

UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC



INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DEVELOPPEMENT

Mémoire de DEA

DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental

**PRISE EN COMPTE DES SPECIFICITES
DE L'EVAPOTRANSPIRATION
EN ZONE SEMI-ARIDE
DANS LA MODELISATION GLOBALE
DE LA RELATION PLUIE-DEBIT**

par **Sandra ARDOIN**

Soutenu le 11 juillet 2000 à Montpellier devant :

E. SERVAT (IRD) - Maître de stage
M. DESBORDES (UMII)
R. MOUSSA (INRA)
C. SALLES (UMII)

à mon grand-père,

AVANT-PROPOS

Au terme de ces quatre mois passés au sein de l'équipe Vahyne de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), je tiens à remercier vivement tous ceux et toutes celles qui m'ont assistée ou soutenue, parfois les deux, au cours de ce stage de DEA.

En premier lieu, mes remerciements s'adressent à Eric Servat. Je lui suis infiniment reconnaissante de m'avoir proposé cette étude et de m'avoir accueillie dans son équipe. Ses remarques et sa rigueur scientifique ont permis d'améliorer considérablement la qualité de ce mémoire.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à Alain Dezetter. Sa disponibilité fut d'un secours appréciable dans les moments les plus difficiles. Ses multiples conseils furent précieux pour corriger et adapter ma démarche tout au long de ce stage. Sans son aide, mon premier contact avec la modélisation aurait été certainement plus laborieux.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les autres membres de l'équipe Vahyne, pour leur accueil, leur aide et leurs conseils : Claudine Dieulin, Nathalie Rouché, Muriel Tapiou, Bertrand Marieu, et particulièrement Michel Travaglio, pour la synthèse des fichiers de données, et Jean-François Boyer, pour ces multiples dépannages informatiques. Je tiens à remercier Nadine Muther pour l'encadrement administratif et son enthousiasme.

Je tiens à remercier également Serge Rambal du Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE) de m'avoir reçue et permis de bénéficier de son expérience pour orienter mes recherches.

Mes remerciements s'adressent également à M. Desbordes, R. Moussa et C. Salles, pour avoir accepté de juger ce travail.

Mes dernières pensées s'adressent à mes compagnons de bureau, Fabienne, Erwan et Telesphore, pour leur amitié et leur bonne humeur permanente.

Et merci à Guillaume.

RESUME

En Afrique de l'Ouest, les données climatologiques sont souvent difficiles à collecter. Les stations météorologiques synoptiques sont peu nombreuses et leur implantation pas toujours représentative des zones étudiées. La prise en considération de l'évapotranspiration est importante dans le cadre de la gestion des ressources en eau, puisque l'évapotranspiration potentielle est un terme majeur du bilan hydrique et un élément constant du climat en zone tropicale semi-aride. L'utilisation de modèles hydrologiques permet de mettre en évidence les particularités de cet élément essentiel. Pour cela, le développement de modèles conceptuels de la relation pluie-débit, axés sur la partie production et développés à partir du modèle GR3J du CEMAGREF, est réalisé ici. Diverses fonctions de production, élaborées à partir des éléments du climat, mais aussi des notions de développement de la végétation et de réserves d'eau disponibles dans le sol, sont sélectionnées. Leur particularité repose sur le fait que l'évapotranspiration potentielle n'intervient pas dans leur formulation. Les modèles sont calés sur treize bassins versants de 120 à 4700 km², répartis en zone de savane soudanaise en nord Côte d'Ivoire. Ces fonctions de production, une fois testées, permettent d'envisager l'utilisation de modèles hydrologiques pour des bassins versants où les données d'évapotranspiration potentielle ne seraient pas disponibles.

MOTS CLES

HYDROLOGIE – EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE – EVAPOTRANSPIRATION REELLE - MODELISATION CONCEPTUELLE – PLUIE-DEBIT – ZONE TROPICALE SEMI-ARIDE – COTE D'IVOIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
1. PREMIERE PARTIE : Description du milieu physique de la Côte d'Ivoire	6
2. DEUXIEME PARTIE : Présentation des bassins versants	18
3. TROISIEME PARTIE : La modélisation conceptuelle de la relation pluie-débit	34
4. QUATRIEME PARTIE : Exploitations des résultats	66
CONCLUSION GENERALE	95
BIBLIOGRAPHIE	98
LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX	104
ANNEXES	106

INTRODUCTION

INTRODUCTION

En hydrologie, de nombreux travaux s'organisent autour du développement de la modélisation de la relation pluie-débit. Cet outil est essentiel puisqu'il permet de travailler sur des points aussi différents que la prédétermination et la prévision des inondations et des sécheresses, le calcul des ouvrages de type barrage ou usine hydroélectrique, la gestion des réserves, etc.

Le travail que nous présentons s'inscrit dans le cadre du programme VAHYNE, Analyse de la Variabilité Hydrologique et Impacts sur les Ressources en Eau, développé en milieu tropical semi-aride par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). La modélisation pluie-débit choisie est développée à partir des modèles conceptuels existants tels que les modèles GR du CEMAGREF. Cette modélisation a pour objectif de permettre d'évaluer l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau. C'est pourquoi les modèles choisis doivent être adaptés à la zone climatique étudiée.

Nos travaux portent donc sur des bassins versants de quelques centaines à quelques milliers de km², échelle de la planification et de la gestion desdites ressources, en zone de savane soudanaise du nord Côte d'Ivoire. Une fois le modèle adapté à la zone climatique à laquelle on s'intéresse et représentatif de cette zone, il s'agit de regarder son comportement face à l'insertion de différentes fonctions de production faisant intervenir des variables hydroclimatiques, telles que les précipitations, l'évapotranspiration potentielle, etc.

La variable, qui nous intéresse ici, est la fonction évapotranspiration. Le développement des sciences et techniques a permis d'améliorer sans cesse les connaissances sur les termes du bilan hydrique, dont l'évapotranspiration potentielle est un élément prépondérant. Cette évapotranspiration potentielle est une notion complexe, puisqu'elle fait intervenir le climat, le sol et la végétation. Ses variations dans le temps sont fonction des facteurs climatiques externes comme la température de l'air, la vitesse du vent ou encore la durée d'insolation. Elle représente donc un terme important dans les aspects de gestion agricole de l'eau.

En Afrique de l'Ouest, l'évapotranspiration potentielle est un élément essentiel du climat. Les travaux à entreprendre, durant cette étude, nécessitent l'emploi de la modélisation. Les modèles de relation pluie-débit constituent un outil d'évaluation des ressources en eau bien adaptés à l'échelle régionale. Ils permettent de procéder à des tests de la fonction de production, puisque c'est à ce niveau qu'intervient la fonction évapotranspiration potentielle (ETP). Cependant, l'ETP est une donnée très difficile à obtenir dans la zone étudiée. La plupart des stations météorologiques ne sont pas des stations synoptiques. L'acquisition de l'évapotranspiration potentielle peut, alors, devenir un handicap pour le déroulement des études entreprises. Notre travail s'axe donc sur la recherche de fonctions de production, identifiables dans la région tropicale semi-aride, qui permettraient de s'affranchir de l'évapotranspiration potentielle.

PREMIERE PARTIE

1. PREMIERE PARTIE

DESCRIPTION DU MILIEU PHYSIQUE DE LA COTE D'IVOIRE

La République de Côte d'Ivoire est située en Afrique de l'Ouest. Elle est entourée à l'Est par le Ghana, au Nord par le Mali et le Burkina Faso et à l'Ouest par la Guinée et le Libéria. Toute la frontière Sud est constituée par le Golfe de Guinée. La Côte d'Ivoire occupe une superficie de 322460 km², et est située approximativement entre 4°30 et 10°30 de latitude Nord, et 2°30 et 8°30 de longitude Ouest.

1.1 GEOMORPHOLOGIE

La Côte d'Ivoire appartient au vieux socle africain et présente un relief monotone, c'est pourquoi il est difficile de le définir à partir de critères topographiques. Son relief résulte essentiellement de l'érosion de chaînes de montagne évoluant en plate-forme (pénéplaine). Les altitudes diminuent graduellement depuis 500 m d'altitude au nord à moins de 50 m au sud. Cette planité d'ensemble est associée à l'allure générale du socle qui s'incline du Nord en direction de l'Atlantique avec une pente régulière. Le paysage passe d'une région de plateaux développés en glacis au Nord à celui d'une plaine par l'intermédiaire d'une zone de transition plus ou moins développée.

Malgré cette uniformité d'ensemble, il est possible d'organiser le relief en cinq grands domaines (Avenard et al, 1971) :

- la retombée de la dorsale guinéenne
- les plateaux du Nord
- la zone de transition : glacis méridionaux et "Marche" centrale
- les bas-pays intérieurs
- la frange littorale

Ces différentes unités sont représentées sur la figure 1.1.1.



Figure 1.1.1. Carte du relief de la Côte d'Ivoire (Arnaud in Vennetier et al, 1983)

1.2 LE CLIMAT

La position géographique de la Côte d'Ivoire induit des climats chauds intermédiaires entre équatoriaux humides et tropicaux secs. Les variations de température ne permettent pas de souligner les différences saisonnières régionales, contrairement aux variations de précipitations, du fait de leur importance (Berron in Venetier et al, 1983). Les masses d'air continentales ou marines, qui suivent les mouvements du soleil du Nord au Sud, déterminent le cycle des saisons.

1.2.1 Les masses d'air

La Côte d'Ivoire subit l'influence alternative de deux masses d'air différentes :

- l'harmattan, alizé boréal provenant du Nord-Est, apporte un air continental chaud, sec et chargé de poussières de décembre à février. Les vents doux excèdent rarement 15 à 20 km/h.

- La mousson, alizé austral provenant du Sud-Ouest, pousse les masses d'air vers le nord à travers le pays. Devant ces masses d'air, une ceinture de basses pressions ou front intertropical amène un air chaud et humide provenant de l'Océan Atlantique, de juillet à septembre. Ses effets se ressentent jusque dans le Nord du pays.

La zone de confluence de ces deux masses d'air est appelée Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) et se traduit par un phénomène de convergence engendrant une ascendance de l'air avec formation de nuages. Ces masses d'air et la ZCIT se déplacent sous l'effet des gradients de pression. Les positions de l'anticyclone de Sainte-Hélène et de la dépression thermique saharienne, en liaison avec les mouvements apparents du soleil, jouent le rôle de moteur principal de ces oscillations Nord-Sud.

La différenciation entre les deux zones climatiques n'est possible qu'à partir de leur teneur en humidité. En effet, les températures moyennes sont très uniformes d'une région à l'autre et les températures mensuelles varient peu d'une saison à l'autre.

Il n'y a pas de mélange possible entre les deux masses d'air : la mousson pénètre sous l'harmattan selon un plan oblique, la ZCIT. La mousson étant humide et instable, la convergence provoque, par détente, des formations nuageuses à développement vertical qui se traduisent par des pluies abondantes, des orages, des grains ou des coups de vent selon l'intensité de la convergence.

1.2.2 Les saisons

Le déplacement de la ZCIT sur une région déterminée provoque la succession des saisons, illustrée figure 1.2.1.

En janvier, la ZCIT est aux alentours de 5° ou 6° de latitude Nord. Toute la Côte d'Ivoire est sous le régime d'harmattan : c'est la saison sèche. La dépression thermique saharienne remonte alors en latitude, après avoir reçu un fort rayonnement solaire. Elle crée un appel de mousson qui repousse la ZCIT vers le nord. Mi-avril, la ZCIT se positionne vers 11°N. La Basse Côte d'Ivoire est sous une zone de forte convergence avec orages, grains et coups de vent, tandis que la Haute Côte d'Ivoire est toujours en saison sèche. De la mi-mai à la mi-juillet, la Basse Côte d'Ivoire subit le passage d'une zone de convergence modérée avec

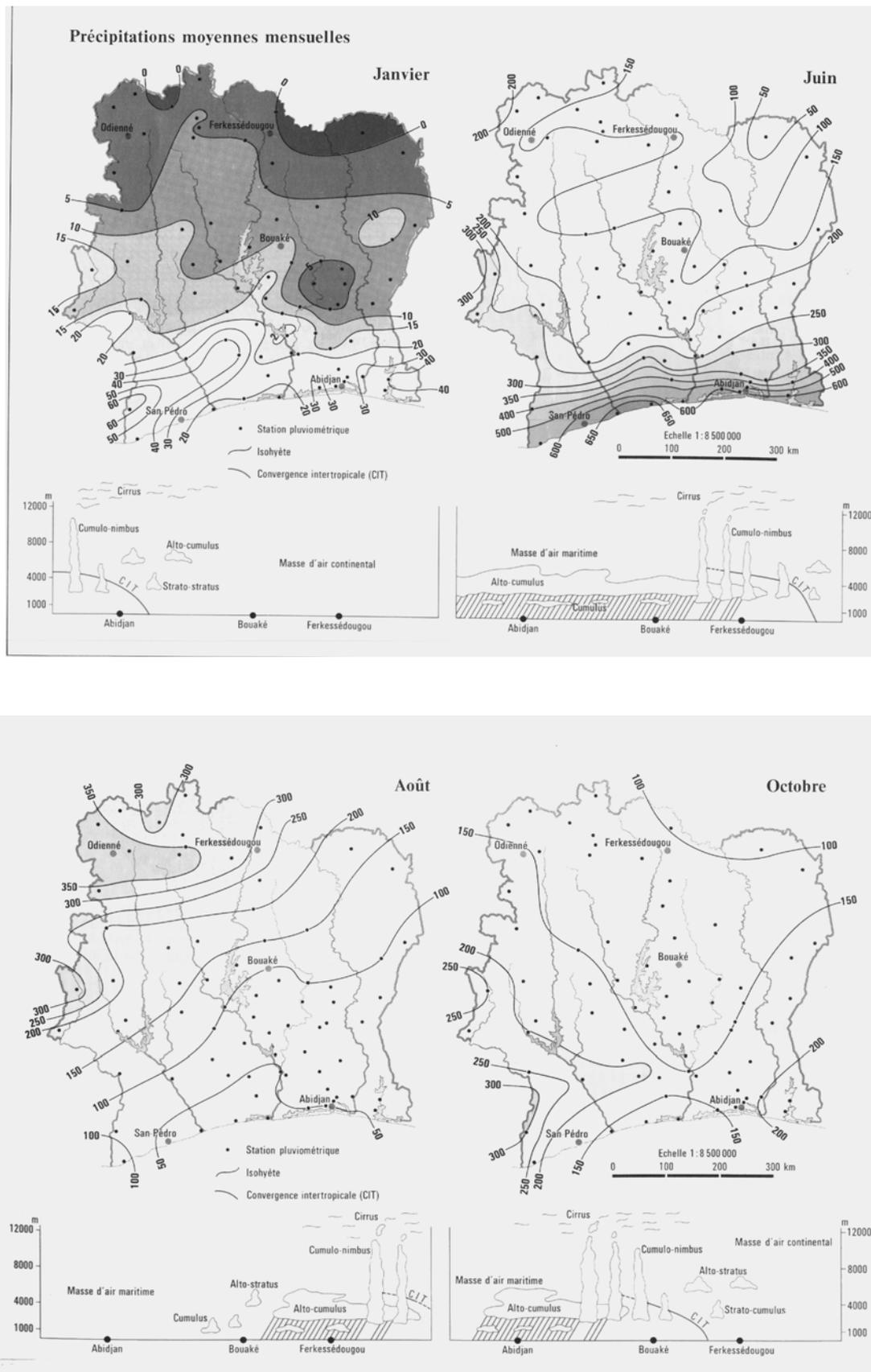


Figure 1.2.1. Cartes des variations saisonnières en Côte d'Ivoire
(Berron in Vennetier et al, 1983)

des pluies quasi-continuelles. C'est la grande saison des pluies. Au 15 août, la ZCIT atteint sa position la plus septentrionale au voisinage de 19°/22°N. Entre le 15 août et le 15 septembre, la Haute Côte d'Ivoire entre dans la saison des pluies et connaît des précipitations très abondantes. En revanche, la Basse Côte d'Ivoire est dans une zone de convergence nulle voire de divergence avec quelques pluies rares et peu abondantes. De la mi-août à la mi-janvier, la ZCIT redescend en latitude, entraînant la succession des saisons définies précédemment en sens contraire et en un point donné (Eldin in Avenard et al, 1971).

Il y a donc passage d'un régime à deux saisons sèches et à deux saisons des pluies dans le sud du pays, où les conditions équatoriales climatiques dominent, à un régime à une seule saison sèche et à une seule saison des pluies dans le nord du pays, où les conditions climatiques tropicales dominent.

1.2.3 La pluviométrie

Les régimes pluviométriques se caractérisent par les hauteurs des précipitations moyennes annuelles et mensuelles (figure 1.2.2).

La pluviométrie de la Côte d'Ivoire est comprise, en année moyenne, entre 900 et 2000 mm. Les précipitations augmentent du Nord au Sud, puis vers les reliefs à l'ouest du pays. Les précipitations les plus importantes surviennent tout le long de la frange littorale (régime équatorial) et sur le massif de Man (régime montagnard).

Pour le régime à deux saisons (partie septentrionale de la Côte d'Ivoire), la répartition des précipitations se fait comme suivant :

- la majorité des précipitations a lieu de juillet à septembre avec un maximum centré sur août, marquant l'unique saison des pluies, typique du climat soudanais,
- il y a une absence totale de pluie de novembre à mars/avril,
- quelques pluies espacées et de faibles importances surviennent d'avril à juin.

Pour le régime à quatre saisons (partie méridionale de la Côte d'Ivoire), la répartition des précipitations se fait comme suivant :

- la grande saison des pluies où tombent la majorité des précipitations a lieu d'avril à mi-juillet, avec un maximum centré sur juin,
- la petite saison des pluies a lieu de mi-septembre à novembre et est marquée par des orages et des grains,
- il y a une absence totale de précipitations de mi-juillet à mi-septembre (petite saison sèche) et de décembre à mars (grande saison sèche).

1.2.4 Les températures et l'humidité relative de l'air

Les températures observées sur l'ensemble du pays sont, d'une manière générale, assez peu variables. Les températures moyennes annuelles sont très uniformes et varient entre 24°C et 27.5°C (figure 1.2.2); les températures moyennes mensuelles varient peu d'une saison à l'autre. Les amplitudes thermiques diurnes maximales ont lieu en janvier. Elles sont plus importantes dans le nord du pays où elles atteignent parfois 20°C en saison sèche, car l'air sec de l'harmattan permet un rafraîchissement nocturne important.

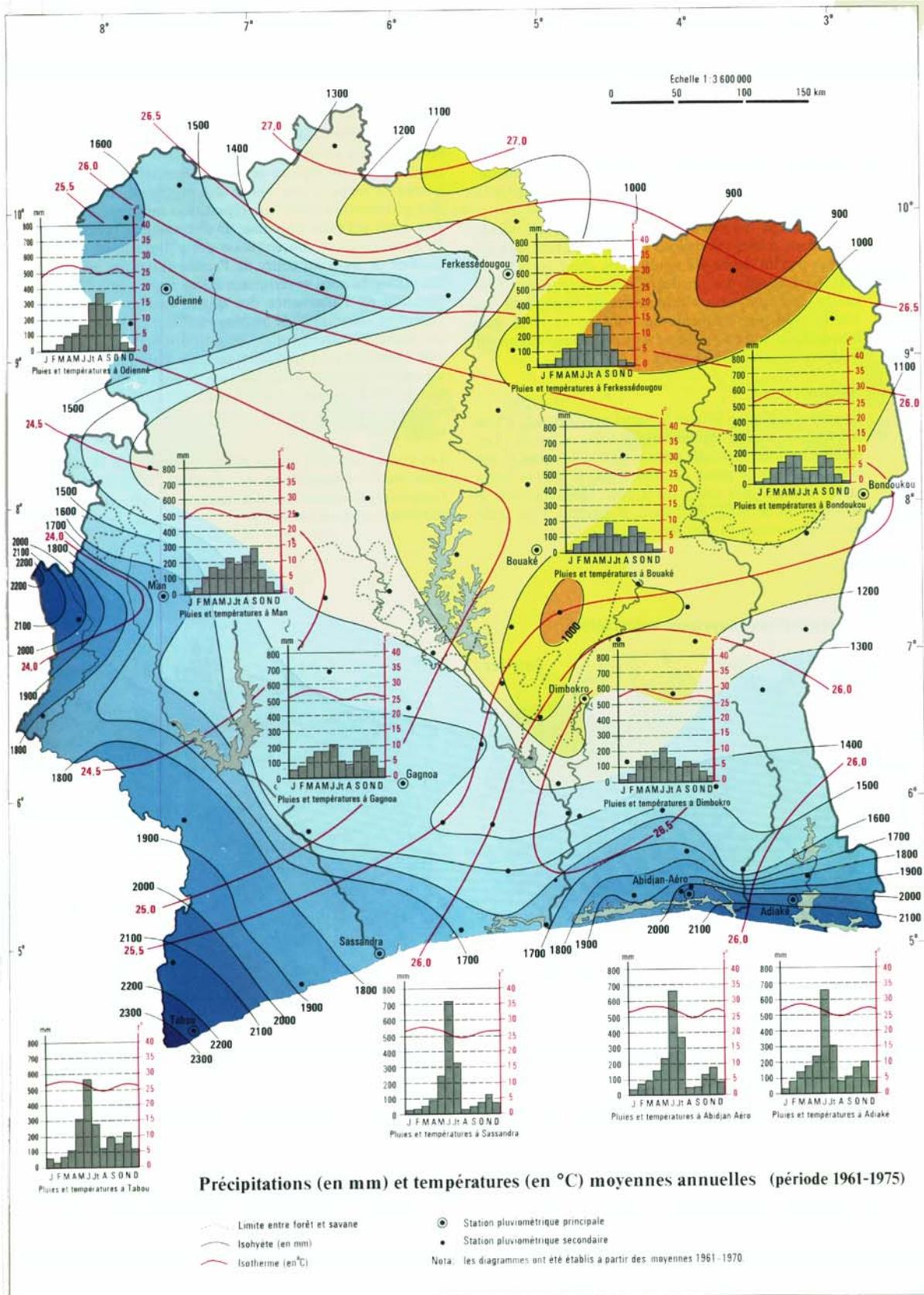


Figure 1.2.2 Carte de répartition de la pluviométrie et des températures (Berron in Vennetier et al, 1983)

L'hygrométrie moyenne annuelle diminue depuis le Sud vers le Nord. En moyenne, elle atteint 71% dans le nord, mais peut descendre jusqu'à 15% en pleine saison sèche, lorsque souffle l'harmattan.

1.2.5 L'évaporation

Les phénomènes d'évaporation jouent un rôle prépondérant dans les bilans hydriques. L'évapotranspiration potentielle (ETP), où la végétation intervient essentiellement, peut atteindre en moyenne 1500 mm par an.

L'évaporation totale annuelle sur des bacs Colorado diminue depuis le Nord (2000 mm) vers le Sud (1000 mm). Les variations saisonnières de l'évaporation suivent assez bien celles de la température et de l'humidité relative de l'air. Ces variations dépendent de l'influence de l'altitude et des formations végétales.

Les évapotranspirations potentielles moyennes se calculent, à l'aide de la formule de Penman, à partir de la température moyenne quotidienne, la tension de vapeur moyenne quotidienne, l'insolation totale mensuelle et le vent moyen quotidien (Dezetter, 1991).

1.3 L'HYDROGRAPHIE

Le réseau hydrographique de la Côte d'Ivoire comprend quatre unités :

- quatre fleuves principaux qui coulent vers le Golfe de Guinée en formant des bassins de drainage parallèles de direction nord-sud. Se distinguent d'Ouest en Est le Cavally, le Sassandra, le Bandama et la Comoé.
- sept petits fleuves côtiers ayant des bassins versants occupant une superficie inférieure à 10000 km². Les principaux sont d'Ouest en Est le Tabou, le San Pédro, le Niouniourou, le Boubo, l'Agnéby, la Mé et la Bia.
- les affluents du Niger qui coulent du Sud vers le Nord en drainant l'angle nord-ouest du pays : le Baoulé, la Bagoé et le Gbanhala.
- les petits affluents de la Volta Noire dont seul le Koulda a un écoulement pérenne.

1.3.1 Les particularités régionales et locales

Les fortes évaporations de la saison sèche mettent totalement à sec les petits cours d'eau temporaires, surtout en zone de savane. Au Sud, le manteau d'altérites permet une plus grande rétention d'eau et une alimentation plus régulière des petits fleuves côtiers.

La nature géologique du sous-sol, impose l'organisation des réseaux hydrographiques :

- les grands cours d'eau (Bandama, Comoé) ont en général emprunté les bandes schisteuses dispersées parmi les granites et les migmatites qui couvrent les deux tiers du pays,
- le chevelu hydrographique est désorganisé sur les granites, alors qu'il s'observe plus dense et hiérarchisé en vallées sur les schistes,
- le relief modeste implique des vitesses d'écoulement souvent faibles (pente faible des cours d'eau), avec des ralentissements créant des biefs larges ou composés de multiples chenaux,
- au contraire, l'emboîtement de plateaux coupe les écoulements de rapides ou de chutes.

1.3.2 La classification des régimes

Les régimes hydrologiques, qui servent à caractériser l'abondance et les variations saisonnières des cours d'eau, s'apparentent étroitement aux régimes des précipitations. Quatre régimes hydrologiques se distinguent (Monnier in Vennetier et al,1983) :

- le régime équatorial : il s'étend sur la partie méridionale de la Côte d'Ivoire, au sud de la ligne Soubré-Toumodi-Abengourou (cf figure 1.1.1). Il se caractérise par le dédoublement de la crue annuelle, qui s'explique par la répartition saisonnière des précipitations (juin-juillet et octobre-novembre). Les périodes de basses eaux correspondent sensiblement aux saisons sèches et s'observent en août-septembre et de décembre à mars, où les étiages sont bien plus marqués.

- le régime tropical : il s'étend sur la partie septentrionale du pays. Pour les bassins versants importants, ce régime comporte une crue unique d'août à octobre, suivie d'un tarissement rapide en novembre-décembre, puis d'une longue période de basses eaux de janvier à mai, pendant laquelle les débits tombent à de faibles valeurs (étiages marqués). Sur les petits bassins, on observe de brèves pointes de crue dès le mois d'avril et le tarissement complet a lieu à la fin de l'année.

- le régime de transition : il s'applique aux cours d'eau de la région centrale de la Côte d'Ivoire. Il correspond à un régime intermédiaire entre le régime équatorial et le régime tropical. Il se caractérise par deux pointes de crue en juin-juillet et en septembre-octobre, mais ce dédoublement n'est pas toujours nettement marqué.

- le régime montagnard : il s'observe dans la partie montagneuse de l'ouest du pays. L'influence orographique se traduit par des débits spécifiques élevés. Les hautes eaux s'étendent d'avril à octobre, avec un maximum en septembre. L'étiage est très soutenu en janvier-février.

Le débit des cours d'eau dépend essentiellement de l'influence des précipitations. Mais d'autres facteurs sont à prendre en compte, si l'on veut caractériser ces cours d'eau : la structure du réseau hydrographique, le relief mais aussi la végétation et la nature des sols.

1.4 LA VEGETATION

La Côte d'Ivoire est divisée en deux domaines, division basée sur les formations végétales prédominantes dans le paysage :

- domaine guinéen rattaché à la Basse Côte d'Ivoire,
- domaine soudanais rattaché à la Haute Côte d'Ivoire.

La carte de la répartition de la végétation est donnée figure 1.4.1.

Le domaine guinéen comprend quatre secteurs forestiers qui sont du Sud vers le Nord : le secteur littoral, le secteur ombrophile, le secteur mésophile et le secteur montagnard. Le domaine littoral est composé de savanes de basse côte qui occupent de vastes étendues au niveau des lagunes.

Elles sont constituées d'un tapis graminéen et d'arbustes. La forêt ombrophile se caractérise par la présence d'arbres atteignant 50 m et une abondance de lianes. C'est une forêt sempervirente, dense, fermée qui entretient un climat chaud, humide et sombre. La forêt mésophile ou semi-décidue abrite un certain nombre d'essences qui perdent leurs feuilles au cours de la saison sèche. La forêt montagnarde couvre le massif de Man avec de grandes fougères arborescentes et de prairies altimontaines.

Le domaine soudanais se subdivise en deux secteurs se présentant comme une juxtaposition de formations forestières à deux strates, l'une arborescente et l'autre herbacée, et de formations savanicoles, en plages discontinues et dont l'importance du peuplement ligneux en définit le type.

Le district préforestier guinéen constitue une zone de transition entre ces deux domaines. Il se compose de lambeaux de forêt mésophile et de larges étendues de savane séparées par des forêts-galeries.

1.5 LES SOLS

Les granites occupent la plus grande partie de la région et présentent parfois de nombreux filons de pegmatites. Les schistes y sont représentés par des bandes plus ou moins larges et orientées SSW-NNE. Les phénomènes d'induration plus fréquents sur les schistes que sur les granites se traduisent par la formation de surfaces cuirassées (Perraud in Avenard et al, 1971).

Les sols ferralitiques moyennement désaturés montrent un remaniement gravillonnaire plus fréquent dans les zones de cultures : dégradation des sols par l'enrichissement en éléments grossiers et appauvrissement en argiles.

Les sols ferrugineux tropicaux montrent une texture souvent sableuse, très sensible à l'érosion et à l'induration. Ils dérivent des matériaux ferralitiques.

Des sols hydromorphes se rencontrent sur les alluvions des terrasses des fleuves et des bas-fonds. Leur présence est liée aux fluctuations des nappes alluviales.

1.6 OCCUPATION HUMAINE

L'influence humaine est très importante et se fait sentir en de nombreux domaines.

Favorisée et diversifiée par la présence de forêt et de savane, l'occupation humaine est relativement importante sur l'ensemble du pays. Dans la partie méridionale, l'habitat est très dense avec plusieurs grosses villes dont Abidjan. Le réseau routier y est très serré et laisse encore quelques zones inhabitées.

A côté des activités de ramassage, de pêche et de chasse importantes dans les régions moins peuplées, l'homme pratique pour ses cultures vivrières, riz, manioc ou banane, une agriculture caractérisée par une jachère forestière plus ou moins prolongée. Des particuliers,

collectivités ou sociétés, ont entrepris des plantations de type industriel (café, cacao, bananes, agrumes, hévéa et palmiers à huile). Sur la frange littorale, les cocoteraies traditionnelles ou industrielles sont prises sur la savane et la forêt. Il y a une activité d'élevage de bovins bien développée dans le secteur mésophile du domaine guinéen. Ailleurs, l'élevage est pratiquement inexistant.

Les ressources en bois d'exploitation de la forêt sont très importantes et trouvent un débouché dans les industries locales de transformation. Sur la frange littorale, les forêts sont en voie de disparition rapide car elles sont mises en cultures ou exploitées en bois de chauffage.

Les défrichements et les feux pratiqués par l'homme aboutissent à un appauvrissement de la flore originelle et à une baisse de la fertilité des sols. Le développement croissant de la population entraîne une importante dégradation de la végétation et des sols. C'est pourquoi des réserves botaniques ont été créées ; la Côte d'Ivoire en compte une douzaine. Il existe aussi quatre parcs nationaux.

DEUXIEME PARTIE

2. DEUXIEME PARTIE

PRESENTATION DES BASSINS VERSANTS

Dans le cadre de ce mémoire, nous travaillons sur les bassins versants issus de la thèse d'A. Dezetter (1991), choisis pour leur nombre d'années de données disponibles et leur répartition géographique. L'année 1983 est une année exceptionnellement sèche, et 1984 également mais à un degré moindre. De ce fait, les bassins versants comportant deux ou trois années de données dont 1983 et/ou 1984 ont été exclus de cette étude, car ces années apporteraient un biais beaucoup trop important à la validation de la démarche entreprise ici. Nous travaillons donc plus que sur 13 bassins versants situés dans une même zone géographique, l'angle Nord-Ouest du pays, et répartis en trois grands ensembles : les hauts bassins du Niger, du Sassandra et du Bandama.

2.1 DESCRIPTION DU SECTEUR NORD-OUEST

C'est dans ce secteur de la Côte d'Ivoire que se trouvent l'ensemble de nos bassins versants.

Cette zone recouvre les deux premiers domaines géomorphologiques définis par Avenard (1971) :

- la zone Ouest correspond à l'extrémité orientale de la dorsale guinéenne. Elle comporte d'une part le massif montagneux de Nimba, qui culmine à 1750 m et marque la frontière entre la Côte d'Ivoire, le Libéria et la Guinée, d'autre part le massif montagneux de Man qui forme un arc de cercle de près de 120 km de long et dont certains sommets s'élèvent au-dessus de 1000 m. Cette région montagneuse s'explique par la présence de granites très résistants (Arnaud in Vennetier et al, 1983).

- la région des plateaux du Nord, comprise entre les derniers plis de la dorsale guinéenne à l'Ouest et le Burkina Faso à l'Est, correspond au domaine des glacis étagés et rattachés à la famille des plateaux par leur allure tabulaire. De ces plateaux émergent des collines ou des buttes cuirassées alignées. Cette zone peut être divisée en deux ensembles pétrographiques avec à l'ouest une dominante granitique et à l'est une dominante schisteuse.

Ce secteur est situé en zone de climat soudanais à sub-soudanais (régime tropical de transition). Cette zone climatique est limitée approximativement au sud par le 8^{ème} parallèle.

C'est-à-dire qu'il se caractérise par une seule saison des pluies et une grande saison sèche. Les stations pluviométriques de Ferkessedougou et d'Odienné sont bien représentatives de ce secteur avec, respectivement, 1360 mm et 1640 mm de précipitations annuelles (Girard et al in Avenard et al, 1971). Il y a, au minimum, 90 jours de pluies par an en moyenne dans cette région, avec en moyenne 109 jours par an pour Ferkessedougou et 123 jours par an pour Odienné (Girard et al in Avenard et al, 1971).

Ces stations servent aussi à mesurer l'évapotranspiration potentielle (ETP). Elles enregistrent des ETP totales de 1847 mm à Ferkessedougou et 1803 mm à Odienné (Eldin in Avenard et al, 1971).

Dans cette zone, les régimes hydrologiques des cours d'eau appartiennent à la catégorie régime tropical. Ce régime s'étend au nord de la ligne Touba-Ferkessedougou-Bondoukou (figure 1.1.1). Pour les bassins versants étudiés, de l'ordre du millier de km², l'hydrogramme ne comporte qu'une seule crue (août à octobre), correspondant à l'unique saison des pluies. Cette période de crue est suivie d'un tarissement rapide puis d'une période de basses eaux où les débits sont très faibles (janvier à mai). Selon l'amplitude, la crue atteinte peut inonder de vastes étendues. Pour les bassins de plus petites tailles (de l'ordre de la centaine de km²), l'hydrogramme de crue est marqué de brèves pointes avant d'atteindre un écoulement continu (juillet à septembre).

Notre zone d'étude appartient au domaine soudanais qui s'étend depuis le nord de la limite de la zone guinéenne (représentée par la ligne Touba-Séguéla-Katiola-Nassian-Bondoukou, figure 1.1.1) vers le Nord. Ce secteur est soumis à un climat tropical subhumide (secteur subsoudanais), où le déficit hydrique annuel dépasse 900 mm, et à un climat tropical semi-aride (secteur soudanais), où le déficit hydrique annuel atteint 700 à 800 mm (Guillaumet et al in Avenard et al, 1971).

Cette partie de la Côte d'Ivoire se présente comme une juxtaposition de formations forestières et de formations savaniques. La forêt claire comporte deux strates de végétaux : l'une, arborescente, avec de petits arbres de 8 à 15 m et à cimes plus ou moins jointives, l'autre, herbacée, constituée de graminée en touffe et de géophytes (plante réduite à un appareil souterrain de type bulbe ou rhizome une partie de l'année). Elle est caractérisée par un cortège d'espèces ligneuses et herbacées. La savane est de moins en moins épaisse au fur et à mesure que l'on se déplace vers le nord. Elle se présente sous la forme de vastes étendues discontinues. L'importance du peuplement ligneux définira une savane boisée, arborée, arbustive ou herbeuse. Il existe aussi des boisements denses regroupés en îlots forestiers occupant les plateaux ou en forêts-galeries bordant les vallées et donc liées à la présence de cours d'eau.

De par les phénomènes de pédogenèse importants, cette zone de la Côte d'Ivoire est essentiellement composée de sols ferralitiques, plus ou moins désaturés selon la pluviométrie, et de sols ferrugineux.

Les formations végétales du domaine soudanais ont été profondément modifiées par l'homme qui continue à les cultiver et à les brûler car les défrichements et les feux de "brousse" y sont pratiques courantes. Les secteurs les plus peuplés, où l'action de l'homme est importante, sont Odienné, Boundiali et Khorogo. En dehors des cultures vivrières dominées par les céréales (mil, sorgho), ce sont les cultures du riz et du coton qui se développent de plus

en plus. Certains hameaux se distinguent par le groupement en vergers ou en parcs d'espèces utiles et protégées. A l'heure actuelle, les forêts claires typiques ne se trouvent que sporadiquement par petits lambeaux aux dépends de sites particuliers montagneux ou chaotiques.

Après avoir donné les caractéristiques géographiques, climatiques et pédologiques du secteur concerné, nous allons voir quelles sont les particularités de nos bassins versants. Pour cela nous allons procéder en travaillant sur chaque grand groupe de bassin.

