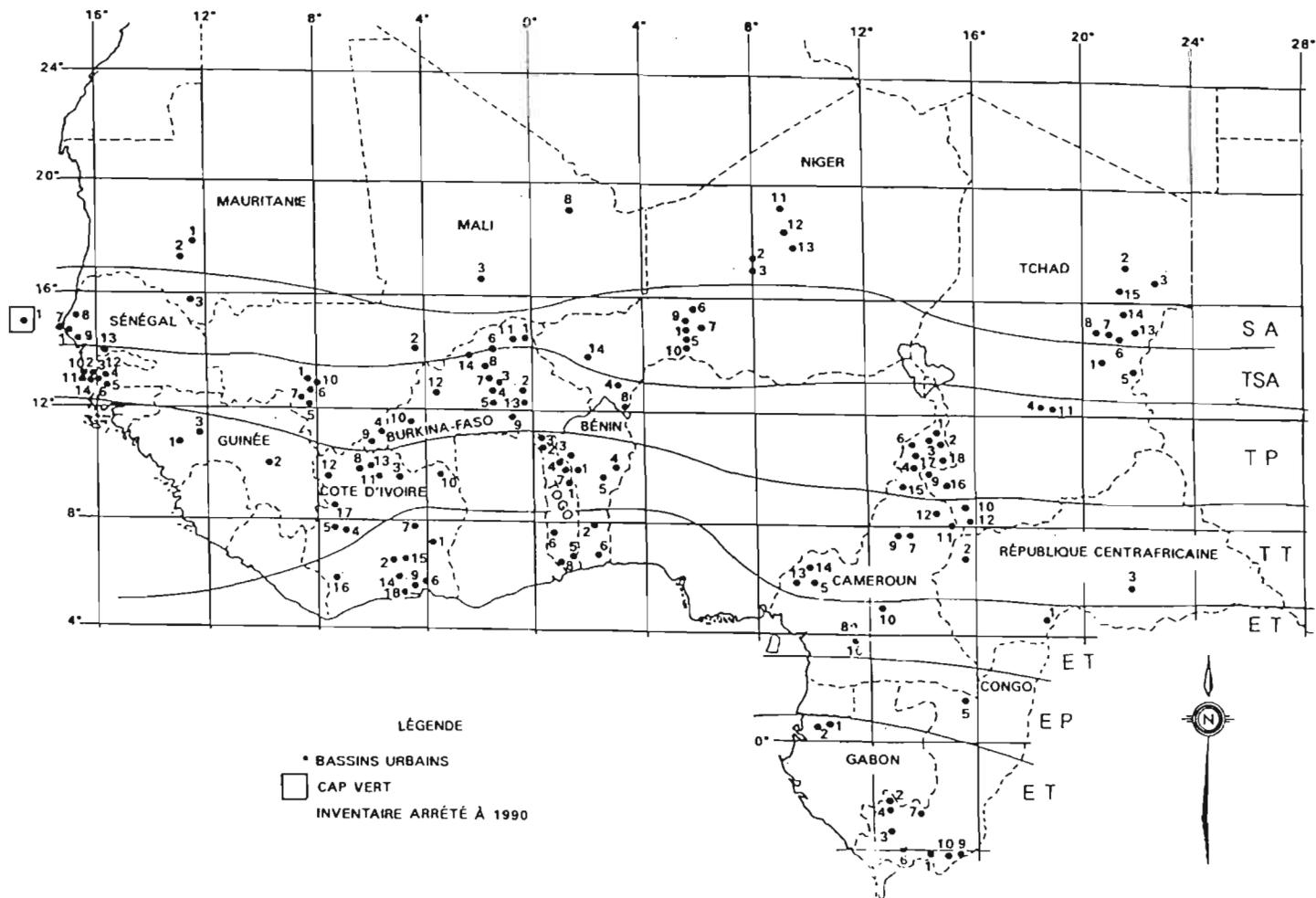
400 < Pan < 700 mm

3 à 4 mois > 50 mm.

- **SA Semi-aride**

100 < Pan < 400 mm

1 à 2 mois > 50 mm.



CAMEROUN

- 1 TSANAGA
- 2 LE BOULORE
- 3 GODOLA
- 4 MAYO KERENG
- 5 MAYO BALENG
- 6 MOGODE
- 7 BOUNDJOUK
- 8 MEFOU
- 9 MAYO REM
- 10 AVEA
- 11 TOUBORO
- 12 RISSO
- 13 MIFI
- 14 LA MONKIE
- 15 SANGUERE
- 16 OTTOTOMO
- 17 MOKOLO
- 18 MOUDA

COTE D'IVOIRE

- 1 IFOU
- 2 TOUMODI
- 3 FLAKOHO
- 4 NION
- 5 TONKOU
- 6 GUISSÉGUE
- 7 BOUAKE
- 8 PONONDOUGOU
- 9 AGNEBY
- 10 VARALE
- 11 LOSERIGUE
- 12 DOUMI
- 13 KORHOGO
- 14 AMITIORO
- 15 SAKASSOU
- 16 FORET DE TAI
- 17 BOORO-BOROTOU
- 18 YOPOUGON*

TCHAD

- 1 OUADI-KAOUN
- 2 KOURIEN-DOULIEN
- 3 BACHIKÉLE
- 4 BARLO
- 5 ABOU-GOULEM
- 6 TOROU
- 7 KOURO
- 8 TARAÏMAN
- 9 MAYO-LIGAN
- 10 BADE
- 11 BAM-BAM
- 12 MATAON
- 13 AM-NABAK
- 14 KADJEMEUR
- 15 SOFOYA
- 16 MAYO-DORBO

NIGER

- 1 MAGGIA-SABONGA
- 2 RAZELMAMOULMI
- 3 TELOUA-AGADES
- 4 KOULOU
- 5 KAOUARA
- 6 KOUNTKOUZOUT
- 7 VALLÉE DE KEITA
- 8 DALLOL-MAOURI
- 9 BADEGUICHERI
- 10 GALMI
- 11 IFEROUANE
- 12 TIMIA
- 13 TABELOT
- 14 NIAMEY*

BURKINA-FASO

- 1 GAGARA
- 2 BOULSA
- 3 LUMBILA
- 4 OUAGADOUGOU
- 5 NABAGALE
- 6 BODEO
- 7 TIKARE
- 8 ANSOURI
- 9 MANGA
- 10 NIENA-DIONKELE
- 11 MARE D'OURS
- 12 PLAINE DE KAMADENA
- 13 MIGA
- 14 BASSIN DE BIDI

SENEGAL

- 1 SEBKOTANE
- 2 DIARONE-BADIOURE
- 3 DIOUNKING
- 4 BOUNKILING
- 5 DIANGO
- 6 MARIGOT DE BIGNONA
- 7 MARIGOT DE M'BAO
- 8 PANETIOR
- 9 PELEO
- 10 MARIGOT DE BAILA
- 11 MARIGOT DE NIASSA
- 12 MARIGOT DE GUIDEL
- 13 THYSSE KAYMOR
- 14 DJIGUINOUM

CONGO

- 1 COMBA
- 2 LEYOU
- 3 MAKABANA
- 4 BIBANGA
- 5 MIELEKOUKA
- 6 PLAINE DE DIHESSE
- 7 FOUBOU
- 8 POINTE NOIRE*
- 9 BRAZZAVILLE*
- 10 MAKELEKELE*

MALI

- 1 DOUNFING
- 2 KOUMBAKA
- 3 TIN ADJAR
- 4 FARAKO
- 5 KAMGABA
- 6 BARRARO
- 7 DJIKITO
- 8 OUED DE KIDAL
- 9 KAMBO
- 10 BAMAKO*

TOGO

- 1 SARA
- 2 LA FOSSE AUX LIONS
- 3 NADJOUNDI
- 4 HIDENWOU
- 5 LAC ELIA
- 6 LA DAYE
- 7 KOZA
- 8 LOME*

BENIN

- 1 TERO
- 2 LHOTO
- 3 BOUKOMBE
- 4 TIAPALOUJ
- 5 DODOU
- 6 COTONOU*

MAURITANIE

- 1 SELOUMBO
- 2 DIONABA
- 3 GHORFA

GUINEE

- 1 MAYONKOURE
- 2 KANDALA
- 3 TIMBIS

REPUBLIQUE CENTRAFRICAINE

- 1 N'GOLA
- 2 SARKI
- 3 M'PATOU

GABON

- 1 MALA
- 2 NZEME

CAP VERT

- 1 SÃO NICOLAU

SITUATION DES BASSINS REPRESENTATIFS ET EXPERIMENTAUX EN AFRIQUE DE L'OUEST ET DU CENTRE

Annexe 2

SYNTHESE DES DIFFERENTS DISPOSITIFS DE MESURES ET D'OBSERVATIONS
UTILISES SUR 127 BVRE RURAUX AFRICAINS

Répartition des BVRE ruraux par Etat

Pays	Nombre de BVRE	Nombre de bassins et sous-bassins
Bénin	5	12
Burkina-Faso	13	51
Cameroun	18	60
Cap-Vert	1	2
Congo	7	19
Côte d'Ivoire	17	38
Gabon	2	5
Guinée	3	9
Mali	8	24
Mauritanie	3	10
Niger	13	48
République Centrafricaine	3	9
Sénégal	11	27
Tchad	16	36
Togo	7	11
Total	127	352

Répartition des BVRE ruraux par zones pluviométriques

P : mm	Nombre de BVRE
$P \leq 200$	10
$200 < P \leq 400$	9
$400 < P \leq 800$	25
$800 < P \leq 1600$	64
$P > 1600$	19
Total	127

**Répartition des bassins et sous-bassins ruraux par zones pluviométriques
et classes de superficie**

S : km ²						
P : mm	S ≤ 2	2 < S ≤ 10	10 < S ≤ 50	50 < S ≤ 200	S > 200	Total
P ≤ 200	3	4	6	8	11	32
200 < P ≤ 400	2	4	9	5	2	22
400 < P ≤ 800	11	11	25	17	14	78
800 < P ≤ 1600	19	30	57	42	20	168
P > 1600	4	11	18	10	9	52
Total	39	60	115	82	56	352

Equipements pluviométriques des BVRE ruraux.

Appareils	PG		PJ		PG + PJ + PT	
	PG/km ²	S : km ²	PJ/km ²	S : km ²	P/km ²	S : km ²
S ≤ 2 km ²	1,47	0,68	4,00	0,25	5,00	0,20
2 < S ≤ 10 km ²	0,30	3,3	0,89	1,12	1,19	0,84
10 < S ≤ 50 km ²	0,086	11,6	0,31	3,2	0,43	2,3
50 < S ≤ 200 km ²	0,027	37	0,066	15	0,092	11
S > 200 km ²	0,0057	175	0,025	40	0,025	40

PG : pluviographe

PJ : pluviomètre journalier

PT : pluviomètre totalisateur

P / km² : nombre d'appareils, par km²

S : km² : nombre de km² couverts, par appareil

Les valeurs données sont les médianes des échantillons.

Equipements hydrométriques des BVRE ruraux

Superficies	S 2	S 10	S 50	S 200	S 1000	Total
Nombre de B.V.	39	60	115	82	56	352
Exutoire naturel	10	37	85	54	40	226
Exutoire contrôlé	29	23	30	28	16	126
Limnigraphe	35	54	107	73	52	321
Passerelle	13	23	41	11	8	96
Déversoir	17	8	8	5	2	40
Parshall	6	1				7
Venturi	1	2	1			4
Pont	1	2	5	6		14
Téléphérique			9	5	5	19

- S 2 : bassins dont la superficie $S \leq 2 \text{ km}^2$
- S 10 : bassins dont la superficie $2 < S \leq 10 \text{ km}^2$
- S 50 : bassins dont la superficie $10 < S \leq 50 \text{ km}^2$
- S 200 : bassins dont la superficie $50 < S \leq 200 \text{ km}^2$
- S 1000 : bassins dont la superficie $S > 200 \text{ km}^2$

Equipements piézométriques des BVRE ruraux

	$S \leq 2 \text{ km}^2$	$2 < S \leq 10 \text{ km}^2$	$10 < S \leq 50 \text{ km}^2$	$50 < S \leq 200 \text{ km}^2$	$S > 200 \text{ km}^2$
PZ / km ²	16,4	4,4	0,074	0,05	0,003
S : km ²	0,06	0,23	13,5	20	330

PZ / km² : nombre d'appareils (piézomètres, piézographes ou puits), par km²

S : km² : nombre de km² couverts, par appareil

Les valeurs données sont les médianes des échantillons.

Statistiques diverses

- Un BVRE rural se composait en moyenne d'un bassin et de deux sous-bassins.
- Sur 127 BVRE :
 - . 70 étaient équipés d'une station climatologique.
 - . 42 ont fait l'objet de mesures d'infiltration dont 18 sous pluie simulée.
 - . 33 étaient équipées pour mesurer l'érosion (sur parcelle ou en station).
 - . 18 pour étudier la nappe souterraine.
 - . 11 pour mesurer l'humidité dans la zone d'aération.
 - . 5 pour effectuer un suivi physico-chimique de l'eau.

Annexe 3

FICHES TYPES

F1	Relevés pluviométriques : fiche mensuelle de terrain des relevés bi-journaliers
F2	Relevés pluviométriques : fiche annuelle de la pluviométrie journalière
F3	Enregistrements pluviographiques : fiche de dépouillement
F3'	Enregistrements pluviographiques : fiche de dépouillement avec correction
F4	Relevés limnimétriques : fiche mensuelle de terrain des relevés journaliers
F5	Mesure des débits : fiche de jaugeages
F6	Nivellement topographique : fiche de rattachement altimétrique d'échelles limnimétriques
F7	Enregistrements limnigraphiques : fiche de dépouillement
F8	Relevés climatologiques : fiche mensuelle de dépouillement des observations
F9	Mesure de l'insolation : fiche mensuelle de dépouillement
F10	Mesure des transports en suspension : fiche de dépouillement
F11	Mesure de l'humidité du sol : fiche de dépouillement des mesures à la sonde à neutrons
F12	Fiche mensuelle de collationnement : pluviométrie, piézométrie, etc.

RELEVÉS PLUVIOMETRIQUES

F1

Relevés de: DJIGUINOUM R1

Relevés de: DJIGUINOUM R1

Mois de: JUIN Année: 1989

Mois de: JUIN Année: 1989

Date	Matin	Soir	Date	Matin	Soir	Date	Matin	Soir	Date	Matin	Soir
1			16			1			16		
2			17		29,3 (18 ^H)	2			17		29,3 (18 ^H)
3			18			3			18		
4			19			4			19		
5			20	1,6 (7 ^H)		5			20	1,6 (8 ^H)	
6			21			6			21		
7			22			7			22		
8			23		2,0 (18 ^H)	8			23		2,0 (18 ^H)
9			24		4,8 (16 ^H)	9			24		4,8 (18 ^H)
10			25			10			25		
11			26			11			26		
12			27		39,8 (18 ^H)	12			27		39,8 (16 ^H)
13			28			13			28		
14			29			14			29		
15			30		59,7 (18 ^H)	15			30		59,7 (15 ^H)
			31		—				31		—

BASSIN = _____ STATION = DTILGUINDUM J8

FICHE METEOROLOGIQUE

Source des renseignements = _____

Année 19	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	Maxi journalie
Température	max													
	moy													
	min													
Evaporation totale														
Pluviométrie 19														
FREQUENCES	0,1 à 10													
	10,1 à 20													
	20,1 à 30													
	30,1 à 40													
	40,1 à 50													
	50,1 à 60													
	60,1 à 70													
	70,1 à 80													
	80,1 à 90													
	90,1 à 100													
> 100														
> 125														
N. de jours de pluie														
PLUVIOMETRIE JOURNALIERE	1						2,0	23,3	0,4					1
	2						7,3	5,7	10,5					2
	3								27,8	5,2				3
	4													4
	5						44,8		48,5	7,6				5
	6						7,6			3,9				6
	7							10,7						7
	8									16,8				8
	9									49,8	6,8			9
	10													10
	11							1,2	2,2	24,3	1,6			11
	12							7,0	2,5	9,1	2,0			12
	13							5,6	6,6		2,8			13
	14								28,3	33,5				14
	15							16,8		1,7				15
	16								29,5	34,0				16
	17								9,1					17
	18							0,2		2,1				18
	19													19
	20						0,6	3,5						20
	21							31,4		47,4				21
	22													22
	23						0,9	18,2		11,5				23
	24						4,7	47,5	58,9					24
	25							18,9						25
	26							9,1	10,7	34,9				26
	27						40,1	2,2	12,0					27
	28							8,7	57,8	13,8				28
	29							36,4	1,7					29
	30		X				67,5	24,3	8,1					30
	31		X		X		X			X		X		31
						113,8	286,8	263,0	354,3	47,7			1065,6	

LIMNIMETRIE

F4

Rivière : RISSO

Station : 54

Observateur : DJINOUM

Relevé du mois de : JUILLET

Année : 1967

Jour	Hauteur à 7 h	Hauteur à 12 h	Hauteur à 17 h	Observations	Jour	Hauteur à 7 h	Hauteur à 12 h	Hauteur à 17 h	Observations
1	0,06				16	0,12			
2	0,06				17	0,115			
3	0,07	0,25	0,42	max. 0,72	18	0,11			
4	0,07				19	0,36	0,63	0,83	max. 1,55
5	0,065				20	0,18			
6	0,06				21	0,15			
7	0,06	0,10	0,36	max. 0,47	22	0,14			
8	0,08				23	0,145			
9	0,075				24	0,13	0,22	0,25	max. 0,36
10	0,22	0,39	0,43	max. 0,72	25	0,14			
11	0,10				26	0,13			
12	0,095				27	0,125			
13	0,09				28	0,12	0,46	0,32	max. 0,52
14	0,10	0,36	1,15	max. 1,22	29	0,18			
15	0,40	0,26			30	0,16			
					31	0,15			

FICHE METEOROLOGIQUE MENSUELLE - Dépouillement des observations

STATION N' DOCK

MOIS Juin 1966

BASSIN Risso (CAMEROUN)

Jours	Température de l'air (C°)									Humidité de l'air (%)			Tension de vapeur d'eau (mb)			Pluie au sol (mm)			Evaporation bac (mm)				Température bac (C°)			Piche (mm)		Héliog 1/10h	Vitesse moyenne de vent (m/s)			Direction du vent			Pluie 1,50 m (mm)		
	6h		12h		18h		T	T	T	6h	12h	18h	6h	12h	18h	6h*	18h	6h*	18h	6h	12h	18h	6h*	18h	6h	12h	18h		6h	12h	18h	6h*	18h	Tot.			
	Ts	Th	Ts	Th	Ts	Th	maxi	mini	moy																												
1	24,4	23,7	30,6	23,8	27,6	25,4	32,6	22,3	27,5	94	51	83	28,8	23,8	32,7		4,5	4,9		1,1		5,6	25,6	28,3	25,2		4,5	8,0	0,2	1,6	1,3	W	SW	SE		4,1	4,4
2	24,2	23,7	32,0	27,6	28,6	26,5	32,6	24,0	29,2	96	70	84	28,9	33,5	33,0	0,4	2,2	2,5	2,0	2,5	2,4	4,7	25,3	28,2	26,3	1,8	2,9	6,7	1,8	2,5	1,6	E	NE	SE	0,3	2,1	2,3
3	24,6	23,8	28,6	25,7	27,0	25,3	30,0	22,5	26,7	93	78	87	28,9	30,8	30,9	0,3	0,0	0,0	1,8	2,8		2,9	25,8	26,3	24,1	1,6	2,7	5,2	2,3	3,1	2,1	NW	N	NE	0,2	0,0	0,0
4	25,0	24,2	28,7	25,8	28,4	26,6	30,3	23,9	27,3	96	87	89	25,5	30,5	32,5	0,0	1,5	2,7	1,5	3,5	1,9	5,0	26,3	27,2	25,8	1,4	2,0	7,6	4,2	5,3	3,8	SW	W	NW	0,0	1,3	2,4
5																1,2			2,8		3,7															1,1	
6																																					
7																																					
8																																					
9																																					
10																																					
11																																					
12																																					
13																																					
14																																					
15																																					
16																																					
17																																					
18																																					
19																																					
20																																					
21																																					
22																																					
23																																					
24																																					
25																																					
26																																					
27																																					
28																																					
29																																					
30																																					
31																																					
Total																																					
Moy.																																					

* Les heures marquées d'un astérisque se rapportent au jour précédent - Ts : thermomètre sec - Th : thermomètre humide - Direction vent : N, NW, W, SW, S, SE, E, NE

Annexe 4

BIBLIOGRAPHIE THEMATIQUE

- 100 - Bassins versants représentatifs et expérimentaux
- 200 - Cartographie, Télédétection, Morphométrie
- 300 - Pluviométrie
- 400 - Hydrométrie
- 600 - Erosion
- 700 - Hydrodynamique des sols
- 800 - Eau souterraine
- 900 - Qualité des eaux
- 1000 - Hydrologie
- 1100 - Modélisation

Les références sont classées par ordre alphabétique d'auteurs.

Les cotes MH... sont celles du Laboratoire d'Hydrologie du Centre ORSTOM de Montpellier.



Bassins Versants Représentatifs et Expérimentaux

- 101 - ABRH, 1983. V Simposio Brasileiro de Hidrologica e Recursos Hidricos, 1983. 195 p. RBE Anais n°1. MH 61502
- 102 - AISH, 1965. Bassins représentatifs et expérimentaux = Representative and experimental areas. Symp. Budapest, 28 sept. au 10 oct. 1965, vol.1 et 2. Gentbrugge (BE), AISH, 1-346, 347-708. AISH Publication n°66. MH 41002
- 103 - Ambroise B., Najjar G., Humbert J., Viville D., Mercier J.L., 1982. Hydrological research basins and their use in water resources planning. In : Proceeding of the International Symposium, Berne (CH), 21-23 sept. 1982. Bern (CH), Service Hydrologique National, 2 : 249-257. MH 81208
- 104 - AUPELF, UREF, EIER, R3S, 1991. Compte rendu des Journées Scientifiques du Programme Génie Para-Sécheresse : utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride, Ouagadougou (BF), 12-15 mars 1990, 10 p.
- 105 - Bagnan B., 1978. Rôles des bassins représentatifs ou expérimentaux en hydrologie opérationnelle et appliquée : quelques résultats obtenus en République du Niger, tome 2. Mémoire de 3ème cycle, Hydrologie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 64 p. MH 71888
- 106 - Bernier J., (1967). Planification et interprétation statistique des observations hydrométéorologiques sur bassins représentatifs et expérimentaux. (FR), EDF, 11 p. + ann. MH 60864
- 107 - Bernier J., 1966. Sur le rôle de la méthode et des techniques statistiques dans les recherches sur bassins représentatifs et expérimentaux. Chatou (FR), EDF, 4 p. HYD-66 n°20. MH 60515
- 108 - Body D.N. (éd.), 1982. Application of results from representative and experimental basins : a contribution to the International Hydrological Programme, project 4.1. Paris, The UNESCO Press, 477 p. Studies and Report in Hydrology.
- 109 - Canadian National Committee, 1966. Guidelines for research basin studies. Proceedings of the National Workshop Seminar on Research Basin Studies, Ottawa, 12-14 janvier 1966, 44 p. MH 60986
- 110 - Da Costa, J.A., Jacquet, J., 1965. Présentation des résultats de l'enquête UNESCO-AISH sur les bassins représentatifs et expérimentaux dans le monde. Gentbrugge (BE), AISH, 107-119. AISH Publication n°4. MH 80802
- 111 - DGRST, Action concertée Eau-BEP, 1970. Recommandations relatives à un programme minimum commun des études menées sur bassins versants d'investigation. Paris, DGRST, 38 p., + ann. MH 60410
- 112 - Djonde G., 1981. Le développement des réseaux hydropluviométriques, planification et rationalisation, détermination des zones hydrologiques homogènes. Mémoire de DEA, Science de l'eau, Paris 6, 57 p. MH 72110
- 113 - Dubreuil P., 1972. Recueil de données de base des bassins représentatifs et expérimentaux, années 1951-1969. Paris, ORSTOM, 916 p.

- 114 - Dubreuil P., 1966. Bassins représentatifs et expérimentaux : réflexions sur le symposium AISH de Budapest, sept. 1965. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrologie, 3 (4) : 15-26.
- 115 - Dubreuil P., 1968. Estimation de l'écoulement en région mal connue à l'aide des bassins représentatifs. Colloque franco-polonais, mars 1968, 11 p. MH 71013
- 116 - Dubreuil P., 1988. Les bassins versants représentatifs et expérimentaux pour une surveillance à long terme des ressources en eau et de leurs modifications. CEMAGREF, 19 p.
- 117 - Dubreuil P., 1965. Méthodologie d'exploitation du bassin représentatif : élaboration et classement des données d'observations. Symposium of Budapest (HU), 1965. Gentbrugge (BE), AISH, 262-274. AISH Publication n° 66.
- 118 - Dubreuil P., 1989. Pour un suivi à long terme de l'évolution des ressources en eau grâce à un réseau européen de bassins de référence. Hydrogéologie, 2, 111-114. MH 81413
- 119 - Dubreuil P., 1965. Contribution à l'étude d'implantation de bassins représentatifs de régions hydrologiques homogènes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 2 (2) : 3-20.
- 120 - Hadley R., s.d. Classification of representative and experimental basins : first preliminary edition. Paris, UNESCO, 16 p. MH 30059
- 121 - IAHS, 1971. Results of research on representative and experimental basins = Résultats des recherches sur les bassins représentatifs et expérimentaux. Colloque de Wellington (N.Z.), 2, 1-8 déc. 1970. Paris, IAHS, UNESCO, 737 p. IAHS Publication n°96. MH 41010
- 122 - Jacquet J., 1964. Les recherches hydrologiques sur bassins versants expérimentaux : problèmes d'équipement et d'exploitation ; organisation de recherches concertées. Colloque franco-polonais sur la recherche dans le domaine de l'eau, Varsovie (PL) , sept. 1964. Chatou (FR), EDF, 17 p. + ann. MH 61241
- 123 - Jacquet J., Cormary Y., 1965. L'étude du cycle de l'eau sur un bassin d'investigation. La Houille Blanche, 3 : 269-274. MH 81215
- 124 - Kienitz G., 1974. International coopération in research on representative basins : first preliminary edition. Paris, UNESCO, 10 p. MH 60593
- 125 - National Academy of Sciences, U.S.IHD, 1974. International hydrological decade : representative and experimental basins in the United States. Catalog of available data and results 1965-1972. Washington, U.S.IHD, 149 p. MH 10515
- 126 - New Zealand Ministry of Works, Water and Soil Division, 1970. Representative basins of New Zealand, 1970. Wellington (NZ), IHD, 291 p. Miscellaneous hydrological publication N°7. MH 10328
- 127 - Nouvelot J.F. 1977. Préparation du projet d'implantation d'un bassin représentatif. Recife (BR), SUDENE, ORSTOM, 24 p.
- 128 - Nouvelot J.F., 1974. Instruções de exploração das bacias representativas no campo. Recife (BR), SUDENE, ORSTOM, 39 p.
- 129 - Nouvelot J.F., 1974. Planificação da implantação de bacias representativas. Recife (BR), SUDENE, ORSTOM, 91 p. + cartes.
- 130 - OMM (Organisation Météorologique Mondiale), 1971. Quelques recommandations pour l'exploitation des bassins versants représentatifs et expérimentaux et l'analyse des données. Genève, OMM, 34 p. Rapports sur les projets OMM/DHI n°15.

- 131 - Ouryvaev V., Toebes C. (eds.), 1970. Les bassins représentatifs et expérimentaux : guide international des pratiques en matière de recherche. Contribution à la décennie hydrologique internationale. UNESCO, 180 p. Etudes et Rapports d'Hydrologie n°4. MH 30037
- 132 - PRONAREG, ORSTOM, 1978. Definicion, metodologia y alcance de los estudios hidrometeorologicos en cuencas vertientes representativas y/o experimentales. Quito (EC), PRONAREG, ORSTOM, 14 p.
- 133 - Rodier J.A., 1975. State-of-art report on research on experimental and representative basins = Rapport sur l'état actuel des recherches sur bassins représentatifs et expérimentaux. 2 vol. Genève, World Meteorological Organisation, 34 p et 43 p. MH 71645
- 134 - Rodier J.A., 1976. Utilisation des bassins représentatifs expérimentaux en hydrologie opérationnelle. 42 p. MH 71654
- 135 - Rodier J.A., 1972. Intérêt d'une politique systématique d'aménagement de bassins versants représentatifs et expérimentaux. Journées d'Etudes de l'Eau, Strasbourg (FR), mars 1973. S.l., s.n., 7 p. MH 71245
- 136 - Rodier J., 1982. La transposition des résultats des bassins représentatifs et ses problèmes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 19 (2) : 115-127.
- 137 - Serra L., 1967. Les bassins expérimentaux : cours UNESCO de Tunis pour techniciens hydrologues, sept-déc. 1966. S.l., UNESCO, 10 p. MH 60461
- 138 - WMO, IAHS, 1965. Design of hydrological networks = planification des réseaux hydrologiques. Symp. Québec (CA), 15-22 juin 1965. Gentbrugge (BE), IAHS, 409 p. IAHS Publication n°67. MH 41015
- 139 - W.M.O., 1978. Casebook on hydrological design practice. Genève, WMO. n°324.

Cartographie - Télédétection - Morphométrie

- 201 - Archambault M., Lhénaff R., Vanney J.R., 1987. Documents et méthodes pour le commentaire de cartes (géographie et géologie), 2 fasc. 2ème ed. Paris, Masson, 98 p. + 186 p. + pl. MH 10885
- 202 - Assad E.D., 1987. Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne, cas du Sénégal. Thèse de Doctorat, Science de l'Eau, USTL, Montpellier, 1987/01/08. 258 p. MH 61856
- 203 - CNRS, 1967. Notice de base relative aux projets d'expressions cartographiques des climats aux moyennes et grandes échelles. Saint Martin d'Hères-Grenoble, CNRS, 7 p. + cartes. MH 10185
- 204 - Cairo L., Delannoy C., Graham I.D.G., Storey L.R.O., Canceill M., Domazewski B., Vuillaume Y., 1976. Identification des caractéristiques des images de détecteur multispectral à balayage, utiles pour la recherche hydrogéologique, 2 tomes. S.I., CNRS, BRGM, 195p.+ 20 p. + fig. Note tech. CRPE-19 ; BRGM 76 SGN 019 AME. MH 10583
- 205 - Carré J., 1971. Lecture et exploitation des photographies aériennes, 2 tomes. Paris, Eyrolles, 213 p. + 212 p. Collection Technique de l'IGN. MH 10331
- 206 - De Montmollin F., Olivier R., Zwahlen F., 1979. Utilisation d'une grille d'altitudes digitalisées pour la cartographie d'éléments du bilan hydrique. J. of Hydrology, 44 : 191-209.
- 207 - De Montmollin F., Olivier R., Zwahlen F., 1979. Cartographie automatique des éléments du bilan hydrique. Berne (CH), Serv. Hydrol. Nat., 39 p. Communication du Service Hydrologique National n°1.
- 208 - Depraetère C., 1989. LAMONT : Logiciel d'Application des MOdèles Numériques de Terrain. Paris, ORSTOM, 128 p. Notice OVNIH du Laboratoire d'Hydrol. n°4.
- 209 - Depraetère C., 1989. Etude géomorphologique du bassin-versant de Booro-Borotou à partir d'un modèle numérique de terrain. ORSTOM, 11 p. MH 81445
- 210 - Domenico P., Stephenson D., 1964. Application of quantitative mapping techniques to aid in hydrologic systems analysis of alluvial aquifers. J. of Hydrology, 2 : 164-181. MH 20014
- 211 - Dubreuil P., 1966. Les caractères physiques et morphologiques des bassins versants ; leur détermination avec une précision acceptable. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (5) : 13-29.
- 212 - Dubreuil P., 1969. Compléments pratiques aux règles de mesure des caractères morphologiques des bassins versants. Paris, ORSTOM, 19 p. Sér. Tech. N° 19.
- 213 - Dubreuil P., Morell M., Séchet P., 1975. Comportement et interaction des paramètres physiques de petits bassins versants semi-arides et intertropicaux. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (1) : 13-36.
- 214 - Gallaire R., 1978. Action des paramètres physico-morphométriques sur l'écoulement. Mémoire de DEA, Science de l'eau, Paris 6, Juil. 1978, 241 p. MH 72361

- 215 - Jarry F., Normand M., Bernard R., Vidal-Madjar D., 1988. Observation de la réponse de surfaces agricoles aux pluies par télédétection en hyperfréquence active aéroportée. Hydrol. Continent., 3 (2) : 75-87.
- 216 - Lagacherie P., Depraetère C., 1989. Analyse des relations sol-paysage au sein d'un secteur de référence en vue d'un zonage pédologique semi-automatisé d'une petite région naturelle. ORSTOM, 22 p. MH 81444
- 217 - Lamachère J.M., 1988. Interprétation des images satellitaires spot et cartographie des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols sur un bassin versant sahélien : le bassin versant de la Mare d'Oursi - Burkina Faso. Journées Techniques du CIEH, 9-11 février 1988. Ouagadougou, CIEH, 18 p. MH 81266
- 218 - Martin R., Challine R., 1973. Photogrammétrie. Paris, Eyrolles, 394 p. Bibliothèque de l'Institut de Topométrie du CNAM. MH 10951
- 219 - Moniod F., 1983. Deux paramètres pour caractériser le réseau hydrographique. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 20 (3-4) : 191-203.
- 220 - Normand M., Loumagne C., Galle S., Jarry F., 1988. Etat hydrique du sol et hydrologie : mesures ponctuelles et télédétection en hyperfréquences. 25ème anniv. du bassin de l'Orgeval, 18 oct. 1988. CEMAGREF, 11 p. MH 81473
- 221 - Puech C., Carette J., 1989. Apport de la télédétection à l'aménagement des bassins versants par petits ouvrages en Afrique soudano-sahélienne : guide élaboré à l'occasion d'une opération d'appui formation à l'AFVP. Montpellier (FR), LCT (CEMAGREF/ENGREF), 166 p. MH 61938
- 222 - Roux C., Lebel T., Depraetère C., Andrieu H., 1989. Simulation à l'aide d'un modèle numérique de terrain des échos de sol détectés par un radar météorologique. Hydrol. Continent., 4 (2) : 139-149.
- 223 - Ruellan F., 1967. Photogrammétrie et interprétation des photographies stéréoscopiques terrestres et aériennes : initiation. Paris, Masson. MH 10202

Pluviométrie

- 301 - Bouvier C., 1983. Etude des effets de dépendance dans une série chronologique : application à l'étude des séquences de jours de pluie. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 20 (2) : 79-116.
- 302 - Boyer J.F., Crespy A., Dieulin C., Guiscafré J., Raous P., 1989. Pluviom, logiciel de gestion de données pluviométriques : manuel d'utilisation. Montpellier (FR), ORSTOM, 200 p.
- 303 - Brunet-Moret Y., 1979. Homogénéisation des précipitations. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 16 (3-4) : 147-170.
- 304 - Brunet-Moret Y., Roche M., 1966. Etude théorique et méthodologique de l'abattement des pluies. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (4) : 3-13.
- 305 - Chevallier P., Lapetite J.M., 1986. Note sur les écarts de mesure observés entre les pluviomètres standards et les pluviomètres au sol en Afrique de l'Ouest. Hydrol. Continent., 1 (2) : 111-119.
- 306 - CTGREF, 1980. Bassin du Réal Collobrier : analyse de la pluviométrie par la méthode des composantes principales. Aix en Provence (FR), CTGREF, 44 p. Etude n°19.
- 307 - Dir. de l'Hydraulique (MA) 1975. Exploitation des pluviographes enregistreurs. Rabat (MA), Min. des T.P. et des Communications. MH 71900
- 308 - Galéa G., Michel C., Oberlin G., 1982. Pluies des bassins : abattement sur une surface des averses de 1 h à 24 h. Antony (FR), CEMAGREF, 127 p. Etude n° 54. MH 61524
- 309 - Girard G., 1974. Etude de l'interception par la forêt aux Iles Loyautés (Ile Lifou en Nvelle Calédonie), rapport préliminaire. Paris, ORSTOM, 8 p. + ann. MH 71465
- 310 - Hiez G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 14 (2) : 129-172.
- 311 - Hubert H., 1922. Nouvelles recherches sur les grains orageux et les pluies en Afrique occidentale. Paris, Larose, 42 p. MH 10081
- 312 - Hubert P., Carbonnel J.P., 1989. Dimensions fractales de l'occurrence de pluie en climat soudano-sahélien. Hydrol. Continent., 4 (1) : 3-10.
- 313 - Jacquet J., 1960. Répartition spatiale des précipitations à l'échelle fine et précision des mesures pluviométriques : résultats d'analyse statistique des observations pluviométriques effectuées de 1952 à 1959 sur le terrain expérimental d'Alrance. Chatou (FR), EDF, 16 p. MH 60360
- 314 - Laborde J.P., Lempereur R., 1986. Les pluies sur des petits bassins versants : une fonction aléatoire dont on peut estimer le variogramme. Hydrol. Continent., 1 (1) : 3-14.
- 315 - Lafosse B., 1980. Pluie moyenne sur un bassin : étude expérimentale de la précision des résultats suivant la densité des pluviographes. La Météorologie, 6ème série, 20-21 : 243-253.

- 316 - Larroucau G., 1966. Notes de l'établissement d'études et de recherches météorologiques : erreurs sur les mesures pluviométriques. Magny les Hameaux (FR), Min. des T.P. et des Transports, 9 p. Note n°98. MH 30010
- 317 - Larroucau G., 1967. Notes de l'établissement d'études et de recherches météorologiques : erreurs sur les mesures pluviométriques (suite). Magny les Hameaux (FR), Min. des T.P. et des Transports, (9 p.). Note n°246. MH 30010
- 318 - Lebel T., 1984. Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes. Thèse de Doct., Hydrologie, Inst. Nat. Polytech. Grenoble, fév.1984, 339 p. MH 72386
- 319 - Meylan P., 1986. Régionalisation de données entachées d'erreur de mesure par krigeage : application à la pluviométrie. Hydrol. Continent., 1 (1) : 25-34.
- 320 - Min. des Transports, Dir. de la Météorologie, 1983. Notice d'Installation et d'utilisation du pluviomètre Spiea modifié M.N. Paris, Min. des Transport, 9 p. R01-2050-A.
- 321 - Roche M., 1968. Traitement automatique des données hydrométriques et des données pluviométriques au service hydrologique de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 5 (3) : 5-119.
- 322 - Rossignol D., 1989. Anomalies de fonctionnement des augets basculeurs à contact de mercure. Guadeloupe, ORSTOM, 3 p. MH 72782
- 323 - Service Technique de l'Urbanisme. 1985. Catalogue des appareils de mesure des précipitations (document provisoire). Paris, Service Technique de l'Urbanisme, 150 p.
- 324 - Sircoulon J., 1986. Contribution de l'ORSTOM à la connaissance des précipitations en Afrique de l'Ouest et Centrale. Hydrol. Continent., 1 (2) : 153-160.
- 325 - Sircoulon J., Cruette J., 1968. Le calcul des pluies moyennes mensuelles et annuelles sur bassin versant, avec méthode de substitution des pluviomètres pour les observations manquantes, en traitement automatique. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 5 (4) : 42-56.
- 326 - Société Météorologique de France, 1980. Précipitations et hydrologie (numéro spécial). La Météorologie, 20-21 : 334 p.
- 327 - Touchebeuf de Lussigny P., 1970. Calcul automatique de l'abattement des pluies journalières. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (1) : 87-98.
- 328 - Vuillaume G., 1974. L'abattement des précipitations journalières en Afrique intertropicale. Variabilité et précision de calcul. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 11 (3) : 205-240.
- 329 - Perrin de Brichambaut, C., 1977. Les instruments de mesures météorologiques. Cahiers d'Information de la Météorologie Nationale, 1 : 60 p.

