



Soutenu le 30 juin 2003 devant :

- Alain Delacourt (Engref)
- Michel Desbordes (UMII)
- Alain Dezetter (IRD)
- Eric Servat (IRD)

Au terme de ces sept mois passés au sein de l'équipe Vahyne du laboratoire Hydrosiences,

Je tiens à adresser en premier lieu, ma profonde reconnaissance à Eric Servat, mon directeur de stage, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe. Au delà de l'encadrement scientifique de qualité qu'il m'a offert, je ne serais trouver les mots justes pour exprimer toute ma gratitude pour la confiance qu'il a su me donner et pour le temps qu'il a su me consacrer au fil de ces derniers mois.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à celui qui a suivi quotidiennement mon travail, Alain Dezetter, pour sa disponibilité, ses conseils et remarques avisés, son attention, sa patience et sa gentillesse.

Je remercie notamment Michel Desbordes, tout d'abord pour avoir accepté de relire ce mémoire mais aussi pour la richesse humaine dont il a fait preuve à mon égard.

Je tiens aussi à remercier Alain Delacourt pour avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les autres membres de l'équipe Vahyne pour leur bonne humeur et leur gentillesse, qui m'ont permis de réaliser mon stage dans un cadre chaleureux. Merci tout particulièrement à Claudine Dieulin pour son efficacité et sa disponibilité, à Nicole Couesnon pour tout le côté administratif, Muriel Tapiou et les autres.

Merci aussi à Jean-françois Boyer pour ses conseils avisés en terme de relation sur la variabilité des ressources...humaines.

Merci à toi, Sandra, tout d'abord, pour tes bons petits cafés matinaux, mais aussi pour tous tes conseils judicieux sur l'avancement de mon sujet, pour tes relectures avisées de ce mémoire, pour avoir su être à mon écoute, pour ta bonne humeur et ta présence, enfin, tout simplement parce que sans toi, ce stage n'aurait jamais été le même.

Un merci tout particulier à toi, ma Manon, pour ta joie de vivre permanente, garde toujours cette fraîcheur et cette richesse d'âme en toi.

Merci notamment à tous mes amis pour avoir su être présents.

Je voudrais aussi remercier profondément ma famille qui à su, même éloignée par la distance, être à mes côtés et me soutenir.

Enfin, merci à toi, David.

TABLE DES MATIERES

	Pages
AVANT-PROPOS.....	2
RESUME.....	5
INTRODUCTION.....	6

Chapitre 1 : contexte général, hydrologique et climatique

1.1	La variabilité climatique.....	8
1.1.1	Les caractéristiques climatiques.....	8
1.1.2	L'évolution climatique.....	8
1.1.3	Les principales caractéristiques de la sécheresse.....	9
1.2	La variabilité pluviométrique.....	10
1.3	Les répercussions sur les composantes du bilan.....	10
1.4	La variabilité hydrologique.....	12
1.5	Les conséquences socio-économiques.....	12

Chapitre 2 : Description de la zone d'étude et choix des bassins versants

2.1	Pourquoi travailler sur des bassins versants africains?.....	13
2.2	Caractéristiques physiques des bassins versants étudiés.....	13
2.2.1	Bassin du Sénégal.....	14
2.2.2	Bassin du Chari.....	15
2.2.3	Bassin du Logone.....	16
2.2.4	Bassin de la Gambie.....	17
2.2.5	Bassin de la Sassandra.....	17
2.3	Choix de la zone d'étude.....	18
2.3.1	Méthodologie employée pour le choix des bassins versants.....	20
2.3.1.1	Repérage visuel de la diversité des sols à l'échelle de la maille.....	20
2.3.1.2	Etude statistique.....	23
2.3.1.3	Analyse détaillée des sous-bassins et choix final.....	24
2.3.2	Caractéristiques et intérêt des sous-bassins choisis.....	25
2.3.2.1	Bassin versant : Chari – Sous-bassin versant : Gore.....	25
2.3.2.2	Bassin versant : Gambie – Sous-bassin versant : Goulombo.....	27
2.3.2.3	Bassin versant : Sassandra – Sous-bassin versant : Soubré.....	29
2.3.2.4	Bassin versant : Sénégal – Sous-bassin versant : Galougo.....	31
2.4	Choix des mailles caractéristiques de chaque sous-bassin.....	34

Chapitre 3 : Modélisation de la relation pluie-débit

3.1	La relation pluie-débit.....	38
3.2	Définition d'un modèle.....	38
3.2.1	Le modèle global.....	39
3.2.2	Le modèle distribué et semi distribué.....	40
3.2.3	Le modèle conceptuel.....	40

3.2.4	Les variables du modèle.....	40
3.2.5	La notion de paramètres.....	41
3.3	Caractéristique de la modélisation utilisée.....	41
3.3.1	Choix de l'échelle.....	41
3.3.1.1	Choix du découpage spatial.....	41
3.3.1.2	Choix du pas de temps.....	41
3.3.2	Le modèle GR2M.....	42
3.3.2.1	Description.....	42
3.3.2.2	Le réservoir sol.....	42
3.3.2.3	Fonction de production et fonction de transfert.....	43
3.3.2.4	Hierarchisation des différentes étapes.....	43
3.3.3	Mise en œuvre du modèle.....	46
3.3.3.1	Initialisation et période de mise en route du modèle.....	46
3.3.3.2	Le calage.....	46
3.3.3.3	Les critères de la qualité d'ajustement.....	47
3.3.3.4	Les méthodes d'optimisations utilisées.....	47
3.3.3.5	Le problème de l'équifinalité.....	50
3.3.3.6	La validation.....	50
3.3.3.7	La technique du double échantillon.....	50
3.4	Les séries de données utilisées.....	51
3.4.1	Le problème de la disponibilité des données.....	51
3.4.2	Les données utilisées.....	51
3.4.2.1	Les données pluviométriques.....	51
3.4.2.2	Les données d'évapotranspiration.....	52
3.4.2.3	Les données hydrologiques.....	52

Chapitre 4 : Méthodologie et exploitation des résultats

4.1	Modélisation de la relation Pluie-débit par GR2M.....	53
4.1.1	Choix des périodes de Calage/Validation.....	53
4.1.2	Modèle global.....	54
4.1.2.1	GR2MGlobal sous Excel.....	54
4.1.2.2	Programmation GR2M Global.....	57
4.1.3	Modèle distribué.....	60
4.1.3.1	GR2M sous ModMens.....	60
4.1.3.2	Modélisation par GR2M sous Excel à l'échelle de la maille....	63
4.1.3.3	GR2M sous ModMens_distr.....	73
CONCLUSION.....		78
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		79
ABREVIATIONS ET SIGLES.....		86
LISTE DES FIGURES.....		83
LISTE DES TABLEAUX.....		85
ANNEXES.....		87

RESUME

Dans un contexte où l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau est au cœur des préoccupations scientifiques internationales, la compréhension de la redistribution des précipitations à travers les principales composantes du bilan hydrologique revêt une place cruciale. Dans ce cadre, la modélisation conceptuelle représente un outil privilégié pour aborder cette problématique. La contribution du réservoir sol au sein de ce type de modèle n'est pas neutre. Ainsi, une meilleure prise en compte de la donnée "sol" pourrait sensiblement améliorer la qualité des modèles proposés. Le modèle hydrologique utilisé ici, GR2M, est un modèle pluie-débit à bases conceptuelles et à pas de temps mensuel. Sa robustesse et sa simplicité permettent de l'adapter aisément du mode global au mode distribué. L'objectif visé dans le cadre de ce travail est d'évaluer l'apport de la distribution de la donnée "sol", issue de la carte des sols de l'Afrique fournie par la FAO, en vue de faire fonctionner le modèle selon plusieurs types d'unités pertinentes et des critères temporels précis. Quatre bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale ont ainsi été sélectionnés dans cette optique, suivant le degré d'hétérogénéité de la donnée "sol" qui les caractérise. Après avoir travaillé en mode global, GR2M a été utilisé en mode semi-distribué (assemblage de sous-modèles globaux), dans un premier temps, sur des mailles carrées élémentaires à l'échelle du demi-degré carré, puis dans un second temps sur les parcelles de sols élémentaires intra-maille.

Le passage à l'échelle de la maille, permettant une meilleure prise en compte des données de sol, pouvait laisser présager une amélioration du critère de Nash, signe de meilleures performances du modèle utilisé. Les résultats obtenus ne mettent pas de tels résultats en évidence. Ils soulignent le caractère robuste et performant de GR2M.

Mots clés :

- Modélisation Pluie-débit
- Modèle conceptuel
- Réservoir sol
- Modélisation globale
- Modélisation semi-distribuée
- Afrique de l'Ouest et Centrale

INTRODUCTION

L'étude de la variabilité climatique revêt une place cruciale parmi les problèmes environnementaux rencontrés à l'heure actuelle. Les différents travaux effectués ces dernières années par la communauté scientifique ont permis, entre autres, d'affiner de façon qualitative les prévisions climatiques futures. Les implications de cette variabilité sur celle des ressources en eau sont particulièrement fortes et les répercussions de celles-ci touchent de nombreux secteurs d'activités.

Dans ce contexte, la question d'ordre scientifique fondamentale est de prévoir, dans le cadre d'un bassin versant donné, comment l'eau des précipitations sera redistribuée selon les principales composantes du bilan hydrologique.

Dans ce cadre, la modélisation hydrologique représente un outil privilégié pour aborder cette problématique.

Cette étude est menée dans le cadre du programme de recherche VAHYNE (VARIabilité HYdrologique et modélisation des ressources eN Eau) qui présente comme objectif principal une meilleure approche de l'influence de la variabilité climatique sur les ressources en eau en zone tropicale semi-aride. Une des ambitions de ce programme est de travailler sur la redistribution des composantes du bilan hydrologique, en se projetant à des horizons plus lointains, sur la base des scénarios climatiques prospectifs qui tendent de nos jours à se perfectionner.

L'aboutissement de ce projet pourrait fournir des éléments décisionnels importants en matière de planification des hydro-aménagements, offrant aux décideurs une aide à la gestion des ressources en eau dans des pays où l'évolution future reste encore obscure.

La problématique évoquée dans cette étude est d'évaluer l'apport d'une modélisation spatialisée, tenant compte de la diversité spatiale et de l'hétérogénéité des données environnementales, en comparaison à une simple modélisation globale de la relation pluie-débit. Ceci, en vue de permettre une meilleure quantification des ressources en eau, par l'utilisation de modèles plus performants.

La contribution du réservoir sol dans la modélisation hydrologique n'est pas neutre. Déjà pressenti par des études antérieures, le rôle de la donnée "sol" dans le cycle global de l'eau rend son étude incontournable.

Jusqu'alors, sa prise en compte dans les modèles de type conceptuels se limitait à une valeur moyenne sur l'ensemble du bassin versant considéré. Ainsi, une meilleure appréciation de ce paramètre pourrait sensiblement améliorer la qualité des modèles proposés.

L'objectif visé ici est de redistribuer cette donnée sol, issue de la carte des sols de l'Afrique fournie par la FAO (Food & Agriculture Organisation), selon différents découpages spatiaux, en vue de faire fonctionner le modèle de bilan selon plusieurs types d'unités spatiales pertinentes et suivant des critères temporels précis.

Organisation des travaux :

Les travaux effectués durant ce stage de DEA s'articulent autour de quatre chapitres ;

Un travail de synthèse et d'analyse des études déjà menées dans les domaines de la variabilité climatique et pluviométrique, avec une introduction sur les notions de sécheresse.

Le deuxième chapitre s'attèle à décrire les différents découpages spatiaux. On argumentera sur les choix effectués, à différentes échelles, pour les différentes zones étudiées.

Le troisième chapitre rentre dans le domaine de la modélisation de la relation pluie-débit avec une description du modèle utilisé.

Le quatrième et dernier chapitre correspond à l'exploitation des résultats obtenus au cours de ce stage et conclut sur la méthode utilisée.

Chapitre 1

CONTEXTE GENERAL, HYDROLOGIQUE ET CLIMATIQUE

Les caractéristiques hydro-climatiques d'une région ont un lien direct avec son comportement socio-économique et les répercussions sur la communauté humaine restent indéniables.

La prise en compte de l'évolution des précipitations et, par voie de conséquence, des écoulements vont conduire à prendre des décisions différentes en matière de planification et de gestion des ressources en eau. Ceci s'accroît d'autant plus dans les pays en voie de développement où le comportement économique est intimement lié à la situation du secteur agricole. Les spécificités des pays situés en région semi-aride aggravent les répercussions de situations déficitaires en eau. De surcroît, l'étude hydro-climatique de ces zones reste confrontée à un cruel manque de données, en raison d'une situation où les mesures sont rares et difficiles.

1.1 Variabilité pluviométrique et climatique de l'Afrique de l'Ouest et de l'Afrique Centrale

L'Afrique de l'Ouest et l'Afrique centrale présentent une importante vulnérabilité aux déficits pluviométriques, et même si ces régions ne subissent pas les mêmes effets face à un contexte de sécheresse, cette dernière semble toucher aujourd'hui l'ensemble du continent jusqu'aux régions les plus humides.

1.1.1 Les caractéristiques climatiques.

Les grands bassins étudiés ici se situent dans l'AOC (Afrique de l'Ouest et Centrale).

Dans cette zone, la température moyenne annuelle est de 28°C.

Ces régions climatiques sont surtout fonction de la pluviométrie annuelle qui varie de 200 mm au nord à 2.000 mm au sud avec des isohyètes orientés W-E.

On différencie quatre larges bandes parallèles décrivant chacune des zones climatiques caractérisées par un domaine de végétation type (Aubreville, 1960) :

- Le domaine sahélo-saharien avec des précipitations annuelles comprises entre 200 et 500 mm et une végétation de type steppe à épineux,

- Le domaine soudanien dont les précipitations annuelles vont de 500 à 900 mm : le domaine de végétation est de type savane arbustive,
- Le domaine soudano-guinéen présentant des précipitations de l'ordre de 900 à 1.200 mm : la végétation correspond au domaine de la savane arborée préforestière,
- Le domaine guinéen où les précipitations vont de 1.200 à plus de 2.000 mm, la végétation correspond au domaine de la forêt tropicale humide.