2.2 LES TROIS GRANDS ENSEMBLES

2.2.1 Le haut bassin du Niger

Parmi les bassins étudiés, quatre appartiennent au haut bassin du Niger. Ils représentent 27 stations années. Les tableaux suivants indiquent, pour chaque bassin, la superficie occupée, les années de données retenues, les lames précipitées et écoulées, l'écart à la lame moyenne écoulee, ainsi que les débits moyens et spécifiques de chaque année.

La figure 2.2.1 indique leurs emplacements respectifs, ainsi que la situation des postes pluviométriques utilisés. Les données de précipitations sont calculées à partir des coefficients de Thiessen dans le cas où plusieurs postes sont présents sur le bassin.

2.2.1.1 La Bagoé

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m³/s)	Débit spécifique (l/s/km²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Bagoé à Kouto 4700 km ²	1968	1291	267	39.69	8.45	+87
	1969	1632	355	52.95	11.27	+175
	1970	1655	260	38.73	8.24	+80
	1971	1768	177	26.35	5.61	-3
	1973	1424	141	21.06	4.48	-39
	1974	1827	127	18.88	4.02	-53
	1975	1463	183	27.39	5.83	+3
	1976	1291	112	16.63	3.54	-68
	1981	1340	221	32.96	7.01	+41
	1982	1316	166	24.81	5.28	-14
	1983	971	45	6.71	1.43	-135
	1984	1147	67	9.98	2.12	-113
	1985	1377	223	33.30	7.08	+43
MOYENNE		1423	180	26.88	5.72	

Tableau 2.2.1. La Bagoé à Kouto

Les postes pluviométriques utilisés ici sont Madinani, Boundiali et Kouto. Leur coefficient de Thiessen sont respectivement 0.36, 0.48 et 0.19.

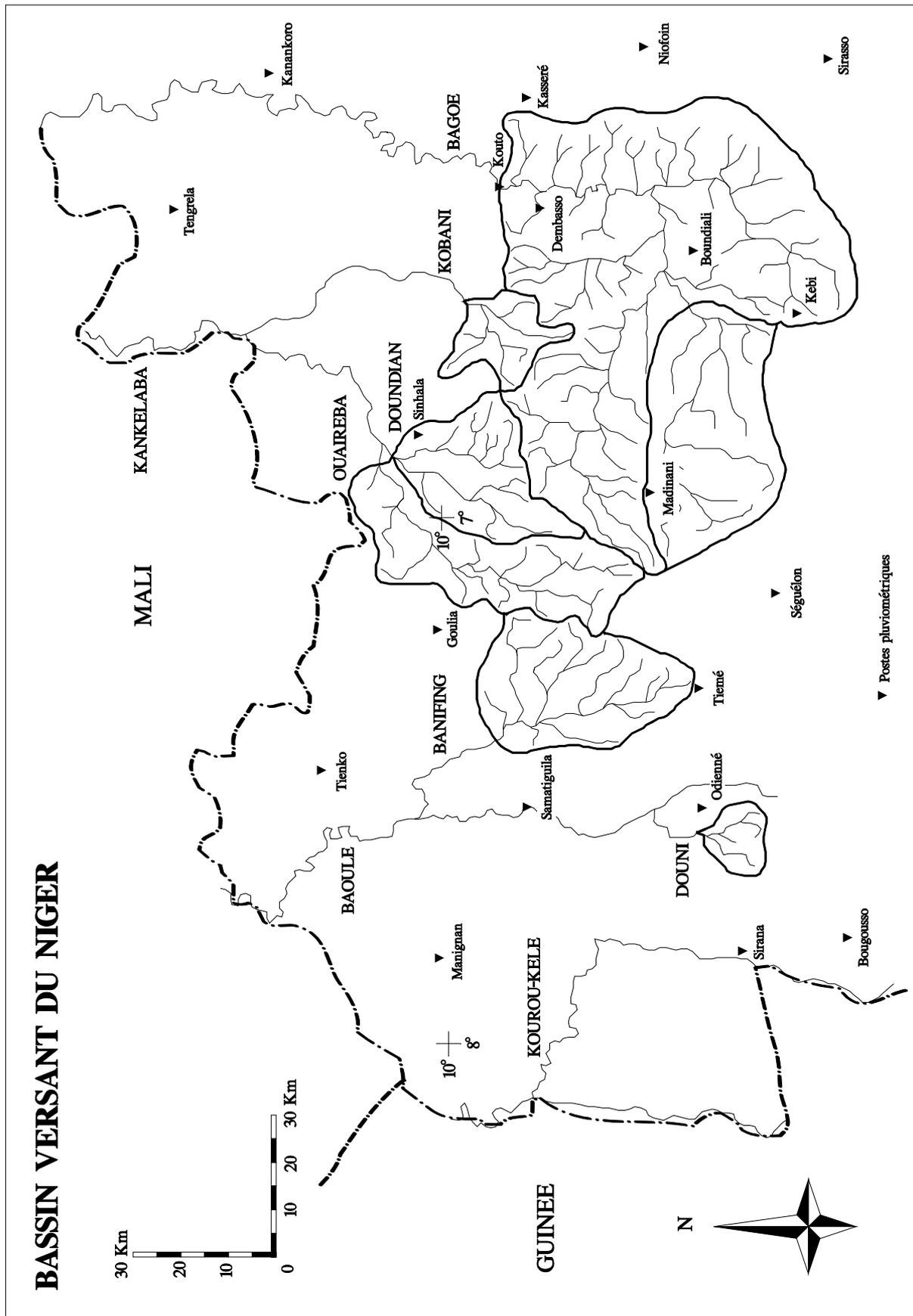


Figure 2.2.1. Carte du haut bassin du Niger (Dezetter, 1991)

Les séries présentent des lacunes de données en 1972 et de 1977 à 1980. Les précipitations annuelles varient de 971 mm (1983) à 1827 mm (1974). Les modules annuels sont compris entre 6.71 m³/s (1983) et 52.95 m³/s (1969) et les débits spécifiques correspondant sont 1.43 l/s/km² et 11.27 l/s/km². Ce bassin ne présente pas d'étiage sec pendant la saison sèche.

Les périodes 1969-1971 et 1973-1975 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1968-1970, 1975, 1981 et 1985 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. Nous avons calculé les écarts à la lame écoulee moyenne, et ce, pour chaque année de données dont nous disposons. Ces écarts varient de -135 mm en 1983 à + 175 mm en 1969.

2.2.1.3 Le Banifing

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Banifing à Ziemougoula 990 km ²	1978	1457	252	7.90	7.98	+21
	1979	1243	276	8.67	8.76	+45
	1980	1404	182	5.71	5.77	-49
	1984	1104	193	6.04	6.10	-38
	1985	1341	252	7.92	8.00	+21
MOYENNE		1310	231	7.25	7.32	

Tableau 2.2.2. Le Banifing à Ziemougoula

Les postes pluviométriques utilisés ici sont Tieme, Goulia et Samtiguila. Leur coefficient de Thiessen sont respectivement 0.41, 0.42 et 0.17.

Les séries de données présentent des lacunes de 1981 à 1983. Les précipitations annuelles varient de 1104 mm (1984) à 1457 mm (1978). Les modules annuels sont compris entre 6.04 m³/s (1983) et 8.67 m³/s (1979) et les modules spécifiques correspondant sont 6.10 l/s/km² et 8.76 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'étiage.

Les années 1978, 1980 et 1985 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1978-1979 et 1985 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -49 mm en 1983 à + 45 mm en 1979.

2.2.1.3 Le Douni

Le poste pluviométrique utilisé ici est Odienné.

Les précipitations annuelles varient de 1011 mm (1986) à 1241 mm (1984). Les modules annuels sont compris entre 0.29 m³/s (1986) et 0.94 m³/s (1985) et les modules spécifiques correspondant sont 2.45 l/s/km² et 7.83 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'étiage.

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Douni à Pt 398 120 km ²	1983	1038	118	0.45	3.76	-25
	1984	1241	130	0.50	4.13	-13
	1985	1099	247	0.94	7.83	+104
	1986	1011	77	0.29	2.45	-66
MOYENNE		1097	143	0.54	4.54	

Tableau 2.2.3. Le Douni à Point 368

Les années 1984 et 1985 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, seule l'année 1985 présente une valeur de débit supérieure à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -66 mm en 1986 à +104 mm en 1985.

2.2.1.4 Le Doundian

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Doundian à Wahire 650 km ²	1980	1228	142	2.92	4.49	+1
	1981	1527	253	5.21	8.01	+112
	1982	1257	184	3.78	5.82	+43
	1983	1092	71	1.46	2.25	-70
	1984	1117	55	1.13	1.74	-86
MOYENNE		1244	141	2.90	4.46	

Tableau 2.2.4. Le Doundian à Wahire

Le poste pluviométrique utilisé ici est Sinhala.

Les précipitations annuelles varient de 1092 mm (1983) à 1527 mm (1981). Les modules annuels sont compris entre 1.13 m³/s (1984) et 5.21 m³/s (1981) et les modules spécifiques correspondant sont 1.74 l/s/km² et 8.01 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'étiage.

Les années 1981 et 1982 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1980 à 1982 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -86 mm en 1984 à +112 mm en 1981.

2.2.1.5 En résumé

Les quatre bassins versants de l'étude, situés dans le haut bassin du Niger, ont des superficies qui varient de 120 km² (Douni) à 4700 km² (Bagoé). Sur cette zone et sur la période 1968-1986, les précipitations annuelles sont comprises entre 971 mm (Bagoé, 1983) et 1827 mm (Bagoé, 1974). Les modules annuels varient entre 0.29 m³/s (Douni, 1986) et

52.95 m³/s (Bagoé, 1969). Les écarts à la lame écoulee moyenne montrent bien que les années 1983 et 1984 présentent un déficit d'écoulement. Cette période sèche est encadrée par deux périodes plus humides : 1981 et 1985. Dans le cas de longues séries de données comme la Bagoé à Kouto, la période 1973-1974 constitue aussi une période sèche et l'année 1969 apparaît comme exceptionnellement humide.

Notons aussi que pour le bassin versant du Douni, l'année 1986 apparaît comme une année anormalement sèche. Cela pourrait provenir du choix du poste pluviométrique : Odienné ne serait pas le plus représentatif de ce bassin.

2.2.2 Le haut bassin du Sassandra

Parmi les neuf bassins restants de l'étude, deux font partie du haut bassin du Sassandra et représentent 14 stations années. Les tableaux suivants indiquent, pour chaque bassin, la superficie occupée, les années de données retenues, les lames précipitées et écoulees, l'écart à la lame moyenne écoulee, ainsi que les débits moyens et spécifiques de chaque année.

La figure 2.2.2 indique leurs emplacements respectifs, ainsi que la situation des postes pluviométriques utilisés. Les données de précipitations utilisées dans les modèles sont calculées à partir des coefficients de Thiessen dans le cas où plusieurs postes sont présents sur le bassin.

2.2.2.1 Le Sien à Massadougou

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Sien à Massadougou 1325 km ²	1981	1457	193	8.13	6.13	+82
	1982	1611	122	5.13	3.87	+11
	1983	1038	40	1.68	1.27	-71
	1984	1241	77	3.25	2.45	-34
	1985	1099	169	7.11	5.36	+58
	1986	1011	64	2.69	2.03	-47
MOYENNE		1243	111	4.66	3.52	

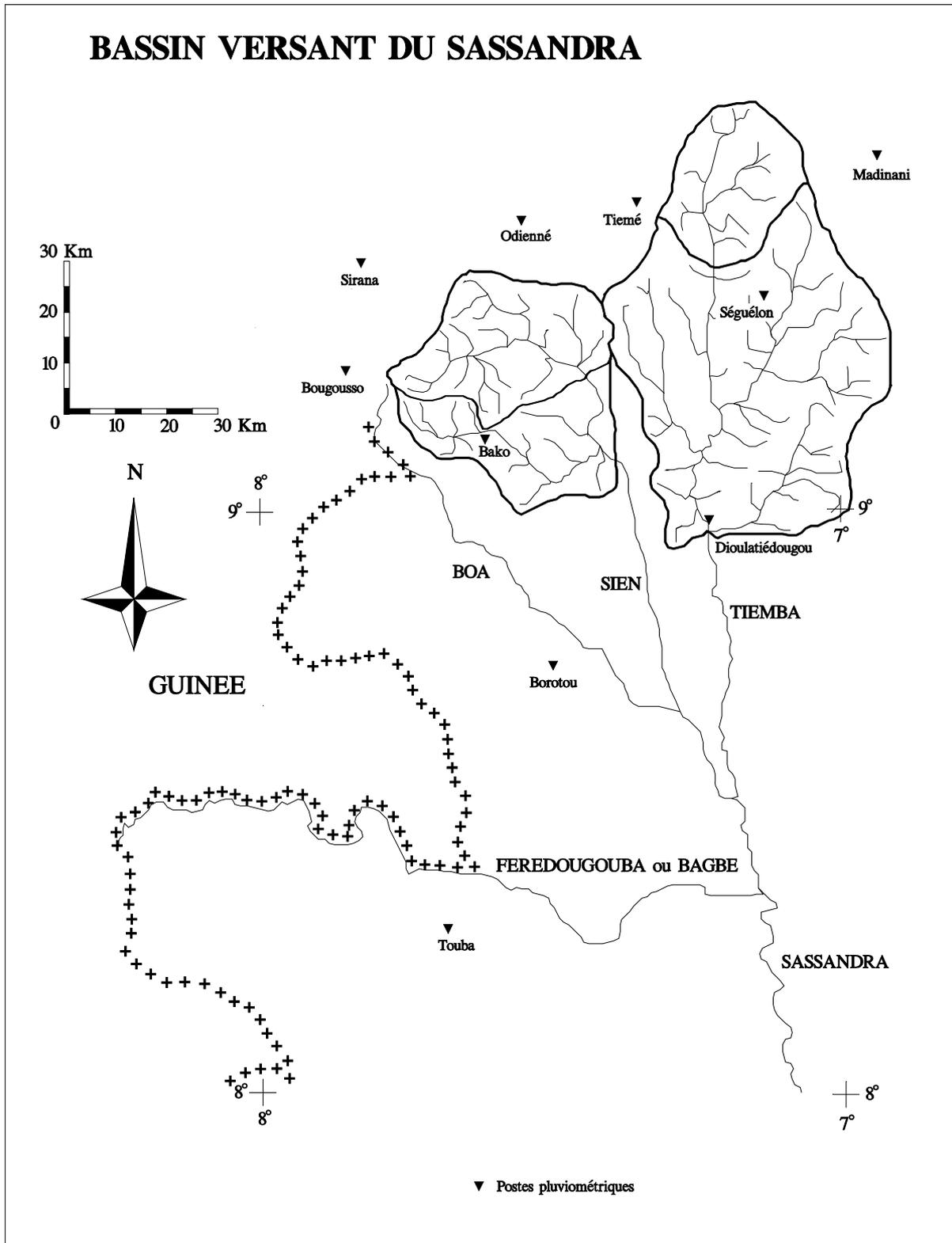
Tableau 2.2.5. Le Sien à Massadougou

Le poste pluviométrique utilisé ici est Odienné.

Les précipitations annuelles varient de 1011 mm (1986) à 1611 mm (1982). Les modules annuels sont compris entre 1.68 m³/s (1983) et 8.13 m³/s (1981) et les modules spécifiques correspondant sont 1.27 l/s/km² et 6.13 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'étiage.

Les années 1981 et 1982 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1981-1982 et 1985 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -71mm en 1983 à +82 mm en 1981.

Figure 2.2.2. Carte du haut bassin du Sassandra (Dezetter, 1991)



2.2.2.2 Le Sien à Nafana

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulée (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulée moyenne (mm)
Sien à Nafana-Sienso 615 km ²	1977	1450	210	4.09	6.65	+33
	1978	1599	185	3.61	5.87	+8
	1979	1667	284	5.54	9.01	+107
	1980	1410	222	4.32	7.02	+45
	1981	1457	228	4.44	7.22	+51
	1982	1611	147	2.87	4.67	-30
	1983	1038	57	1.11	1.80	-120
	1984	1241	84	1.63	2.64	-93
MOYENNE		1434	177	3.45	5.61	

Tableau 2.2.6. Le Sien à Nafana-Sienso

Le poste pluviométrique utilisé ici est Odienné.

Les précipitations annuelles varient de 1038 mm (1983) à 1667 mm (1979). Les modules annuels sont compris entre 1.11 m³/s (1983) et 5.54 m³/s (1979) et les modules spécifiques correspondant sont 6.10 l/s/km² et 8.76 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'étiage.

Les années 1977-1979 et 1981-1982 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1977 à 1981 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulée moyenne varie de -120 mm en 1983 à + 107 mm en 1979.

2.2.2.3 En résumé

Les deux bassins versants de l'étude, situés dans le haut bassin du Sassandra, ont des superficies qui varient de 615 km² (Sien à Nafana) à 1325 km² (Sien à Massadougou). Sur cette zone et sur la période 1977-1986, les précipitations annuelles sont comprises entre 1038 mm (Sien, 1983) et 1667 mm (Sien à Nafana, 1979). Les modules annuels varient entre 1.11 m³/s (Sien à Nafana, 1983) et 8.13 m³/s (Sien à Massadougou, 1981). Les écarts à la lame écoulée moyenne montrent que la période 1983-1984 présente un déficit d'écoulement, au contraire de la période 1977-1981 et de 1985. L'année 1986 présente aussi un déficit d'écoulement.

2.2.3 Le haut bassin du Bandama

Les sept bassins versants restants sont situés dans le haut bassin du Bandama et représentent 26 stations années. Les tableaux suivants indiquent, pour chaque bassin, la

superficie occupée, les années de données retenues, les lames précipitées et écoulées, l'écart à la lame moyenne écoulee, ainsi que les débits moyens et spécifiques de chaque année.

La figure 2.2.3 indique leurs emplacements respectifs, ainsi que la situation des postes pluviométriques utilisés. Les données de précipitations utilisées dans les modèles sont calculées à partir des coefficients de Thiessen dans le cas où plusieurs postes sont présents sur le bassin.

2.2.3.1 Le Bou

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Bou à Boron 3710 km ²	1981	1073	97	11.40	3.07	+34
	1982	1108	42	4.94	1.33	-21
	1983	853	10	1.13	0.31	-53
	1984	1056	33	3.92	1.06	-30
	1985	1437	134	15.79	4.26	+71
MOYENNE		1106	63	7.44	2.01	

Tableau 2.2.8. Le Bou à Boron

Les postes pluviométriques utilisés ici sont Sirasso, Dianra et Dikodougou. Leurs coefficients de Thiessen sont respectivement 0.54, 0.26 et 0.20.

Les précipitations annuelles varient de 853 mm (1983) à 1437 mm (1985). Les modules annuels sont compris entre 1.13 m³/s (1983) et 15.79 m³/s (1985) et les modules spécifiques correspondant sont 0.31 l/s/km² et 4.26 l/s/km². Ce bassin ne présente pas d'étiage sec pendant la saison sèche.

Les années 1982 et 1985 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1981 et 1985 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -53 mm en 1983 à +71 mm en 1985.

2.2.3.2 Le Bandama

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Bandama à Seguekiele 368 km ²	1981	1121	106	1.24	3.36	+29
	1982	1100	65	0.75	2.05	-12
	1983	896	16	0.19	0.51	-61
	1984	1039	20	0.24	0.65	-57
	1985	1541	176	2.05	5.58	+99
MOYENNE		1139	77	0.89	2.43	

Tableau. Le Bandama à Seguekiele

Les postes pluviométriques utilisés ici sont Sirasso et Niofoin. Leurs coefficients de Thiessen sont respectivement 0.40 et 0.60.

Les précipitations annuelles varient de 896mm (1983) à 1541 mm (1985). Les modules annuels sont compris entre 0.19 m³/s (1983) et 2.05 m³/s (1985) et les modules spécifiques correspondant sont 0.51 l/s/km² et 5.58 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'été.

Les années 1981 et 1985 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1981 et 1985 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -61 mm en 1983 à +99 mm en 1985.

2.2.3.3 Le Lafigue

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Lafigue à Rte de Badikaha 443 km ²	1981	1198	195	2.75	6.20	+68
	1982	1171	115	1.62	3.66	-12
	1983	836	36	0.50	1.13	-91
	1984	1410	161	2.25	5.08	+34
MOYENNE		1154	127	1.78	4.02	

Tableau 2.2.9. Le Lafigue à Route de Badikaha

Le poste pluviométrique utilisé ici est Korhogo.

Les précipitations annuelles varient de 836 mm (1983) à 1410 mm (1984). Les modules annuels sont compris entre 0.50 m³/s (1983) et 2.75 m³/s (1981) et les modules spécifiques correspondant sont 1.13 l/s/km² et 6.20 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'été.

Les années 1981-1982 et 1984 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1981 et 1984 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -91 mm en 1983 à +68 mm en 1981.

2.2.3.4 Le Lokpoho

Le poste pluviométrique utilisé ici est Ouangolodougou.

Les séries de données présentent des lacunes de données en 1986. Les précipitations annuelles varient de 553 mm (1983) à 1245 mm (1985). Les modules annuels sont compris entre 0.23 m³/s (1984) et 3.85 m³/s (1987) et les modules spécifiques correspondant sont 0.30 l/s/km² et 4.99 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'été.

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Lokpoho à Namboukaha 772 km ²	1983	553	11	0.27	0.35	-66
	1984	740	9	0.23	0.30	-68
	1985	1245	130	3.18	4.12	+53
	1987	968	157	3.85	4.99	+80
MOYENNE		926	77	1.88	2.44	

Tableau 2.2.10. Le Lokpoho à Namboukaha

Les années 1985 et 1987 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1985 et 1987 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -68 mm en 1984 à +80 mm en 1987.

2.2.3.5 Le Solomougou

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Solomougou à Ziebatago 1510 km ²	1983	877	14	0.68	0.45	-81
	1984	1343	88	4.22	2.80	-7
	1985	1444	192	9.19	6.08	+97
	1986	1240	88	4.20	2.78	-7
MOYENNE		1225	95	4.57	3.03	

Tableau 2.2.11. Le Solomougou à Ziebatago

Les postes pluviométriques utilisés ici sont Korhogo et Sirasso. Leurs coefficients de Thiessen sont respectivement 0.77 et 0.23.

Les précipitations annuelles varient de 877 mm (1983) à 1444 mm (1985). Les modules annuels sont compris entre 0.68 m³/s (1983) et 9.19 m³/s (1985) et les modules spécifiques correspondant sont 0.45 l/s/km² et 6.08 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'étiage.

Les années 1984 à 1986 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, seule l'année 1985 présente une valeur de débit supérieure à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -81 mm en 1983 à +97 mm en 1985.

2.2.3.6 Le Yoreloro

Les postes pluviométriques utilisés ici sont Niofoin, Sirasso et Korhogo. Leurs coefficients de Thiessen sont respectivement 0.35, 0.48 et 0.17.

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Yoreloro à Kategue 338 km ²	1982	1127	44	0.48	1.41	+7
	1983	915	14	0.15	0.46	-23
	1984	1122	23	0.25	0.73	-14
	1986	1163	67	0.71	2.11	+30
MOYENNE		1117	37	0.40	1.18	

Tableau 2.2.12. Le Yoreloro à Kategue

Les séries de données présentent des lacunes de données en 1985. Les précipitations annuelles varient de 915 mm (1983) à 1163 mm (1986). Les modules annuels sont compris entre 0.15 m³/s (1983) et 0.71 m³/s (1986) et les modules spécifiques correspondant sont 0.46 l/s/km² et 2.11 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'été.

Les années 1982, 1984 et 1986 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1982 et 1986 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -23 mm en 1983 à + 30 mm en 1986.

2.2.3.7 Le Yani

Bassin versant	Années	Lame précipitée (mm)	Lame écoulee (mm)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)	Ecart à lame écoulee moyenne (mm)
Yani à Madji 1013 km ²	1980	1254	116	3.73	3.68	+22
	1981	1559	165	5.30	5.23	+71
	1983	879	22	0.70	0.69	-72
	1986	1190	75	2.40	2.37	-19
MOYENNE		1220	94	3.03	3.00	

Tableau 2.2.13. Le Yani à Madji

Le poste pluviométrique utilisé ici est Morondo.

Les séries de données présentent des lacunes de données en 1982 et de 1984 à 1985. Les précipitations annuelles varient de 879 mm (1983) à 1559 mm (1981). Les modules annuels sont compris entre 0.70m³/s (1983) et 5.30 m³/s (1981) et les modules spécifiques correspondant sont 0.69 l/s/km² et 5.23 l/s/km². Les débits tombent à 0 m³/s en période d'été.

Les années 1980 et 1981 présentent des hauteurs de précipitations supérieures ou égales à la valeur moyenne de la période considérée. En terme d'écoulement, les années 1980 et 1981 présentent des valeurs de débit supérieures à la moyenne de la période considérée. L'écart à la lame écoulee moyenne varie de -72 mm en 1983 à +71 mm en 1981.

2.2.3.8 En résumé

Les sept bassins versants de l'étude, situés dans le haut bassin du Bandama, ont des superficies qui varient de 338 km² (Yoreloro) à 3710 km² (Bou). Sur cette zone et sur la période 1981-1987, les précipitations annuelles sont comprises entre 553 mm (Lokpoho, 1983) et 1541 mm (Bandama, 1985). Les modules annuels varient entre 0.15 m³/s (Yoreloro, 1983) et 15.79 m³/s (Bou, 1985). Les écarts à la lame écoulée moyenne montrent un déficit d'écoulement pour la période 1982-1984. Au contraire, les années 1981 et 1985 montrent un excès par rapport à la lame écoulée moyenne.

Notons que l'année 1984, qui correspond à une année sèche, présente des précipitations anormalement élevées sur le bassin de Lafigue (1410 mm). De même, l'année 1986, qui présente un déficit d'écoulement pour la majorité des bassins du haut Bandama, montre un excès de 30 mm à la lame écoulée moyenne pour le bassin de Yoreloro.

2.2.4 Conclusion

L'ensemble de nos bassins versants est situé dans l'angle nord-ouest de la Côte d'Ivoire. Ils occupent des superficies comprises entre 120 km² et 4700 km². Cette zone est soumise à un régime climatique tropical de transition ou climat soudanais. C'est-à-dire que les bassins subissent l'alternance d'une seule saison des pluies (d'avril-mai à septembre-octobre) et d'une longue saison sèche (novembre à mars), selon les mouvements de la Zone de Convergence InterTropicale. La végétation qui les recouvre est essentiellement composée de formations forestières et de formations savanicoles. Ces dernières, des graminées surtout, disparaissent durant la saison sèche.

La période 1981-1985, commune à presque tous les bassins versants, présente des précipitations moyennes annuelles variant de 1106 mm (Bou) à 1289 mm (Sien). L'année 1983 est particulièrement sèche puisque les précipitations annuelles sont comprises entre 553 mm (Lokpoho) et 1092 mm (Doundian). 1984 l'est aussi, mais dans une moindre mesure, puisque les précipitations annuelles sont comprises entre 740 mm (Lokpoho) et 1410 mm (Lafigue). Les précipitations maximales sont enregistrées pour la Bagoé, avec une moyenne de 1685 mm de précipitations annuelles sur la période 1969-1970, et pour le Sien, avec une moyenne de 1633 mm de précipitations annuelles sur la période 1978-1979.

Les cours d'eau de ces bassins versants montrent un régime hydrologique tropical, marqué par un hydrogramme ne comportant qu'une seule crue. Cette crue résulte des précipitations tombant durant la saison des pluies. Sur la période 1981-1985, les débits spécifiques moyens varient entre 2.01 l/s/km² (Bou) et 4.58 l/s/km² (Bagoé). Les débits spécifiques sont particulièrement faibles en 1983 avec des variations comprises entre 0.31 l/s/km² (Bou) et 3.76 l/s/km² (Douni). L'année 1984 présentent, quant à elle, des débits spécifiques compris entre 0.30 l/s/km² (Lokpoho) et 6.10 l/s/km² (Banifing). Les débits spécifiques maximum sont enregistrés pour la Bagoé, avec un débit spécifique de 11.27 l/s/km² en 1969, et pour le Sien, avec un débit spécifique de 9.01 l/s/km² en 1979.

TROISIEME PARTIE

3. TROISIEME PARTIE

MODELISATION CONCEPTUELLE DE LA RELATION PLUIE-DEBIT SOUS CLIMAT SEMI-ARIDE

Les progrès informatiques ont permis un développement important de la modélisation en hydrologie. De ce fait, il existe un très grand nombre de modèles variés, simples ou complexes, qui dépendent de l'utilisateur et des questions auxquelles il cherche à répondre (prédiction de crues, simulation d'ouvrage, gestion de la ressource en eau, aménagement des bassins versants...).

3.1 GENERALITES SUR LA MODELISATION

Un modèle est une figuration approchée de systèmes hydrologiques complexes, basée sur la représentation mathématique ou physique des processus du cycle de l'eau aussi proche que possible de la réalité. En modélisation, la recherche de la simplicité est le mot d'ordre, car procéder par des descriptions complexes pour coller au mieux à la réalité peut conduire à une impasse mathématique (calculs irrésolvables, difficulté d'acquisition des données...). Il n'existe donc pas de modèles hydrologiques parfaits, c'est-à-dire applicables à toutes les échelles d'espace et de temps pour le plus grand nombre de bassins versants.

Le modèle de relation pluie-débit utilisé ici est un modèle conceptuel fonctionnant au pas de temps journalier.

Un modèle conceptuel repose sur le concept qu'une unité hydrologique (le bassin versant) est assimilable à un système, et que les relations entre les variables sont exprimées au moyen d'équations mathématiques et/ou physiques.

Ce type de modèle permet de prévoir et/ou de simuler le fonctionnement d'un système. Il permet, à partir de la définition des paramètres et des variables d'entrées, de connaître les paramètres et variables de sorties. La mise en oeuvre analytique consiste en l'identification d'opérateurs de transformation à partir de l'observation des flux entrants et sortants. Le modèle est de type "boîte noire" lorsque ces mécanismes de transformation interne au modèle sont inconnus, ce qui est notre cas.

Beaucoup de modèles hydrologiques globaux simulent le cycle de l'eau dans un bassin versant par une succession de réservoirs (pluie, évaporation, infiltration, écoulement). Les précipitations sont propagées à travers ces différents réservoirs, correspondant à des sous-processus, jusqu'aux débits écoulés à l'exutoire, en incluant éventuellement une recharge souterraine ou une perte dans l'atmosphère sous forme d'évaporation. Dans cette approche, les descriptions internes des différents sous-processus sont modélisées suivant des fonctions déterminées empiriquement et reliées dans un ordre conceptuel logique (Editjano, 1987).

Les modèles font intervenir un certain nombre de paramètres. Pour les ajuster à un bassin versant donné, il est nécessaire de disposer d'une série de précipitations, d'une série d'évaporation et d'une série de débits à l'exutoire afin de pouvoir utiliser le modèle. Ces trois séries de données doivent impérativement être disponibles sur la même période d'observation.

Le modèle choisi permet de restituer les débits à condition de connaître l'état initial du bassin versant au début de la période simulée. Pour ce faire, parmi les diverses techniques existantes, la prise en compte de la répétition de la première année de la période simulée permet d'initialiser le niveau des réservoirs. Compte tenu du caractère arbitraire de cette initialisation, les premières valeurs des débits simulés ne sont pas fiables et, par conséquent, non retenues dans le calcul de la fonction critère. Cette année correspond à la période de mise en route du modèle.

En modélisation, se distinguent aussi la période de calage et la période de validation. Ces deux périodes comprennent chacune une période de mise en route. Il est donc impossible, en pratique, d'utiliser un modèle si on dispose de moins de trois années de données de pluie, d'évaporation et de débit. Dans le cas présent, notre étude porte sur l'élaboration du modèle. Notre travail se focalise donc principalement sur le calage. La période de validation est une étape ultérieure, servant à vérifier la pertinence et la qualité des choix effectués en matière d'élaboration de l'algorithme et de choix du jeu des paramètres.

Le calage d'un modèle consiste à déterminer le jeu de paramètres du modèle permettant de reproduire le plus fidèlement possible les débits observés à l'exutoire du bassin versant étudié. La qualité de la reproduction de ces débits est mesurée par une valeur numérique, que l'on appelle fonction critère. Il existe de nombreuses fonctions critères permettant de mettre l'accent sur les crues, les étiages, ou d'autres caractéristiques selon les objectifs visés par la modélisation. L'optimisation consiste à déterminer, de manière automatique, le jeu de paramètres qui donnera la meilleure valeur de critère. Plusieurs jeux de paramètres peuvent donner des valeurs identiques de fonction critère, le jeu final retenu dépendra, entre autres, de la méthode numérique d'optimisation.

3.2 PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE SUIVIE

Dans les zones semi-arides, le terme évapotranspiration peut représenter entre 50% et 90% du bilan hydrique. Il s'agit donc d'une composante majeure du bilan hydrique. Dans un premier temps, une recherche bibliographique a été faite sur ce thème. On présentera ici l'analyse de cette bibliographie, puis les conséquences sur la problématique et la démarche adoptée.

3.2.1 L'évaporation

Dans certaines régions du globe, il a paru nécessaire d'évaluer les quantités d'eau évaporée par les surfaces naturelles. Le développement des techniques et des sciences de la nature fait intervenir de plus en plus cette étape du cycle de l'eau. Cependant, la direction des recherches entreprises est très dispersée et dépend des secteurs scientifiques concernés : agronomie, hydrologie, climatologie..., etc. C'est pourquoi les nombreux travaux réalisés sont loin d'aboutir à un corps de doctrine unanimement reconnue.

L'évaporation est le phénomène physique qui permet le passage de l'eau liquide à la vapeur d'eau. Lorsque cette eau est un constituant d'un être vivant, le terme transpiration qualifie la vaporisation de l'eau à travers, par exemple, les stomates d'un végétal ou les pores de la peau d'un être vivant. Dans la réalité, il est souvent difficile de faire la part de l'eau qui quitte directement le sol et sa surface par évaporation et celle qui correspond à la transpiration des végétaux. Il est donc convenu de réunir les deux termes sous une dénomination unique : l'évapotranspiration.

Ainsi définie, l'évaporation peut alors s'appréhender à trois niveaux de complexité selon qu'on la considère comme simple phénomène physique de diffusion gazeuse après changement d'état, comme élément déterminant du cycle de l'eau (bilan hydrique) ou comme phénomène climatique majeur mobilisant une part importante de l'énergie échangée dans un écosystème donné (bilan énergétique).

Les facteurs conditionnant le taux d'évaporation peuvent être groupés en deux catégories (Réménieras, 1976) :

- les paramètres caractérisant l'état de l'air ou le pouvoir évaporant de l'air, c'est son aptitude à provoquer l'évaporation. Ces paramètres sont le déficit hygrométrique ou déficit de saturation atmosphérique, la température de l'air, la vitesse et la turbulence du vent, l'insolation et la pression atmosphérique.
- les paramètres définissant la nature et l'état de la surface évaporante, c'est-à-dire son aptitude à alimenter l'évaporation. Ces paramètres sont un flux de chaleur résultant des échanges thermiques par rayonnement, convection et conduction entre la surface évaporante et son environnement, un flux de vapeur d'eau émis vers l'atmosphère sous l'action de la diffusion moléculaire et de la turbulence à l'interface et un flux d'eau liquide alimentant cette surface à travers le sol et le couvert végétal.

L'évapotranspiration peut se définir comme un prélèvement d'eau direct au niveau du sol ou indirect par les végétaux pour assurer leur croissance ou leur survie. On distingue l'évapotranspiration potentielle, qui correspond à la consommation en eau lorsque la ressource est illimitée, et l'évapotranspiration réelle, qui correspond à l'eau effectivement prélevée du fait du caractère limité de la ressource.

3.2.1.1 Le concept d'évapotranspiration potentielle

En 1948, Thornthwaite a introduit la notion d'évapotranspiration potentielle ou ETP dans l'optique d'une classification des climats. Elle représente la demande climatique imposée par le climat sans restriction d'eau pour le sol et qui correspond au pouvoir évaporant de l'air (Dagorne *et al*, 1996).

Il est classique d'attribuer cette ETP à la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée par une végétation couvrant complètement et uniformément le sol, alimentée en eau de façon optimale et s'étendant sur une surface assez grande. A cette quantité d'eau correspond l'énergie climatique captée par le couvert végétal pour en assurer la vaporisation. Dans ces conditions, la quantité d'eau évaporée est très voisine de celle observée sur une nappe d'eau libre peu profonde placée dans le même site. Les conditions imposées par la définition de l'ETP éliminent les facteurs d'ordre physiologique ou pédologique qui pourraient limiter l'alimentation en eau de la surface évaporante, en sorte que l'énergie d'origine climatique disponible pour la vaporisation soit totalement consommée et qu'elle constitue le seul facteur limitant de l'évapotranspiration (Eldin in Avenard, 1971).

Cette notion est étroitement liée aux facteurs climatiques tels que la température de l'air et de l'eau, l'insolation, la vitesse du vent..., etc. dont les données ne sont pas toujours disponibles. Et comme il est difficile de vérifier ces conditions, une telle définition est source d'ambiguïtés. De plus, les méthodes de mesures de l'ETP posent nombre de problèmes : elles doivent s'effectuer au niveau du sol, à l'interface air/eau quand cela est possible. Du fait qu'il existe un faible nombre de stations synoptiques, les valeurs prises en compte sont souvent celles estimées dans des zones accessibles, d'où la possibilité d'avoir des erreurs d'observations. Pour résoudre ces problèmes d'acquisition de données, les méthodes basées sur la télédétection sont actuellement en plein essor.