Hydrométrie

- 401 - AFNOR, 1983. Mesure de débit des fluides : tome 2, canaux découverts. 2ème éd. Paris, AFNOR, 259 p.
Recueil de Normes Françaises. MH 10805
- 402 - Aldegheri M., 1978. Stations téléphériques de jaugeage (description, notes de calcul et règles à observer pour leur installation). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 15 (3) : 213-259.
- 403 - Aldegheri M., 1979. Manuel d'hydrométrie, tome 4 : mesure des débits à partir des vitesses. Paris, ORSTOM, 313 p. Initiations, Documents Techniques n° 41.
- 404 - André H., 1964. Hydrométrie pratique des cours d'eau : jaugeages par la méthode de dilution. Grenoble (FR), ENSEHRMA, Faculté des Sciences, 88 p. MH 10017
- 405 - André H., Amenet M., Mazeran G., River J., 1976. Hydrométrie pratique des cours d'eau. Paris, Eyrolles. MH 10610
- 406 - André, J.C., Molinari, J., 1976. Mises au point sur les différents facteurs physico-chimiques influant sur la mesure de concentration de traceurs fluorescents et leurs conséquences pratiques en hydrologie. Journal of Hydrologie, 3 : 257-285. MH 20014
- 407 - Armandier J., Tartès R., Arrighi de Casanova J., 1954. Mesureur de débit Parshall. Arles-sur-Rhône (FR), Min. de l'Agriculture, 24 + 20 + 14 p. MH 61049
- 408 - Barthélémy J., 1967. Rapport d'étude sur les mesures de débit des effluents industriels. Paris, DGRST, 46 p. MH 61050
- 409 - Bos M.G. (ed.), 1976. Discharge measurement structures. Wageningen (NL), ILRI, Landbouwhogeschool, 464 p. Rapport 4.
- 410 - Boyer J.F., Cochonneau G., Dieulin C., Rouché N., 1989. Hydrom, logiciel de banque de données hydrométriques : manuel de l'opérateur. Montpellier (FR), ORSTOM, 100 p.
- 411 - Brakeniek D.L., Osborn H.B., Rawls W.J. (coord.), 1979. Field manual for research in agricultural hydrology. Washington, USDA, 547 p. Agriculture Handbook n°224.
- 412 - Carlier M., 1972. Hydraulique générale et appliquée. Paris, Eyrolles, 565 p. Coll. du Centre de Recherche et d'Essais de Chatou. MH 10372
- 413 - CEMAGREF, 1981. L'extrapolation des courbes de tarage en hydrométrie, fascicule 1 : rappel des méthodes classiques, exemples d'application. Antony (FR), CEMAGREF, 76 p. Note Technique n°10. MH 61761
- 414 - Chebotarev A.I., 1977. Compendium of meteorology, volume 2, part 1 : general hydrology. Genève, WMO, 42 p. WMO n°364.
- 415 - Chouret A., 1969. Application de la méthode de dilution (jaugeages chimiques) sur les rivières de Madagascar. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (2) : 3-16.

- 416 - Cochonneau G., 1989. Hydrom, logiciel de banque de données hydrométriques : manuel de l'utilisateur. Montpellier (FR), ORSTOM, 180 p.
- 417 - Commission Economique pour l'Afrique, OMM, 1969. Instruments, observations et réseaux hydrométéorologiques en Afrique. Compte rendu du cycle d'études sur l'emploi des instruments hydrométéorologiques. Genève, OMM, 246 p.
- 418 - Cruette J., 1971. Jaugeage au moulinet et aux flotteurs. Paris, ORSTOM, 47 p. MH 71374
- 419 - Cruette J., 1971. Limnimétrie, 4- Hydrométrie, 40 p. MH 71375
- 420 - Cruette J., 1975. Méthodologie pour la mesure des crues brutales. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (1) : 3-12.
- 421 - Cruette J., Rodier J.A., 1971. Mesures de débits de l'Oued Zéroud pendant les crues exceptionnelles de l'automne 1969. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 8 (1) : 33-64.
- 422 - Dubreuil P., Lamagat J.P., Vuillaume G., 1970. Tarage et calcul des débits des stations hydrométriques non univoques. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (3) : 3-72.
- 423 - EDF, 1966. Méthode de jaugeage par déversoirs triangulaires en mince paroi : barèmes hauteurs-débits. Paris, EDF, 55 p. E.M.H. 6100-27.
- 424 - Escandre L., 1947, 1948, 1950. Hydraulique générale, 3 tomes. Toulouse (FR), E. Privat, 327 + 359 + 380 p. MH 10268
- 425 - Escande L., 1947-1951. Compléments d'hydraulique. 2 tomes. Paris, Dunod, 220 + 248 p. MH 10269
- 426 - Escande L., 1953, 1955, 1958, 1963. Nouveaux compléments d'hydraulique, 4 tomes. Paris, Min. de l'Air, 232 + 274 + 190 + 219 p. Publ. Sc. et Tech. du Min. de l'Air. MH 10270
- 427 - Etablissements Neyrpic, 1957. Equipement des canaux d'irrigation. Grenoble (FR), Neyrpic, 43 p. MH 10071
- 428 - Gallé-Cavallon H., Farand R., 1973. Stations de jaugeage en haute altitude, principes et méthodes de réalisation. Orléans (FR), BRGM, 20 p. + ann. 73 SGN 151 AME. MH 60793
- 429 - Gautier M., Lebel T., 1990. Technologies nouvelles en hydrologie de surface, acquisition et exploitation des données : document n°1, pluviométrie et limnimétrie électronique. Stage de formation, session de mars-avril 1990. Montpellier (FR), ORSTOM.
- 430 - Gioda A., Le Barbé L., Delfieu G., 1989. Traçage à la rhodamine B. Montpellier (FR), ORSTOM, 19 p.
- 431 - Habib J., s.d. Mesure du débit des canaux et rivières au moyen du débitmètre Parshall. 11 p. MH 80730
- 432 - Habib J., s.d. Modification des débitmètres Parshall pour la mesure de débits à grande amplitude de variation. 8 p. MH 80731
- 433 - Herschy R.W., 1978. Hydrometry. J. Wiley and Jones. MH 10701
- 434 - ISO (Organisation Internationale de Normalisation), 1983. Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. 1ère éd. Genève, ISO, 540 p., Recueil de Normes ISO 16.
- 435 - Jacon G., 1975. Formation permanente des techniciens hydrologues : critères de choix du site d'une station hydrométrique. Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique, 12 p. Note Technique n°61/SHYL. MH 71514

- 436 - Jacon G., 1974. Bassins versants expérimentaux de l'Isser-Tafna. Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique, 22 p. Note Technique n°007/NT, code 16.
- 437 - Jacon G., 1986. Manuel d'hydrométrie, tome 5 : tracé de la courbe de tarage et calculs des débits. Brasilia (BR), ORSTOM, 225 p. + ann. Initiations, Documentations Techniques n°70.
- 438 - Jacon G., 1975. Formation permanente des techniciens hydrologues : à propos des échelles limnimétriques. Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique, 13 p. Note Technique n°66/SHYL.
- 439 - Jacon G., Tourne M., 1975. Formation permanente des techniciens hydrologues : jaugeages par la méthode des verticales indépendantes. Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique, 16 p., ann. Note technique 60/SHYL. MH 71512
- 440 - Jacon G., Tourné M., 1975. Formation permanente des hydrologues : estimation d'un débit de crues par la mesure des vitesses de surface, jaugeages aux flotteurs. Secrétariat d'Etat à l'Hydraulique, 18 p. + ann. Note technique n°57/SHYL. MH 71511
- 441 - James F., Wilson J., 1968. Fluorometric procedures for dye tracing. In : Techniques of water-resources investigations of the United States geological survey, chapter A12. Washington, U.S. Depart. of the Interior, 31 p. Application of Hydraulics, book 3.
- 442 - Jamme G., 1974. Travaux fluviaux. Paris, Eyrolles, 163 p. Coll. de la Dir. des Etudes et Recherches d'EDF. MH 10526
- 443 - Kabbaj A., 1972. Rédaction des carnets de jaugeages au moulinet : stage d'hydrologie, tome 2, Guercif, Ouarzazate (MA), printemps 1972. Rabat (MA), Min. des T.P. et des Communications.
- 444 - Lamagat J.P., 1981. Zone ouest du delta du Niger : hydrométrie des ouvrages. Bamako (NE), ORSTOM, 21 p. MH 72016
- 445 - Le Gourières D., s.d. Hydraulique générale. Yaoundé (CM), Faculté des Sciences, 197 p. + ann.
- 446 - Le Gourières D., s.d. Cours d'hydrologie : les eaux de surface. Yaoundé (CM), Faculté des Sciences, 170 p.
- 447 - Lencastre A., 1986. Manuel d'hydraulique générale. 10ème éd. Paris, Eyrolles, 411 p. MH 10247
- 448 - Min. de l'Agriculture, Dir. de l'Aménagement, 1977. Technique des barrages en aménagement rural. Min. de l'Agriculture, 325 p.
- 449 - Morin P., s.d. Mesure du débit de l'écoulement d'une source, d'une rigole ou d'un petit ruisseau. 26 p. MH 10075
- 450 - Normand M., 1974. Méthodes de jaugeages de l'office régional de mise en valeur agricole du Haouz : analyse des principales sources d'erreurs commises sur les débits. Rabat (MA), Min. des T.P. et des Communications. 60 p. + ann.
- 451 - OMM, 1981. Guide des pratiques hydrologiques : volume 1, acquisition et traitement des données. 4ème ed. Genève, OMM, 245 p. OMM n°168.
- 452 - ORSTOM, 1988. Troisièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier : Techniques nouvelles en hydrologie (capteurs et télétransmission, logiciels informatiques) ; 23-24 septembre 1987. Paris, ORSTOM, 208 p. Colloques et Séminaires.
- 453 - PRONAREG, ORSTOM, 1982. Mediciones y calculos de caudales. PRONAREG, ORSTOM, 33 p. Technicas Particulares, Departamento de Hidrologia.

- 454 - Quesnel B., 1963. Traité d'hydraulique fluviale appliquée : cours d'eau non navigables -1- généralités et pratique des travaux. Paris, Eyrolles, 335 p. MH 10033
- 455 - Réménieras G., 1960. L'hydrologie de l'ingénieur. Paris, Eyrolles, 413 p.
- 456 - Roche M., 1969. Traitement automatique des relevés limnigraphiques intégraux. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (2) : 99-122.
- 457 - Rodier J.A., s.d. Quelques perfectionnements apportés par les hydrologues français aux instruments utilisés pour les observations et les mesures. ORSTOM, 9 p. MH 70977
- 458 - Roche M., 1963. Hydrologie de surface. Paris, ORSTOM, Gauthier-Villars, 423 p.
- 459 - Rossignol D., 1984. Méthode de dépouillement des jaugeages hydrologiques par trace automatique des profils de vitesse. Guadeloupe, ORSTOM, 26 p. MH 72340
- 460 - Santos Pereira L.A., Keller H.M., 1975. Le calcul des débits moyens journaliers dans les bassins expérimentaux de l'Alptal. Birmensdorf (CH), Institut Fédéral de Recherches Forestières, 25 p. MH 61179
- 461 - Sircoulon J., 1970. Programme mixte de transformation hauteurs d'eau-débits. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (1) : 75-85.
- 462 - Société Hydrotechnique de France, 1987. Mesures en rivière et en réseaux d'assainissement, situation actuelle et perspectives : comptes rendus de la session n°132 du Comité Technique, 26 et 27 nov. 1986. La Houille Blanche, 4-5 : 265-392. MH 20004
- 463 - Société Hydrotechnique de France, s.d. Mesure des débits par déversoirs, réservoirs étalonnés, écran mobile, écran salé (Allen), appareils déprimogènes. 2ème éd. Paris, Soc. Hydrotechnique de France, 46 p. Fascicule n°5. MH 10043
- 464 - Thiébaux J., 1980. Note concernant les jaugeages par la méthode de dilution au bichromate de sodium : application aux régimes tropicaux ou désertiques. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 17 (1) : 21-68.
- 465 - Tilren O.A., 1986. Methods of measurement and estimation of discharges at hydraulic structures. Genève, WMO, 38 p. WMO n°658. Operational Hydrology, report n°26.
- 466 - Troskolanski A.T., Laronde M. (trad.), s.d. Théorie et pratique des mesures hydrauliques. Paris, Dunod, 820 p.
- 467 - Vierhout M.M., 1973. On the boundary layer development in rounded broad-crested weirs with a rectangular control section. Wageningen (NL), IRLI, Landbouwhogeschool, 73 p. Rapport n°3. MH 61145
- 468 - WMO, 1980. Manual on stream gauging : volume 1, fieldwork. Genève, WMO, 308 p. WHO n° 519. Operational Hydrology, report n° 13.
- 469 - WMO, 1980. Manual on stream gauging : volume 2, computation of discharge. Genève, WMO, 258 p. WMO n°519. Operational Hydrology, report n° 13.
- 470 - WMO, 1974. Guide to hydrological practices. 3rd ed. Genève, WMO, 310 p. + ann. WMO n°168. MH 30023

Climatologie

- 501 - Albergel, J., Carbonnel, J.P., Grouzis, M., 1984-1985. Péjoration climatique au Burkina-Faso : incidences sur les ressources en eau et les productions végétales. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 21 (1) : 3-19.
- 502 - Aldegheri M., 1966. Note sur l'appareillage pour la mesure semi-automatique de l'évaporation sur bacs colorado et classe A. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (5) : 3-7 + pl. + fig.
- 503 - Bernard A., 1984. Bac flottant : appareil de mesure de l'évaporation sur plans d'eau. Ouagadougou (ML), ORSTOM, 9 p. Note Technique. MH 72370
- 504 - Brochet P., Gerbier N., 1972. Une méthode pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle. Ann. Agron., 1 : 31-49. MH 80781
- 505 - Brochet P., Gerbier N., 1968. L'évapotranspiration, aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Paris, Dir. de la Météo. Nat., 67 p. Monographies de la Météo. Nat. n° 65. MH 30009
- 506 - Cartreau J.M., Dosseur H., 1970. Automatisation des mesures d'évaporation sur bassins versants d'investigation. Montpellier (FR), EDF, 19 p. + ann. Note Hyd. n°14/70. MH 60536
- 507 - Centre Départemental de la Météorologie, 1989. Recueil de fiches instrumentales. Montpellier (FR), Centre Dép. de la Météo., 31 p.
- 508 - Chartier R., 1973. Sur un dispositif de mesure de l'évaporation en période pluvieuse. Brazzaville (CG), ORSTOM, 3 p. MH 71400
- 509 - Chartier R., 1966. Enregistrement continu de l'évaporation ; bac à niveau constant. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (5) : 9-12 + pl.
- 510 - Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M., 1987. Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire), année 1986. Abidjan (CI), ORSTOM, 46 p.
- 511 - Chevallier P., Lapetite J.M., Mahieux A., 1985. Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire), année 1984. Abidjan (CI), ORSTOM, 36 p. MH 72390
- 512 - Cimel Electronique, s.d. Station météorologique automatique. Paris, Cimel Electronique, 8 p.
- 513 - Dhonneur G., s.d. Traité de météorologie tropicale : application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale. Trappes (FR), Dir. de la Météorologie, 151 p. MH 10884
- 514 - Franquin P., 1968. Méthode d'égalisation des erreurs relatives et son application à des problèmes climatologiques. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 5 (1) : 3-13.
- 515 - Grissollet H., Guilmet B., Arléry R., 1962. Climatologie, méthodes et pratiques. Paris, Gauthier-Villars, 401 p. Monographie de Météorologie. MH 10258

- 516 - Grolée J., Hallaire M., Pernes P., Richard L., Roche M., 1965. Propositions pour un réseau concernant la mesure d'un standard climatique de l'évapotranspiration potentielle. Symposium OMM/AIHS de Québec : planification des réseaux hydrométéorologiques , 15-22 Juin 1965, 15 p. MH 70981
- 517 - Ibiza D., 1972. Mesure de l'évaporation d'un lac en climat sahélien : Lac de Bam (premiers résultats). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (3) : 47-64.
- 518 - Krishnamurti T.N., Wiin-Nielsen A., 1979. Compendium of meteorology, volume 2, part 4 : Tropical meteorology. WMO, Genève, 428 p. WHO n° 364.
- 519 - Lhomme J.P., Monteny B., Kalms J.M., 1982. Etude fréquentielle du rayonnement global journalier en deux localités de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 19 (2) : 73-114.
- 520 - Min. des Transport, Dir de la Météo., CTM, 1982. Notice relative à l'implantation et à l'aménagement des parcs météorologiques et aux règles d'implantation des instruments. Trappes (FR), Min. des Transport, 51 p.
- 521 - OMM, 1987. Directives pour la formation professionnelle des personnels de la météorologie et de l'hydrologie opérationnelle. 3ème éd. Genève, OMM, 331 p. OMM n°258.
- 522 - OMM, 1973. Guide des instruments et des observations météorologiques. 4ème éd. Genève, OMM, 390 p. OMM n° 8. MH 30023
- 523 - Oberlin G., 1967. Exploitation d'une station météorologique : instructions utilisées pour le parc météo de Bangui, Centre ORSTOM. Bangui (CF), ORSTOM, 22 p. MH 71018
- 524 - Oke T.R. (ed.), 1986. Proceedings of the technical conference : urban climatology and its applications with special regard to tropical areas, Mexico D.F., 26-30 November 1984. Genève, WMO, 534 p. WMO n°652.
- 525 - Olivry J.C., 1983. Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégambie et aux Iles du Cap Vert : examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 20 (1) : 47-69.
- 526 - Péguy C.P., 1970. Précis de climatologie. Paris, Masson. MH 10273
- 527 - Perrin de Brichambaut C., 1963. Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. Paris, Gauthier-Villar, 299 p. Monographie de météorologie. MH 10333
- 528 - Pouyaud B., 1986. Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec : exemples du lac de Bam et de la Mare d'Oursi (Burkina-Faso), du lac Tchad et d'Açudes du Nordeste brésilien. Paris, ORSTOM, 254 p. Etudes et Thèses.
- 529 - Pouyaud B., 1985. L'évaporation, composante majeure du cycle hydrologique. Séminaire : climat et développement, 16 oct. 1985, 6 p. MH 81281
- 530 - Pouyaud B., 1979. Etude de l'évaporation d'un lac en climat soudano-sahélien : le lac de Bam (Haute-Volta). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 16 (2) : 89-143.
- 531 - Pouyaud B., 1987. L'évaporation des nappes d'eau libre ; l'exemple du Burkina-Faso, 1ère partie : échelles décadaire et mensuelle. Hydrol. Continent., 2 (1) : 29-46.
- 532 - Pouyaud B., 1987. L'évaporation des nappes d'eau libre ; l'exemple du Lac de Bam au Burkina-Faso, 2ème partie : échelles journalières et infrajournalières. Hydrol. Continent., 2 (2) : 127-149.
- 533 - Pouyaud B., Dubois J., Le Duc P., 1967. Etude hydrologique du Lac de Bam, données climatologiques : observations aux stations de Saint-Paul, Kongoussi et Bam, année 1976. Ouagadougou (B.F.), ORSTOM, 107 p.

- 534 - Riou C., 1975. La détermination pratique de l'évaporation : application à l'Afrique Centrale. Bondy (FR), ORSTOM, 236 p. Mémoires ORSTOM n° 80.
- 535 - Riou C., 1966. Relations entre l'évaporation en bac, l'évapotranspiration potentielle et l'évaporation sous abri dans la zone sahéenne de la République du Tchad. Fort-Lamy (TD), ORSTOM, 9 p. MH 70456
- 536 - Riou C., 1967. Calcul de l'évaporation par le calcul du bilan énergétique en zone sahéenne. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (2) : 37-46.
- 537 - Riou C., 1967. Estimation de la part de l'énergie rayonnante et de l'énergie advective dans l'évaporation, sous climat sahéen. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (2) : 61-69.
- 538 - Riou C., 1970. L'utilisation du pyranomètre Bellani à Brazzaville. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (1) : 65-73.
- 539 - Riou C., 1970. Evaporation en bac et évapotranspiration potentielle. expression et l'évaporation d'une petite nappe d'eau en fonction des données sous abri. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (3) : 73-87.
- 540 - Riou C., 1970. Quelques exemples d'application des mesures de rayonnement à la détermination de l'évapotranspiration en climat tropical. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (4) : 19-37.
- 541 - Riou C., 1972. Etude de l'évaporation en Afrique Centrale. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (2) : 39-51.
- 542 - Riou C., 1977. Evaporation du sol nu et répartition des pluies. Relations établies en Tunisie à partir des résultats des cases lysimétriques. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 14 (3) : 285-295.
- 543 - Riou C., Chartier R., 1982. La station hydroclimatologique du Mornag : 1-Description et résultats 1980-1981, évaporation en bac d'eau libre et évapotranspiration potentielle. Tunis (TN), DRES, ORSTOM, 40 p. MH 72162
- 544 - Riou C., Chartier R., 1985. Evapotranspiration en zone semi-aride de deux couverts végétaux (gazon, blé) obtenue par plusieurs méthodes : 1-Evaluation de l'ETP (conditions hydriques non limitantes). Agronomie, 3 : 261-266.
- 545 - Riou C., Dubois G.J., 1966. L'utilisation des bacs d'évaporation sous climat sahéen. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (5) : 45-66.
- 546 - Riou C., Dubois G.J., 1967. Premières mesures d'évapotranspiration potentielle en République du Tchad. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (2) : 47-60.
- 547 - Roche M., (1972). Etude méthodologique pour l'utilisation des données climatologiques de l'Afrique tropicale, livre 1 : livre des codes. CIEH, Min. de la Coop., ORSTOM, 91 p. MH 71452
- 548 - Sircoulon J., 1967. Mise à jour des mesures d'évaporation sur bac Colorado en Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (2) : 71-78.
- 549 - Solomon S.I., Cordery I., 1984. Compendium of meteorology, volume 2 : part 5 : Hydrometeorology. Genève, WMO, 183 p. WMO n° 364.
- 550 - UNESCO, 1957. Arid zone research : evaporation, reduction, physical and chemical principles and review of experiments. Paris, UNESCO. MH 10171
- 551 - WMO 1983. Guide to climatological practices. 2nd ed. Genève, WMO, (150 p.). WMO n°100.
- 552 - WMO, 1985. Casebook on operational assessment of areal evaporation. Genève, WMO, 194 p. WMO n° 635, Operational hydrology report n° 22.

553 - WMO, 1989. Fourth WMO technical conference on instruments and methods of observation (tecimo-4), Brussels (BE), 4-8 September 1989. 2 vol. Genève, WMO, 413 p. WHO/TD n°303, Instrument and Observing Methods report n° 35.

554 - WMO, 1965. Guide to hydrometeorological practices. First ed. Geneva, WMO, WMO n° 168. TP 82.

Erosion

- 601 - Anaya Garduno M., Martinez Menes M.R., Trueba Carranza A., Fernandez Marroquin O., (coord.), 1977. Manual de conservacion del suelo y del agua. Chapingo (MX), Colegio de Postgraduados, SARH, SPP, 584 p.
- 602 - Arquisou G., 1976. Note technique sur la construction et l'exploitation des fosses à sédiments : exemple du bassin versant représentatif de Sarki (République Centrafricaine). N'Djaména (TD), ORSTOM, 7 p. MH 71674
- 603 - Ben Salah C., 1984. Les caractéristiques de l'érosion en relation avec les pratiques agricoles. Mémoire de DEA, Ressources en eau (Géologie appliquée), Montpellier, USTL, juil. 1984, 129 p. MH 72262
- 604 - Besanval G., (1970). Erosion fluviale : généralités sur les débits solides de charriage. Stage de Strasbourg, mai 1970. (FR), Ministère de l'Agriculture, Serv. Hydro., 37 p. MH 61003
- 605 - Billon B., 1968. Mise au point des mesures de débits solides en suspension (République du Tchad). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 5 (2) : 3-13.
- 606- Birot Y., Galabert J., Chapart J.P., 1968. Troisième campagne d'observations sur la station de mesure de l'érosion d'Allokoto (Ader-Doutchi-Maggia). Niamey (NE), Centre Technique Forestier Tropical, 23 p. MH 60705
- 607 - Birot Y., Thomassey J.P., Galabert J., Chapart J.P., 1967. Deuxième campagne d'observations sur la station de mesure de l'érosion d'Allokoto (Ader Doutchi-Maggia). Niamey (NE), Centre Technique Forestier Tropical, 10 p., ann. MH 60704
- 608 - Bollinne A., 1975. La mesure de l'intensité du splash sur sol limoneux : mise au point d'une technique de terrain et premiers résultats. Pédologie, 3 : 199-210.
- 609 - Bourges J., 1978. Note sur un dispositif de prélèvement des débits en continu. Gabes (TN), ORSTOM, Min. de l'Agriculture (TN), 14 p. MH 71814
- 610 - Bouzaiane S., Camus, H., Abdallah, R., Rajhi, A., 1987. Evaluation de l'impact de travaux anti-érosifs : rapport d'installation de trois micro-bassins dans la région de Sbeitla. DGRE, DCEs, ORSTOM, 26 p. MH 72580
- 611 - Braudeau G., 1951. L'étude et la mesure du débit solide en suspension. In : Assemblée générale de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Bruxelles, tome 3, 1951. Soc. Intern. d'Hydrologie Scientifique, 117-123. MH 80718
- 612 - CIEM (Centre Interuniversitaire d'Études Méditerranéennes), 1988. Géomorphologie et dynamique des bassins versants élémentaires en régions méditerranéennes. Actes de la table ronde organisée à Poitiers, 4-5 déc. 1987. Poitiers (FR), Université de Poitiers, 107-115. Etudes Méditerranéennes, fascicule 12.
- 613 - CTFT (Centre Technique Forestier Tropical), 1979. Conservation des sols au sud du Sahara. 2ème éd. Paris, Min. de la Coopération, 296 p.

- 614 - Callède J., Chartier R., Jacon G., 1989. Contribution à la mesure des écoulements très chargés : utilisation des capteurs de pression pour la détermination en continu des transports en suspension (tests en laboratoire). Montpellier (FR), ORSTOM, 43 p.
- 615 - Cambon J.P., 1985. Bassins versants expérimentaux de Draix : mesure des transports solides, test d'une chaîne de mesure. Digne (FR), ONF ; Grenoble-Aix, CEMAGREF, 12 p. + ann.
- 616 - Chevallier P., 1989. Transport solides : cours à l'école polytechnique fédérale de Lausanne Montpellier (FR), ORSTOM, 76p. + ann. MH 72721
- 617 - Chouret A., 1977. La mesure du débit solide des cours d'eau : étude de transport solide, mise en oeuvre des méthodes, synthèse des résultats obtenus en République du Tchad. N'Djaména (TD), ORSTOM, 15 p. Notes Techniques du Centre ORSTOM de N'Djaména n°16. MH 71707
- 618 - Christoi R., 1956. Résultats obtenus à l'essai érosion de la station de Niangoloko (BF) pour l'année 1956. (BF), Bureau des Sols de l'AOF, IRHO, 15 p.
- 619 - Claude J., Chartier R., 1977. Mesure de l'envasement dans les retenues de six barrages en Tunisie, campagne de 1975. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 14 (1) : 3-35.
- 620 - Collinet J., 1983. Hydrodynamique superficielle et érosion comparées des sols représentatifs des sites forestiers et cultivés de la station écologique de Taï (Sud-Ouest ivoirien). Premier bilan sur parcelles expérimentales recevant des pluies naturelles et simulées. Abidjan (CI), ORSTOM, 15 p. + ann. MH 61624
- 621 - Colombani J., 1985. Transfert de matières solides dans le cycle de l'eau - 1-Mesures et évaluations. DEA, Sciences de l'eau, USTL, Montpellier (FR), 38 p. + ann. MH 72430
- 622 - Colombani J., 1967. Contribution à la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (2) : 27-36.
- 623 - Colombani J., Fritsch J.M., Susini J., 1981. Dispositif de prélèvement automatique d'un échantillon moyen de transport solide en suspension pondéré en fonction du débit, et dispositif de mesure par électrodes spécifiques des concentrations en solutés. In : Erosion and sediment transport measurement Proceeding of the Florence Symposium, June, 1981 : 131-136. IAHS Publication n°133. MH 81217
- 624 - Direction départementale de l'agriculture du Rhône, 1982. L'érosion dans le vignoble du Beaujolais : étude comparative de l'influence des techniques culturales pratiquées sur la commune de Pommiers. Lyon, CEMAGREF, Ch. d'Agr. du Rhône, 12 p.
- 625 - Féodoroff A., 1965. Mécanisme de l'érosion par la pluie. Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique, 2 (2) : 149-163. MH 80212
- 626 - Ferry L., 1985. Etude bathymétrique de la retenue de la Sahamaloto. Tananarive (MG), ORSTOM, 4 p. + ann. MH 72359
- 627 - Fritsch J.M., 1981. Prélèvement automatique d'un échantillon proportionnel au volume écoulé sur petits bassins versants. In : Séminaire sur la stratégie de la mesure dans l'eau et dans l'air, Lyon-Villeurbanne (FR), 16-17 sept. 1981. Paris, Société Hydrotechnique de France, 11 p.
- 628 - Granier J.P., 1983. La mesure *in situ* du débit solide des cours d'eau. Mémoire, CNAM-ESGT, 115 p. + ann. MH 72178
- 629 - Heusch B., s.d.. Technique de lutte contre l'érosion, 55 p.
- 630 - Hoorelbeck J., 1986. Mesure de l'érosion sur une pente de B.V.R.E. Paris, BRGM-ORSTOM, 4 p. MH 72659

- 631 - Hudson N., 1983. Soil conservation. London, Batsford Academic, 324 p.
- 632 - IAHS, 1981. Erosion and transport measurement = Mesure de l'érosion et du transport des sédiments. (Symp. Florence (IT), 22-26 oct. 1981). 527 p. IAHS Publication n°133. MH 41070
- 633 - Kouidri R., Roose E., Muxart T., s.d. Quantification de l'érosion en ravine : approche dans le temps et dans l'espace : 52-54. Réseau Erosion n°9.
- 634 - Kowal J.M., Kijewski W., Kassam A.H., 1973. A simple device for analysing the energy load and intensity of rainstorms. Agricultural Meteorology, 12 : 271-280.
- 635 - Lafforgue A., Naah E., 1976. Mesure des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adiopodoumé : 1-Analyse des facteurs de ruissellement. Abidjan, ORSTOM, 32 p. MH 71624
- 636 - Lal R. (ed.), 1980. Soil erosion research methods, Wageningen (ND), SWCS, Intern. Soil Sc. Soc., 244 p.
- 637 - Lecocq J.M., 1976. Inventaire et analyse des mesures de ruissellement effectuées sur des parcelles expérimentales de la zone intertropicale africaine. Mémoire, Ecole. Nat. des Ingénieurs des Tr. Ruraux et des Tech. Sanitaires, Paris, 79 p. MH 61104
- 638 - Leprun J.C., 1981. A erosao, a conservação e o manejo do solo no nordeste brasileiro : balanço, diagnostico e novas linhas de pesquisas. Recife (BR), SUDENE, ORSTOM, 105 p. Recursos de solos, 15.
- 639 - Masson J.M., 1971. L'érosion des sols par l'eau en climat méditerranéen : méthodes expérimentales pour l'étude des quantités érodées à l'échelle du champ. Thèse de Doc. Ing., CNRS AO 5445, USTL, Montpellier (FR), 212 p. + ann.
- 640 - Mercier J.L., Geissert, E., 1982. Contraintes et déplacement de matière sur versant, mesure d'un mécanisme : le creep, premiers résultats. Recherches Géographiques à Strasbourg, 19-20 : 231-240. MH 81222
- 641 - Meyer L.D., McCune D.L., 1985. Rainfall simulator for runoff plots. Agricultural Engineering, 10 : 644-648.
- 642 - Mietton M., 1988. Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina-Faso ; l'érosion en zone de savane. Grenoble (FR), Université de Grenoble 1, 485 p.
- 643 - Nkamdjou S. L., 1986. Contribution au calcul de bilans d'érosion sur petits bassins représentatifs : les bassins du pic Saint-Loup. Mémoire de DEA, Science de l'eau et aménagement, USTL, Montpellier, 22 sept. 1986, 108 p. + ann. MH 72421
- 644 - Nouvelot J.F., 1969. Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (4) : 43-85.
- 645 - Nouvelot J.F., 1972. Méthodologie pour la mesure en réseau des transports solides en suspension dans les cours d'eau intertropicaux peu chargés. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (1) : 3-18.
- 646 - Nouvelot J.F., Delfieu, G., 1972. La Bénoué au site de Lagdo, campagne 1971 : mesure des transports de sable, note hydrologique. Yaoundé (CM), Energie électrique du Cameroun, ORSTOM, 29 p. MH 71342
- 647 - Olivry J.C., Hoorelbeck, J., 1988. Erosion des terres noires de la vallée du Buech (Alpes du Sud) : bassins sur roubines de Savournon. 20 p.
- 648 - ONF, CEMAGREF, 1985. L'étude de l'érosion des marnes : les bassins versants expérimentaux de Draix, note de présentation, 1ère version. Digne (FR), ONF ; Grenoble-Aix, CEMAGREF, 23 p.

- 649 - ONF, CEMAGREF, 1988. L'étude de l'érosion des marnes : les bassins versants expérimentaux de Draix, note de présentation et de synthèse, 2ème version. Digne (FR), ONF. Grenoble-Aix, CEMAGREF, 38 p. MH 61959
- 650 - Planchon O., 1988. La production de sédiments sur les versants et leur transport à l'échelle du km² en savane humide, Côte d'Ivoire. In : Sédiments budgets (Proceeding of the Porto Alegre Symposium, déc. 1988). Genève, IAHS : 281-291. IAHS Publication n°174. MH 81426
- 651 - Pouquet J., 1961. L'érosion des sols. Paris, PUF, 126 p. Que sais-je ?, n°491.
- 652 - Pourrut P., 1975. Guide pratique pour la mesure des transports solides en suspension. (RW), Min. de l'Agr. et de l'Elevage, 20 p. MH 71529
- 653 - Roose E., 1975. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest : vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. Abidjan (CI), ORSTOM, 72 p.
- 654 - Roose E., 1976. Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. In : Soil erosion, prediction and control. Ankeny, Soil Conservation Society of America, Iowa (US) : 60-73.
- 655 - Roose E., 1973. Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire : contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse de Docteur-Ingénieur, Pédologie, Université d'Abidjan, n°20, 6 juil. 1973, 124 p. MH 60873
- 656 - Roose E., 1988. Protocole standard pour les parcelles de mesure de l'érosion en nappe et rigole, en accord avec le modèle empirique de prévision des pertes en terre (Usle de Wischmeier), 12 p.
- 657 - Roose E., 1969. Séminaire sur la conservation de l'eau et des sols : document de travail. Montpellier (FR), ENGREF, ORSTOM.
- 658 - Roose E., s.d. - Les formes d'érosion. (Cours de 16 p.).
- 659 - Roose E., Sarrailh J.M., 1989-1990. Erodibilité de quelques sols tropicaux : vingt années de mesure en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. Cah. ORSTOM, Sér. Pédo., 1-2 : 7-30.
- 660 - Sabir M., 1986. Ressources en eau et aménagement : l'érosion hydrique et sa qualification. Mémoire de DEA, Hydrologie et Géochimie Isotopique, Paris 11, juil. 1986, 172 p. MH 72397
- 661 - Sardouk Y., 1981. Prédétermination de l'envasement dans les retenues de barrage. Mémoire de DEA, Science de l'eau, Paris 6, Juin 1981, 80 p. MH 72112
- 662 - Servat E., 1984. Contribution à l'étude des matières en suspension du ruissellement pluvial à l'échelle d'un petit bassin versant urbain. 2 tomes. Thèse de Doct., Science de l'eau, USTL, Montpellier, juin 1984, 182 p. + 202 p. MH 72387
- 663 - Société Hydrotechnique de France, (1981). Séminaire sur la stratégie de la mesure dans l'eau et dans l'air pour aboutir au moindre prix à des données significatives et exploitables : session A, mesure sur le terrain, Lyon Villeurbanne (FR), 16-17 sept. 1981. Paris, Société Hydrotechnique de France, 180 p.
- 664 - Thauvin V., 1988. Possibilité d'utilisation de la télédétection pour la caractérisation de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique à l'échelle d'un bassin versant. DEA d'Hydrologie, Sciences de l'eau et aménagement, USTL, Montpellier (FR). 40 p. + ann. MH 72697
- 665 - Toucheboeuf de Lussigny P., (1970). Mesures de transports solides en suspension effectuées par l'ORSTOM en Afrique Noire, 13 p. MH 71108

- 666 - UNESCO, AISH, 1977. Erosion and solid matter transport in inland waters = Erosion et transports solides dans les eaux continentales. Symp. Paris Juillet 1977. Washington, IAHS, 352 p. AISH Publication n° 122.
- 667 - Vuillaume G., 1969. Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne (Bassin de Kountkouzout, Niger). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (4) : 87-132.
- 668 - Vuillaume G., 1968. Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne : bassin représentatif de Kountkouzout (Niger). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 5 (2) : 33-56.
- 669 - White W.R. (éd.), Colombani J. (trad.), s.d. Problèmes d'érosion, transport solide et sédimentation dans les bassins versants : projet 5.3 du programme hydrologique international. Paris, UNESCO, 275 p. Etudes et Rapports Hydrologiques n°35.
- 670 - Wischmeier W.H., Smith D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning. Washington, USDA, 58 p. Agriculture Handbook n°537.
- 671 - WMO, Operational Hydrology, 1981. Report n°16 : Measurement of river sediments. Geneva, WMO, 61 p. WMO n°561.

Hydrodynamique des sols

- 701 - Albergel J., Touiri H., 1982. Un nouvel outil pour estimer le ruissellement sur un petit bassin versant : le mini-simulateur de pluies ; expérimentation sur le bassin de Binndé. Ouagadougou (BF), ORSTOM, 140 p. + ann. MH 72134
- 702 - Albergel, J., Bernard A., Ruelle P., Touma J., 1989. Hydrodynamique des sols : bassins versants expérimentaux de Thyssé-Kaymor ; rapport de la campagne de mesures février-avril 1988. Dakar (SN), ISRA, CIRAD, ORSTOM, R3S, 29 p. Programme CEE DG 12 n° TS2A 0017 CD.
- 703 - Aresmouk H., 1982. La variation de la réserve en eau du sol en climat tropical (de transition), méditerranéen (aride) et sahélien. Mémoire de DEA, Science de l'eau, Paris 6, 1982/07. Bondy (FR), ORSTOM, 54 p. MH 72121
- 704 - Asseline, J., Valentin, C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 15 (4) : 321-349.
- 705 - Bernard A., 1987. Le simulateur de pluie 2ème génération : note technique. Montpellier (FR), ORSTOM, 17 p. + ann. MH 72502
- 706 - Bernard A., 1984. Table support de limnigraphe pour mini-simulateur de pluie. Ouagadougou (BF), ORSTOM, 6 p. + ann. MH 72371
- 707 - Bernard A., Marieu B., 1990. Bas-fond du Siné Saloum : action de recherches "Economie de l'eau DRS"; simulation de pluies sur le bas-fond de Keur Samba Diama du 06-16/03/1990. Dakar (SN), ISRA, ORSTOM, CIRAD, R3S, 20 p. Programme CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD.
- 708 - Bois J.F., Roose E., 1978. Réflexion sur les résultats de mesure systématiques d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol ferrallitique de basse Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 15 (4) : 351-363.
- 709 - Bouvier C., Gathelier R., Gioda A., 1986. Campagne de simulation de pluies en milieu urbain, Niamey, avril 1986. Montpellier (FR), ORSTOM, 19 p. + ann. MH 72426
- 710 - BRGM, 1974. Mouvements de l'eau dans les sols non saturés. Hydrogéologie, section 3, 2 : 143-226. MH 20024
- 711 - BRGM, 1969. Les mouvements d'eau dans les sols non saturés. Hydrogéologie, section 3, 4 : 131 p. MH 20024
- 712 - Camus H., 1974. Homogénéisation des mesures d'humidité du sol faites avec diverses sondes à neutrons et à partir d'étalonnages différents. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 11 (1) : 3-33.
- 713 - Camus H., 1973. Règles d'emploi de l'humidimétrie à neutrons à l'échelle d'un bassin versant. Paris, ORSTOM, 19 p. + ann. Note Technique n°34. MH 30001
- 714 - Camus H., Berthault C., 1972. Influence du couvert végétal sur la perméabilité des sols du bassin représentatif de Korhogo (Côte d'Ivoire). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (3) : 3-13.