1.1.2 L'évolution climatique

Les études menées dernièrement sur le continent africain mettent en relief une tendance générale à l'aridification depuis une période charnière. Plusieurs travaux ont permis la mise au point de méthodes de détermination de ce phénomène de sécheresse, en terme de déficit pluviométrique. Parmi celles-ci, les méthodes statistiques de détection des ruptures (Lubès *et al.*, 1994 et 1998) ont permis de localiser cette période charnière entre 1969 et 1971. Ces résultats rentrent en concordance avec ceux mis en évidence par les méthodes d'interpolation et de représentations cartographiques issues de l'analyse des séries pluviométriques. Ainsi, on admet aujourd'hui une tendance générale à l'aridification (Nicholson, 1994 ; Hulme, 1996a ; Servat *et al.*, 1998), celle-ci n'est ni générale, ni continue, mais le déficit pluviométrique est significatif sur l'ensemble du continent africain (Hubert *et al.*, 1989 ; Adejuwon *et al.*, 1990 ; Mahé et Citeau, 1993).

Ces cinquante dernières années de données ont permis de définir quelques-unes des caractéristiques de l'évolution climatique en zone non-sahélienne et des pays contenus dans l'AOC. La pluviométrie est un bon indicateur de l'évolution climatique et elle a fortement diminué après la rupture de 69/71 au cours des décennies 70 et 80 (Carbonnel et Hubert, 1992 ; Olivry *et al.*, 1993 ; Paturel *et al.*, 1997 ; Servat *et al.*, 1997a). La légère augmentation qui a marqué la décennie 90 n'a jamais permis d'atteindre les valeurs "pré-rupture" caractérisant les années 50 et 60 (Ardoin, 2003 ; L'hôte, 2003 ; Xue, 1997).

1.1.3 Les principales caractéristiques de la sécheresse

Trois aspects principaux mettent en évidence cette rupture climatique et permettent de considérer ce phénomène comme se distinguant des autres sécheresses connues jusqu'alors (Ouedraogo, 2001) ;

- sa durée
- son intensité
- son extension

A l'échelle régionale, cette sécheresse modifie de façon profonde et durable les caractéristiques climatiques et l'étude poussée de certaines variables, comme la pluviométrie et les écoulements, met clairement en évidence ces changements, permettant de concevoir la mise en place d'un nouveau régime climatique (Ouedraogo, 2001).

Ainsi, par exemple, les zones à très forte pluviométrie disparaissent partiellement et à l'inverse, les zones à faible pluviométrie s'étendent considérablement, entraînant de nombreux secteurs à passer d'un régime guinéen à soudanais.

La caractéristique majeure de la sécheresse reste cependant son hétérogénéité dans l'espace et dans le temps (Servat *et al.*, 1997b), complexifiant d'autant plus son étude à l'échelle du continent africain.

Un grand nombre de variables climatiques reste cependant à étudier afin d'étayer de manière plus fine ce qu'il s'est produit entre la fin des années 60 et le début des années 70. De nombreux paramètres rentrent en jeu et les processus ayant permis l'installation de ce nouveau régime restent des phénomènes complexes à variables multiples.

1.2 La variabilité pluviométrique

Cette fluctuation climatique va principalement se traduire par une baisse notable de la pluviométrie annuelle, non sans conséquences sur les ressources en eau et les régimes d'écoulement des cours d'eau (Mahé et Olivry, 1991).

1.2.1 Les répercussions sur les composantes du bilan

L'étude de ces modifications souligne une diminution importante des volumes écoulés à travers les différents réservoirs du cycle hydrologique. Depuis l'entrée du système, la baisse significative de la pluviométrie avoisine les 20 à 25% suivant les pays (Servat *et al.*, 1997c) et va se répercuter sur chacune des composantes du bilan hydrologique.

L'analyse des déficits retrouvés au niveau des écoulements de surface a été réalisée d'après les moyennes de la période sèche (1970-1989) en comparaison à la période humide (1950-1969). Alors que la baisse significative de la pluviométrie est de l'ordre de 20% (Tableau 1-a), les taux de diminution retrouvés pour les écoulements de surface sont de l'ordre de 50% (Tableau 1-b) (Servat *et al.*, 1998).

Pays	Baisse des précipitations (%)	Période de rupture
Cameroun	16	1969-71
Togo	16	1968-70
République centrafricaine	17	1968-69
Benin	19	1968-70
Ghana	19	1968-69
Nigeria	19	1967-70
Guinée	20	1969-70
Tchad	20	1970-71
Côte d'Ivoire	21	1966-71
Burkina Faso	22	1968-71
Guinée Bissau	22	1967-69
Mali	23	1967-70
Sénégal	25	1967-69

Tableau 1-a : Diminution des précipitations en Afrique de l'Ouest et Centrale

(Moyenne de la période 1970-1989 comparée à la période 1950-1969) (d'après **Servat et al., 1998**)

Rivière	Station	Baisse des précipitations (%)	Période de rupture
Comoe	Aniassue	50	1971
Chari	Ndajmena	51	1971
Logone	Lai	39	1970
Niger	Malanville	43	1970
Niger	Niamey	34	1970
Bani	Douna	70	1971
Oueme	Sagon	42	1967
Sassandra	Semien	36	1970
Senegal	Bakel	50	1967
Bakoye	Ouali	66	1971
Volta noire	Dapola	41	1971
Volta noire	Boromo	46	1971
Oubangui	Bangui	30	1970
Sangha	Salo	22	1975

Tableau 1-b : Diminution du débit des rivières en Afrique de l'Ouest et Centrale

(Moyenne de la période 1970-1989 comparée à la période 1950-1969) (d'après **Servat et al., 1998**)Les bassins soulignés en gras correspondent aux bassins étudiés.

Ces chiffres mettent en évidence les répercussions importantes de la sécheresse sur la ressource en eau avec un phénomène d'amplification des réactions hydrologiques à différentes échelles. De surcroît, un certain nombre de boucles de rétroactions et d'effets multiplicatifs peuvent avoir des effets indirects considérables sur les ressources.

La sensibilité des processus de redistribution de l'eau sur les bassins versants est donc importante et des modifications durables de l'abondance et du régime des précipitations auront des conséquences tangibles en matière de ressources en eau.

1.3 La variabilité hydrologique

Une des principales variables caractéristiques prise en compte au niveau hydrologique est le débit moyen annuel, représentatif des volumes d'eau transitant annuellement.

Ce paramètre est de ce fait un témoin de l'évolution des ressources en eau disponibles, conditionnant la réalisation de nombreux ouvrages hydrauliques.

Ainsi, les grands fleuves tropicaux tels que le Sénégal, le Logone ou encore le Chari présentent une baisse manifeste de leur débit depuis le début des années 70, une diminution de 50 % des débits sur la décennie 80, et se retrouvent depuis systématiquement déficitaires à l'échelle annuelle.

1.3.1 Les conséquences socio-économiques

L'exemple emblématique de l'amplification des réactions hydrologiques met en évidence la sensibilité des processus de redistribution de l'eau sur les bassins versants, soulignant les conséquences dramatiques sur les ressources en eau.

Or, la maîtrise de cette ressource demeure un préalable indispensable à toute activité économique (Servat *et al.*, 1997b). De telles modifications ont des conséquences manifestes sur l'agriculture, l'alimentation des retenues et la production hydroélectrique. Les effets de cette variabilité climatique peuvent ainsi se révéler désastreux, modifiant les données d'un équilibre déjà mis à mal par ailleurs.

L'étude des bassins versant réalisée ici n'est pas neutre, elle répond en effet à un critère de fragilité particulier de ces pays en voie de développement, en raison d'une double évolution récente du climat et des usages.

CHAPITRE 2

ZONE D'ETUDE - CHOIX DES BASSINS VERSANTS

2.1 Pourquoi travailler sur des bassins versants africains ?

Le continent africain reste une des parties du monde les plus fragilisées d'un point de vue environnemental, d'une part par la forte pression anthropique qu'elle subit, d'autre part par les problèmes de déforestation, désertification et dégradation des sols. Le phénomène de sécheresse dont souffre le continent semble en être en grande partie responsable.

Ce continent se révèle donc être un objet d'étude approprié pour traiter de la variabilité climatique et de la modélisation des ressources en eau, dans la mesure où son développement repose en grande partie sur la maîtrise de celles-ci.

De plus, la sécheresse persistante que subit l'Afrique de l'Ouest et Centrale depuis près de trente ans ont permis à des équipes scientifiques (IRD, ex-ORSTOM) de collecter une masse de données importante depuis de nombreuses années.

L'étude que nous présentons ici se propose de travailler sur des bassins versants de l'ordre de plusieurs milliers de km², échelle de la planification en matière de ressources en eau sur le continent africain.

2.2 Caractéristiques physiques des bassins versants étudiés :

Les zones d'étude ont été définies par grands ensembles de bassins hydrographiques, recouvrant ainsi des superficies allant de la dizaine à plusieurs centaines de milliers de km², sur plusieurs pays.

On distingue trois grands ensembles (fig.1) :

- Un premier groupe de bassins versants, traversé par les fleuves Sénégal et Gambie.
- Un second groupe dans lequel on trouve la Sassandra.
- Un groupe situé en Afrique centrale appartenant aux bassins versants du Chari et du Logone.

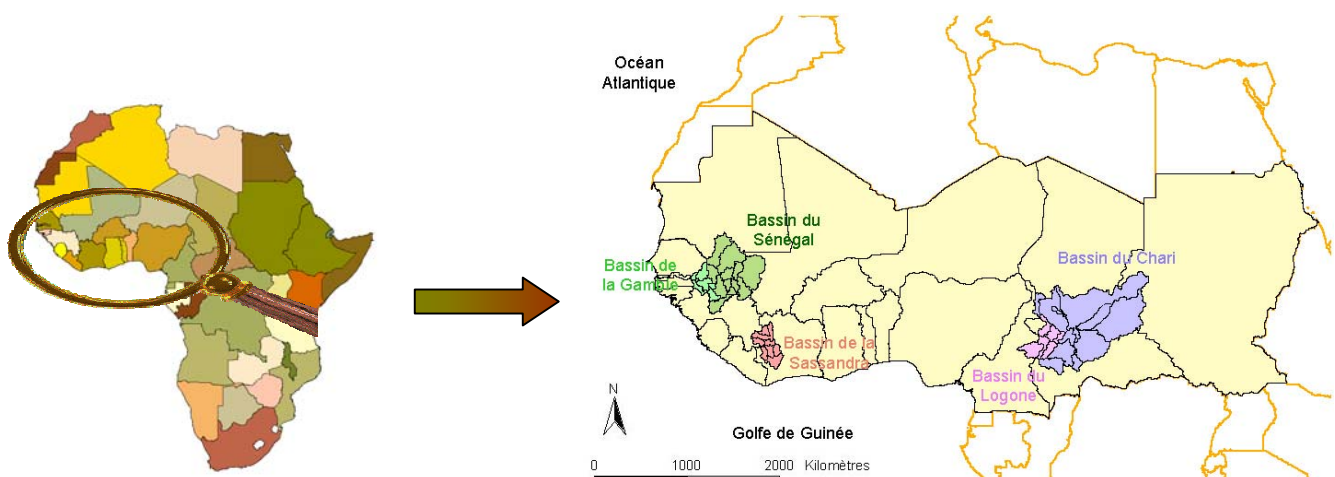


Figure 1 : Localisation des grands ensembles hydrographiques étudiés

2.2.1 Bassin du Sénégal

Le fleuve Sénégal, long de 1790 km prend naissance au Nord de la Guinée, traverse le Mali et constitue la frontière entre le Sénégal et la Mauritanie. On distingue deux parties : le bassin supérieur, région tourmentée et montagneuse et le bassin inférieur, région plate où le fleuve inscrit ses méandres dans une large vallée. Nous nous intéresserons essentiellement au bassin supérieur, en amont de Bakel. Ce dernier traverse 3 pays : le Sénégal, le Mali et la Guinée.

Forme, surface, relief :

L'extrémité méridionale du bassin est la plus montagneuse (massif du Fouta Djallon) et l'altitude moyenne est de 1000 m dans cette zone. Vers le Nord, on passe à une série de reliefs subtabulaires (altitude moyenne 800m) et prolongés plus au Nord par des plateaux culminant à 600 m. L'ensemble du massif de Fouta Djallon se limite par une ligne de falaise dominant une région plus basse (altitude moyenne : 200m) où les seuls reliefs notables sont créés par des sills doléritiques.

Types de sols et climats :

Dans cette région, la répartition des sols est complexe et les variations spatiales sont importantes. Les facteurs principaux de la pédogenèse sont le climat, la roche mère et la végétation. On observe une correspondance entre zonalité climatique et la zone pédologique : On observe donc au sud, un climat soudano-guinéen, avec des sols ferralitiques développés sur tout matériau. La ferralitisation induit des sols plus rouges et plus argileux en présence de roche mère basique avec des processus d'agrégation des pseudo-sables.

Au centre, le climat est de type sahélo-soudanais, dont les sols ferrugineux tropicaux sont plus ou moins lessivés ou remaniés sur matériaux sableux à argilo-sableux.

Au Nord, le climat sahélo-saharien engendre des sols subarides sur matériaux sableux ou argilo-sableux et des sols bruns sur matériaux argileux (Rochette, 1974).

2.2.2 Bassin du Chari

Le fleuve Chari traverse 4 pays : le Soudan, la République Centrafricaine, le Tchad et le Cameroun. Il représente le principal tributaire du lac Tchad. Son principal affluent de rive gauche est le Logone que nous décrirons séparément.

Forme, surface, relief :

La bordure méridionale du bassin dessine une bande de montagnes et de collines en arc de cercle centrées sur la cuvette tchadienne. Si ce n'est quelques pointements rocheux, le paysage est assez mamelonné jusqu'à un plateau réunissant la terminaison de cet arc.

Pédologie :

On observe six types de sols :

- Les sols à sesquioxydes ; représentés par des sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés, développés à partir de matériaux sablo-argileux.
- Les sols minéraux bruts et sols peu évolués, non soumis à l'action du climat, ils correspondent aux affleurements rocheux et aux cuirasses ferrugineuses dénudées.
- Les vertisols ; riches en argile gonflante, ils sont lithomorphes ou hydromorphes selon la durée d'humidification des sols et la présence d'horizons superficiels à structure fine. Ceux-ci restent localisés dans les grandes cuvettes ou dans les mares.
- Les sols hydromorphes ; se caractérisent par un excès d'eau dû, soit à un engorgement profond, soit à une inondation temporaire ou permanente. Ces phénomènes d'hydromorphie sont très importants dans la cuvette alluviale tchadienne.
- Les sols halomorphes ; ils se caractérisent par la présence d'une nappe à faible profondeur sur des alluvions argilo-sableuses. Ces sols occupent les cuvettes inondables.

Facteurs climatiques :

Soumis aux climats de type sahélien au Nord, tropical pur au centre et soudanien au Sud, on distingue deux saisons ; une saison des pluies et une saison sèche. La saison sèche est assez forte durant trois à neuf mois en moyenne. Ces types de climats s'expliquent par les déplacements annuels du FIT qui sépare l'air équatorial maritime (mousson) de l'air tropical continental (harmattan) (Annexe1) (Billon *et al.*, 1974).