De nombreuses formules empiriques ont été proposées pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. Il est parfois hasardeux d'utiliser ces formules (Riou, 1975), puisqu'elles ont été développées pour des bassins de tailles différentes et sous des climats considérablement différents de ceux de notre zone d'étude.

Formule de Thornthwaite (1948)

Cette expression ancienne est basée sur les expériences effectuées sur des cases lysimétriques (Réménieras, 1976). L'ETP est donnée par la relation :

$$ETP = Ct^a$$

où ETP = évapotranspiration potentielle mensuelle en cm pour un mois fictif de 30 jours
 t = température moyenne mensuelle en °C pour le mois fictif considéré
 C et a = fonctions de l'indice thermique mensuel i" exprimé par :

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

Si I est l'indice annuel égal à la somme des 12 indices mensuels i, alors la valeur de a est donnée par l'expression :

$$a = \frac{1.6}{100} I + 0.5$$

C varie en sens inverse de I et l'équation de Thornthwaite peut alors s'écrire :

$$ETP = 1.6 \times \left(10 \frac{t}{I}\right)^a$$

Mais cette formule est d'un faible secours pour l'Afrique tropicale (Riou, 1984) puisque les températures moyennes annuelles sont très uniformes et varient peu entre 25°C et 30°C.

Formule de Penman (1948)

Le rapport de Bowen, à partir duquel Penman propose une formulation pour calculer l'ETP, est défini comme étant un flux évaporatoire déterminé à partir d'un bilan énergétique (Pouyaud, 1985). C'est le rapport du flux de chaleur sensible au flux de chaleur latente exprimé par :

$$\beta = \frac{C}{L.E} = \gamma \frac{\theta_s - \theta_a}{e_s - e_d}$$

- où
- β = rapport de Bowen
 - C = chaleur sensible fournie à l'atmosphère
 - L = chaleur latente de vaporisation de l'eau
 - θ_s = température de la surface évaporante
 - θ_a = température moyenne de l'air
 - e_s = pression de vapeur d'eau saturante à la température de la surface évaporante
 - e_d = pression de vapeur d'eau mesurée sous abri
 - γ = constante psychométrique

En utilisant l'expression dérivée de Bowen : $L.E = \frac{Q}{1+\beta}$ et la formule de Dalton :

$$E_a = f(u) \times (e_a - e_d),$$

- où
- E_a = évaporation d'une surface dont la température serait celle de l'air, mesurée sous abri
 - $f(u)$ = vitesse horizontale du vent à 2 m de la surface évaporante
 - Q = rayonnement net

Penman aboutit à l'expression suivante :

$$ETP = f \left(\frac{\Delta \frac{Q}{L} + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma} \right)$$

- où $\Delta \approx \Delta_s^a = \frac{e_s - e_a}{\theta_s - \theta_a}$ et correspond à la pente de la courbe $e_\theta = f(\theta)$ au point $\theta = \theta_a$.

f = facteur de réduction contrôlé par la durée du jour et variable suivant le lieu et le type de végétation, autrement dit contrôlé par les saisons et par la latitude. Pour les climats africains, une valeur de $f=0.80$ en saison humide et une valeur de $f=0.75$ en saison sèche permet une bonne approximation de l'ETP (Riou, 1984).

Formule de Turc (1953)

Après des recherches sur les cases lysimétriques, Turc aboutit à une formule complexe donnant l'ETP en fonction de l'insolation et de la température (Réménieras, 1976).

- 1) lorsque l'humidité relative mensuelle de l'air est supérieure à 50%, l'ETP est donnée par la relation suivante :

$$ETP = 0.40 \times (I_g + 50) \frac{t}{t + 15}$$

- où ETP = évapotranspiration potentielle mensuelle en mm
 t = température moyenne mensuelle mesurée sous abri en °C pour le mois considéré.
 I_g = radiation solaire globale du mois considéré sur une surface horizontale en cal/cm²/j exprimée par la relation :

$$I_g = I_0 \times \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

- où I₀ = radiation maximale théorique calculée d'après les données astronomiques en cal/cm²/j
 $\frac{h}{H}$ = durée d'insolation effective en heures à la durée du jour astronomique.
 I₀ et H ne dépendent que de la latitude et sont données par des tables.

- 2) lorsque l'humidité relative mensuelle de l'air est inférieure à 50%, on multiplie l'ETP, calculée par la formule ci dessus, par un facteur correctif :

$$1 + \frac{50 - h_r}{70}$$

où h_r est l'humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré, exprimée en pourcentage.

Cette formule a été établie à partir de données de bassins versants répartis dans des zones climatiques fort différentes, ce qui est un argument en faveur de son utilisation. Mais elle présente l'inconvénient de ne pas tenir compte des effets du vent, ce qui risque d'entraîner de fortes sous-estimations dans les zones très ventées.

La structure de ces formules souligne l'influence prépondérante de la radiation solaire sur la valeur de l'ETP et le souci des auteurs de ne faire entrer en jeu que des données climatologiques assez faciles à mesurer ou à estimer. Toutefois, la formule de Penman est unanimement reconnue. Elle est basée sur l'évaluation de l'énergie disponible au niveau des surfaces naturelles évaporant à leur taux potentiel. Elle fait intervenir des paramètres (température de l'air, vitesse du vent, tension de vapeur d'eau, durée réelle d'insolation) combinés à la constante psychométrique (L'Hote, 1998). L'utilisation de cette formule peut poser quelques problèmes puisqu'un grand nombre de données climatiques est nécessaire. Ceci ne constitue pas un véritable défaut puisque c'est là un facteur de précision (Riou, 1975), reste que du point de vue opérationnel, cela constitue un certain handicap.

3.2.1.2 L'évaporation réelle

Autant la littérature abonde sur les recherches autour de l'évapotranspiration potentielle, autant elle est moins riche sur la détermination de l'évapotranspiration réelle.

L'évapotranspiration réelle correspond à l'évapotranspiration effective d'un couvert végétal lorsque l'alimentation en eau n'est pas assurée de façon optimale. Ceci constitue un tout autre problème car la nature du sol et le type de végétation interviennent alors au même titre que le climat. C'est dire que le facteur limitant peut être d'ordre climatique (pluies insuffisantes par exemple), d'ordre pédologique (épuisement rapide de la réserve en eau facilement utilisable du sol) ou d'ordre physiologique (couvert végétal incapable d'assurer un débit en eau suffisant des racines vers les feuilles) (Eldin in Avenard, 1971).

La détermination de l'ETR s'effectue par la méthode de Thornthwaite. Cette méthode consiste à distinguer plusieurs phases dans l'évaporation en comparant la pluie à l'ETP (Réménieras, 1976). Dans ce bilan, interviennent trois facteurs : la pluie, l'ETP et la réserve en eau du sol. La répartition des pluies concentrées sur une saison plus ou moins longue a conduit à la distinction de trois phases (Riou, 1975):

- 1^{ère} phase : $P < ETP$, $ETR = P$

L'hypothèse la plus simple consiste à supposer que toute la pluie soit utilisée par l'évapotranspiration, lorsque l'ETP est supérieure à la pluie P . On admet alors l'égalité $ETR = P$. Dans cette première phase, la pluie est le facteur limitant de l'évaporation. On peut considérer qu'il s'agit du début de la saison des pluies où la végétation est absente ou en voie de développement.

- 2^{ème} phase : $P > ETP$, $ETR_{max} = ETP$

La végétation est bien établie et les pluies abondantes sont supérieures à l'ETP. L'ETR peut être supérieure ou inférieure à l'ETP, tout en étant limitée par les conditions climatiques et non par les réserves en eau du sol; c'est ce qu'on appelle l'ETR_{max} (Riou, 1975). Le facteur limitant est donc l'énergie fournie par le climat, énergie nécessaire à la transformation de l'eau liquide transitant à travers la végétation en vapeur d'eau. La différence entre l'ETR_{max} et l'ETP peut être due aux caractéristiques des couverts végétaux (albédo, rugosité...).

- 3^{ème} phase : $P < ETP$, $ETR = ETP \exp. [(-1/Wu) \int ETP dt]$ où Wu représente la réserve d'eau du sol utilisable.

La pluie redevient inférieure à l'ETP. La végétation est bien établie, se dégradant plus ou moins. Elle survit grâce aux réserves en eau du sol qu'elle épaisse peu à peu. L'ETR devient inférieure à l'ETP en obéissant à une loi exponentielle. Le facteur limitant est ici la réserve en eau du sol. La valeur de la réserve en eau s'estime à partir des caractéristiques du sol et du couvert végétal.

A partir de ces valeurs d'évapotranspiration, les hydrologues ont défini un déficit d'eau D par la différence entre l'ETP et l'ETR :

$$D = ETP - ETR$$

Ce déficit est appelé déficit agricole par les agronomes car il représente la quantité d'eau supplémentaire qui aurait dû être utilisée par les plantes et le sol si les disponibilités en eau avaient pu artificiellement être complétées par un système d'irrigation. Les végétaux sont très sensibles à cette différence. Selon les agronomes, à partir d'un seuil, plus l'ETR diminue, plus le rendement des cultures baisse. Il permet aussi de déterminer les saisons et en particulier d'approfondir la notion de mois humide en classant les mois en trois catégories (Riou, 1975):

- $ETR < ETP/2$, correspond à un mois sec
- $ETP/2 \leq ETR < ETP$, équivaut à un mois humide
- $ETR = ETP$, définit un mois très humide

Il existe différentes méthodes de mesures de l'ETR, qui relèvent de techniques spécifiques et des interactions eau-sol-plante.

Du point de vue physiologique, il est possible de mesurer les écoulements de sève à partir des techniques de la fluxmétrie pour estimer la transpiration réelle d'un couvert végétal (Bertuzzi *et al*, 1994).

Dans le domaine climatique, il est possible de mesurer les échanges turbulents de chaleur dans les masses d'air. Ce type de méthodes est le fait de spécialistes de la diffusion de la vapeur d'eau. Elles nécessitent des connaissances approfondies et l'usage d'appareils coûteux mais fournissant les termes du bilan énergétique (Riou, 1975).

Du point de vue pédologique, deux méthodes sont à retenir : les profils hydriques et les lysimètres :

- dans le cas des profils hydriques, l'ETR est déterminée en suivant l'évolution de l'humidité des sols entre deux profils. Ceux-ci sont réalisés à partir de prélèvements d'échantillons de sol à différentes profondeurs ou en utilisant des sondes sensibles à l'humidité du sol, du type tensiomètre ou humidimètre à neutrons. Cette méthode présente deux inconvénients majeurs : la précision des mesures dépend de celle de l'échantillonnage et le caractère "local" du bilan hydrique établi par cette méthode au voisinage des sites neutroniques nécessite la multiplication des sites de mesures pour rendre compte de la variabilité spatiale de l'humidité et de l'hétérogénéité des sols (Bertuzzi *et al*, 1994).

- les lysimètres consistent en une cuve étanche enterrée, aux parois verticales, ouverte à sa partie supérieure et remplie du sol à étudier (Riou, 1984). La surface du sol est ainsi soumise aux agents climatiques. Développés pour les études des phénomènes d'infiltration, les lysimètres ont été améliorés dans le but d'étudier l'évapotranspiration. Ils disposent de limnimètres pour mesurer l'eau ruisselée et l'eau drainée à travers cette parcelle de sol. Un dispositif de pesée avec une bascule enregistreuse ou des lysimètres flottants ont permis de mesurer les variations de poids auxquelles on assimilait la perte par évaporation. Il existe des petits lysimètres extractables et transportés par un petit appareil de levage sur bascule peseuse présentant une bonne sensibilité. Ces lysimètres présentent l'avantage de transmettre une analyse très fine dans le temps. En revanche, ces appareils sont coûteux en petit nombre et le remplissage est délicat puisque le sol naturel doit être reconstitué (Réménieras, 1976).

L'évapotranspiration est à la fois cause et conséquence du climat : le climat fixe la valeur de l'ETP tandis que l'ETR est un élément déterminant du climat. Ces deux évapotranspirations ont en commun les facteurs climatiques intervenant dans leur détermination et leur différenciation porte sur des considérations pédologiques et biologiques.

C'est une évidence de constater que les conditions climatiques des zones tropicales et équatoriales stimulent l'évaporation des nappes d'eau libre et l'évapotranspiration des végétaux. Lorsque l'énergie et l'eau sont disponibles à profusion, une végétation luxuriante s'établit et se développe sans entrave. Mais lorsqu'on s'écarte de l'équateur pour atteindre les latitudes tropicales puis sahéliennes, l'eau manque durant une partie de l'année, en même temps que l'air ambiant s'assèche. Et donc la demande en eau pour l'évapotranspiration devient ainsi le premier facteur limitant de tout développement de la végétation dans ces zones.

Lorsqu'il s'agit de procéder à une évaluation des variables hydro-climatiques, les hydrologues ne disposent pas, dans la majorité des cas, de longues séries d'observation concernant la zone qui les intéresse, et ils doivent souvent avoir recours aux données climatiques d'une station météorologique éloignée. En région semi-aride, les stations synoptiques sont peu nombreuses et il est souvent difficile de recueillir l'ensemble des données climatiques (température sous abri, pression de vapeur d'eau, vitesse de vent, pluviométrie, durée d'insolation). L'évapotranspiration potentielle constitue certainement la donnée climatique la plus difficile à acquérir, et n'est, donc, pas toujours disponible.

3.2.2 Démarche adoptée

3.2.2.1 Conséquence de la définition de l'évapotranspiration sur le choix de la fonction de production

L'évapotranspiration est un terme important du bilan hydrique, et la transpiration réelle des végétaux est considérée comme le facteur déterminant dans la production agricole. Cependant, les mesures d'ETR sont compliquées et particulièrement lorsqu'il s'agit de distinguer l'évaporation du sol et la transpiration des plantes nécessitant des techniques de mesures spécifiques.

Une alternative attractive est l'utilisation de modèles de simulation pour estimer cette ETR. Les considérations actuelles sur l'évaporation tendent à utiliser une approche en terme de ressources et non en terme de processus.

En effet, il apparaît que l'ETR dépend de la demande climatique représentée par l'ETP, mais aussi essentiellement de la ressource en eau. Notamment au cours de la saison sèche, l'ETR n'est plus limitée par l'ETP mais uniquement par la quantité d'eau disponible dans le réservoir sol, la végétation étant totalement absente. Dans ces conditions, il serait possible de s'affranchir de l'ETP difficile à mesurer dans ces régions semi-arides.

Les fonctions de production choisies sont donc indépendantes de l'ETP. Elles tiennent compte des variations climatiques saisonnières ainsi que du niveau d'eau dans le réservoir sol. Elles vont être comparées à une fonction de production "classique" où l'ETR est fonction de l'ETP.

3.2.2.2 La démarche suivie

C'est sur cette notion d'ETR non liée à l'ETP que différents tests de fonction de production ont été réalisés sur un ou deux bassins versants du Nord Côte d'Ivoire. Ces tests sont basés sur les modèles conceptuels GR du CEMAGREF et réalisés à l'aide du logiciel de simulation Vensim®. Ces essais ont permis de mettre en évidence les particularités de la

fonction évapotranspiration, et notamment, la possibilité de s'affranchir de l'évapotranspiration potentielle dans le calcul de la fonction de production.

L'objectif de ce mémoire est, donc, de tester différentes fonctions de calcul de l'évapotranspiration réelle, où l'évapotranspiration potentielle n'interviendrait pas, sur un nombre important de bassins en zone semi-aride. Il s'agit, enfin, de vérifier leur validité par rapport à une fonction classique, où l'évapotranspiration réelle est reliée à l'évapotranspiration potentielle. Il s'agit de vérifier si ce type de fonctionnement est systématique ou occasionnel par une analyse transversale sur l'ensemble des bassins versants testés, afin de trouver une explication à ce comportement.

Dans un premier temps, il convient de présenter l'outil de modélisation utilisé pour cette étude. En effet, l'utilisation du logiciel Vensim®, dans le cadre de la modélisation conceptuelle de la relation pluie-débit, nécessite, quelques explications. Ce logiciel emploie une terminologie particulière. Il est utile de d'expliquer la correspondance entre sa terminologie et celle des modèles hydrologiques habituels à pas de temps fixes.

Le modèle de base est le modèle GR3J développé par C.Michel et Editjano en 1989. Son emploi sous Vensim® implique une réécriture des algorithmes selon la terminologie de ce logiciel. Cette réécriture est nécessaire puisque Vensim® fonctionne avec des formulations analytiques exactes au contraire des anciens modèles. C'est cette réécriture qui fait l'objet d'un paragraphe dans celui présentant la recherche sur la structure du modèle.

D'une manière classique, les fonctions de production et de transfert sont relativement indépendantes dans les modèles GR du CEMAGREF. Comme les fonctions de calcul d'évapotranspiration réelle interviennent uniquement au niveau de la production, l'étape suivante consiste à vérifier cette indépendance entre production et transfert, afin de n'utiliser que la partie production par la suite. Une fois la vérification effectuée, il convient de mettre en place un schéma de modèle de production sous Vensim® en introduisant des variables supplémentaires pour pouvoir effectuer le calage.

La suite de la démarche, une fois la structure du modèle établie, est de tester un certain nombre de fonctions de production. Après un bref rappel de la définition de ces fonctions, nous devons, donc, sélectionner différentes formulations de calcul d'évapotranspiration réelle. Celles-ci ne doivent pas tenir compte de l'évapotranspiration potentielle d'après les objectifs que nous nous sommes fixés. En l'occurrence, nous en avons choisi trois que nous allons tester sur l'ensemble des bassins versants retenus.

Afin de mettre en évidence les particularités de l'évapotranspiration, il convient d'analyser les résultats des calages obtenus pour chacune des trois fonctions de production. En premier lieu, il faut étudier la qualité des calages effectués par l'intermédiaire des valeurs des paramètres calés et à l'aide de la fonction critère. Dans un second temps, une analyse plus fine, de type critère graphique, permettra de mettre en avant les avantages et les défauts des différentes fonctions de production. Il sera alors possible d'établir les conclusions quant à la fonction évapotranspiration et de statuer en faveur d'une ou plusieurs fonctions de production.

3.3 PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION

L'outil, utilisé ici et permettant cette modélisation, est le logiciel Vensim® 4.0 (Ventana System 1997). Ce logiciel offre la possibilité de décrire, simuler, analyser et optimiser les systèmes dynamiques, pas uniquement dans le domaine hydrologique. C'est un outil très performant pour décrire des flux entre des variables. Il permet de construire un graphique du système étudié complet par l'intermédiaire de flux reliés à des variables d'état dépendantes du temps et/ou influencées par des variables auxiliaires, influence décrite par l'éditeur d'équations (construction d'équations et de fonctions complexes). Il permet aussi de s'affranchir du langage de programmation habituel. Le modèle ainsi bâti présente l'avantage d'une cohérence dans les équations et d'une homogénéité des unités.

Ce logiciel fournit, en outre, une voie simple et flexible dans la mise en oeuvre et l'analyse du modèle : construction graphique, modification de la valeur ou de la place d'une variable dans le diagramme, visualisation des résultats à partir d'outils graphiques (tableaux, courbes) ou exportation des données sous forme de fichiers (possibilité de traitement ultérieur). On dispose également, lors de la construction du modèle, d'un outil de vérification des dimensions des variables qui permet de s'assurer que les équations entrées sont dimensionnellement correctes.

La simplicité d'utilisation de Vensim® en fait un bon outil pédagogique pour la modélisation en s'affranchissant des langages de programmation habituels.

Vensim® utilise une représentation spécifique composée de variables d'état et auxiliaires, de constantes, de données et de flux.

Les variables d'état (Levels) changent de valeur uniquement avec le temps (Time), et les valeurs qu'elles prennent dépendent uniquement de la valeur prise au pas de temps précédent. Ces variables déterminent les comportements dynamiques du système. Ces variables sont idéalement adaptées pour simuler le fonctionnement d'un réservoir, concept largement utilisé dans les modèles conceptuels pluie-débit.

Les variables auxiliaires (Auxiliary) sont le résultat de calculs entre les variables d'état, les constantes, les données ou autres variables auxiliaires. Leurs valeurs, à chaque pas de temps, sont indépendantes de la valeur des mêmes variables au pas de temps précédent. Les constantes (Constant), comme l'indique leur nom, ne changent pas de valeur.

Les données (Data) correspondent aux variables exogènes. Elles sont importées dans Vensim®. Elles changent de valeur à chaque pas de temps mais sont complètement indépendantes de ce qui se passe pour les autres variables.

Les flux (Rates) sont des variables qui influent directement sur les variables d'état. Ce sont sensiblement le même type de variables que les auxiliaires, qui diffèrent seulement par la façon dont elles sont utilisées dans le modèle.

Les flèches sont utilisées pour mettre en relation l'ensemble des variables intervenant dans les calculs nécessaires compte-tenu de l'algorithme décrit. Elles décrivent les relations de cause à effet entre les différents composants du modèle.

Dans l'exemple ci-dessous (figure 3.3.1), la variable réservoir S est de type Level, toutes les autres variables sont de type auxiliaire sauf etp data et pluie data.

Lorsqu'on clique sur la variable réservoir S, on a accès à la définition de l'équation régissant sa variation. Ici, on a réservoir S = INTEG (entrée S – etr bv), où INTEG signifie intégrale. Les flèches reliant entrée S et etr bv à réservoir S viennent symboliser cette relation.

Vensim® permet donc de simuler les flux et de construire de manière interactive le modèle de simulation. Il est aussi doté d'une méthode d'optimisation permettant de trouver automatiquement la meilleure valeur de certaines variables en fonction d'une autre. C'est ce que l'on fait classiquement lorsqu'on réalise le calage d'un modèle pluie-débit. Les variables à déterminer sont les paramètres du modèle et la variable "cible" est la fonction critère.

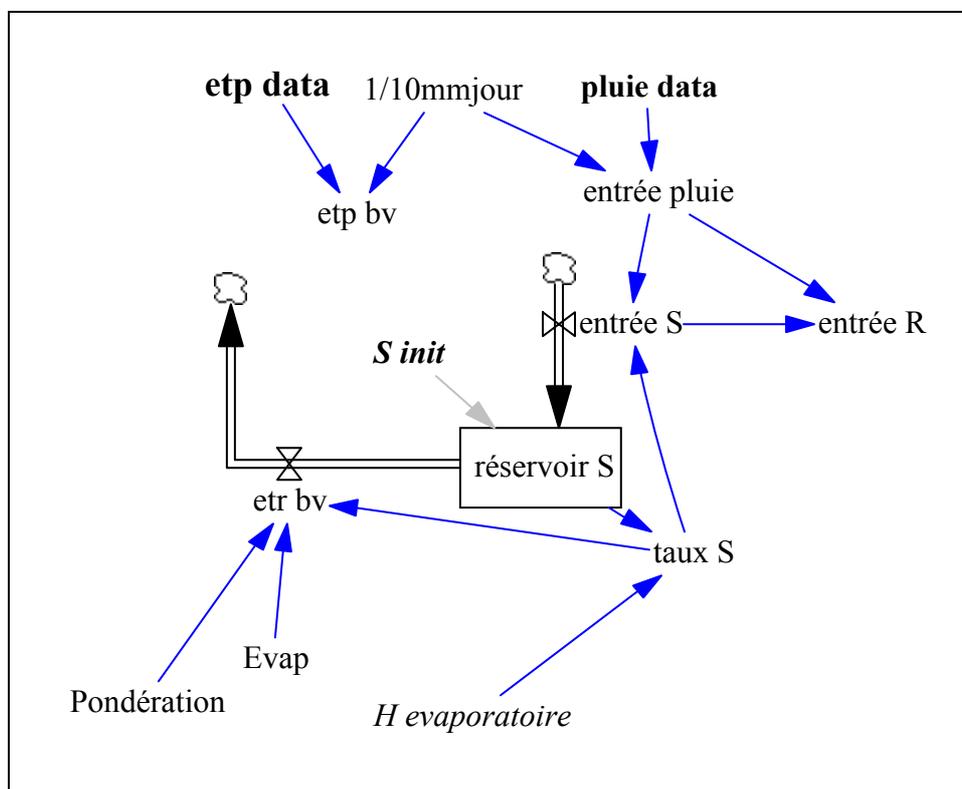


Figure 3.3.1. Exemple de la construction d'un modèle sous Vensim®

Dans Vensim® la fonction critère associée à la méthode d'optimisation (en l'occurrence, méthode de POWELL) est dénommée "payoff". Ce terme sera employé dans les tableaux de résultats figurant dans la suite du document à des fins de comparaison des résultats entre les différentes simulations. Lors du calcul de ce terme payoff, Vensim® peut utiliser deux types de variables, les variables auxiliaires et les variables "data". Dans la terminologie propre à Vensim®, lorsqu'on utilise les variables de type "data" on se place alors en mode "calibration", sinon on se place en mode "policy".

En mode policy, à chaque pas de temps (TIME STEP), les valeurs de toutes les variables choisies sont multipliées par le poids que nous avons choisi, puis par TIME STEP avant d'être intégrées au payoff. L'optimisation permet de maximiser le payoff, donc les variables pour lesquelles les valeurs fortes sont meilleures doivent avoir un poids positif, et celles pour lesquelles les valeurs faibles sont meilleures se voient attribuer un poids négatif. La valeur définitive du payoff est juste une combinaison du poids et des différents éléments du payoff, intégrée au cours de la simulation.

En mode calibration, à chaque TIME STEP, les données des variables à comparer sont vérifiées pour voir si une valeur est disponible. Si c'est le cas, les différences entre les data et les variables du modèle sont multipliées par le poids spécifié et le résultat est élevé au carré. Ce nombre, qui est toujours positif, est ensuite soustrait du payoff, donc le payoff définitif est

toujours négatif. La maximisation du payoff revient à le rendre aussi proche que possible de zéro.

Pour pouvoir comparer les résultats des simulations en se basant uniquement sur les payoffs, il est nécessaire de diviser ces derniers par le Time. On obtient ainsi des valeurs de payoffs "journaliers" comparables entre les différentes simulations.

3.4 RECHERCHE SUR LA STRUCTURE DU MODELE

Nous sommes dans la première phase d'élaboration d'un modèle qui correspond, en quelque sorte, à une phase exploratoire. Le modèle établi pour la réalisation de ce mémoire n'est pas une version définitive, il est le résultat d'une recherche de la structure la mieux adaptée à notre étude.

3.4.1 Le modèle "complet"

Ce modèle repose sur l'un des modèles conceptuels élaborés au CEMAGREF, en l'occurrence le modèle GR3J dans une ancienne version. C'est un modèle global mis au point par C.Michel et Editjano (1989). Il vise à représenter les processus de production de débit pour des bassins versants allant de quelques km² à quelques milliers de km². L'intérêt de se baser sur ce type de modèle est le faible nombre de paramètres à caler sur des observations.

Son architecture (figure 3.4.1), où interviennent une fonction de production et une fonction de transfert, repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire. Avant la prise en compte de la pluie entrée sur le bassin versant considéré, une neutralisation pluie P-évapotranspiration potentielle Ep est effectuée, laquelle permet de considérer, à chaque pas de temps, soit une pluie nette d'évaporation P', soit une évaporation nette de pluie E' (CEMAGREF, 1991).

Le sous-modèle de rendement repose sur un réservoir sol représentant le stock d'eau liée présent dans le bassin versant. Ce réservoir a comme unique sortie un prélèvement occasionné par l'évaporation potentielle. Il commande la répartition de la pluie nette entre lui-même et le sous-modèle de routage. Ce réservoir est caractérisé par sa capacité A. Son niveau S est soumis soit à la pluie P' (P-Ep ou 0) soit à l'évaporation potentielle E' (Ep-P ou 0), selon que ces termes sont positifs ou négatifs. Le niveau S permet de définir la fraction de pluie qui accèdera au réservoir de vidange, appelé aussi réservoir eau-gravitaire. Cette fraction est définie par la fonction :

$$\left(\frac{S}{A} \right)^2$$

Le complément à 1 de cette fraction entre dans le réservoir sol. Le niveau S permet également de définir l'évaporation réelle que le réservoir sol pourra délivrer. Cette évaporation réelle est une fraction de l'évaporation potentielle :

$$\frac{S}{A} \times \left(2 - \frac{S}{A} \right)$$

Le sous-modèle de routage est composé de la succession d'un hydrogramme unitaire et d'un réservoir de vidange.

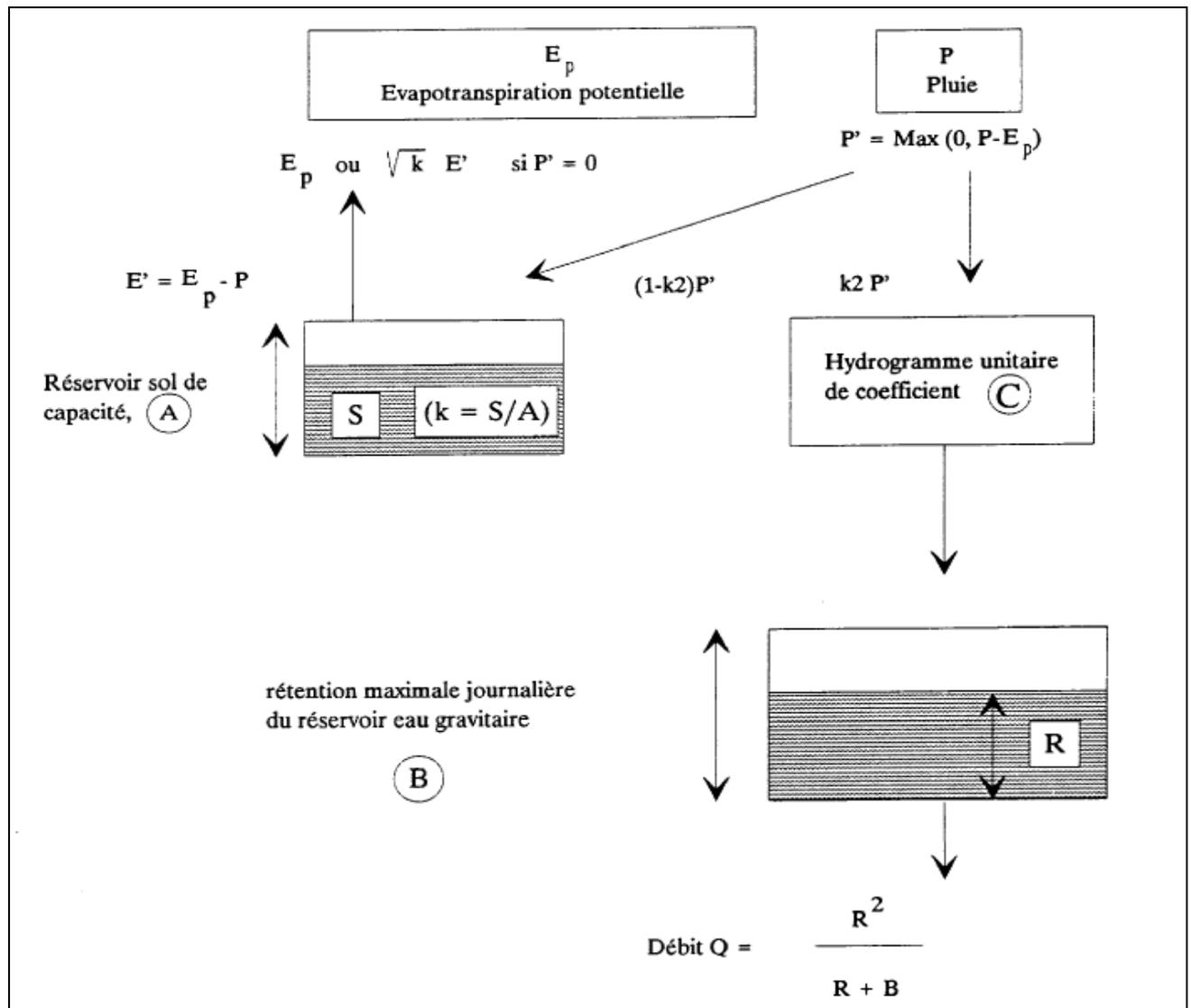


Figure 3.4.1. Représentation schématique du modèle GR3J du CEMAGREF (Dezetter, 1991)

L'hydrogramme unitaire réalise un décalage progressif, de durée C , entre l'apparition de la pluie nette et son introduction dans le réservoir eau-gravitaire. Ce paramètre de répartition contrôle des coefficients de partage journaliers C_p , dont l'ensemble correspond à la discrétisation d'une fonction de répartition dans le temps d'allure parabolique. Si x est le paramètre de décalage maximum fixé dans le modèle (en jours) et si $C_p(i)$ correspond à C_i^2 , alors l'entrée de la pluie nette P_N du jour j correspond à :

$$P_N = \sum_{i=1}^x C_p(i) \times \text{Pluie}(j + 1 - i)$$

Le réservoir eau-gravitaire reçoit les débits routés selon l'hydrogramme unitaire. Il est caractérisé par sa "rétention maximale à un jour" B . Son unique sortie est le débit journalier de la rivière considérée et sa loi de vidange est de type quadratique. Le niveau R du réservoir eau-gravitaire règle le débit Q qu'il relâche selon une fonction puissance :

$$Q = \frac{R^2}{R + B}$$

Cette relation résulte de l'intégration sur le pas de temps Δt de la vidange quadratique du réservoir, qui permet de reproduire correctement les décrues que l'on peut observer sur les hydrogrammes réels :

$$Q = -\frac{dR}{dt} = kR^2$$

L'utilisation du logiciel Vensim® implique la réécriture du modèle GR3J du CEMAGREF. En effet, du point de vue analytique, Vensim® procède de manière exacte. Il a donc été nécessaire de modifier l'écriture du modèle GR3J, sans trop en modifier l'architecture. Cette modification correspond à l'introduction de nouvelles notions et variables au sein du modèle. Le modèle, ainsi réécrit, est appelé *moder*. Son schéma est donné par la figure 3.4.2.

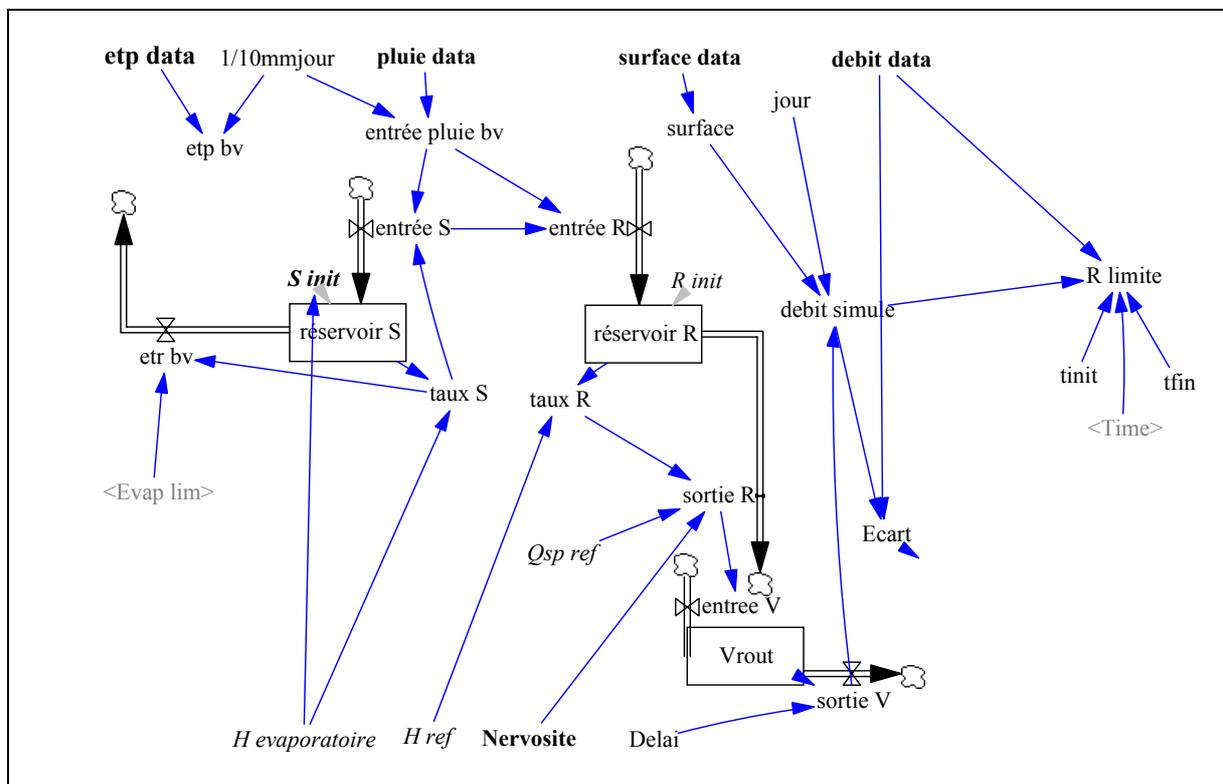


Figure 3.4.2. Schéma du modèle *moder*

Le sous-modèle de rendement est constitué d'un réservoir sol, identique à celui du modèle GR3J. Sa sortie unique est un prélèvement provoqué par l'évapotranspiration réelle (ETR) du bassin versant. Il se caractérise par une capacité H évaporatoire, qui correspond au paramètre A du modèle GR3J. Son remplissage est défini par le taux S , donné par la relation :

$$\text{tauxS} = \frac{\text{réservoirS}}{\text{Hévaporatoire}}$$

où réservoir S constitue son niveau de remplissage. Ce taux S correspond au rapport S/A défini dans le modèle de C. Michel et Editjano (1989). Le paramètre H évaporatoire est le premier paramètre à caler.