- 715 - Cardon D., 1972. Analyse des facteurs responsables de la dispersion des mesures neutroniques dans un sol donné et application à la mesure de la variation du stock d'eau du sol. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (4) : 27-33.
- 716 - Casenave A., 1987. Bilan hydrique des sols cultivés de la zone semi-aride de l'ouest africain : étude de l'infiltration sous pluies simulées (rapport final). Paris, ORSTOM, 53 p. + ann. MH 72552
- 717 - Casenave A., s.d. Bilan hydrique des sols cultivés de la zone semi-aride de l'ouest africain : étude de l'infiltration sous pluies simulées (rapport final sommaire). Paris, ORSTOM, 7 p. MH 72590
- 718 - Casenave A., 1987. Bilan hydrique des sols cultivés de la zone semi-aride de l'ouest africain : étude de l'infiltration sous pluies simulées (rapport semestriel, période du 1er janvier au 1er juin 1987). Paris, ORSTOM, 13 p. MH 72589
- 719 - Casenave A., 1987. Bilan hydrique des sols cultivés de la zone semi-aride de l'ouest africain : étude de l'infiltration sous pluies simulées (rapport semestriel, période du 1er juillet au 31 décembre 1986). Paris, ORSTOM, 13 p. MH 72588
- 720 - Casenave A., 1986. Bilan hydrique des sols cultivés de la zone semi-aride de l'ouest africain : étude de l'infiltration sous pluies simulées (rapport semestriel, période du 1er janvier au 31 juin 1986). Paris, ORSTOM, 22 p. MH 72587
- 721 - Casenave A., 1986. Bilan hydrique des sols cultivés de la zone semi-aride de l'ouest africain : étude de l'infiltration sous pluies simulées (rapport semestriel, période du 1er juin au 31 décembre 1985). Paris, ORSTOM, 18 p. MH 72586
- 722 - Casenave A., 1986. L'apport de la simulation de pluie dans l'analyse des phénomènes de ruissellement et d'infiltration : quelques exemples d'applications hydrologiques. Annales CNFGG, 5 : 35-48. MH 81260
- 723 - Casenave A., Chevallier P., Guiguen N., Simon J.M., 1982. Simulation de pluie sur bassins versants représentatifs. Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie. 19 (4) : 207-297.
- 724 - Casenave A., Valentin C., 1988. Les états de surface de la zone sahéenne : influence sur l'infiltration. Paris, ORSTOM, 202 p. + ann. MH 72543
- 725 - Casenave A., Valentin C., 1989. Les états de surface de la zone sahéenne : influence sur l'infiltration. Paris, ORSTOM, 229 p. Collection Didactiques.
- 726 - Chevallier P., 1983. L'indice des précipitations antérieures : évaluation de l'humectation des sols des bassins versants représentatifs. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 20 (3-4) : 179-189.
- 727 - Cissé L., Vachaud G., 1987. Effet d'un amendement organique sur l'infiltration, les coefficients de transferts hydriques, et l'évaporation d'un sol sableux dégradé du Nord-Sénégal. Hydrol. Continent., 2 (1) : 15-28.
- 728 - Colombani J., 1978. Utilisation de la sonde à neutrons pour la caractérisation d'un profil de sol du Sud tunisien simultanément à l'emploi de mesures tensiométriques et de traçages isotopiques et salins. Journées Scientifiques du Groupe Français d'Humidimétrie Neutronique, Cadarache (FR), 21-22 novembre 1978. ORSTOM, Paris 6, Univ. de Grenoble, Dir. des Ress. eau sols (TN), 18 p. MH 71857
- 729 - Colombani J., Lamagat J.P., Thiébaux J., 1972. Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz ; une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (3) : 15-46.
- 730 - Dubreuil P., 1966. Point de vue théorique sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique. Paris, ORSTOM, 39 p. + ann. MH 70993

- 731 - Dubreuil P., 1967. Point de vue théorique sur le rôle du sol dans le cycle hydrologique. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (1) : 3-26.
- 732 - Dubreuil P., 1967. Détermination des paramètres du sol influant sur le cycle hydrologique dans les bassins représentatifs expérimentaux (protocoles de mesures). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (3) : 3-17.
- 733 - Dubreuil P., Colombani J., 1970. Mesures d'humidité et de perméabilité des sols dans les bassins représentatifs et expérimentaux : additifs aux protocoles et présentation des résultats. Paris, ORSTOM + ann. 18 p., Note Technique n°21 (2ème éd.). MH 30001
- 734 - Gathelier R., Casenave A., Bricquet J.P., Delfieu J.M., 1987. Etude des relations pluies-débits à l'aide d'un simulateur de pluie sur un petit bassin sahélien (Banigorou - Rép. du Niger). Niamey ORSTOM, 24 p. + ann. MH 72591
- 735 - Herbaud J., 1967. Renseignements concernant les humidimètres à neutrons et les densimètres à rayons gamma adaptés aux mesures dans le sol. Paris, ORSTOM, 27 p. Note Technique n°10. MH 30001
- 736 - Hillel D., 1974. L'eau et le sol : principes et processus physiques. Paris, Vander Leuven. MH 10523
- 737 - Holtan H.N., (1975). A formulation for quantifying the influence of soil porosity and vegetation on infiltration. First preliminary edition. Paris, UNESCO, 18 p. SC.75/WS/100. MH 30059
- 738 - Ibiza D., 1984-1985. Etude de l'infiltration au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Refus à l'infiltration par saturation des réserves souterraines. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 21 (3) : 17-50.
- 739 - Lafforgue A., 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 14 (4) : 299-344.
- 740 - Lafforgue A., Naah E., 1976. Exemple d'analyse expérimentale des facteurs de ruissellement sous pluies simulées. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 13 (3) : 195-237.
- 741 - Mermoud A., Morel-Seytoux H.J., 1989. Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis une nappe peu profonde. Hydrol. Continent., 4 (1) : 11-24.
- 742 - Morel-Seytoux H.J., 1973. Pour une théorie modifiée de l'infiltration : 1ère partie, pourquoi ? Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 10 (2) : 185-194.
- 743 - Morel-Seytoux H.J., 1973. Pour une théorie modifiée de l'infiltration : 2ème partie, comment ? Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 10 (3) : 199-209.
- 744 - Morel-Seytoux H., 1974. Pour une théorie modifiée de l'infiltration : 3ème partie, effets de compression et de contre-courant. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 11 (1) : 51-59.
- 745 - Morel-Seytoux H., 1974. Pour une théorie modifiée de l'infiltration : 4ème partie, le drainage vu comme une infiltration d'air. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 11 (3) : 181-188.
- 746 - Morel-Seytoux H.J., 1975. Pour une théorie modifiée de l'infiltration : 5ème partie, le cas de la pluie. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (4) : 227-233.
- 747 - Normand M., 1970. La mesure de l'humidité du sol : application aux problèmes d'hydraulique agricole. Antony (FR), CERAFER, 232 p. Bulletin Technique de Génie Rural n° 103. MH PB 337
- 748 - Nouvelot J.F., 1975. Papel dos medidores de umidade do solo nos estudos hidrologicos (sonda de neutrons). Boletim de Recursos Naturais (BR), 1-2 : 45-56.

- 749 - OMM, 1973. Bassins représentatifs expérimentaux : choix de l'indice représentant l'humidité du sol. Genève, OMM, 17 p. MH 71582
- 750 - ORSTOM, 1986. Premières journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier : la simulation de pluie et ses applications ; 17-18 septembre 1985. Paris, ORSTOM, 297 p. Colloques et Séminaires.
- 751 - Pérez P., Sarr P.S., 1990. Programme gestion des ressources naturelles : rapport d'activité "économie de l'eau-DRS" année 1989. Dakar (SN), ISRA, ORSTOM, CIRAD, R3S, (40 p.) Programme Gestion des Ressources Naturelles.
- 752 - Pourrut P., 1968. Utilisation pratique de l'humidimètre à neutrons pour les mesures hydrologiques : premiers résultats obtenus sur le bassin versant représentatif de la Tafaina (République Malgache). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 5 (2) : 15-31.
- 753 - Pourrut P., Moutonnet P., 1971. Contrôle neutronique de l'humidité des sols en surface : applications hydrologiques sur sol ferrallitique tropical (Bassin versant de la Tafaina, République Malgache). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 8 (2) : 51-66.
- 754 - Pourrut P., Zébrowski C., 1970. Détermination de certaines caractéristiques intrinsèques et hydrodynamiques des sols par utilisation de méthodes neutroniques en République malgache. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (1) : 37-64.
- 755 - Pouyaud B., 1975. La mesure de l'humidité du sol par chocs thermiques. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (4) : 259-284.
- 756 - Pouyaud B., Chartier R., 1971. Méthode thermo-dynamique de mesure de l'humidité des sols. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 8 (1) : 65-98.
- 757 - Riou C., 1966. Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration, obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (5) : 31-43.
- 758 - Tabet Y., 1983. Simulation des pluies. Mémoire de DEA, juillet 1983, 191 p.
- 759 - Valentin C., 1990. Les états de surface des bassins versants de Thyse Kaymor (Sénégal). Dakar (SN) ISRA, ORSTOM, CIRAD, R3S, 9 p. Programme CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD.S.

Eaux souterraines

- 801 - Bachmat Y., 1989. Management of groundwater observation programmes. Geneva, WMO, 96 p. WMO n° 705, Operational Hydrology Report n°31.
- 802 - Brémond R., Chéret I., Parsy C., 1961. Mesures piézométriques et essais de pompage dans les nappes souterraines : application à l'estimation de la puissance d'une nappe, 78 p. MH 10283
- 803 - Brémond R., 1965. Contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines. Paris, Gauthier-Villars, 118 p. MH 10016
- 804 - BRGM 1969. Variations naturelles du niveau piézométrique. Hydrogéologie, section 3, 2 : 111 p. MH 20024
- 805 - BRGM 1970. Pompages d'essai. Hydrogéologie, section 3, 1 : 94 p. MH 20024
- 806 - Castany G., 1968. Prospection et exploitation des eaux souterraines. Paris, Dunod. MH 10183
- 807 - Castany G., Margat J., 1977. Dictionnaire français d'hydrogéologie. Orléans (FR), BRGM, 249 p. MH 10664
- 808 - Degallier R., 1975. Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines : application aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire). Orléans (FR), BRGM, 231 p. + ann. 75 SGN 383 AME.
- 809 - Degallier R., 1977. Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe souterraine du bassin versant de Korhogo, d'après les variations de son niveau piézométrique. Hydrogéologie, section 3, 3-4 : 57-106. MH 20024
- 810 - El Harmouchi, 1982. Techniques d'amélioration des ressources ou de meilleure utilisation des eaux souterraines : la réalimentation des eaux souterraines, le stockage souterrain, les barrages d'inféro-flux... Mémoire de DEA, Science de l'eau, Paris 6, juil. 1982, 98 p. MH 72119
- 811 - Lefèvre R., Delfieu G., 1972. Mesure directe de l'inféro-flux : application au Mayo Tsanaga. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (3) : 65-76.
- 812 - Lenoir F., 1977. Le régime des nappes dans les formations d'altération, un exemple en Côte d'Ivoire (Sakassou-Toumodi). Abidjan (CI), ORSTOM, 48 p. MH 61261
- 813 - Margat J., 1963. Rapport hydrogéologique préliminaire sur le bassin de Korhogo (Côte d'Ivoire) : étude de la surface piézométrique. Paris, BRGM, 14 p. + ann. DS.63.A73. MH 60464
- 814 - Margat J., 1972. Méthode d'implantation d'un réseau piézométrique minimal. Orléans (FR), BRGM, 54 p. N° 72 SGN 128 AME. MH 61020
- 815 - Rodier J., Pourrut P., 1967. Etude de l'alimentation des nappes souterraines sur bassins représentatifs : derniers enseignements méthodologiques des campagnes hydrologiques de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (4) : 45-50.

- 816 - Roussin-Bariac M., 1985. Etude hydrochimique et isotopique d'une nappe alluviale sous climat semi-aride (cuvette d'Agadez, Niger). Thèse de Doc. de 3ème Cycle, Géologie Appliquée, Paris-Sud, Orsay, n°3998, 20 déc. 1985, 217 p. MH 61934
- 817 - Soc. d'Etudes pour la France et l'Etranger, s.d. Prospection géophysique : champ d'application, méthodes, références. Paris, Soc. d'Etudes, 20 p. MH 10073
- 818 - Stephenson G.R., (1963). Network design for ground-water studies in a small watershed. 11 p. + ann. MH 60275

Qualité des eaux

- 901 - Brémond R., Perrodon C., 1979. Les paramètres de la qualité des eaux. 2ème éd. Neuilly-sur-Seine (FR), Min. de l'Environnement et du Cadre de Vie, 259 p. MH 10801
- 902 - BRGM, 1970. Qualité des eaux, pollution, 1ère partie. Hydrogéologie, section 3, 4 : 99 p. MH 20024
- 903 - Brunet-Moret Y., 1969. Mesure de la salinité dans le fleuve Casamance. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (1) : 3-16.
- 904 - Camail M., Mahamane M., Pucci B., Rigaud J.P., 1987. Analyses chimiques des eaux du fleuve Niger à Niamey : premiers résultats d'une campagne annuelle de mesures. Hydrol. Continent. 2 (2) : 87-99.
- 905 - Claude J., 1972. Une chaîne de programme pour le traitement des données sur la salinité. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (2) : 3-31.
- 906 - Colombani J., 1967. Premiers résultats des mesures de qualité des eaux au Togo et au Dahomey. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (2) : 3-25.
- 907 - Fontes J.C., 1980. Environmental isotopes in groundwater hydrology. In : Handbook of environmental isotope geochemistry, vol.1 : the terrestrial environment, A. Amsterdam, Elsevier, 75-140. MH 10708
- 908 - Fontes J.C., Maglione G., Roche M.A., 1969. Données isotopiques préliminaires sur les rapports du Lac Tchad avec les nappes de la bordure Nord-Est. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (1) : 17-34.
- 909 - Fontes J.C., Olivry J.C., 1976. Premiers résultats sur la composition isotopique des précipitations de la région du Mont Cameroun. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 13 (3) : 179-194.
- 910 - Gat J.R., Gonfiantini R. (eds.), 1981. Stable isotope hydrology : deuterium and oxygen 18 in the water cycle. Vienna (AT), International Atomic Energy Agency, 339 p. Technical Reports Series n° 210. MH 10690
- 911 - Jauzein A., 1982. Deutérium et oxygène 18 dans les saumures : modélisation et implications sédimentologiques. C.R. Acad. Sc. Paris, Série 2, t.294 : 663-668.
- 912 - Lemoalle M., 1972. Azote et phosphore dans les eaux de pluies à Fort-Lamy (1970). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (4) : 61-63.
- 913 - Mathieu P., 1972. Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane et sous forêt ; influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides (bassin de l'Amitioro, Côte d'Ivoire). Thèse Doc., Sc. Nat., Univ. de Nice, n°A.O.7838 du CNRS, 20 déc. 1972. 441 p. MH 61078
- 914 - Mérot P., Bourguet M., Le Leuch M., 1981. Analyse d'une crue à l'aide du traçage naturel par l'oxygène 18 mesuré dans les pluies, le sol, le ruisseau. CATENA, 69-81. MH 81129
- 915 - Molinier M., 1976. Qualité des eaux de surface en zone forestière équatoriale de Côte d'Ivoire. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 13 (1) : 7-36.

- 916 - ORSTOM, 1989. Quatrième journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier : physico-chimie des eaux continentales ; 14-15 septembre 1988. Paris, ORSTOM, 328 p. Colloques et Séminaires.
- 917 - Roche M.A., 1969. Evolution dans l'espace et le temps de la conductivité électrique des eaux du Lac Tchad d'après les résultats de 1908, 1957, 1962 à mars 1968. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (1) : 35-78.
- 918 - Rodier J., 1966. L'analyse chimique et physico-chimique de l'eau : eaux naturelles, eaux usées. 3ème éd. Paris, Dunod. MH 10230
- 919 - Rodier J., 1975. L'analyse de l'eau. 2 tomes. 5ème éd. Paris, Dunod. MH 10520
- 920 - Roussin-Bariac M., 1985. Etude hydrochimique et isotopique d'une nappe alluviale sous climat semi-aride (cuvette d'Agadez, Niger). Thèse de Doct. 3ème cycle, Géologie appliquée, Paris Sud Orsay, 20 déc. 1985. Paris, Univ. Paris Sud, 218 p. MH 61934
- 921 - UNESCO, 1973. Water quality research on representative and experimental basins : a preliminary report, Paris 1973. Paris, UNESCO, 27 p. SC/WS/544. MH 30059

Hydrologie

- 1001 - Albergel J., Casenave A., 1983. Une nouvelle technique d'estimation des crues décennales des petits bassins versants : les études sous pluies simulées. In : Journées techniques du 12ème conseil des ministres du CIEH, Yaoundé (CM), 20-21 fév. 1984. Ouagadougou (ML), CIEH, 28 p. MH 72239
- 1002 - Brunet-Moret Y., 1979. Homogénéisation des précipitations. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 16 (2-4) : 117-170.
- 1003 - Brunet-Moret Y., 1979. Estimateur de Wald. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 16 (1) : 5-24.
- 1004 - Brunet-Moret Y., 1977. Test d'homogénéité. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 14 (2) : 119-128.
- 1005 - Brunet-Moret Y., 1975. Distribution gaussio-logarithmique. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 12 (2) : 63-140.
- 1006 - Brunet-Moret Y., 1974. Distribution exponentielle généralisée. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 11 (4) : 245-336.
- 1007 - Brunet-Moret Y., 1969. Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 6 (3) : 3-100.
- 1008 - Brunet-Moret Y., 1971. Fonctions de distribution en développement limité. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 8 (1) : 3-33.
- 1009 - Brunet-Moret Y., 1971. Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 8 (4) : 3-31.
- 1010 - Brunet-Moret Y., Roche M., 1975. Persistance dans les suites chronologiques de précipitations annuelles. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 12 (3) : 147-165.
- 1011 - Callède, J., 1977. Oscillations journalières du débit des rivières en l'absence de précipitations. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 14 (3) : 219-283.
- 1012 - Dubreuil P., 1971. L'exploitation systématique des données de bassins représentatifs en traitement automatique. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 8 (3) : 3-45.
- 1013 - Dubreuil P., 1974. Initiation à l'analyse hydrologique. Paris, Masson, ORSTOM, 216 p. MH 10476
- 1014 - Dubreuil P., 1966. Conditions requises de l'observation des barrages réservoirs en région intertropicale pour fournir une bonne estimation des termes du bilan hydrologique. In : Symposium de Garda, 9-15 oct. 1966, 114-121. Gentbrugge (BE), AISH. Publication de l'AISH n°70.
- 1015 - Dubreuil P., 1966. Un exemple d'estimation sur carte du volume total emmagasiné dans les petits réservoirs d'une région. In : Symposium de Garda, 9-15 oct. 1966, 551-558. Gentbrugge (BE), AISH. Publication de l'AISH n°71.
- 1016 - Dubreuil P., Vuillaume G. s.d. Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement de petits bassins intertropicaux. Paris, ORSTOM, 8 p. + ann. MH 71543

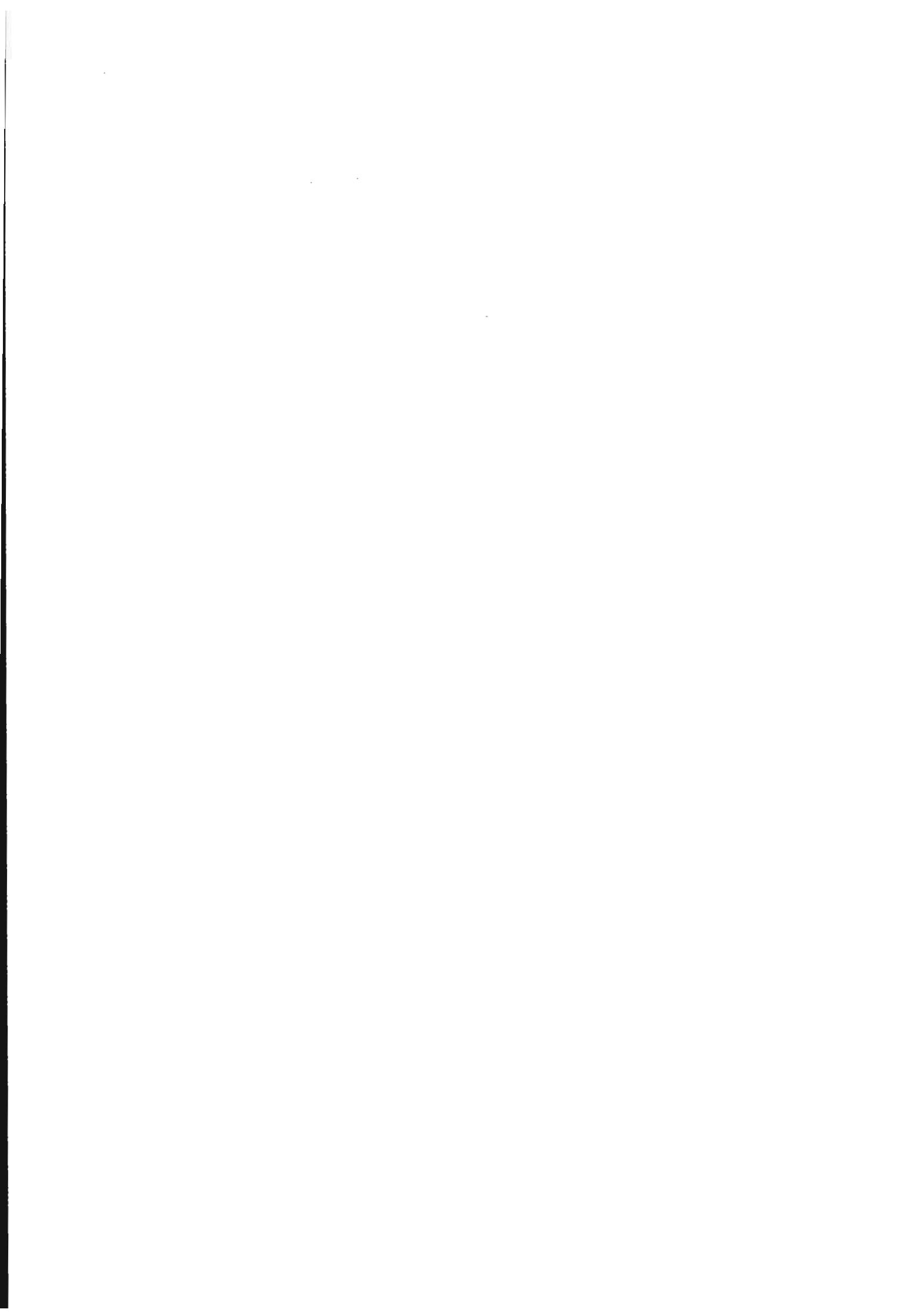
- 1017 - Gray D.M. (ed.), 1970. Handbook on the principles of hydrology, a general text with special emphasis on canadian conditions. New York, Water Information Center, Inc., 500 p. MH 10383
- 1018 - Guiscafré J., Moniod F., 1975. Intensité des averses et formes des crues dans une petite région homogène. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (1) : 41-57.
- 1019 - Ibiza D., 1987. Transfert de surface : étude systématique du temps caractéristique t (temps de concentration) sur des bassins en zone intertropicales de 2 à 2 000 km². Hydrol. Continent., 2 (2) : 101-115.
- 1020 - Lamachère J.M., 1989. Détermination des débits maximaux par enquête de crues. Séminaire AFVP, du 1 au 2 février 1989, 6 p.
- 1021 - Larras J., 1972. Prévision et prédétermination des étiages et des crues. Paris, Eyrolles, 159 p. Collection du BCEOM. MH 10401
- 1022 - Lebel T., Boyer J.F., 1989. DIXLOI : un ensemble de programmes Fortran 77 pour l'ajustement de lois statistiques et leur représentation graphique. Paris, ORSTOM, 55 p. Notice OVNIh du Laboratoire d'Hydrol. n°3.
- 1023 - Mebarki A., Thomas C., 1988. Analyse des relations entre écoulements superficiels et souterrains à partir des hydrogrammes des cours d'eau : application au bassin du Kebir-Rhumel dans le Constantinois (Algérie). Hydrol. Continent. 3 (2) : 89-103.
- 1024 - Michel C., 1989. Réservoirs passifs d'écrêtement de crues dans les petits bassins sans données hydrométriques. Hydrol. Continent., 4 (1) : 25-31.
- 1025 - Michel C., 1987. Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. Antony (FR), CEMAGREF, 429 p. MH 61669
- 1026 - Millet P., 1986. Dynamique hydrologique d'un petit système lagunaire tropical : le Lac Togo. Hydrol. Continent., 1 (1) : 35-50.
- 1027 - Moallemi-Pour A., Michel C., 1989. Contribution à une meilleure estimation des paramètres d'une crue décennale : la méthode Deltaqix. Hydrol. Continent., 4 (2) : 113-122.
- 1028 - Moniod F., 1969. Calcul automatique des paramètres de l'hydrogramme standard. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (2) : 77-97.
- 1029 - Oberlin G.R., Galéa G.C., Toni J.T., 1973. Intérêt des jaugeages épisodiques pour l'estimation des étiages de petits bassins non équipés. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 10 (4) : 349-368.
- 1030 - Ribstein P., 1983. Loi des fuites. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 20 (2) : 117-140.
- 1031 - Ribstein P., Rodier J.A., 1989. Fortes crues des petits cours d'eau du Sahel : forme de l'hydrogramme. Hydrol. Continent., 4 (1) : 33-47.
- 1032 - Roche M., 1987. Dictionnaire français d'hydrologie de surface. Paris, Masson, 288 p. MH 10894
- 1033 - Roche M., 1972. Problèmes méthodologiques relatifs à la connaissance des crues. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (2) : 53-63.
- 1034 - Roche M., 1973. Hydrologie et aménagement des eaux (méthodes structurales). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 10 (1) : 3-104.
- 1035 - Roche M., 1963. Hydrologie de surface. Paris, ORSTOM, Gauthier-Villars, 429 p.

- 1036 - Roche M., 1968. Traitement automatique des données hydrométriques et des données pluviométriques au Service hydrologique de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 5 (3) : 5-119.
- 1037 - Roche P.A., 1987. Guide de prévision des crues, tome 1 : texte principal. Min. Chargé de l'Environnement, 324 p.
- 1038 - Rodier J.A., 1976. Estimation des débits de crues décennales pour les petits bassins forestiers en Afrique tropicale : étude préliminaire. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 13 (4) : 243-267.
- 1039 - Rodier J.A., 1976. Evaluation de l'écoulement annuel dans les régions tropicales sèches d'Afrique occidentale. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 13 (4) : 269-306.
- 1040 - Rodier J.A., 1984-1985. Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 21 (2) : 3-25.
- 1041 - Rodier J.A., 1989. Ecoulement de surface dans les bassins perméables du Sahel : comparaison avec d'autres bassins perméables tropicaux. Hydrol. Continent., 4 (2) : 123-138.
- 1042 - Rodier J.A., 1966. Méthodes utilisées pour le calcul du coefficient de ruissellement sur les bassins représentatifs et expérimentaux. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 3 (4) : 27-38.
- 1043 - Rodier J.A., 1967. Présentation de toutes les crues de faible fréquence étudiées par les hydrologues de l'ORSTOM. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (1) : 79-85.
- 1044 - Rodier J.A., 1965. Débits de crues exceptionnelles sur les bassins représentatifs et expérimentaux d'Afrique Noire d'expression française. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 2 (2) : 37-48.
- 1045 - Rodier J.A., Auvray C., 1965. Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. Dakar (SN), ORSTOM, CIEH, 48 p.
- 1046 - Sutcliffe J.V., Piper B.S., 1986. Bilan hydrologique en Guinée et Togo-Bénin. Hydrol. Continent. 1 (1) : 51-61.
- 1047 - Touchebeuf de Lusigny Y., 1971. Régressions et corrélations multiples en hydrologie. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol, 8 (4) : 33-58.
- 1048 - Berton S., 1988. La maîtrise des crues dans les bas-fonds : petits et microbarrages en Afrique de l'Ouest. Paris, GRET, Min. de la Coopération, Agence de Coopération Culturelle et Technique, 474 p. Le Point Sur, Dossier n° 12.
- 1049 - Puech C., Chabi-Gonni D., 1984. Méthode de calcul des débits de crues décennales pour les petits et moyens bassins versants en Afrique de l'Ouest et Centrale. 2ème éd. Ouagadougou (BF), CIEH, 91 p.

Modélisation

- 1101 - Afouda, A., 1982. Modélisation de la résistance hydraulique à la surface d'un bassin fluvial. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 19 (1) : 3-13.
- 1102 - Albergel J., 1987. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso, du m² au km² : étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de Doct., Hydrologie, Paris 6, 1987/06. 341 p.
MH 72503
- 1103 - Albergel, J., Chevallier, P., Lortic, B., 1987. D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina Faso). Hydrol. Continent., 2 (2) : 77-86.
- 1104 - Chevallier P., 1990. Complexité hydrologique du petit bassin versant : exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) ; suivi d'une postface de Rodier J.A. Paris, ORSTOM, 331 p., cartes. Etudes et Thèses.
- 1105 - Dezetter A., 1986. Contribution à l'étude et à la refonte de deux modèles hydropluviométriques au pas du temps journalier, modèle Girard, modèle Ibiza, 2 vol. Rapport de stage, Science de l'eau, ISIM, Montpellier, 1986. Montpellier, USTL, 123 p.
MH 72415
- 1106 - Dezetter A., 1987. Modèle global "ORSTOM 74" : analyse des structures et du fonctionnement en vue d'une reformulation. Mémoire de DEA, Science de l'eau, USTL, Montpellier, 1987/09, 137 p.
MH 72535
- 1107 - Girard G., 1969. Etude du ruissellement sur un bassin de 1 200 km² et recherche d'un modèle hydropluviométrique. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (2) : 43-76.
- 1108 - Girard G., 1975. Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'Oued Ghorfa (Mauritanie). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (3) : 167-188.
- 1109 - Girard G., 1975. Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (3) : 189-221.
- 1110 - Girard G., 1982. Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs, modèle Modlac. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 19 (2) : 55-72.
- 1111 - Girard G., Ledoux E., Villeneuve J.P., 1981. Le modèle couplé : simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 18 (4) : 191-280.
- 1112 - Girard G., Morin G., Charbonneau R., 1972. Modèle précipitations-débits à discrétisation spatiale. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 10 (4) : 35-52.
- 1113 - Hasnaoui M.D., 1985. Analyse des facteurs de ruissellement pour la prédétermination de la crue décennale au Sahel. Mémoire de DEA, Science de l'eau, USTL, Montpellier, 1985/09. MH 72305
- 1114 - Ibiza D., 1983. Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydrique : application, variation de quelques paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 20 (1) : 3-45.

- 1115 - Ibiza D., 1984-1985. Point de vues sur les fonctions de production. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 21 (3) : 5-16.
- 1116 - Ibiza D., 1984-1985. Une fonction de production aux petits pas de temps. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 21 (3) : 51-97.
- 1117 - Leviandier T., 1986. Estimation adaptative d'une fonction de transfert à deux termes avec erreurs sur les entrées. Hydrol. Continent., 1 (2) : 121-139.
- 1118 - Ribstein P., 1990. Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Thèse de Doct., Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, USTL, Montpellier, 1990/01/26. 317 p. MH 72825
- 1119 - Roche M., 1970. Les divers types de modèles déterministes. In : Comité Technique n°91 de la Société Hydrotechnique de France, session des 19-20 nov. 1970. Société Hydrotechnique de France, 20 p. + ann. MH 71170
- 1120 - Roche M., 1967. Recherche d'un hydrogramme standard. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 4 (1) : 27-44.
- 1121 - Roche M., 1970. Les divers types de modèles déterministes. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 7 (4) : 39-66.
- 1122 - Séguis L., 1986. Recherche, pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame précipitée - lame écoulée), et de régularisation. Thèse de Doctorat, Génie Civil, Aménagement (Hydrologie), USTL, Montpellier, 1986/11/12. 326 p. MH 72444
- 1123 - Séguis L., 1987. Indice des précipitations antérieures et prédiction des crues au Sahel. Hydrol. Continent., 2 (1) : 47-55.
- 1124 - Servat E., Dezetter A., 1988. Modélisation globale de la relation pluie-débit : des outils au service de l'évaluation des ressources en eau. Hydrol. Continent., 3 (2) : 117-129.
- 1125 - Servat L., Dezetter A., Lapetite J.M., 1989. Modélisation pluie-débit : étude et sélection des critères de calage des modèles pluie-débit. ORSTOM, IIRSDA, 42 p. + ann. Programme ERREAU, note 2. MH 72834
- 1126 - Sighomnou D., Desbordes M., 1988. Recherche d'un modèle de pluie de projet adapté aux précipitations de la zone tropicale africaine : cas d'Adiopodoumé, Abidjan (Côte d'Ivoire). Hydrol. Continent., 3 (2) : 131-139.
- 1127 - Thébé B., Pontanier R., 1989. Etude du ruissellement au Nord Cameroun : transfert de la parcelle au bassin versant. Hydrol. Continent., 4 (1) : 57-69.
- 1128 - Thirriot B., Habaieb H., 1987. Fiabilité des modèles mathématiques de prévision de crues. Hydrol. Continent., 2 (2) : 151-157.
- 1129 - Touri H., 1981. L'utilisation des modèles mathématiques pour l'aménagement des eaux. Mémoire de DEA, Science de l'eau, Paris 6, 1981/07. Bondy (FR), ORSTOM, 84 p. MH 72113
- 1130 - Zahar Y., 1986. La méthode du Gradex, application pratique : étude à partir d'un générateur stochastique de pluie moyenne et d'un petit modèle pluie-débit global. Mémoire de DEA, Science de l'eau, USTL, Montpellier, 1986/10. Montpellier, ORSTOM. MH 72424
- 1131 - Zerhouni R., 1981. Méthodes de prédétermination de crues décennales. Géodynamique, Paris 6, 1981/07. ORSTOM, 152 p. MH 72122



Annexe 5

LES BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS ET EXPERIMENTAUX

BIBLIOGRAPHIE : REPARTITION PAR PAYS

Bénin

Burkina-Faso

Cameroun

Cap-Vert

Congo

Côte d'Ivoire

Gabon

Guinée

Mali

Mauritanie

Niger

République Centrafricaine

Sénégal

Tchad

Togo

Pour chaque pays, les bassins sont classés par ordre chronologique des études et les références par ordre chronologique des publications.

Les cotes MH..... sont celles du Laboratoire d'Hydrologie du Centre ORSTOM de Montpellier.

Bénin

BASSIN DE LA TERO

Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, ORSTOM, 1960/02. Etudes de petits bassins versants au Dahomey : rapport général. Paris, ORSTOM ; Cotonou (Dahomey), Min. des T.P. - Arr. de l'Hydraulique, 90 p. MH 70314

ORSTOM, 1960/06. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 2. Paris, ORSTOM ; Bamako (Féd. du Mali), Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 70 p. MH 70074

CCTA, CSA, 1960/12. Etat d'avancement des études hydrologiques dans la République du Dahomey. In : Conférence interafricaine sur l'hydrologie, Nairobi (KE), 16-26 janv. 1961. London, CCTA, CSA, 5 p. MH 70316

Rodier J., Sircoulon J., 1963. Monographie de l'Ouémé supérieur, tome 1 : 1-Facteurs conditionnels du régime ; 2-Equipement hydrométrique. Paris, ORSTOM ; Cotonou (Dahomey), Min. des T.P. - Arr. de l'Hydraulique, 67 p. MH 70318

BASSIN DE LA LHOTO

ORSTOM, 1957/12. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1956 : tome 2. Paris, ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, p. 96 à 181. MH 70072

ORSTOM, 1960/02. Etudes de petits bassins versants au Dahomey : rapport général. Paris, ORSTOM ; Cotonou (Dahomey), Min. des T.P. - Arr. de l'Hydraulique, 90 p. MH 70314

ORSTOM, 1960/03-04. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 3. Paris, ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 124 p. MH 70073

ORSTOM, 1960/06. Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1959. Paris, ORSTOM ; Bamako (Féd. du Mali), Min. des T.P. - Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 100 p. MH 70075

CCTA, CSA, 1960/12. Etat d'avancement des études hydrologiques dans la République du Dahomey. In : Conférence interafricaine sur l'hydrologie, Nairobi (KE), 16-26 janv. 1961. London, CCTA, CSA, 5 p. MH 70316

Rodier J., Sircoulon J., 1963. Monographie de l'Ouémé supérieur, tome 1 : 1-Facteurs conditionnels du régime ; 2-Equipement hydrométrique. Paris, ORSTOM ; Cotonou (Dahomey), Min. des T.P. - Arr. de l'Hydraulique, 67 p. MH 70318

BASSIN DE BOUKOUMBE

Colombani, Fauck, 1960/12. Etudes hydro-pédologiques du bassin versant expérimental de Boukombé : rapport provisoire. Paris, ORSTOM, 62 p. MH 70315

CCTA, CSA, 1960/12. Etat d'avancement des études hydrologiques dans la République du Dahomey. In : Conférence interafricaine sur l'hydrologie, Nairobi (KE), 16-26 janv. 1961. London, CCTA, CSA, 5 p. MH 70316

Willaime P., 1962/10. Etude pédologique du secteur de Boukombé. Mission au Dahomey, ORSTOM, 119 p.

BASSIN DE TIAPALOU

Sircoulon J., 1964. Etude hydrologique des bassins versants du Tiapalou et du Dodou (Dahomey) : tome 1, bassin du Tiapalou. Paris, ORSTOM ; Cotonou (Dahomey), Min. des T.P. - Arr. de l'Hydraulique, 61 p. MH 70319

BASSIN DE DODOU

Sircoulon J., 1964. Etude hydrologique des bassins versants du Tiapalou et du Dodou (Dahomey) : tome 2, bassin du Dodou. Paris, ORSTOM ; Cotonou (Dahomey), Min. des T.P. - Arr. de l'Hydraulique, pp. 62-112. MH 70319

Burkina-Faso

BASSIN DE GAGARA

- ORSTOM, 1957/12. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1956 : tome 2. Paris, ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, pp. 96-181. MH 70072
- ORSTOM, 1960/11-12. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 2. Paris, ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 72 p. MH 70073
- Albergel, J., Chevallier, P., Lortic, B., 1987. D'Oursi à Gagara : transposition d'un modèle de ruissellement dans le Sahel (Burkina-Faso). Hydrol. Continent., 2(2) : 77-86.
- Albergel J., 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Paris, ORSTOM, 341 p. Etudes et Thèses.