2.2.3 Le bassin du Logone

Affluent du Chari, ses deux cours d'eau sont les principaux tributaires du lac Tchad. Son bassin versant comporte deux parties bien distinctes ; le bassin supérieur (en amont de Lai) région montagneuse, et le bassin inférieur (en aval de Lai) région de plaines et de fleuves aboutissant sur un cône de déjection immense. Nous nous intéresserons ici principalement au bassin supérieur.

Le bassin supérieur traverse trois pays : le Cameroun, la République Centrafricaine et le Tchad.

Forme, surface, relief : Dans la partie haute, l'altitude moyenne est de 1200 m avec un point culminant au sommet volcanique des monts Nghana (1923m). Ce plateau se termine par un rebord abrupt avant d'atteindre le fossé d'effondrement de la Mbéré. Au Nord-Ouest, on trouve une succession de monts et de massifs plus ou moins isolés, constituant des barrages naturels pour les rivières. Le fleuve pénètre alors dans une pénéplaine en pente douce vers le nord, de 40 à 500 m d'altitude.

Pédologie : Développés sur les éléments du socle cristallin au sud de la ligne Gore-Pandzangue et sur les roches sédimentaires du Koros au Nord de cette ligne, ces sols sont, dans l'ensemble, perméables en surface mais rencontrent rapidement la roche saine, responsable d'un coefficient d'infiltration moyen.

Facteurs climatiques : Le bassin supérieur est soumis au climat soudanien correspondant au passage du climat tropical pur (sud du bassin) au climat tropical de transition au nord. Il comporte une saison des pluies et une saison sèche dont la durée varie de trois (décembre-février) à sept mois (novembre-mai). Les périodes de transition sont en moyenne, de l'ordre de 2 mois. Tout comme le Chari, ce type de climat s'explique par les déplacements annuels du FIT (Billon *et al.*, 1974).

2.2.4 Bassin de la Gambie :

On distingue deux parties ; la partie amont ou "bassin continental" avec une orientation générale SE-NW alors que la partie aval ou "bassin maritime" présente une orientation E-W. Nous nous concentrerons sur la partie amont dans le cadre de ce travail.

Forme, surface, relief : Cette zone située en amont est principalement caractérisée par des reliefs nets d'altitude moyenne de 1000 m.

Pédologie : Dans le bassin amont, où la topographie est le facteur dominant de la pédogenèse, l'esquisse générale des sols met en évidence des lithosols sur cuirasses ou roches basiques, des sols hydromorphes peu évolués d'érosion et des sols à faciès ferrugineux tropicaux lessivés ou encore des sols à caractère vertique et de nombreux plaquages de limons éoliens dit "terres jaunes".

Climatologie : Située sur la façade occidentale du continent africain, cette zone est soumise à l'influence de la mousson du Golfe de Guinée avec un régime pluviométrique unimodal. La saison sèche de novembre en avril (hiver boréal) s'allonge au Nord et les précipitations diminuent alors que les températures, l'évaporation et l'insolation augmentent.

Ce bassin versant appartient au domaine de climat soudanien dans sa majeure partie.

2.2.5 Bassin de la Sassandra

Correspondant à un des principaux fleuves de la Côte d'Ivoire, la Sassandra coule du nord vers le sud en direction du Golfe de Guinée.

Forme, surface, relief :

S'écoulant sur le vieux socle africain, la région présente un relief monotone. Les reliefs résultent essentiellement de l'érosion des chaînes montagneuses ayant évoluées en pénéplaines. Les altitudes diminuent de manière graduelle de 500 m d'altitude au nord à moins de 50 m au sud. Le paysage passe d'une région de glacis au Nord à une pénéplaine (Ardoin, 2000).

Pédologie : Dominée en grande partie par les granites et des bandes schisteuses plus ou moins prononcées, les phénomènes d'indurations se traduisent dans cette zone par la formation de surfaces cuirassées (Perraud., 1971 ; Avenard., 1974)

Climatologie :

Les climats de type chauds intermédiaires entre équatoriaux humides et tropicaux secs engendrent des variations de température ne permettant pas de souligner les différences saisonnières régionales, contrairement aux variations de précipitations, du fait de leurs importances (Vennetier *et al.*, 1983). Les masses d'air continentales (harmattan et mousson) vont déterminer le cycle des saisons suivant la Zone de Confluence Inter-Tropicale (ZICT). Ainsi, il y a donc passage d'un régime à deux saisons sèches et deux saisons des pluies au niveau du bassin inférieur de la Sassandra à un régime à une seule saison sèche et une seule saison des pluies au niveau du bassin supérieur, où les conditions climatiques tropicales dominent.

2.3 Choix de la zone d'étude

Deux étapes de sélection ont été effectuées au cours de ce travail en vue de deux types de modélisations différentes. La première étape était de choisir le sous bassin-versant le plus représentatif de la diversité de la donnée sol (FAOmax) pour chaque unité de grand bassin hydrographique, la deuxième était de choisir la maille la plus représentative de chaque sous-bassin choisi précédemment, en vue de faire fonctionner le modèle à l'échelle de la maille.

2.3.1 Méthodologie employée pour le choix des bassins versants

Le choix du découpage des sous-bassins versants est issu d'un travail de thèse (Ardoin, 2003) à partir d'une base de donnée. Celle-ci provient essentiellement de la banque SIEREM de l'IRD. Le projet SIEREM (Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation) concentre des données hydrologiques et climatiques collectées par les réseaux nationaux, diverses organisations internationales et des organismes de recherche (FAO, AID, etc.). Théoriquement, un nombre important de sous-bassins aurait pu être traité, mais, tant à cause de lacunes d'observations que de la qualité douteuse de certaines mesures, de nombreuses stations hydrométriques se sont avérées inutilisables pour l'objectif visé.

Sur 111 stations hydrométriques au total, dont 20 pour le bassin versant du Sénégal, 22 pour celui de la Gambie, 26 pour celui du Sassandra et 43 pour le bassin du Logone-Chari, une

première sélection a été effectuée sur la base de la durée et de la quantité des informations disponibles.

Une durée minimale de 20 ans a été imposée, réduisant ainsi le nombre de stations à 53. Une nouvelle sélection de bassins présentant un taux de lacunes mensuelles inférieur à 18% et une superficie minimum établie à 5000 km² ont permis un nouveau tri.

Ainsi, pour chaque unité hydrographique, on dénombre :

Unité hydrographique	Nombre de sous-bassins
Logone-Chari	16
Gambie	7
Sassandra	8
Sénégal	11

Tableau 2 : Nombre de sous-bassins par unité hydrographique

Au total, 42 sous-bassins ont ainsi été sélectionnés à partir de leur stations hydrométriques réparties sur 5 pays dont 2 en Centrafrique, 13 au Tchad, 8 en Côte d'Ivoire; 9 au Sénégal et 10 au Mali (Tableau 2).

Les unités hydrographiques choisies s'étendent sur de grandes superficies, recouvrant plusieurs pays. De ce fait, la modélisation de ces bassins nécessite des données de pluies et de débits très nombreuses, sur des périodes pouvant aller jusqu'à 36 ans de données suivant les bassins (Ardoïn, 2003).

Nous avons donc cherché à travailler sur des "bassins-témoins" les plus représentatifs possibles des paramètres sur lesquels notre étude se porte.

Le degré d'hétérogénéité de la couverture pédologique nous est apparu être le caractère le plus discriminant pour apprécier l'hétérogénéité physique des bassins versants considérés.

Le paramètre considéré ici est la donnée sol extraite de la carte des sols de la FAO (FAO-UNESCO, 1974-1981) représentant la capacité en eau maximale caractéristique de chaque sol (FAOmax).

Pour évaluer l'apport d'un découpage spatial de cette donnée "sol" à différentes échelles, les bassins les plus représentatifs sont ceux qui présentent la plus grande diversité des types de sols et la plus grande disparité de valeurs de FAOmax.

Nous avons donc sélectionné en plusieurs étapes un sous-bassin le plus représentatif de chaque entité hydrographique, parmi les quatre unités que sont les bassins du Chari-Logonne, de la Gambie, du Sénégal et du Sassandra.

2.3.2 Méthodologie employée pour le choix des sous bassins-versants

2.3.2.1 Repérage visuel de la diversité des sols à l'échelle de la maille.

Par le biais d'un Système d'Information Géographique (ArcView3.2), une première sélection visuelle a été effectuée pour chaque grande unité. La couche de sol a été croisée avec une grille dont la maille élémentaire représente un demi-degré carré.

Cependant, ce découpage spatial, effectué sous forme de grille de $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, crée des redondances du nombre de sols observés par maille (figure 2) avec le découpage des polygones de sols tirés de la carte FAO. Il a donc fallu s'affranchir de ce problème afin de cerner le nombre de sols effectif par maille.

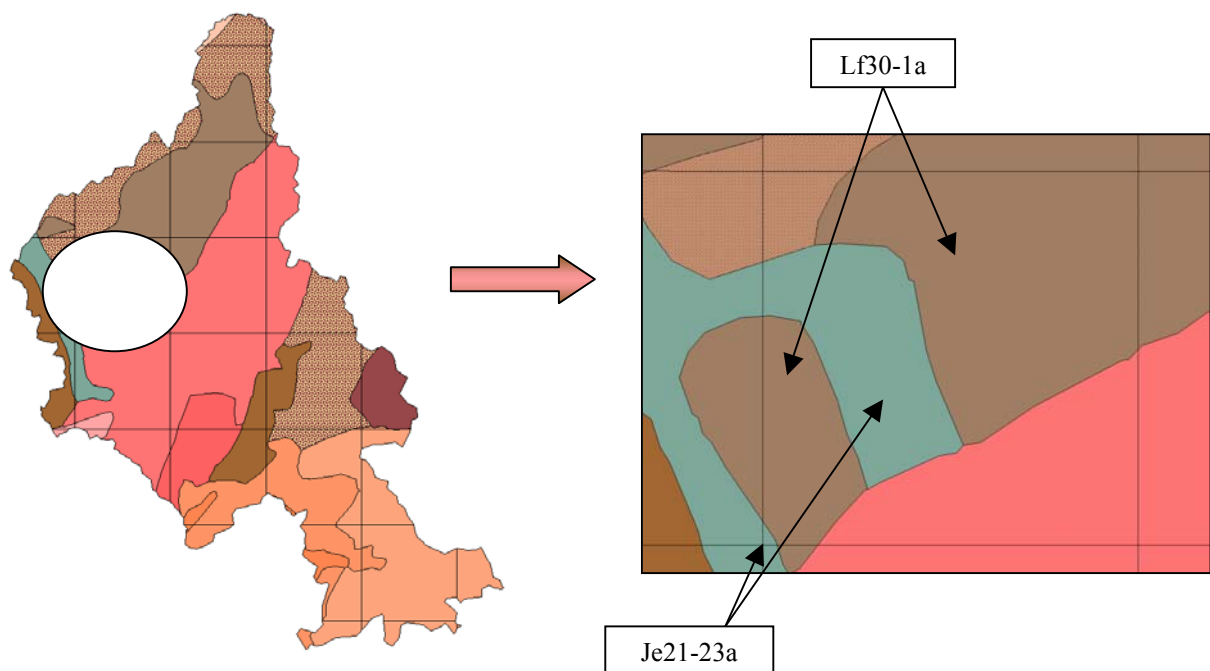


Fig.2 Exemple de carte des sols (d'après la carte de la FAO) et du découpage spatial au demi-degré carré et mise en évidence des redondances.

Le découpage spatial effectué par ArcView présente ici six types de sols distincts correspondant à six morceaux de polygones sol compris dans la maille considérée. En analysant la maille de plus près, on se rend compte qu'elle ne contient en réalité que quatre types de sols distincts. Cela tient du découpage par maille de $0.5 \times 0.5^\circ$ qui recouvre un découpage de polygones de sol.

Il a donc fallu analyser chacune des mailles les plus représentatives afin de voir si le découpage engendrait un nombre de sols faussé.

Une échelle de graduation de couleur du nombre de sols à l'échelle de la maille a été réalisée (fig.3) avec cet objectif.

On peut noter que certaines mailles peuvent contenir jusqu'à 9 types de sols différents.

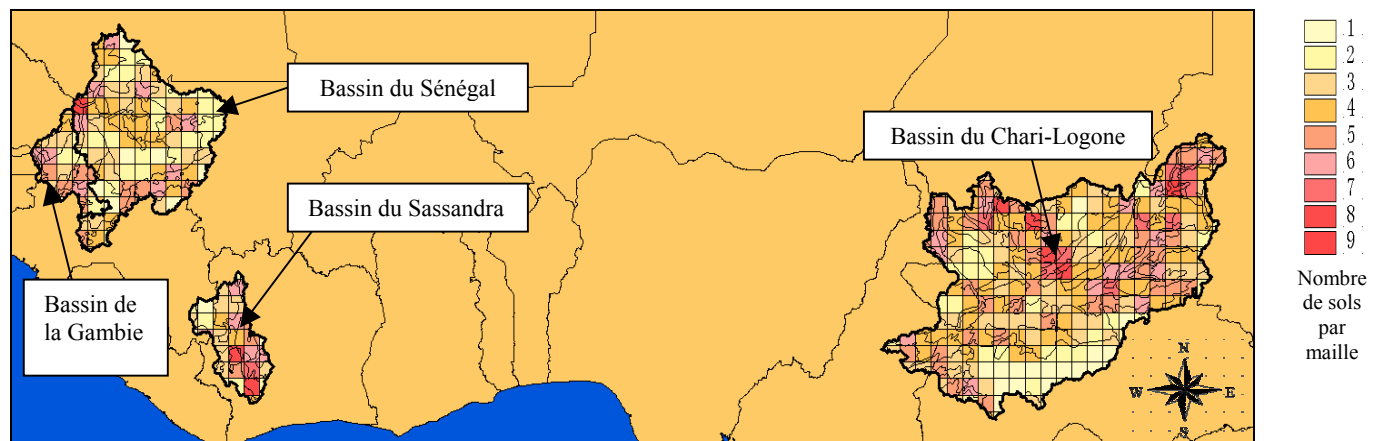


Figure 3 : Sélection visuelle du nombre de sol par maille pour chaque grande unité hydrographique

Cela permet d'obtenir, dans un premier temps une bonne approche visuelle des zones à forte diversité de la donnée sol.

On peut ainsi facilement effectuer une première sélection des sous-bassins versants les plus diversifiés au niveau de la donnée de sol.