La modification du sous-modèle de rendement repose essentiellement sur la définition de la formule de calcul de l'ETR intervenant dans la fonction de production. C'est cette formulation qui fut utilisée dans les premiers tests du modèle, pour mettre en évidence les particularités de la fonction évapotranspiration. L'ETR est donnée par la relation :

$$\text{ETR} = \text{taux S} \times \text{Evap lim}$$

La variable Evap lim correspond à un taux d'évaporation maximum, qui limite l'ETR. C'est le deuxième paramètre à caler.

Le sous-modèle de routage est constitué d'un réservoir eau-gravitaire, identique à celui du modèle GR3J. La quantité d'eau qui y pénètre dépend donc exclusivement de la fonction de production. Il se caractérise par une capacité H ref, qui équivaut au paramètre B du modèle de C. Michel et Editjano (1989). Son remplissage est défini par le taux R, donné par la relation :

$$\text{tauxR} = \frac{\text{réservoirR}}{\text{Href}}$$

où la variable réservoir R constitue son niveau de remplissage, et correspond au niveau R du modèle GR3J. H ref constitue le troisième paramètre du modèle *moder* à caler.

La sortie de ce réservoir est une vidange définie par la relation :

$$\text{sortieR} = Q_{\text{sp,ref}} \times (\text{tauxR})^{\text{Nervosite}}$$

où $Q_{\text{sp,ref}}$ et Nervosité sont des nouvelles notions par rapport au modèle GR3J. Le $Q_{\text{sp,ref}}$ est le débit spécifique de référence, calculé pour chaque bassin versant et pour chaque année de la période d'observation. La Nervosité est un coefficient qui correspond à la dynamique de réponse du bassin versant. Plus la Nervosité est élevée, plus le bassin aura une réponse rapide vis-à-vis d'un événement de pluie. Lorsque la Nervosité vaut 2, on retrouve la définition de vidange quadratique donnée dans le modèle de base GR3J. Ce terme est le quatrième paramètre que l'on cherche à caler.

Le sous-modèle de routage diffère avec celui du modèle GR3J par la disparition de l'hydrogramme unitaire entre le sous-modèle de rendement et le réservoir eau-gravitaire. Il a été remplacé par un réservoir de routage, nommé Vrout, placé après le réservoir R. Il décrit la propagation des débits depuis leur sortie du réservoir R jusqu'aux débits simulés. Son rôle est d'étaler la vidange du réservoir R pour produire les montées de crues avec un paramètre de décalage nommé Délai. Ce décalage correspond au paramètre C du modèle Gr3J. Il joue le même rôle qu'un hydrogramme unitaire. Le Délai constitue le cinquième et dernier paramètre à caler.

Dans cette version *moder*, les résultats de la simulation portent sur la comparaison entre les débits observés et R limite. R limite est une variable qui permet de ne pas prendre en

compte la première année répétée, utilisée pour l'initialisation des niveaux des réservoirs sol et eau-gravitaire. R limite est, donc, la partie de débit simulé qui correspond à la période de calage.

La réécriture sous Vensim® du modèle GR3J du CEMAGREF entraîne donc quelques modifications : l'introduction de nouvelles variables, tant au niveau de la partie production que de la partie transfert, le changement d'opérateur pour reproduire les montées de crues avec un décalage. Ces modifications engendrent un accroissement du nombre de paramètres à caler : ainsi de trois paramètres pour le GR3J on passe à cinq paramètres pour *moder*.

3.4.2 Mise au point d'un modèle de production

Cette étude porte sur la recherche de fonctions de production identifiables dans cette région et dont on veut tester la robustesse pour mettre en évidence les particularités de la fonction évapotranspiration. C'est pourquoi nous nous sommes interrogés sur l'utilité de conserver la fonction de transfert avec les calages supplémentaires qu'elle impliquait et, par voie de conséquence, l'influence "en retour" que cela pouvait avoir sur les valeurs des paramètres de production. En outre, le passage d'un modèle "complet" à un modèle de production permet de s'affranchir des problèmes numériques qu'engendre le changement de fonction de production. Les effets de ces changements, non négligeables, se ressentent au niveau de la fonction de transfert, et le modèle peut avoir besoin de modifications à chaque nouvelle fonction de production.

Pour valider l'hypothèse de calages sur des lames mensuelles, nous avons étudié les lames écoulées observées sur les bassins à l'aide des techniques de corrélation et d'autocorrélation. Une forte corrélation des lames écoulées est significative d'un transfert lent, au pas de temps considéré, restituant les précipitations sur plusieurs pas de temps, et inversement. Caractère qui sera également souligné par des corrélations "pluie-lame écoulee" fortes malgré plusieurs pas de temps d'écart. Et inversement là aussi.

Les autocorrélations sont établies entre la lame mensuelle écoulee et la lame mensuelle écoulee décalée. Ce décalage est nommé d'ordre 1 lorsqu'il est de un mois, et d'ordre 2 lorsqu'il est de deux mois. Les divers résultats de corrélation sont donnés dans le tableau 3.4.1.

Les coefficients de corrélation, établis entre la lame mensuelle précipitée et la lame mensuelle écoulee, sont compris entre 0.335 (Yoreloro) et 0.761 (Lafigue). Onze bassins sur treize montrent des corrélations supérieures à 0.500. On peut donc dire qu'il existe une corrélation entre la lame mensuelle précipitée et la lame mensuelle écoulee pour la majorité des bassins versants étudiés.

Les coefficients de corrélation établis entre la pluie m et la lame $m+1$ varient de 0.466 (Yoreloro) à 0.888 (Banifing, 1984-1985). En dehors du bassin versant Yoreloro, les coefficients sont supérieurs à 0.630. Ces coefficients sont suffisamment importants pour que le retard induit soit considéré. Les autocorrélations d'ordre 1 varient entre 0.443 (Lokpoho) et 0.686 (Bandama). Dix bassins versants sur treize présentent un coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 supérieur à 0.560. Ces deux types de corrélation présentent donc de fortes valeurs. Ceci laisse penser qu'il existe bien un décalage "mensuel" entre les lames précipitées et écoulées. Cette forte corrélation impose l'utilisation du transfert.

En revanche, les coefficients, établis entre la pluie m et la lame $m+2$, sont compris entre 0.345 (Yoreloro) et 0.768 (Banifing, 1984-1985). Seuls neuf bassins sur treize ont des coefficients supérieurs à 0.500. Les autocorrélations d'ordre 2 varient de 0.013 (Banifing, 1984-1985) à 0.333 (Lafigue). Onze bassins sur treize présentent des autocorrélations inférieures à 0.200. Ces deux types de corrélation présentent des valeurs relativement faibles. Il n'y aurait donc pas de corrélation entre la lame précipitée et la lame écoulée en considérant un décalage "bimensuel".

Bassin versant	Période	Coefficient de corrélation pluie m avec lame m	Lame mensuelle écoulée		Coefficient de corrélation pluie m avec lame $m+1$	Coefficient de corrélation pluie m avec lame $m+2$
			Autocorrélation d'ordre 1	Autocorrélation d'ordre 2		
Bou	1981-1985	0.635	0.638	0.134	0.796	0.520
Bandama	1981-1985	0.591	0.686	0.201	0.804	0.664
Banifing	1978-1980	0.499	0.667	0.187	0.786	0.730
Banifing	1984-1985	0.533	0.617	0.013	0.888	0.768
Bagoé	1968-1971	0.545	0.674	0.121	0.828	0.659
	1973-1976	0.610	0.581	0.022	0.807	0.561
	1981-1985	0.510	0.637	0.105	0.805	0.684
Doundian	1980-1984	0.515	0.578	0.044	0.801	0.625
Douni	1983-1986	0.670	0.567	0.120	0.745	0.487
Lafigue	1981-1984	0.761	0.678	0.333	0.714	0.489
Lokpoho	1983-1985+1987	0.589	0.443	0.042	0.632	0.530
Sien (Mass.)	1981-1986	0.600	0.597	0.095	0.772	0.534
Sien (Naf.)	1977-1984	0.642	0.618	0.148	0.808	0.606
Solomougou	1983-1986	0.731	0.521	0.053	0.641	0.343
Yani	1980-1981+83+86	0.468	0.679	0.153	0.654	0.579
Yoreloro	1982-1984+1986	0.335	0.507	0.043	0.466	0.345

Tableau 3.4.1. Corrélations et autocorrélations entre la lame mensuelle précipitée et la lame mensuelle écoulée.

On travaille sur les lames précipitées et les lames écoulées produites par la fonction de production pour s'affranchir du transfert. On utilise la lame précipitée, dans le calcul des corrélations, pour montrer la relation entre la lame écoulée et la lame précipitée. Les valeurs des coefficients de corrélation, entre la pluie m et la lame m , augmentent lorsque le décalage est de un mois et diminuent lorsque le décalage est de deux mois. Ceci laisse penser que la pluie m explique la formation de la lame $m+1$. On veut, donc, trouver une plage de cumul de lames écoulées, au bout de laquelle la lame produite par la fonction de production se retrouve à l'exutoire. Si on considère une période de cumul d'un mois, ce n'est pas possible, puisque la pluie m explique la lame $m+1$. Comme on a vérifié que les coefficients de corrélation entre la pluie m et la lame $m+2$ diminuaient, en prenant une période de cumul de deux mois, on se place dans le cas où toute la lame précipitée sur cette période se retrouve à l'exutoire sur la

même période. Il est, donc, possible de s'affranchir du transfert et de ne travailler qu'avec la partie production. En se basant sur le modèle complet *moder*, nous effectuons quelques transformations afin d'obtenir un modèle de production. Nous le nommons *grprod2*. Son schéma conceptuel est présenté en figure 3.4.3.

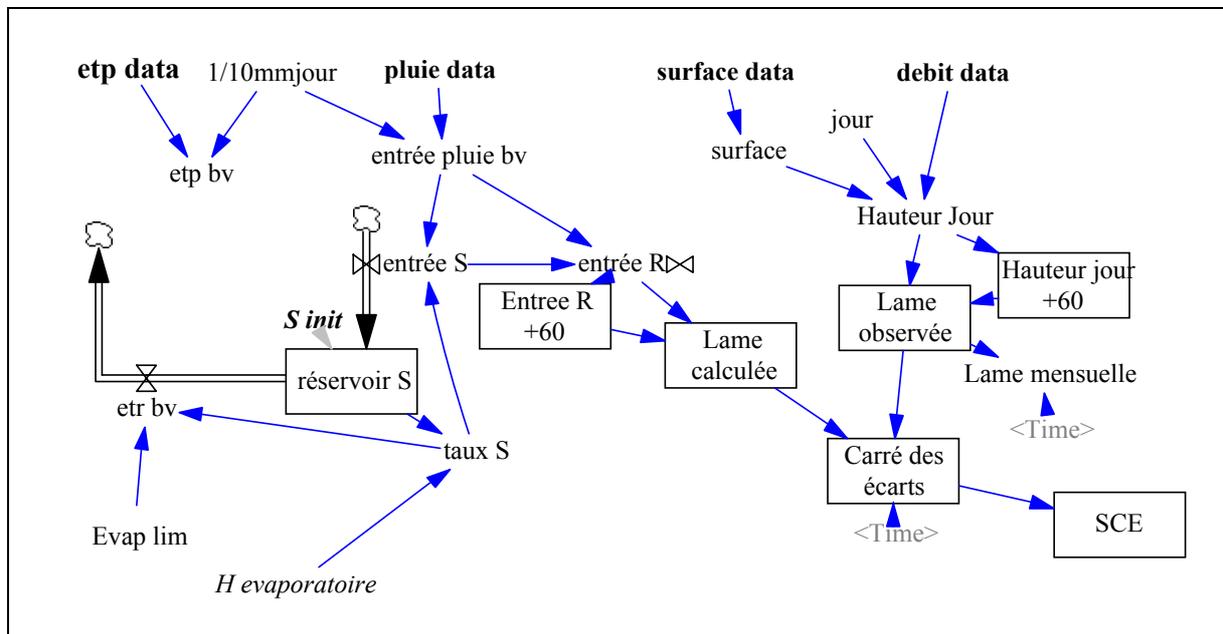


Figure 3.4.3. Représentation schématique du modèle *grprod2*

Sa partie production est identique à celle du modèle *moder*. Elle est composée d'un seul réservoir, le réservoir sol S. Il régit toujours la répartition de la pluie brute entre lui-même et la pluie nette. Sa capacité est H évaporatoire et son taux de remplissage taux S. Sa sortie unique est toujours le prélèvement occasionné par l'ETR, donnée par la relation :

$$\text{ETR} = \text{taux S} \times \text{Evap lim}$$

En revanche, sa partie transfert a été supprimée et remplacée par des lames écoulées et observées. L'étude des coefficients de corrélation a montré qu'il était nécessaire de considérer un décalage "bimensuel". Il faut prendre une période de temps suffisamment longue pour s'affranchir du décalage entre la pluie m et la lame m+1. Sous Vensim®, le pas de temps utilisé n'est pas un pas de temps au sens calendaire du terme. Les notions de mois, jours et décades ne sont pas accessibles sous Vensim®, c'est pourquoi on utilise une valeur de 60 jours pour reproduire la période de cumul sur deux mois. Nous avons, donc, utilisé un réservoir "fictif" pour cumuler les lames écoulées observées et un autre pour cumuler les lames écoulées calculées par la fonction de production. Ce réservoir peut s'apparenter à un artefact numérique pour reproduire un stockage. Au jour j, ce réservoir contient la lame écoulée entre j-60 et j. La fonction carré des écarts va, tous les 60 jours, établir la comparaison entre les valeurs calculées et les valeurs observées.

La calibration du modèle se fait donc sur la minimisation de la somme du carré des écarts, nommée SCE sous Vensim®, entre la lame écoulée produite et la lame écoulée observée.

Ce changement dans la structure du modèle implique une diminution de paramètres à caler : de cinq dans la version *moder*, nous passons à deux dans la version *grprod2* (Evap lim et H évaporatoire).

Il convient, maintenant, de vérifier la validité de ce nouveau modèle.

Dans un premier temps, nous avons effectué le calage de l'ensemble de nos bassins versants sur le modèle complet *moder*, décrit précédemment. Les résultats de cette simulation sont présentés dans le tableau 3.4.2. On obtient une certaine qualité de calage par l'intermédiaire du payoff "journalier".

BV	Qsp ref (m3/s)	Années	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	DELAI (jours)	H ref (m)	Nervosité	Payoff "journalier"
Bou	0.000173	1981-1985	0.017	0.976	5.30	0.003	1.41	-40.434
Bandama	0.00021	1981-1985	0.018	0.859	1.00	0.010	5.00	-4.137
Banifing	0.0006483	1978-1980	0.009	0.697	5.18	0.051	3.91	-23.325
Banifing	0.000609	1984-1985	0.016	0.043	15.00	0.022	1.34	-33.438
Bagoé	0.000725	1968-1971	0.024	0.026	15.00	0.027	1.34	-1159.295
Bagoé	0.000386	1973-1976	0.032	0.197	10.13	0.015	2.23	-405.542
Bagoé	0.000396	1981-1985	0.011	0.728	7.67	0.067	5.00	-214.509
Doundian	0.000386	1980-1984	0.012	0.738	1.00	0.015	1.64	-6.420
Douni	0.000392	1983-1986	0.012	0.825	1.81	0.000	1.00	-1.239
Lafigue	0.000347	1981-1984	0.016	0.359	1.00	0.003	1.47	-2.701
Lokpoho	0.0004119	1983-1985	0.014	0.609	1.84	0.046	5.00	-9.676
Sien (Mass.)	0.000304	1981-1986	0.020	0.819	12.94	0.001	1.00	-45.848
Sien (Naf.)	0.000485	1977-1984	0.013	1.243	1.00	0.026	3.57	-17.641
Solomougou	0.000336	1983-1986	0.019	0.631	3.43	0.014	5.00	-28.184
Yani	0.00077	1980-1981	0.014	1.018	12.13	0.009	1.00	-15.245
Yoreloro	0.0002589	1982-1984	0.037	0.008	14.40	0.085	5.00	-7.517

Tableau 3.4.2. Résultats des calages sous *moder*.

Dans un second temps, il s'agit de caler la partie production de ces mêmes bassins par l'utilisation de modèle *grprod2*. On obtient un certain jeu de paramètres, pour les deux variables Evap lim et H évaporatoire, et une qualité de calage par le payoff "journalier". Les résultats de cette simulation sont présentés dans le tableau 3.4.3.

La troisième étape consiste à reporter les valeurs d'Evap lim et H évaporatoire, obtenues par *grprod2*, dans le modèle complet *moder*, afin de ne caler que la partie transfert. Les résultats de cette simulation, nommée *transf*, sont donnés dans le tableau 3.4.4.

L'analyse des résultats des simulations *moder* et *transf*, par l'intermédiaire des payoffs "journaliers", donne des qualités de calage sensiblement équivalentes malgré des jeux de paramètres différents. On note toutefois une petite amélioration des résultats pour quatre bassins : Bagoé (1968-1971), Doundian, Douni et Lokpoho. En terme de pourcentage, les améliorations varient de 0.5% (Bagoé, 1968-1971) à 6.9% (Lokpoho). En revanche, on note une forte dégradation des résultats pour quatre autres bassins : Banifing (1984-1985), Bagoé (1973-1976 et 1981-1985), Sien à Massadougou et Solomougou. En terme de pourcentage,

ces dégradations varient de 3.6% (Bandama) à 88.4% (Banifing, 1984-1985). Mais comme les résultats sont du même ordre de grandeur, on considère que cette manière de procéder n'engendre pas de différences significatives. La structure du modèle *grprod2* est donc retenue pour les simulations futures, qui correspondent aux tests de différentes fonctions de production.

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	Payoff journalier
Bou	3710	1981-1985	1826	0.013	1.332	-0.00030
Bandama	368	1981-1985	1826	0.013	1.281	-0.00022
Banifing	990	1978-1980	1096	0.009	0.948	-0.00109
Banifing	990	1984-1985	731	0.039	0.015	-0.00230
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.010	1.244	-0.00451
Bagoé	4700	1973-1976	1461	0.023	1.244	-0.00190
Bagoé	4700	1981-1985	1826	0.010	1.148	-0.00375
Doundian	650	1980-1984	1827	0.011	1.052	-0.00182
Douni	120	1983-1986	1461	0.008	1.664	-0.00076
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.011	0.738	-0.00014
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.013	1.407	-0.00005
Sien (Mass.)	1325	1981-1986	2191	0.018	1.190	-0.00102
Sien (Naf.)	615	1977-1984	2922	0.012	1.378	-0.00248
Solomougou	1510	1983-1986	1461	0.017	0.863	-0.00021
Yani	1013	1980-1981	731	0.014	1.198	-0.00036
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.012	1.051	-0.00196

Tableau 3.4.3. Résultats des calages sous *grprod2*.

BV	Qsp ref (m3/s)	Années	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	DELAI (jours)	H ref (m)	Nervosité	Payoff journalier
Bou	0.000173	1981-1985	0.013	1.332	5.08	0.003	1.54	-44.506
Bandama	0.00021	1981-1985	0.013	1.281	1.00	0.010	5.00	-4.287
Banifing	0.0006483	1978-1980	0.009	0.948	5.37	0.044	4.13	-24.547
Banifing	0.000609	1984-1985	0.039	0.015	15.00	0.010	1.00	-63.014
Bagoé	0.000725	1968-1971	0.010	1.244	15.00	0.006	1.00	-1153.682
Bagoé	0.000386	1973-1976	0.023	1.244	6.17	0.003	1.17	-500.696
Bagoé	0.000396	1981-1985	0.010	1.148	7.25	0.050	5.00	-268.321
Doundian	0.000386	1980-1984	0.011	1.052	8.29	0.025	5.00	-6.376
Douni	0.000392	1983-1986	0.008	1.669	1.00	0.002	1.86	-1.224
Lafigue	0.000347	1981-1984	0.011	0.738	1.00	0.002	1.12	-3.514
Lokpoho	0.0004119	1983-1985	0.013	1.407	2.61	0.017	5.00	-9.007
Sien (Mass.)	0.000304	1981-1986	0.018	1.190	6.02	0.001	1.00	-70.533
Sien (Naf.)	0.000485	1977-1984	0.012	1.378	1.00	0.032	4.24	-23.571
Solomougou	0.000336	1983-1986	0.017	0.863	3.28	0.014	5.00	-38.671
Yani	0.00077	1980-1981	0.014	1.198	11.32	0.009	1.00	-15.838
Yoreloro	0.0002589	1982-1984	0.012	1.051	1.35	0.019	5.00	-7.996

Tableau 3.4.4. Résultats des calages sous *transf*.

Une fois le modèle de production construit, vérifié et validé, la suite de notre étude peut, donc, se focaliser sur la recherche de fonctions de production adaptées à cette région

3.5 RECHERCHE SUR LES FONCTIONS DE PRODUCTIONS

3.5.1 La fonction de production

3.5.1.1 Définition

Les modèles utilisés représentent la transformation pluie-débit sur un bassin versant. La transformation de la pluie en débit à l'exutoire d'un bassin versant est une opération complexe. Elle résulte de la combinaison d'une multitude de processus, schématisée par les hydrologues en deux fonctions successives (figure 3.5.1).

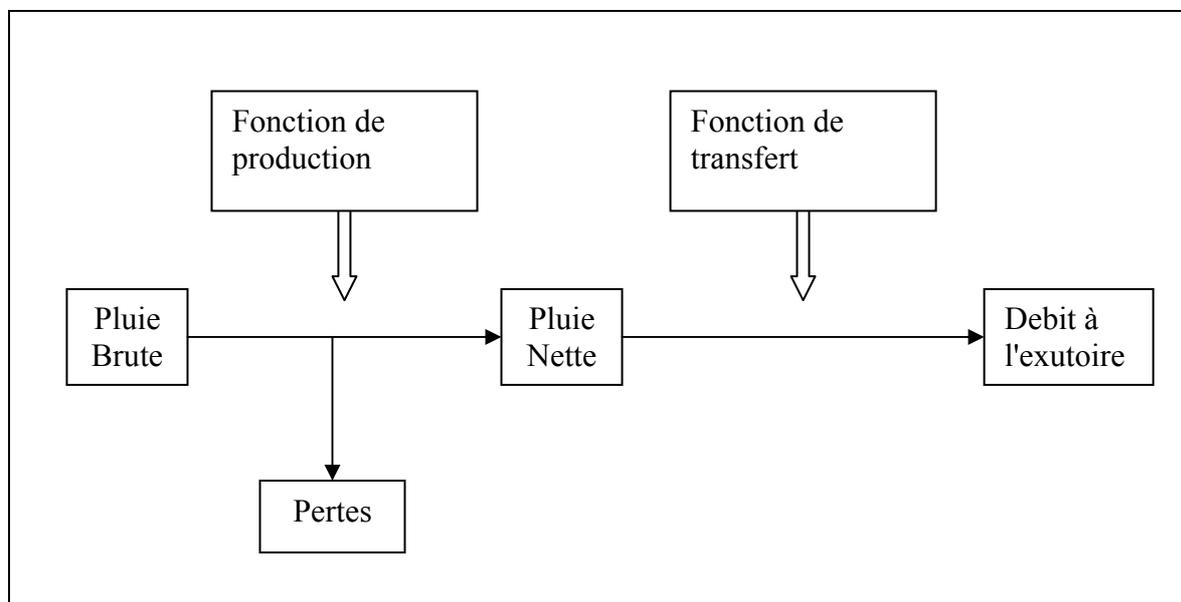


Figure 3.5.1. Décomposition d'un modèle pluie-débit en deux sous-modèles (Ribstein, 1990)

Nous utilisons un modèle réduit à la seule fonction de production avec une échelle de temps journalier sur la période d'observation, et une échelle d'espace qui est la totalité du bassin versant. Les modèles globaux de type modèles à réservoirs sont utilisés sur des pas de temps journaliers. Ils permettent la reconstitution des séries de lames écoulées mensuelles après calage sur des données journalières, calage résultant de la comparaison entre les valeurs calculées avec les valeurs observées. Les lames écoulées, ainsi calculées, peuvent ensuite être modulées selon une fonction de transfert obtenue par ailleurs.

La fonction de production permet de définir la partie de la pluie précipitée (pluie brute) qui va effectivement s'écouler vers l'exutoire du bassin versant considéré. Le résultat de cette transformation est un hyétogramme, courbe de variation de la pluie en fonction du temps, de la pluie nette. Cette pluie nette est calculée par différence entre la pluie brute et les pertes à l'écoulement : infiltration dans les couches superficielles du sol, interception par la végétation, reprise par évaporation, stockage dans les nappes, percolation vers les nappes profondes.

A l'échelle du bassin versant, si les mécanismes de transfert sont relativement bien maîtrisés, il en est tout autrement pour la fonction de production. Sur une parcelle, il est possible de mesurer les différents termes composant les pertes. Sur un bassin versant, il est possible de mesurer en différents points les termes du bilan hydrique, mais l'intégration dans l'espace de ces mesures et de leur variabilité s'avère très difficile, car la plupart sont des phénomènes discontinus dans l'espace et dans le temps (Ribstein, 1990). En plus des caractéristiques de la pluie, la fonction de production dépend du couvert végétal, des pratiques culturales, des types de sols et de leurs états hydriques..., etc.

Toute la difficulté réside dans l'estimation de cette fonction de production. La littérature hydrologique en propose une multitude. Le choix de l'une d'entre elles se fait d'abord en fonction des objectifs fixés.

3.5.1.2 Exemples de fonctions de production

Une recherche, menée dans la littérature hydrologique, a montré qu'il existait une multitude de fonction de production, permettant d'identifier la pluie nette à partir de la pluie brute. Dans la bibliographie, les fonctions de production appliquées à notre zone d'étude se basent sur les relations établies entre les lames précipitées et les lames ruisselées.

Parmi les nombreux exemples à notre disposition, l'indice des précipitations antérieures est majoritairement utilisé. Cet indice, défini par Kohler en 1951, fait appel aux hauteurs de pluies précédant l'averse et à leur plus ou moins grande antériorité. Il permet de connaître l'état d'humidité des sols d'un bassin versant au début de l'averse considérée (Seguis, 1986).

Ribstein (1990) compare, dans sa thèse, sept fonctions de production différentes. Mais les fonctions qu'il a choisies se basent sur une capacité limite d'infiltration et ne tiennent compte que de deux facteurs (pluies et indice des précipitations antérieures).

Il apparaît donc impossible d'utiliser de telles fonctions dans notre situation :

- elles ont été établies pour des événements d'averses et de crues pour des petits bassins versants (moins de 100 km²) au Sahel,
- la fonction évapotranspiration est totalement négligée.

Nous devons donc soit trouver d'autres fonctions de production dans la littérature, soit établir nos propres fonctions.

3.5.2 Les fonctions de production retenues

Il apparaît nécessaire de sélectionner les diverses fonctions de production que nous allons appliquer dans le modèle de production, avant d'effectuer tout travail de traitement de données. Dans un premier temps, la fonction retenue est celle issue du modèle GR3J du CEMAGREF. Puis, nous proposerons trois fonctions différentes où l'ETP n'intervient plus dans la détermination de l'ETR.

3.5.2.1 Le modèle GR3prod

Le modèle *GR3prod* se base sur le modèle GR3J développé par le CEMAGREF en 1989. Le schéma du modèle est donné dans la figure 3.5.2.

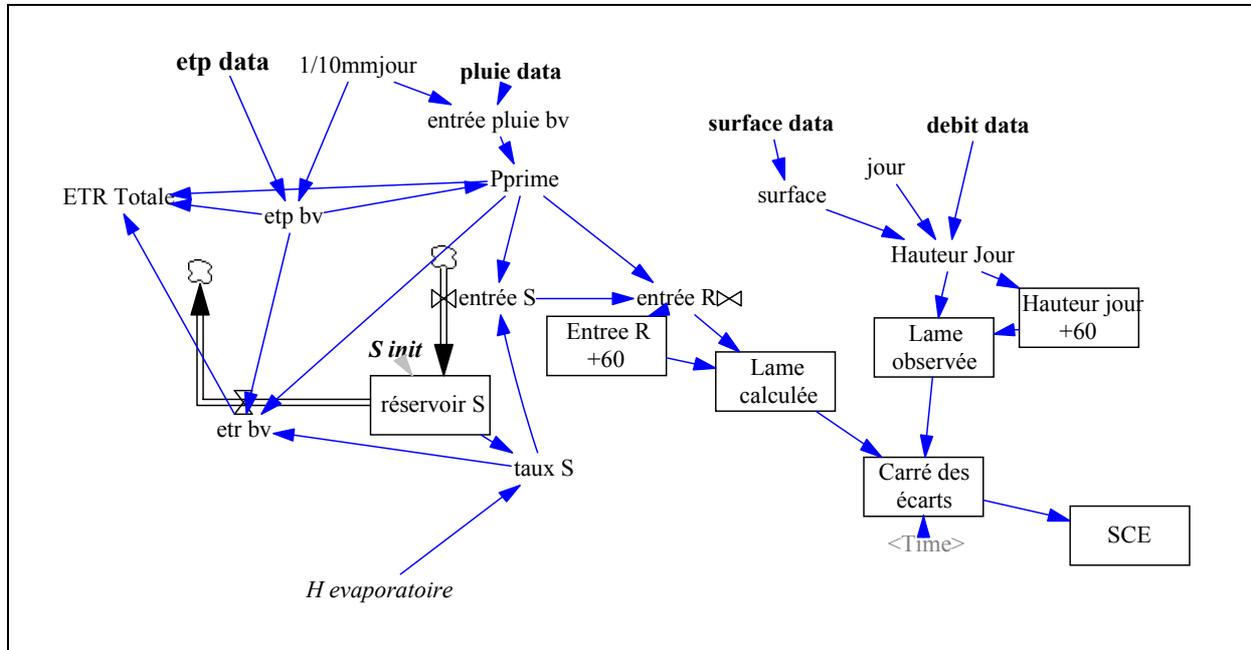


Figure 3.5.2. Schéma du modèle *GR3prod*

L'unique réservoir est le réservoir sol de capacité maximale H évaporatoire. Son niveau de remplissage est soumis à une pluie P_{prime} déterminée par le maximum entre 0 et la différence (entrée pluie bv – $etp\ bv$). Le niveau du réservoir sol permet aussi de définir l'évapotranspiration réelle qu'il pourra délivrer. Cette ETR, puisée dans le réservoir sol, est une fraction de l'ETP et est donnée par la relation :

$$\begin{aligned} \text{si } P_{prime} = 0 \text{ alors } \quad etr\ bv &= etp\ bv \times \sqrt{taux\ S} \\ \text{si } P_{prime} \neq 0 \text{ alors } \quad etr\ bv &= etp\ bv \end{aligned}$$

où $taux\ S$ = taux de remplissage du réservoir sol défini par le rapport entre son niveau et sa capacité maximale de remplissage :

$$taux\ S = \frac{\text{réservoir}\ S}{H_{\text{évaporatoire}}}$$

Ce $taux\ S$ correspond au rapport S/A défini dans le modèle de C. Michel et Editjano (1989), tout comme l'ETP correspond à $E' = (E_p - P)$.

Un autre terme apparaît dans *GR3prod*, l'ETR Totale. Elle correspond à l'évapotranspiration totale à laquelle est soumis le réservoir sol. Elle est exprimée par :

$$\begin{aligned} \text{si } P_{prime} = 0 \text{ alors } \quad ETR\ Totale &= etr\ bv \\ \text{si } P_{prime} \neq 0 \text{ alors } \quad ETR\ Totale &= etp\ bv. \end{aligned}$$

3.5.2.2 Le modèle grprod2

Ce qu'il y a de commun entre les deux phénomènes d'ETP et d'ETR, c'est qu'ils sont tous deux soumis aux mêmes facteurs du climat. La détermination de l'ETR repose essentiellement sur deux facteurs : la demande climatique représentée par l'ETP et la réserve en eau du sol. Dans la zone étudiée, les conditions climatiques imposent une forte demande vis-à-vis de l'évaporation et ne peuvent constituer un facteur limitant. Au contraire, le sol ne dispose pas en permanence d'une réserve d'eau importante. C'est cette notion de réserve qui constitue le facteur limitant bien que l'ETR soit la résultante de facteurs liés au sol, à la végétation et au climat.

Des travaux ont été effectués par Eagleman (1971) pour établir une relation entre le flux relatif d'évapotranspiration et l'humidité des sols. Il traduit ces deux termes par les expressions suivantes :

- $\frac{AE}{PE}$ = flux d'évaporation relative où AE représente l'ETR et PE représente l'ETP

- $MR = \frac{SM - WP}{FC - WP}$ = fraction de la capacité en eau disponible dans le sol

où

- SM représente la teneur en eau du sol,
- WP est la teneur en eau au point de flétrissement (succion de 15 atm),
- FC est la teneur en eau déterminée à la capacité au champ (succion 1/3 atm).

La définition de cette capacité en eau est essentielle pour évaluer l'influence de l'humidité sur le flux d'ETR, puisque selon Eagleman, la perte en eau par évaporation est liée au degré d'attraction des molécules d'eau avec les particules du sol.

Il établit une relation du 3^{ème} degré, où les coefficients sont des coefficients de régression établis pour différents types de végétation et pour une surface totalement humide, et exprimés en fonction de PE :

$$AE = 0.732 - 0.050(PE) + [4.97 - 0.661(PE)^2] \times MR - [8.57(PE) - 1.56(PE)^2] \times MR^2 + [4.35(PE) - 0.88(PE)^2] \times MR^3 \text{ (mm/jour)}$$

Cette équation traduit la perte en eau d'un sol : l'humidité du sol diminue en fonction du taux d'ETR journalier. On observe le développement d'une surface sèche en couche provoquant des interférences dans la diffusion de l'humidité du sol. Lorsque $MR = 0.5$ (la moitié de l'humidité du sol est disponible pour la végétation et l'évaporation) et que PE est forte, alors on observe une décroissance de AE.

Linacre a repris ces travaux en 1973, et aboutit à une simplification de l'équation proposée par Eagleman. Il regroupe les termes de l'équation afin d'obtenir une AE fonction de MR. Sa conclusion est que l'AE prend la valeur minimale entre les deux phases constituant le processus d'assèchement du sol:

- une phase dépendant des conditions atmosphériques qui se traduit par $AE = PE$,
- une phase dépendant du sol traduite par $AE = 16(MR)^2$, ce qui correspond à un taux d'évaporation maximal de 16 mm/j pour une surface humide.

Ce critère implique qu'en tenant compte des deux phases ensemble, l'assèchement du sol, dans des conditions particulières de PE, se produit sans obstacle jusqu'à une fraction résiduelle de la capacité en eau du sol atteignant $\sqrt{PE/4}$.

Ces différents travaux nous amènent à considérer une fonction de production totalement indépendante des conditions climatiques, mais basée sur le concept de capacité en eau d'un sol. Pour cela, nous avons élaboré une fonction de production où l'ETP n'intervient pas, traduite par la relation :

$$ETR = \text{taux S} \times \text{Evap lim}$$

où $\text{taux S} = \text{taux de remplissage du réservoir S}$
 $\text{Evap lim} = \text{taux d'évaporation maximale, si le réservoir S était plein.}$

Cette fonction est une représentation conceptuelle du fonctionnement du sol soumis à l'évaporation.

Le schéma du modèle est donné dans la figure 3.5.3.

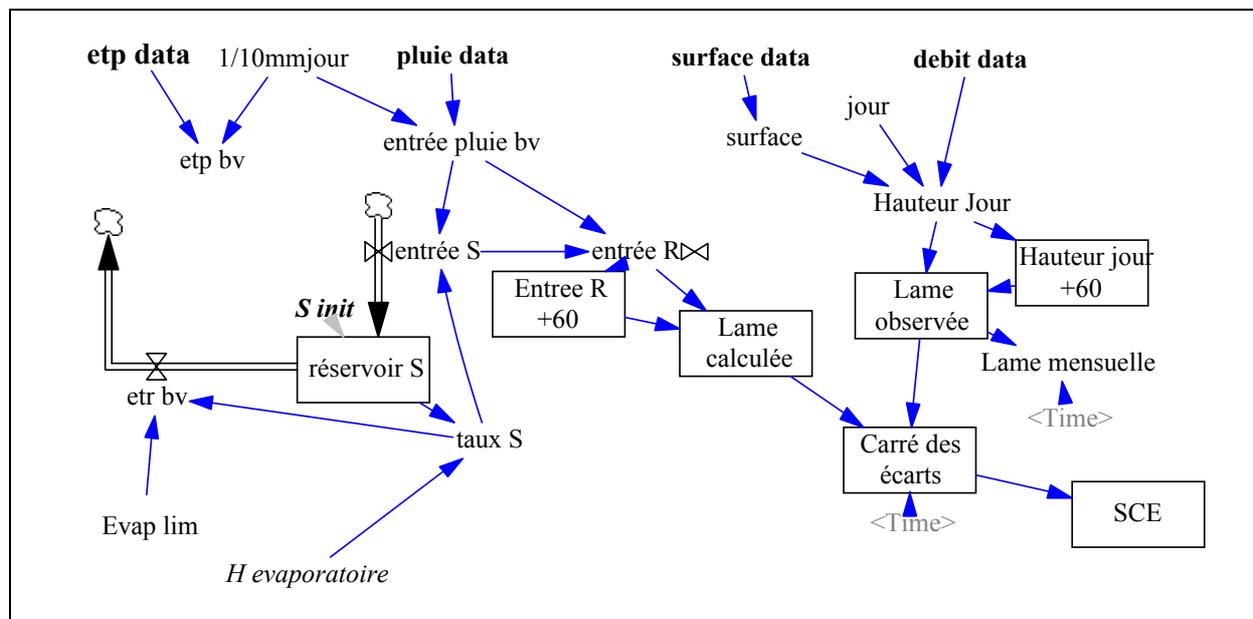


Figure 3.5.3. Schéma du modèle *grprod2*

3.5.2.3 Utilisation de fonctions de pondération

Nous avons vu que les facteurs climatiques, physiologiques et pédologiques, auxquels est liée l'ETR, pouvaient être des facteurs limitants de l'évaporation.