BASSIN DE BOULSA

- ORSTOM, 1961/08. Etude hydrologique de bassins versants expérimentaux dans l'Est-Volta : bassins de Boulsa, campagne 1960, rapport définitif. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Agriculture et de la Coopération - Service du Génie Rural, 57 p. + ann. MH 70141
- ORSTOM, 1961/08. Etude hydrologique de bassins versants expérimentaux dans l'Est-Volta : bassins de Boulsa, campagne 1961. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale-Service du Génie Rural, 37 p. + ann. MH 70143
- Sircoulon J., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique de bassins versants expérimentaux dans l'Est-Volta : bassins de Boulsa, campagne 1962. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Service du Génie Rural, 77 p. + ann. MH 70152
- Valentin C., 1985/08. Le bassin versant de Boulsa-Koghnéré (Burkina-Faso). Abidjan (CI) ORSTOM, 15 p. + ann. MH 61753
- Albergel J., 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Paris, ORSTOM, 341 p. Etudes et Thèses.

BASSIN DE LOUMBILA

- ORSTOM, 1963. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou : campagne 1961. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T. P. - Service de l'Hydraulique, 61 p. MH 70147
- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1962, tome 1 : Données géographiques et climatologiques, étude hydrologique. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T. P. - Service de l'Hydraulique, 80 p. MH 70151

- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1962, tome 2 : Etude hydrologique, suite. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, p.81 à 160 + ann. MH 70151
- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1963 : conclusions générales sur les trois campagnes. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, 95 p. + ann. MH 70153
- Pieyns S., 1965. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, République Voltaïque. Doct. 3ème cycle, Hydrologie, Paris, 1965, 186 p. MH 70166
- Collinet J., 1988. Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse de Doct., Géologie-Pédologie, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg (FR), le 28 mai 1988.

BASSIN DE OUAGADOUGOU

- ORSTOM, 1963. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou : campagne 1961. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P - Service de l'Hydraulique, 61 p. MH 70147
- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1962, tome 1 : Données géographiques et climatologiques, étude hydrologique. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, 80 p. MH 70151
- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1962, tome 2 : Etude hydrologique, suite. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, pp.81-160 + ann. MH 70151
- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1963 : conclusions générales sur les trois campagnes. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, 95 p. + ann. MH 70153
- Pieyns S., 1965. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, République Voltaïque. Doct. 3ème cycle, Hydrologie, Paris, 1965, 186 p. MH 70166

BASSIN DE NABAGALE

- ORSTOM, 1963. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou : campagne 1961. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, 61 p. MH 70147
- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1962. Tome 1 : Données géographiques et climatologiques, étude hydrologique. Tome 2 : Etude hydrologique. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, 160 p. + ann. MH 70151
- Pieyns S., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, campagne 1963 : conclusions générales sur les trois campagnes. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. des T.P. - Service de l'Hydraulique, 95 p. + ann. MH 70153
- Pieyns S., 1965. Etude hydrologique des bassins versants dans la région de Ouagadougou, République Voltaïque. Doct. 3ème cycle, Hydrologie, Paris, 186 p. MH 70166

BASSIN DE BODEO

- Brunet-Moret Y., 1964. Etudes hydrologiques dans les régions du Nord-Dori et de Djibo : rapport intérimaire de la campagne 1963. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 33 p. + ann. MH 70150
- Brunet-Moret Y., 1965. Etudes hydrologiques dans les régions du Nord-Dori et de Djibo : rapport intérimaire de la campagne 1964. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 48 p. + ann. MH 70158
- Brunet-Moret Y., 1966. Etudes hydrologiques dans les régions du Nord-Dori : rapport définitif. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 31 p. + ann. MH 70163

BASSIN DE TIKARE

- Rodier J., Colombani J., Ruat P., 1964. Etude hydrologique en vue d'aménagements hydro-agricoles financés par le Fonds Européen de Développement en Haute-Volta, campagne 1963, 1ère et 2ème partie. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 45 p. et 40 p. + ann. MH 70154
- Oberlin G., 1965. Etude hydrologique en vue d'aménagements hydro-agricoles financés par le Fonds Européen de Développement en Haute-Volta : région de Tikaré, campagne 1964. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 71 p. + ann. MH 70160
- Oberlin G., Baudoin D., Chaperon P., 1966. Etude hydrologique en Haute-Volta, région de Tikaré : campagne 1965 et conclusions générales. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 82 p. + ann. MH 70161

BASSIN D'ANSOURI

- Rodier J., Colombani J., Ruat P., 1964. Etude hydrologique en vue d'aménagements hydro-agricoles financés par le Fonds Européen de Développement en Haute-Volta, campagne 1963, 1ère et 2ème partie. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 45 p. et 40 p. + ann. MH 70154
- Oberlin G., 1965. Etude hydrologique en vue d'aménagements hydro-agricoles financés par le Fonds Européen de Développement en Haute-Volta : région de Tikaré, campagne 1964. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 71 p. + ann. MH 70160
- Oberlin G., Baudoin D., Chaperon P., 1966. Etude hydrologique en Haute-Volta, région de Tikaré : campagne 1965 et conclusions générales. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 82 p. + ann. MH 70161

BASSIN DE MANGA

- Sircoulon J., Klein J.C., 1964. Etude hydrologique de bassins expérimentaux dans le sud-est de la Haute-Volta (région de Manga) : campagne 1963, rapport intérimaire. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 59 p. MH 70155
- Klein J.C., 1965. Etude hydrologique de bassins représentatifs dans le sud-est de la Haute-Volta (région de Manga) : second rapport, campagne 1964. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 110 p. + ann. MH 70159

- Klein J.C., 1967. Etude hydrologique de bassins représentatifs dans le sud-est de la Haute-Volta (région de Manga) : rapport définitif, 1963-1965. Paris, ORSTOM ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. de l'Economie Nationale - Dir. du Génie Rural, 137 p. + ann. MH 70164
- Valentin C., 1982/04. Esquisse à 1/25 000 des organisations superficielles d'un petit bassin versant soudanien (Binndé). Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM, 12 p. + cartes.
- Valentin C., 1983/06. Organisation superficielle de Kazanga : esquisse à 1/50 000 d'un petit bassin versant de 56 km². Abidjan (CI), ORSTOM, 13 p.
- Albergel J., Bernard A., 1984. Etude des paramètres hydrodynamiques des sols sous pluies simulées : estimation du ruissellement sur le bassin versant de Kazanga. Ouagadougou (BF), ORSTOM, 101 p. MH 72320
- Albergel J., Bernard A., 1984/12. Calage du modèle simulateur. Préviation de la crue décennale sur le bassin versant de Binndé. Ouagadougou (BF), ORSTOM, 63 p. MH 72319
- Albergel J., 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Paris, ORSTOM, 341 p. Etudes et Thèses.
- Lamachère J.M., 1989/11. Campagne hydrologique 1989 sur les bassins versants de Kazanga et Tougou : rapport final. Ouagadougou (BF), ORSTOM, 38 p.

BASSIN DE NIENA-DIONKELE

- Séchet P., 1975/04. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 1-Procès verbal d'installation et rapport de campagne 1974. 2-Limnigraphie. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Min. du Plan-Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 54 p. + graph. MH 71534
- ORSTOM, 1975/04. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 6-Station climatologique de N'Dorola Karamassasso, observations en 1976. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 65 p. MH 71786
- Séchet P., 1976/02. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 3-Rapport de campagne 1975. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 26 p. + ann. MH 71610
- Dubois G.J., Séchet P., 1976/02. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 4-La station climatologique de N'Dorola-Karamassasso, procès verbal d'installation et observation en 1975. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 30 p. MH 71611
- Le Barbé L., 1977/05. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 5-Rapport définitif. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 86 p. + ann. MH 71770
- Le Barbé L., (1977). Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 7-Station climatologique de N'Dorola Karamassasso, observations en 1977 et conclusion sur deux années d'observation. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 79 p. MH 71795
- Claude J., Lointier M., Gualde R., 1982/03. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 2-Station climatologique de N'Dorola, observations en 1981. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 57 p. MH 72114

- Claude J., Lointier M., Gualde R., 1982. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé et Foullasso-Lelasso : 1-Rapport de campagne 1981. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 90 p.
- Claude J., Lointier M., Gualde R., 1983. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé et Foullasso-Lelasso : 3-Rapport de campagne 1982. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 108 p.
- Lointier M., Gualde R., 1983. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 4-Station climatologique, observations en 1982. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 69 p.
- Valentin C., Mahop F., 1983/06. Organisations superficielles et reconnaissance pédologique. Esquisse à 1/50 000 du bassin de Kuo à Digouéra. Abidjan (CI), ORSTOM, 25 p.
- Lamachère J.M., Gualde R., 1984. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé et Foullasso-Lelasso : 5-Rapport de campagne 1983. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 123 p.
- Lamachère J.M., Gualde R., 1984. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé : 6-Station climatologique, observations en 1983. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 75 p.
- Lamachère J.M., 1984/09. Etude hydrologique de la plaine de Niéna-Dionkélé et Foullasso-Lelasso : 7 et 8-Rapport définitif, 2 tomes. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Ouagadougou, Min. du Plan - Dir. de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural, 171 p. et pp.172-387. MH 72271
- Albergel J., 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Paris, ORSTOM, 341 p. Etudes et Thèses.
- Lamachère J.M., 1989. Les risques d'inondations dans la plaine agricole de Niéna-Dionkélé. In : Le risque en agriculture. Eldin M. et Milleville P. (éds). Paris, ORSTOM, pp. 83-99. Coll. A Travers Champs.

MARE D'OURSIS

- Bernard A., (1978). Observations climatologiques à la station météorologique de Djalafanka, Mare d'Oursi, juin 1976 à décembre 1977. Ouagadougou (BF), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou (Haute-Volta), Min. du Plan, 91 p. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta). MH 71791
- Bernard A., Claude J., Saadoun N., (1978). Observations climatologiques à la station météorologique de Djalafanka, Mare d'Oursi, année 1978. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 73 p. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute-Volta). MH 71884
- Claude J., Bernard A., Saadoun N., (1978). Etude hydrologique de sept bassins versants alimentant la Mare d'Oursi, rapport des campagnes 1976 et 1977. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 76 p. + ann. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute-Volta). MH 71792
- Claude J., Bernard A., Saadoun N., (1978). Etude hydrologique de sept bassins versants alimentant la Mare d'Oursi, rapport de campagne 1978. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM, Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 66 p. + ann. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta). MH 71894

- Claude J., Bernard A., Lointier M., (1978). Etude hydrologique de sept bassins versants alimentant la Mare d'Oursi, rapport de campagne 1980. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 98 p. + ann. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta).
MH 72051
- Claude J., Bernard A., Bardin E., (1979). Etude hydrologique de sept bassins versants alimentant la Mare d'Oursi, rapport de campagne 1979. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM, Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 28 p. + ann. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta).
MH 71977
- Claude J., Bernard A., Lointier M., 1981/03. Observations climatologiques à la station météorologique de Djalafanka-Mare d'Oursi, année 1980. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 80 p. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta).
MH 72036
- Bernard A., 1983/06. Observations climatologiques à la station météorologique de Djalafanka et suivi de la Mare d'Oursi, année 1982. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 59 p. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta).
MH 72190
- Claude J., Bernard A., Touiri H., Albergel J., 1982/04. Observations climatologiques à la station de Djalafanka et observations hydrologiques à Kolel, Jalafanka et Mare d'Oursi, année 1981. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 98 p. + ann. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta).
MH 72115
- Chevalier P., 1982/08. Simulation de pluie sur deux bassins versants sahéliers (Mare d'Oursi - Haute Volta). Ouagadougou, ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 105 p. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta).
MH 72149
- Bernard A., 1984/04. Observations climatologiques à la station météorologique de Djalafanka et suivi de la Mare d'Oursi, année 1983. Ouagadougou (BF), ORSTOM ; Paris, DGRST ; Ouagadougou, Min. du Plan, 62 p. (ACC, Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan, Haute Volta).
- Chevalier P., Claude J., Pouyaud B., Bernard A., 1985. Pluies et crues au Sahel : hydrologie de la Mare d'Oursi, Burkina-Faso, 1976-1981. Paris, ORSTOM, 251 p. Travaux et Documents n°190.
- Collinet J., 1988. Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse de Doct., Géologie-Pédologie, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg (FR), le 28 mai 1988.
- Albergel J., 1988. Genèse et prédétermination des crues au Burkina-Faso : du m² au km², étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Paris, ORSTOM, 341 p. Etudes et Thèses.
- Janneau J.L., Lamachère J.M., 1988/09. Programme d'évaluation préliminaire SPOT, PEPS n°149 - SPOT OURSI : caractéristiques des principales surfaces élémentaires de la région d'Oursi. Ouagadougou (BF), ORSTOM, 33 p.
- Lamachère J.M., 1988/10. Programme d'évaluation préliminaire SPOT, PEPS n°149 - SPOT OURSI : les états de surface de la région d'Oursi, observations au sol et hydrodynamique. Ouagadougou (BF), ORSTOM, 33 p.
- Lamachère J.M., 1988/02. Interprétation des images satellitaires SPOT et cartographie des aptitudes au ruissellement et à l'infiltration des sols sur un bassin versant sahélier : le bassin versant de la Mare d'Oursi. In : Journées techniques du CIEH, Ouagadougou (BF), 9-11 fév. 1988, 18 p.

PLAINE DE KAMADENA

ORSTOM, 1977/12. Etude hydrologique de la plaine de Kamadéna : 1-Rapport d'installation, rapport de campagne 1977. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Dir. de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural - Fond de Développement Rural, 52 p. MH 71785

Le Barbé L., 1979/01. Etude hydrologique de la plaine de Kamadéna : 2-Rapport de campagne 1978. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Dir. de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural - Fond de Développement Rural, 57 p. + ann. MH 71873

Le Barbé L., Thiébaux J.P., Letroquer Y., 1980. Etude hydrologique de la plaine de Kamadéna : 3-Rapport définitif. Ouagadougou (Haute-Volta), ORSTOM ; Dir. de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural - Fond de Développement Rural, 224 p. MH 71968

BASSIN DE BIDI

ORSTOM, 1991. Bassin de BIDI.

BASSIN D'IMIGA

Mietton M., 1988. Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère au Burkina-Faso : l'érosion en zone de savane. Grenoble, Univ. Grenoble 1, 511 p.

Cameroun

BASSIN DE LA TSANAGA

- Callède J., Delfieu G., 1967/04. Hydrologie des mayos du Nord Cameroun : le bassin du mayo Tsanaga, campagne 1966. Yaoundé (CM), ORSTOM, 45 p. + ann. MH 70537
- Nouvelot J.F., Delfieu G., 1968/01. Hydrologie des mayos du Nord Cameroun : le bassin de la Tsanaga, campagne 1967. Yaoundé (CM), ORSTOM, 29 p. MH 70544
- Nouvelot J.F., 1972/12. Hydrologie des mayos du Nord Cameroun : monographie de la Tsanaga, rapport terminal. Yaoundé (CM), ORSTOM, 118 p. MH 71397
- Nouvelot J.F., 1973. Hydrologie des Mayos du Nord Cameroun, monographie de la Tsanaga. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., 10 (3) : 211-303.
- Olivry J.C., Hoorelbecke R., Andiga J., 1974/12. Quelques mesures complémentaires de transport solides en suspension au Cameroun : le Mayo de Tsanaga à Bogo 1973 ; le Mbam à Goura 1970-1974. Yaoundé (CM), ORSTOM ; Min. du Plan et de l'Aménagement du Territoire, 63 p. MH 71518
- Naah E., (1977). Etude hydrologique du mayo Tsanaga à Minglia : campagne 1977, rapport définitif. Yaoundé (CM), ONAREST, 33 p. + ann. MH 71838

BASSIN DU BOULORE

- Commission Scientifique du Logone et du Tchad 1956/11. 1-Etudes de crues sur un petit bassin de la région de Maroua, le Bouloré : supplément 1955 à la monographie du Logone inférieur. Paris, Min. de la France d'Outre Mer, 117 p. MH 70357
- Le Gourières D., (1962). Conférence de Fort-Lamy (TC) sur les bassins versants expérimentaux du Nord-Cameroun, 23 au 25 octobre 1962. Yaoundé (CM), I.R.CAM, 9 p. + ann. MH 70508

BASSIN DU GODOLA

- Tixier J., (1956). Etudes du bassin expérimental du Motorsolo à Godola (Région Nord de Maroua - Cameroun) : campagne 1956. ORSTOM, 14 p. + ann. MH 70486
- Cadier E., 1971. Hydrologie des Mayos du Nord Cameroun : bassin versant représentatif du Motorsolo : rapport définitif des campagnes 1966-1967-1968-1969. Yaoundé (CM), ORSTOM, 177 p. + ann. MH 71311

BASSIN DU MAYO KERENG

- Pelleray H., 1957/12. Etudes des bassins versants expérimentaux du Mayo-Kérenge : 1ère partie : Mayo-Kérenge. Yaoundé (CM), ORSTOM-IRCAM, 80 p. + ann. MH 70491
- Le Gourières D., (1962). Conférence de Fort-Lamy (TC) sur les bassins versants expérimentaux du Nord Cameroun, 23 au 25 octobre 1962. Yaoundé (CM), I.R.CAM, 9 p. + ann. MH 70508

BASSIN DU MAYO BALENG

- Guiscafré J., 1960/08. Application de la méthode des hydrogrammes unitaires à un écoulement de type hypodermique : bassin versant du Mayo Baleng. In : Conférence Interafricaine sur l'Hydrologie, Nairobi (KN), 16-26 janv. 1961, 11 p. MH 70500

BASSIN DU MOGODE

- Guiscafré J., 1961/01. Influence des aménagements anti-érosifs sur l'écoulement des Mayos des Kapsiki : bassins versants de Mododé. Yaoundé (CM), ORSTOM-I.R.CAM, 40 p. MH 70504
- Le Gourières D., (1962). Les bassins versants expérimentaux du Nord-Cameroun. In : Conférence de Fort-Lamy (TC), 23 au 25 octobre 1962. Yaoundé (CM), I.R.CAM, 9 p. + ann. MH 70508

BASSIN DE BOUNDJOUK

- Rodier J., Brunet-Moret Y., 1963/07. Etude du ruissellement sur le plateau de l'Adamaoua (bassin expérimental de Boundjouk). Yaoundé (CM), ORSTOM-I.R.CAM ; Min. des Finances et du Plan, 52 p. + ann. MH 70514
- Brunet-Moret Y., (1963). Etude du ruissellement sur le plateau de l'Adamaoua (bassin expérimental de Boundjouk) : rapport définitif, campagne 1962 et 1963. Yaoundé (CM), ORSTOM-I.R.CAM ; Min. des Finances et du Plan, 43 p. + ann. MH 70524
- Brunet-Moret Y., 1965. Influence du corps de l'averse sur le ruissellement d'un petit bassin (Bassin du petit Boundjouk). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 2 (3) : 3-32.
- Brunet-Moret Y., 1965/04. Etude des facteurs du ruissellement sur un bassin représentatif du Cameroun (petit bassin de Boundjouk). In : Symp. de Budapest, Oct. 1965. Gentbrugge (BE), AISH, p.163-177. AISH Publication n°66. MH 70522

BASSIN DE LA MEFOU

- EDF, IGECO, ORSTOM, 1969/10. Barrage de Mopfou amont ; étude hydrologique de la Méfou supérieure : campagne 1968-1969. Yaoundé (CM), EDF-IGECO ; ORSTOM, 26 p. + ann. MH 71070

BASSIN DU MAYO REM

- Brunet-Moret Y., 1965. Etude du ruissellement sur le plateau de l'Adamaoua (Bassins expérimentaux de Rem). Yaoundé (CM), ORSTOM ; Min. des Finances et du Plan, 44 p. + ann. MH 70525

BASSIN D'AVEA

- Lefèvre R., 1964/06. Etude hydrologique de la moyenne Sanaga : bassins expérimentaux de l'Avéa, campagne 1963. Yaoundé (CM), ORSTOM, Min. des Finances et du Plan, 70 p. + ann. MH 70518
- Lefèvre R., 1965. Etude hydrologique de la moyenne Sanaga : bassins représentatifs de l'Avéa, campagne 1963 et 1964. Yaoundé (CM), ORSTOM, Min. des Finances et du Plan, 136 p. + ann. MH 70526

BASSIN DE TOUBORO-MAYO BOME

- Lefèvre R., 1964/07. Etude générale du chemin de fer Cameroun-Tchad : hydrologie de la Vina du Nord, bassins expérimentaux de Touboro, campagne 1963. Yaoundé (CM), ORSTOM ; Comité Mixte de Coordination des Etudes Ferroviaires Cameroun-Tchad, 89 p. + ann. MH 70517
- Lefèvre R., 1966. Hydrologie de la Vina du Nord, bassins expérimentaux de Touboro : campagne 1964, rapport provisoire. Yaoundé (CM), Paris, ORSTOM ; Comité Mixte de Coordination des Etudes Ferroviaires Cameroun-Tchad, 113 p. + ann. MH 70528
- Lefèvre R., Nouvelot J.F., 1966/06. Hydrologie de la Vina du Nord, bassins représentatifs de Touboro : rapport définitif, campagne 1963-1964-1965. Paris, ORSTOM ; Comité Mixte de Coordination des Etudes Ferroviaires Cameroun-Tchad, 141 p. + ann. MH 70534

BASSIN DU RISSO

- Nouvelot J.F., 1967. Hydrologie de la Vina du Nord, bassins représentatifs du Risso : rapport provisoire, campagne 1966. Yaoundé (CM), ORSTOM, 77 p. + ann. MH 70543
- Nouvelot J.F., 1969/01. Hydrologie de la Vina du Nord, bassins représentatifs du Risso : rapport provisoire, campagne 1967. Yaoundé (CM), ORSTOM, 51 p. MH 70557
- Naah E., 1979. Etudes des caractéristiques hydrologiques sur un ensemble de bassins versants représentatifs des terrains précambriens de la Vina du Nord (les bassins du Risso - Cameroun). Doc. 3ème cycle, Hydrologie, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6, 6 avr. 1979, 177 p. MH 71877

BASSIN DE LA MIFI

- EDF, ORSTOM, 1966/06. Aménagement du Choumi (Cameroun Oriental) : note hydrologique. Paris, EDF ; ORSTOM, 17 p. + ann. MH 70533
- EDF, ORSTOM, 1967. Aménagement du Choumi (Cameroun Oriental) : note hydrologique. Paris, EDF ; ORSTOM, 23 p. + ann. MH 70540
- EDF, ORSTOM, 1967/08. Etudes hydrologiques du Choumi : campagne 1966, résultats bruts. Paris, EDF-IGECO ; ORSTOM, 37 p. + ann. MH 70538
- EDF, ORSTOM, 1968. Aménagement du Choumi (Cameroun Oriental) : note hydrologique. Paris, EDF ; ORSTOM, 18 p. + ann. MH 70555
- Olivry J.C., (1973). Régimes hydrologiques en pays Bamiléké, la Mifi-Sud, tome 1 : Le milieu physique de la région de l'ouest, le bassin de la Mifi-Sud, généralités et données de base. Yaoundé (CM), ORSTOM, 275 p. MH 71416
- Olivry J.C., (1974). Régimes hydrologiques en pays Bamiléké, la Mifi-Sud, tome 2 : Interprétation des mesures, modules et bilan, basses eaux et crues. Yaoundé (CM), ORSTOM, 300 p. MH 71416

Olivry J.C., (1975). Principales caractéristiques des régimes hydrologiques en pays bamiléké déterminées dans l'étude de la Mifi-Sud. Yaoundé (CM), ONAREST, 76 p. MH 71647

BASSIN DE LA MONKIE

Nouvelot J.F., Cadier E., Olivry J.C., 1971. Hydrologie du bassin supérieur du Noun : campagnes 1968-1969, 1969-1970, 1970-1971. Yaoundé (CM), ORSTOM ; Min. du Plan et du Développement Industriel et Commercial du Cameroun, 314 p. MH 71320

BASSIN DE SANGUERÉ

Casenave A., 1978. Etude hydrologique des bassins de Sanguéré. Cah. de l'IRTISS n°1, 209 p., Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 15 (1-2) : 3-209. MH 71853

BASSIN DE OTTOTOMO

Ikounga M., 1978. Analyse fine du mécanisme de la formation du ruissellement sur sols ferrallitiques sous forêt (région de Yaoundé-Cameroun) Thèse de Doct. ingénieur, Hydrologie, Paris 6, 27 janv. 1978. 109 p. + ann. MH 71868

BASSIN DE MOKOLO

Olivry J.C., Hoorelbecke R., (1974). Etude hydrologique du haut bassin du mayo Tsanaga à Mokolo : résultats de la campagne 1974. Yaoundé (CM), ORSTOM, SNEC, 46 p. MH 71491

Olivry J.C., Hoorelbecke R., (1975). Etude hydrologique du haut bassin du mayo Tsanaga à Mokolo (1974-1975) : rapport définitif. Yaoundé (CM), ONAREST, SNEC, 93 p. MH 71595

BASSIN DE MOUDA

Thébé B., Sayol R., Seyni Boukar L., 1984/09. Erosion et bilan hydrique Nord-Cameroun ; les sites de Mouda, données techniques. Yaoundé (CM), MESRES, 12 p. + ann.

Thébé B., Ayanga A., Seyni Boukar L., Sighomnou D., 1985/04. Bassins versants de Mouda (Nord Cameroun) : campagne 1984, rapport provisoire. Yaoundé (CM), MESRES, 49 p. + ann. MH 72441

Thébé B., Seyni Boukar L., Abéga R., Djoko Pawa A., Mainam F., 1985/11. Les bassins versants de Mouda (Nord Cameroun) : rapport hydrologique campagne 1985. Yaoundé (CM), MESRES, 54 p. + ann. MH 72442

Thébé B., 1987. Hydrodynamique de quelques sols du Nord-Cameroun : bassins versants de Mouda, contribution à l'étude des transferts d'échelles Doc. d'Univ., Hydrologie, USTL, Montpellier (FR), 15 juin 1987, 306 p. MH 72536

Cap-Vert

ILE DE SAO NICOLAU

Gallaire R., Calvez R., Lérique J., 1979/05. Etude de deux petits bassins versants de l'île de Sao Nicolau. Dakar (SN), ORSTOM ; Praia (CV), Min. du Développement Rural, 33 p. MH 71918

Desconnets J.C., 1987. Contribution à l'étude des ressources souterraines dans l'île de Sao Nicolau. Mémoire de Licence en Gestion de l'Eau, Université d'Avignon, septembre 1987. 110 p. + ann.

MH 72609

Olivry J.C., Lérique J., Calvez R., Gallaire R., Hoorelbecke R., Servat E., Le Troquer Y., Randon R., 1987. Etude de l'île de Sao Nicolau. Paris, ORSTOM ; Praia (CV), Min. du Développement Rural et de la Pêche, 372 p. MH 72797

Congo

BASSIN DE LA COMBA

- Aimé J., 1959/07. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport provisoire. Brazaville (CG), ORSTOM ; I.E.C, 17 p. MH 70616
- Aimé J., 1960/01. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport définitif. Brazaville (CG), ORSTOM ; I.E.C ; COMILOG, 50 p. MH 70617
- Molinier M., 1975/09. Bassins versants de la Comba : équipement hydro-pluviométrique et étalonnage. Paris, ORSTOM, 18 p. + ann. MH 71640
- Molinier M., Thébé B., 1978/01. Etude du ruissellement sur les bassins représentatifs et expérimentaux de la Comba. Abidjan (CI), ORSTOM, 91 p. + ann. MH 71822
- Molinier M., 1981. Etude hydrologique des bassins de la Comba (République Populaire du Congo). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 18 (2-3) : 75-190.
- Casenave A., Kong J., Tiébaux J.P., 1986. Etude du ruissellement sous pluies simulées sur un bassin versant de la Comba. Abidjan (CI), ORSTOM, 29 p. + ann. MH 72331

BASSIN DU LEYOU

- ORSTOM, Institut d'Etudes Centrafricaines, 1958/12. Bassin versant expérimental du Leyou (Moyen-Congo) : résultats principaux des études à la fin des deux campagnes 1957 et 1958. Brazaville (CG), ORSTOM ; I.E.C, 12 p. MH 70613
- Aimé J., 1959/07. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport provisoire. Brazaville (CG), ORSTOM ; I.E.C, 17 p. MH 70616
- Aimé J., 1960/01. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport définitif. Paris, ORSTOM ; I.E.C ; COMILOG, 50 p. MH 70617
- Casenave A., Chevallier P., Kong J., 1986/02. Etudes des crues décennales des petits bassins forestiers : bassin du Leyou et de la Bibanga (Congo). Abidjan (CI), ORSTOM, 25 p. + ann. MH 72332

BASSIN DE MAKABANA

- Aimé J., 1959/07. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport provisoire. Brazaville (CG), ORSTOM ; I.E.C, 17 p. MH 70616
- Aimé J., 1960/01. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport définitif. Brazaville (CG), ORSTOM ; I.E.C ; COMILOG, 50 p. MH 70617

BASSIN DE BIBANGA

- Aimé J., 1959/07. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport provisoire. Paris, ORSTOM ; I.E.C, 17 p. MH 70616
- Aimé J., 1960/01. Etude des crues décennales des petits cours d'eau traversés par la ligne de chemin de fer C.F.C.O.- M'BINDA : rapport définitif. Paris, ORSTOM ; I.E.C ; COMLOG, 50 p. MH 70617
- Casenave A., Chevallier P., Kong J., 1986/02. Etudes des crues décennales des petits bassins forestiers : bassin du Leyou et de la Bibanga (Congo). Abidjan (CI), ORSTOM, 25 p. + ann. MH 72332

BASSIN DE MIELEKOUKA

- Pouyaud B., 1969/05. Bassins versants de Miélékouka : régimes des rivières de la Route du Cacao, tome 1. Brazzaville (CG), ORSTOM ; Min. des T.P., R.N.T.P., 138 p. MH 71041

PLAINE DE DIHESSE

- Pouyaud B., Barilly A., Chartier R., Gathelier R., Guiguen N., 1971/06. Etude hydrologique de la Plaine de Dihessé : rapport définitif, période du 15 mai 70 au 15 mai 71. Brazzaville (CG), ORSTOM ; Coordination Générale des Services de Planification, 84 p. + ann. MH 71231
- Cadier E., Barilly A., Chartier R., Gathelier R., Mailhac P., Pouyaud B., 1972/06. Etude hydrologique de la Plaine de Dihessé : rapport définitif, période du 15 mai 1971 au 15 mai 1972. Brazzaville (CG), ORSTOM ; Commissariat Général au Plan, 102 p. + ann. MH 71328

BASSIN DE FOUBOU

- Cadier E., Barilly A., Gathelier R., Hoorelbecke R., 1973/09. Etudes hydrologiques dans la région du Mayombé : campagne 1972-1973. Brazzaville (CG), ORSTOM ; Agence Transcongolaise de Communications, 96 p. + ann. MH 71402
- Molinier M., Barilly A., Gathelier R., Thébé B., 1974/09. Etudes hydrologiques dans la région du Mayombé : rapport définitif. Brazzaville (CG), ORSTOM ; Agence Transcongolaise de Communications, 110 p. + ann. MH 71473

Côte d'Ivoire

BASSIN D'IFOU

- ORSTOM, 1956/05. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1955. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 64 p. + ann. MH 70071
- ORSTOM, 1957/12. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1956, tome 2. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 181 p. MH 70072
- Dubreuil P., 1960/01. Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire : rapport général, tome 1 : Zone forestière. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. des T.P. - Serv. de l'Hydrologie, 156 p. MH 70228
- ORSTOM, 1960/03-04 Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 3. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 124 p. MH 70073
- ORSTOM, 1960/05. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 1. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 78 p. MH 70074
- Girard G., 1960/08. Equipement des bassins versants expérimentaux en service dans la République de Côte d'Ivoire. In : Conférence Interafricaine sur l'Hydrologie, Nairobi (KE), 16-26 janv. 1961, 5 p. MH 70230

BASSIN DE TOUMODI

- Dubreuil P., 1960/01. Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire : rapport général, tome 2 : Zone de savane. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. des T.P. - Serv. de l'Hydrologie, 141 p. MH 70228
- Girard G., 1960/08. Equipement des bassins versants expérimentaux en service dans la République de Côte d'Ivoire. In : conférence Interafricaine sur l'Hydrologie, Nairobi (KE), 16-26 janv. 1961, 5 p. MH 70230

BASSIN DE FLAKOHO

- ORSTOM, 1958/09. Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 1. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 115 p. MH 70073
- Dubreuil P., 1960/01. Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire : rapport général, tome 2 : Zone de savane. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. des T.P. - Serv. de l'Hydrologie, 141 p. MH 70228
- ORSTOM, 1960/05. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 1. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 78 p. MH 70074

ORSTOM, 1960/06. Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1959. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 100 p. MH 70075

Girard G., 1960/08. Equipement des bassins versants expérimentaux en service dans la République de Côte d'Ivoire. In : conférence Interafricaine sur l'Hydrologie, Nairobi (KE), 16-26 janv. 1961, 5 p. MH 70230

Gioda A., Lapetite J.M., 1985/07. Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'infiltromètre à aspersion (Worossantiakaha, Côte d'Ivoire, 1984). Abidjan (CI), ORSTOM, 54 p. MH 72548

BASSIN DE NION

ORSTOM, 1958/09. Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 1. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 115 p. MH 70073

Dubreuil P., 1960/01. Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire : rapport général, tome 1 : Zone forestière. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. des T.P. - Serv. de l'Hydrologie, 156 p. MH 70228

ORSTOM, 1960/05. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 1. Abidjan (CI), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 78 p. MH 70074

Girard G., 1960/08. Equipement des bassins versants expérimentaux en service dans la République de Côte d'Ivoire. In : conférence Interafricaine sur l'Hydrologie, Nairobi (KE), 16-26 janv. 1961, 5 p. MH 70230

BASSIN DE TONKOU

Dubreuil P., 1960/01. Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire : rapport général, tome 1 : Zone forestière. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. des T.P. - Serv. de l'Hydrologie, 156 p. MH 70228

Casenave A., Guigen N., Simon J.M., 1979/06. Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale : détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols forestiers, campagne 1978. Abidjan (CI), ORSTOM ; CIEH, 51 p. + ann. MH 71896

BASSIN DE GUISSÉGUE

Dubreuil P., 1960/04. Etude du bassin versant de la rivière Agneby : résultats de la campagne 1959. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 60 p. MH 70229

Girard G., 1961/05. Etude du bassin versant de la rivière Agneby : résultats de la campagne 1960. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 79 p. MH 70233

Girard G., 1963. Etude du bassin versant de la rivière d'Agneby : résultats des campagnes 1961 et 1962, tome 1 : Les bassins supérieurs et moyens. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 85 p. + ann. MH 70241

BASSIN DE BOUAKE

Dubreuil P., 1960/01. Etude hydrologique de petits bassins versants en Côte d'Ivoire : rapport général, tome 2 : Zone de savane. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. des T.P. - Serv. de l'Hydrologie, 141 p. MH 70228

BASSIN DE PONONDOUGOU

- Girard G., 1961/03. Etude du bassin versant de la Haute-Bagoé : résultats de la campagne 1960. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 82 p. MH 70232
- Girard G., 1962/06. Etudes du bassin versant de la Haute-Bagoé : résultats de la campagne 1961. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 44 p. MH 70236
- Girard G., Touchebeuf de Lusigny P., 1964/04. Etude hydrologique du bassin versant de la Haute-Bagoé : résultats de la campagne 1962. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 91 p. + ann. MH 70244

BASSIN D'AGNEBY

- Girard G., 1963. Etude du bassin versant de la rivière Agneby : Résultats des campagnes 1961 et 1962, tome 2 : Le bassin inférieur. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 85 p. + ann. MH 70241

BASSIN DE VARALE

- Girard G., 1962. Etude hydrologique de bassins versants expérimentaux dans la région de Bouna : campagne 1961. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 27 p. MH 70234
- Guillou J.L., 1965. Etude hydrologique des bassins versants expérimentaux de Varale dans la région de Bouna, Côte d'Ivoire : rapport définitif, campagnes 1962 et 1963. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 156 p. MH 70250
- Hasnaoui M.D. 1986/09. Etude du rapport pluie-débit par simulation de pluies sur les bassins versants de Varale dans la région de Bouna (Nord-Est Côte d'Ivoire). Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 111 p. MH 72422

BASSIN DE LOSSERIGUE

- ORSTOM, 1962/05. Etude hydrologique du Solomougou : résultats de la campagne 1961. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 43 p. MH 70235
- Cruette J., Lelièvre M., 1963. Etude hydrologique du Solomougou, résultats de la campagne 1962, tome 1 : Données géographique et climatologiques, bassins versants expérimentaux du Loserigue. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 68 p. MH 70242
- Girard G., Lelièvre M., 1963. Etude hydrologique du Solomougou, résultats de la campagne 1962, tome 2 : Bassin du Solomougou. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 32 p. + ann. MH 70242
- Herbaud J., 1965/04. Etude hydrologique du Solomougou : synthèse des études effectuées jusqu'en 1963, 1ère partie : Bassin du Solomougou. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 54 p. + ann. MH 70248
- Herbaud J., 1965/04. Etude hydrologique du Solomougou : synthèse des études effectuées jusqu'en 1963, 2ème partie : Bassins versants expérimentaux du Lossérigüé. Abidjan (CI), ORSTOM ; Soc. d'Equip. de la Côte d'Ivoire (S.E.C.I.), 70 p. + ann. MH 70248

BASSIN DE DOUNI

- Girard G., Le Gourières D., 1963/11. Etude des bassins versants du Baoulé et de la Kourou-Kéllé, région d'Odienné : résultats de la campagne 1962. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. et de la Coop. - Dir. du Génie Rural, 62 p. + ann. MH 70240
- Pourrut P., 1965. Etude des bassins versants du Baoulé et de la Kourou-Kéllé, région d'Odienné : résultats de la campagne 1963. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. et de la Coop. - Dir. du Génie Rural, 71 p. + ann. MH 70249
- ORSTOM, 1966/03. Etude hydrologique du Baoulé et de la Kourou-Kéllé, région d'Odienné : rapport définitif, campagne 1962, 1963 et 1964. Abidjan (CI), ORSTOM ; Min. de l'Agr. et de la Coop. - Dir. du Génie Rural, 80 p. + ann. MH 70253

BASSIN DE KORHOGO

- Girard G., Touchebeuf de Lusigny P., Cruette J., 1963. Etude de ruissellement sur le bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire), résultats de la campagne 1962 : 1-Etude d'hydrologie de surface. Paris, ORSTOM ; Min. de la Coop. ; CIEH, 75 p. + ann. MH 70239
- Girard G., Chouret A., 1965/03. Etude de ruissellement sur le bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire), résultats de la campagne 1963 : 1-Etude hydrologique de surface. Paris, ORSTOM ; CIEH, 61 p. + ann. MH 70247
- ORSTOM, 1966. Etude de ruissellement sur le bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire), campagne 1962 à 1965 : étude d'hydrologie de surface, tome 1 et 2. Paris, C.I.E.H.; ORSTOM, 46 p. et 46 p. + ann. MH 70256
- Molinier M., 1968/12. Etude de ruissellement sur le bassin versant de Korhogo : résultats de la campagne 1967. Abidjan (CI) ORSTOM, 20 p. + ann. MH 70267
- Molinier M., 1971/11. Etude du ruissellement sur le bassin versant de Korhogo : campagnes 1968 - 1969 - 1970. Abidjan (CI) ORSTOM, 60 p. + ann. MH 71302
- Camus H., Berthault C., 1972. Influence du couvert végétal sur la perméabilité des sols du bassin représentatif de Korhogo (Côte d'Ivoire). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 9 (3) : 3-13.
- Dégallier R., 1972. Etude du ruissellement et de l'infiltration sur un petit bassin versant de zone de savane, Korhogo. Paris, BRGM.
- Chaperon P., 1975/02. Note sur l'étalonnage du bassin versant de Korhogo (Côte d'Ivoire). Paris, ORSTOM, 16 p. + fig. MH 71567
- Camus H., Chaperon P., Girard P., Molinier M., 1976. Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical, influence de la mise en culture : Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972. Paris, ORSTOM, 81 p. + ann. Travaux et Documents n°52. MH 30036
- Roose E., 1981. Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale : étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Paris, ORSTOM, 569 p. Travaux et Documents n° 130.
- Gioda A., 1983/08. Etude du rapport pluie-débit sur un petit bassin de savane à l'aide d'un infiltromètre à aspersion (Korhogo, Côte d'Ivoire). Rapport d'élève, année de spécialisation. Abidjan (CI), ORSTOM, 64 p. MH 72197
- Koffi Y., 1983/09. Bassin versant de Waraniéné-Korhogo : mesures du mois de juillet 1983. Rapport de stage. Abidjan (CI), ORSTOM, 34 p. MH 72841

Gioda A., Simon J.M., Etienne J., 1985/04. Comparaison entre les relations précipitations-débits déduites de la simulation de pluies sur parcelles (1983) et celles observées à l'échelle du bassin (1968-71 et 1983-84), Waraniéné - Korhogo - Côte d'Ivoire. Abidjan (CI), ORSTOM, 68 p. MH 72316

Collinet J., 1988. Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse de Doct., Géologie-Pédologie, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg (FR), le 28 mai 1988. MH 61897

BASSIN D'AMITIORO

Sircoulon J., 1967/04. Bassin de l'Amitioro : étude du ruissellement et de ses facteurs conditionnels climatologiques. Abidjan (CI), ORSTOM, 89 p. + ann. MH 70258

Mathieu, 1969. Erosion et transport solide sur le bassin versant de l'Amitioro.