Dans l'exemple fourni par la figure 4-d, on distingue nettement que la zone Nord-Ouest du Chari présente de nombreux types de sols, dont de nombreuses mailles présentant un nombre supérieur à 6 types de sols. On aura donc tendance à sélectionner les sous-bassins situés dans cette zone.

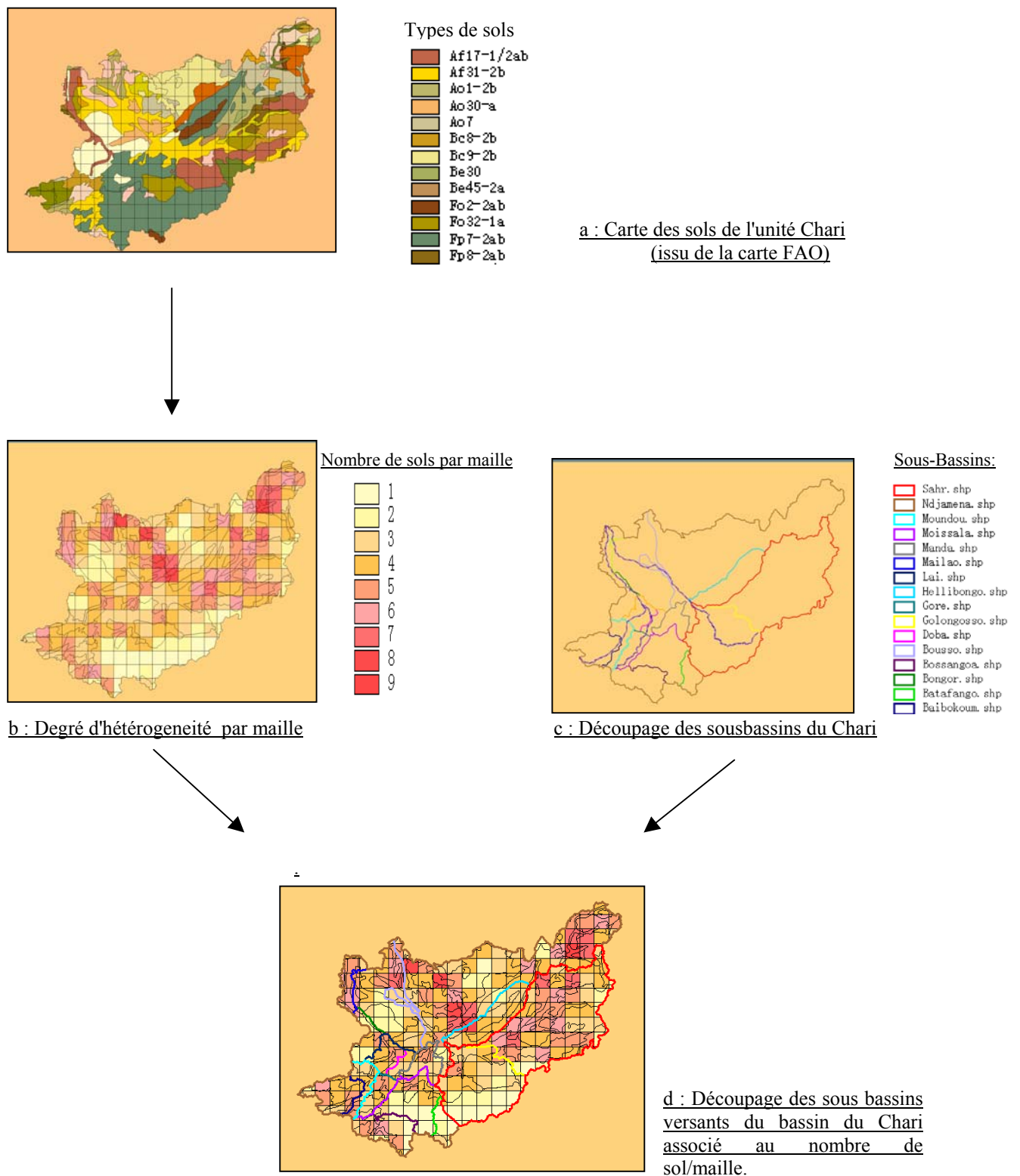


Fig.4-a-b-c-d : Description des différentes étapes de sélection des sous-bassins versant présentant le degré d'hétérogénéité de la donnée "sol" le plus important.

2.3.2.2 Etude statistique

Dans un deuxième temps, en vue d'affiner la sélection nous sommes passés par le biais d'une étude statistique.

Une limite a été imposée à 5 types de sols différents par maille séparant ainsi deux catégories de mailles :

- Les mailles présentant un nombre de sols supérieur à cinq : Catégorie 1.



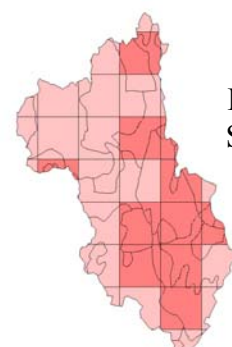
- Les mailles présentant un nombre de sols inférieur à cinq : Catégorie 2.



Le nombre de mailles de catégorie 2 a été additionné pour chacun des sous-bassins et rapporté au nombre de mailles totales de chaque sous-bassins.

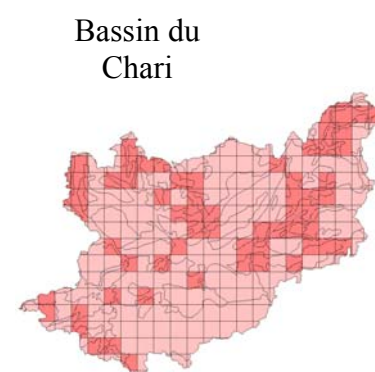
Pour chaque grand bassin hydrographique, 3 sous-bassins ont ainsi été sélectionnés en fonction de leur pourcentage de mailles de catégorie 2 (Tableau a-b-c-d).

SASSANDRA (a)	Nombre de mailles totales du bassin	Nombre de mailles de catégorie 2	% de mailles de catégories 2
BafingMakana	19	3	15.79
Bafingdala	6	1	16.67
Guessabo	24	5	20.83
Guiglo	6	0	0.00
Nibehibe	6	2	33.33
Sorotona	14	1	7.14
Soubré	35	11	31.43



Bassin du
Sassandra

CHARI (b)	Nombre de mailles totales du bassin	Nombre de mailles de catégorie 2	% de mailles de catégories 2
Baibokoum	16	3	18.75
Batafango	10	0	0.00
Bongor	40	8	20.00
Bossangoa	16	3	18.75
Bouso	194	50	25.77
Doba	14	3	21.43
Gore	11	3	27.27
Hellibongo	99	20	20.20
Lai	33	7	21.21
Mailao	240	60	25.00
Manda	43	5	11.63
Moissala	36	4	11.11
Moundou	22	4	18.18
Ndjamena	246	67	27.24
Sahr	91	19	20.88



Bassin du
Chari

SENEGAL (c)	Nombre de mailles totales du bassin	Nombre de mailles de catégorie 2	% de mailles de catégories 2
Bakel	103	14	13.59
DakaSaidou	13	1	7.69
Dibia	25	5	20.00
Galougo	31	5	16.13
Gourbassy	14	0	0.00
Kayes	80	10	12.50
KidiraUhea	19	2	10.53
Mako	10	2	20.00
Missirah	10	2	20.00
Oualia	41	6	14.63
Siramakana	29	4	13.79
Soukoutali	22	5	22.73
Toukoto	13	2	15.38
GAMBIE (d)	Nombre de mailles totales du bassin	Nombre de mailles de catégorie 2	% de mailles de catégories 2
Gouloumbo	30	8	26.67
Kedougou	9	1	11.11
Simenti	16	4	25.00
WassadouAmt	16	4	25.00
WassadouAvl	24	5	20.83

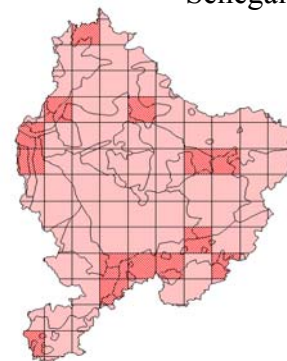
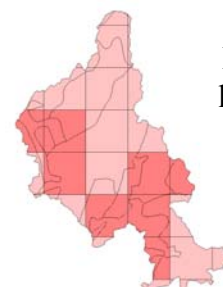
Bassin du
SénégalBassin de
la Gambie

Tableau 3-a-b-c-d : Mise en évidence du pourcentage de mailles à haut degré d'hétérogénéité de la donnée "sol" par sous-bassins versants.

2.3.2.3 Analyse détaillée des sous-bassins présélectionnés pour chaque entité

La dernière étape nous a permis d'effectuer notre choix final, après analyse détaillée des trois présélections. Après avoir travaillé sur le critère de diversité des types de sol au sein de chaque maille, nous avons pris en compte deux autres critères :

- 1- L'importance des redondances d'un même sol (figure 2).
- 2- La disparité des valeurs de FAOmax (Figure 15), capacité de rétention en eau du sol, représentative de la variabilité de la fonction de production.

Ces deux derniers critères ont permis d'établir un choix final de 4 sous-bassins les plus représentatifs des unités hydrographiques considérées (Tableau 4).

Bassin	Rivière	Exutoire	Pays	Surf.(km²)	Période
Chari-Logone	Pende	Gore	Tchad	11511	1959-1995
Gambie	Gambie	Goulombo	Sénégal	42642	1972-1995
Sassandra	Sassandra	Soubré	Côte d'Ivoire	62173	1956-1980
Sénégal	Sénégal	Galougo	Mali	120820	1952-1995

Tableau 4 : Description des quatre sous-bassins retenus dans le cadre de notre étude

2.3.2 Caractéristiques et intérêts des sous-bassins versants choisis

2.3.2.1 Bassin versant : CHARI-LOGONE - Sous bassin versant : GORE

Caractéristiques de GORE :

Gore constitue un des sous-bassins versant du Logone.

- 3 mailles sur 11 présentent 5 types de sols différents, soit 27.27 % de la totalité des mailles.
- Au total, on distingue 7 types de sols.
- La superficie est de 11511 km², c'est donc un petit bassin, comparé à la majeure partie des sous-bassins (de 40000 à 120000 km²)
- Valeur FAOmax moyen : 187 mm.
- La série chronologique de données s'étend de 1959-1995, on possède donc 36 ans de données de débits, pluies et ETP mesurées.
- Ce bassin permet de mettre en évidence une forte disparité des valeurs de FAOmax; on distingue ainsi 6 valeurs : 92, 110, 140, 164, 200, 360 mm.

Gore a été choisi en raison de sa forte disparité des valeurs de FAOmax, sur une superficie relativement petite avec une série chronologique suffisamment longue, répartie tant sur la période humide que sur la sèche.

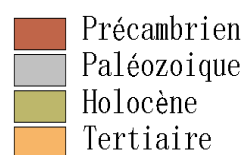
Type de végétation : ce bassin est caractérisé par un régime tropical à sub-tropical. Il est partagé au Nord-Est par une savane arborée préforestière constituée de savanes boisées et de forêts claires sèches et au Sud-Ouest par une forêt tropicale humide équatoriale, aux faciès variés. Plus au Nord, la sécheresse accentuée entraîne le passage à la steppe sahélienne à épineux aux prairies à graminées dans les zones périodiquement inondées par le Logone.

Géologie : 95 % du bassin versant est constitué par le vieux socle africain, gendolé et accidenté de fossés tectoniques, où affleurent gneiss et granites au sol, souvent latérisés. La partie Nord s'ennoie sous les sédiments récents holocènes au niveau de l'exutoire.

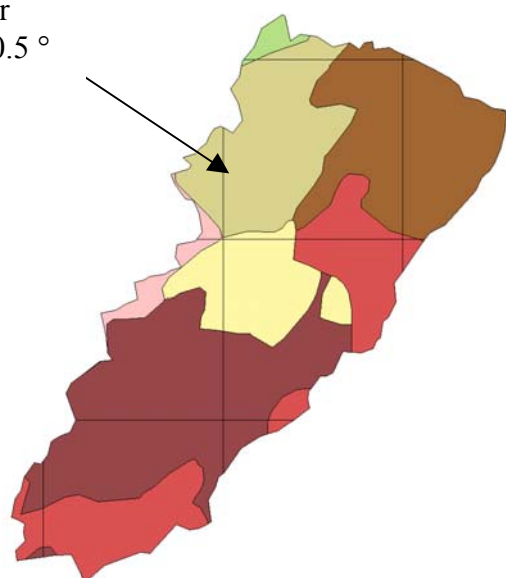
Bassin de Gore 11511 km²



Géologie



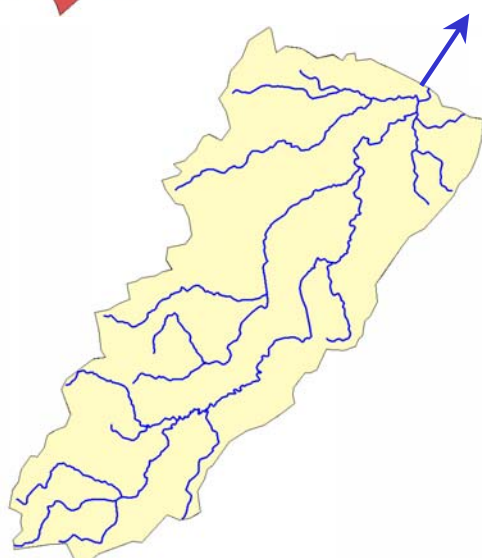
Découpage par
maille 0.5° x 0.5 °



Classe des sols FAO



Exutoire



Réseau hydrographique

0 50 100 150 200 Kilomètres

Echelle

2.3.2.2 Bassin versant : GAMBIE - Sous bassin versant : GOULOMBO

Goulombo constitue un des sous-bassins versants du fleuve de la Gambie. Sa localisation à proximité des côtes sénégalaises, le rend sensible aux ondes de marées. Celles-ci vont par conséquent fortement influencer le régime hydrologique du fleuve, surtout durant les périodes de basses eaux et vont ainsi représenter une contrainte majeure pour la mise en valeur de ses versants. Il en résulte que les valeurs de débits ne sont vraiment fiables qu'au-dessus de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (en dessous, on enregistre donc les ondes de marées), donc durant les périodes de hautes eaux.

Le réseau hydrographique est très dense. Le fleuve est formé par l'association de nombreux petits cours d'eaux à très fortes pentes (Sambou, 1995).