En s'inspirant des travaux sur les indices de précipitations antérieures, nous avons recherché comment faire intervenir les variations saisonnières, conséquences du climat et responsables des variations spatiales du couvert végétal, au sein de la fonction de production.

Pour cela, l'utilisation d'une pondération, par le biais d'une fonction dépendante du pas de temps ou des précipitations, permettrait de rendre compte de ces variations. Nous allons appliquer cette pondération à la fonction retenue pour le modèle *grprod2*.

Le modèle *grprodw*

La première fonction de pondération choisie repose sur la caractérisation des saisons par les précipitations.

Lorsqu'il pleut, le rayonnement solaire est absorbé par la couverture nuageuse et n'atteint que partiellement le sol. Cette absorption engendre une diminution d'énergie au niveau du sol. Cette énergie étant nécessaire pour transformer l'eau liquide du sol en vapeur, on admet une réduction de l'ETR en période de pluie.

De plus, on constate que la répartition des précipitations est différente entre le jour et la nuit. Nous disposons des données à 18h et à 6h de quatre pluviographes implantés dans notre zone d'étude. Les données à 18h correspondent à la quantité d'eau précipitée durant la journée, celles de 6h à la quantité d'eau précipitée durant la nuit. En traçant les graphes de la hauteur des pluies à 18h et à 6h sur la période considérée, on s'aperçoit que la plupart des précipitations ont lieu en fin de journée et durant la nuit (Figure 3.5.4).

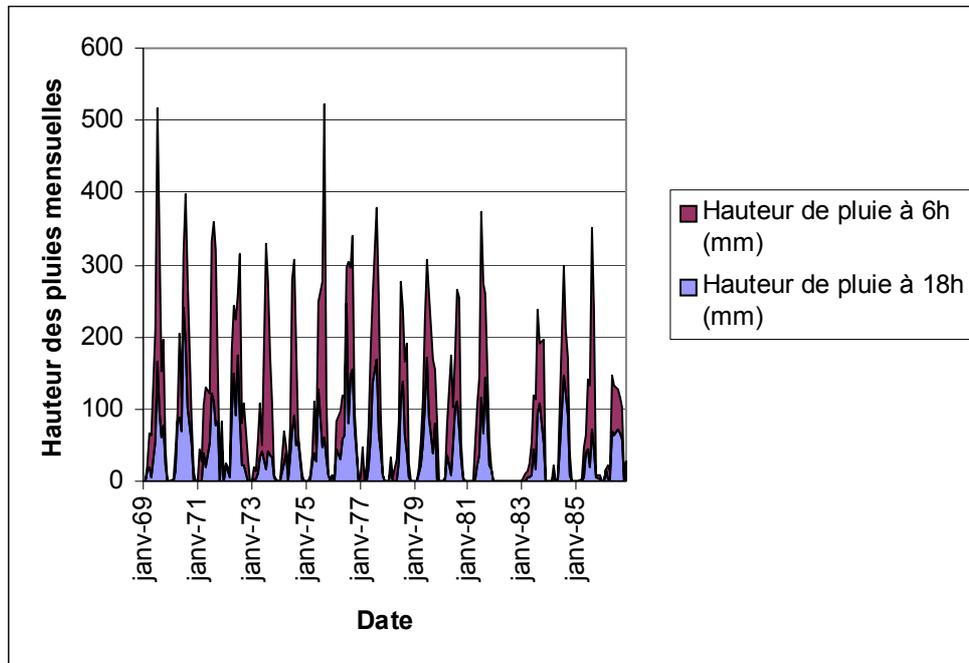


Figure 3.5.4. Comparaison des "pluies de jour" aux "pluies de nuit" pour le poste pluviométrique d'Odienné.

Il est alors possible de calculer la part des pluies tombant dans la journée et celle tombant la nuit. Ces résultats sont donnés dans le tableau 3.5.1.

Une valeur moyenne de 40% de pluies tombant le jour est acceptable pour notre zone d'étude. A partir de ce résultats, nous définissons la première fonction de pondération w comme :

si une pluie $P = 0$ alors $w = 1$
si une pluie $P \neq 0$ alors $w = 0.4$

La fonction de production utilisée dans ce modèle *grprodw*, dont le schéma est donné en figure 3.5.5, est donc défini par : $ETR = w \times Evap \lim \times \text{taux } S$.

N° ORSTOM	Station	Période d'observation	Hauteur de pluie à 18h (mm)	Hauteur de pluie à 6h (mm)	Hauteur totale de pluie (mm)	Pourcentage de pluies à 18h	Pourcentage de pluies à 6h
1090016001	Odienne aéroport	1969-1986	8101	13239	21340	37.96	62.04
1090191181	Korhogo PG1	1962-1972	5494	7941	13435	40.89	59.11
1090191182	Korhogo PG2	1962-1966 et 1967-1971	5126	7595	12721	40.29	59.71
1090191183	Korhogo PG3-PARCE	(Jan-Oct)1967 et 1968-1974	3212	4444	7657	41.95	58.05

Tableau 3.5.1. Comparaison des "pluies de jour" aux "pluies de nuit" pour quatre pluviographes.

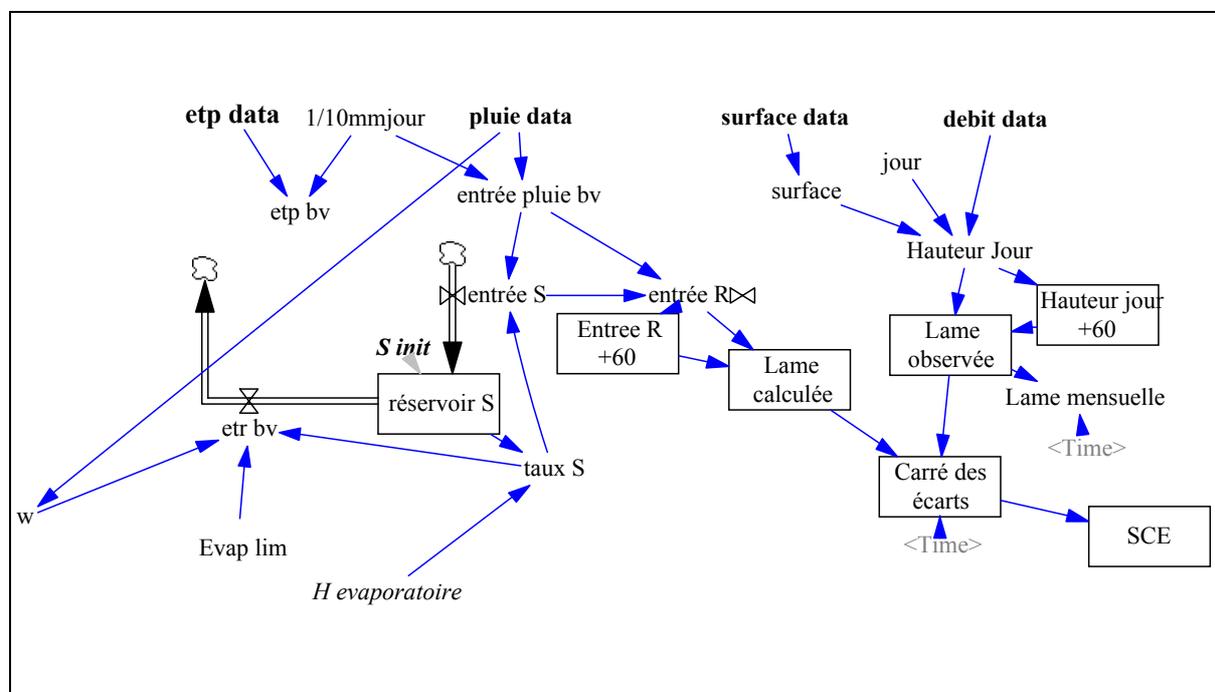


Figure 3.5.5. Schéma du modèle *gprodw*

Notons que la valeur retenue pour la pondération w peut montrer des variations entre:

- la saison sèche et la saison des pluies,
- le début et la fin de la saison des pluies.

Le développement de cet aspect de la pondération w constitue un travail ultérieur au notre et qui permettra certainement d'améliorer le fonctionnement du modèle.

Le modèle *grprod*

Cette deuxième pondération repose sur les variations spatiales de la couverture végétale entre la saison sèche et la saison des pluies.

Il est possible de traduire ces variations par un pourcentage de végétation, basé sur les Indices de Végétation Normalisée (NDVI). Ces indices permettent de caractériser l'état de surface (densité de feuillage, activité chlorophyllienne) à partir des mesures de rayonnement électromagnétique, fournies par le satellite NOAA/AVHRR.

Il n'a pas été possible de faire un traitement statistique complet sur les NDVI. Cependant les connaissances de terrain des hydrologues de l'IRD et le sondage des fichiers images ont permis d'obtenir une approximation proche de la réalité.

Une valeur de 40% est retenue. Elle représente le pourcentage de végétation capable d'évapotranspirer durant la saison sèche.

Cette valeur arbitraire de 40% pourra être modifiée lorsque des études statistiques complètes sur le développement de la végétation auront été effectuées. Elle pourra aussi nécessiter une correction lors d'un changement de contexte géographique et climatique.

Riou (1975) explique les variations du développement végétal avec les saisons. Les premiers mois où la pluie apparaît, le sol est complètement desséché et la végétation quasi-inexistante. Les premières pluies sont donc rapidement évaporées. La saison des pluies s'installant, la végétation se développe et couvre peu à peu le sol. Pendant un certain temps où la végétation est en pleine activité, le sol constitue ses réserves puisqu'il reçoit plus d'eau que la végétation n'en demande. Lorsque les précipitations diminuent à la fin de la saison des pluies, la végétation se maintient en puisant dans les réserves. Lorsque celles-ci sont épuisées, les graminées commencent à disparaître, suivies des arbustes. Si la période d'interruption des pluies est courte, la végétation supporte sans trop de difficulté la saison sèche et il est possible d'observer une végétation permanente.

Nous avons cherché à établir une pondération qui suivrait ce principe de fonctionnement. Cette pondération, nommée v , varie entre 0.4 correspondant à la valeur obtenue par les NDVI pour caractériser le développement de la végétation en saison sèche et 1 marquant un développement maximum de la végétation durant la saison des pluies. L'allure de la fonction de pondération, pour une année, est donnée dans la figure 3.5.6.

Le pas de temps est en jours car le logiciel Vensim® ne peut utiliser de dates. Nous nous sommes basés sur une année de 366 jours pour tenir compte des années bissextiles. Cela induit un décalage de quelques jours pour une période d'observation de plusieurs années, sans provoquer de changements notables dans la modélisation. L'année hydrologique correspondant à l'année calendaire dans cette région, la fonction v pondère l'évapotranspiration à partir du mois de janvier.

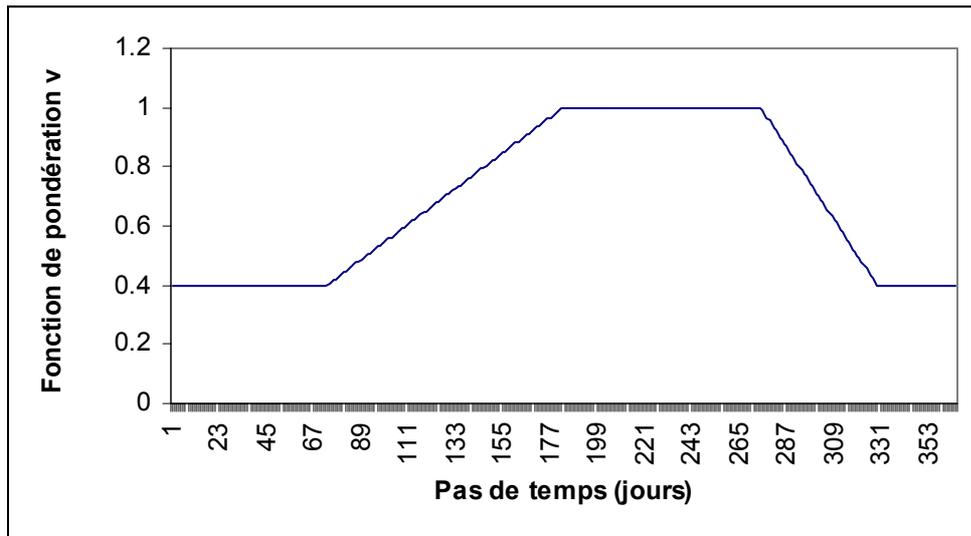


Figure 3.5.6. La fonction de pondération v en fonction du temps

Ainsi, du 1^{er} (début janvier) au 74^{ème} jour (mi-mars) on se trouve en saison sèche. La couverture végétale est minimale; la fonction v prend donc la valeur de 0.4. A partir du 75^{ème} jour et jusqu'au 183^{ème} jour (début juillet), les quelques pluies éparses annonçant le retour de la saison des pluies permettent un développement croissant des végétaux; la fonction v augmente de 0.4 à 1. Du 184^{ème} jour au 275^{ème} jour (fin septembre), la saison des pluies apporte l'eau en quantité suffisante pour avoir un développement de la végétation optimal : la fonction v dessine un plateau et vaut 1. Mais dès le 276^{ème} jour, les précipitations diminuent, marquant la fin de la saison des pluies. La fonction v varie de 1 à 0.4 jusqu'au 328^{ème} jour (fin novembre). Dès lors, la saison sèche s'installe et la végétation dépérit, d'où un plateau de la fonction de pondération v à la valeur 0.4. Ce schéma est répété pour chaque année de la période d'observation.

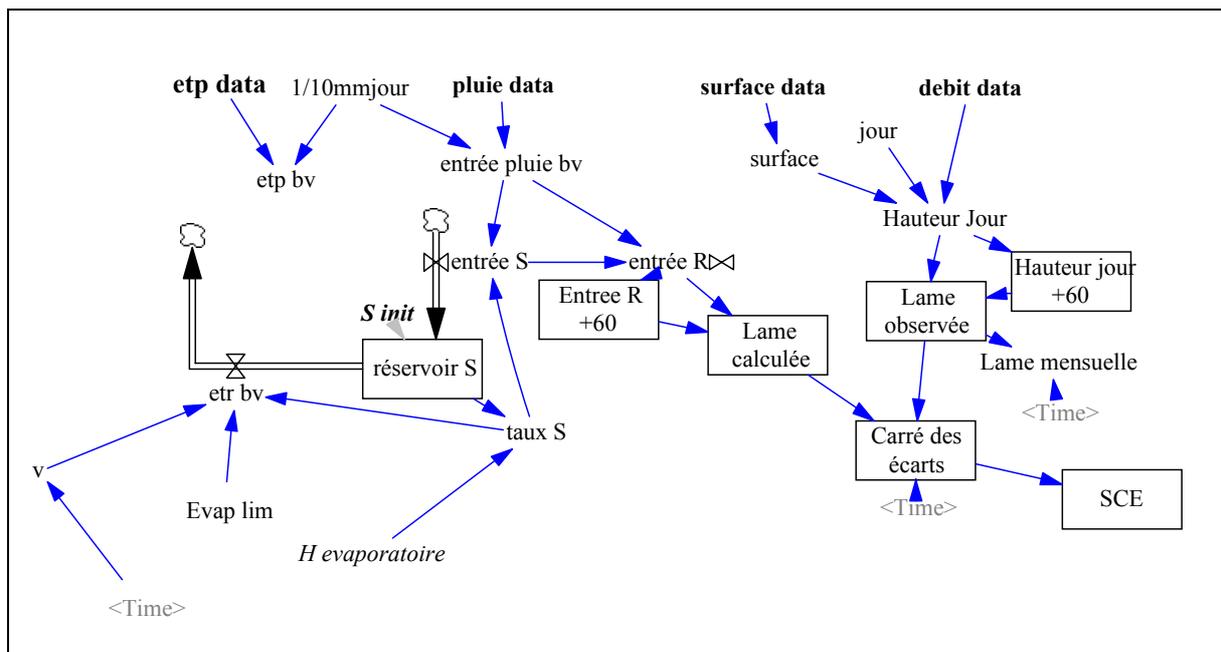


Figure 3.5.7. Schéma du modèle *gprodv*

La fonction de production utilisée dans ce modèle *grprodv*, dont le schéma est donné en figure 3.5.7, est donc définie par :

$$ETR = v \times \text{Evap} \lim \times \text{taux S}$$

3.5.2.4 Conclusion

Les diverses considérations sur la notion d'évaporation nous ont amenés à sélectionner trois fonctions de production où l'ETP n'interviendrait pas. Ces fonctions sont basées sur la relation de l'ETR avec ses facteurs limitants :

- la quantité d'eau disponible dans le sol (fonction *grprod2*),
- les précipitations (fonction *grprodw*),
- le développement de la végétation (fonction *grprodv*).

Ces fonctions de production vont être testées et comparées à la fonction originale, basée sur le modèle GR3J du CEMAGREF.

3.6 CONCLUSION

Cette troisième partie consistait à définir l'architecture du modèle utilisé, ainsi que les différentes fonctions de production que nous allons tester.

Nous avons vu qu'à partir du modèle GR3J développé par C. Michel et Editjano (1989), réécrit sous Vensim®, il était possible de construire un modèle de production où la partie transfert n'est plus prise en compte. Le calcul des divers coefficients de corrélation permet d'assimiler la lame précipitée à la lame écoulée décalée de deux mois. La comparaison des résultats de simulation entre les modèles *moder* (calage de la production et du transfert) et *transf* (calage de la production par *grprod2*, puis calage du transfert par *moder*) permet de valider le choix d'un modèle axé sur la partie production.

La seconde étape consistait, à partir des définitions d'évapotranspiration potentielle et réelle ainsi que des divers travaux menés sur ces deux termes du bilan hydrique, de proposer des fonctions de production applicables dans cette région, et où l'évapotranspiration réelle ne serait plus liée à l'évapotranspiration potentielle. Nous avons donc utilisé trois formulations basées sur chacun des facteurs limitants de l'évapotranspiration réelle.

La dernière étape consiste à insérer ces diverses formulations dans le modèle de production élaboré durant la première phase de cette étude, afin de caler les différents paramètres pour chaque bassin versant de la zone étudiée. Le même calage sera effectué pour la fonction de production originale, basée sur le modèle GR3J du CEMAGREF où l'évapotranspiration réelle est fonction de l'évapotranspiration potentielle. Il s'agit, donc maintenant, d'analyser les résultats de ces simulations pour en tirer les conséquences quant à la robustesse et à la sensibilité des fonctions de productions testées.

QUATRIEME PARTIE

4. QUATRIEME PARTIE

INTERPRETATION DES RESULTATS

S'agissant des résultats obtenus, on peut tout d'abord distinguer les résultats "bruts" issus des calages pour chacune des fonctions de production sélectionnées. La fonction critère permettant une appréciation qualitative des résultats, nous analyserons le comportement du critère de Nash à l'issue des calages. Dans un second temps, nous effectuerons une analyse plus fine portant sur une étude comparative de graphiques hydrologiques, comme le tracé des lames écoulées calculées et observées et l'interprétation des particularités de la fonction évapotranspiration.

4.1 CALAGE DES MODELES

4.1.1. Mode opératoire

Nous avons procédé au calage des modèles retenus (*GR3prod*, *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*) sur l'ensemble des stations années disponibles. Suite à la démarche adoptée dans ce mémoire, il convient d'analyser les valeurs des paramètres calés suivant chaque fonction de production utilisée.

4.1.1.1 Calage du modèle GR3prod

La première fonction de production que nous avons testée est celle issue de la réécriture du modèle GR3J du CEMAGREF sous Vensim®. Ce modèle, nommé *GR3prod*, a été présenté dans la troisième partie. Il comporte seulement un paramètre à optimiser H évaporatoire. Le calage de ce modèle a été effectué sur l'ensemble des 67 stations années disponibles. L'ensemble des caractéristiques des calages est regroupé dans le tableau 4.1.1.

Dans cette version de GR3J, il n'y a qu'un seul paramètre à caler, H évaporatoire, qui représente la capacité du réservoir S. H évaporatoire moyen est de 0.963 m. Il varie de 0.436 m (Yoreloro) à 2.545 m (Bagoé, 1973-1976). Cinq bassins versants présentent des valeurs de H évaporatoire supérieures à la moyenne (Bandama, Bagoé 1973-1976, Sien à Nafana, Solomougou et Yani).

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	H évaporatoire (m)	"Payoff"	Payoff "journalier"
Bou	3710	1981-1985	1826	0.87722	-3.46719	-0.00190
Bandama	368	1981-1985	1826	1.00073	-3.54122	-0.00194
Banifing	990	1978-1980	1096	0.46631	-5.27853	-0.00482
		1984-1985	731	0.54083	-3.90019	-0.00534
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.88540	-38.12565	-0.02610
		1973-1976	1461	2.52452	-8.44508	-0.01223
		1981-1985	1826	0.60748	-17.86527	-0.00978
Doundian	650	1980-1984	1827	0.95058	-15.03019	-0.00823
Douni	120	1983-1986	1461	0.54130	-10.76134	-0.00737
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.61127	-4.12281	-0.00282
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.80690	-0.02928	-0.00003
Sien (Mass.)	1510	1983-1986	1461	0.85031	-14.39054	-0.00492
Sien (Naf.)	1325	1981-1986	2191	1.49006	-17.36720	-0.00793
Solomougou	615	1977-1984	2922	1.25877	-0.76960	-0.00026
Yani	1013	1980-1981	731	1.55709	-1.16387	-0.00159
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.43624	-7.59232	-0.00693

Tableau 4.1.1. Caractéristiques des calages du modèle *GR3prod*

Les payoffs journaliers permettent d'établir une comparaison avec les autres modèles employés. Pour *GR3prod*, le payoff journalier moyen est de -0.00639 . Il est compris entre -0.00003 (Lokpoho) et -0.02610 (Bagoé, 1968-1971). Sept bassins versants obtiennent des valeurs de payoffs journaliers supérieures à la moyenne.

L'examen des valeurs des paramètres contenus dans le tableau 4.1.1 montre une bonne qualité d'ensemble des calages effectués à l'aide du modèle *GR3prod*.

4.1.1.2 Calage du modèle *grprod2*

La seconde fonction de production que nous avons testée est celle issue de la prise en compte du niveau d'eau disponible dans le réservoir sol, équivalent à un taux d'humidité. Ce modèle, nommé *grprod2*, a été présenté dans la troisième partie. Il comporte deux paramètres à optimiser : Evap lim et H évaporatoire. Le calage de ce modèle a été effectué sur l'ensemble des 67 stations années disponibles. L'ensemble des caractéristiques des calages est regroupé dans le tableau 4.1.2.

Dans ce modèle, les paramètres à caler sont au nombre de deux : H évaporatoire et Evap lim. La capacité H évaporatoire a une valeur moyenne de 1.110 m. Ce terme varie de 0.015 m (Banifing, 1984-1985) à 1.664 m (Douni). Dix bassins versant présentent des valeurs de H évaporatoire supérieures à la moyenne.

Le second paramètre du calage, Evap lim, a une valeur moyenne de 0.0146 m/j. Cette valeur moyenne est du même ordre de grandeur que le taux d'évaporation maximum défini par Linacre (1973). Ce taux avait été défini dans des conditions d'assèchement d'un sol par l'évapotranspiration réelle, nommée AE par Eagleman (1971) et repris par Linacre, dépendant des conditions d'humidité de ce même sol. Quatre bassins versants présentent des valeurs d'Evap lim supérieures à la moyenne (Banifing 1984-1985, Bagoé 1973-1976, Sien à

Massadougou et Solomougou). Ce paramètre est compris entre 0.009 m/j (Banifing, 1978-1980) et 0.039 m/j (Banifing, 1984-1985).

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	Payoff	Payoff "journalier"
Bou	3710	1981-1985	1826	0.01323	1.33196	-0.53907	-0.00030
Bandama	368	1981-1985	1826	0.01330	1.28106	-0.39481	-0.00022
Banifing	990	1978-1980	1096	0.00893	0.94770	-1.19739	-0.00109
		1984-1985	731	0.03864	0.01493	-1.68259	-0.00230
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.00984	1.24413	-6.58441	-0.00451
		1973-1976	1461	0.02344	1.24405	-2.77536	-0.00190
		1981-1985	1826	0.00986	1.14845	-6.85100	-0.00375
Doundian	650	1980-1984	1827	0.01085	1.05199	-3.32046	-0.00182
Douni	120	1983-1986	1461	0.00784	1.66438	-1.10975	-0.00076
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.01076	0.73775	-0.20703	-0.00014
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.01295	1.40739	-0.05338	-0.00005
Sien (Mass.)	1325	1981-1986	2191	0.01835	1.19043	-2.24545	-0.00102
Sien (Naf.)	615	1977-1984	2922	0.01213	1.37803	-7.24137	-0.00248
Solomougou	1510	1983-1986	1461	0.01735	0.86340	-0.30367	-0.00021
Yani	1013	1980-1981	731	0.01417	1.19812	-0.26644	-0.00036
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.01177	1.05090	-2.14853	-0.00196

Tableau 4.1.2. Caractéristiques des calages du modèle *grprod2*

Le payoff journalier moyen est de -0.00143 . Il varie de -0.00005 (Lokpoho) à -0.00451 (Bagoé, 1968-1971). Sept bassins versants montrent des valeurs supérieures à la moyenne.

4.1.1.3 Calage du modèle *grprodw*

La troisième fonction de production que nous avons testée est celle issue de la prise en compte des variations des précipitations. Ce modèle, nommé *grprodw*, a été présenté dans la troisième partie. Il comporte deux paramètres à optimiser : Evap lim et H évaporatoire. Le calage de ce modèle a été effectué sur l'ensemble des 67 stations années disponibles. L'ensemble des caractéristiques des calages est regroupé dans le tableau 4.1.3.

Ce modèle utilise une fonction de production basée sur la pondération de l'ETR par les précipitations. Le calage s'effectue sur deux paramètres qui sont, là aussi, H évaporatoire et Evap lim. H évaporatoire moyen est de 1.188 m. Il varie de 0.035 m (Banifing, 1978-1980) à 2 m (Douni et Yoreloro). Neuf bassins versants présentent des valeurs de H évaporatoire supérieures à la moyenne. Pour le paramètre Evap lim, la moyenne est de 0.020 m/j, là aussi du même ordre de grandeur que les travaux de Linacre (1973). Il est compris entre 0.009 m/j (Douni) et 0.039 m/j (Banifing, 1978-1980).

Les payoffs journaliers ont une valeur moyenne de -0.0013 . Ils sont compris entre -0.00004 (Lokpoho) et -0.00366 (Bagoé, 1968-1971). Sept bassins versants montrent des valeurs de payoffs journaliers supérieures à la moyenne.

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	Payoff	Payoff "journalier"
Bou	3710	1981-1985	1826	0.01862	1.38419	-0.45673	-0.00025
Bandama	368	1981-1985	1826	0.01846	1.30942	-0.28687	-0.00016
Banifing	990	1978-1980	1096	0.03869	0.03542	-2.76193	-0.00252
		1984-1985	731	0.01075	1.04401	-0.92561	-0.00127
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.01507	1.30978	-5.34492	-0.00366
		1973-1976	1461	0.03840	1.36769	-2.68585	-0.00184
		1981-1985	1826	0.01435	1.18495	-5.65081	-0.00309
Doundian	650	1980-1984	1827	0.01444	1.06625	-2.64428	-0.00145
Douni	120	1983-1986	1461	0.00917	2.00000	-1.07438	-0.00074
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.01701	0.57191	-0.18804	-0.00013
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.01504	1.39891	-0.04662	-0.00004
Sien (Mass.)	1510	1983-1986	1461	0.03035	0.67343	-0.19544	-0.00013
Sien (Naf.)	1325	1981-1986	2191	0.03121	1.04537	-2.06066	-0.00094
Solomougou	615	1977-1984	2922	0.01706	1.42318	-5.91929	-0.00203
Yani	1013	1980-1981	731	0.01652	1.19400	-0.23113	-0.00032
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.01259	2.00000	-2.17834	-0.00199

Tableau 4.1.3. Caractéristiques des calages du modèle *grprodw*

4.1.1.4 Calage du modèle *grprodv*

La quatrième fonction de production que nous avons testée est celle issue de la prise en compte des variations de développement de la végétation. Ce modèle, nommé *grprodv*, a été présenté dans la troisième partie. Il comporte deux paramètres à optimiser : Evap lim et H évaporatoire. Le calage de ce modèle a été effectué sur l'ensemble des 67 stations années disponibles. L'ensemble des caractéristiques des calages est regroupé dans le tableau 4.1.4.

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	Payoff	Payoff "journalier"
Bou	3710	1981-1985	1826	0.01721	1.24162	-0.72348	-0.00040
Bandama	368	1981-1985	1826	0.01694	1.15541	-0.58853	-0.00032
Banifing	990	1978-1980	1096	0.01155	0.94262	-2.08990	-0.00191
		1984-1985	731	0.02622	0.02940	-2.11598	-0.00289
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.01300	1.15755	-8.51957	-0.00583
		1973-1976	1461	0.02833	0.88449	-2.89157	-0.00198
		1981-1985	1826	0.01293	1.10072	-8.96781	-0.00491
Doundian	650	1980-1984	1827	0.01408	0.93010	-4.69632	-0.00257
Douni	120	1983-1986	1461	0.01168	1.17714	-1.29858	-0.00089
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.01240	0.83677	-0.32717	-0.00022
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.01645	1.34131	-0.06718	-0.00006
Sien (Mass.)	1510	1983-1986	1461	0.01906	0.81183	-0.39030	-0.00027
Sien (Naf.)	1325	1981-1986	2191	0.02030	1.17621	-2.42766	-0.00111
Solomougou	615	1977-1984	2922	0.01565	1.23837	-10.54880	-0.00361
Yani	1013	1980-1981	731	0.01914	1.22141	-0.44546	-0.00061
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.01509	0.97532	-2.26974	-0.00207

Tableau 4.1.4. Caractéristiques des calages du modèle *grprodv*

Ce modèle utilise une fonction de production basée sur la pondération de l'ETR par le développement de la végétation. Les paramètres à caler sont identiques à ceux du modèle *grprod2*. H évaporatoire moyen est de 1.014 m. Il varie de 0.029 m (Banifing, 1984-1985) à 1.341 m (Lokpoho). Neuf bassins versants montrent des valeurs de H évaporatoire supérieures à la moyenne. Evap lim moyen vaut 0.017 m/j, valeur qui, encore une fois, concorde avec les travaux de Linacre (1973). Il est compris entre 0.012 m/j (Douni et Banifing 1978-1980) et 0.028 m/j (Bagoé, 1973-1976). Sept bassins montrent des valeurs d'Evap lim supérieures à la moyenne.

Le payoff journalier moyen est de -0.00185 . Il varie entre -0.00006 (Lokpoho) et -0.00583 (Bagoé, 1968-1971). Huit bassins versants présentent des valeurs supérieures à la moyenne.

4.1.1.5 Conclusion

Aux termes des calages des quatre fonctions de productions effectués sur l'ensemble des bassins versants, quelques points sont à retenir.

En ce qui concerne H évaporatoire, trois bassins versants donnent systématiquement des valeurs supérieures à la moyenne, quelque soit la fonction de production choisie : Bandama, Sien (Nafana-Sienso) et Yani. La valeur H évaporatoire moyenne la plus faible est donnée par le modèle *GR3prod* et la plus forte est donnée par le modèle *grprodw*. La dispersion des valeurs de ce paramètre est plus ou moins prononcée selon la fonction choisie. Ce sont les modèles *GR3prod* et *grprodv* qui montrent le plus de dispersion pour les valeurs de H évaporatoire. La fonction de production *grprodw* est assez brutale dans la manière de pondérer l'ETR. Son utilisation peut engendrer des discontinuités mathématiques, qui se retrouvent dans la dispersion des valeurs du paramètre H évaporatoire.

Le paramètre Evap lim est calé dans les trois modèles *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*. Trois bassins montrent, là aussi, des valeurs d'Evap lim systématiquement supérieures à la moyenne, quelque soit la fonction de production utilisée : Bagoé (1973-1976), Sien (Massadougou et Solomougou). La valeur Evap lim moyenne la plus faible est donnée par le modèle *grprod2* et la plus forte est donnée par le modèle *grprodw*. Pour ce paramètre, le modèle *grprodv* montre une dispersion nettement plus faible que les modèles *grprod2* et *grprodw*.

Les payoffs journaliers donnent une première idée de la qualité du calage. On peut dire, d'après les résultats, que l'ensemble des calages réalisés est d'assez bonne qualité. Quatre bassins versants montrent des valeurs de payoffs journaliers systématiquement supérieures à la moyenne : Bagoé (1968-1971, 1973-1976, 1981-1985), Doundian, Sien (Nafana) et Yoreloro. La valeur du payoff journalier moyenne la plus faible est donnée par le modèle *grprodw* et la plus forte est donnée par le modèle *GR3prod*. La dispersion des valeurs de payoffs journaliers est la plus importante pour le modèle *GR3prod*.

L'étude des valeurs des paramètres calés et, particulièrement, celle des payoffs journaliers permet de se rendre compte de la qualité des calages réalisés. Mais cette étude n'est pas suffisante pour retenir ou éliminer une fonction de production. Pour cela, nous devons analyser les valeurs de la fonction critère.

4.1.2 Fonction critère

Les problèmes d'optimisation des paramètres se rencontrent très fréquemment en hydrologie. L'association des techniques d'optimisation avec une fonction critère constitue une aide au calage, dans la mesure où elle permet d'évaluer et de comparer les résultats obtenus avec les différents modèles.

Il existe, dans la littérature, un très grand nombre de fonctions critères qui s'expriment par différentes formulations mathématiques faisant, cependant, toujours intervenir l'écart entre les valeurs observées et les valeurs calculées auquel on applique diverses transformations ou pondérations. Le choix de la formulation n'est pas sans influence sur la qualité du calage obtenu. Telle fonction critère aura un poids plus important sur les étiages, telle autre sur les crues.

Le critère de Nash, proposé par Nash et Sutcliffe en 1970, est couramment utilisé en hydrologie. Il est défini par :

$$C_Q = 1 - \frac{\sum (Q_C - Q_0)^2}{\sum (Q_0 - Q_{m0})^2}$$

où Q_C = débit calculé,
 Q_0 = débit observé,
 Q_{m0} = débit moyen observé.

Ce critère tend vers 1 lorsque Q_C tend vers Q_0 . Il est possible de faire une analogie de ce critère avec une régression. Le terme $\sum (Q_C - Q_{m0})^2$ correspond à un terme de variance de la série observée. Le terme $\sum (Q_C - Q_0)^2$ peut être assimilé à un terme de variance résiduelle. La formulation du critère traduit donc une certaine "efficacité" (ou "rendement") du modèle, comparable au coefficient de détermination d'une régression (Dezetter, 1991).

Aussi, comme les modèles utilisés calent les lames écoulées calculées par rapport aux lames écoulées observées, le critère de Nash est utilisé sous la forme :

$$C_L = 1 - \frac{\sum (L_C - L_0)^2}{\sum (L_0 - L_{m0})^2}$$

où L_C = lame écoulee calculée,
 L_0 = lame écoulee observée,
 L_{m0} = lame écoulee moyenne observée.

Les critères de Nash ont été calculés pour les lames "bimensuelles" (tous les 60 jours), par référence au calage, et pour les lames "mensuelles" (tous les 30 jours), car c'est le pas de temps le plus souvent utilisé lorsqu'on s'intéresse aux ressources en eau. Les valeurs des critères sont données dans le tableau 4.1.5.

L'ensemble des valeurs du critère de Nash montre, quelque soit la fonction de production utilisée, des résultats satisfaisants à quelques exceptions près.

Bassin Versant	Modèle <i>GR3prod</i>		Modèle <i>grprod2</i>		Modèle <i>grprodw</i>		Modèle <i>grprodv</i>	
	mensuel	bimensuel	mensuel	bimensuel	mensuel	bimensuel	mensuel	bimensuel
Bou	0.792	0.768	0.827	0.810	0.844	0.822	0.783	0.769
Bandama	0.847	0.805	0.878	0.888	0.891	0.889	0.858	0.905
Banifing	0.660	0.708	0.624	0.709	0.207	0.352	0.494	0.572
	0.753	0.681	0.077	0.026	0.757	0.700	0.240	0.156
Bagoé	0.577	0.624	0.444	0.456	0.503	0.536	0.395	0.381
	0.538	0.601	0.583	0.581	0.752	0.618	0.691	0.616
	0.774	0.742	0.675	0.625	0.741	0.694	0.566	0.508
Doundian	0.635	0.656	0.666	0.668	0.705	0.714	0.597	0.578
Douni	0.459	0.523	0.608	0.635	0.612	0.639	0.581	0.605
Lafigue	0.663	0.638	0.858	0.864	0.889	0.894	0.862	0.877
Lokpoho	0.917	0.988	0.692	0.872	0.718	0.890	0.641	0.840
Sien (Mass.)	0.897	0.925	0.567	0.657	0.914	0.931	0.858	0.886
Sien (Naf.)	0.434	0.506	0.744	0.809	0.585	0.665	0.533	0.634
Solomougou	0.772	0.838	0.879	0.904	0.768	0.820	0.683	0.760
Yani	0.621	0.709	0.619	0.718	0.667	0.758	0.393	0.480
Yoreloro	0.344	0.302	0.192	0.109	0.278	0.265	0.151	0.079
MOYENNE	0.668	0.688	0.621	0.646	0.677	0.699	0.583	0.603

Tableau 4.1.5. Résultats des critères de Nash mensuels et bimensuels pour l'ensemble des bassins versant étudiés

Regardons les valeurs du critère au pas de temps bimensuel, correspondant au pas de temps utilisé pour le calage.