Boulangé, 1970. Transport et érosion sur un bassin versant tributaire de la rivière Amitioro. Abidjan (CI), ORSTOM.

BASSIN DE SAKASSOU

Lafforgue A., 1972/12. Opération géodynamique en Côte d'Ivoire : procès-verbal d'installation des B.V.R. de Sakassou. Abidjan (CI), ORSTOM, 9 p. MH 71359

Lafforgue A., 1982. Etude hydrologique des bassins versants de Sakassou, Côte d'Ivoire, 1972-1977. Paris, ORSTOM 342 p. Travaux et Documents n°149.

Collinet J., 1988. Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse de Doct., Géologie-Pédologie, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg (FR), le 28 mai 1988. MH 61897

FORET DE TAI

Casenave A., Guigen N., Simon J.M., 1979/06. Etude des crues décennales des petits bassins forestiers en Afrique tropicale : détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols forestiers, campagne 1978. Abidjan (CI), ORSTOM ; CIEH, 51 p. + ann. MH 71896

Casenave A., Flory J., Guiguen N., Ranc N., Simon J.M., Toilliez J., Tourné M., 1980/12. Etude hydrologique des bassins de Taï : campagne 1978-1979. Abidjan (CI), ORSTOM, 46 p. + ann. (Progr. MAB de l'UNESCO). MH 72001

Casenave A., Flory J., Ranc N., Simon J.M., 1981/12. Etude hydrologique des bassins de Taï : campagne 1980. Abidjan (CI), ORSTOM, 96 p. (Progr. MAB de l'UNESCO). MH 72073

Casenave A., Flory J., Mathieux A., Simon J.M., 1984/12. Etude hydrologique des bassins de Taï : campagne 1981. Abidjan (CI), ORSTOM, 88 p. (Progr. MAB de l'UNESCO). MH 72268

Collinet J., 1988. Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse de Doct., Géologie-Pédologie, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg (FR), le 28 mai 1988. MH 61897

BASSIN DE BOORO-BOROTOU

- Collinet J., Valentin C., 1984/07. Identification des principaux types d'organisations superficielles du bassin versant de Booro-Borotou. Abidjan (CI), ORSTOM, 15 p. MH 61729
- Kourouma A.J., 1985. Etude et analyse hydropluviométriques d'un bassin versant tropical. Rapport de stage. Abidjan, ORSTOM.
- Chevallier P., Lapetite J.M., Mahieux A., 1985/01. Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire), année 1984. Abidjan (CI), ORSTOM, 36 p. (Programme Hyperbav). MH 72390
- Chevallier P., Etienne J., Janeau J.L., Lapetite J.M., Mahieux A., 1985/05. Bassin versant représentatif de Booro-Borotou : caractéristiques physiques et équipement hydropluviométrique. Abidjan (CI), ORSTOM, 22 p. MH 72610
- Gnaman C., 1986. Initiation à l'hydrologie analytique sur le bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Rapport de stage, Institut Supérieur Technique d'Outre Mer, Le Havre (FR), juil.-août 1986. Abidjan (CI), ORSTOM, 25 p. MH 72429
- Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M., 1986/05. Bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) : données de base hydropluviométriques, années 1984 et 1985. Abidjan (CI), ORSTOM, 65 p. (Progr. Hyperbav). MH 72571
- Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M., 1986/05. Bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) : données de base hydropluviométriques, années 1986. Abidjan (CI), ORSTOM, 75 p. (Progr. Hyperbav). MH 72446
- Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M., 1986/03. Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) : année 1985. Abidjan (CI), ORSTOM. (Progr. Hyperbav). MH 72333
- Chevallier P., Berthelot M., Etienne J., Lapetite J.M., 1987/01. Observations climatologiques à la station de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) : année 1986. Abidjan (CI), ORSTOM 46 p. (Progr. Hyperbav). MH 72447
- Chevallier P., 1988. Complexité hydrologique du petit bassin versant : exemple en savane humide Booro-Borotou (Côte d'Ivoire). Thèse d'Etat, Hydrologie-Mécanique-Génie Mécanique-Génie Civil, USTL, Montpellier (FR), 23 nov. 1988. 330 p. + ann. MH 72713
- Chevallier P., Berthelot M., Lapetite J.M., Planchon O., 1988/05. Bassin versant de Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) : données de base hydropluviométriques, janvier 1987-mars 1988. Abidjan (CI), ORSTOM, 66 p. (Progr. Hyperbav). MH 72631
- Chevallier P., 1990. Complexité hydrologique du petit bassin versant : exemple en savane humide, Booro-Borotou (Côte d'Ivoire) Paris, ORSTOM, 331 p. + ann. Etudes et Thèses.

Gabon

BASSIN DE MALA

Lerique J., 1965. Etude hydrologique de bassins versants dans la région de Mala, tome 1. Paris, ORSTOM ; Libreville (GA), Min. de l'Economie Nationale, du Plan et des Mines, 74 p. + ann. MH 70584

BASSIN DE NZEME

Lerique J., Tourné M., 1971/06. Etude hydropluviométrique du bassin versant de la Nzémé : rapport provisoire, résultats bruts de la première campagne (1969-1970). Paris, ORSTOM ; Libreville (GA), Min. de l'Economie Nationale, du Plan et des Mines, 52 p. + ann. MH 70584

Lerique, J., Tourné, M., 1972/03. Etude hydropluviométrique du bassin versant de la Nzémé : rapport provisoire, résultats bruts de la deuxième campagne (1970-1971). Libreville (GA), ORSTOM ; Société d'Energie et d'Eau du Gabon, 15 p. + ann. MH 71293

Lerique J., Tourné M., 1972/12. Etude hydropluviométrique du bassin versant de la Nzémé : rapport définitif, tome 2, annexes et croquis. Libreville (GA), ORSTOM ; Société d'Energie et d'Eau du Gabon, 95 p., MH 71309

Carré P., 1979/05. Petit bassin versant de la Nzémé 3 : éléments de modélisation des écoulements exceptionnels. Paris, ORSTOM, 25 p. + ann. MH 72081

Guinée

BASSIN DU MAYONKOURE

Brunet-Moret Y., 1957/03. Exposé de la méthode des hydrogrammes unitaires : introduction à l'étude hydrologique analytique du bassin du Mayonkouré. Paris (FR), EDF-IGUFE - Div. Hydrologie, 29 p. + ann. MH 70218

BASSIN DE KANDALA

ORSTOM, 1958/09. Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 1. Paris, ORSTOM ; Serv. fédéral de l'hydraulique de l'AOF, 115 p. MH 70073

ORSTOM, 1960/05. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 1. Paris, ORSTOM ; Serv. fédéral de l'hydraulique de l'AOF, 78 p. MH 70074

BASSIN DE TIMBIS

Roche M., Chartier R., 1963/03. Rapport préliminaire relatif aux études hydrologiques : bassins expérimentaux de Timbis. Paris (FR), ORSTOM ; Conakry (GN), Mission CCTA-FAMA dans le Fouta-Djallon, 21 p. MH 70220

Mali

BASSIN DE DOUNFING

ORSTOM, 1956/05. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1955. Paris (FR), ORSTOM ; Serv. Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 64 p. + ann. MH 70071

BASSIN DE KOUMBAKA

ORSTOM, 1957/12. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1956, tome 2. Paris (FR), ORSTOM ; Serv. Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 181 p. MH 70072

ORSTOM, 1960/03-04 Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 3. Paris (FR), ORSTOM ; Serv. Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 24 p. MH 70073

BASSIN DE TIN ADJAR

ORSTOM, (1956). Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'A.O.F : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1956, tome 1. Paris (FR), ORSTOM ; Serv. Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 82 p. MH 70072

ORSTOM, 1959/11-12 Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 2. Paris (FR), ORSTOM ; Serv. Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 72 p. MH 70073

ORSTOM, 1960/06. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 2. Paris (FR), ORSTOM ; Serv. Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 50 p. MH 70074

BASSIN DE FARAKO

Brunet Y., Dubreuil P., 1960. Aménagement de la plaine de Loulouni (Région de Sikasso) : étude hydrologique du Kobafini. Bamako (ML), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 66 p. + ann.

MH 70122

BASSIN DE KANGABA

Pourrut P., Dubée G., 1962. Etude hydrologique des bassins versants expérimentaux de Kangaba : campagne 1960. Bamako (ML), ORSTOM ; Min. de l'Econ. Rurale - Serv. du Génie Rural, 61 p. + ann.

MH 70126

BASSIN DE BARRARO

Camus H., Molinier M., 1969/01. Etude hydrologique des bassins versants du Barraro et du Djitiko : rapport préliminaire. Abidjan (CI), ORSTOM ; Bamako (ML), Min. du Plan et de la Coordination, des Affaires Economiques et Financières - Serv. du Génie Rural, 28 p. MH 71022

Molinier M., 1969/12. Etude hydrologique des bassins versants du Barraro et du Djitiko : rapport définitif. Abidjan (CI), ORSTOM ; Bamako (ML), Min. du Plan et de la Coordination des Affaires Economiques et Financières - Serv. du Génie Rural, 66 p. MH 71092

BASSIN DE DJIKITO

Camus H., Molinier M., 1969/01. Etude hydrologique des bassins versants du Barraro et du Djitiko : rapport préliminaire. Abidjan (CI), ORSTOM ; Bamako (ML), Min. du Plan et de la Coordination des Affaires Economiques et Financières - Serv. du Génie Rural, 28 p. MH 71022

Molinier M., 1969/12. Etude hydrologique des bassins versants du Barraro et du Djitiko : rapport définitif. Abidjan (CI), ORSTOM ; Bamako (ML), Min. du Plan et de la Coordination des Affaires Economiques et Financières - Serv. du Génie Rural, 66 p. MH 71092

OUED DE KIDAL

Chouret C., Berthault C., Kone B., 1985/05. Bassin versant de l'Oued de Kidal (Adrar des Iforas) : campagne 1984. Bamako (ML), ORSTOM ; Min. d'Etat chargé du Développement Industriel et du Tourisme, Dir. de l'Hydraulique et de l'Energie, 62 p. MH 72356

Pépin Y., Kone B., 1986/05. Bassin versant de l'Oued de Kidal (Adrar des Iforas) : campagne 1985. Bamako (ML), ORSTOM ; Min. d'Etat chargé du Développement Industriel et du Tourisme - Dir. de l'Hydraulique et de l'Energie, 56 p. MH 72611

Pépin Y., Bertault C., Kone B., 1987/12. Bassin versant de l'Oued de Kidal (Adrar des Iforas) : campagne 1986. Bamako (ML), ORSTOM ; Min. d'Etat chargé du Développement Industriel et du Tourisme - Dir. de l'Hydraulique et de l'Energie, 71 p. MH 72559

BASSIN DE KAMBO

Pépin Y., Guiguen N., 1989. Bassin versant de Kambo, région de Kadiolo au Mali : procès verbal des installations de mars 1989. Bamako (ML), ORSTOM ; IER ; CIRAD ; R3S, 22 p. (Progr. Bas-Fonds, CEE n°TS2A-0017-F) MH 72817

Pépin Y., 1989/06. Bassin versant de Kambo, région de Kadiolo au Mali : rapport de mission de Juin 1989. Bamako (ML), ORSTOM ; IER ; CIRAD ; R3S, 14 p. (Progr. Bas-Fonds, CEE n°TS2A-0017-F). MH 72752

Pépin Y., 1989/12. Bassin versant de Kambo, région de Kadiolo au Mali : synthèse des observations hydrologiques 1988 et 1989. Dakar (SN), ORSTOM ; IER ; CIRAD ; R3S, 24 p. + ann. (Progr. Bas-Fonds, CEE n°TS2A-0017-F). MH 72826

Mauritanie

BASSIN DE DIONABA

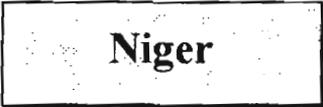
- ORSTOM, 1958/12. Rapport provisoire sur les résultats de la campagne hydrologique dans le Brakna et le Tagant en 1958. Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Serv. du Génie Rural, 38 p. MH 70083
- Brunet-Moret Y., 1959/04. Rapport sur les résultats de la campagne hydrologique dans le Brakna et le Tagant en 1958. Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Serv. du Génie Rural, 99 p. MH 70084
- Brunet-Moret Y., 1960/06. Rapport sur les résultats de la campagne hydrologique dans le Brakna et le Tagant en 1959. Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Min. de l'Expansion Economique et du Plan - Serv. du Génie Rural, 50 p. + ann. MH 70085

BASSIN DE SELOUMBO

- ORSTOM, 1958/12. Rapport provisoire sur les résultats de la campagne hydrologique dans le Brakna et le Tagant en 1958. Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Min. de l'Expansion Economique et du Plan - Serv. du Génie Rural, 38 p. MH 70083
- Brunet-Moret Y., 1959/04. Rapport sur les résultats de la campagne hydrologique dans le Brakna et la Tagant en 1958. Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Min. de l'Expansion Economique et du Plan - Serv. du Génie Rural, 99 p. MH 70084
- ORSTOM, 1959/11-12 Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 2. Paris (FR), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 72 p. MH 70073
- ORSTOM, 1960/06. Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1959. Paris (FR), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 100 p. MH 70075
- ORSTOM, 1960/06. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 2. Paris (FR), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 50 p. MH 70074
- Brunet-Moret Y., 1960/06. Rapport sur les résultats de la campagne hydrologique dans le Brakna et le Tagant en 1959. Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Min. de l'Expansion Economique et du Plan - Serv. du Génie Rural, 50 p. + ann. MH 70085

BASSIN DU GHORFA

- Jaccon G., 1966/04. Etude hydrologique des Oueds Ghorfa et Niordé et des Oualos en amont de Kaédi : rapport de campagne 1965. Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Min. de l'Expansion Economique et du Plan - Serv. du Génie Rural, 39 p. + ann. MH 70092
- Jaccon G., Camus H., 1967. Etude hydrologique des Oueds Ghorfa et Niordé et des Oualos en amont de Kaédi : rapport définitif (1964-1966). Paris (FR), ORSTOM ; Nouakchott (MR), Min. de l'Expansion Economique et du Plan - Serv. du Génie Rural, 127 p. + ann. MH 70093
- Girard G., 1975. Application du modèle à discrétisation spatiale au bassin versant de l'Oued Ghorfa (Mauritanie). Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 12 (3) : 167-188.



Niger

BASSIN DE LA MAGGIA-SABONGA

- ORSTOM, (1956). Etudes hydrologiques des petits bassins versants d'AOF : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1956, tome 1. Paris (FR), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 82 p. MH 70072
- ORSTOM, 1959/11-12 Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale Française : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1957, tome 2. Paris (FR), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 72 p. MH 70073
- ORSTOM, 1960/06. Etudes hydrologiques des petits bassins versants de l'Afrique Occidentale : rapport préliminaire sur les résultats de la campagne 1958, tome 2. Paris (FR), ORSTOM ; Service Fédéral de l'Hydraulique de l'AOF, 50 p. MH 70074

BASSIN DE RAZELMAMOULMI

- Lefèvre R., 1960/01. Etudes d'écoulement dans le massif de l'Air : alimentation en eau de la zone des grès d'Agadès, campagne 1959. Paris (FR), ORSTOM ; O.C.R.S. ; Niamey (NE), Min. des T.P., 131 p. MH 70170
- Lefèvre R., 1961/03. Etudes d'écoulement dans le massif de l'Air, campagne 1960. Paris (FR), ORSTOM ; O.C.R.S. ; Niamey (NE), Min. des T.P., 86 p. MH 70172

BASSIN D'AGADES-TELOUA

- Lefèvre R., 1960/01. Etudes d'écoulement dans le massif de l'Air : alimentation en eau de la zone des grès d'Agadès, campagne 1959. Paris (FR), ORSTOM ; O.C.R.S. ; Niamey (NE), Min. des T.P., 131 p. MH 70170
- Lefèvre R., 1961/03. Etudes d'écoulement dans le massif de l'Air, campagne 1960. Paris (FR), ORSTOM ; O.C.R.S. ; Niamey (NE), Min. des T.P., 86 p. MH 70172
- Roche M., 1965/03. Etude des nappes d'infero-flux des rivières de la bordure ouest de l'Air : campagne 1964. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. des T.P., des Mines et de l'Urbanisme - Serv. des Mines et de la Géologie, 54 p. + ann. MH 70189
- Hœpffner, Delfieu, 1975/01. Projet d'une étude des ressources en eau de la cuvette d'Agadez. Niamey (NE), ORSTOM, 11 p. + ann. MH 71492
- Le Goulven P., 1977/03. Note provisoire sur le Téloua à Azel-village : campagnes 1975 et 1976. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 8 p. + ann. MH 71716
- Le Goulven P., Delfieu G., (1977). Le Téloua à Azel, campagnes 1975 et 1976, rapport provisoire. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 23 p. + ann. MH 71802

- Le Goulven P., Delfieu G., (1977). Le Téloua à Azel, campagnes 1975 et 1976. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 27 p. + ann. MH 72000
- Hœpffner M., Pépin Y., (1979). Bassin du Haut Téloua : étude hydrologique, campagne 1979. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 27 p. + ann. MH 71995
- Hœpffner M., Le goulven P., Delfieu J.M., 1980/04. La cuvette d'Agadez : étude hydrologique, campagne 1977. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. des Mines et de l'Hydraulique - Dir. de l'Hydraulique, 36 p. + ann. MH 71997
- Hœpffner M., Le goulven P., Delfieu J.M., 1980/06. La cuvette d'Agadez : étude hydrologique, campagne 1978-1979. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. des Mines et de l'Hydraulique - Dir. de l'Hydraulique, 30 p. + ann. MH 72011
- Bouvier J.C., Billon B., Delfieu J.M., Gathelier R., Haran P., Pépin Y., (1980). La cuvette d'Agadez : étude hydrologique, campagne 1980. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 22 p. + ann. MH 72555
- Billon B., Pépin Y., 1981/05. Etude du kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1980. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 24 p. + ann. MH 72068
- Hœpffner M., Dubée G., Pépin Y., 1981/06. La cuvette d'Agadez : étude hydrologique, campagne 1979. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. des Mines et de l'Hydraulique - Dir. de l'Hydraulique, 24 p. + ann. MH 72074
- Billon B., Gallaire R., Delfieu J.M., 1981/08. Enquête sur les crues des koris traversant la route Zinder-Agadez : campagne 1981. Niamey (NE), ORSTOM ; SATEC International ; Min. de l'Hydraulique - Dir. des Ressources en Eau, 21 p. + ann. MH 72067
- Billon B., Pépin Y., 1982/12. Etude du kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1981. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 21 p. + ann. MH 72218
- Ribstein P., Pépin Y., Billon B., 1983/04. Etude du kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1982. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 21 p. + ann. MH 72188
- Billon B., Delfieu J.M., Gathelier R., Pépin Y., Ribstein P., 1983/06. Etude du Kori Téloua, 2ème partie : Les stations en aval d'Azal, campagne 1982. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 22 p. + ann. MH 72189
- Bricquet J.P., Bouvier J.C., Delfieu J.M., Gathelier R., Gallaire R., 1984/05. Etude du Kori Téloua : campagne 1983, 1ère partie : Le haut bassin. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 19 p. + ann. MH 72269
- Bricquet J.P., Bouvier J.C., Delfieu J.M., Gathelier R., Gallaire R., 1984/05. Etude du Kori Téloua : campagne 1983, 2ème partie : Les stations en aval d'Azal. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 18 p. + ann. MH 72269
- Bricquet J.P., Delfieu J.M., Dubée G., Gallaire R., Bouvier C., 1985/07. Etude du kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1984. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 16 p. + ann. MH 72312
- Gallaire R., Bricquet J.P., Delfieu J.M., Dubée G., Bouvier C., Gathelier R., 1985/07. Etude du Kori Téloua, 2ème partie : Les stations en aval d'Azal, campagne 1984. Niamey (NE), ORSTOM ; GTZ ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 14 p. + ann. MH 72312

- Bricquet J.P., Casenave A., Delfieu J.M., Gathelier R., 1986/02. Etude du rapport pluie-débit sous pluies simulées : estimation du ruissellement sur le bassin d'Agassaghass, rapport provisoire. Niamey (NE), ORSTOM, 50 p. MH 72469
- Gallaire R., Bricquet J.P., Delfieu J.M., Gathelier R., 1986/07. Etude du kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1985. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 13 p. + ann. MH 72425
- Amri M., Bouchaala A., Gallaire R., Bricquet J.P., Delfieu J.M., Gathelier R., 1986/07. Etude du Kori Téloua, 2ème partie : Les stations en aval d'Azél, campagne 1985. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 29 p. + ann. MH 72425
- Gallaire R., Gréard M., Gathelier R., 1987/07. Etude du Kori Téloua, 2ème partie : Les stations en aval d'Azél, campagne 1986. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 24 p. + ann. MH 72556
- Gallaire R., Gréard M., Gathelier R., 1987/11. Etude du kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1986. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 30 p. + ann. MH 72557
- Gallaire R., Gréard M., Tehet, 1988/06. Etude du Kori Téloua, 2ème partie : Les stations en aval d'Azél, campagne 1987. Niamey (NE), ORSTOM.
- Gallaire R., Gréard M., Tehet, 1989/05. Etude du Kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1987. Niamey (NE), ORSTOM.
- Gallaire R., Gréard M., Tehet, 1990/04. Etude du Kori Téloua, 2ème partie : Les stations en aval d'Azél, campagne 1988. Niamey (NE), ORSTOM.
- Gallaire R., Gréard M., Tehet, 1990/05. Etude du Kori Téloua, 1ère partie : Le haut bassin, campagne 1988. Niamey (NE), ORSTOM.
- Gallaire R., Gréard M., Tehet, 1990/06. Etude du Kori Téloua, 2ème partie : Les stations en aval d'Azél, campagne 1989. Niamey (NE), ORSTOM.

BASSIN DE KOULOU

- ORSTOM, 1961/01. Etude hydrologique des tributaires de la cuvette de Koulou : note provisoire. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 7 p. MH 70209
- Dubreuil P., 1961/05. Etude hydrologique des tributaires de la cuvette de Koulou : rapport de la campagne 1960. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 57 p. + ann. MH 70174
- Lefèvre R., 1962/05. Etude hydrologique des tributaires de la cuvette de Koulou : rapport de la campagne 1961. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Agr. - Serv. du Génie Rural, 34 p. + ann. MH 70176
- Gathelier R., Casenave A., Bricquet J.P., Delfieu J.M., 1987/02. Etude des relations pluies-débits à l'aide d'un simulateur de pluie sur un petit bassin versant sahélien : Banigorou - Niamey (NE). Niamey (NE), ORSTOM, 24 p. + ann. MH 72591

BASSIN DE KAOUARA

- Perret A., 1964/05. Observations et mesures hydrologiques dans les "vallées sèches" : rapport de la campagne 1963. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale, Serv. du Génie Rural, 84 p. MH 70185

- Vuillaume G., Dubée G., (1964). Observations et mesures hydrologiques dans les "vallées sèches" : rapport de la campagne 1964. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale, Serv. du Génie Rural, 90 p. MH 70191
- ORSTOM, (1965). Observations et mesures hydrologiques dans les "vallées sèches" : rapport de la campagne 1965. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 98 p. MH 70192
- Chaperon P., 1967. Note hydrologique sur deux bassins représentatifs de la vallée de la Maggia : bassin versant de Kaouara et Kworé. Paris (FR), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 18 p. MH 70202
- Laouali M., Yambo A., Niandou O., Habon M.L., 1990/07. Etude hydrologique du bassin versant de Kaora Abdou : campagne 1989. Niamey (NE), Min. de l'Hydraulique.

BASSIN DE KOUNTKOUZOUT

- Vuillaume G., 1967. Observations et mesures hydrologiques sur les bassins versants de la région de Tamaské : bassin représentatif de Kountkouzout, rapport définitif des campagnes 1964, 1965 et 1966. Paris (FR), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 81 p. + ann. MH 70201
- Vuillaume G., 1968. Premiers résultats d'une étude analytique de ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne : bassin représentatif de Kountkouzout (Niger). Cah. ORSTOM, Sér. Hydro., 5 (2) : 33-56.
- Vuillaume G., 1968. Bassin représentatif de Kountkouzout : résultats de la campagne 1967. Paris (FR), ORSTOM, 29 p. MH 70205
- Vuillaume G., 1968/11. Bassin représentatif de Kountkouzout (Niamey (NE)) : étude analytique du ruissellement et de l'érosion. Paris (FR), ORSTOM, 137 p. + ann. MH 71093
- Vuillaume G., 1969. Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone sahélienne : bassin de Kountkouzout, Niger. Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol., 6 (4) : 87-131.
- Dubreuil P., Vuillaume G., (1970). Etude analytique du ruissellement et de l'érosion en région tropicale sur bassins de quelques hectares à Kountkouzout (République du Niger). In International Water Erosion Symposium, Prague, 1970, p. 1 à 29. MH 80446
- Gathelier R., Gioda A., 1986/06. Etude des relations pluies-débits à l'aide d'un simulateur de pluie sur un petit bassin sahélien (Kountkouzout, Niamey). Niamey (NE), ORSTOM ; C.E.E., 25 p. + ann. MH 72501
- Gathelier R., 1988/04. Etude hydrologique du bassin versant de Kountkouzout : rapport de campagne 1987. Niamey (NE), ORSTOM.

VALLEE DE KEITA

- ORSTOM, 1966. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : résultats de la mission préliminaire 1965. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 22 p. + ann. MH 70193
- ORSTOM, 1966. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : compte rendu d'exécution de la campagne 1966. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 13 p. MH 70196
- Jarre P., Chaperon P., Le Duc P., 1967/05. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : résultats de la campagne 1966. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 59 p. + ann. MH 70198

- Jarre P., Chaperon P., Travaglio M., 1968. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : résultats de la mission préliminaire 1965. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 72 p. + ann. MH 70206
- Hœpffner M., Le Goulven P., Garreta P., 1976/11. Les bassins versants de Galmi, Ibohamane et Tegueleguel : étude hydrologique, campagne 1975. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale et du Climat - Serv. du Génie Rural, 34 p. + ann. MH 71656
- Hœpffner M., Le Goulven P., Garreta P., Gathelier R., (1977). Les bassins versants de Galmi, Ibohamane et Tegueleguel : étude hydrologique, campagne 1976. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Développement Rural - Serv. du Génie Rural, 25 p. + ann. MH 71996
- Hœpffner M., Garreta P., Gathelier R., (1977). Les bassins versants de Galmi, Ibohamane et Tegueleguel : étude hydrologique, campagne 1977. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 28 p. + ann. MH 71998
- Hœpffner M., Gathelier R., Vauchel V., 1983/12. Les bassins versants de Galmi et Ibohamane : étude hydrologique, campagne 1978 et 1979, rapport provisoire. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 14 p. + ann. MH 72281

BASSIN DU DALLOL-MAOURI

- Chaperon P., 1967/12. Projet de mise en valeur du Dallol-Maouri : programme d'étude hydrologique en surface. S.I, ORSTOM: FAO, 20 p. MH 70199
- ORSTOM, 1968/11. Projet de mise en valeur du Dallol Maouri : étude hydrologique, rapport intérimaire, campagne 1968. Niamey (NE), ORSTOM ; FAO ; 23 p. MH 70207
- Chaperon P., 1970/05. Projet de mise en valeur du Dallol-Maouri : étude hydrologique, campagne 1969. Niamey (NE), ORSTOM ; FAO, 55 p. + ann. MH 71126

BASSIN DE BADEGUICHERI

- ORSTOM, 1966. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : résultats de la mission préliminaire 1965. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 22 p. + ann. MH 70193
- ORSTOM, 1966. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : compte rendu d'exécution de la campagne 1966. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 13 p. MH 70196
- Jarre P., Chaperon P., Le Duc P., 1967/05. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : résultats de la campagne 1966. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 59 p. + ann. MH 70198
- Jarre P., Chaperon P., Travaglio M., 1968. Etude hydrologique des vallées de l'Ader-Doutchi : résultats de la mission préliminaire 1965. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Nationale - Serv. du Génie Rural, 72 p. + ann. MH 70206
- Chaperon P., Guiguen N., 1970/02. Vallée de Badéguichéri : étude hydrologique, résultats de la campagne 1969. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale, Serv. du Génie Rural, 119 p. MH 71142
- Chaperon P., Travaglio M., 1971/04. Vallée de Badéguichéri : étude hydrologique, résultats de la campagne 1970. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 46 p. + ann. MH 71216

Carre P., Guiguen N., 1972. Vallée de Badéguichéri : étude hydrologique, résultats de la campagne 1971, rapport terminal. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 49 p. + ann. MH 71301

BASSIN DE GALMI

Chaperon P., 1970. Note hydrologique sur les bassins de Galmi (Maggia) : campagne 1969. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 20 p. + ann. MH 71139

Chaperon P., Ranc N., 1971. Note hydrologique sur les bassins de Galmi (Maggia) : campagne 1970. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 16 p. + ann. MH 71219

Carré P., 1973. Note hydrologique sur les bassins de Galmi (Maggia) : campagne 1971. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale - Serv. du Génie Rural, 23 p. MH 71354

Hœpffner M., Le Goulven P., 1975. Les bassins versant de Galmi (Maggia) : campagne 1974. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Economie Rurale et du Climat - Serv. du Génie Rural, 36 p. + ann. MH 71500

Hœpffner M., Le Goulven P., Garreta P., 1976/11. Les bassins versants de Galmi, Ibohamane et Tegueleguel : étude hydrologique, campagne 1975. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Développement Rural - Serv. du Génie Rural, 34 p. + ann. MH 71656

Hœpffner M., Le Goulven P., Garreta P., Gathelier R., (1977). Les bassins versants de Galmi, Ibohamane et Tegueleguel : étude hydrologique, campagne 1976. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Développement Rural - Serv. du Génie Rural, 25 p. + ann. MH 71996

Hœpffner M., Garreta P., Gathelier R., (1977). Les bassins versants de Galmi, Ibohamane et Tegueleguel : étude hydrologique, campagne 1977. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 28 p. + ann. MH 71998

Collinet J., 1988. Comportement hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest : évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse de Doct., Géologie-Pédologie, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg (FR), le 28 mai 1988.

Hœpffner M., Gathelier R., Vauchel V., 1983/12. Les bassins versants de Galmi et Ibohamane : étude hydrologique, campagne 1978 et 1979, rapport provisoire. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 14 p. + ann. MH 72281

Dalimier F., 1984-85. Contribution à l'étude des crues des bassins versants d'Ibohamane et de Galmi (Niger). Diplôme d'Ingénieur Agronome, Génie Rural, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (BE), 88 p., ann. MH 61985

Polarski M., 1984-85. Contribution à la modélisation des crues du bassin versant de Galmi (Niger). Diplôme d'Ingénieur Agronome, Génie Rural, Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (BE), 110 p. MH 61984

Niang M., 1987/10. Analyse du ruissellement en régime sahélien : exemple du bassin versant de Galmi 2 au Niger. Mémoire de fin d'Etudes, Ecole des Ingénieurs des Travaux Agricoles des Régions Chaudes, CNEARC-ORSTOM, Montpellier (FR).

BASSIN D'IFEROUANE

Hœpffner M., Le Goulven P., Delfieu G., 1976/01. Les bassins versants d'Iférouane : campagne 1975. Niamey (NE), ORSTOM ; G.K.W. ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 18 p. MH 71630

- Hoepffner M., Le goulven P., Delfieu J.M., 1976/11. Les bassins versants d'Iférouane : campagne 1976, rapport provisoire. Niamey (NE), ORSTOM ; G.K.W. ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 23 p. + ann. MH 71679
- Hoepffner M., Le Goulven P., Delfieu J.M., 1977/03. Les bassins versants d'Iférouane : étude hydrologique, campagne 1976. Niamey (NE), ORSTOM ; G.K.W. ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 34 p. + ann. MH 71725
- Hoepffner M., Le Goulven P., Calvez R., Delfieu J.M., 1978/06. Les bassins versants d'Iférouane et de Timia : étude hydrologique, campagne 1977. Niamey (NE), ORSTOM ; G.K.W. ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 41 p. + ann. MH 71862
- Harang P., Hoepffner M., Dubée G., Pépin Y., (1981). Les bassins versants d'Iférouane et de Timia : étude hydrologique, campagnes 1978 et 1979. Niamey (NE), ORSTOM ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 41 p. + ann. MH 72050
- Ribstein Y., Pépin Y., 1982/09. Les bassins versants d'Iférouane : étude hydrologique, campagne 1980. Niamey (NE), ORSTOM ; G.K.W. ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 18 p. + ann. MH 72132

BASSIN DE TIMIA

- Hoepffner M., Le Goulven P., Bouchez J.M., Calvez R., 1977/03. Les bassins versants de Timia : étude hydrologique, campagne 1976. Niamey (NE), ORSTOM ; G.K.W. ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 28 p. + ann. MH 71726
- Hoepffner M., Le Goulven P., Calvez R., Delfieu J.M., 1978/06. Les bassins versants d'Iférouane et de Timia : étude hydrologique, campagne 1977. Niamey (NE), ORSTOM ; G.K.W. ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 41 p. + ann. MH 71862
- Harang P., Hoepffner M., Dubée G., Pépin Y., (1981). Les bassins versants d'Iférouane et de Timia : étude hydrologique, campagnes 1978 et 1979. Niamey (NE), ORSTOM ; G.T.Z. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 41 p. + ann. MH 72050
- Sardouk Y., Pépin Y., 1982/09. Les bassins versants de Timia : étude hydrologique, campagne 1980. Niamey (NE), ORSTOM ; Min. de l'Hydraulique et de l'Environnement - Dir. des Ressources en Eau, 12 p. + ann. MH 72131

BASSIN DE TABELOT

- Hoepffner M., 1978/03. Les bassins versants de Tabelot : étude hydrologique, campagne 1977. Niamey (NE), ORSTOM ; U.S.A.I.D. ; C.W.S. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 26 p. + ann. MH 71824
- Hoepffner M., Le Goulven P., Delfieu J.M., Garreta P., 1979/06. Les bassins versants de Tabelot : étude hydrologique, campagne 1978. Niamey (NE), ORSTOM ; USAID ; CWS ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 16 p. + ann. MH 71951
- Hoepffner M., Delfieu J.M., 1980/03. Les bassins versants de Tabelot : étude hydrologique, campagne 1979. Niamey (NE), ORSTOM ; U.S.A.I.D. ; C.W.S. ; Min. du Dév. Rural - Serv. du Génie Rural, 15 p. + ann. MH 71999

République Centrafricaine**BASSIN DE N'GOLA**

Tixier, J., 1953. Etude de crues sur un petit bassin de la région de Bangui. Bangui (CF), ORSTOM, pp .29-47.
Ann. Hydrol. de la France d'Outre-Mer. MH 50001

BASSIN DE SARKI

Callède J., Ranc N., 1969/06. Etude du ruissellement sur le bassin représentatif de Sarki, campagne 1968.
Bangui (CF), ORSTOM, 43 p. + ann. MH 71073

Callède J., Gréard M., 1970/05. Etude du ruissellement sur le bassin versant représentatif de Sarki, campagne
1969. Bangui (CF), ORSTOM, 56 p. + ann. MH 71129

Callède J., 1974/04. Bassin versant représentatif de Sarki (République Centrafricaine) : bilan de 5 ans
d'observations, 1968 à 1972. Bangui (CF), ORSTOM, 120 p. + ann. MH 71432

BASSIN DE M'PATOU

Pieyns.S., Gréard M., 1975/03. Etude hydrologique du M'Patou à Bakouma. Bangui (CF), ORSTOM ;
Aluminium Suisse S.A., 41 p. + ann. MH 71521

Pieyns S., Gréard M., 1975/06. Résultats des essais de débits effectués à Bakouma en 1974-75. Bangui (CF),
ORSTOM ; Aluminium Suisse S.A., 19 p. MH 71536

Pieyns S., 1976/03. Etude hydrologique du M'Patou à Bakouma : rapport définitif. Bangui (CF), ORSTOM ;
Uranium Centrafricain, 35 p. + ann. MH 71618

Sénégal

BASSIN DE SEBIKOTANE

ORSTOM, 1963. Etude hydrologique des bassins versants de Sébikotane : campagne 1962. Dakar (SN), ORSTOM ; Min. des T.P., de l'Habitat et de l'Urbanisme - Arr. des T.P. du Cap Vert, 86 p. + ann. MH 70100

BASSIN DE DIARONE-BADIOURE

Brunet-Moret Y., 1967/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 38 p. + ann. MH 70108

Brunet-Moret Y., 1968/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 23 p. + fig. MH 70109

Brunet-Moret Y., 1970. Etudes hydrologiques en Casamance. Rapport définitif. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 52 p. + 104 fig. et tabl. MH 71177

BASSIN DE DIOUNIKING

Brunet-Moret Y., 1967/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 38 p. + ann. MH 70108

Brunet-Moret Y., 1968/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 23 p. + fig. MH 70109

Brunet-Moret Y., 1970. Etudes hydrologiques en Casamance. Rapport définitif. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 52 p. + 104 fig. et tabl. MH 71177

BASSIN DE BOUNKILING

Brunet-Moret Y., 1967/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 38 p. + ann. MH 70108

Brunet-Moret Y., 1968/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 23 p. + fig. MH 70109

Brunet-Moret Y., 1970. Etudes hydrologiques en Casamance. Rapport définitif. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 52 p. + 104 fig. et tabl. MH 71177

BASSIN DE DJANGO

Brunet-Moret Y., 1967/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 38 p. + ann. MH 70108

Brunet-Moret Y., 1968/11. Etudes hydrologiques en Casamance. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 23 p. + fig. MH 70109

Brunet-Moret Y., 1970. Etudes hydrologiques en Casamance. Rapport définitif. Paris, ORSTOM ; Dakar, Dir. du Génie Rural, 52 p. + 104 fig. et tabl. MH 71177

Olivry J.C., Chouret A., 1981. Etude hydrologique du Marigot de Bignona : quelques aspects intéressants des mesures réalisées en 1970-1971. Dakar (SN), ORSTOM, 93 p. MH 72089

MARIGOT DE BIGNONA

Olivry J.C., Chouret A., 1981. Etude hydrologique du marigot de Bignona : quelques aspects intéressants des mesures réalisées en 1970-1971. Dakar (SN), ORSTOM, 93 p. MH 72089

MARIGOT DE M'BAO

Chaperon P., 1975/02. Etude hydrologique de la zone de M'Bao. Dakar (SN), ORSTOM ; Min. du Dév. Industriel, 5 p. MH 71531

BASSIN DE PANETIOR

Lerique J., 1977/01. Etude hydrologique de deux petits bassins de la région de Thiès. Dakar (SN), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural et de l'Hydraulique, 34 p. MH 71720

BASSIN DE PELEO

Lerique J., 1977/01. Etude hydrologique de deux petits bassins de la région de Thiès. Dakar (SN), ORSTOM ; Min. du Dév. Rural et de l'Hydraulique, 34 p. MH 71720

MARIGOT DE BAILA

Gallaire R., 1980/07. Etude hydrologique du Marigot de Baïla. Dakar (SN), ORSTOM ; Min. de l'Equipement, 103 p. MH 72002

Olivry J.C., Dacosta H., 1984/06. Le Marigot de Baïla (Basse Casamance) : bilan des apports hydriques et évolution de la salinité (résultats des campagnes 1980-81, 1982-82, 1982-83). Dakar (SN), ORSTOM ; Louis Berger International, 146 p. MH 72360

Saos J.L., Dacosta H., Le Troquer Y., Olivry J.C., 1987. Le Marigot de Baïla (Basse Casamance) : pluviométrie et écoulement, résultats des campagnes 1983, 1984, 1985, 1986. Dakar (SN), ORSTOM.