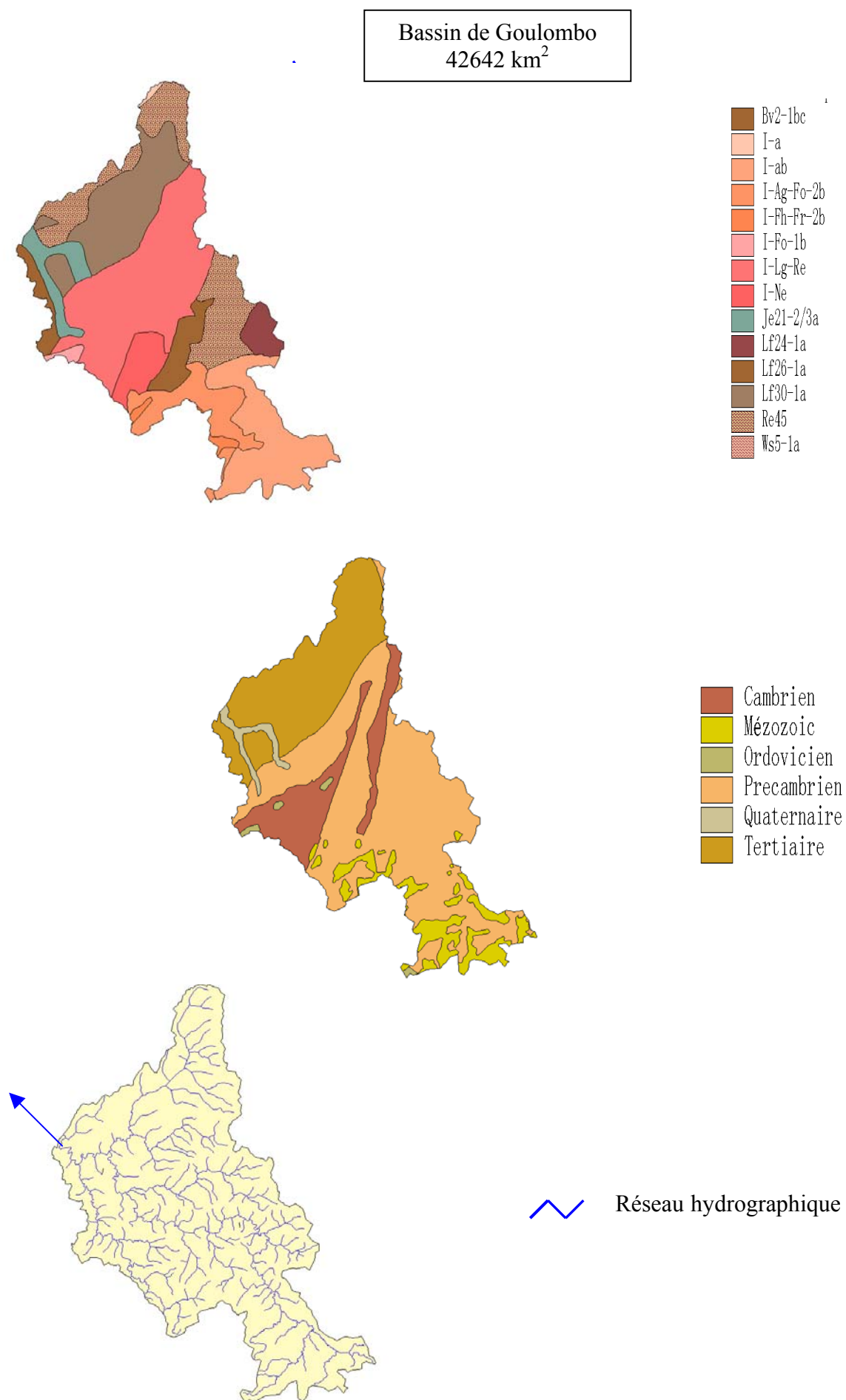
Goulombo représente le bassin de la Gambie le plus diversifié au niveau de la donnée "sol". Son intérêt est surtout qu'il présente une catégorie de sol de type Wetland, caractérisant les zones marécageuses.

Particularités du sous bassin :

- Superficie : 42642 km^2
- FAOmax moyen : 149 mm.
- Présente 8 mailles sur 30 avec une diversité de sols/mailles > 5 , donc 26.67% de la surface d'occupation.
- Au total, ce bassin présente 14 types de sols. Avec 10 valeurs distinctes de FAOmax : 20, 94, 117, 124, 132, 134, 139, 195, 1000 mm (Wetlands) et une très forte disparité.

Végétation : on retrouve un gradient Nord-Sud où l'on passe d'une zone de savanes au Nord à une forêt tropicale humide au Sud.

Géologie : Marqué en grande partie par une zone de socle précambrien sur la majeure partie sud-est, on retrouve une frange tertiaire Nord-Ouest. Le sol dérive de l'altération directe de la roche mère, donc pédologie et géologie sont étroitement liées. Ici, on peut noter que les classes pédologiques suivent parfaitement les limites géologiques.



2.3.2.3 Bassin versant : SASSANDRA Sous bassin versant : SOUBRÉ

Particularités du sous bassin :

Le sous-bassin Soubré représente l'exutoire du fleuve Sassandra. Par conséquent, il présente la superficie la plus importante (62173 km²) puisqu'il recouvre l'ensemble des sous-bassins. L'intérêt majeur est qu'il présente 24 types de sols différents, ce qui le rend le plus représentatif de la donnée "sol" de l'unité hydrologique du Sassandra. On retrouve sept valeurs distinctes de FAOmax (110, 140, 143, 164, 182, 200, 255 mm) et un FAOmax moyen sur le bassin élevé (177 mm).

Il présente 11 mailles sur 35 avec une importante diversité de sols, donc 31.43% de la surface d'occupation du bassin.

Remarque :

Les données de débits ne s'étendent que de 1956 à 1980 car après 1980, le barrage de BUYO situé en amont (Annexe 4), ne permettait plus d'obtenir un débit naturel, avec pour conséquence une influence sur les données obtenues. La période post-80 ne sera donc pas prise en compte.

Végétation : 98% du bassin est de type forêt tropicale humide

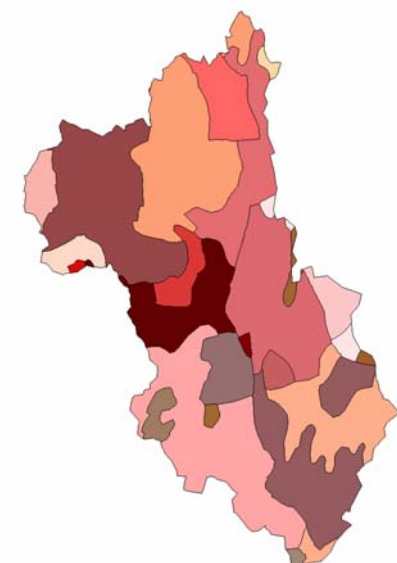
Géologie : Le socle granito-gneissique couvre 97 % du territoire, mettant en évidence une zone principalement fissurée.

Bassin de Soubre 62173 km²



Classes de sols FAO

Af2-2a	Be42
Af24-2a	Bf3
Af27	Bf3-2b
Af27-1ab	Bf4
Af28-a	Bf4-2b
Af30	Bf5-2/3ab
Af5	Bf7-2b
Af5-1/2a	Fb6-2b
Ao10-a	Fo46-3bc
Ao48-1a	I-Ao-2bc
Ao49-ac	I-Fo-2bc
Ao59-1a	
Ao60	



Géologie

Miocène
Précambrien



Réseau hydrographique



Exutoire

0 100 200 Kilomètres



2.3.2.4 Bassin versant : SENEGAL-Sous bassin versant : GALOUGO

Galougo constitue un des bassins versant du fleuve Sénégal, sa superficie est particulièrement importante, en comparaison aux sous-bassins décrits précédemment (120821 km²). Son intérêt réside principalement par le fait qu'il présente un FAOmax moyen particulièrement faible (96 mm), ceci en raison d'une majeure partie du bassin présente un FAOmax très faible (20 mm). Il présente une forte disparité des valeurs de FAOmax puisqu'on retrouve des sols avec des valeurs allant de 20 à 200, avec au total, sept valeurs distinctes (20, 80, 110, 139, 154, 182, 200 mm).

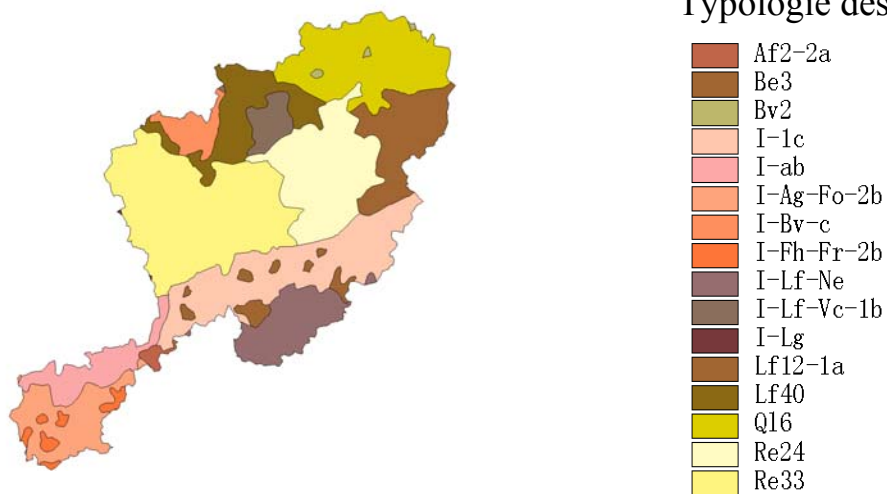
L'étude statistique menée précédemment met en relief le fait que seulement 16,13% du bassin présente un fort degré d'hétérogénéité de la donnée de sol mais ici, c'est la diversité importante sur l'ensemble du bassin (16 types de sols) et la grande disparité que nous chercherons à mettre en évidence.

Végétation : on distingue trois zones distinctes, au Nord, un climat tropical à sub-tropical avec une zone de savanes, au centre, une zone de savane arborée préforestière et au Sud, une forêt tropicale humide.

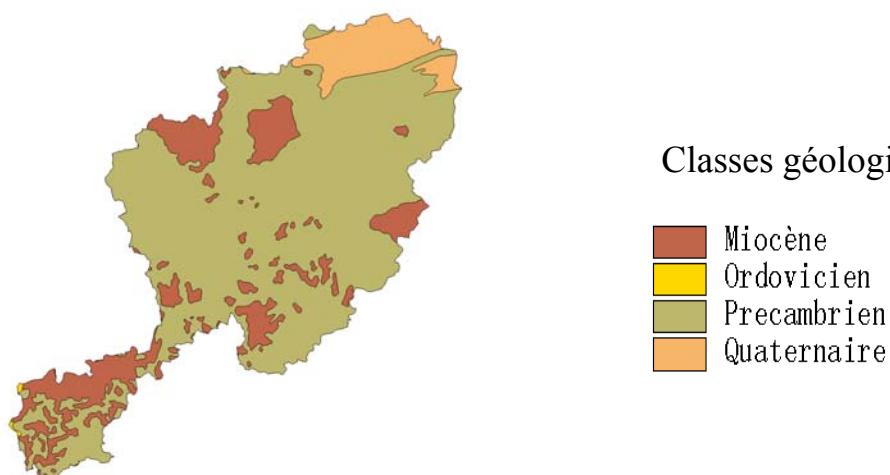
Géologie : là encore, on retrouve majoritairement une zone de socle cristallophyllienne et cristalline précambrienne fissurée.

Bassin de Galougo 128 400 km²

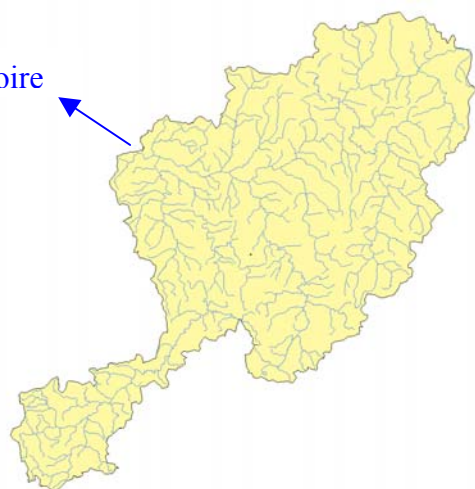
Typologie des sols



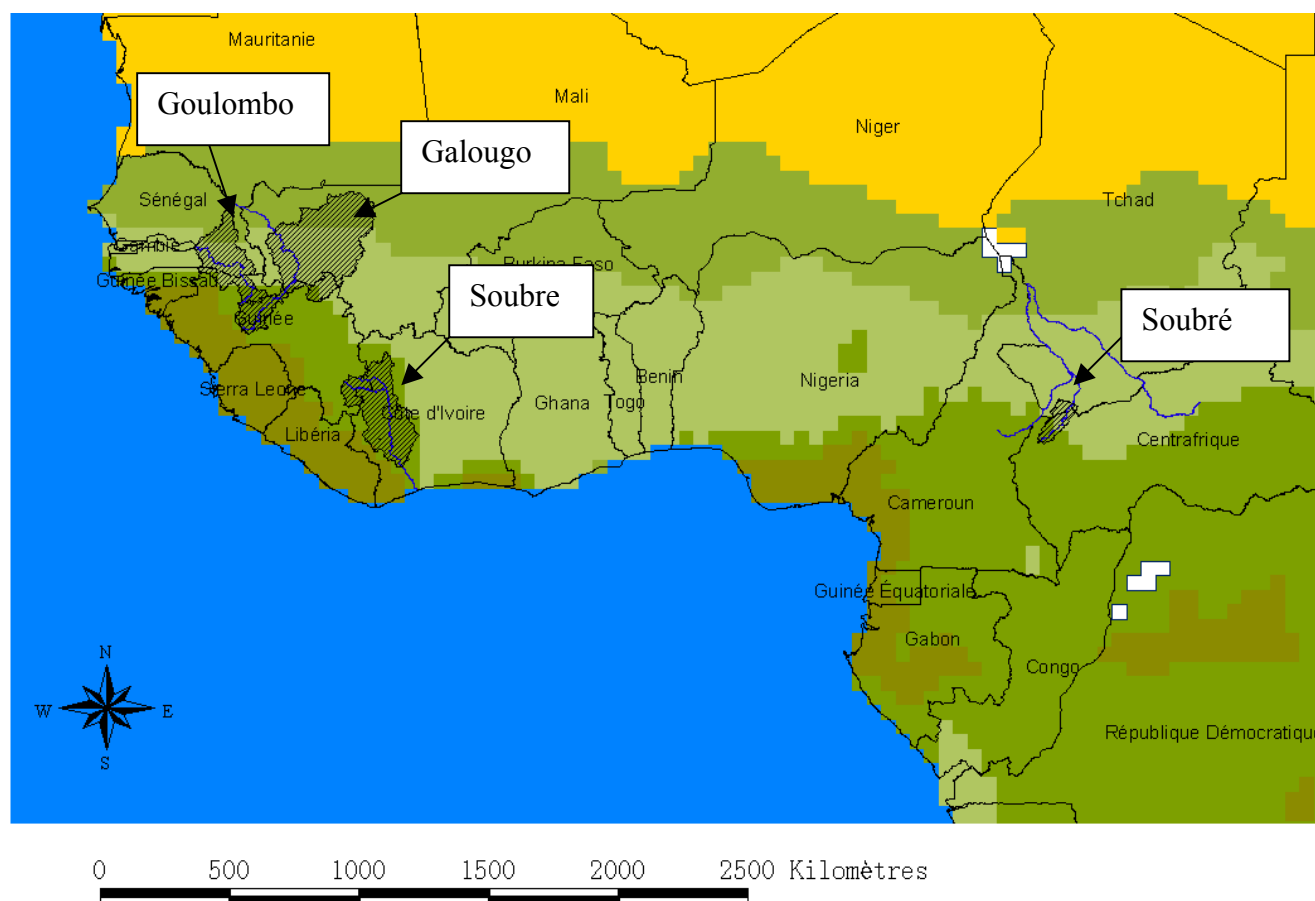
Classes géologiques



Exutoire



 Réseau hydrographique



Légende :

Type de végétation

- no data
- Tundra/polar
- Boreal forest
- Cool desert
- Steppe
- Temperate forest
- Hot desert
- Chaparral
- Warm temperate forest
- Trop./Sub-trop. semi-arid
- Trop./Sub-trop. dry forest and savannah
- Trop./Sub-trop. seasonal forest
- Trop./Sub-trop. rain and wet forest
- 14



Sous-bassins versants étudiés



Réseau hydrographique simplifié

Figure 9 : Localisation des sous bassins étudiés sur la carte des régions climatiques et végétation associées

2.4 Choix des mailles caractéristiques de chaque sous-bassin :

En vue de travailler à l'échelle de la maille, c'est à dire sur un demi-degré carré, nous avons cherché sur la base des mêmes critères à définir, pour chacun des sous-bassins, la maille la plus représentative de la diversité de la donnée de sol. Une recherche maille par maille a permis une nouvelle sélection.