Pour le modèle *GR3prod*, le critère de Nash atteint une moyenne de 68.8%. Il varie entre 98.8% (Lokpoho) et 30.2% (Yoreloro). Huit bassins versants montrent un critère supérieur à la moyenne. Pour le modèle *grprod2*, le critère de Nash moyen vaut 64.6%. Il est compris entre 90.4% (Solomougou) et 2.6% (Banifing, 1984-1985). Dix bassins versants présentent des valeurs de critère supérieures à la moyenne. Pour le modèle *grprodw*, la valeur moyenne du critère est de 69.9%. Il varie de 93.1% (Sien à Massadougou) à 26.5% (Yoreloro). Neuf bassins versants montrent des valeurs de critère supérieures à la moyenne. Enfin, pour le modèle *grprodv*, le critère moyen vaut 60.3%. Il varie entre 90.5% (Bandama) et 79% (Yoreloro).

Il est possible de comparer les valeurs du critère de Nash, établies à la suite des tests des fonctions de productions *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*, avec celles établies pour la fonction de référence *GR3prod*. Avec l'utilisation de la fonction *grprod2*, on obtient de meilleurs résultats pour neuf bassins et un résultat équivalent. Avec la fonction *grprodw*, on note l'amélioration du critère pour dix bassins. Et pour le modèle *grprodv*, on observe une amélioration pour seulement cinq bassins et un résultat équivalent.

Les valeurs du critère montrent des dispersions plus importantes pour les modèles *grprod2* et *grprodv*.

Regardons maintenant les valeurs du critère au pas de temps mensuel, correspondant au pas de temps le plus usité en terme de ressources en eau.

Pour le modèle *GR3prod*, le critère de Nash atteint une moyenne de 66.8%. Il varie entre 91.7% (Lokpoho) et 34.4% (Yoreloro). Sept bassins versants montrent un critère supérieur à la moyenne. Pour le modèle *grprod2*, le critère de Nash moyen vaut 62.1%. Il est compris entre 87.8% (Bandama) et 7.7% (Banifing, 1984-1985). Huit bassins versants présentent des valeurs de critère supérieures à la moyenne. Pour le modèle *grprodw*, la valeur moyenne du critère est de 67.7%. Il varie de 91.4% (Sien à Massadougou) à 20.7% (Banifing, 1978-1980). Dix bassins versants montrent des valeurs de critère supérieures à la moyenne. Enfin, pour le modèle *grprodv*, le critère moyen vaut 58.3%. Il varie entre 86.2% (Lafigue) et 15.1% (Yoreloro).

La comparaison des valeurs du critère entre les différents modèles donne des résultats sensiblement identiques à ceux établis pour des critères bimensuels. On note une amélioration pour huit bassins versants et un résultat équivalent avec la version *grprod2*. L'utilisation du modèle *grprodw* permet d'améliorer les valeurs du critère pour dix bassins. Le modèle *grprodv* améliore les résultats de seulement cinq bassins.

Regardons maintenant les caractères principaux qui ressortent de ce tableau 4.1.5.

Quelque soit le modèle utilisé, le Yoreloro présente toujours de mauvais critères de Nash : inférieurs à 35% en mensuel et inférieurs à 30.5% en bimensuel. Le Banifing, période 1984-1985, obtient de mauvais critères pour le modèle *grprod2* (inférieurs à 10% en mensuel et en bimensuel) et pour le modèle *grprodv* (inférieurs à 25% en mensuel et en bimensuel). Ces mauvais résultats sont attribués aux années exceptionnellement sèches 1983 et 1984.

Il est possible de regarder pour chaque bassin versant quel modèle améliore au mieux les valeurs du critère. Pour cela, nous avons dressé le tableau 4.1.6. Lorsque l'utilisation d'une fonction de production améliore la valeur du critère ou donne une valeur équivalente, on note le signe (+). Dans le cas contraire, on note le signe (-). Les valeurs mensuelles et bimensuelles variant dans le même sens, on utilise un signe par modèle.

Bassin versant	Modèle grprod2	Modèle grprodw	Modèle grprodv
Bou	+	+	-
Bandama	+	+	+
Banifing	-	-	-
	-	+	-
Bagoé	-	-	-
	+	+	+
	-	-	-
Doundian	+	+	-
Douni	+	+	+
Lafigue	+	+	+
Lokpoho	-	-	-
Sien (Mass.)	-	+	-
Sien (Naf.)	+	+	+
Solomougou	+	-	-
Yani	+	+	-
Yoreloro	-	-	-

Tableau 4.1.6. Attribution d'un signe en fonction d'une amélioration ou non de la valeur du critère de Nash

Ce tableau nous permet de voir que l'utilisation de fonctions de production, où l'ETP n'intervient pas, donne autant de meilleurs résultats que de moins bons. En revanche, si on prend chaque bassin versant indépendamment, on s'aperçoit que l'utilisation des fonctions *grprod2* et *grprodw* donnent, majoritairement, de meilleurs résultats.

4.1.3 Conclusion

Le comportement, en phase de calage, des quatre modèles globaux choisis dans le cadre de nos travaux, est plutôt satisfaisant. Au vu des résultats des valeurs des paramètres calés, il apparaît que les stations années retenues présentent de fortes variabilités. Cette variabilité est imputable aux années sèches 1983 et 1984, qui perturbent significativement le calage.

Au terme de l'analyse des critères de Nash, il semblerait que l'utilisation de fonctions de production, où l'ETR calculée n'est pas liée à l'ETP (modèles *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*), donne des résultats au moins aussi bons que ceux où l'ETP intervient (modèle *GR3prod*). Une analyse plus fine des mêmes critères a permis de mettre en avant les fonctions *grprod2* et *grprodw*. La fonction *grprodv* n'apporte pas autant d'amélioration que l'on escomptait.

Par conséquent, si la valeur du critère permet de rejeter certaines solutions, il faut déterminer d'autres éléments d'appréciation permettant de juger de la qualité des calages, d'un point de vue hydrologique. Si l'on veut évaluer la capacité d'un modèle à reproduire des lames écoulées, il est certain qu'aucun critère ne peut remplacer l'examen de graphiques. Le premier élément d'appréciation est, donc, l'étude des tracés des lames observées et calculées. Le second porte sur une étude comparative des valeurs d'ETR obtenues suivant les quatre fonctions de production.

4.2 INTERPRETATION GRAPHIQUE

4.2.1 Le tracé des lames mensuelles écoulées

Ce critère, plutôt subjectif puisque qualitatif, reste un critère de choix pour l'hydrologue. Il permet de se rendre compte de la façon dont évoluent les lames, au cours de l'année et tout au long de la période étudiée, et de voir si le modèle reproduit correctement les valeurs observées. Le tracé de graphiques sous forme de lames écoulées a permis de se faire une idée quant à la qualité des calages réalisés.

Nous avons, donc, construit les graphes des lames mensuelles écoulées observées et calculées pour les treize bassins versants retenus. Nous ne présentons pas ici l'ensemble des graphiques, ce qui serait trop fastidieux et ce qui, dans certains cas, n'apporterait rien.

4.2.1.1 Le modèle GR3prod

Ce modèle, décrit en troisième partie, est dérivé du modèle conceptuel GR3J du CEMAGREF. La fonction de production utilisée est : $etr_{bv} = etp_{bv} \times \sqrt{\text{taux}S}$, où $\text{taux}S$ est le taux de remplissage du réservoir S .

L'étude de l'ensemble des tracés des lames mensuelles permet d'isoler trois groupes.

Dans un groupe sont réunis les bassins pour lesquels le modèle *GR3prod* arrive à bien reproduire les lames mensuelles écoulées observées. On trouve dans ce groupe les bassins du Bou, du Bandama, du Bagoé (1981-1985), du Lokpoho et du Solomougou. A titre d'exemple, la figure 4.2.1 représente le tracé de ces lames pour la Bagoé à Kouto, période 1981-1985.

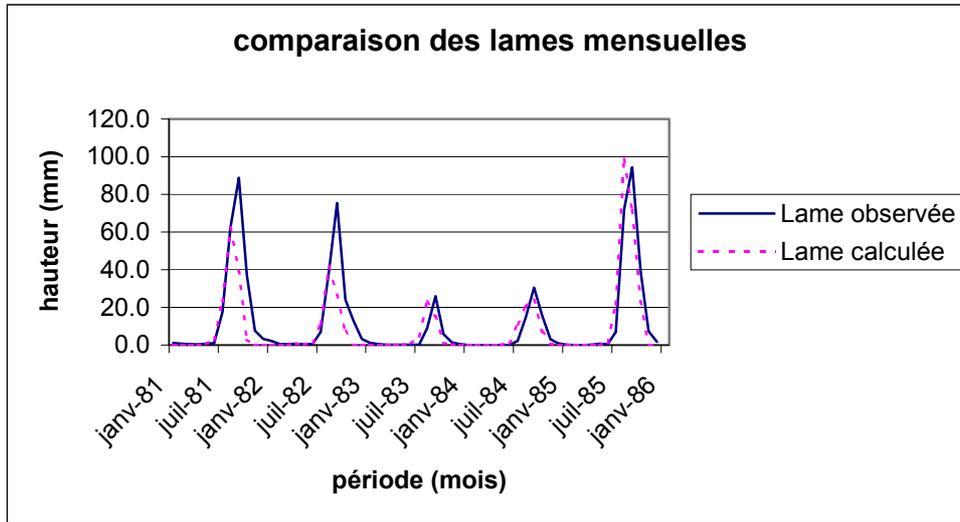


Figure 4.2.1. La Bagoé à Kouto, période 1981-1985

Dans ce cas, le calage est de bonne qualité puisque le modèle est capable de reproduire le fonctionnement du bassin durant la période retenue. Le critère de Nash correspondant est de 77.4%. Les volumes sont bien conservés malgré un décalage pouvant atteindre 20 mm pour les années 1981 et 1982.

Un second groupe comprend les bassins pour lesquels le modèle montre des difficultés à reproduire les lames observées. On trouve dans ce groupe les bassins du Yoreloro, du Banifing (1978-1980 et 1984-1985), du Yani et du Lafigue. A titre d'exemple, la figure 4.2.2 représente le tracé de ces lames pour le Yoreloro.

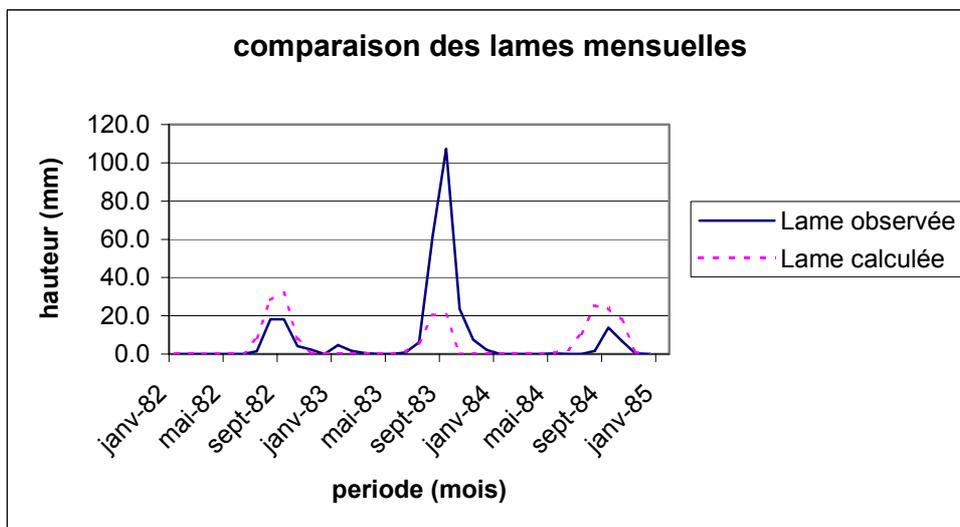


Figure 4.2.2. Le Yoreloro à Kategue

Dans ce cas, le calage est d'assez mauvaise qualité. Le modèle n'arrive pas à reproduire les lames écoulées observées. Cette mauvaise performance de *GR3prod* sur le bassin du Yoreloro correspond à un critère de Nash de 34.4%. La mauvaise détermination porte sur le paramètre H évaporatoire qui vaut 0.436 m lors du calage. Cette valeur correspond à la valeur minimale du paramètre H évaporatoire pour l'ensemble des bassins versants calés par le modèle *GR3prod*.

Les autres bassins versants sont à ranger dans un groupe de calage moyen. Les volumes sont moins bien reproduits mais on retrouve la dynamique du bassin versant.

D'une manière générale, les lames écoulées calculées suivent correctement la dynamique des lames observées, si l'on exclut les quelques cas particuliers du type Yoreloro. Les lames calculées sont parfois supérieures ou inférieures aux lames observées, mais il est impossible de dégager un comportement général.

4.2.1.2 Le modèle *grprod2*

Ce modèle dérive du modèle *GR3prod*. Il a été présenté en troisième partie. La différence repose sur le changement de la formulation de la fonction de production, avec le retrait de l'influence de l'évapotranspiration potentielle. La fonction de production utilisée est, donc, $etr_{bv} = \text{taux } S \times \text{Evap } lim$, où $\text{taux } S$ est le taux de remplissage du réservoir S et $\text{Evap } lim$ le taux d'évapotranspiration maximal.

L'étude de l'ensemble des tracés des lames mensuelles permet d'isoler, là encore, trois groupes.

Le premier est constitué des bassins versants pour lesquels le modèle *grprod2* donne de bons résultats. On y trouve les bassins versants du Bou, du Bandama, du Lafigue, du Solomougou et du Sien à Nafana. A titre d'exemple, la figure 4.2.3 présente des lames mensuelles écoulées observées et calculées pour le Lafigue.

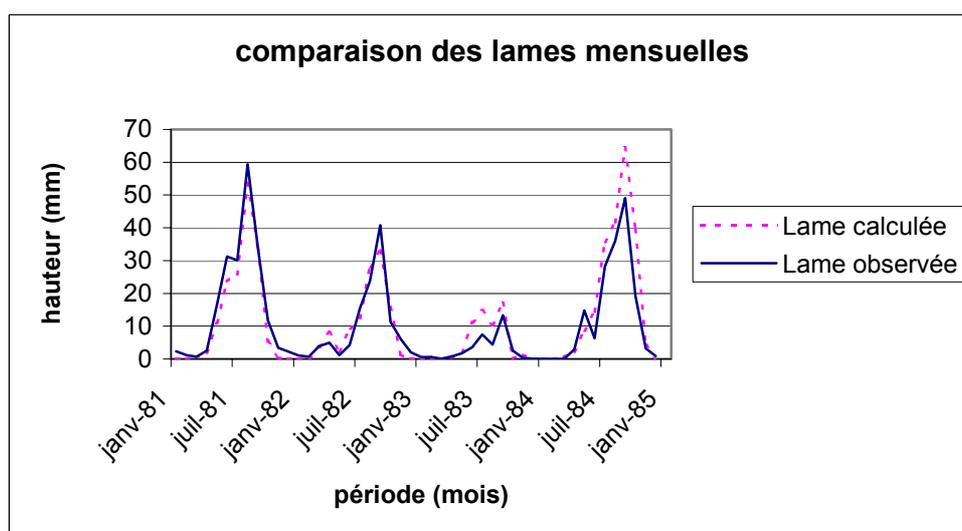


Figure 4.2.3. Le Lafigue à Route de Badikaha

Le modèle *grprod2* arrive à bien reproduire la dynamique des lames écoulées observées. Le critère de Nash correspondant est de 85.8%. Il existe cependant un petit décalage dans la reproduction des lames qui, au plus fort, vaut environ 20 mm. Pour les bassins versants de ce groupe, le calage est donc d'assez bonne qualité.

Un second groupe de bassins versants se distingue. Il est constitué des bassins pour lesquels, le calage par ce modèle est assez défavorable. Les lames écoulées calculées ne retranscrivent pas la dynamique du bassin versant. On y trouve les bassins du Banifing (1978-1980 et 1984-1985), le Douni, le Yani et le Yoreloro. A titre d'illustration, la figure 4.2.4 représente la comparaison des lames écoulées pour le Banifing, période 1984-1985.

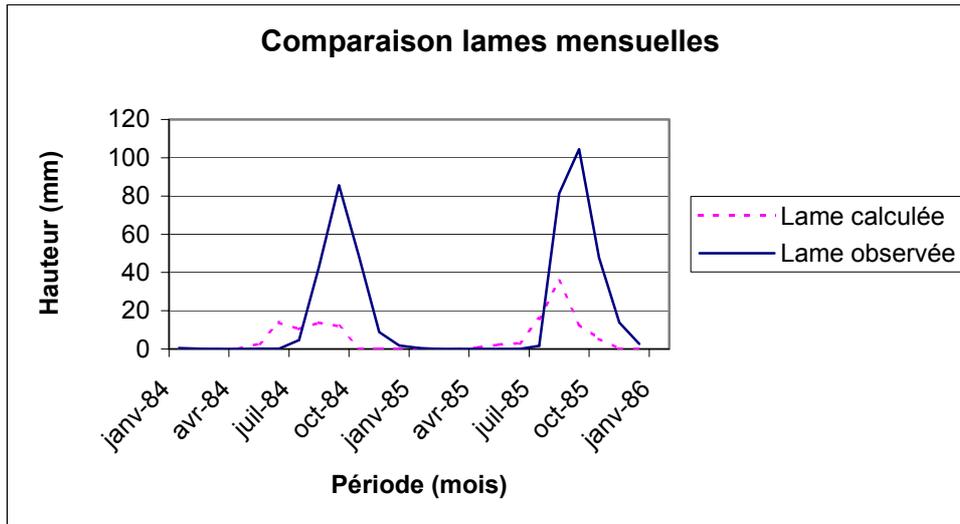


Figure 4.2.4. Le Banifing à Ziemougoula, période 1984-1985

Cet exemple montre que le modèle *grprod2* n'arrive pas, dans certains cas, à reproduire les lames observées. La dynamique du bassin versant n'est absolument pas retranscrite. Dans ce cas, le calage est de très mauvaise qualité. Le critère de Nash correspondant est de 7.7%. Cette très mauvaise performance est à relier aux valeurs des paramètres calés par le modèle : H évaporatoire vaut 0.015 m et Evap lim 0.039 m/j. Ces valeurs correspondent aux valeurs extrêmes des deux paramètres.

Les autres bassins versants sont à ranger dans un groupe de calage moyen. Les volumes sont moins bien reproduits mais on retrouve la dynamique du bassin versant.

D'une manière générale, les lames écoulées calculées décrivent correctement la dynamique des lames observées, si l'on exclut les quelques cas particuliers du type Banifing. Les lames calculées oscillent au-dessus ou au-dessous des lames observées, mais il est difficile de dégager un comportement général.

4.2.1.3 Le modèle *grprodw*

Ce modèle dérive du modèle *grprod2*, dont le schéma conceptuel est donné en troisième partie. La différence repose sur le changement de la formulation de la fonction de production, avec l'utilisation d'une fonction de pondération w . Cette fonction de pondération dépend de la caractérisation des saisons par les précipitations. La fonction de production utilisée est, donc, $etr_{bv} = w \times Evap_{lim} \times taux\ S$, où $taux\ S$ est le taux de remplissage du

réservoir S et Evap lim le taux d'évapotranspiration maximal. La fonction de pondération est définie comme suivant :

si une pluie $P = 0$ alors $w = 1$
 si une pluie $P \neq 0$ alors $w = 0.4$

L'étude de l'ensemble des tracés des lames mensuelles permet d'isoler, là encore, trois groupes.

Le premier est constitué des bassins versants pour lesquels le modèle *grprodw* donne de très bons résultats de calage. On y trouve les bassins versants du Bou, du Bandama, du Bagoé (1981-1985), du Lafigue, du Lokpoho, du Solomougou et du Sien à Massadougou. A titre d'exemple, la figure 4.2.5 présente des lames mensuelles écoulées observées et calculées pour le Solomougou.

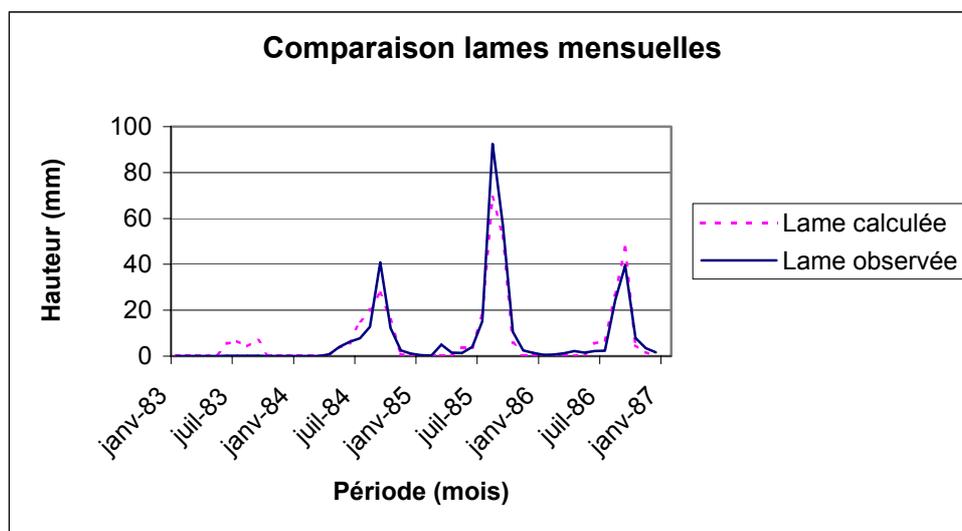


Figure 4.2.5. Le Solomougou à Ziebatago

Dans ce cas, le calage est de bonne qualité puisque le modèle est capable de reproduire le fonctionnement du bassin durant la période retenue. Le critère de Nash correspondant est de 76.8%. Les volumes sont bien conservés malgré un décalage pouvant atteindre 20 mm pour l'année 1985. On note aussi que le modèle augmente le volume d'eau écoulee sur l'année 1983. Ceci est dû au fait que la période de mise en route s'effectue sur cette année de sécheresse marquée.

Le second groupe contient les bassins versants pour lesquels le calage est d'assez mauvaise qualité. Les volumes écoulés et la dynamique des bassins ne sont pas reproduits. Le modèle *grprodw* n'est donc pas capable de reproduire les lames écoulées pour certains bassins. On y trouve les bassins du Banifing (1984-1985), du Bagoé (1968-1971), du Douni, du Sien à Nafana, du Yani et du Yoreloro. En guise d'exemple, la figure 4.2.6 illustre cette catégorie de bassins.

Dans ce cas, le calage n'est pas de bonne qualité. Autant le modèle retranscrit, de manière relativement correcte, la dynamique du bassin, autant il n'arrive pas à reproduire les volumes écoulés. Cette performance, assez mauvaise, de *grprodw* sur le bassin du Yoreloro correspond à un critère de Nash de 61.2%. La mauvaise détermination porte sur les paramètres H évaporatoire, qui vaut 2 m, et Evap lim, qui vaut 0.009 m/j. Ces valeurs

correspondent aux valeurs extrêmes de ces deux paramètres pour l'ensemble des bassins versants calés par le modèle *grprodw*.

Les autres bassins versants sont à ranger dans un groupe de calage moyen. Les volumes sont plus ou moins bien reproduits, mais on retrouve la dynamique des bassins versants.

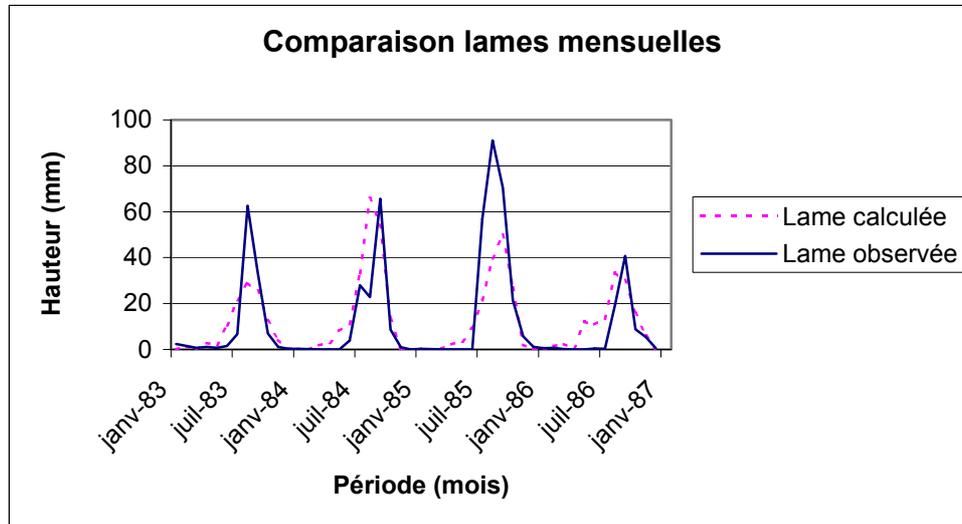


Figure 4.2.6. Le Douni à Point 398.

D'une manière générale, les lames écoulées calculées décrivent correctement la dynamique des lames observées, si l'on exclut les quelques cas particuliers du type Douni. La correspondance des volumes est plus ou moins bien conservée, puisque les lames calculées oscillent au-dessus ou au-dessous des lames observées, sans qu'il soit possible de dégager un comportement général.

4.2.1.4 Le modèle *grprodv*

Ce modèle dérive du modèle *grprod2*, dont le schéma conceptuel est donné en troisième partie. La différence repose sur le changement de la formulation de la fonction de production, avec l'utilisation d'une fonction de pondération v . Cette fonction de pondération repose sur les variations spatiales de la couverture végétale entre la saison sèche et la saison des pluies. La fonction de production utilisée est, donc, $etr_{bv} = v \times Evap_{lim} \times \text{taux } S$, où $\text{taux } S$ est le taux de remplissage du réservoir S et $Evap_{lim}$ le taux d'évapotranspiration maximal. L'allure de la fonction de pondération est donnée par la figure 3.5.6 de la troisième partie.

L'étude de l'ensemble des tracés des lames mensuelles permet d'isoler, là encore, trois groupes.

Le premier est constitué des bassins versants pour lesquels le modèle *grprodv* donne de bons résultats de calage. On y trouve les bassins versants du Bandama, du Bagoé (1973-1976), du Lafigue, du Solomougou et du Sien à Massadougou. A titre d'exemple, la figure 4.2.7 présente des lames mensuelles écoulées observées et calculées pour le Sien à Massadougou.

Dans ce cas, le calage est d'assez bonne qualité puisque le modèle est capable de reproduire le fonctionnement du bassin durant la période retenue. Le critère de Nash correspondant est de 85.8%. Les volumes sont moyennement bien conservés. Un décalage pouvant atteindre 50 mm est observé pour les années 1981 et 1985. On note aussi que le modèle a tendance à sous-estimer les volumes d'eau écoulés sauf en 1982 et en période d'été.

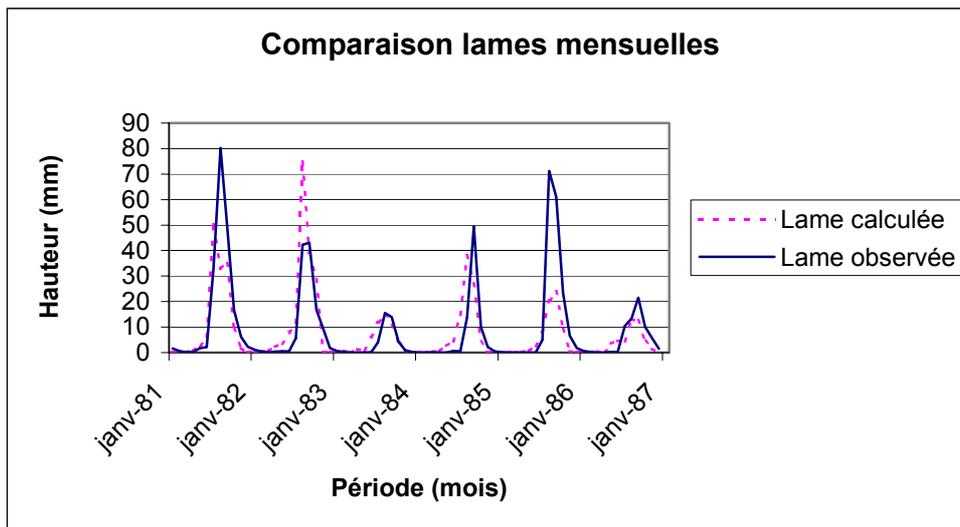


Figure 4.2.7. Le Sien à Massadougou

Le second groupe contient les bassins versants pour lesquels le calage est d'assez mauvaise qualité. Les volumes écoulés et la dynamique des bassins ne sont pas reproduits. Le modèle *grprodw* n'est donc pas capable de reproduire les lames écoulées pour certains bassins. On y trouve les bassins du Banifing (1978-1980 et 1984-1985), du Bagoé (1968-1971), du Yani et du Yoreloro. La figure 4.2.8 illustre un exemple de cette catégorie de bassins.

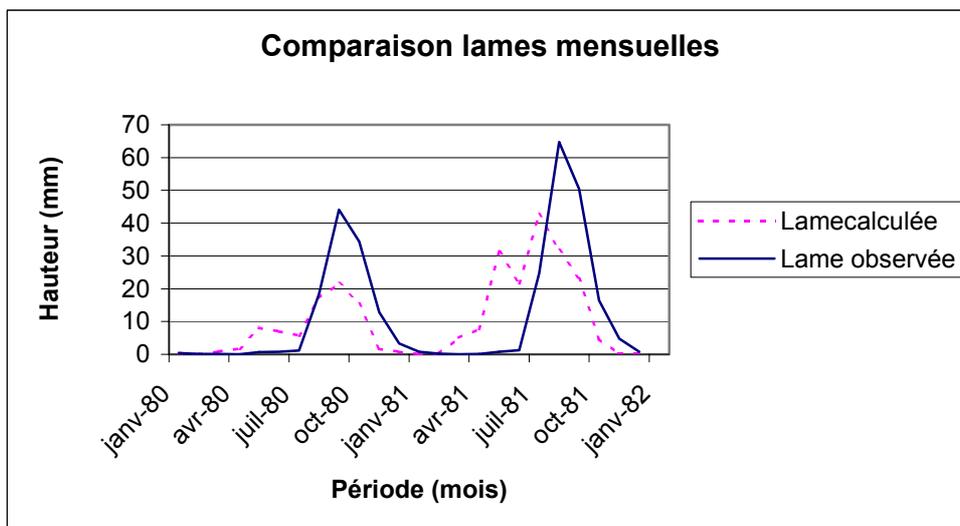


Figure 4.2.8. Le Yani à Madji

Dans ce cas, le calage n'est pas de très bonne qualité. Autant le modèle parvient à retranscrire, de manière relativement imparfaite, la dynamique du bassin, autant il n'arrive pas à reproduire les volumes écoulés. Les volumes calculés sont sous-estimés par rapport aux volumes observés. Cette performance, assez mauvaise, du modèle *grprodv* sur le bassin du Yani correspond à un critère de Nash de 39.3%. La mauvaise détermination peut venir de la valeur des paramètres H évaporatoire, qui vaut 1.221 m, et Evap lim, qui vaut 0.019 m/j.

Les autres bassins versants sont à ranger dans un groupe de calage moyen. Les volumes sont plus ou moins bien reproduits, mais on retrouve la dynamique des bassins versants.

D'une manière générale, les lames écoulées calculées décrivent correctement la dynamique des lames observées, si l'on exclut les quelques cas particuliers du type Yani. La correspondance des volumes est plus ou moins bien conservée, puisque les lames calculées sont sur ou sous-estimées par rapport aux lames observées, sans qu'il soit possible de dégager un comportement général.

4.2.1.5 Conclusion

Conclure sur l'allure du critère graphique pour chacun des bassins versants et chacun des modèles utilisés revient à établir une comparaison de ces critères graphiques. L'objectif de la gestion des ressources en eau rend cette comparaison nécessaire. Pour tous les bassins versants utilisés, nous disposons d'une série de lames mensuelles écoulées observées que l'on cherche à reproduire par l'intermédiaire des différents modèles utilisés.

Comme l'ont montré les études des tracés des lames mensuelles écoulées observées et calculées, il s'avère que les quatre modèles donnent des résultats sensiblement équivalents. En effet, les valeurs moyennes des critères de Nash sont très proches. L'étude des tracés des lames, calculées par chacun des modèles, en comparaison avec la lame observée permet d'apporter des compléments d'information à celle des critères numériques.

Parmi les calages de bonne qualité, on peut citer, à titre d'exemple le Lafigue. Il obtient des valeurs de critères de Nash de 66.3% pour le modèle *GR3prod* et supérieures à 85% pour les trois autres modèles. La figure 4.2.9 présente la comparaison des lames calculées par chacun des trois modèles de production (*grprod2*, *grprodw* et *grprodv*) et celle calculée par le modèle *GR3prod* avec les lames observées.

L'ensemble des modèles donne un calage satisfaisant puisque la dynamique est bien retranscrite. On note, cependant, que les quatre modèles surestiment les lames écoulées calculées à l'amorce et au plus fort de la saison des pluies. On constate aussi que les quatre modèles sous-estiment les lames écoulées calculées en fin de saison des pluies.

Au vu de ces tracés, on s'aperçoit mieux des fortes particularités de 1983 et à un moindre degré 1984. Il est aisé de mesurer le biais important qu'introduisent ces années dans le calage des modèles.