Saos J.L., Dacosta H., 1987. Evolution hydrologique d'un bassin versant margino-littoral : le Marigot de Baïla (basse Casamance), Dakar (SN), ORSTOM. Rapport EPEEC.

Malou, 1989. Etude hydrologique de l'aquifère superficiel de la vallée de Baïla (Basse Casamance) : bilan hydrique (1987-1988). Mémoire de DEA, Géologie Appliquée, Université Cheikh Anta Diop, Dakar (SN).

MARIGOT DE NIISSA

BCEOM, 1983. Etude d'aménagement hydro-agricole de la moyenne Casamance. Dakar (SN), ORSTOM.

MARIGOT DE GUIDEL

BCEOM, 1983. Etude d'aménagement hydro-agricole de la moyenne Casamance. Dakar (SN), ORSTOM.

BASSIN DE THYSSE KAYMOR

- Saos J.L., Flory J., Gac J.Y., Le Troquer Y., Olivry J.C., (1986). Etudes hydrologiques dans la région de Thyssé Kaymor, Siné Saloum : résultats de la campagne 1986. Dakar (SN), ORSTOM ; ISRA ; IRAT, 71 p. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD) : DRS, Economie de l'eau). MH 72607
- Albergel J., Bernard A., Ruelle P., Touma J., 1989/03. Hydrodynamique des sols, bassins versants expérimentaux de Thyssé Kaymor : rapport de la campagne de mesures fév. - avr. 1988. Dakar (SN), ISRA ; CIRAD ; ORSTOM ; R3S, 29 p. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD). MH 72816
- Albergel J., Bernard A., Dacosta H., Gac J.Y., Ruelle P., 1989/07. Bassins versants expérimentaux de Thyssé Kaymor, saison des pluies 1988 : rapport de campagne. Dakar (SN), ISRA ; CIRAD ; ORSTOM ; R3S, 62 p. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD). MH 72788
- ISRA, CIRAD, ORSTOM, R3S, 1989/07. Bas-fonds Siné Saloum : 3ème rapport d'avancement. Dakar (SN), ISRA ; CIRAD ; ORSTOM ; R3S, 6 p. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD). MH 72818
- ISRA, CIRAD, ORSTOM, R3S, 1990/02. Action de recherche "DRS-Economie de l'eau" Siné Saloum, 4ème rapport d'avancement. Dakar (SN), ISRA ; CIRAD ; ORSTOM ; R3S, 17 p. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD). MH 72821
- Pérez P., Sarr P.S., 1990/03. Programme gestion des ressources naturelles : rapport d'activité "Economie de l'eau - DRS", année 1989. Dakar (SN), ISRA ; CIRAD ; ORSTOM ; R3S, (39 p.).
- Valentin C., 1990/04. Les états de surface des bassins versants de Thyssé Kaymor (Sénégal). Dakar (SN), ORSTOM ; ISRA ; CIRAD ; R3S, 10 p. + ann. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD).
- Bernard A., Marieu B., 1990/06. Bas-fond Siné Saloum, action de recherches "Economie de l'eau DRS" : simulation de pluie sur le bas-fond de Keur Samba Diama du 06 au 16/03/1990. Dakar (SN), ORSTOM ; ISRA ; CIRAD ; R3S, 20 p. + ann. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD). MH 72872
- Albergel J., Bernard A., Marieu B., 1990/07. Bas-fonds Siné Saloum, action de recherches "Economie de l'eau DRS" : simulation de pluie sur le bassin de Keur Dianko du 23/01/1989 au 22/02/1989. Dakar (SN), ORSTOM ; ISRA ; CIRAD ; R3S, 36 p. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD). MH 72874
- ORSTOM, ISRA, CIRAD, R3S, 1990/07. Rapport d'avancement n°5 : bassins versants de Thyssé Kaymor : action de recherche "DRS-Economie de l'eau". Dakar (SN), ORSTOM ; ISRA ; CIRAD ; R3S, 13 p. (Progr. CEE-CIRAD n°TS2A 0017 F CD). MH 72875

BASSIN DE DJIGUINOUM

- ISRA, CIRAD, ORSTOM, R3S, 1989/12. Bas-fond Casamance : 1er rapport d'avancement. Dakar (SN), ISRA ; CIRAD ; ORSTOM ; R3S, 19 p. MH 72819
- Brunet D., 1990/02. Principales caractéristiques des eaux de nappe de la vallée de Djiguioum (Basse Casamance) : bilan d'une année du suivi d'un réseau piézométrique (juin 1988 à juin 1989). Dakar (SN), ISRA ; ORSTOM ; R3S, 40 p.
- Albergel J., Brunet D., Dubée G., Duprey J.L., Marieu B., Montoroi J.P., Zante P., 1990/05. Rapport hydrologique 1989, vallée de Djiguioum, Casamance. Dakar (SN), ISRA ; IRAT ; ORSTOM ; R3S, 73 p. (Progr. CEE DG XII, contrat n° TS2A-0216-M CD).
- ISRA, ORSTOM, CIRAD, R3S, 1990/07. Bas-fond Casamance : 2ème rapport d'avancement. Dakar (SN), ISRA ; ORSTOM ; CIRAD ; R3S, 11 p. (Progr. CEE DG XII, contrat n° TS2A-0216-M CD). MH 72863

Tchad

BASSIN DE OUADI KAOUN

Tixier J., 1958/09. Etudes d'écoulement en régime sahélien : massif de l'Ouaddaï, bassin versant expérimental de l'Ouadi Koun. Fort-Lamy (TD), ORSTOM, 77 p. MH 70380

BASSIN DE KOURIEN-DOULIEN

ORSTOM, Commission Scientifique du Logone et du Tchad, 1957. Etudes d'écoulement en régime désertique : massif de l'Ennédi et région Nord du Mortcha, campagne 1957. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Commission Scientifique du Logone et du Tchad, 92 p. + ann. MH 70374

BASSIN DE BACHIKELE

Braquaval R., 1958/12. Etudes d'écoulement en régime désertique : massif de l'Ennédi, campagne 1958. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Commission Scientifique du Logone et du Tchad ; Organisation Commune des Régions Sahariennes, 80 p. + ann. MH 70389

Roche M., 1960/03. Etudes d'écoulement en régime désertique : plaine du Mortcha et massif de l'Ennédi, campagne 1959. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Organisation Commune des Régions Sahariennes, 80 p. + ann. MH 70397

BASSIN DE BARLO

Bouteyre M.M., Beslon M., 1959. Bassin expérimental de Barlo (près Mongo) : étude de ruissellement en régime soudano-sahélien, étude pédologique. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Centre de Recherches Tchadiennes, 55 p.+ 31 p. + ann. MH 70395

Beslon M., 1960/04. Bassin expérimental de Barlo (près Mongo) : étude de ruissellement en régime soudano-sahélien, campagne 1959. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Centre de Recherches Tchadiennes, 35 p. + ann. MH 70401

BASSIN D'ABOU-GOULEM

Tixier J., (1959). Etude du ruissellement en régime sahélien - Bassin expérimental d'Abou-Goulem, Ouaddaï, campagne 1958. Paris (FR), ORSTOM ; Fort-Lamy (TD), Commission Scientifique du Logone et du Tchad ; Centre de Recherches Tchadiennes, 69 p. + ann. MH 70379

Tixier J., Beslon M., (1960). Etude du ruissellement en régime sahélien - Bassin expérimental d'Abou-Goulem, Ouaddaï, campagne 1958 et 1959. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Centre de Recherches Tchadiennes, 66 p. + ann. MH 70406

BASSIN DE TOROU

- Bouchardeau A., Billon B., Damiéan G., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 1 : Résumé et interprétation des observations ; étude géomorphologique. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 40 p. + carte.
- Billon B., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 2 : Stations principales. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous Dir. du Génie Rural, 120 p.
- Bouchardeau A., Boulin E., Billon B., Borel Y., 1962/10. Ouadi Enne, campagne 1961, tome 3 : Les bassins expérimentaux, Torou, Kouro, Taraïman. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 50 p. + ann. MH 70420

BASSIN DE KOURO

- Bouchardeau A., Billon B., Damiéan G., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 1 : Résumé et interprétation des observations ; étude géomorphologique. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 40 p., carte.
- Billon B., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 2 : Stations principales. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 120 p.
- Bouchardeau A., Boulin E., Billon B., Borel Y., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 3 : Les bassins expérimentaux, Torou, Kouro, Taraïman. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 50 p. + ann. MH 70420

BASSIN DE TARAÏMAN

- Bouchardeau A., Billon B., Damiéan G., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 1 : Résumé et interprétation des observations : étude géomorphologique. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 40 p., carte.
- Billon B., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 2 : Stations principales. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 120 p.
- Bouchardeau A., Boulin E., Billon B., Borel Y., 1962/10. Ouadi Enné, campagne 1961, tome 3 : Les bassins expérimentaux, Torou, Kouro, Taraïman. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de l'Agriculture. et des Eaux et Forêts - Sous-Dir. du Génie Rural, 50 p. + ann. MH 70420

BASSIN DE MAYO LIGAN

- Roche M., 1963/01. Chutes Gauthiot : campagne hydrologique 1961. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P. et des Communications, 106 p. + ann. MH 70426
- Billon B., Randon R., 1965/10. Etude hydrologique des Chutes Gauthiot : campagne 1964. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 68 p. + ann. MH 70450
- Callède J., 1966/07. Etude hydrologique pour l'aménagement des Chutes Gauthiot : campagne 1965. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 102 p. + ann. MH 70459

BASSIN DE BADE

- Billon B., Callède J., Michenaud P., Randon P., 1964/07. Etudes hydrologiques pour le chemin de fer transcamerounais : bassin expérimental de Badé, rapport préliminaire, campagne 1963. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Comité Mixte de Coordination pour les Etudes Ferroviaires Cameroun-Tchad, Office Tchadien des Etudes Ferroviaires, 95 p. + ann. MH 70438
- Callède J., Dubois G.J., Michenaud P., 1965/10. Etudes hydrologiques pour le chemin de fer transcamerounais : rapport définitif, campagne 1964. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Comité Mixte de Coordination pour les Etudes Ferroviaires Cameroun-Tchad, Office Tchadien des Etudes Ferroviaires, 66 p. + ann. MH 70449

BASSIN DE BAM-BAM

- Billon B., Riou C., 1964. Etude hydrologique du bassin versant du Bam Bam dans le Massif de Guéra (Tchad) : campagne 1963. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de la Coopération; CIEH, 25 p. + ann. MH 70436
- ORSTOM, 1964. Etude d'un bassin type de 1 000 km² dans la région du Guéra : rapport d'activité pour la campagne 1964. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; CIEH, 5 p. MH 70441
- Girard G., Le Guillou J.L., 1968. Etude des crues du bassin versant du Bam Bam à Tialozoudou, République du Tchad : rapport définitif (1963-1966), tome 1. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. de la Coopération ; CIEH, 108 p. MH 70476
- ORSTOM, 1972/12. Résultats de l'exploitation d'une parcelle d'érosion de trois hectares à Bidjir (Tchad). Fort-Lamy (TD), ORSTOM, 8 p. + ann. MH 71360

BASSIN DE MATAON

- Callède J., Dubois G.J., Michenaud P., 1965/10. Etudes hydrologiques pour le chemin de fer transcamerounais : rapport définitif, campagne 1964. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Comité Mixte de Coordination pour les Etudes Ferroviaires Cameroun-Tchad, Office Tchadien des Etudes Ferroviaires, 66 p. + ann. MH 70449
- Michenaud P., (1964). Bassin expérimental de Mataon, 1964. Fort-Lamy (TD), ORSTOM, 12 p. MH 70439

BASSIN DE AM-NABAK

- Billon B., Roche M.A., 1965. Etude hydrologique des Ouadis Kadjemeur, Sofoya et Féra : campagne 1965. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 104 p. + ann. MH 70458
- Roche M.A., 1968/03. Ecoulement de surface, alimentation des nappes et transport solide des ouadis Féra, Kadjemeur et Sofoya (République du Tchad) : rapport définitif 1965-1966. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 140 p. + ann. MH 70471

BASSIN DE KADJEMEUR

- Billon B., Roche M.A., 1965. Etude hydrologique des Ouadis Kadjemeur, Sofoya et Féra : campagne 1965. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 104 p. + ann. MH 70458
- Roche M.A., 1968/03. Ecoulement de surface, alimentation des nappes et transport solide des ouadis Féra, Kadjemeur et Sofoya (République du Tchad) : rapport définitif 1965-1966. Fort-Lamy (TD), ORSTOM, 140 p. + ann. MH 70471

BASSIN DE SOFOYA

- Billon B., Roche M.A., 1965. Etude hydrologique des Ouadis Kadjemeur, Sofoya et Féra : campagne 1965. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 104 p. + ann. MH 70458
- Roche M.A., 1968/03. Ecoulement de surface, alimentation des nappes et transport solide des ouadis Féra, Kadjemeur et Sofoya (République du Tchad) : rapport définitif 1965-1966. Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 140 p. + ann. MH 70471
- Bourges J., 1972/10. Résultats de la campagne 1967 sur les bassins de Sofoya (Tchad). Fort-Lamy (TD), ORSTOM ; Min. des T.P., 19 p. + ann. MH 71365

BASSIN DU MAYO DORBO

- ORSTOM, 1967. Etude hydrologique du Mayo Dorbo à Zama Guin, Torok et Balani : campagne 1967. Fort-Lamy (TC), ORSTOM ; Min. des T.P., 59 p. MH 70469

Togo

BASSIN DE SARA

Fritsch J.M., 1970. Bassin représentatif de la Sara : résultats des campagnes 1957-1958. Lomé (TG), ORSTOM, 16 p. + ann. MH 71141

LA FOSSE AUX LIONS

Jarre P., 1959/12. Aménagements rizicoles dans le nord Togo : études hydrologiques. Lomé (TG), ORSTOM, n.p. + ann. MH 70281

Colombani J., 1959/12. Aménagements hydro-agricoles du Nord Togo ; première partie : La Fosse aux Lions, campagne hydrologique 1960. Lomé (TG), ORSTOM, n.p. + ann. MH 70283

Colombani J., (1961). Aménagements hydro-agricoles du Nord Togo : La Fosse aux Lions, campagnes hydrologiques 1959-1960-1961. Lomé (TG), ORSTOM, 25 p. + ann. MH 70285

BASSIN DE NADJOUNDI

Bouchardeau A., Colombani J., Roche M., Féat J., (1965). Etudes pédohydrologiques au Togo, volume 3 : Données hydrologiques concernant la région maritime et la région des savanes. Rome, FAO ; Paris, ORSTOM, 360 p. + ann. FAO/SF : 13/TO. MH 70302

Smaoui A., 1987/07. Etude hydrologique de deux bassins versants au nord du Togo, le Nadjoundi et le Hidenwou : estimation de la crue décennale par la méthode de simulation de pluie. Lomé (TG), ORSTOM, 87 p. + ann. MH 72699

BASSIN DE HIDENWOU

Dossou-Yovo B., 1964. Observations effectuées en 1962 sur le bassin du Hidenwou à Kandé. Lomé (TG), ORSTOM, 19 p.

Bouchardeau A., Colombani J., Roche M., Féat J., (1965). Etudes pédohydrologiques au Togo, volume 3 : Données hydrologiques concernant la région maritime et la région des savanes. Rome, FAO ; Paris, ORSTOM, 360 p. + ann. FAO/SF : 13/TO. MH 70302

Yacoubi M., 1986. Simulation de pluie sur le bassin de Hidenwou (TG) : déroulement de la campagne et analyse des résultats. Rapport de fin de stage. Lomé (TG), ORSTOM, 58 p. + ann.

Smaoui A., 1987/07. Etude hydrologique de deux bassins versants au nord du Togo, le Nadjoundi et le Hidenwou, estimation de la crue décennale par la méthode de simulation de pluie. Lomé (TG), ORSTOM, 87 p. + ann. MH 72699

LAC ELIA

- Falabrègues F., 1964. Etude du ruissellement sur les bassins versants du lac Elia. Lomé (TG), ORSTOM, 57 p.
- Bouchardeau A., Colombani J., Roche M., Feéat J., (1965). Etudes pédohydrologiques au Togo, volume 3 : Données hydrologiques concernant la région maritime et la région des savanes. Rome, FAO ; Paris, ORSTOM, 360 p. + ann. FAO/SF : 13/TO. MH 70302
- Bader J.C., 1985/10. Etude du ruissellement sous pluie simulée sur les bassins versants du lac Elia et de la Dayes à Dzogbegan, Togo. Lomé (TG), ORSTOM, 60 p. + ann. MH 72550

BASSIN DE LA DAYE

- Bouchardeau A., Colombani J., Roche M., Feéat J., (1965). Etudes pédohydrologiques au Togo, volume 3 : Données hydrologiques concernant la région maritime et la région des savanes. Rome, FAO ; Paris, ORSTOM, 360 p. + ann. FAO/SF : 13/TO. MH 70302
- Colombani J., 1966. Note préliminaire sur l'aménagement de la chute de la Daye, Dzobégan-Bogo Ahlon. Lomé (TG), ORSTOM, 5 p. MH 72297
- Bourges J., (1979). Hydrologie d'un bassin représentatif des hauts plateaux du sud Togo : la Daye à Dzogbegan. Lomé (TG), ORSTOM, 213 p. MH 72808
- Bader J.C., 1985/10. Etude du ruissellement sous pluie simulée sur les bassins versants du lac Elia et de la Dayes à Dzogbegan, Togo. Lomé (TG), ORSTOM, 60 p. + ann. MH 72550

BASSIN DE KOZA

- Bourges J., 1972/06. Etude hydrologique de la Koza. Lomé (TG), ORSTOM ; Min. des T.P. - Dir. de l'Hydraulique, 22 p. + ann. MH 71322
- Lhôte Y., Moyon Y., 1975/03. Etude hydrologique de la Koza : compte rendu de la campagne de hautes eaux 1974. Lomé (TG), ORSTOM ; Min. des T.P. - Dir. de l'Hydraulique ; BCEOM, 19 p. + ann. MH 71507
- Lhôte Y., Moyon Y., Touchebeuf de Lusigny P., 1975/07. Etude hydrologique de la Koza : résultats et interprétation de la campagne 1974-1975. Lomé (TG), ORSTOM ; Min. des T.P. - Dir. de l'Hydraulique ; BCEOM, 50 p. + ann. MH 71542
- Lhôte Y., Moyon Y., 1976/01. Etude hydrologique de la Koza : compte rendu de la campagne des hautes eaux 1975. Lomé (TG), ORSTOM ; Min. des T.P. - Dir. de l'Hydraulique ; BCEOM, 13 p. + ann. MH 71598
- Lhôte Y., Moyon Y., 1976/06. Etude hydrologique de la Koza : compte rendu de la campagne des basses eaux 1975-1976. Lomé (TG), ORSTOM ; Min. des T.P. - Dir. de l'Hydraulique ; BCEOM, 8 p. + ann. MH 71639

Annexe 6

LES BASSINS VERSANTS REPRESENTATIFS ET EXPERIMENTAUX

INVENTAIRE PAR PAYS

Bénin

Burkina-Faso

Cameroun

Cap-Vert

Congo

Côte d'Ivoire

Gabon

Guinée

Mali

Mauritanie

Niger

République Centrafricaine

Sénégal

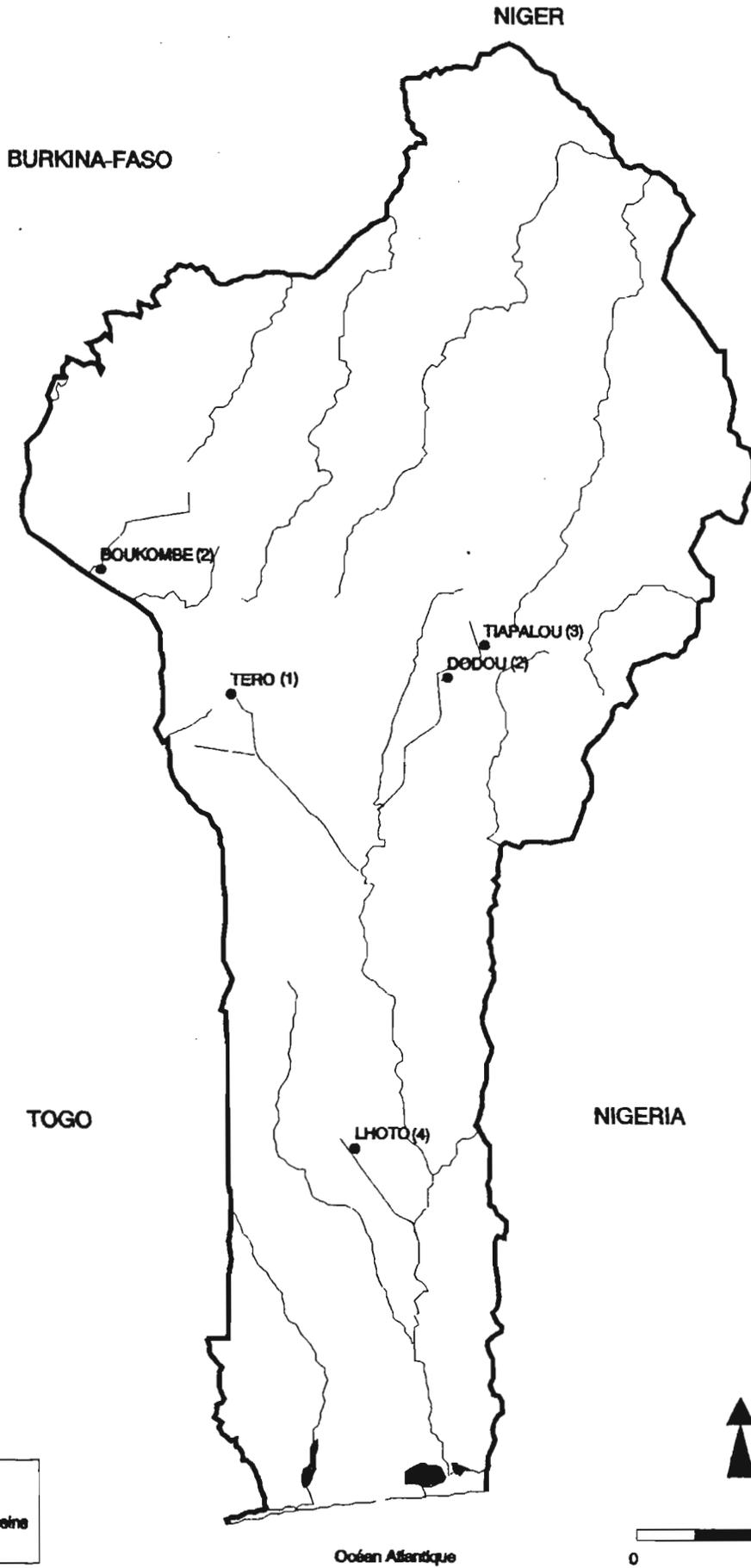
Tchad

Togo

Les tableaux, ordonnés par pays, présentent les bassins classés par ordre chronologique des études, avec :

- le nom du bassin,*
- l'organisme exploitant,*
- les périodes d'exploitation,*
- les phénomènes observés autres que précipitations et écoulements,*
- les sous-bassins, leur superficie et les coordonnées de l'exutoire.*

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU BENIN



Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés

Océan Atlantique



Bénin

TERO

ORSTOM

1956-1958

Climatologie, érosion

DJOUGOU (TERO)

32.00 km²

09°41'04" N - 01°39'11" E

LHOTO

ORSTOM

1956-1959

Climatologie

MOUMOUDI

45.00 km²

07°47'56" N - 02°10'11" E

SOUSSOU

7.40 -

07°48'37" N - 02°10'57" E

BOHM-BOHM

12.00 -

07°49'56" N - 02°10'07" E

KOLOMANDJE

13.00 -

07°47'53" N - 02°10'56" E

BOUKOMBE

ORSTOM

1960-1962

Climatologie, érosion

KOUNAKANKOUO (TEMOIN) 3.20 km²

10°12'04" N - 01°06'25" E

KOUMIPEGOU (AMENENAGE) 2.80 -

10°10'46" N - 01°06'15" E

TIAPALOU

ORSTOM

1961-1963

Climatologie

N'DALI

17.40 km²

09°53'32" N - 02°43'15" E

KOKO-SIKA RF7

14.10 -

09°56'44" N - 02°43'31" E

KOKO-SIKA BARRAGE

34.30 -

09°57'30" N - 02°42'13" E

DODOU

ORSTOM

1963-1963

GORI BOUNIEROU

119.80 km²

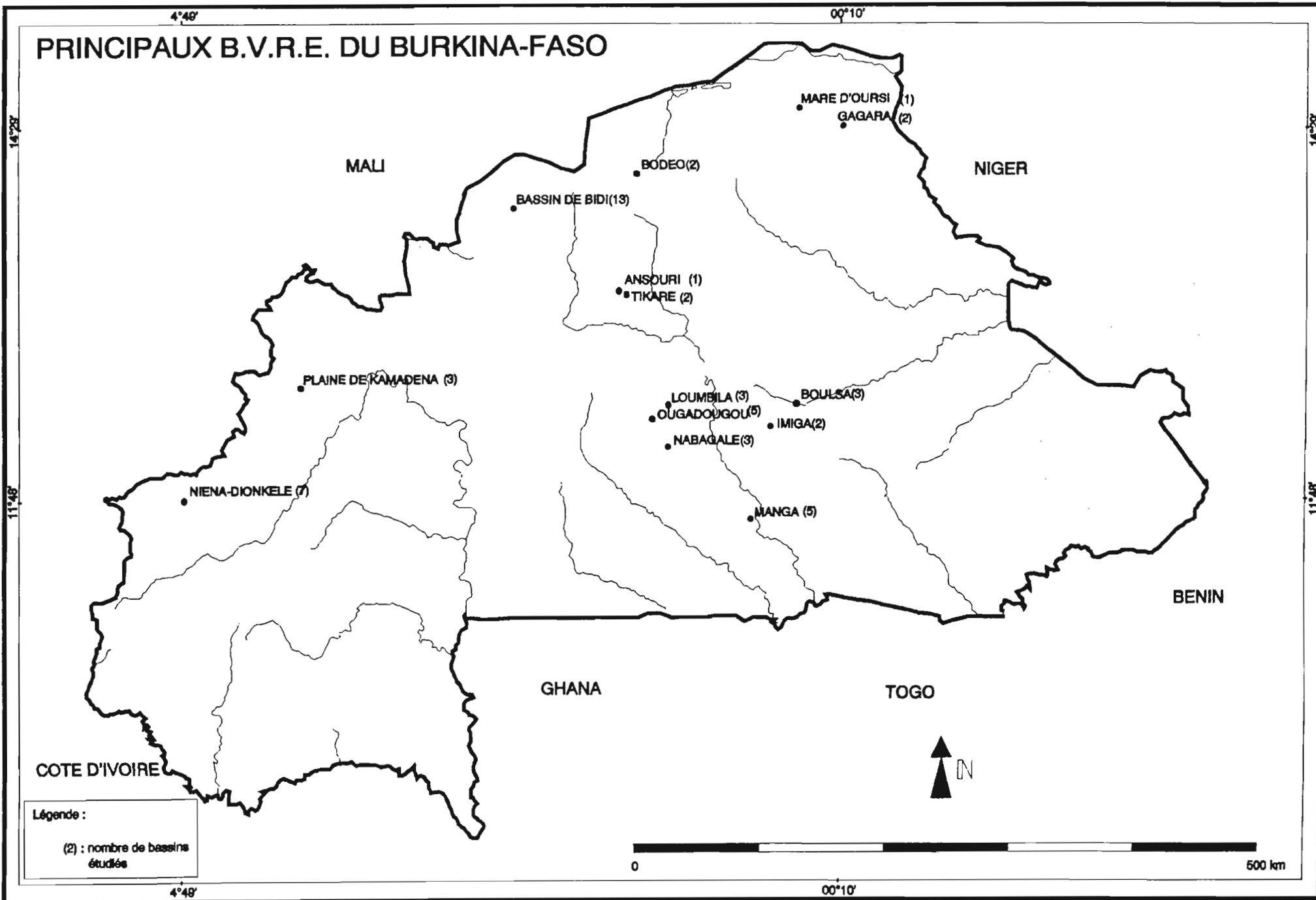
09°45'26" N - 02°33'51" E

WENOU

33.40 -

09°46'18" N - 02°38'54" E

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU BURKINA-FASO



Légende :
(2) : nombre de bassins étudiés

Burkina-Faso

GAGARA

ORSTOM

1956-1957, 1985

Climatologie, Humidité du sol, infiltration.

MARIGOT OUEST	28.10 km ²	14°29'10" N - 00°10'33" W
MARIGOT EST	32.35 -	14°29'16" N - 00°09'10" W

BOULSA

ORSTOM

Humidité du sol, infiltration.

1960-1962, 1984

NIEGHA	1010.00 km ²	12°29'53" N - 00°29'54" W
KOGHO	84.70 -	12°39'49" N - 00°38'59" W
KOGHNERE	22.00 -	12°41'14" N - 00°38'18" W

LUMBILA

ORSTOM

1961-1963, 1975

Climatologie, infiltration.

LUMBILA	2120.00 km ²	12°29'36" N - 01°24'13" W
DONSE	182.00 -	12°34'47" N - 01°24'27" W
KAMBOENSE	137.00 -	12°27'27" N - 01°33'09" W

OUAGADOUGOU

ORSTOM

1961-1963

Climatologie.

OUAGADOUGOU	352.00 km ²	12°23'16" N - 01°31'00" W
OUAGADOUGOU 1	294.00 -	12°23'04" N - 01°33'20" W
MORO-NABA	19.10 -	12°21'44" N - 01°32'13" W
ZAGTOULI	8.00 -	12°19'00" N - 01°37'17" W
BAZOULE	12.80 -	12°19'15" N - 01°43'09" W

NABAGALE

ORSTOM

1961-1963

Climatologie.

NABAGALE	470.00 km ²	12°11'28" N - 01°24'17" W
BOULBI	125.00 -	12°14'16" N - 01°32'27" W
SEGOLEN	74.00 -	12°02'08" N - 01°18'40" W

BODEO

ORSTOM

1963-1964

BODEO AVAL	11.20 km ²	14°08'31" N - 01°38'00" W
BODEO AMONT	3.45 -	14°08'09" N - 01°39'33" W

TIKARE

ORSTOM

1963-1965

TIKARE 2	2.36 km ²	13°16'47" N - 01°42'00" W
TIKARE 1	0.11 -	13°16'20" N - 01°42'27" W

ANSOURI

ORSTOM

1963-1965

ANSOURI	0.69 km ²	13°18'28" N - 01°45'13" W
---------	----------------------	---------------------------

MANGA

ORSTOM

1963-1965, 1982-1983, 1989

Climatologie, infiltration, humidité du sol.

NIARBA	572.00 km ²	11°40'20" N - 00°49'13" W
LOURE	98.00 -	11°40'10" N - 01°01'55" W
KAZANGA	54.30 -	11°42'41" N - 01°02'18" W
ZAPTINGA	15.10 -	11°42'00" N - 01°05'07" W
BINNDE	9.51 -	11°44'00" N - 01°05'40" W

NIENA-DIONKELE

ORSTOM

1974-1976, 1981-1984

Climatologie, humidité du sol, infiltration.

KARAMASSASSO	914.00 km ²	11°48'50" N - 04°49'40" W
KAYA	26.00 -	11°50' N - 04°45' W
N'DANA	177.00 -	11°47'40" N - 04°41'30" W
KOUEREDENI	77.00 -	11°44'00" N - 04°38'00" W
DOUGBE A DIGOUERA	19.00 -	11°41'00" N - 04°44'00" W
KUO A DIGOUERA	60.00 -	11°39'50" N - 04°45'00" W
DINGASSO	158.00 -	11°42'40" N - 04°49'10" W

MARE D'OURSIS

ORSTOM

1976-1981, 1988

Climatologie, infiltration, eau souterraine, humidité du sol.

MARE D'OURSIS	286.00 km ²	14°37' N - 00°29' W
OUTARDES	16.50 -	
POLAKA	9.65 -	
TCHALOL	9.28 -	
TAIMA	105.00 -	
DJALAFANKA	0.68 -	
KOLEL	1.05 -	
GOUNTOURE	24.60 -	

PLAINE DE KAMADENA

ORSTOM

1977-1979

Climatologie.

PLAINE DE KAMADENA	1710.00 km ²	12°37' N - 04°00' W
TONI	1535.00 -	12°40' N - 04°00' W
TENEKUY	875.00 -	12°40' N - 04°20' W
AYOUBAKOLON	1354.00 -	
KOBA	1450.00 -	
BAGALA	3800.00 -	
MARIGOT 3 ET 4	190.00 -	
MARIGOT 5	230.00 -	

IMIGA

FOND DE DEVELOPPEMENT RURAL

1982-1985

Climatologie, humidité du sol, infiltration.

BV1	12.05 km ²	12°20' N - 00°41' W
BV2	5.30 -	12°20' N - 00°41' W

BASSIN DE BIDI

ORSTOM

1985-1990

BOURBA AVAL	44.20 km ²	13°53'34" N - 02°29'52" W
AMENE BARRAGE	154.00 -	13°59'11" N - 02°33'07" W
SANNI (TEMOIN)	0.01 -	13°55'17" N - 02°33'53" W
SANNI (AMENAGE)	0.01 -	13°55'18" N - 02°31'54" W
SANNI (LABOURE)	0.01 -	13°55'19" N - 02°31'55" W
DISSA	9.10 -	13°52'53" N - 02°30'22" W
GOURGA	43.50 -	13°53'25" N - 02°29'57" W
SANNI WEOGO	2.20 -	13°56'22" N - 02°31'35" W
TILLI BARRAGE	45.00 -	13°53'42" N - 02°29'41" W
TILLI	46.50 -	13°53'45" N - 02°29'23" W
BOURDA AMONT	43.00 -	13°53'28" N - 02°29'56" W
ROULGOU TOEGA	93.10 -	13°57'07" N - 02°30'52" W
RIMBOLO	6.40 -	13°52'24" N - 02°30'10" W

11°14'

14°38'

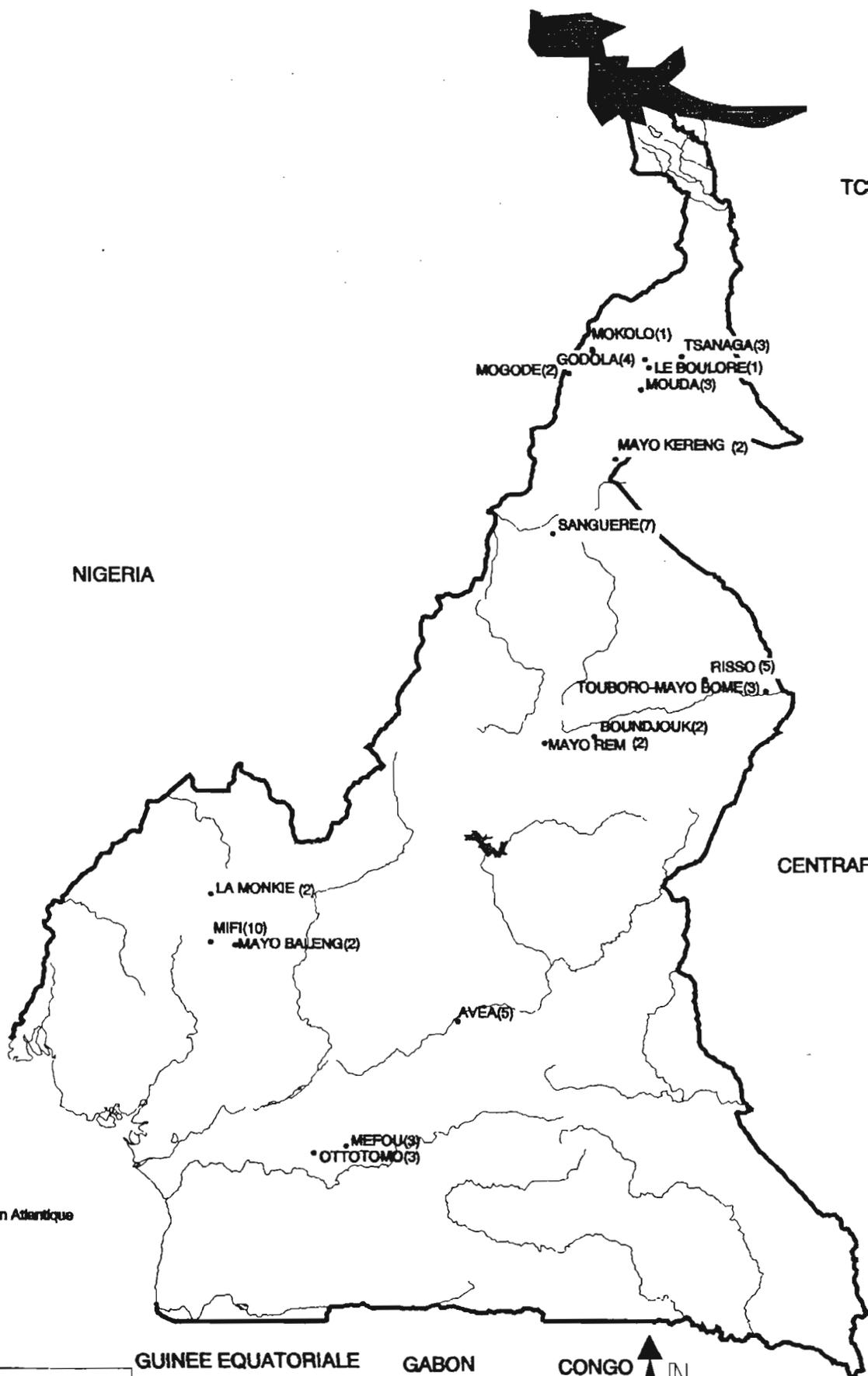
PRINCIPAUX B.V.R.E. DU CAMEROUN

10°44'

10°44'

8°40'

8°40'



NIGERIA

TCHAD

CENTRAFRIQUE

GUINEE EQUATORIALE

GABON

CONGO



Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés



11°14'

14°38'

Cameroun

TSANAGA

ORSTOM

1953-1956, 1966-1971

Climatologie, érosion.