GORE : Choix de la maille 1625E775N

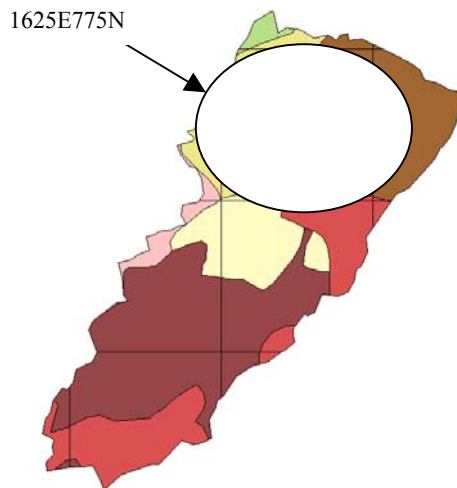


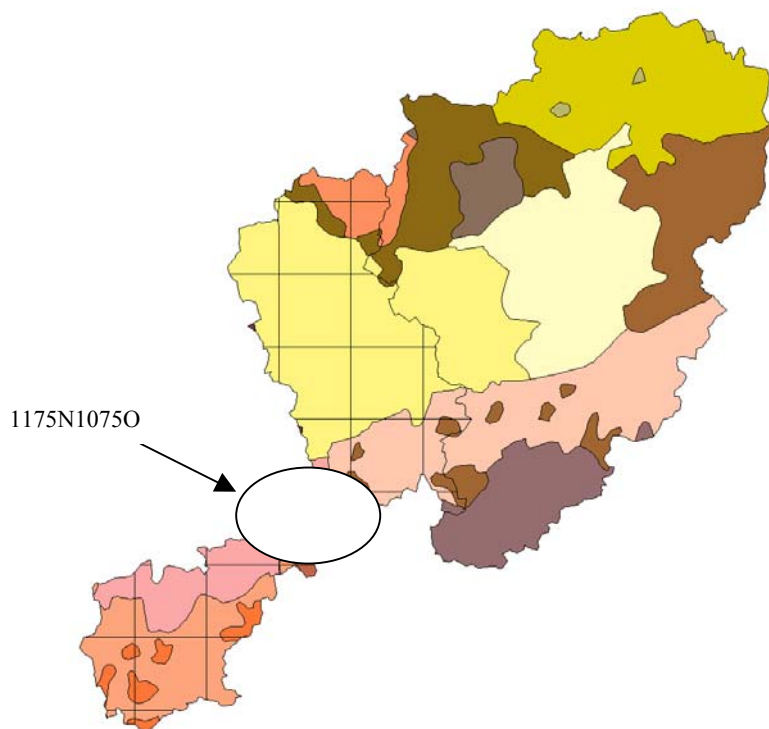
Figure 10 : Localisation de la maille choisie sur le bassin de Gore

FAOmax(mm)	FAOSOIL	Superficie (%)	% d'occupation de la maille	96,6%
200	Nd11	0.14	Surface d'occupation en degré carré	0.241
92	Re33-1a	50.41	Superficie de la maille en km ²	3063,12
360	Lg36-1a	36.65	Surface d'occupation en km ²	2961.51
140	Fp7-2ab	10.73	FAOmax moyen de la maille en mm	197
164	Rd12-2bc	2.04		

Tableau 5 a-b : Caractéristiques de la maille 1625E775N

L'intérêt de cette maille est qu'elle présente 2 types de sols majeurs (Fig.10) ; le premier occupe 50 % du bassin versant avec un FAOmax de 92 mm, la deuxième, occupe 36 % de la maille avec un FAOmax de 360 mm (Tableau 5-a). On retrouve donc deux types de fonctions de production bien distinctes, ce qui est intéressant en terme de modélisation de la relation pluie-débit.

Végétation et géologie : Zone intermédiaire de savane arborée préforestière, zone de socle cristallophyllien et cristallin précambrien fissuré.

GALOUGO : Choix de la maille 1175N1075OFigure 11 : Localisation de la maille choisie. Bassin de Galougo

FAOmax(mm)	FAOSOIL	Superficie (%)
20	I-ab	28.16
20	I-1c	42.38
154	Be3	2.61
182	Af2-2a	27.02
139	I-Ag-Fo-2b	23.95

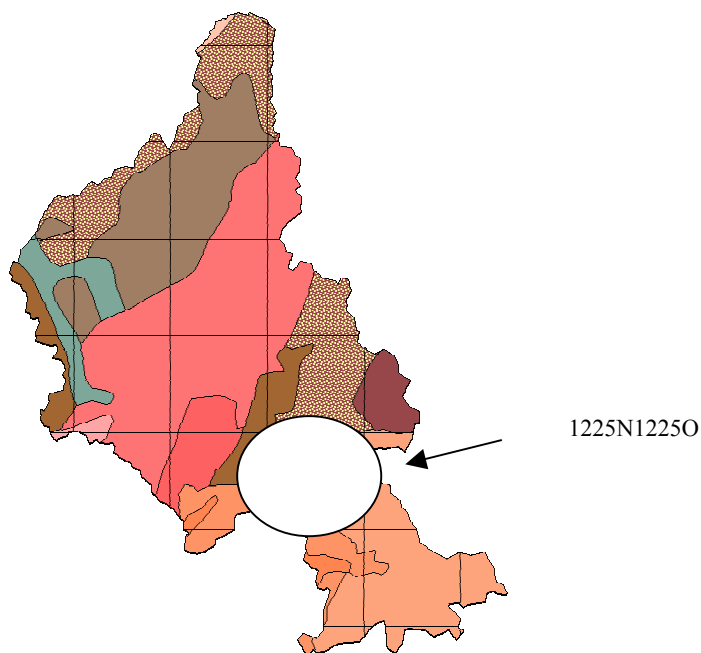
% d'occupation de la maille	62.80%
Surface d'occupation en degré carré	0.157
FAOmax moyen de la maille en mm	66.6

Tableau 6 a-b : Caractéristiques de la maille 1175N1075O. a- Description des superficies pour chaque type de sol et FAOmax correspondant ; b- Caractéristiques de la maille considérée.

On peut noter un faible pourcentage d'occupation du bassin versant dans la maille (seulement 62,80%),

Cependant; l'intérêt que présente l'étude de cette maille est le fait que 70.54 % de l'occupation du bassin versant dans la maille présente un FAOmax égal à 20 mm, ce qui fait fortement diminuer le FAOmax moyen et correspond à un critère intéressant pour cette étude.

Végétation et géologie : Cette maille se situe en zone de forêt tropicale humide. La géologie est partagée entre du socle précambrien et des roches ignées mésozoïques.

GOULOMBO : Choix de la maille 1225N1225OFigure 12 : Localisation de la maille choisie- Bassin versant de Goulombo

FAOMAX(mm)	FAOSOIL	Superficie (%)
124	Bv2-1bc	2.28
94	Re45	10.20
20	I-ab	35.35
139	I-Ag-Fo-2b	51.67
139	I-Fh-Fr-2b	0.04
139	I-Fh-Fr-2b	0.43

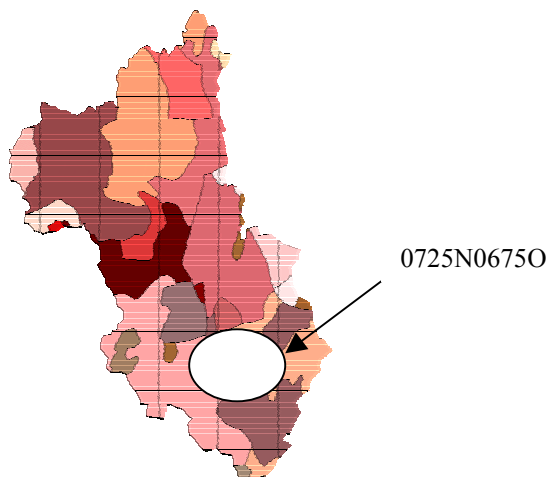
% d'occupation de la maille	99.14
Surface d'occupation en degré carré	0.227
FAOmax moyen de la maille	91.9

Tableau 7 a-b : Caractéristiques de la maille 1225N1225O. a- Description des superficies pour chaque type de sol et FAOmax correspondant ; b- Caractéristiques de la maille considérée.

Là encore, l'intérêt réside dans le fait que 35.35% du bassin versant présente un FAOmax= 20.

La forte diversité et disparité de la donnée "sol" revêt aussi une grande importance dans le cadre du volet de modélisation à l'échelle de la maille.

Végétation et géologie : zone intermédiaire de forêt saisonnière. Socle précambrien.

SOUBRÉ : Choix de la maille 0725N0675OFigure 13 : Localisation de la maille choisie pour le sous-bassin Soubré.

FAOSOIL	Superficies (%)	FAOmax(mm)
Af28-a	0.139987	143
Ao10-a	0.008073	164
Ao48-1a	0.002026	140
Ao59-1a	0.046870	255
Af27-1ab	0.040054	152
Af24-2a	0.012972	182

% d'occupation de la maille	99.14
Surface d'occupation en degré	0.25
FAOmax moyen de la maille	153.2

Tableau 8 a-b : Caractéristiques de la maille 1175N1075O. a- Description des superficies pour chaque type de sol et FAOmax correspondant ; b- Caractéristiques de la maille considérée.

Cette maille présente l'intérêt d'avoir un fort degré d'hétérogénéité de sols avec six types de sols distincts, avec des FAOmax caractéristiques.

Végétation et géologie : Forêt tropicale humide, zone de socle précambrien.

Chapitre 3

MODELISATION DE LA RELATION PLUIE-DEBIT

3.1 La relation pluie-débit :

Aujourd'hui, la nécessité de quantifier les phénomènes de types extrêmes comme les crues exceptionnelles est un des domaines les plus connus du grand public, mais la connaissance des débits moins exceptionnels reste fondamentale dans le cadre de la gestion de la ressource en eau, en relation directe avec la demande en eau des populations.

Chaque point d'un cours d'eau permet de définir un bassin versant et les débits observés en ce point sont directement liés aux précipitations tombées sur ce bassin. A partir des observations faites en quantifiant la pluie tombée, on peut arriver à reproduire la réponse en débit du bassin. La simulation hydrologique du bassin versant, décrite comme la transformation de la pluie en débit passe par l'utilisation d'un modèle hydrologique.

Le passage de la pluie au débit reste un problème complexe mais demande pour une utilisation simple un nombre de paramètres limité. La modélisation conceptuelle permet de limiter le nombre de paramètres entrant en jeu dans le modèle mais renonce à une connaissance minutieuse des différents phénomènes, l'objectif principal étant de reproduire au mieux le comportement global d'un bassin donné face à une série chronologique de données pluviométriques.

Les facteurs déterminants entrant dans les mécanismes hydrologiques présentent une variabilité tant d'un point de vue temporel que spatial extrêmement importante. Cela induit par conséquent une représentation mathématique de ces phénomènes extrêmement complexes.

La modélisation globale des processus avec des paramètres intégrant les hétérogénéités locales comme la donnée "sol" permet aujourd'hui de proposer des outils simples et opérationnels pour la prévision de la ressource en eau à l'échelle du bassin (Baudez *et al.*, 1997).

Cette démarche de recherche d'optimisation des outils de modélisation s'insère dans un cadre beaucoup plus général de l'hydrologie où l'objectif est de pouvoir obtenir des méthodes

transposables d'un bassin versant à un autre. Pour cela, il semble nécessaire de relier les paramètres du modèle aux grandeurs caractéristiques du milieu physique.

Aussi, pour tenir compte de l'hétérogénéité d'un bassin, une démarche assez souvent suivie est la discrétisation du milieu étudié, grâce à un modèle distribué, avec une taille de maille telle que les paramètres physiques soient supposés homogènes. En outre, la variabilité entre les mailles doit reproduire une distribution observée ou présumée des grandeurs physiques et de leurs dépendances par rapport à des grandeurs macroscopiques établies sur quelques points de mesures.

La problématique est l'apport d'une modélisation spatialisée en mode semi-distribué par rapport à une simple modélisation globale en prenant mieux en compte la donnée "sol" dans les algorithmes de la relation pluie-débit, par une désagrégation de l'information à des échelles plus réduites.

Pour pouvoir y répondre, nous avons comparé ces deux approches à l'aide d'un même modèle, sur les quatre sous-bassins versants choisis précédemment avec pour objectif l'amélioration d'outils adaptés (modèles hydrologiques).