Parmi les calages d'assez mauvaise qualité, on peut citer, à titre d'exemple le Banifing, période 1978-1980. Il obtient des valeurs de critères de Nash de 66% pour le modèle *GR3prod*, de 62.4% pour le modèle *grprod2*, de 20.7% pour le modèle *grprodw* et de 49.4%

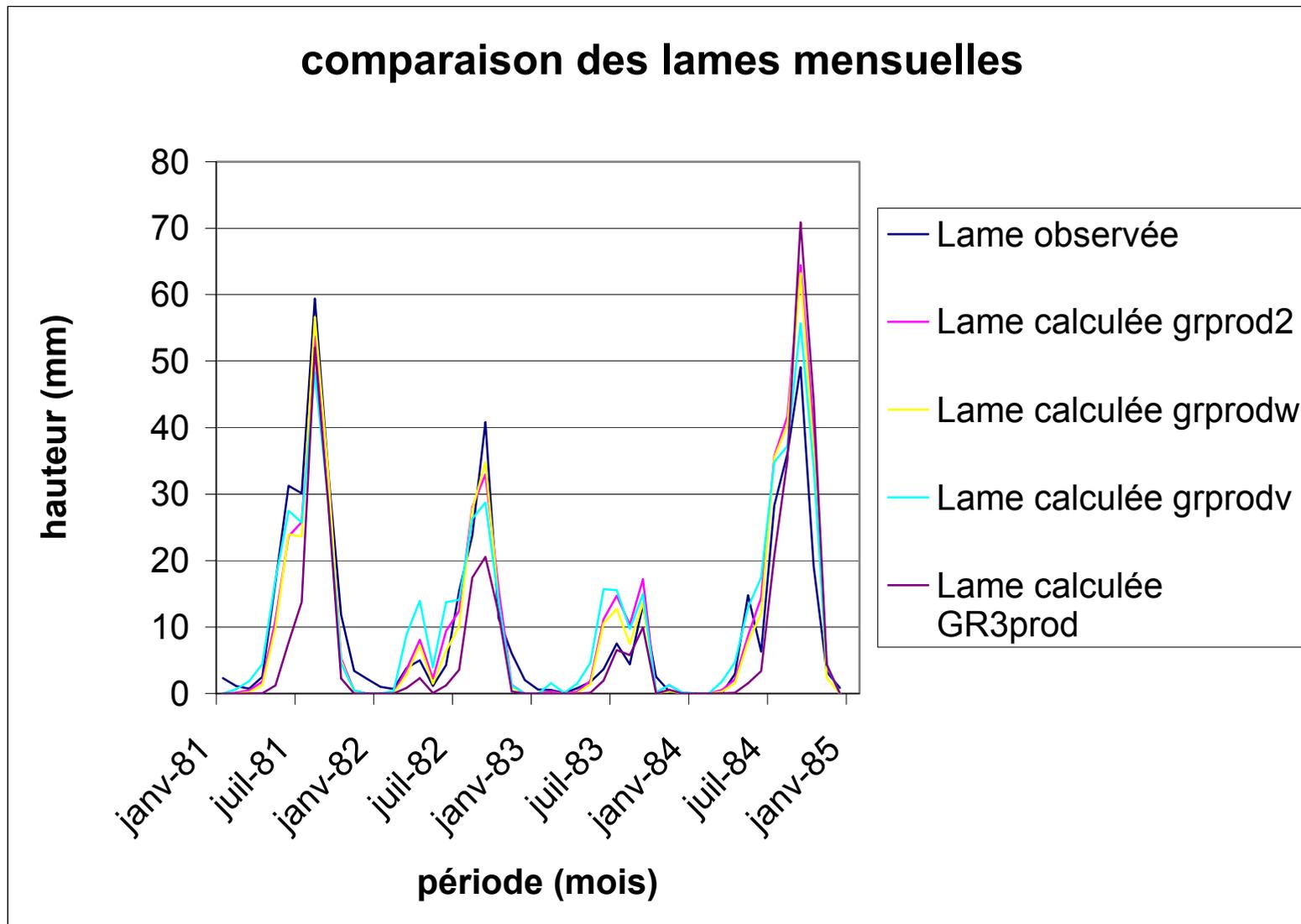


Figure 4.2.9. Le Lafigue à Route de Badikaha

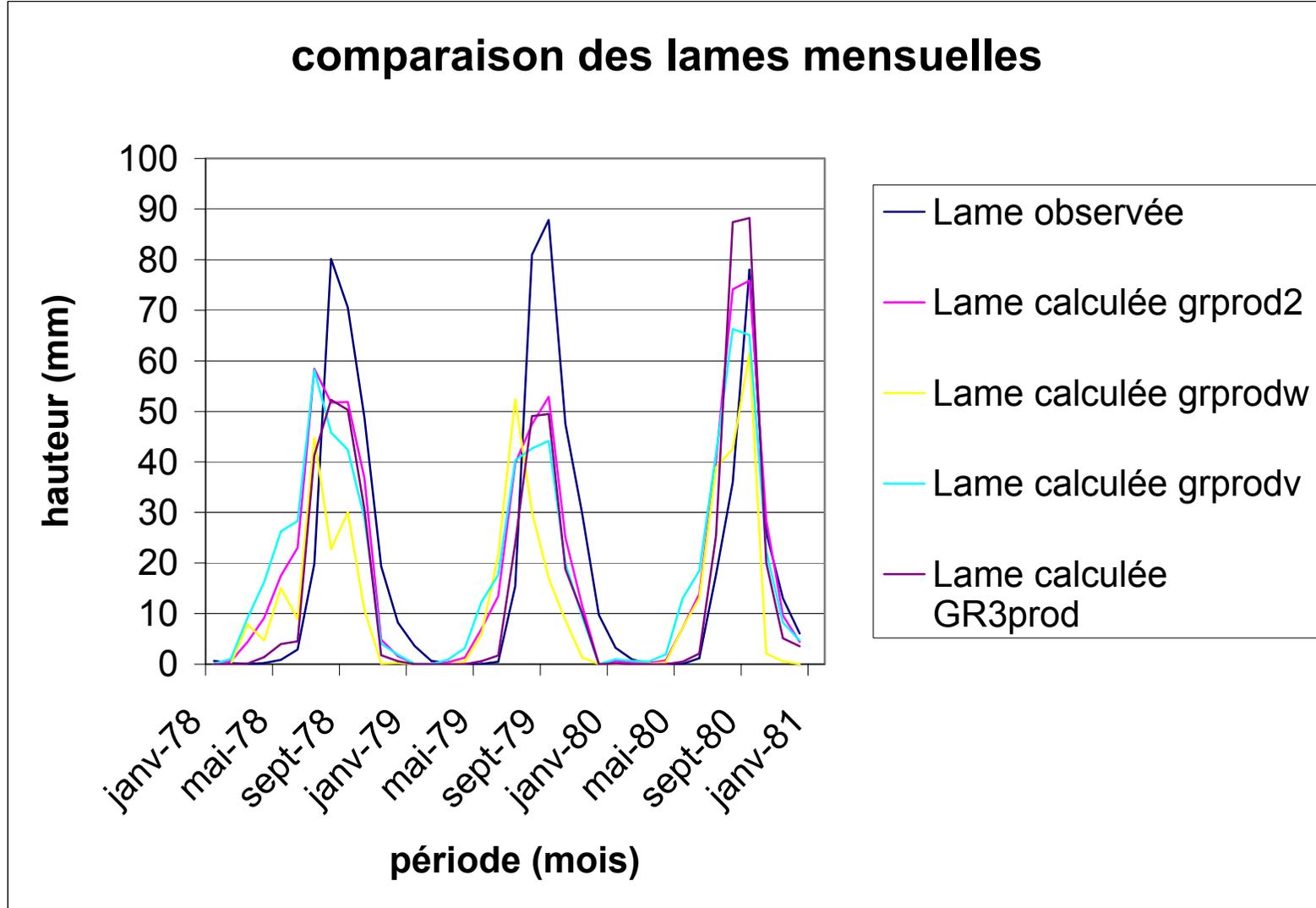


Figure 4.2.10. Le Banifing à Ziemougoula, période 1978-1980

pour le modèle *grprodv*. La figure 4.2.10 présente la comparaison des lames calculées par chacun des trois modèles de production (*grprod2*, *grprodw* et *grprodv*) et celle calculée par le modèle *GR3prod* avec les lames observées.

L'ensemble des modèles donne un calage peu satisfaisant. En effet, les différents modèles montrent de la difficulté à reproduire la dynamique du bassin considérée. Les volumes écoulés ne sont jamais reproduits correctement. On note, cependant, que les quatre modèles surestiment les lames écoulées calculées à l'amorce de la saison des pluies. On constate aussi que les quatre modèles sous-estiment les lames écoulées calculées en fin de saison des pluies. La lame calculée par le modèle *grprodw* oscille anormalement, par rapport aux autres lames calculées, pour la saison des pluies de 1978.

En conclusion, l'examen des tracés des lames calculées montre que quelque soit la fonction de production, on retrouve sensiblement les mêmes résultats. L'affranchissement de l'évapotranspiration potentielle dans la fonction de production donne des résultats d'aussi bonne qualité que ceux issus de la fonction de production originale, où l'évapotranspiration potentielle intervient. Après avoir montré que l'utilisation de fonctions de production particulières n'introduisait pas de perturbations majeures, une analyse plus fine portant sur les évapotranspirations réelles permet de confirmer l'hypothèse de départ. Cette hypothèse est, rappelons-le, basée sur la possibilité de s'affranchir de l'évapotranspiration potentielle dans le calcul de fonction de production.

4.2.2 Etude comparative des tracés d'évapotranspiration potentielle et réelle

L'interprétation des résultats sous diverses formes, statistiques de base sur les valeurs des paramètres calés et sur les payoffs journaliers, calcul des critères numériques de Nash et appréciation des tracés de lames mensuelles, a permis de se faire une idée quant au comportement des différentes fonctions de productions choisies. Une analyse plus détaillée portant sur les évapotranspirations, objet principal de cette étude, permettra de valider ou d'infirmer l'hypothèse adoptée.

Les modèles utilisés sont des modèles conceptuels fonctionnant au pas de temps journalier. Il est donc évident que la première phase d'interprétation des tracés d'évapotranspiration porte sur les valeurs journalières. Pour cela, nous traçons des graphiques où apparaissent les diverses évapotranspirations réelles, calculées à partir des différents modèles élaborés en troisième partie, et l'évapotranspiration potentielle. Le tracé de tels graphiques facilite la compréhension de la dynamique de ces diverses fonctions de production. Ils permettent, en outre, d'évaluer la sensibilité de ces fonctions face à diverses variables hydro-climatiques.

Par souci de simplification et de lisibilité, nous avons réuni deux à deux les différentes fonctions de production testées. Ainsi, pour chaque bassin versant, nous obtenons un graphe avec l'ETP, l'ETR calculée à partir de la fonction *GR3prod* et celle calculée par la fonction *grprod2*, et un autre avec l'ETP, l'ETR calculée par les fonctions *grprodw* et *grprodv*. Il nous a semblé plus judicieux de regrouper les fonctions de production utilisant une pondération. Dans le même esprit de clarté, nous ne présenterons pas l'ensemble des graphiques établis ici, en dehors des exemples pris pour illustrer notre propos.

Le Bandama présente des résultats de calage satisfaisant et de bonne qualité, quelque soit le modèle utilisé. C'est pourquoi nous l'avons retenu, à titre d'exemple. La figure 4.2.11

représente le tracé des ETR calculées par les modèles *GR3prod* et *grprod2*. La figure 4.2.12 présente le tracé des ETR calculées par les modèles *grprodw* et *grprodv*.

Au vu de ces graphiques, une distinction majeure apparaît dans le comportement de ces fonctions. Les fonctions *GR3prod* et *grprodw* oscillent brutalement. Cet aspect peut s'expliquer par la définition même de ces fonctions de production.

Dans le modèle *GR3prod*, l'ETR est définie selon la valeur prise par la variable P_{prime} :

$$\text{si } P_{\text{prime}} = 0 \text{ alors } \text{etr bv} = \text{etp bv} \times \sqrt{\text{tauxS}}$$

$$\text{si } P_{\text{prime}} \neq 0 \text{ alors } \text{etr bv} = \text{etp bv}$$

C'est pourquoi l'ETR calculée par la fonction *GR3prod* varie entre zéro et une valeur maximale donnée par l'ETP.

Dans le modèle *grprodw*, la définition de l'ETR est sensiblement différente. Cette définition utilise toujours une formule mathématique sous forme de condition. Mais une des différences essentielles de la formulation repose sur l'absence de borne supérieure. L'ETR est alors définie par :

$$\text{si } P = 0 \quad \text{alors } \text{etr bv} = 1 \times \text{tauxS} \times \text{Evap lim}$$

$$\text{si } P \neq 0 \quad \text{alors } \text{etr bv} = 0.4 \times \text{tauxS} \times \text{Evap lim}$$

Ainsi, l'ETR calculée par cette formule peut être supérieure ou inférieure à l'ETP

Au contraire, les fonctions *grprod2* et *grprodv* montrent une évolution plus homogène. Les oscillations journalières sont encore visibles, mais elles sont moins prononcées. Cela tient au fait que ces fonctions dépendent essentiellement des variations du niveau d'eau dans le réservoir S, dont les oscillations sont beaucoup plus lentes.

A la suite de ces considérations, l'emploi de formules mathématiques de type "condition" implique une variation brutale de l'ETR au pas de temps journalier. Il n'est donc pas possible de comparer les différents tracés des ETR. Pour cela, il est nécessaire de travailler au pas de temps mensuel, qui est rappelons-le, le pas de temps usuel en terme de ressources en eau.

Les tracés mensuels montrent des courbes d'aspect plus lissé que ceux établis au pas de temps journaliers. L'analyse de tous les tracés a permis de mettre en évidence quatre groupe de bassins versants.

Le premier groupe est constitué du Banifing (1978-1980 et 1984-1985), du Yani et du Yoreloro. A la suite de l'analyse des valeurs des paramètres calés et de l'examen des tracés de lames, nous avons montré que les calages effectués sur ces bassins versants étaient de mauvaise qualité. En effet, le critère de Nash mensuel ne dépasse jamais 50% quel que soit le modèle utilisé. Il est possible d'interpréter les tracés d'ETR, mais cela n'apporterait rien quant aux conséquences sur le choix des fonctions de production. C'est pourquoi, nous n'avons pas tenu compte de ces bassins dans la suite de notre interprétation.

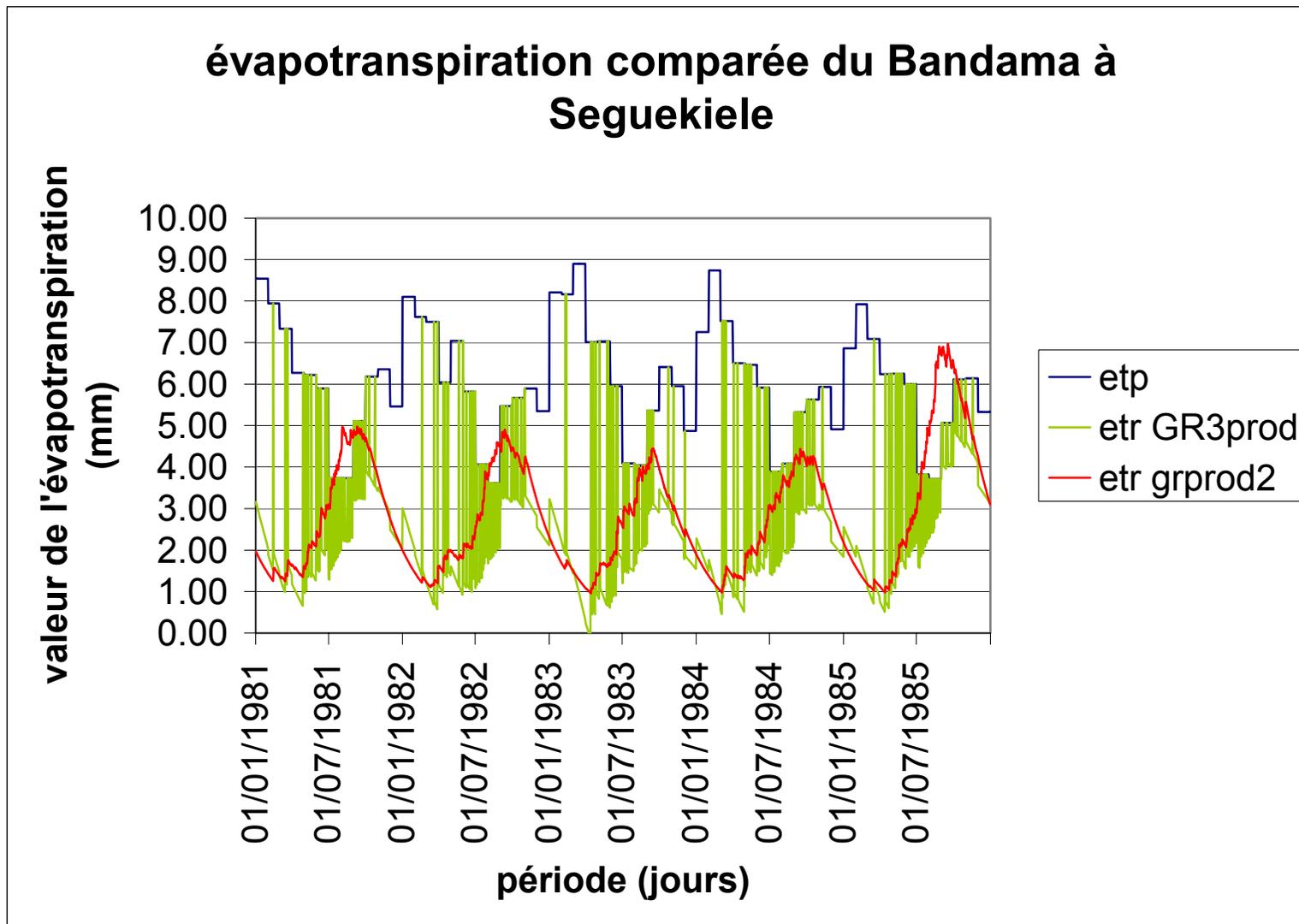


Figure 4.2.11. Tracé des ETR journalières calculées par les modèles *GR3prod* et *grprod2* pour le Bandama à Seguekiele

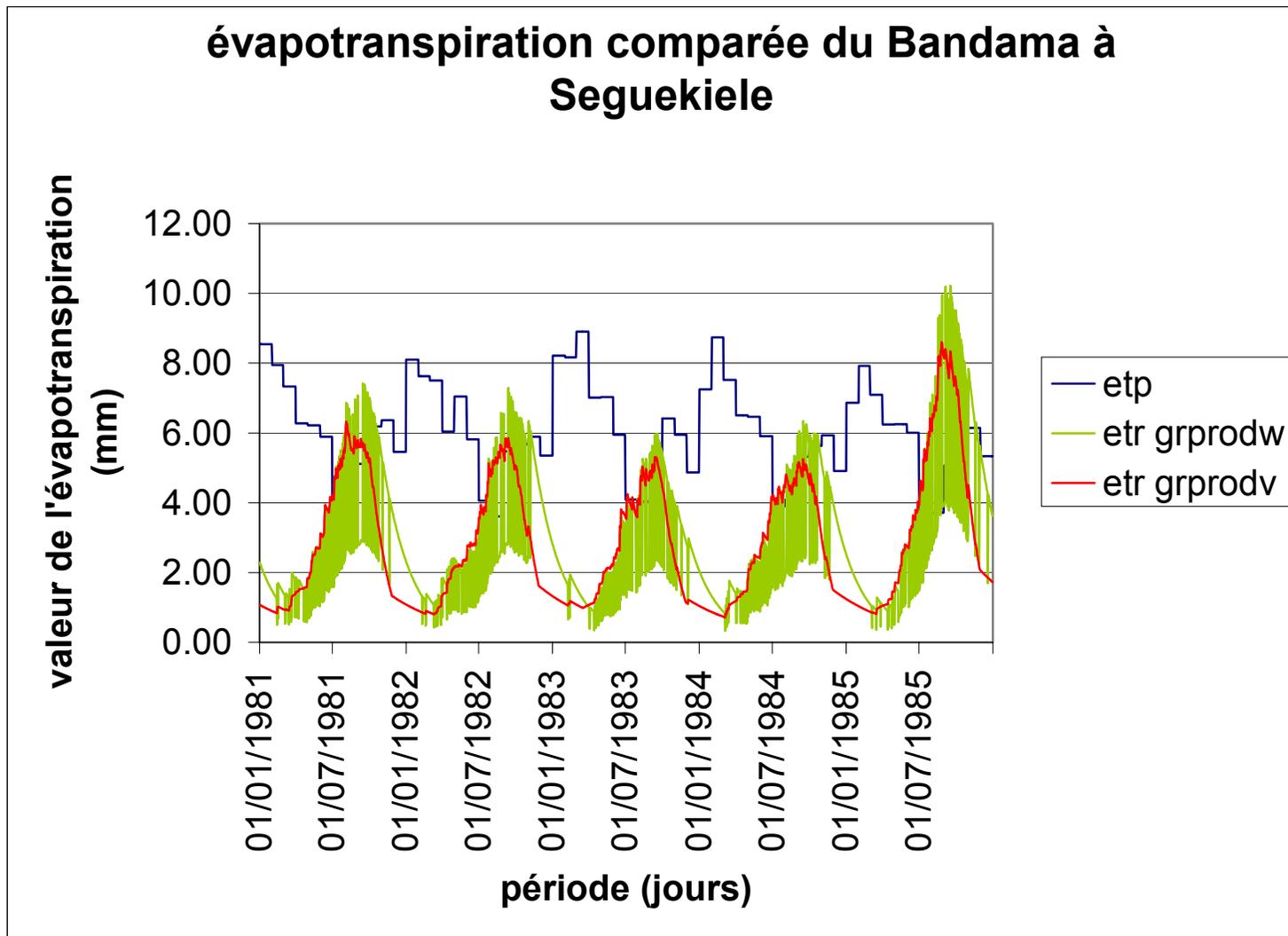


Figure 4.2.12. Tracé des ETR journalières calculées par les modèles *grprodw* et *grprodv* pour le Bandama à Seguekiele

Le second groupe est constitué de trois bassins versants : le Sien à Nafana, le Sien à Massadougou et la Bagoé (1973-1976). Les critères de Nash s'étendent entre 43% et 91%, quel que soit le modèle utilisé. Ces bassins versants montrent le même schéma de fonctionnement. La figure 4.2.13 représente la comparaison des ETR calculées par les différentes fonctions de production pour la Bagoé, période 1973-1976.

Au vu de ce graphique, deux points importants sont à souligner. D'une part, l'ETR calculée par le modèle *GR3prod* est toujours inférieure à l'ETP. Cette ETR montre les mêmes variations que l'ETP. Ainsi, à un pic d'ETP correspond un pic d'ETR calculée par *GR3prod*. D'autre part, les ETR calculées par les trois autres fonctions de production évoluent sensiblement sur le même schéma. La différence majeure avec l'ETR calculée par *GR3prod* repose sur la non concordance des ETR calculées par *grprod2*, *grprodw* et *grprodv* avec l'ETP. Ainsi, les pointes d'ETR ne correspondent pas aux pointes d'ETP. La définition de ces fonctions implique que l'ETP n'est pas un facteur limitant. C'est pourquoi on observe des ETR supérieures à l'ETP en période de fin de saison des pluies.

Mais ce mode de fonctionnement n'est pas systématique. Le troisième groupe de bassins versants comprend le Bandama, le Bou, la Bagoé (1981-1985), le Lokpoho et le Lafigue. Ces bassins versants présentent tous une bonne qualité de calage que ce soit à travers l'analyse des paramètres calés ou à travers celle des tracés de lames mensuelles écoulées. Les critères de Nash mensuels varient entre 56% et 84%, quel que soit le modèle utilisé. Pour ces cinq bassins versants, les tracés d'ETR présentent une même allure générale. Les quatre fonctions de production utilisées (*GR3prod*, *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*) montrent des variations identiques. De plus, il faut noter que ces variations d'ETR ne sont pas en phase avec celles de l'ETP. Ces oscillations mettent en évidence le comportement particulier de l'ETR. La figure 4.2.14 illustre les variations des ETR calculées pour les quatre fonctions de production.

On constate qu'il est possible d'identifier deux types de comportement. Le premier est celui de l'ETP. Régie par le climat, l'ETP retranscrit relativement bien l'alternance de la saison des pluies et de la saison sèche. On observe, ainsi, des pics d'ETP durant la saison sèche, c'est-à-dire de novembre à avril. Les ETP minimales sont centrées sur juillet-août, c'est-à-dire au plus fort de la saison des pluies.

Le deuxième est celui de l'ETR. Tout d'abord, on s'aperçoit que l'ETR peut prendre des valeurs supérieures à celles de l'ETP. De plus, les variations de l'ETR vont à l'opposé de celles de l'ETP. Ainsi, on observe de fortes valeurs d'ETR lorsque les valeurs d'ETP marquent une indentation. Il apparaît que le maximum d'ETR correspond à la fin de la saison des pluies, avec des pointes centrées sur novembre. Et le minimum d'ETR concorde avec le milieu de la saison sèche (février).

Le dernier groupe comprend quatre bassins versants : la Bagoé (1968-1971), le Doundian, le Douni et le Solomougou. Ces bassins présentent des qualités de calage intermédiaires. Les critères de Nash, à l'exception du Solomougou, pour lequel le critère de Nash est supérieur à 68%, varient entre 40% et 70%, quel que soit le modèle utilisé. La figure 4.2.15 représente le tracé des ETR pour le Solomougou.

évapotranspiration comparée du Bagoé à Kouto période 1973-1976

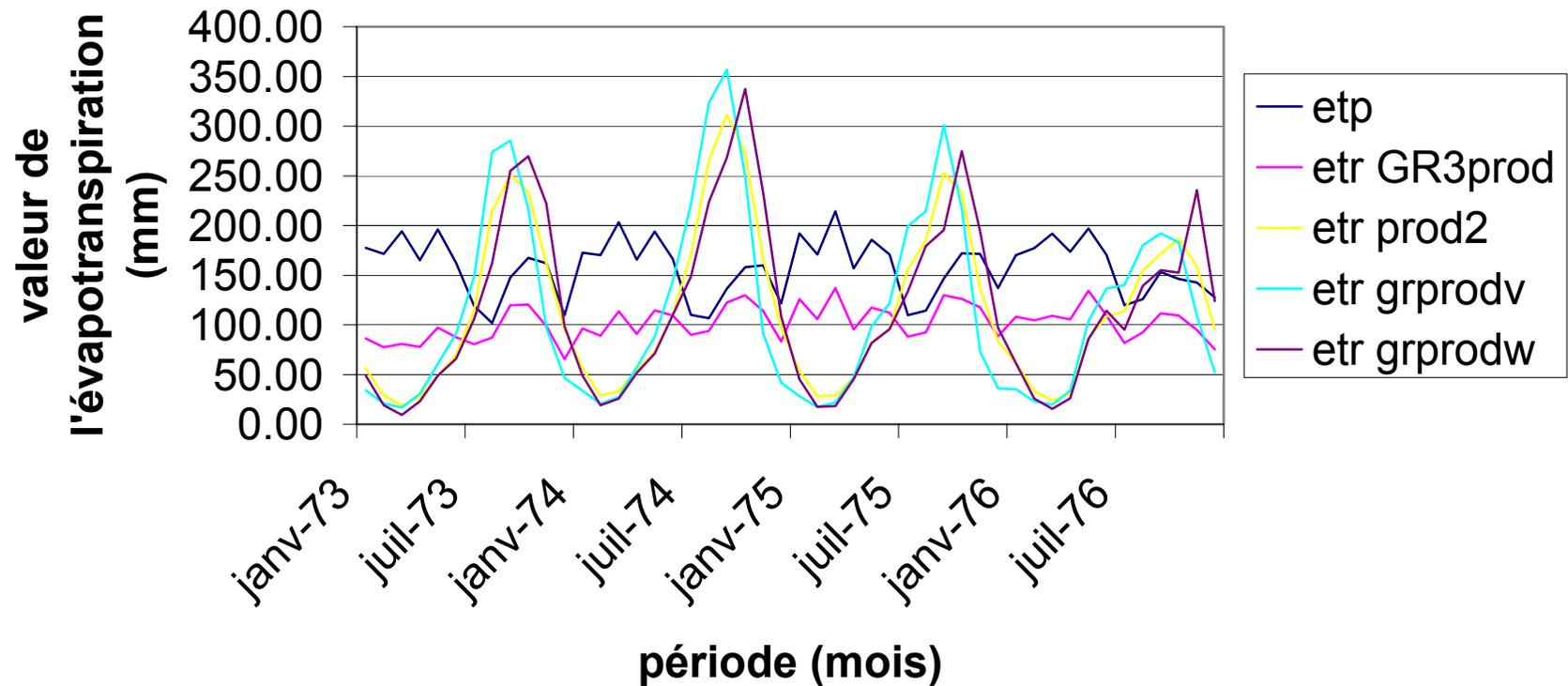


Figure 4.2.13. Tracé des ETR mensuelles calculées par les quatre modèles pour la Bagoé à Kouto, période 1973-1976

On constate un comportement identique des fonctions de productions *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*. Ces fonctions montrent des variations plus importantes que celles de l'ETP, et l'allure de leurs tracés ressemble à celle des bassins versants du groupe précédent. C'est le comportement de la fonction *GR3prod* qui distingue ce groupe des autres. Cette fonction présente des fortes valeurs d'ETR en octobre-novembre et correspond à un pic d'ETP (début de saison sèche). De plus, les valeurs d'ETR calculées par *GR3prod* ne dépassent jamais celles de l'ETP, au contraire des ETR calculées par les autres fonctions de production. Les ETR minimales s'observent en février-mars, alors que l'ETP est maximum (fin de saison des pluies).

L'examen de l'ensemble des tracés d'ETR journalières calculées par les quatre fonctions de production met en évidence les différentes dynamiques de ces fonctions. On a pu ainsi montrer que l'utilisation de formules conditionnelles entraîne des oscillations assez brutales. C'est le cas des modèles *GR3prod* et *grprodw*. Ces oscillations très marquées ne permettent pas la comparaison des tracés des ETR calculées par les différentes fonctions. C'est pourquoi l'interprétation porte plutôt sur les tracés mensuels. Ceux-ci définissent les différents comportements des trois fonctions de production, élaborées en troisième partie, face à la fonction de référence *GR3prod*. Certains bassins versants, présentant une mauvaise qualité de calage, n'ont pas permis de dégager un quelconque comportement. Pour les autres bassins, les tracés présentent des variations d'ETR en concordance ou non avec celles de la fonction de référence. Dans cinq cas, nous observons que les trois fonctions de production (*grprod2*, *grprodw* et *grprodv*), limitées par des facteurs autres que l'ETP, montrent des oscillations similaires et concomitantes avec la fonction de référence *GR3prod*. D'autres cas montrent que les fonctions de production choisies varient indépendamment de l'ETP et qu'elles présentent des variations plus importantes que celles de la fonction de référence. Certaines adoptent un comportement intermédiaire entre celui de la fonction de référence et celui de l'ETR calculée indépendamment de l'ETP. L'examen des graphiques ne donne pas d'aberration et montre bien souvent un fonctionnement qui se rapproche d'une certaine logique, bien qu'il soit nécessaire d'insister sur la diversité des situations rencontrées.

4.3 CONCLUSION

Après avoir mis au point la structure du modèle, nous avons testé quatre fonctions de production. Les résultats de ces tests peuvent être interprétés de différentes manières.

La première porte sur les valeurs numériques. On analyse, ainsi, les valeurs des paramètres calés et celles de la fonction critère adoptée. L'issue de cette analyse a montré que l'ensemble des calages était d'assez bonne qualité, et ce, quel que soit le modèle utilisé. On remarque, tout de même, que certains bassins versants présentent des valeurs extrêmes de paramètres et des critères de Nash faibles. Ces mauvais calages se reproduisent sur les quatre modèles. Ces résultats peuvent s'expliquer, soit par une mauvaise représentativité des stations choisies, soit par les stations années disponibles, dont 1983 et 1984 particulièrement sèches font partie, soit encore par une inadéquation du modèle. Le faible nombre de bassins versants concernés rassure quant à ce dernier point.

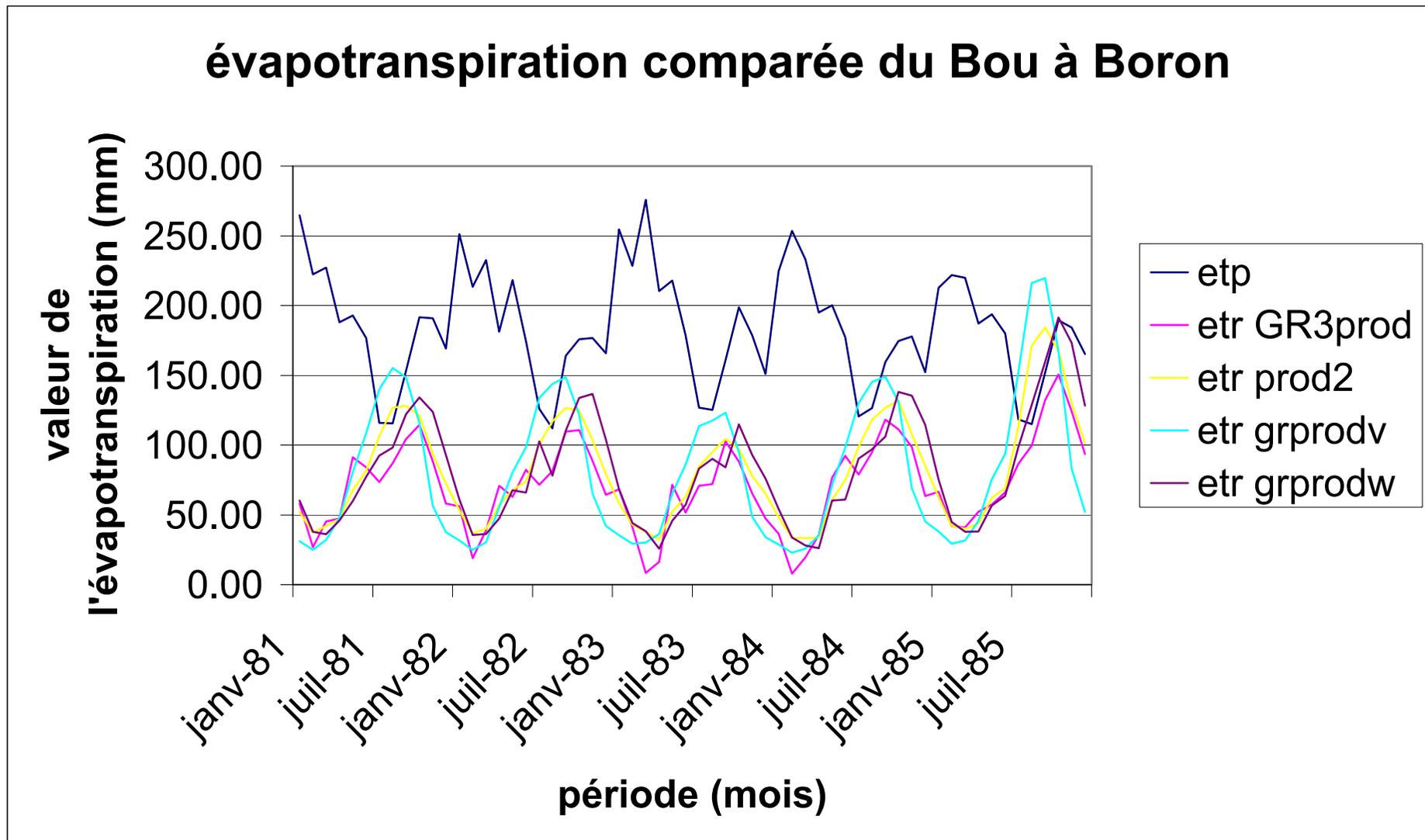


Figure 4.2.14. Tracé des ETR mensuelles calculées par les quatre modèles pour le Bou à Boron

évapotranspiration comparée du Solomougou à Ziebatago

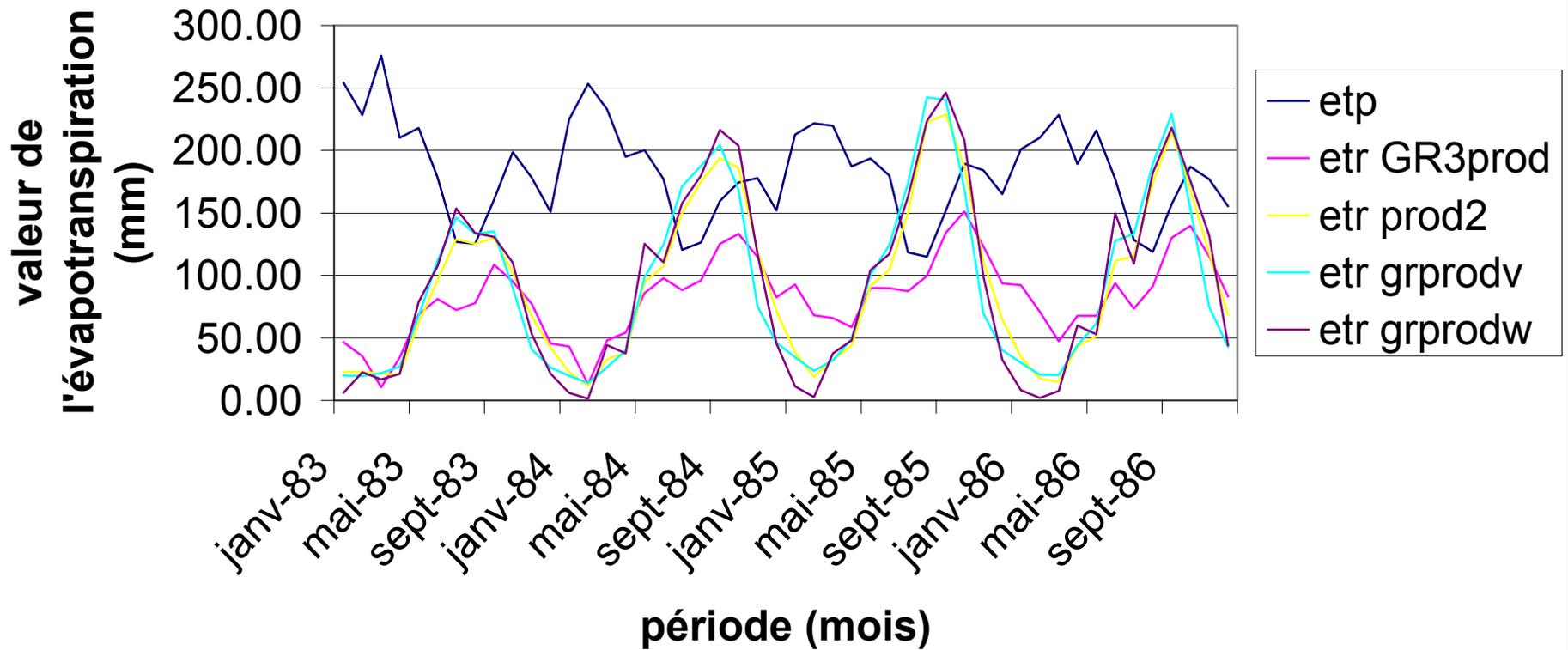


Figure 4.2.15. Tracé des ETR mensuelles calculées par les quatre modèles pour le Solomougou à Ziebatago

Dans l'ensemble, l'examen approfondi des critères numériques a montré la qualité des calages obtenus. L'utilisation de fonctions de production, dont l'ETP n'est pas un facteur limitant, montre, par l'intermédiaire des critères numériques, l'amélioration des calages dans la moitié des cas. Les valeurs des paramètres calés présentent des dispersions moindres avec les fonctions de production *grprod2*, *grprodw* et *grprody*. Au vu des valeurs du critère de Nash, il apparaît que l'utilisation des modèles *grprod2* et *grprodw* engendre de biens meilleurs résultats.

Le second type d'interprétation repose sur l'analyse de critères graphiques. En effet, les critères numériques utilisés seuls peuvent s'avérer insuffisants. L'examen de graphiques est indispensable si l'on veut pouvoir juger du bon fonctionnement des modèles et de leur adéquation.

Dans un premier temps, il s'agissait de voir si les modèles utilisés reproduisaient correctement les volumes écoulés. Les tracés des lames mensuelles écoulées observées et calculées constituent l'unique méthode de vérification. L'examen de ces tracés a montré que, pour des calages de bonne qualité, les différents modèles utilisés reproduisaient correctement la dynamique des bassins versants. Certains modèles surestiment les volumes calculés en début de saison des pluies et les sous-estiment en fin de saison des pluies. L'utilisation des modèles, où l'ETP n'est pas un facteur limitant de la fonction de production, donne des résultats au moins aussi bons qu'avec l'utilisation de la fonction de référence.