TSANAGA A BOGO	1535.00 km ²	10°44' N - 14°36' E
TSANAGA A MAROUA	845.00 -	10°34' N - 14°17' E
TSANAGA A MINGLIA	575.00 -	10°30' N - 13°42' E

LE BOULORE

ORSTOM

1954-1955

Climatologie, érosion, infiltration.

BOULORE	3.75 km ²	10°37'54" N - 14°18'23" E
---------	----------------------	---------------------------

GODOLA

ORSTOM

1955-1956, 1966-1969

Climatologie.

S4 MOTORSOLO	42.00 km ²	10°42'25" N - 14°16'09" E
S3 DJEBE	11.10 -	10°41'58" N - 14°14'02" E
S2 MOTOR SOLO	20.30 -	10°42'08" N - 14°15'05" E
S1 LELENG	4.00 -	10°42'50" N - 14°13'38" E

MAYO KERENG

ORSTOM, IRCAM

1956-1956

Climatologie, érosion, infiltration.

MAYO A	4.00 km ²	09°49'19" N - 14°00'01" E
MAYO B	0.07 -	09°49'05" N - 14°00'17" E

MAYO BALENG

ORSTOM

1958-1959

Erosion.

MAYO BALENG	10.70 km ²	05°30'56" N - 10°33'30" E
FOSSE	0.98 -	05°30'28" N - 10°31'40" E

MOGODE

ORSTOM, IRCAM

1960

BASSIN A (AMENAGE)	1.08 km ²	10°35'00" N - 13°35'14" E
BASSIN B (NATUREL)	0.94 -	10°34'27" N - 13°34'43" E

BOUNDJOUK

ORSTOM

1962-1963

Climatologie, érosion.

BOUNDJOUK	18.00 km ²	07°22'03" N - 13°47'38" E
PETIT BOUNDJOUK	1.66 -	07°19'44" N - 13°47'42" E

MEFOU

EDF (IGECO)

1962-1963, 1968-1969

MEFOU A NSIMALEN	425.00 km ²	03°44' N - 11°32' E
MEFOU A ETOA	235.00 -	03°47' N - 11°29' E
CENTRALE	70.00 -	03°52' N - 11°56' E

MAYO REM

ORSTOM

1963-1964

REM	10.55 km ²	07°18'28" N - 13°20'31" E
M'BIDOU	1.86 -	07°17'34" N - 13°21'15" E

AVEA

ORSTOM

1963-1965

Erosion, infiltration.

MEVOUNGA (AVEA)	375.00 km ²	04°50'13" N - 12°32'32" E
NSONGOLE S1	5.70 -	04°37'28" N - 12°38'32" E
AVEA S2	39.00 -	04°36'30" N - 12°39'54" E
MEBOKO S3	2.00 -	04°35'57" N - 12°40'39" E
YOM S4	96.00 -	04°39'40" N - 12°40'09" E

TOUBORO-MAYO BOME

ORSTOM

1963-1965

Climatologie, érosion, hydrochimie.

MAYO BOME S1	38.00 km ²	07°46'05" N - 15°20'26" E
MAYO BOME S2	21.90 -	07°47'50" N - 15°21'05" E
MAYO BAFE S3	4.45 -	07°45'59" N - 15°20'00" E

RISSO

ORSTOM

1966-1968

Climatologie, érosion, humidité du sol, eau souterraine, infiltration.

S5	127.00 km ²	07°52'42" N - 14°47'38" E
S4	76.00 -	07°54'46" N - 14°44'13" E
S3	32.50 -	07°56'07" N - 14°41'45" E
S2	14.10 -	07°57'32" N - 14°42'28" E
S1 ASSONGAI	4.30 -	07°57'19" N - 14°41'18" E

MIFI

ORSTOM, EDF (IGECO)

1967-1972

Climatologie, érosion, hydrochimie, eau souterraine.

MIFI A BAFOUNDA	854.00 km ²	05°32'36" N - 10°20'16" E
MIFI A BAMOUNGOM	306.00 -	05°30'55" N - 10°21'34" E
METEU A BALENG	29.40 -	05°30'45" N - 10°24'13" E
CHRIS A M'BO	18.80 -	05°26'42" N - 10°25'17" E
NAT A BANDJOU	7.95 -	05°21'14" N - 10°24'49" E
METCHIE AUX CHUTES	480.00 -	05°31'53" N - 10°19'44" E
CHOUMI A BANOK	360.00 -	05°28'42" N - 10°16'52" E
CHOUMI A BAMENDOU	80.00 -	05°29'14" N - 10°13'14" E
WASSA A BANOK	119.00 -	05°28'00" N - 10°16'52" E
MESAP A BANDANG	8.57 -	05°33'53" N - 10°11'05" E

LA MONKIE

ORSTOM

1968-1971

Climatologie, érosion, hydrochimie.

BABANKI	24.20 km ²	05°58'27" N - 10°20'44" E
BAMESSING	181.00 -	05°57'15" N - 10°25'16" E

SANGUERE

ORSTOM, ONAREST

1971-1975

Climatologie, humidité du sol, eau souterraine.

S7	86.50 km ²	09°10' N - 13°26' E
S1	3.30 -	09°11' N - 13°29'30" E
S2	7.10 -	09°11' N - 13°29' E
S3	1.00 -	
S4	1.60 -	09°09' N - 13°28'45" E
S5	27.10 -	09°09' N - 13°28'30" E
S6	3.20 -	09°12'30" N - 13°28'30" E

OTTOTOMO

1973-1978

Climatologie, infiltration.

S3 ST PRINCIPALE	23.60 km ²	03°40'15" N - 11°14'58" E
S1 SIBEKON	1.80 -	03°40'06" N - 11°17'03" E
S2 BIBANDA	2.30 -	03°40'52" N - 11°17'26" E

MOKOLO

ORSTOM, ONAREST

1974-1975

Erosion.

TSANAGA A DOUVAR	48.90 km ²	10°47'10" N - 13°47'52" E
------------------	-----------------------	---------------------------

MOUDA

ORSTOM

1984-1985

Erosion, humidité du sol, infiltration.

BV1	18.10 km ²	10°26' N - 14°14' E
BV2	0.01 -	10°26' N - 14°14' E
BV3	0.06 -	10°26' N - 14°14' E

24°18'

20°

PRINCIPAL B.V.R.E. DES ILES DU CAP-VERT

16°37'

16°37'



Océan Atlantique

SAO NICOLAU (2)

15°

15°

Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés



24°18'

20°

Cap-Vert**SAO NICOLAU**

ORSTOM

1978, 1987

Climatologie, érosion, hydrochimie, eau souterraine.

RIBEIRA BRAVA	6.70 km ²	16°37' N - 24°18' W
RIBEIRA GRANDE	11.00 -	16°40' N - 24°19'30" W

12°36'

15°11'

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU CONGO

CENTRAFRIQUE

CAMEROUN

GABON

MELEKOUKA(3)

ZAÏRE

ILEYOU(1)

BIBANGA(1)

MAKABANA(3)

PLAINE DE D'ESSE(5)

COMBA(4)

CABINDA

Océan Atlantique



Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés

0

500 km

12°36'

15°11'

1°33'

1°33'

3°28'

3°28'

Congo

COMBA

ORSTOM

1957-1958, 1975-1977, 1981, 1986

Erosion, infiltration.

S4 (TELEPHERIQUE)	17.50 km ²	04°17'50" S - 14°15'35" E
S1 (ABATTOIRS)	3.25 -	04°18'30" S - 14°16'10" E
S2 (DEVERSOIR)	1.18 -	04°18'46" S - 14°15'56" E
S5	90.00 -	04°14' S - 14°17' E

LEYOU

ORSTOM

1957-1958, 1986

Infiltration.

LEYOU	5.00 km ²	02°22'02" S - 12°46'16" E
-------	----------------------	---------------------------

MAKABANA

ORSTOM

1958-1959

Climatologie.

MAKABANA	2.06 km ²	03°26'43" S - 12°36'50" E
PETIT MAKABANA	0.35 -	03°27'16" S - 12°36'17" E
MIGOUENGUELE	10.60 -	03°29'30" S - 12°35'40" E

BIBANGA

ORSTOM

1959-1986, 1986

Infiltration.

BIBANGA	25.20 km ²	02°29'00" S - 12°43'25" E
---------	-----------------------	---------------------------

MIELEKOUKA

ORSTOM

1967-1968

BASSIN 3	43.00 km ²	01°33'54" N - 15°11'08" E
BASSIN 1	3.90 -	01°35'10" N - 10°10'58" E
BASSIN 2	11.10 -	01°35'12" N - 15°11'06" E

PLAINE DE DIHESSE

ORSTOM

1970-1972

Climatologie.

MOUNDI 1	147.40 km ²	03°56' S - 12°50' E
MOUNDI 2	100.80 -	03°57' S - 12°48' E
MOUNDI 3	60.40 -	03°57' S - 12°46' E
KILIKA	21.80 -	03°50' S - 12°46' E
KIBOUBA	7.75 -	04°03'20" S - 12°51'32" E

FOUBOU

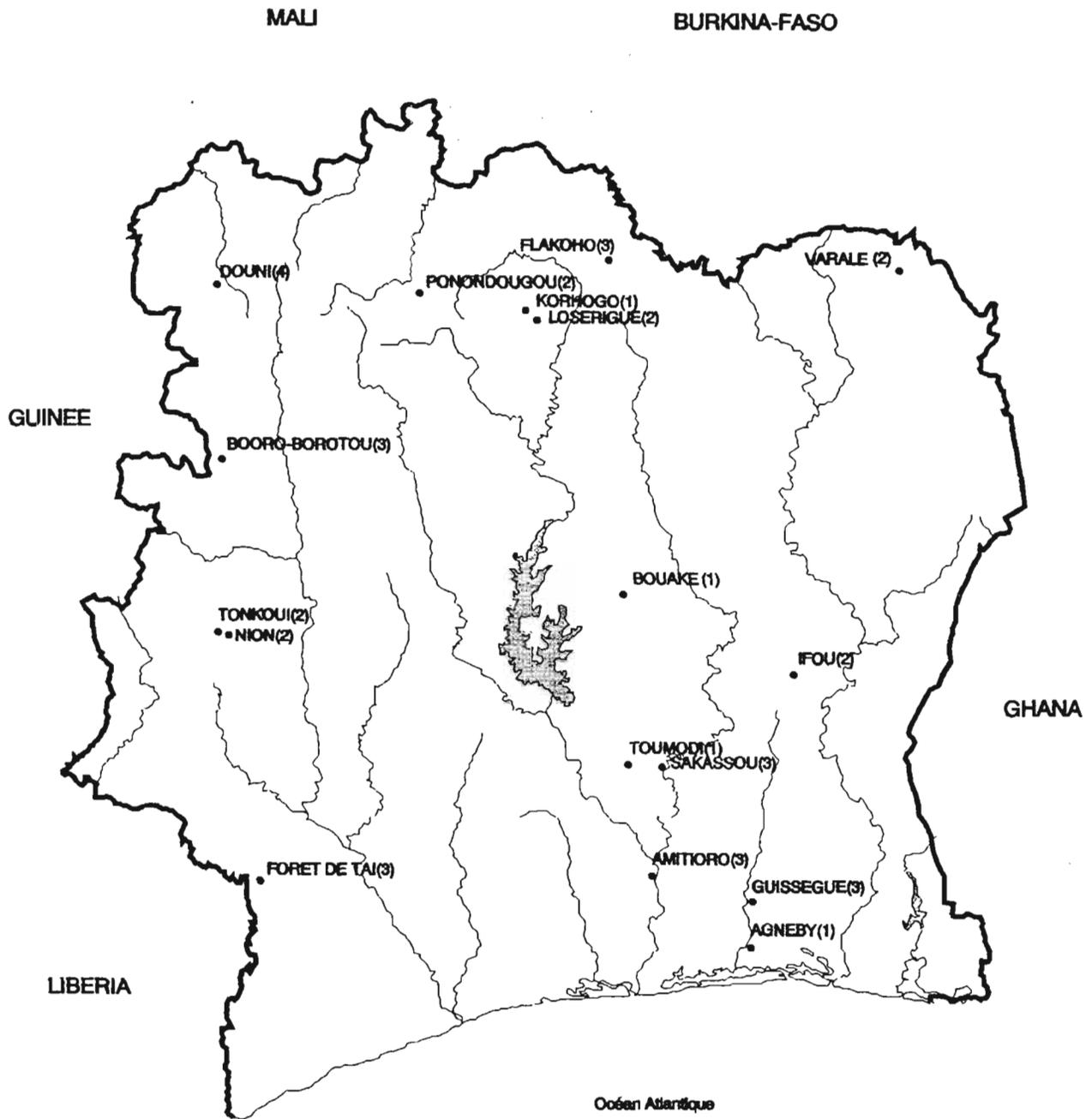
ORSTOM

1971-1974

Climatologie.

FOUBOU	38.50 km ²	
DZOUNDZA	3.10 -	

PRINCIPAUX B.V.R.E. DE LA COTE D'IVOIRE



Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés



7°20'

5°16'

Côte d'Ivoire

IFOU

ORSTOM

1955-1958

Climatologie, infiltration.

KOUASSI DIOTEKRO	37.80 km ²	07°08'16" N - 03°57'17" W
ANOMABO	150.00 -	07°05'32" N - 03°56'15" W

TOUMODI

ORSTOM

1957-1958

TOUMODI	22.50 km ²	06°34'34" N - 05°00'52" W
---------	-----------------------	---------------------------

FLAKOHO

ORSTOM

1957-1959

Climatologie.

STATION CENTRALE	30.20 km ²	09°44'00" N - 05°07'24" W
WOROSSANTIAKAHA	12.00 -	09°42'53" N - 05°05'57" W
NAMBONKAHA	47.60 -	09°44'37" N - 05°09'30" W

NION

ORSTOM

1957-1959

Climatologie, infiltration.

STATION 1	75.00 km ²	07°22'51" N - 07°32'23" W
STATION 2	12.50 -	07°24'44" N - 07°31'28" W

TONKOU

ORSTOM

1958-1959

Infiltration.

LOUE	18.40 km ²	07°23'46" N - 07°36'25" W
GBOA	12.30 -	07°25'39" N - 07°35'40" W

GUISSEGUE

ORSTOM

1959-1961, 1961-1962

Climatologie, infiltration.

GUISSEGUE 1 MANSO	88.20 km ²	05°42'40" N - 04°13'38" W
GUISSEGUE 2 BAFO	26.70 -	05°43'51" N - 04°13'58" W
SITOU	27.80 -	05°47'22" N - 04°13'25" W

BOUAKE

ORSTOM

1959-1962

Climatologie.

BOUAKE	24.50 km ²	07°38'32" N - 05°02'24" W
--------	-----------------------	---------------------------

PONONDOUGOU

ORSTOM

1960-1962

LODALA	52.10 km ²	09°31'24" N - 06°19'15" W
FALADOUA	10.30 -	09°30'57" N - 06°17'44" W

AGNEBY

ORSTOM

1961-1962

AGNEBY	11.00 km ²	05°25'27" N - 04°14'11" W
--------	-----------------------	---------------------------

VARALE

ORSTOM

1961-1963

Climatologie.

BOITAO	55.60 km ²	09°40'20" N - 03°16'32" W
GUIDERE-KOLOGO	10.30 -	09°40'06" N - 03°16'57" W

LOSERIGUE

ORSTOM

1961-1963

DIELIKAHA	57.60 km ²	09°21'10" N - 05°34'40" W
NATIOKAHA	10.40 -	09°22'04" N - 05°35'41" W

DOUNI

ORSTOM

1962-1964

GBAHALAN	204.40 km ²	09°34'27" N - 07°36'07" W
S3 POINT 398	120.00 -	09°30'07" N - 07°36'00" W
BASSEKODOUGOU	27.70 -	09°26'48" N - 07°34'35" W
ZIEVASSO	4.60 -	09°24'42" N - 07°35'37" W

KORHOGO

ORSTOM

1962-1968, 1968-1970, 1983

Climatologie, érosion, humidité du sol, infiltration, eau souterraine.

KORHOGO	3.63 km ²	09°25'12" N - 05°39'11" W
---------	----------------------	---------------------------

AMITIORO

ORSTOM

1963-1968

Climatologie, érosion.

STATION 1	170.00 km ²	05°52'19" N - 04°51'45" W
STATION 2	2.75 -	05°54'47" N - 04°54'58" W
RAVINEAU	0.02 -	05°55'07" N - 04°54'45" W

SAKASSOU

ORSTOM

1972-1977

Climatologie, érosion, infiltration.

STATION AVAL	26.62 km ²	06°33'40" N - 04°47'42" W
BV EST	0.55 -	06°33'37" N - 04°49'19" W
BV OUEST	0.63 -	06°33'38" N - 04°50'00" W

FORET DE TAI

ORSTOM

1978-1981

Climatologie, érosion, humidité du sol, infiltration.

STATION 1 (BV 1)	37.80 km ²	05°50'14" N - 07°20'40" W
STATION 2 (BV 2)	1.17 -	05°52'40" N - 07°19'50" W
STATION 3 (BV 3)	1.44 -	05°52'10" N - 07°20'08" W

BOORO-BOROTOU

ORSTOM

1984-1988

Climatologie, humidité du sol, infiltration, eau souterraine.

BOORO PRINCIPAL	1.36 km ²	08°28'53" N - 07°34'43" W
BOORO AMONT	0.45 -	08°28'35" N - 07°35'07" W
TOURESSO	111.00 -	08°30'19" N - 07°32'28" W

9°46'

12°

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU GABON

CAMEROUN

GUINEE EQUATORIALE

CONGO

NZEME (3)

MALA (2)

Océan Atlantique

CONGO

0°35'

0°35'

3°26'

3°26'



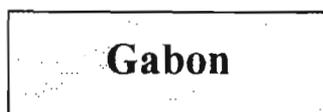
Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés



9°46'

12°

**MALA**

ORSTOM

1962-1964

Climatologie.

NZANG

9.20 km²

00°35'55" N - 10°15'53" E

MITZIBE

6.70 -

00°35'29" N - 10°15'34" E

NZEME

ORSTOM

1969-1973, 1979

Climatologie.

NZEME 1

73.60 km²

00°23'22" N - 09°46'24" E

NZEME 2

17.50 -

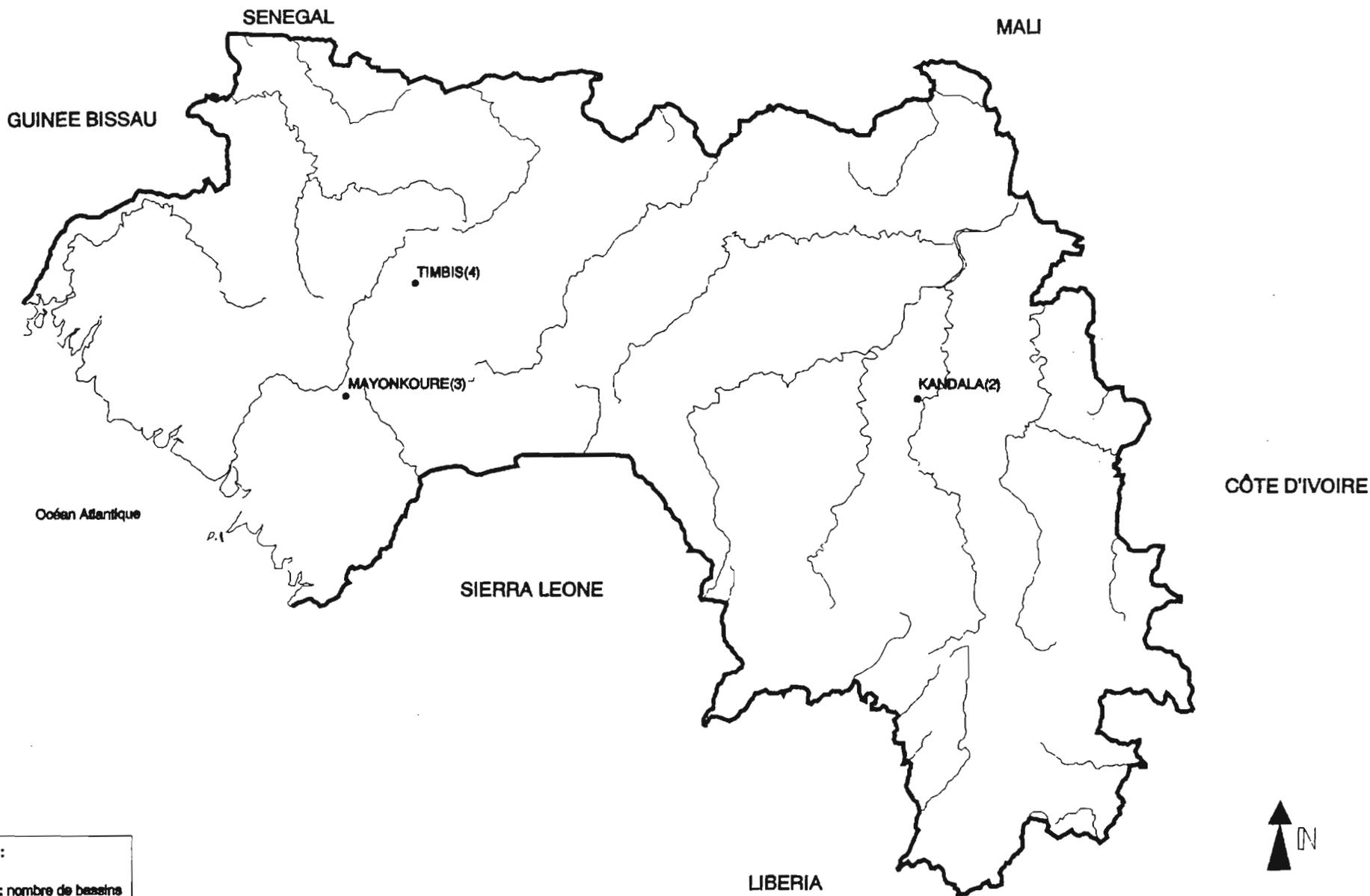
00°23'47" N - 09°46'41" E

NZEME 3

3.26 -

00°22'43" N - 09°47'39" E

PRINCIPAUX B.V.R.E. DE LA GUINEE



Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés

0 500 km

Guinée

MAYONKOURE

ORSTOM

1956

BAREAH	540.00 km ²	10°22'40" N - 12°58'00" W
BV1 KIESSI	7.30 -	10°08'56" N - 12°51'41" W
BV2 TANENE	77.00 -	10°12'52" N - 12°53'06" W

KANDALA

ORSTOM

1957-1958

Climatologie.

TIEMORO	55.00 km ²	10°21'26" N - 09°23'21" W
DIALABO	24.00 -	10°22'09" N - 09°23'39" W

TIMBIS

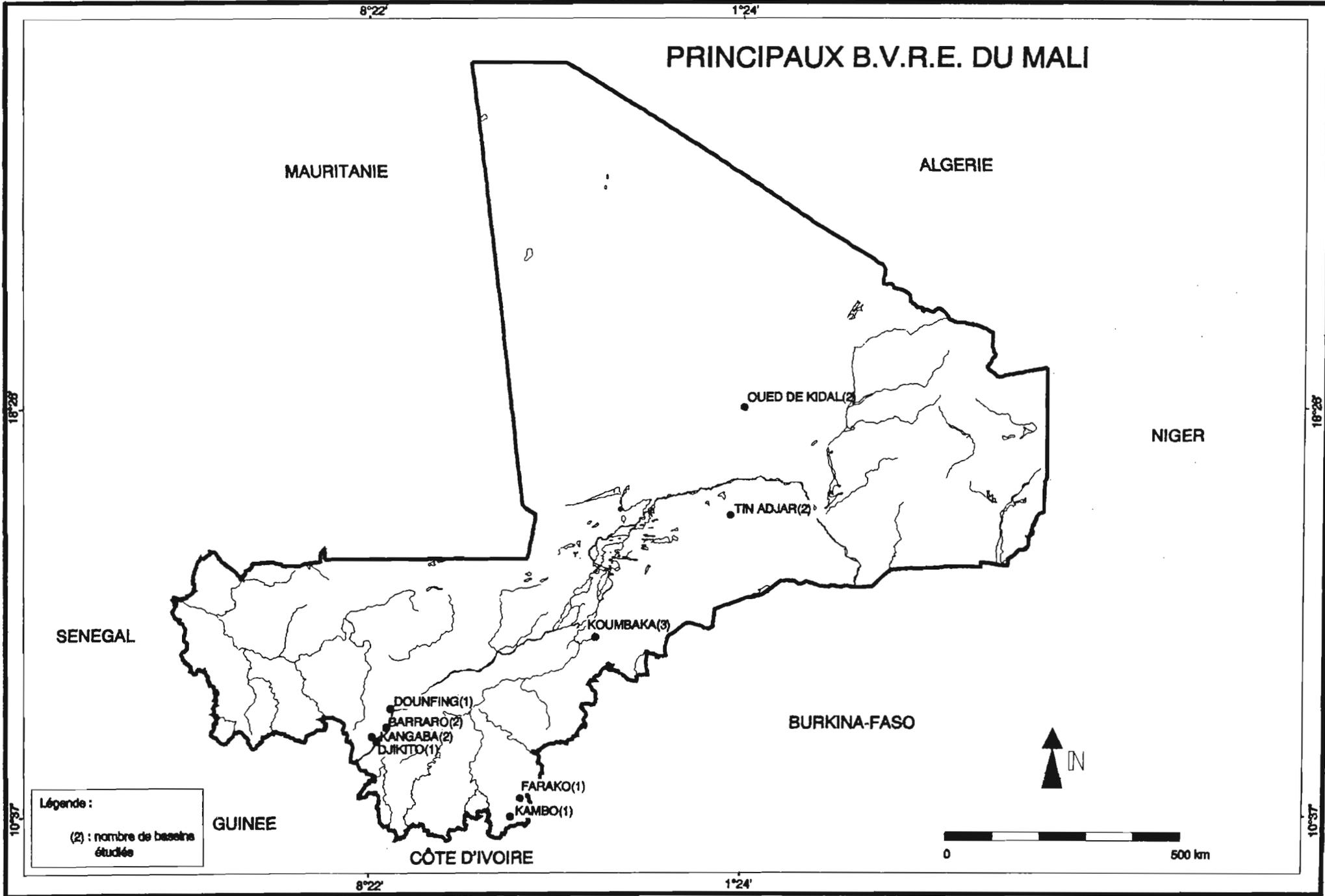
ORSTOM

1957-1959, 1962

Climatologie, érosion.

FOTERE	210.00 km ²	11°05'39" N - 12°32'00" W
GUESSEWOL	16.20 -	11°06'47" N - 12°33'53" W
PALLEWOL	2.75 -	11°07'10" N - 12°33'45" W
TONDOULLA	0.51 -	11°08'17" N - 12°33'50" W

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU MALI



Mali

DOUNFING

ORSTOM

1954-1955

Climatologie.

DOUNFING	17.50 km ²	12°40'41" N - 08°02'42" W
----------	-----------------------	---------------------------

KOUMBAKA

ORSTOM

1955-1957

Climatologie, infiltration.

STATION 1	87.00 km ²	13°57'46" N - 04°12'50" W
SINKORONI	8.90 -	13°54'07" N - 04°13'00" W
STATION 2 AMONT	30.40 -	13°55'10" N - 04°11'18" W

TIN ADJAR

ORSTOM

1956-1958

Climatologie.

BASSIN AMONT	35.50 km ²	16°17'53" N - 01°39'54" W
BASSIN REDUIT AVAL	16.50 -	16°19'00" N - 01°41'41" W

FARAKO

ORSTOM

1959

Climatologie.

BANANKORO	68.00 km ²	10°55'37" N - 05°35'57" W
-----------	-----------------------	---------------------------

KANGABA

ORSTOM

1960, 1968-1969

Climatologie.

DEGUELA (KOBBA)	1052.00 km ²	12°01'51" N - 08°22'51" W
MADINA (DJITIKO)	92.30 -	12°03'16" N - 08°22'38" W

BARRARO

ORSTOM

1968, 1969

BARRARO A KRINA	251.00 km ²	12°18' N - 08°09' W
BARRARO A TENAYA	39.00 -	12°19' N - 08°17' W

DJIKITO

ORSTOM

1960, 1968-1969

DJIKITO A MADINA	103.00 km ²	12°03' N - 08°22' W
------------------	------------------------	---------------------

Oued de KIDAL

ORSTOM

1984-1986

Climatologie, érosion.

KIDAL	98.00 km ²	18°26'13" N - 01°24'10" E
TAMAYA	15.00 -	18°28'20" N - 01°23'00" E

KAMBO

ORSTOM, IER, CIRAD

1988-1989

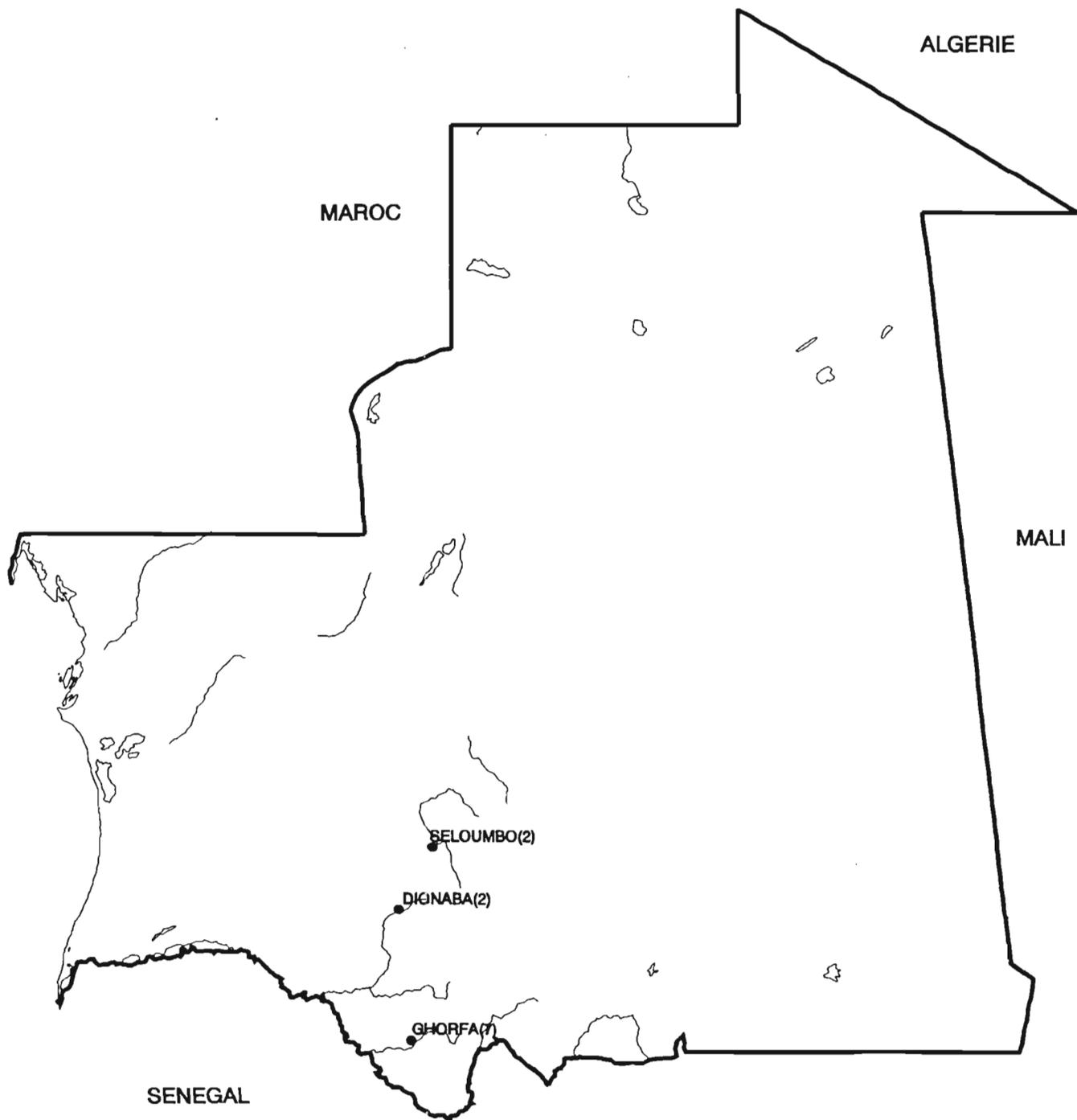
Eau souterraine.

KAMBO

9.80 km²

10°37' N - 05°48' W

PRINCIPAUX B.V.R.E. DE LA MAURITANIE



Légende :
(2) : nombre de bassins étudiés



15°38'
17°48'

15°38'
17°48'

12°37'

8°

Mauritanie

SELOUMBO

ORSTOM

1957-1959

Climatologie.

OUED MOKTAR	12.20 km ²	17°49'23" N - 12°16'46" W
OUED ALI	10.40 -	17°49'02" N - 12°16'45" W

DIONABA

ORSTOM

1958-1959

Climatologie.

DIONABA AVAL	111.00 km ²	17°05'57" N - 12°37'24" W
DIONABA AMONT	34.10 -	17°09'50" N - 12°39'54" W

GHORFA

ORSTOM

1964-1967, 1975

Erosion.

OULED ADDET	1125.00 km ²	15°38'30" N - 12°30'30" W
KADIEL	39.50 -	15°47'15" N - 12°28'32" W
DJAJIBINE	148.00 -	15°46'47" N - 12°29'00" W
BOITIEK	250.00 -	15°42'28" N - 12°38'15" W
ECHKATA	149.00 -	15°55'29" N - 12°16'00" W
BOUDAMA	564.00 -	15°43'26" N - 12°25'10" W
PO	2.71 -	15°46'00" N - 12°28'00" W

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU NIGER

5°22' 8°56'

LYBIE

ALGERIE

IFREOUANE(3)

JIMIA(4)

TABELOT(3)

RAZMAMOULMI(3)

TELLOUA-AGADES(6)

MALI

KOUNTKOUZOUT(3)

VALLEE DE KEITA(2)

BADEGUICHERI(9)

MAGGIA-SABONGA(4)

KAOUARA(1)

GALMI(2)

TCHAD

BURKINA-FASO

KOULOÛ(2)

BENIN

DALLOL MAOURI(6)

NIGERIA



Légende :
(2) : nombre de bassins étudiés

5°22' 8°56'

19°03'

14°30'

19°03'

14°30'

Niger

MAGGIA-SABONGA

ORSTOM

1956-1958

Climatologie, érosion, infiltration.

SABONGA	79.90 km ²	14°11'15" N - 05°39'10" E
ALOKOTO	48.30 -	14°12'52" N - 05°38'19" E
HAMZA	16.60 -	14°12'39" N - 05°38'49" E
FOSSE	0.05 -	14°12'42" N - 05°38'07" E

RAZELMAMOULMI

ORSTOM

1959-1961

IN-TIZIOUEN 1	1.87 km ²	17°09'52" N - 08°09'08" E
IN-TIZIOUEN 2	0.67 -	17°09'46" N - 08°09'15" E
IN-AZEMA	2.61 -	17°10'01" N - 08°08'58" E

TELOUA-AGADES

ORSTOM

1959-1964, 1975-1986, 1989-1990

Climatologie, eau souterraine, humidité du sol, infiltration.

NDOUNA	1635.00 km ²	16°56'13" N - 07°52'00" E
AZEL	1360.00 -	17°03' N - 08°03' E
RAZEL MAMOULMI	1260.00 -	17°10' N - 08°06' E
DABAGA	1024.00 -	17°20' N - 08°10' E
AZAMELLA	61.00 -	17°01' N - 08°01' E
AGASSAGHAS	5.75 -	17°00' N - 07°59' E
PERTUIS		
NIGELEC (RADIER 1)		16°59'50" N - 07°58'20" E
RADIER 2		

KOULOU

ORSTOM

1960-1961, 1987

Infiltration.

BANIGOROU	17.30 km ²	12°15'20" N - 03°03'37" E
YOLDE	82.60 -	12°16'36" N - 03°02'37" E

KAOUARA

ORSTOM

1964-1966, 1990

KAOUARA	3.30 km ²	14°05'32" N - 05°40'20" E
---------	----------------------	---------------------------

KOUNTKOUZOUT

ORSTOM

1964-1967, 1986, 1988

Erosion, infiltration.

STATION PRINCIPALE	16.60 km ²	14°50'47" N - 05°35'59" E
BARRAGE	0.70 -	14°50'26" N - 05°36'52" E
STATION SECONDAIRE	0.26 -	14°50'34" N - 05°38'05" E

VALLEE DE KEITA

ORSTOM

1965-1967, 1975-1979

Erosion.

TEGUELEGUEL	130.00 km ²	14°46'57" N - 05°57'20" E
IBOHAMANE	87.70 -	14°49'45" N - 05°55'07" E

DALLOL MAOURI

ORSTOM

1967-1969

BANGOU BERI	12.50 km ²	11°56'30" N - 03°34' E
BANGOU BERI (Pt.B.)	0.50 -	11°56' N - 03°34'30" E
BENGOU	90.00 -	11°59'30" N - 03°35' E
KOTE KOTE SUD	30.00 -	12° N - 03°32' E
KOTE KOTE NORD	5.00 -	12°02' N - 03°31'30" E
TANAGUEYE	75.00 -	12°04'30" N - 03°29' E

BADEGUICHERI

ORSTOM

1965-1967, 1969-1971

BADEGUICHERI	824.00 km ²	14°30'00" N - 05°22'00" E
TAMBAS	284.00 -	14°29'40" N - 05°26'30" E
DOUHOUA	74.00 -	14°32'30" N - 05°34'50" E
DOUDEBEY-BABA	68.00	
BOUJI 1	8.50 -	14°30'30" N - 05°26'50" E
BOUJI 2	6.15 -	14°30'30" N - 05°26'40" E
KOARA ABDOU 1	234.00 -	14°27'40" N - 05°39'30" E
KOARA ABDOU 2	5.65 -	14°27'15" N - 05°40'00" E
KATASAROA	104.00 -	14°25'35" N - 05°35'20" E

GALMI

ORSTOM

1969-1971, 1974-1979

Erosion, infiltration.

GUIDAM BAGUILBI S1	29.20 km ²	13°58'50" N - 05°42'00" E
GUIDAM KODIDI S2	46.50 -	13°57'50" N - 05°42'30" E

IFEROUANE

ORSTOM

1975-1980

Eau souterraine.

IFEROUANE	1550.00 km ²	19°03'10" N - 08°26'20" E
ABOUBDOU	620.00 -	19°02'05" N - 08°30'45" E
SELOUFJET	845.00 -	19°01'30" N - 08°28'40" E

TIMIA

ORSTOM

1976-1980

Eau souterraine.