L'objet de cette étude amène donc à identifier des domaines centraux à de tels projets de recherche (la modélisation du cycle hydrologique) et des domaines périphériques, objets d'autres disciplines qui déterminent les conditions aux limites de la modélisation, mais qui sont interactives avec celles-ci (pédologie, écologie végétale, etc.).

3.2 Définition d'un modèle

Il semble important, avant de rentrer dans l'étude de façon approfondie, de définir ce qu'est un modèle afin d'expliquer les choix de l'outil de modélisation utilisé dans notre étude.

Un modèle permet donc d'approcher de façon figurative des systèmes hydrologiques complexes. Le plus souvent basé sur la représentation mathématique ou physique des processus, il intègre les différentes phases du cycle de l'eau, en tentant de s'approcher au maximum de ce qui se passe dans la réalité.

Le modèle hydrologique parfait, pouvant s'appliquer à toutes les échelles de temps et d'espace, n'existe pas, mais les efforts accomplis dans l'amélioration et le perfectionnement des outils de modélisation permettent aujourd'hui, de mieux cerner les différentes phases du cycle hydrologique et ainsi de mieux les modéliser.

3.2.1 Le modèle global

Dans le panel de modèles hydrologiques existants, la modélisation globale a la particularité de traiter le bassin versant dans son ensemble comme une seule entité, aux propriétés uniformes. On estime que les variations spatiales des paramètres et les variables d'entrée ont un effet négligeable et qu'il n'y a pas lieu d'effectuer un découpage dans l'espace. Le modèle est d'ordre zéro dans l'espace (Makhlouf, 1994).

3.2.2 Le modèle distribué et semi-distribué

Ici, l'étendue ou l'hétérogénéité du cadre physique sur le système peut conduire à faire une discrétisation de l'espace des entrées et des paramètres. On construit alors un modèle distribué (Makhlouf, 1994). La forme des unités élémentaires qui seront représentées par un modèle global peut être arbitraire, par exemple, des mailles carrées ou fondées sur les divisions naturelles, ou encore, un découpage par sous-bassin.

Certains modèles globaux en hydrologie essayent de prendre en compte l'hétérogénéité de l'occupation du sol dans les bassins versants en les découpant en parcelles fictives, correspondant chacune à un type d'occupation du sol, ces niveaux de découpages n'ayant pas un ordre hiérarchique les uns par rapport aux autres. Ces modèles sont appelés semi-distribués.

3.2.3 Le modèle conceptuel

Lorsque la structure du système et les lois qui le régissent sont inconnues ou, quand la mise en œuvre d'un modèle mécaniste devient très compliquée, on procède à une simplification du système. Ainsi, les modèles conceptuels sont réducteurs de la complexité naturelle, bien qu'ils aient l'avantage d'introduire une référence physique (Makhlouf, 1994).

3.2.4 Les variables du modèle

On distingue plusieurs variables entrant en jeu dans le système ;

- Les variables indépendantes correspondent aux données d'entrée du système, ici, il s'agit des pluies mesurées P . Ces données fluctuent en fonction du pas de temps utilisé, donc dans notre cas, la pluviométrie va varier à l'échelle du mois.
- Les variables indépendantes ou variables de sortie : il s'agit essentiellement des débits simulés par le modèle à l'exutoire du bassin versant.
- Les variables d'état permettent de caractériser l'état du système modélisé, comme par exemple, le niveau de remplissage des différents réservoirs d'eau du bassin.

3.2.5 La notion de paramètres

Cette notion est directement liée à la notion de modèles conceptuels. Il n'est souvent pas possible de représenter les processus physiques d'un modèle, on utilise alors des paramètres n'ayant plus de sens physique et ne pouvant être reliés à des variables mesurables. La valeur de ces paramètres doit être déterminée par une phase de calage.

Cependant, une des particularités de l'optimisation de ces paramètres tient à leur domaine de définition. En effet, certains paramètres ne peuvent être négatifs, d'autres doivent absolument être compris entre 0 et 1, sous peine d'aboutir à des aberrations (comme le non respect du bilan par exemple). Ces contraintes doivent donc absolument être respectées. On parle alors d'optimisation sous contrainte, ce qui revient dans notre cas, à interdire l'accès à certaines zones de l'espace des paramètres (Dezetter, 1991)

3.3 Caractéristiques de la modélisation utilisée

3.3.1 Choix de l'échelle

3.3.1.1 Choix du découpage spatial

La résolution spatiale et temporelle des modèles pluviométriques que la communauté climatique est en mesure de fournir conditionne très largement l'approche hydrologique à mettre en œuvre. Le choix de travailler sous forme de grilles maillées est directement relié au découpage spatial utilisé par les climatologues. Nous travaillerons ici avec des mailles au demi-degré carré, échelle utilisée pour de nombreux modèles climatiques régionaux.

3.3.1.2 Choix du pas de temps

A l'échelle de dizaine à centaine de milliers de km^2 , les données journalières s'avèrent trop lourdes et les données annuelles ne permettent pas de mettre en évidence les variations telles que les saisons de pluies.

Le pas de temps mensuel semble donc être le plus approprié à ce type de climat.

Dans ce cadre, l'absence de fonction de transfert permet de s'intéresser uniquement à la fonction de production.

Ainsi les variables pluies, débits et ETP ne sont connues que par leur sommation sur un mois calendaire, la répartition de celles-ci à l'intérieur de chaque mois n'est pas prise en compte.

3.3.2 Le modèle GR2M

3.3.2.1 Description

Elaboré au CEMAGREF sur un ensemble de bassins français (Makhlouf, 1994), GR2M est un modèle conceptuel pluie-débit à réservoirs, à pas de temps mensuel et utilisant seulement deux paramètres.

Bien qu'il soit le plus souvent utilisé en mode global, sa simplicité d'utilisation et sa robustesse permet de facilement l'adapter au mode semi-distribué.

GR2M restitue ainsi les débits calculés à travers une série de réservoirs à partir des données initiales du bassin versant au début de la période simulée.

Ici, les variables d'entrée sont la pluie et l'ETP et les variables de sortie sont les débits simulés notés Q.

Les deux paramètres à caler de ce modèle sont notés x_1 et x_2 (figure 16).

3.3.2.2 Le réservoir sol

Il est caractérisé par sa capacité maximale A. Le niveau S du réservoir sol permet de définir la fraction de pluie qui accédera au réservoir eau gravitaire. Il permet notamment de définir l'évapotranspiration réelle (ETR) qui pourra être fournie, celle-ci est une fraction de l'ETP ayant des caractéristiques symétriques à la fraction de pluie entrant dans le réservoir eau gravitaire.

La valeur A utilisée ici est issue de la carte "Soil Map of the Word" fournie par la FAO (FAO-UNESCO, 1974-1981). Pour la FAO, cette variable est notée S. On s'est aperçu que parmi les différentes grilles fournis par la FAO, Smax conduit aux valeurs du critère les plus élevées pour la majorité des cas (Figure 14), et cela, quelque soit le modèle considéré (Ardoin, 2003). Nous avons donc fait le choix d'utiliser cette valeur S_{max} pour la donnée "sol" A utilisée dans GR2M.

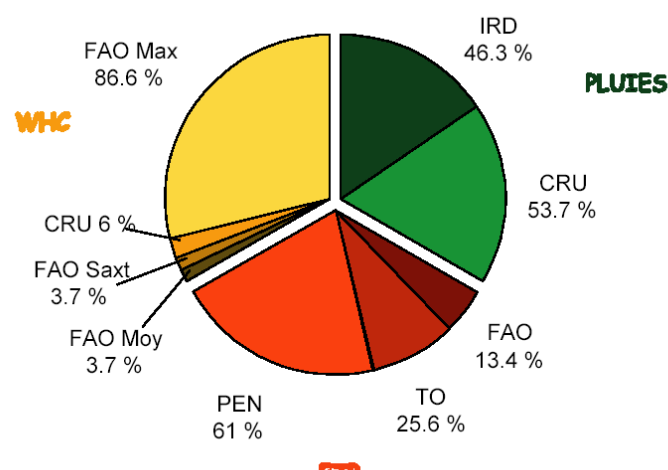


Figure 14 : Résultats en terme de meilleurs calages pour l'ensemble des données sur les 41 bassins pour les sous-populations de pluie, d'ETP et de WHC(selon Ardoin, 2003).

Les valeurs de la capacité d'emménagement de l'humidité du sol (the soil moisture storage capacity) ont été déterminées par une analyse des cent premiers centimètres du sol ou dans les couches imperméables superficielles, cette valeur va donc être caractéristique des particularités du sol et l'on retrouve en général une donnée différente pour chaque grande typologie de sol(Figure 15). Smax est exprimé en millimètres.

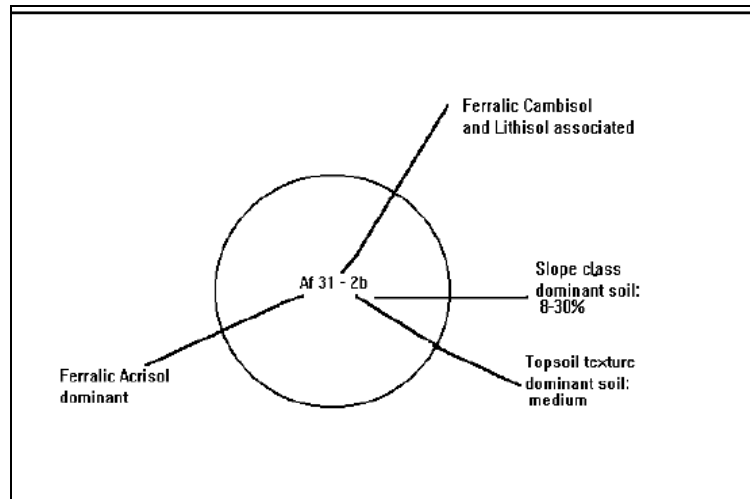


Figure 15 : Informations directes du sol contenu dans la carte des sols du Monde (FAO, Soil Map of the World.)

3.3.2.3 La fonction de production et fonction de transfert

La fonction de production met en évidence la répartition de l'eau précipitée entre les différents termes du bilan hydrique, elle permet essentiellement de déterminer l'ETR, le ruissellement superficiel et la partie de l'eau qui transite par la fonction de transfert appelée "eau gravifique". A P donnée, une valeur faible de FAOmax donnera une production plus forte, et donc un écoulement plus important que pour une forte valeur de FAOmax.

3.3.2.4 Hiérarchisations des différentes étapes

Ajustement des entrées :

Les données de précipitations (P) et d'évapotranspiration (ETP) sont ajustées par un paramètre multiplicatif X_1 afin d'obtenir P' et ETP'.

Ce paramètre agit comme un coefficient correcteur des entrées et correspond à un des paramètres à estimer dans la phase d'optimisation.

$$\begin{cases} P = X_1.P' \\ ETP = X_1.ETP' \end{cases}$$

Neutralisation :

Elle se traduit par la soustraction d'une quantité (U) aux valeurs de P' et ETP'.

On aboutit ainsi aux quantités de pluie (P_n) et d'évapotranspiration nette (E_n), participant de manière effective à l'écoulement.

U est de la forme:

$$U = \frac{P' \cdot ETP'}{(\sqrt{P'} + \sqrt{ETP'})^2}$$

Cette quantité est ainsi soustraite aux entrées :

$$\begin{cases} P_n = P' - U \\ E_n = ETP' - U \end{cases}$$

Action du réservoir (Stockage) :

Soit H le stock d'humidité du réservoir sol en début du mois considéré, le forçage de P_n augmente le niveau de H pour donner H_1 :

$$H_1 = \frac{H + AV}{1 + \frac{HV}{A}}$$

$$\text{où } V = \tanh \frac{P_n}{A}$$

et A correspondant à la capacité maximum du réservoir sol.

La valeur d'excès de pluie P_e est déterminée ici par :

$$P_e = P_n - (H_1 - H)$$

Puis, sous l'effet de E_n , le niveau H_1 du réservoir devient H_2 qui correspond au niveau du réservoir sol au début de chaque mois suivant.

$$H_2 = \frac{H_1(1-W)}{1+W(1-\frac{H_1}{A})}$$

$$\text{Avec } W = \tanh \frac{H_1}{A}$$

Ces relations sont issues de l'intégration de formules plus élémentaires (Edijatno et Michel, 1989).

Routage et écoulements :

Remarque : Le réservoir d'eau gravitaire S (fonction transfert) reçoit directement P_e et le niveau de celui-ci au début de chaque mois considéré, augmente pour devenir S_1 . On peut noter qu'ici, on considère que toute la portion de P_e s'écoule dans le réservoir d'eau gravitaire.

La partie complémentaire, initialement prévue dans le schéma de GR2M, correspondant à l'écoulement direct, n'est plus pris en compte.

Ce choix fait suite à la constatation (Lubes-Niel., 2003) après optimisation, que l'écoulement direct en région tropicale semi-aride, tout au moins d'un point de vue numérique, est nul sur un très grand nombre de bassins versants africains.

Nous ne considéreront donc pas ici les écoulements directs.

Le niveau S du réservoir au début du mois considéré augmente et devient S_1 .

$$S_1 = S + P_e$$

Le débit Q_g libéré par le réservoir linéaire au cours de la vidange est alors de la forme :

$$Q_g = X_2 \cdot S_1$$

Celui ci correspond à l'écoulement total puisque l'écoulement direct est considéré comme nul.

D'où $Q = Q_g$

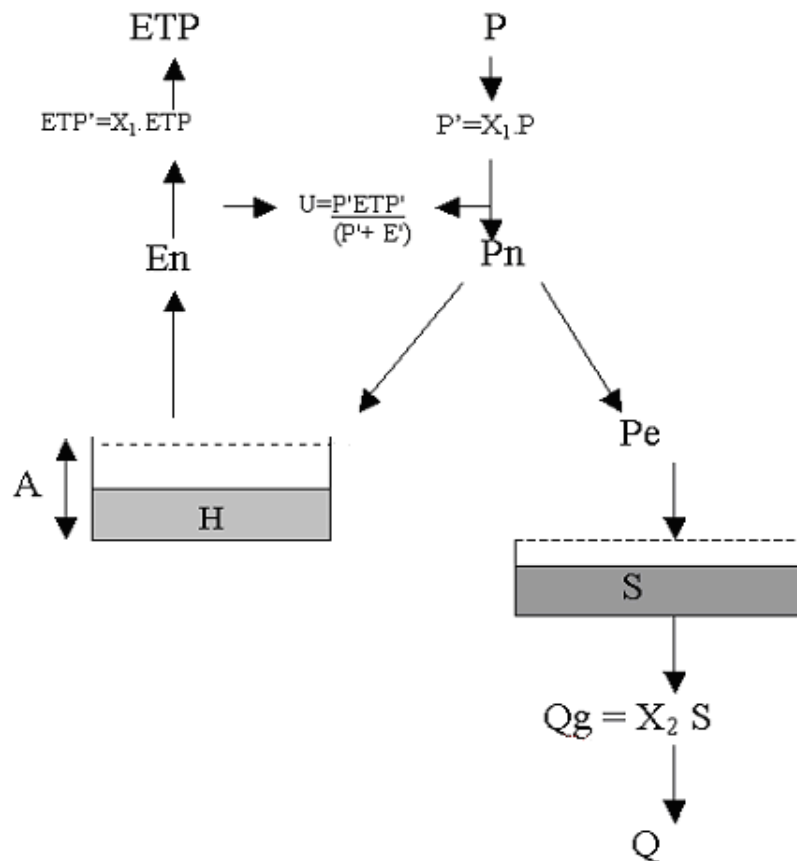


Fig.16 Architecture du Modèle GR2M.