Afin d'analyser le comportement de ces différentes fonctions, face à l'intervention ou non de l'ETP, il est nécessaire de comparer les graphiques des ETR calculées par les quatre fonctions retenues. Une première étape consiste en l'analyse au pas de temps journalier. Ceci permet d'étudier les dynamiques des fonctions choisies. Il apparaît que l'utilisation des fonctions *GR3prod* et *grprodw* engendre des oscillations très brutales.

La seconde étape consiste à analyser ces mêmes fonctions au pas de temps mensuel. Ce changement d'échelle temporelle offre la possibilité de comparer les comportements de chacune de ces fonctions. L'examen des tracés a montré que, dans certains cas, l'ETR calculée par les trois fonctions *grprod2*, *grprodw* et *grprody*, variait de façon similaire à la fonction de référence *GR3prod*. Dans d'autres cas, l'ETR calculée ne montre pas de variation semblable à celle calculée par *GR3prod*, pour autant les calages obtenus sur les lames écoulées ne sont pas plus mauvais. Donc l'utilisation de fonctions différentes conduit à des situations, au regard de l'ETP et de l'ETR, qui sont parfois très diverses. Il est donc possible de s'affranchir de l'ETP puisque les calages sont bons et que le comportement du binôme ETR-ETP reste tout à fait compréhensible.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le cadre de notre travail s'inscrit dans celui du programme VAHYNE, VARIabilité HYdrologique et impacts aNthropiques sur les hydrosystEmes, développé au sein de l'IRD. Parmi les objectifs de ce programme, l'analyse des impacts de la variabilité climatique, sur les ressources en eau concerne directement notre étude.

L'évaluation de ces impacts reposent en partie sur l'utilisation de la modélisation conceptuelle de la relation pluie-débit, développée en zone tropicale semi-aride sur des bassins versants de quelques centaines à quelques milliers de km².

Après la présentation du cadre général, description du milieu physique de la Côte d'Ivoire organisée autour de la caractérisation climatologique et hydrologique, l'inventaire des bassins versants a été réalisé. Cet inventaire consistait en une description plus détaillée de la zone d'étude par la localisation des bassins et un commentaire sur les données disponibles. Issues des réseaux de mesures nationaux de Côte d'Ivoire, les données pluviométriques et hydrométriques ont été recueillies au pas de temps journalier.

Des tests effectués, en amont de cette étude par les hydrologues de l'IRD, ont permis de mettre en évidence un comportement particulier de la fonction évapotranspiration. Notre travail s'orientait, donc, vers l'étude des fonctions de production au sein des modèles conceptuels de la relation pluie-débit et, plus précisément, vers la détermination des fonctions d'évapotranspiration. Utilisant comme base de travail, le modèle GR3J du CEMAGREF réécrit à l'aide du logiciel de simulation Vensim®, le modèle retenu a effectué les calculs au pas de temps journalier pour une exploitation au pas de temps mensuel. L'analyse détaillée de l'architecture du modèle employé a fait apparaître une certaine indépendance entre les sous-modèle de production et de transfert. Il a, alors, été possible de s'affranchir du sous-modèle de transfert et d'axer notre travail sur le sous-modèle de production, où intervient l'évapotranspiration. Le modèle, ainsi élaboré, a constitué le modèle de référence, nommé *GR3prod*.

La recherche bibliographique sur les termes du bilan hydrique, en particulier sur l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR), a permis d'élaborer trois fonctions de production applicables à notre zone d'étude. Ces fonctions, nommées *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*, ont calculé une ETR non limitée par l'ETP, élément essentiel du climat tropical semi-aride. Le concept, qui autorise ces formulations, reposait sur le fait que, dans cette région, les valeurs d'ETP ne constituent pas un facteur limitant à l'évapotranspiration. Sous ce type de climat, le développement de la végétation et les réserves d'eau disponibles dans le sol constituent les véritables facteurs limitants de l'évapotranspiration. A l'inverse, la fonction de production établie pour le modèle *GR3prod*, celle du modèle GR3J d'origine, comprenait une fonction de production dépendante de l'ETP et a servi de base de comparaison.

Après l'insertion de ces trois fonctions au sein du modèle de production, les quatre modèles conceptuels obtenus ont été calés sur l'ensemble des 67 stations années disponibles pour les treize bassins versants de l'étude. Les valeurs des paramètres, ainsi calés, ont été

sujettes à un commentaire détaillé et à une analyse statistique simple. Les résultats significatifs ont porté sur l'étude des critères numériques de Nash. Cette étude a montré que les calages effectués étaient, d'une manière générale, de bonne qualité au regard des objectifs fixés. Quel que soit le modèle, le critère de Nash moyen obtenu était de l'ordre de 60%. L'utilisation de critères graphiques a permis de juger de l'adéquation des modèles employés et d'analyser les comportements des différentes fonctions de production. On s'est aperçu, au vu de l'ensemble des graphiques, que les quatre modèles testés reproduisaient correctement la dynamique des volumes écoulés.

L'ensemble des résultats obtenus a montré une amélioration des calages dans 50% des cas, lors de l'utilisation des fonctions de production indépendantes de l'ETP. Les analyses détaillées, menées tout au long de cette étude, n'ont pas permis d'établir la supériorité d'une fonction par rapport aux autres. Si l'on considère les comportements journaliers, l'utilisation des fonctions *grprod2* et *grprodv* se sont avérées plus justes. Au regard de la dispersion des valeurs pour les paramètres calés, les fonctions *grprodw* et *GR3prod* ont montré les meilleurs résultats. Les résultats obtenus sur les critères de Nash ont conduit à donner un avantage à l'utilisation de modèles conceptuels associés aux fonctions de production *grprod2*, *grprodw* et *grprodv*. S'affranchir d'une référence à l'ETP a donné une amélioration des résultats dans 38% des cas étudiés. Le comportement observé n'a pas été systématique puisqu'il ne s'est pas appliqué à l'ensemble des bassins versants. Toutefois, l'application de ces fonctions n'a pas engendré de dégradation de résultats. La mise au point de telles fonctions de production a permis, donc, de fournir un outil précieux lorsque les données d'ETP n'étaient pas disponibles.

Certaines perspectives de développement sont à envisager :

- développement des analyses sur les fichiers images des NDVI pour la fonction de pondération *v*. Cela permettrait d'obtenir une valeur plus précise selon l'implantation du bassin versant considéré et d'améliorer le modèle en fonction de l'indice retenu et de ses fluctuations spatio-temporelles.
- approfondissement de l'interprétation des résultats bassin par bassin en tenant compte d'autres variables descriptives. Ces variables peuvent être des caractéristiques de sol, des indices de croissance de végétation ou de variation de l'occupation des sols (déforestation, mise en cultures, habitat). Tous les moyens d'obtention de ces informations peuvent être utilisés (cartographie, études de terrain, informations auprès des populations locales, images satellites, etc.).
- association de fonctions de pondération de types *w* et *v* pour tenir compte des effets simultanés des précipitations et du développement de la végétation qui en découle.
- travail en phase de validation. Cette étude porte uniquement sur la phase de calage. Afin de pouvoir appliquer ce modèle à des cas concrets, il faut passer à une phase d'utilisation de ces modèles sur ces mêmes bassins pour des périodes encore non utilisées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

AVENARD J.M. et al (1971)

Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoires ORSTOM n°50. Paris. 391 p.

BERTUZZI P. et al (1994)

Stratégies d'échantillonnage et estimation de l'évapotranspiration réelle par la méthode du bilan hydrique au sol. Actes des X^{èmes} Journées Hydrologiques, ORSTOM, Montpellier, 13-14 Septembre 1994 : 13-25.

CEMAGREF (1991)

Hydrologie appliquée aux petits bassins ruraux. Première Partie. CEMAGREF, Division Hydrologie groupement d'Antony. 208 p.

DAGORNE D. et al (1996)

Champ thermique et évapotranspiration une méthode d'estimation régionale en temps réel. Veille Climatique Satellitaire, Février-Juin 1996. ORSTOM, Météo France, Ministère de la Coopération. n° 56-57 : 76-89.

DEZETTER A. (1991)

Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Docteur-Ingénieur en Mécanique, Génie mécanique, Génie civil. USTL. Montpellier. 422 p.

EAGLEMAN J. R. (1971)

An experimentally derived model for actual evapotranspiration. Agricultural Meteorology, n° 8 : 385-394.

EDITJANO (1987)

Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Extrait du mémoire de DEA Sciences et Techniques de l'Eau. Université Louis Pasteur, Strasbourg.

EDITJANO (1991)

Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Docteur es Sciences et Techniques de l'Eau. CEMAGREF Division Hydrologie groupement d'Antony, Institut de Mécanique des fluides de l'Université de Strasbourg, ENITRIS de Strasbourg. 242 p. Annexes 633 p.

EDITJANO, MICHEL C. (1989)

Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n° 2 : 113-121.

L'HOTE Y. (1998)

Climatologie et Agroclimatologie de la Province Extrême Nord (PEN) du Cameroun. Laboratoire d'Hydrologie, ORSTOM. 31 p.

LINACRE E.T. (1973)

A simpler empirical expression for actual evapotranspiration rates-A discussion. Agricultural Meteorology, n° 11 : 451-452.

POUYAUD B. (1985)

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 Fasso), du lac Tchad et d'açudes du Nordeste brésilien. Thèse de Docteur d'Etat es Sciences Naturelles. Université Paris-Sud, Orsay. 254 p.

REMENIERAS G. (1976)

L'hydrologie de l'ingénieur. Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, n° 6. Eyrolles éditions, Paris. 191-250.

RIBSTEIN P. (1990)

Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Collection Etudes et Thèses, ORSTOM, Paris. 317 p.

RIOU C. (1975)

La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. Mémoires ORSTOM n° 80. 236 p.

RIOU C. (1984)

Experimental study of potential evapotranspiration (PET) in Central Africa. Journal of Hydrology, 72 : 275-288.

SEGUIS L. (1986)

Recherche, pour le Sahel, d'une fonction de production journalière (lame précipitée-lame écoulée), et sa régionalisation. Thèse de Docteur es Génie Civil, Aménagement (Hydrologie). USTL, Montpellier. 326 p.

VENNETIER P. et al (1983)

Atlas de la Côte d'Ivoire. Editions Jeune Afrique. 2^{ème} édition. Paris.72 p.

TABLE DES MATIERES

PLAN DETAILLE

INTRODUCTION GENERALE	4
1. PREMIERE PARTIE : Description du milieu physique de la Côte d'Ivoire	6
1.1 La géomorphologie	7
1.2 Le Climat	9
1.2.1 Les masses d'air	9
1.2.2 Les saisons	9
1.2.3 La pluviométrie	11
1.2.4 Les températures et l'humidité relative de l'air	11
1.2.5 L'évaporation	13
1.3 L'hydrographie	13
1.3.1 Les particularités locales et régionales	13
1.3.2 La classification des régimes	14
1.4 La végétation	16
1.5 Les sols	16
1.6 L'occupation humaine	16
2. DEUXIEME PARTIE : Présentation des bassins versants	18
2.1 Caractéristiques du secteur Nord-Ouest	19
2.2 Présentation des bassins versants	21
2.2.1 Le haut bassin du Niger	21
2.2.1.1 La Bagoé	21
2.2.1.2 Le Banifing	23
2.2.1.3 Le Douni	23
2.2.1.4 Le Doundian	24
2.2.1.5 En résumé	24
2.2.2 Le haut bassin du Bandama	25
2.2.2.1 Le Sien à Massadougou	25
2.2.2.2 Le Sien à Nafana	27
2.2.2.3 En résumé	27
2.2.3 Le haut bassin du Sassandra	27
2.2.3.1 Le Bou	28
2.2.3.2 Le Bandama	28
2.2.3.3 Le Lafigue	30
2.2.3.4 Le Lokpoho	30
2.2.3.5 Le Solomougou	31
2.2.3.6 Le Yoreloro	31
2.2.3.7 Le Yani	32
2.2.3.8 En résumé	33
2.2.4 Conclusion	33

3. TROISIEME PARTIE : La modélisation conceptuelle de la relation pluie-débit. 34

3.1 Généralités sur la modélisation en hydrologie	35
3.2 La problématique et la démarche suivie	36
3.2.1 L'évaporation	37
3.2.1.1 La notion d'évapotranspiration potentielle	37
3.2.1.2 L'évapotranspiration réelle	41
3.2.2 Démarche adoptée durant l'étude	43
3.2.2.1 Conséquence de la définition de l'évapotranspiration sur le choix des fonctions de production	43
3.2.2.2 Démarche suivie	43
3.3 Présentation du logiciel de modélisation : Vensim® 4.0	44
3.4 Recherche sur la structure du modèle	47
3.4.1 Le modèle "complet"	47
3.4.2 Mise au point d'un modèle de production	51
3.5 Recherche sur les fonctions de production	56
3.5.1 La fonction de production	56
3.5.1.1 Définition	56
3.5.1.2 Exemples de fonctions de production	57
3.5.2 Les fonctions retenues	57
3.5.2.1 Le modèle <i>GR3prod</i>	58
3.5.2.2 Le modèle <i>grprod2</i>	59
3.5.2.3 Utilisation de fonctions de pondération	60
3.5.2.4 Conclusion	65
3.6 Conclusion	65

4. QUATRIEME PARTIE : Exploitations des résultats 66

4.1 Calage des modèles	67
4.1.1 Mode opératoire	67
4.1.1.1 Calage du modèle <i>GR3prod</i>	67
4.1.1.2 Calage du modèle <i>grprod2</i>	68
4.1.1.3 Calage du modèle <i>grprodw</i>	69
4.1.1.4 Calage du modèle <i>grprodv</i>	70
4.1.1.5 Conclusion	71
4.1.2 Fonction critère	72
4.1.3 Conclusion	75
4.2 Interprétation graphique	75
4.2.1 Le tracé des lames mensuelles écoulées	75
4.2.1.1 Le modèle <i>GR3prod</i>	75
4.2.1.2 Le modèle <i>grprod2</i>	77
4.2.1.3 Le modèle <i>grprodw</i>	78
4.2.1.4 Le modèle <i>grprodv</i>	80
4.2.1.5 Conclusion	82
4.2.2 Etude comparative des valeurs d'ETR face à l'ETP	85
4.3 Conclusion	91

CONCLUSION GENERALE 95

BIBLIOGRAPHIE 98

LISTE DES FIGURES

1.1.1 : Carte du relief de la Côte d'Ivoire (Arnaud in Vennetier et al, 1983).....	8
1.2.1 : Carte des variations saisonnières en Côte d'Ivoire (Berron in Vennetier et al, 1983).....	10
1.2.2 : Carte de la répartition de la pluviométrie et des températures (Berron in Vennetier et al, 1983).....	12
1.4.1 : Carte de la répartition de la végétation (Monnier in Vennetier et al, 1983).....	15
2.2.1 : Carte du haut bassin du Niger (Dezetter, 1991).....	22
2.2.2 : Carte du haut bassin du Sassandra (Dezetter, 1991).....	26
2.2.3 : Carte du haut bassin du Bandama (Dezetter, 1991).....	29
3.3.1 : Exemple de la construction d'un modèle sous Vensim®.....	46
3.4.1 : Représentation schématique du modèle GR3J du CEMAGREF (Dezetter, 1991).....	48
3.4.2 : Schéma du modèle <i>moder</i>	49
3.4.3 : Représentation schématique du modèle <i>grprod2</i>	53
3.5.1 : Décomposition d'un modèle pluie-débit en deux sous-modèles (Ribstein, 1990).....	56
3.5.2 : Schéma du modèle <i>GR3prod</i>	58
3.5.3 : Schéma du modèle <i>grprod2</i>	60
3.5.4 : Comparaison des "pluies de jour" aux "pluies de nuit" pour le poste pluviométrique d'Odienné.....	61
3.5.5 : Schéma du modèle <i>grprodw</i>	62
3.5.6 : La fonction de pondération v en fonction du temps.....	64
3.5.7 : Schéma du modèle <i>grprodv</i>	64
4.2.1 : La Bagoé à Kouto, période 1981-1985.....	76
4.2.2 : Le Yoreloro à Kategue.....	76
4.2.3 : Le Lafigue à Rte de Badikaha.....	77
4.2.4 : Le Banifing à Ziemougoula, période 1984-1985.....	78
4.2.5 : Le Solomougou à Ziebatago.....	79
4.2.6 : Le Douni à Pt 398.....	80
4.2.7 : Le Sien à Massadougou.....	81
4.2.8 : Le Yani à Madji.....	81
4.2.9 : Le Lafigue à Rte de Badikaha.....	83
4.2.10 : Le Banifing à Ziemougoula, période 1978-1980.....	84
4.2.11 : Tracé des ETR journalières calculées par les modèles GR3prod et grprod2 pour le Bandama à Seguekiele.....	87
4.2.12 : Tracé des ETR journalières calculées par les modèles grprodw et grprodv pour le Bandama à Seguekiele.....	88
4.2.13 : Tracé des ETR mensuelles calculées par les quatre modèles pour la Bagoé à Kouto, période 1973-1976.....	90
4.2.14 : Tracé des ETR mensuelles calculées par les quatre modèles pour le Bou à Boron.....	92
4.2.15 : Tracé des ETR mensuelles calculées par les quatre modèles pour le Solomougou à Ziebatago.....	93

LISTE DES TABLEAUX

2.2.1 : La Bagoé à Kouto.....	21
2.2.2 : Le Banifing à Ziemougoula.....	23
2.2.3 : Le Douni à Pt 398.....	24
2.2.4 : Le Doundian à Wahire.....	24
2.2.5 : Le Sien à Massadougou.....	25
2.2.6 : Le Sien à Nafana-Sienso.....	27
2.2.7 : Le Bou à Boron.....	28
2.2.8 : Le Bandama à Seguekiele.....	28
2.2.9 : Le Lafigue à Route de Badikaha.....	30
2.2.10 : Le Lokpoho à Namboukaha.....	31
2.2.11 : Le Solomougou à Ziebatago.....	31
2.2.12 : Le Yoreloro à Kategue.....	32
2.2.13 : Le Yani à Madji.....	32
3.4.1 : Corrélations et autocorrélations entre la lame mensuelle précipitée et la lame mensuelle écoulee.....	52
3.4.2 : Résultats des calages sous <i>moder</i>	54
3.4.3 : Résultats des calages sous <i>grprod2</i>	55
3.4.4 : Résultats des calages sous <i>transf</i>	55
3.5.1 : Comparaison des "pluies de jour" aux "pluies" de nuit pour quatre pluviographes.....	62
4.1.1 : Caractéristiques des calages du modèle <i>GR3prod</i>	67
4.1.2 : Caractéristiques des calages du modèle <i>grprod2</i>	68
4.1.3 : Caractéristiques des calages du modèle <i>grprodw</i>	70
4.1.4 : caractéristiques des calages du modèle <i>grprodv</i>	70
4.1.5 : Résultats des critères de Nash mensuels et bimensuels pour l'ensemble des bassins versants étudiés.....	73
4.1.6 : Attribution d'un signe en fonction d'une amélioration ou non de la valeur du critère de Nash.....	74

LISTE DES ANNEXES

A.1 : Résultats des calages par le modèle <i>moder</i>	
A.2 : Résultats des calages par le modèle <i>transf</i>	
A.3 : Résultats des calages par le modèle <i>GR3prod</i>	
A.4 : Résultats des calages par le modèle <i>grprod2</i>	
A.5 : Résultats des calages par le modèle <i>grprodw</i>	
A.6 : Résultats des calages par le modèle <i>grprodv</i>	
B.1 : Comparaison des "pluies de jour" aux "pluies de nuit" pour le pluviomètre Korhogo PG1	
B.2 : Comparaison des "pluies de jour" aux "pluies de nuit" pour le pluviomètre Korhogo PG2	
B.3 : Comparaison des "pluies de jour" aux "pluies de nuit" pour le pluviomètre Korhogo PG3	

ANNEXES

ANNEXE A.1

Résultats des calages pour le modèle *moder*

Résultats des calages par le modèle <i>moderBV</i>	Surface (km ²)	Qsp ref (m ³ /s)	Années	Time (jours)	DELAI (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	H ref (m)	Nervosité	Payoff	"Payoff" journalier
Bou	3710	0.000173	1981-1985	1826	5.30	0.017	0.976	0.003	1.41	-73833.2	-40.434
Bandama	368	0.00021	1981-1985	1826	1.00	0.018	0.859	0.010	5.00	-7554.13	-4.137
Banifing	990	0.0006483	1978-1980	1096	5.18	0.009	0.697	0.051	3.91	-25563.8	-23.325
Banifing	990	0.000609	1984-1985	731	15.00	0.016	0.043	0.022	1.34	-24443.4	-33.438
Bagoé	4700	0.000725	1968-1971	1461	15.00	0.024	0.026	0.027	1.34	-1.69E+06	-1159.295
Bagoé	4700	0.000386	1973-1976	1461	10.13	0.032	0.197	0.015	2.23	-592497	-405.542
Bagoé	4700	0.000396	1981-1985	1826	7.67	0.011	0.728	0.067	5.00	-391694	-214.509
Doundian	650	0.000386	1980-1984	1827	1.00	0.012	0.738	0.015	1.64	-11728.7	-6.420
Douni	120	0.000392	1983-1986	1461	1.81	0.012	0.825	0.000	1.00	-1810.46	-1.239
Lafigue	443	0.000347	1981-1984	1461	1.00	0.016	0.359	0.003	1.47	-3946.81	-2.701
Lokpoho	772	0.0004119	1983-1985	1096	1.84	0.014	0.609	0.046	5.00	-10605.4	-9.676
Sien (Mass.)	1325	0.000304	1981-1986	2191	12.94	0.020	0.819	0.001	1.00	-100453	-45.848
Sien (Naf.)	615	0.000485	1977-1984	2922	1.00	0.013	1.243	0.026	3.57	-51548.3	-17.641
Solomougou	1510	0.000336	1983-1986	1461	3.43	0.019	0.631	0.014	5.00	-41177.5	-28.184
Yani	1013	0.00077	1980-1981	731	12.13	0.014	1.018	0.009	1.00	-11143.8	-15.245
Yoreloro	338	0.0002589	1982-1984	1096	14.40	0.037	0.008	0.085	5.00	-8238.88	-7.517

ANNEXE A.2

Résultats des calages par le modèle *transf*

\underline{V}	Surface (km ²)	Qsp ref (m ³ /s)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	DELAI (jours)	H ref (m)	Nervosité	Payoff	"Payoff" journalier
Bou	3710	0.000173	1981-1985	1826	0.013	1.332	5.08	0.003	1.54	-81268.7	-44.506
Bandama	368	0.00021	1981-1985	1826	0.013	1.281	1.00	0.010	5.00	-7827.69	-4.287
Banifing	990	0.0006483	1978-1980	1096	0.009	0.948	5.37	0.044	4.13	-26903.8	-24.547
Banifing	990	0.000609	1984-1985	731	0.039	0.015	15.00	0.010	1.00	-46063.5	-63.014
Bagoé	4700	0.000725	1968-1971	1461	0.010	1.244	15.00	0.006	1.00	-1.69E+06	-1153.682
Bagoé	4700	0.000386	1973-1976	1461	0.023	1.244	6.17	0.003	1.17	-731517	-500.696
Bagoé	4700	0.000396	1981-1985	1826	0.010	1.148	7.25	0.050	5.00	-489955	-268.321
Doundian	650	0.000386	1980-1984	1827	0.011	1.052	8.29	0.025	5.00	-11649.6	-6.376
Douni	120	0.000392	1983-1986	1461	0.008	1.669	1.00	0.002	1.86	-1788.31	-1.224
Lafigue	443	0.000347	1981-1984	1461	0.011	0.738	1.00	0.002	1.12	-5134.24	-3.514
Lokpoho	772	0.0004119	1983-1985	1096	0.013	1.407	2.61	0.017	5.00	-13159.9	-9.007
Sien (Mass.)	1325	0.000304	1981-1986	2191	0.018	1.190	6.02	0.001	1.00	-103049	-70.533
Sien (Naf.)	615	0.000485	1977-1984	2922	0.012	1.378	1.00	0.032	4.24	-51643.1	-23.571
Solomougou	1510	0.000336	1983-1986	1461	0.017	0.863	3.28	0.014	5.00	-42383.6	-38.671
Yani	1013	0.00077	1980-1981	731	0.014	1.198	11.32	0.009	1.00	-11577.8	-15.838
Yoreloro	338	0.0002589	1982-1984	1096	0.012	1.051	1.35	0.019	5.00	-8763.66	-7.996

ANNEXE A.3

Résultats des calages par le modèle *GR3prod*

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	H évaporatoire (m)	"Payoff"	"Payoff" journalier	critère de Nash (mensuel)	critère de Nash (bimensuel)
Bou	3710	1981-1985	1826	0.877	-3.46719	-0.00190	0.792	0.768
Bandama	368	1981-1985	1826	1.001	-3.54122	-0.00194	0.847	0.805
Banifing	990	1978-1980	1096	0.466	-5.27853	-0.00482	0.660	0.708
Banifing	990	1984-1985	731	0.541	-3.90019	-0.00534	0.753	0.681
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.885	-38.12565	-0.02610	0.577	0.624
Bagoé	4700	1973-1976	1461	2.525	-8.44508	-0.01223	0.538	0.601
Bagoé	4700	1981-1985	1826	0.607	-17.86527	-0.00978	0.774	0.742
Doundian	650	1980-1984	1827	0.951	-15.03019	-0.00823	0.635	0.656
Douni	120	1983-1986	1461	0.541	-10.76134	-0.00737	0.459	0.523
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.611	-4.12281	-0.00282	0.663	0.638
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.807	-0.02928	-0.00003	0.917	0.988
Sien (Mass.)	1510	1983-1986	1461	0.850	-14.39054	-0.00492	0.897	0.925
Sien (Naf.)	1325	1981-1986	2191	1.490	-17.36720	-0.00793	0.434	0.506
Solomougou	615	1977-1984	2922	1.259	-0.76960	-0.00026	0.772	0.838
Yani	1013	1980-1981	731	1.557	-1.16387	-0.00159	0.621	0.709
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.436	-7.59232	-0.00693	0.344	0.302

ANNEXE A.4

Résultats des calages par le modèle *grprod2*

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	Payoff	"Payoff" journalier	critère de Nash (mensuel)	critère de Nash (bimensuel)
Bou	3710	1981-1985	1826	0.013	1.332	-0.53907	-0.00030	0.827	0.810
Bandama	368	1981-1985	1826	0.013	1.281	-0.39481	-0.00022	0.878	0.888
Banifing	990	1978-1980	1096	0.009	0.948	-1.19739	-0.00109	0.624	0.709
Banifing	990	1984-1985	731	0.039	0.015	-1.68259	-0.00230	0.077	-0.026
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.010	1.244	-6.58441	-0.00451	0.444	0.456
Bagoé	4700	1973-1976	1461	0.023	1.244	-2.77536	-0.00190	0.583	0.581
Bagoé	4700	1981-1985	1826	0.010	1.148	-6.85100	-0.00375	0.675	0.625
Doundian	650	1980-1984	1827	0.011	1.052	-3.32046	-0.00182	0.666	0.668
Douni	120	1983-1986	1461	0.008	1.664	-1.10975	-0.00076	0.608	0.635
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.011	0.738	-0.20703	-0.00014	0.858	0.864
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.013	1.407	-0.05338	-0.00005	0.692	0.872
Sien (Mass.)	1325	1981-1986	2191	0.018	1.190	-2.24545	-0.00102	0.567	0.657
Sien (Naf.)	615	1977-1984	2922	0.012	1.378	-7.24137	-0.00248	0.744	0.809
Solomougou	1510	1983-1986	1461	0.017	0.863	-0.30367	-0.00021	0.879	0.904
Yani	1013	1980-1981	731	0.014	1.198	-0.26644	-0.00036	0.619	0.718
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.012	1.051	-2.14853	-0.00196	0.192	0.109

ANNEXE A.5

Résultats des calages par le modèle *grprodw*

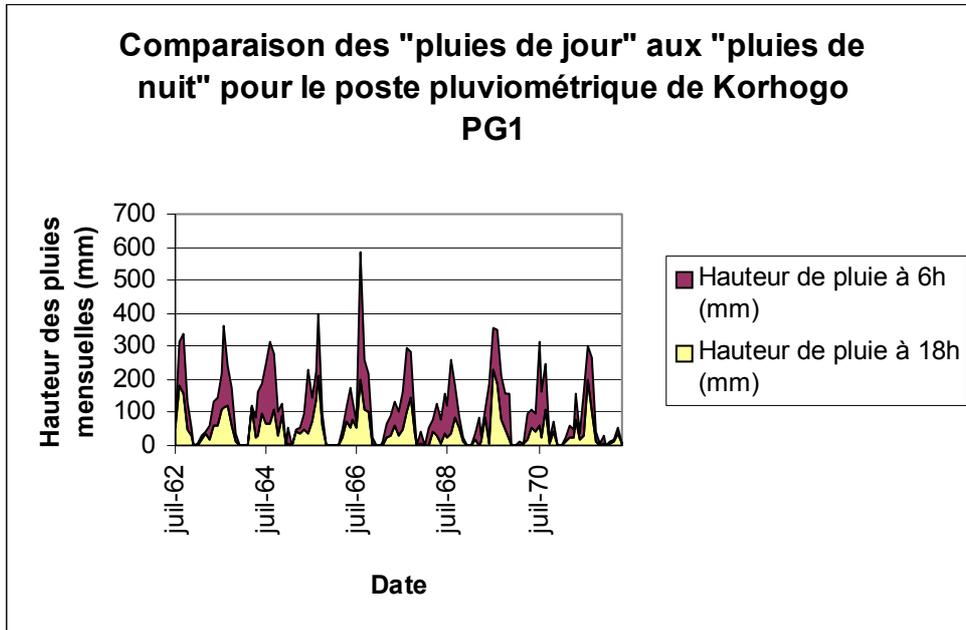
Bassin Versant	Surface (km ²)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	Payoff	"Payoff" journalier	critère de Nash (mensuel)	critère de Nash (bimensuel)
Bou	3710	1981-1985	1826	0.019	1.384	-0.45673	-0.00025	0.844	0.822
Bandama	368	1981-1985	1826	0.018	1.309	-0.28687	-0.00016	0.891	0.889
Banifing	990	1978-1980	1096	0.039	0.035	-2.76193	-0.00252	0.207	0.352
Banifing	990	1984-1985	731	0.011	1.044	-0.92561	-0.00127	0.757	0.700
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.015	1.310	-5.34492	-0.00366	0.503	0.536
Bagoé	4700	1973-1976	1461	0.038	1.368	-2.68585	-0.00184	0.752	0.618
Bagoé	4700	1981-1985	1826	0.014	1.185	-5.65081	-0.00309	0.741	0.694
Doundian	650	1980-1984	1827	0.014	1.066	-2.64428	-0.00145	0.705	0.714
Douni	120	1983-1986	1461	0.009	2.000	-1.07438	-0.00074	0.612	0.639
Lafigue	443	1981-1984	1461	0.017	0.572	-0.18804	-0.00013	0.889	0.894
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.015	1.399	-0.04662	-0.00004	0.718	0.890
Sien (Mass.)	1510	1983-1986	1461	0.030	0.673	-0.19544	-0.00013	0.914	0.931
Sien (Naf.)	1325	1981-1986	2191	0.031	1.045	-2.06066	-0.00094	0.585	0.665
Solomougou	615	1977-1984	2922	0.017	1.423	-5.91929	-0.00203	0.768	0.820
Yani	1013	1980-1981	731	0.017	1.194	-0.23113	-0.00032	0.667	0.758
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.013	2.000	-2.17834	-0.00199	0.278	0.265

ANNEXE A.6

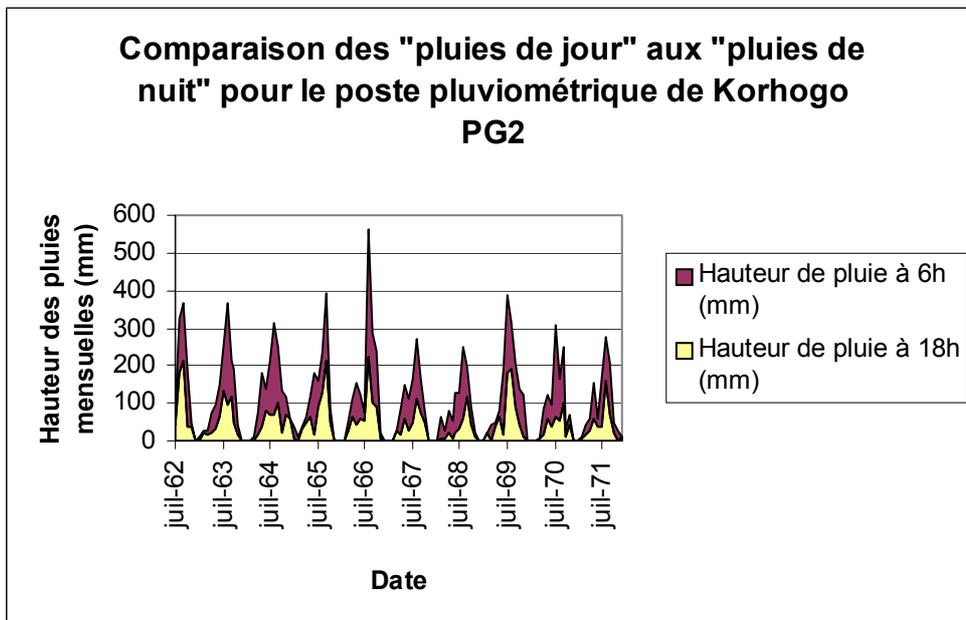
Résultats des calages par le modèle *grprodv*

Bassin Versant	Surface (km2)	Années	Time (jours)	Evap lim (m/j)	H évaporatoire (m)	Payoff	"Payoff" journalier	critère de Nash (mensuel)	critère de Nash (bimensuel)
Bou	3710	1981-1985	1826	0.02	1.24	-0.72348	-0.00040	0.783	0.769
Bandama	368	1981-1985	1826	0.02	1.16	-0.58853	-0.00032	0.858	0.905
Banifing	990	1978-1980	1096	0.01	0.94	-2.08990	-0.00191	0.494	0.572
Banifing	990	1984-1985	731	0.03	0.03	-2.11598	-0.00289	0.240	0.156
Bagoé	4700	1968-1971	1461	0.01	1.16	-8.51957	-0.00583	0.395	0.381
Bagoé	4700	1973-1976	1461	0.03	0.88	-2.89157	-0.00198	0.691	0.616
Bagoé	4700	1981-1985	1826	0.01	1.10	-8.96781	-0.00491	0.566	0.508
Doundian	650	1980-1984	1827	0.01	0.93	-4.69632	-0.00257	0.597	0.578
Douni	120	1983-1986	1461	0.01	1.18	-1.29858	-0.00089	0.581	0.605
Lafique	443	1981-1984	1461	0.01	0.84	-0.32717	-0.00022	0.862	0.877
Lokpoho	772	1983-1985	1096	0.02	1.34	-0.06718	-0.00006	0.641	0.840
Sien (Mass.)	1510	1983-1986	1461	0.02	0.81	-0.39030	-0.00027	0.858	0.886
Sien (Naf.)	1325	1981-1986	2191	0.02	1.18	-2.42766	-0.00111	0.533	0.634
Solomougou	615	1977-1984	2922	0.02	1.24	-10.54880	-0.00361	0.683	0.760
Yani	1013	1980-1981	731	0.02	1.22	-0.44546	-0.00061	0.393	0.480
Yoreloro	338	1982-1984	1096	0.02	0.98	-2.26974	-0.00207	0.151	0.079

ANNEXE B.1



ANNEXE B.2



ANNEXE B.3

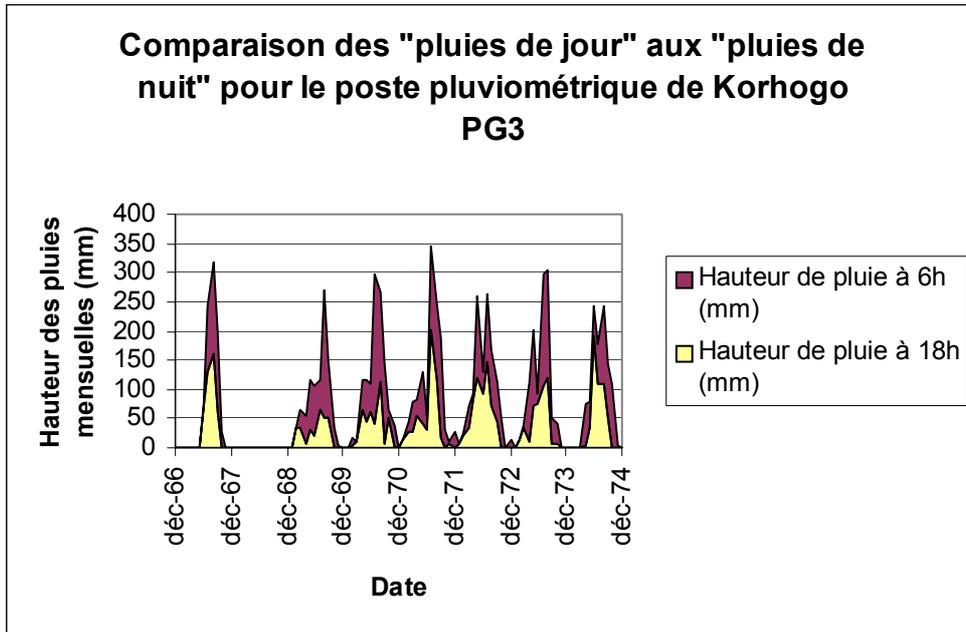


Figure 1