STATION 4 (TIMIA)	156.30 km ²	18°13'50" N - 08°45'50" E
STATION 1 (TIMIA)	40.30 -	18°17'15" N - 08°45'15" E
STATION 2 (IZATAN)	7.10 -	18°16'40" N - 08°45'40" E
STATION 3 (GUIJE)	63.80 -	18°13'25" N - 08°47'25" E

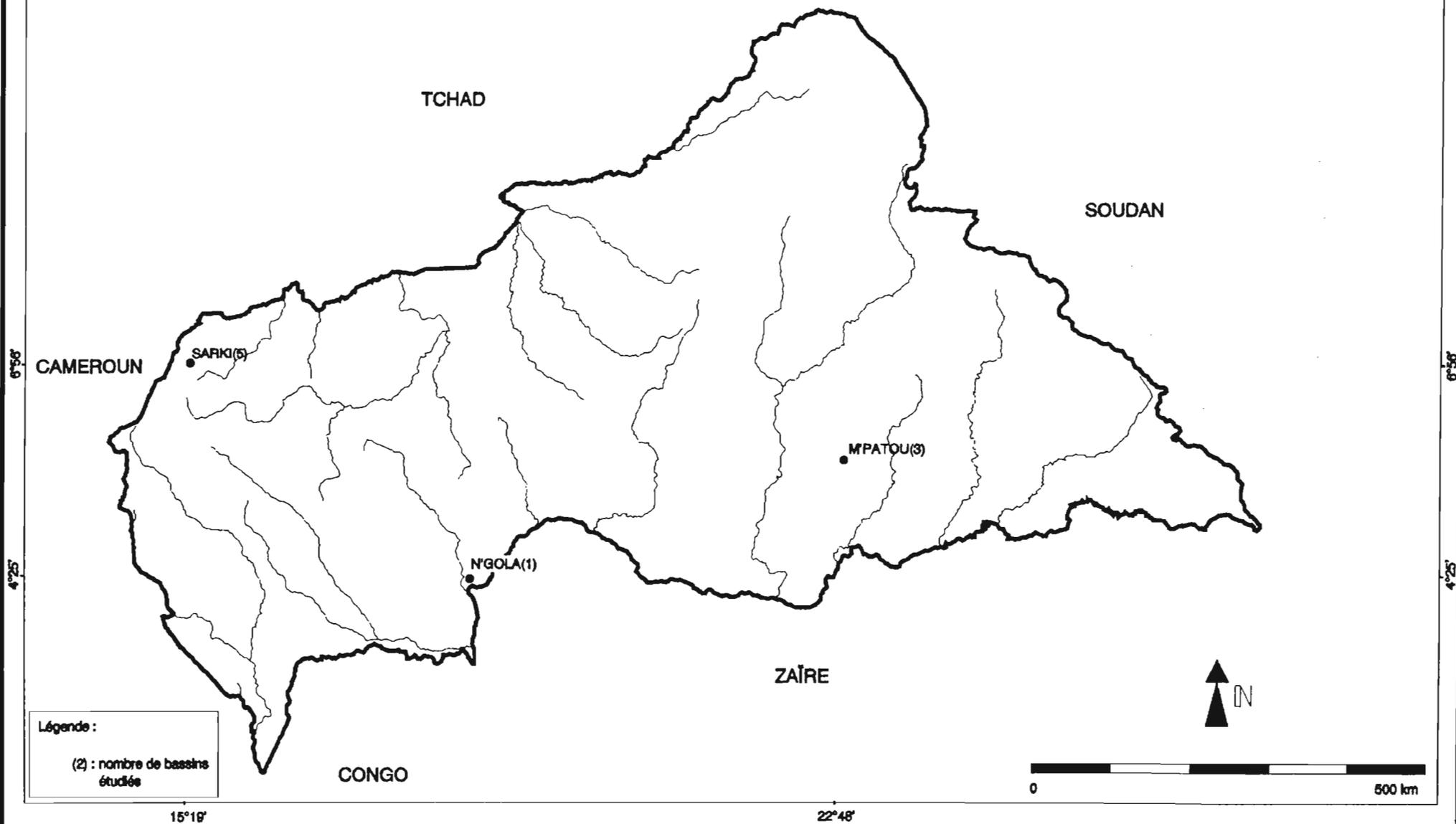
TABELOT

ORSTOM

1977-1979

TELOUES	324.00 km ²	17°34'47" N - 08°56'42" E
AKREREB	26.40 -	17°37'39" N - 08°55'54" E
NABAROU	244.00 -	17°34'01" N - 08°52'16" E

PRINCIPAUX B.V.R.E. DE LA CENTRAFRIQUE



République Centrafricaine

N'GOLA

ORSTOM

1953-1956

Climatologie.

N'GOLA

27.00 km²

04°25'50" N - 18°32'25" E

SARKI

ORSTOM

1968-1972

Climatologie, érosion, humidité du sol, infiltration, eau souterraine.

KOUI A SARKI

184.00 km²

06°56'55" N - 15°19'18" E

KOUI A NANA

93.60 -

06°55'17" N - 15°24'52" E

KOUI A BAKOUSSA

5.10 -

06°55'20" N - 15°29'36" E

M'BILABI A NANA

3.90 -

06°55'28" N - 15°24'46" E

TORO A NANA

36.50 -

06°55'17" N - 15°24'52" E

M'PATOU

ORSTOM

1974-1975

Climatologie, eau souterraine.

PASCALE

350.00 km²

05°50' N - 22°48' E

LOBO

6.80 -

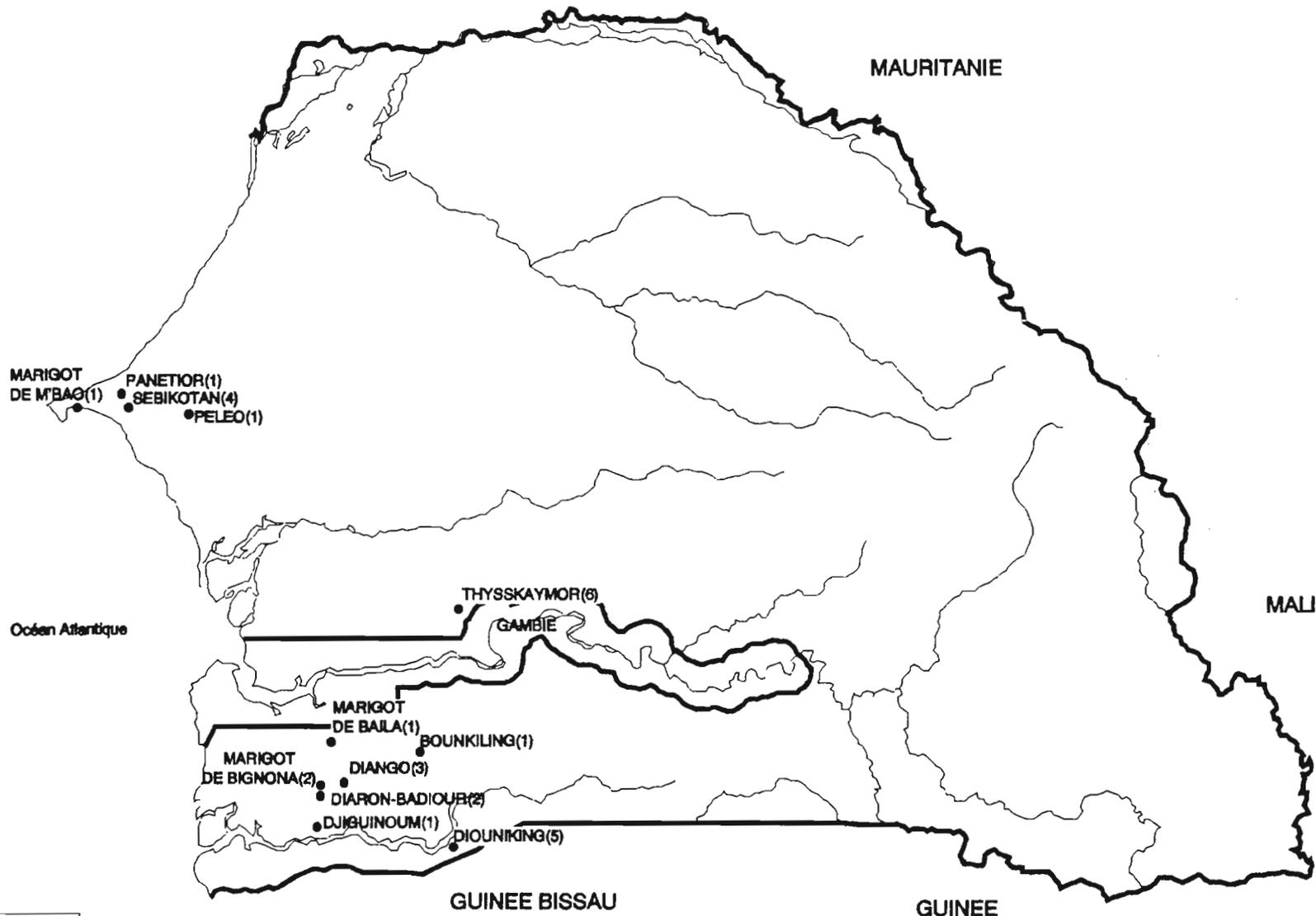
05°45' N - 22°48' E

PALMYRE

375.00 -

05°45' N - 22°50' E

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU SENEGAL



Légende :
(2) : nombre de bassins étudiés



Sénégal

SEBIKOTANE

ORSTOM

1962

PANE TIOR	93.00 km ²	14°44' N - 17°08' W
DAMBOUSSANE	84.50 -	14°42'53"N - 17°10'07" W
KIPE-KIPE	43.00 -	14°44'29"N - 17°08'58" W
DIAM-NIADIE	2.62 -	14°43'52"N - 17°10'03" W

DIARONE-BADIOURE

ORSTOM

1966-1967

Eau souterraine.

DIARONE	16.50 km ²	12°49' N - 16°11' W
BADIOURE	24.50 -	12°51' N - 16°08' W

DIOUNKING

ORSTOM

1966-1967

Eau, souterraine.

BAKOUNDI	30.00 km ²	12°34' N - 15°32' W
BINDABA	3.20 -	12°31' N - 15°52' W
AKINTOU	7.00 -	12°32' N - 15°53' W
BIRKAMA BRAM	6.40 -	12°30' N - 15°51' W
BATANKOUNTOU	4.50 -	12°30' N - 15°53' W

BOUNKILING

ORSTOM

1966-1967

Eau souterraine.

BOUNKILING	200.00 km ²	13°02' N - 15°42' W
------------	------------------------	---------------------

DIANGO

ORSTOM

1966-1967

Eau souterraine.

DIANGO	135.00 km ²	12°53' N - 16°04' W
TANKORON	43.00 -	12°59' N - 16°04' W
DJINONAYE	11.00 -	12°59' N - 16°08' W

MARIGOT DE BIGNONA

ORSTOM

1970-1971

Climatologie.

SANDOUGOU	84.70 km ²	12°52'20"N - 16°11'00" W
SINDIAN	11.70 -	12°57'30"N - 16°11'25" W

MARIGOT DE M'BAO

ORSTOM

1974

Climatologie, eau souterraine.

MARIGOT DE M'BAO	5.00 km ²	14°44' N - 17°23' W
------------------	----------------------	---------------------

PANETIOR

ORSTOM

1975-1976

Climatologie.

PANETIOR	88.50 km ²	14°48' N - 17°10' W
----------	-----------------------	---------------------

PELEO

ORSTOM

1975-1976

Climatologie.

THIES (PELEO)	43.50 km ²	14°42' N - 16°50' W
---------------	-----------------------	---------------------

MARIGOT DE BAILA

1979-1989

Météorologie, eau souterraine, marégraphie

KARTIAK (marégr.)	1634 km ²	13°05' N - 16°08' W
BAILA (marégr.)	1342 -	
BALANDINE (marégr.)	852 -	
DJIBIDIONE (marégr.)	642 -	
TOUKARA (St. hydro.)	324 -	

MARIGOT DE NIASSA

BCEOM

1980-1981

Météorologie

TOUBAKOUTA	61 km ²	
------------	--------------------	--

MARIGOT DE GUIDEL

BCEOM

1980-1981

Météorologie

NIAFENA	115 km ²	
---------	---------------------	--

THYSSE KAYMOR

ISRA, CIRAD, ORSTOM, R3S

1983, 1986, 1988-1990

Erosion, humidité du sol, infiltration, eau souterraine.

NDIBA S1	16.20 km ²	13°44' N - 15°31' W
KEUR DIANKO S2	0.58 -	13°44' N - 15°32' W
NDIERGUELE S3	0.90 -	13°44' N - 15°32' W
NDIBA S4	0.02 -	13°44' N - 15°33' W
YARANE S5	0.02 -	13°44' N - 15°32' W
KEUR SAMBA DIAMA S6	75.60 -	13°44' N - 15°32' W

DJIGUINOUM

ISRA, CIRAD, ORSTOM, R3S

1988-1990

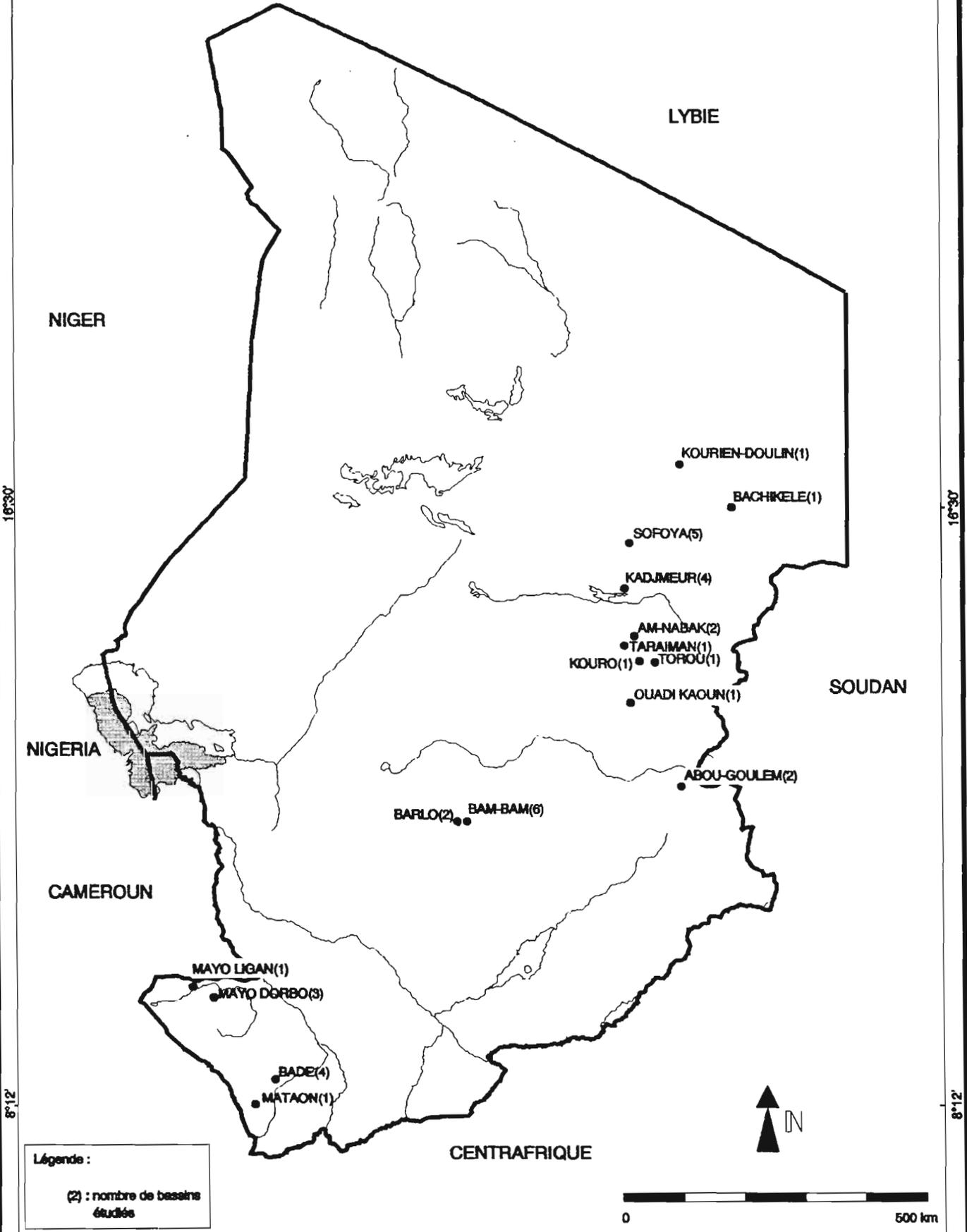
Climatologie, infiltration, hydrochimie, eau souterraine.

DJIGUINOUM	26.52 km ²	12°40' N - 16°12' W
------------	-----------------------	---------------------

14°44'

22°20'

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU TCHAD



Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés



14°44'

22°20'

16°30'

16°30'

8°12'

8°12'

Tchad

OUADI KAOUN

ORSTOM

1956-1957

Infiltration, eau souterraine.

OUADI KAOUN	56.00 km ²	13°47'55" N - 20°53'46" E
-------------	-----------------------	---------------------------

KOURIEN-DOULIEN

ORSTOM

1957

KOURIEN-DOULIEN	7.80 km ²	17°06'53" N - 21°37'59" E
-----------------	----------------------	---------------------------

BACHIKELE

EDF, OCRC, ORSTOM

1958-1959

Climatologie.

BACHIKELE	18.80 km ²	16°30'52" N - 22°20'28" E
-----------	-----------------------	---------------------------

BARLO

ORSTOM

1958-1959

Climatologie, infiltration.

BAGOUA (GR.BASS.)	36.60 km ²	12°06'47" N - 18°28'15" E
-------------------	-----------------------	---------------------------

KOBO (PETIT BARLO)	17.80 -	12°08'06" N - 18°26'59" E
--------------------	---------	---------------------------

ABOU-GOULEM

ORSTOM

1958-1959

Infiltration.

GRAND BASSIN	50.20 km ²	12°37'04" N - 21°39'00" E
--------------	-----------------------	---------------------------

PETIT BASSIN	12.30 -	12°36'41" N - 21°42'36" E
--------------	---------	---------------------------

TOROU

ORSTOM

1961

Climatologie.

TOROU	50.00 km ²	14°20'26" N - 21°14'13" E
-------	-----------------------	---------------------------

KOURO

ORSTOM

1961

Climatologie.

KOURO	16.00 km ²	14°21'55" N - 21°04'54" E
-------	-----------------------	---------------------------

TARAIMAN

ORSTOM

1961

Climatologie.

TARAIMAN	11.25 km ²	14°34'21" N - 20°49'47" E
----------	-----------------------	---------------------------

MAYO LIGAN

ORSTOM

1961-1965, 1964-1965

Climatologie.

MAYO LIGAN	41.00 km ²	09°51'15" N - 14°44'29" E
------------	-----------------------	---------------------------

BADE

ORSTOM

1963-1964

Climatologie.

BAH (BADE)	316.00 km ²	08°33'03" N - 15°52'31" E
BADE 1	5.36 -	08°30'36" N - 15°44'58" E
BADE 2	21.90 -	08°31'54" N - 15°45'44" E
BADE 3	72.00 -	08°32'43" N - 15°46'07" E

BAM-BAM

ORSTOM

1963-1966, 1972

Climatologie, érosion, infiltration.

TIALOZOUDOU	1200.00 km ²	12°09'43" N - 18°34'17" E
TAYA	167.00 -	11°56'41" N - 18°30'07" E
BIDJIR	74.20 -	11°55'07" N - 18°27'12" E
TOUNKOUL	61.30 -	11°54'40" N - 18°36'42" E
BARLO 5	528.00 -	12°02'53" N - 18°29'55" E
MAZERA	316.00 -	12°03'00" N - 18°33'05" E

MATAON

ORSTOM

1964

MATAON	16.80 km ²	08°12'30" N - 15°36'54" E
--------	-----------------------	---------------------------

AM-NABAK

ORSTOM

1965

Erosion.

BASSIN AVAL	60.00 km ²	14°44'08" N - 20°58'00" E
AM-NABAK	5600.00 -	14°40'20" N - 21°01'40" E

KADJEMEUR

ORSTOM

1965-1966

BASSIN 1	245.00 km ²	15°23'22" N - 20°49'53" E
BASSIN 2	195.00 -	15°23'23" N - 20°53'35" E
BASSIN 3	34.00 -	15°22'40" N - 20°55'21" E
BASSIN 4	16.00 -	15°23'00" N - 20°50'00" E

SOFOYA

ORSTOM

1965-1967

Climatologie, érosion, eau souterraine.

BASSIN 1	345.00 km ²	16°03'38" N - 20°54'34" E
BASSIN 2	173.00 -	16°02'37" N - 21°02'28" E
BASSIN 3	62.00 -	16°00'33" N - 21°02'42" E
BASSIN 4	81.00 -	16°02'10" N - 20°59'26" E
BASSIN 5	1.63 -	16°03'45" N - 20°55'17" E

MAYO DORBO

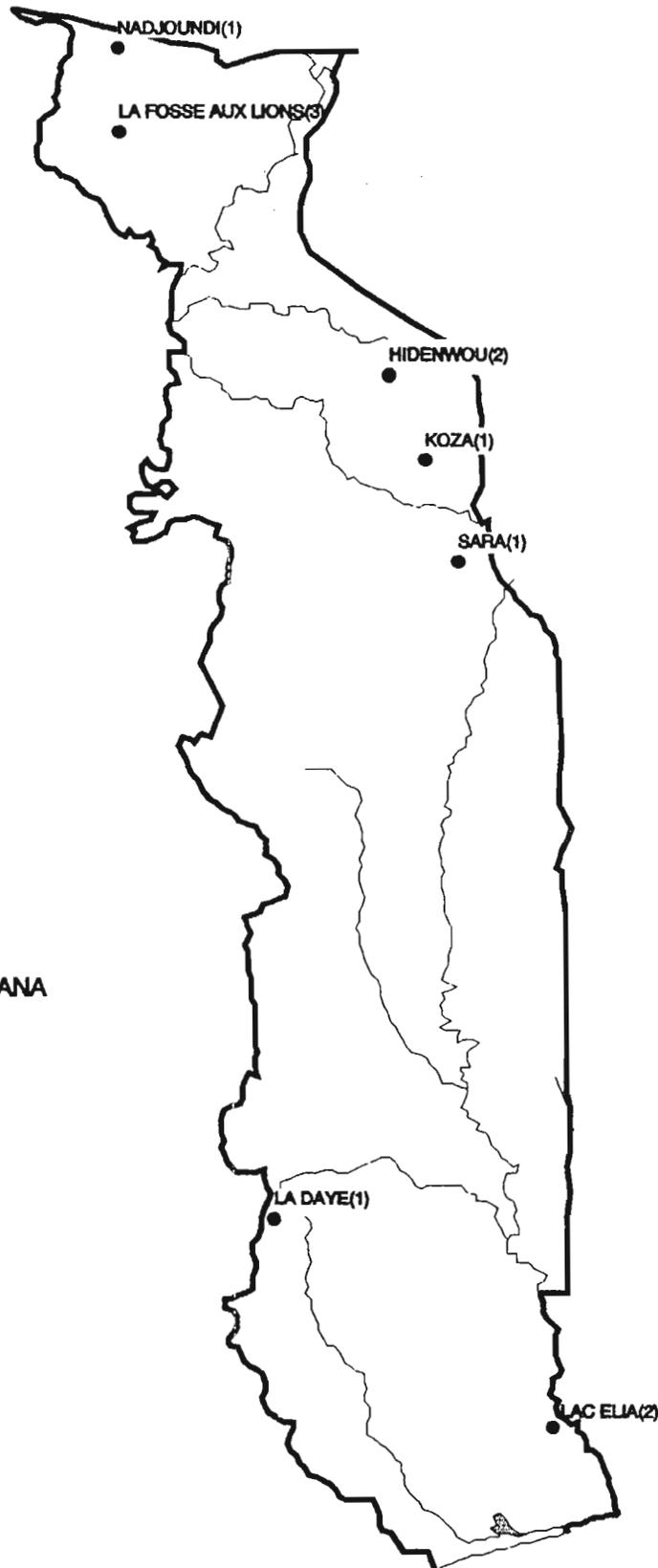
ORSTOM

1967

MAYO DORBO	1180.00 km ²	09°40' N - 15°E
TOROK	250.00 -	09°40' N - 15°E
ZAMA GOUIN	88.00 -	09°30' N - 15°E

PRINCIPAUX B.V.R.E. DU TOGO

BURKINA-FASO



Légende :

(2) : nombre de bassins étudiés



Togo

SARA

ORSTOM

1957-1958

Climatologie.

BAFILO	30.00 km ²	09°21'25" N - 01°17'20" E
--------	-----------------------	---------------------------

LA FOSSE AUX LIONS

ORSTOM

1959-1961

Climatologie.

KOULOUGOUNA	189.00 km ²	10°44'31" N - 00°11'22" E
NAPABOUR	61.40 -	10°46'28" N - 00°12'05" E
KOUMFAB	96.20 -	10°46'24" N - 00°10'00" E

NADJOUNDI

ORSTOM, EDF

1962-1963, 1985-1986

Climatologie, infiltration.

NADJOUNDI	21.20 km ²	11°00'41" N - 00°11'08" E
-----------	-----------------------	---------------------------

HIDENWOU

ORSTOM, EDF

1962-1964, 1985-1986

Climatologie, érosion, infiltration.

KANDE	25.00 km ²	09°57'30" N - 01°04'07" E
KANDE (PETIT BAS.)	1.44 -	09°55'47" N - 01°03'33" E

LAC ELIA

ORSTOM, EDF

1962-1964, 1984

Climatologie, infiltration.

STATION 1	5.30 km ²	06°33'50" N - 01°35'11" E
STATION 2	5.62 -	06°33'40" N - 01°35'22" E

LA DAYE

ORSTOM

1963-1979, 1985

Climatologie, infiltration.

DZOBEGAN	52.00 km ²	07°14'27" N - 00°40'46" E
----------	-----------------------	---------------------------

KOZA

ORSTOM

1971-1973, 1974-1975

Climatologie.

KPADAYO	19.20 km ²	09°41' N - 01°11' E
---------	-----------------------	---------------------

	2.2.2.3.2.2. Choix du dispositif	57
	2.2.2.3.2.3. Réalisation pratique et calcul du débit	64
	2.2.2.3.3. Dispositifs de mesure permanente de la vitesse du courant.....	78
	2.2.2.3.3.1. Stations à ultra-sons.....	78
	2.2.2.3.3.2. Stations électromagnétiques.....	78
	2.2.2.4. Installation du dispositif de mesures et d'observations.....	78
	2.2.3. Parcelles de ruissellement.....	84
	2.2.4. Retenues d'eau naturelles ou artificielles.....	86
2.3.	Observations climatologiques.....	91
	2.3.1. Principes d'installation.....	91
	2.3.2. Abri météorologique.....	93
	2.3.3. Mesures de la température de l'air.....	93
	2.3.3.1. Thermomètres	93
	2.3.3.2. Thermographe	95
	2.3.3.3. Thermomètre-enregistreur à distance.....	95
	2.3.4. Mesure de l'humidité de l'air.....	95
	2.3.4.1. Psychromètre à ventilation naturelle	96
	2.3.4.2. Psychromètre à ventilation forcée.....	96
	2.3.4.3. Hygromètre enregistreur ou hygrographe.....	96
	2.3.4.4. Atomètres.....	97
	2.3.5. Batterie de pluviomètres et pluviographes.....	97
	2.3.6. Bacs évaporatoires.....	97
	2.3.6.1. Bac "Colorado".....	98
	2.3.6.2. Bac "de classe A"	100
	2.3.6.3. Bacs évaporatoires enregistreurs	100
	2.3.6.4. Installation et maintenance.....	100
	2.3.6.5. Mesures connexes	101
	2.3.6.5.1. Température de l'eau	101
	2.3.6.5.2. Vent.....	101
	2.3.6.6. Bac d'évaporation flottant.....	103
	2.3.7. Durée d'insolation.....	103
	2.3.8. Rayonnement.....	105
	2.3.8.1. Rayonnement global.....	105
	2.3.8.2. Rayonnement atmosphérique.....	105
	2.3.8.3. Rayonnement net.....	106
	2.3.9. Evapotranspiration potentielle.....	106
	2.3.9.1. Formule de Penman.....	106
	2.3.9.2. Bac d'évaporation	108
	2.3.10. Autres mesures	108
	2.3.10.1. Température du sol.....	108
	2.3.10.2. Pression atmosphérique.....	108
	2.3.11. Stations climatologiques automatiques	108
2.4.	Erosion mécanique	110
	2.4.1. Les différents phénomènes.....	110
	2.4.1.1. Erosion aréolaire.....	110
	2.4.1.2. Erosion en rigoles et en griffes	110
	2.4.1.3. Erosion en ravines.....	110
	2.4.1.4. Erosion linéaire au fond des cours d'eau et sur les berges.....	110
	2.4.1.5. Autres formes d'érosion hydrique.....	111
	2.4.2. Méthodes de mesure	111
	2.4.2.1. Effet du splash.....	113
	2.4.2.2. Ablation subie par les sols.....	113
	2.4.2.2.1. Parcelles et micro-bassins versants.....	113
	2.4.2.2.1.1. Parcelles type "Wischmeier"	115
	2.4.2.2.1.2. Parcelles moyennes et grandes, micro-bassins.....	121
	2.4.2.2.1.3. Mesure de l'érosion sous pluie simulée	123
	2.4.2.2.2. Méthode des repères.....	125
	2.4.2.3. Erosion en masse.....	125
	2.4.2.4. Transports solides dans les cours d'eau.....	127
	2.4.2.4.1. Mesures en station.....	127
	2.4.2.4.1.1. Transports en suspension	127
	2.4.2.4.1.2. Transports de fond.....	135
	2.4.2.4.2. Mesures globales dans les retenues.....	136

	2.4.2.4.2.1. Techniques de mesure	136
	2.4.2.4.2.2. Evaluation du transport solide	139
2.5.	Infiltration.....	141
	2.5.1. Infiltromètres avec simulation de pluie.....	141
	2.5.1.1. Appareillage.....	141
	2.5.1.2. Précautions d'installation.....	144
	2.5.1.3. Processus observés.....	144
	2.5.1.4. Protocole de mesures	147
	2.5.2. Infiltromètres à anneaux.....	149
	2.5.3. Infiltromètre "Porchet".....	149
2.6.	L'eau dans la zone non saturée.....	152
	2.6.1. Quelques définitions.....	152
	2.6.2. Choix des sites de mesure.....	154
	2.6.3. Mesure de l'humidité du sol.....	154
	2.6.3.1. Méthode gravimétrique.....	155
	2.6.3.2. Méthode neutronique.....	157
	2.6.3.3. Méthode tensiométrique.....	159
	2.6.3.4. Méthode par chocs thermiques	160
2.7.	Eaux souterraines.....	162
	2.7.1. Quelques définitions.....	162
	2.7.2. Contraintes des études hydrogéologiques sur BVRE.....	165
	2.7.3. Inventaire hydrogéologique préalable.....	165
	2.7.4. Dispositif de mesures et d'observations	167
	2.7.5. Mesures et observations.....	168
	2.7.5.1. Appareils de mesures instantanées.....	170
	2.7.5.2. Enregistreurs automatiques.....	171
	2.7.6. Détermination des caractéristiques des aquifères.....	171
	2.7.6.1. Essais de pompage	171
	2.7.6.2. Observations piézométriques	176
	2.7.6.3. Tarpissement des cours d'eau.....	180
2.8.	Qualité des eaux.....	185
	2.8.1. Hydrochimie.....	185
	2.8.1.1. Quelques définitions	185
	2.8.1.2. Prélèvement des échantillons et fréquence des mesures.....	186
	2.8.1.3. Mesures et analyses.....	188
	2.8.1.4. Présentation des résultats.....	190
	2.8.2. Hydrochimie isotopique	192
	2.8.2.1. Quelques définitions	192
	2.8.2.2. Techniques utilisées.....	194
	2.8.2.2.1. Marquage des précipitations	194
	2.8.2.2.2. Marquage de l'évaporation.....	194
	2.8.2.2.3. Conditions d'application.....	194
	2.8.2.2.4. Autres méthodes.....	195
2.9.	Relevés complémentaires.....	196
	2.9.1. Documents topographiques.....	196
	2.9.2. Calcul des paramètres morphométriques	197
	2.9.3. Documents pédologiques.....	203
	2.9.4. Documents phytographiques	204
	2.9.5. Cartes géologiques et hydrogéologiques.....	207
	2.9.6. Techniques nouvelles.....	207

PARTIE III : TRAITEMENT DES DONNEES

ET PUBLICATION DES RESULTATS..... 211

3.1.	Archivage et traitement des données.....	213
	3.1.1. Archivage des données sur le terrain.....	213
	3.1.2. Contrôle et traitement des données sur le terrain.....	214
	3.1.3. Traitements de base des données au bureau.....	215
	3.1.4. Exploitation des données.....	224
	3.1.5. Modélisation.....	230
	3.1.5.1. Généralités.....	230
	3.1.5.2. Mise en oeuvre des modèles	232
	3.1.5.3. Modèles de transformation pluies-débits.....	237

3.1.5.3.1. Fonction de production	237
3.1.5.3.2. Fonction de transfert.....	239
3.1.5.3.3. Remarques.....	240
3.2. Rapports et publications.....	241
3.2.1. Procès verbal d'installation	241
3.2.2. Préparation des rapports de campagnes	247
3.2.3. Organisation et contenu de la publication de synthèse	257
PARTIE IV : ORGANISATION LOGISTIQUE ET ÉVALUATION DES COÛTS	267
4.1. Organisation logistique et humaine des observations et mesures	269
4.1.1. Organisation générale	269
4.1.2. Opérations de routine.....	271
4.1.3. Opérations épisodiques et prioritaires	274
4.1.3.1. Evénements averse-crue	275
4.1.3.2. Etiages exceptionnels.....	276
4.1.4. Coordination des opérations.....	276
4.2. Evaluation des coûts.....	277
4.2.1. Eléments à prendre en compte	277
4.2.1.1. Phase préparatoire	277
4.2.1.1.1. Travail documentaire	277
4.2.1.1.2. Prospection de terrain	277
4.2.1.2. Phase d'installation.....	277
4.2.1.3. Phase d'exploitation.....	279
4.2.1.3.1. Exploitation de saison des pluies	279
4.2.1.3.2. Exploitation de saison sèche	280
4.2.1.3.3. Travaux de bureau	280
4.2.1.4. Relevés complémentaires.....	280
4.2.1.4.1. Relevés pédologiques.....	281
4.2.1.4.2. Relevés géologiques.....	281
4.2.1.4.3. Levés topographiques	281
4.2.1.5. Mesures et observations optionnelles.....	281
4.2.1.5.1. Eaux souterraines.....	282
4.2.1.5.2. Transports solides.....	282
4.2.1.5.3. Hydrochimie.....	283
4.2.1.5.4. Humidité du sol.....	284
4.2.1.5.5. Mini-simulateur de pluie.....	284
4.2.1.5.6. Laboratoire.....	285
4.2.2. Estimation d'un budget-type.....	285
PARTIE V : PRESENTATION DE CAS-TYPES.....	287
5.1. Bassins naturels.....	289
5.1.1. Bassins de Sanguéré - Cameroun.....	290
5.1.1.1. Thème de l'étude	290
5.1.1.2. Contexte physico-climatique	290
5.1.1.3. Caractères physiques et morphologiques	293
5.1.1.4. Equipements de mesures et d'observations	293
5.1.1.4.1. Equipement pluviométrique	293
5.1.1.4.2. Equipement hydrométrique.....	297
5.1.1.4.3. Equipement piézométrique	297
5.1.1.4.4. Equipement climatologique.....	297
5.1.1.4.5. Humidité des sols	297
5.1.1.5. Observations hydrologiques.....	299
5.1.1.5.1. Données de base	299
5.1.1.5.2. Analyse du ruissellement.....	299
5.1.1.5.3. Etude de la nappe.....	303
5.1.1.5.3.1. Observations piézométriques.....	303
5.1.1.5.3.2. Tarissement.....	303
5.1.1.5.4. Régime hydrique des sols	309
5.1.1.5.5. Bilan hydrologique.....	309
5.1.1.6. Bilan de l'étude	312

5.1.2.	Bassin de Booro-Borotou - Côte d'Ivoire	314
5.1.2.1.	Thème de l'étude	314
5.1.2.2.	Contexte physico-climatique	314
5.1.2.3.	Caractères physiques et morphologiques	314
5.1.2.4.	Equipements de mesures et d'observations	314
5.1.2.4.1.	Equipement pluviométrique	318
5.1.2.4.2.	Equipement hydrométrique.....	318
5.1.2.4.3.	Réseau piézométrique	318
5.1.2.4.4.	Zone non saturée	318
5.1.2.4.5.	Observations climatologiques.....	319
5.1.2.5.	Expérimentations.....	319
5.1.2.5.1.	Simulation de pluies	319
5.1.2.5.2.	Profils hydriques.....	323
5.1.2.5.3.	Traçage des écoulements.....	323
5.1.2.6.	Observations hydrologiques.....	323
5.1.2.6.1.	Bilan hydrologique	323
5.1.2.6.2.	Les crues.....	323
5.1.2.6.3.	Tarissement.....	326
5.1.2.6.4.	Modélisation.....	329
5.1.3.	Bassins de Mouda - Cameroun.....	330
5.1.3.1.	Thème de l'étude	330
5.1.3.2.	Contexte physico-climatique	330
5.1.3.3.	Dispositif expérimental.....	330
5.1.3.3.1.	Caractéristiques physiques	330
5.1.3.3.2.	Equipement hydropluviométrique	333
5.1.3.3.3.	Méthodes de mesures	333
5.1.3.4.	Résultats obtenus.....	337
5.1.3.4.1.	Hydropluviométrie	337
5.1.3.4.2.	Erosion.....	340
5.1.4.	Mare d'Oursi - Burkina-faso	342
5.1.4.1.	Thème de l'étude	342
5.1.4.2.	Contexte physico-climatique	342
5.1.4.3.	Caractéristiques physiques des bassins	342
5.1.4.4.	Equipements de mesures et d'observations	342
5.1.4.4.1.	Equipement pluviométrique	342
5.1.4.4.2.	Equipement hydrométrique.....	346
5.1.4.4.3.	Equipement climatologique.....	346
5.1.4.5.	Observations hydrologiques de base	346
5.1.4.5.1.	Précipitations moyennes	346
5.1.4.5.2.	Écoulements moyens.....	348
5.1.4.5.3.	Bilan hydrologique de la Mare d'Oursi	348
5.1.4.6.	Analyse du ruissellement.....	348
5.1.4.7.	Modélisation.....	350
5.1.5.	Bassins de Sakassou - Côte d'Ivoire	355
5.1.5.1.	Thème de l'étude	355
5.1.5.2.	Contexte physico-climatique	355
5.1.5.3.	Caractéristiques physiques des bassins	355
5.1.5.4.	Equipements de mesures et d'observation	355
5.1.5.4.1.	Equipement pluviométrique	355
5.1.5.4.2.	Equipement hydrométrique.....	355
5.1.5.4.3.	Equipement climatologique.....	357
5.1.5.5.	Observations hydrologiques de base	357
5.1.5.5.1.	Observations pluviométriques	357
5.1.5.5.2.	Observations hydrométriques.....	361
5.1.5.6.	Analyse du ruissellement.....	361
5.1.5.7.	Écoulement de base	365
5.2.	Bassins aménagés.....	370
5.2.1.	Bassins de la Vallée de Djiguinoum - Sénégal	370
5.2.1.1.	Thème de l'étude	370
5.2.1.2.	Contexte physico-climatique	370
5.2.1.3.	Dispositifs de mesures et d'observations, protocole expérimental	371
5.2.1.3.1.	Barrage	371
5.2.1.3.2.	Stations hydrométriques.....	371

5.2.1.3.3. Réseau pluviométrique.....	375
5.2.1.3.4. Réseau piézométrique	375
5.2.1.3.5. Ruissellement sur parcelle de 50 m ²	375
5.2.1.3.6. Autres mesures.....	375
5.2.2. Bassins de Bidi - Burkina-Faso	379
5.2.2.1. Problématique	379
5.2.2.2. Contexte physico-climatique	379
5.2.2.3. Dispositif de mesures et d'observations pluvio-hydrométriques.....	379
5.2.2.4. Réseau piézométrique.....	381
5.2.2.5. Bilans de la retenue de Gourga	381
ANNEXES	389
Annexe 1 : Carte d'implantation des différents bassins représentatifs et expérimentaux en Afrique de l'Ouest et du Centre francophone.....	391
Annexe 2 : Synthèse des différents dispositifs de mesures et d'observation utilisés sur 127 BVRE ruraux africains.....	393
Annexe 3 : Fiches types.....	397
Annexe 4 : Bibliographie thématique	411
Annexe 5 : Bibliographie - répartition par pays	447
Annexe 6 : Inventaire par pays.....	495