3.3.3 Mise en œuvre du modèle

Il semble essentiel de distinguer, parmi les séries de données disponibles pour chaque bassin versant, deux périodes distinctes, d'égale importance ; la première servant au calage, la deuxième à son contrôle (validation). Le choix a été fait de distinguer, dans la série pluviométrique disponible la période "humide", débutant généralement dans les années 50, période à partir de laquelle on considère que les données recueillies sont fiables et se terminant à la période charnière de transition où l'on considère qu'il y a eu rupture climatique avec établissement d'un nouveau régime climatique, fixé à 1969. La deuxième période débute à la fin de la première et se termine aux alentours de 95, dates où les dernières données ont été recueillies, et est dite la période " sèche ".

3.3.3.1 Initialisation et période de mise en route du modèle

GR2M nous restitue les débits calculés (Q_c) à condition de connaître l'état initial au début de la période simulée. Au fur et à mesure que le modèle fonctionne, il s'effectue un réajustement progressif des états du système. Compte tenu du caractère inéluctablement arbitraire de l'initialisation, les premières valeurs de Q_c ne sont pas fiables et par conséquent ne sont pas prises en compte dans le calcul de la fonction critère (Ardoin, 2000). On utilise donc de façon systématique une période de deux ans de mise en route du modèle, dont les résultats ne sont pas comptabilisés (Makhlouf, 1994). Cette période de mise en route se produit dans les phases de calages et de validations.

3.3.3.2 Le calage

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 (Ardoin, 1999). La qualité de la reproduction de ces débits est mesurée par une valeur numérique appelée fonction critère.

Quelque soit l'approche utilisée, le calage du modèle exige :

- Une série de données "représentative" des différentes entrées dans le système,
- Une estimation initiale des paramètres et des variables d'état du système,
- Une méthode d'ajustement des paramètres,
- Une méthode ou un critère permettant d'évaluer la qualité de la simulation des débits par le modèle (Makhlouf, 1994).

3.3.3.3 Les critères de la qualité d'ajustement

Le modèle hydrologique GR2M permet de produire une série chronologique de débits Q_c à partir des entrées de pluie (P) et d'évapotranspiration potentielle (E). La modélisation sera d'autant plus satisfaisante que les débits Q_c seront proches des débits Q_o effectivement observés.

Apprécier la validité du modèle consiste à juger de la proximité des deux séries chronologiques Q_o et Q_c (Makhlouf, 1994).

La détermination des paramètres optimaux nécessite le choix d'un critère d'évaluation.

Approche qualitative :

La méthode la plus simple pour évaluer les performances du modèle consiste à évaluer graphiquement les valeurs observées et les valeurs simulées.

Approche quantitative :

Le critère de Nash a été le critère de qualité retenu dans cette étude (Nash & Sutcliffe, 1970) après une étude menée par l'Orstom (Servat *et al.*, 1989) sur la prédominance de ce critère sur les autres formulations. Celui-ci permet de comparer l'écart quadratique moyen des débits par rapport à la variance.

$$NASH = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_c)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o - Q_m)^2} \right]$$

Avec Q_m moyenne des débits observés Q_o , Q_c le débit calculé par le modèle et N le nombre d'observations.

3.3.3.4 Les méthodes d'optimisation utilisées

D'une façon générale lorsqu'il n'existe pas de solution simple, ni d'équation explicite permettant de résoudre rapidement un problème donné, on choisit de passer par des méthodes d'optimisation. Celles-ci reviennent à aboutir, parmi les solutions potentielles, à la meilleure solution possible ou du moins, la moins mauvaise.

Pour parvenir à ce choix, on utilise des techniques d'optimisation associées à un critère numérique (ici, le critère de Nash). Ces techniques permettent par un processus d'"essai-erreur", de se diriger vers la solution optimale (Dezetter, 1991).

Deux méthodes d'optimisation non linéaires ont été utilisées. Il s'agit d'algorithmes développés par Rosenbrock (1960) et Nelder et Mead (1964).

Ces deux méthodes ne nécessitent pas le calcul des dérivées de la fonction à optimiser. On parle dans ce cas de méthode de recherche directe, conduisant à la solution par les seules évaluations successives de la fonction critère.

Soit une fonction à n variables dont on recherche le maximum (ou le minimum, suivant le sens dans lequel on se place), et un espace à n dimensions. Dans notre cas, les n variables sont les paramètres x_1 et x_2 du modèle pluie-débit et la fonction à maximiser est la fonction critère (Nash). On peut noter que cette fonction est non linéaire et que le calcul de la dérivée première de cette fonction par rapport à un des paramètres du modèle (considéré comme variable de la fonction) n'est pas simple et n'autorise pas l'utilisation d'une méthode d'optimisation basée sur le calcul des dérivées. En effet, chaque valeur de débit calculé dépend d'un certain nombre d'équations de production et de transfert propre au modèle et la fonction critère est la combinaison non linéaire de $i = 1$ à $i = n$ (nombre de valeur de débits observés) de ces débits calculés.

Si par exemple, nous prenons le cas d'une fonction critère (Nash) pour un modèle à 2 paramètres comme GR2M, on se place dans un espace plan à deux dimensions. Dans ces plans, il est possible de tracer des courbes d'isovaleurs de la fonction critère. On obtient ainsi une surface "topographique" représentant le critère utilisé. Le but des méthodes d'optimisation est de se déplacer sur cette surface topographique pour atteindre le plus rapidement possible le point le plus bas (ou le plus haut, suivant le sens dans lequel on se place). Ainsi, on peut facilement admettre que dans certains cas, on aboutira dans des cuvettes (minima locaux) desquelles il faudra sortir pour atteindre le vrai minimum. On conçoit ainsi facilement qu'il existe de nombreux pièges, rendant tortueux le chemin de la recherche. Cet exemple, donné pour un modèle à deux paramètres comme GR2M permet d'imaginer la complexité du problème lorsqu'on se place dans un espace à n paramètres. Les méthodes d'optimisation employées doivent donc être capables de déjouer tous les pièges rencontrés afin d'atteindre le plus rapidement sa cible.

Principes de la méthode proposée par Nelder et Mead (1964): la méthode du simplex (d'après Dezzetter, 1991)

Cette méthode se révèle particulièrement simple à programmer et efficace.

Un simplex est un polyèdre régulier dans l'espace à n dimensions E^n . Par exemple, si on se place dans un espace à deux dimensions, un simplex est un triangle équilatéral, dans un espace à trois dimensions, un simplex est un tétraèdre régulier, etc.

Dans la recherche du maximum (ou minimum) d'une fonction critère $f(x)$, on peut sélectionner des jeux de valeurs de x en des points de E^n situés aux sommets du simplex. La fonction critère peut être évaluée en chacun des sommets du simplex. On peut alors faire une projection du point représentant la valeur la plus élevée passant par le barycentre des autres sommets. Ce point est alors supprimé et un nouveau simplex, obtenu par réflexion, peut être constitué à partir des anciens points restants et du nouveau point projeté. L'utilisation de cette procédure, à savoir l'élimination systématique du sommet présentant la valeur la plus élevée de la fonction critère, et de quelques règles permettant de réduire la taille du simplex et de l'empêcher de se boucler sur lui-même au voisinage de l'extremum, permet une recherche directe, à pas fixe mais à direction variable.

Principes de la méthode de Rosenbrock (1960) :

Partant d'un point donné, cette méthode de recherche directe procède par recherche unidimensionnelle successive le long d'un jeu de n directions orthonormées dans l'espace E^n des paramètres à optimiser.

Au départ du processus d'optimisation, les n directions orthonormées sont habituellement choisies parallèles aux axes des paramètres $X_1, X_2, \dots, X_n$.

Partant d'un point donné, la recherche débute en introduisant une modification d'un pas Δx_1 dans la première direction correspondant à l'axe du premier paramètre. Si la valeur de la fonction critère à ce nouveau point est égale ou inférieure à la valeur au point précédent, on a à faire à un succès et ce nouveau point remplace le précédent. Le pas Δx_1 est alors multiplié par un facteur α positif et on passe à la direction n°2. Si la valeur du critère n'est pas inférieure ou égale à celle du point précédent, on a affaire à un échec, le premier point n'étant pas remplacé et le pas de recherche Δx_1 est multiplié par un facteur β négatif...

Après que chacune des n directions ait été modifiée et que chaque pas Δx_i ait été multiplié par α ou β , la première direction est à nouveau modifiée, et ainsi de suite.

L'arrêt de la méthode peut être envisagé au-delà d'un nombre donné d'étapes de recherche (d'itérations) ou lorsque les variations de la fonction critère restent inférieures à une valeur donnée.

On dispose donc de deux méthodes d'optimisation non linéaires procédant par recherche directe. Ces deux méthodes sont bien adaptées au cas particulier de l'optimisation des paramètres les modèles pluie-débit, elles ont d'ailleurs été couramment utilisées dans ce domaine.

3.3.3.5 Le problème de l'équifinalité

La recherche du modèle présentant la meilleure optimisation possible se heurte à une difficulté, le choix des paramètres ; celui-ci est laissé à l'utilisateur et à sa propre conception du système hydrologique (Hreiche, 2003). A une architecture donnée, plusieurs jeux de paramètres peuvent être considérés comme équivalents en terme de comparaison de valeurs simulées par le modèle aux valeurs mesurées, ce qui définit l'équifinalité (Beven, 1993).

On retrouvera ainsi des Nash identiques pour des jeux de paramètres différents, or, la diversité des causes de l'équifinalité rend le problème du choix d'un jeu de paramètres extrêmement difficile (Hreiche, 2003).

3.3.3.6 La validation

Cette phase permet de valider la pertinence et la qualité des choix effectués en matière de l'élaboration de l'algorithme et de choix du jeu des paramètres. L'évaluation de la robustesse d'un modèle s'effectue uniquement au contrôle, donc est fonction des résultats obtenus en validation.

3.3.3.7 La technique du "double-échantillon"

Cette technique consiste à subdiviser la période d'observation de chaque bassin en deux sous-périodes avec calage sur une période et contrôle sur l'autre. Cette tâche est répétée de façon à caler successivement sur les deux sous-périodes et à valider sur celles correspondantes (Figure 17) (Mouelhi, 2002).

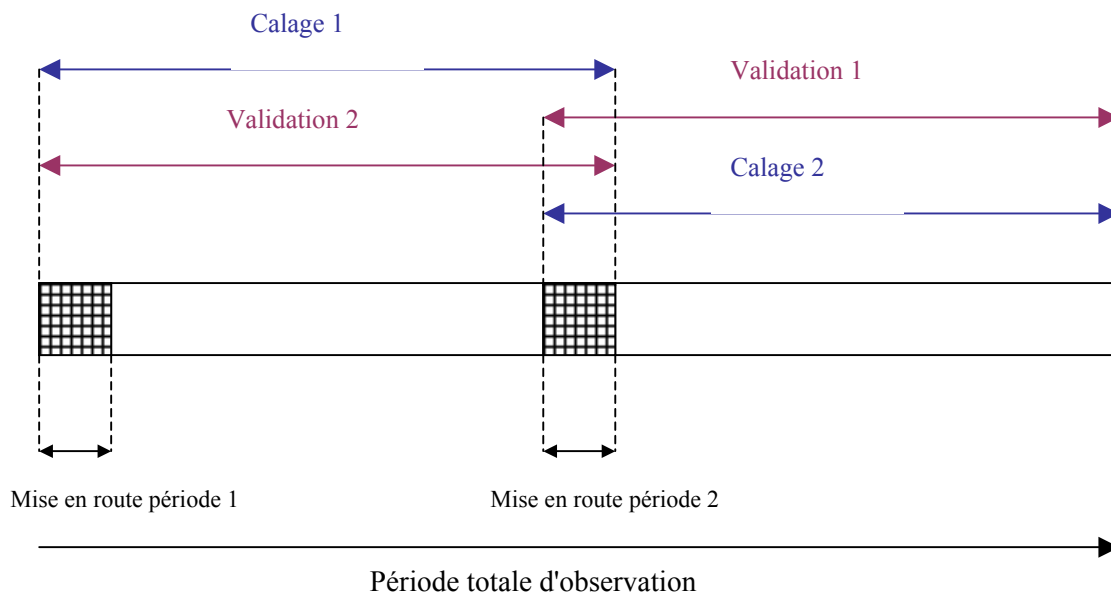


Figure 17 : Représentation schématique de la technique du double échantillon

3.4 Les séries de données utilisées

3.4.1 Le problème de la disponibilité des données

Les premières données pluviométriques remontent au 19^{ème} siècle mais n'ont été sérieusement suivies qu'à partir des années 20. Le développement des réseaux de mesures hydrométriques des années 50 a permis d'améliorer la quantité de données disponibles sur l'ensemble de l'AOC mais la qualité reste douteuse pour de nombreux pays en raison d'un manque de moyen important des états gérant les réseaux de mesures.

Il reste donc préférable d'utiliser les données des stations synoptiques du réseau officiel aux simples relevés de postes pluviométriques (Figure 18). Cet état de cause implique une grande difficulté de l'étude des séries d'observations climatiques à l'échelle du siècle en raison de cette grande subjectivité des données sources, liées la plupart du temps aux méthodes indirectes utilisées (Ouedraogo, 2001).

3.4.2 Les données utilisées

3.4.2.1 Les données pluviométriques

Les données de pluviométrie sont définies par les hauteurs des précipitations moyennes mensuelles. Les séries chronologiques utilisées dans cette étude correspondent à celles utilisées dans le cadre de la thèse de Sandra Ardoin (en cours), basées sur les données fournies par le Climate Research Unit. Les périodes étudiées ont pu être fixées en fonction des débits disponibles pour chaque bassin versant.

3.4.2.2 Les données d'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle est un des termes majeurs du bilan hydrologique en relation directe avec le climat caractéristique des zones tropicales semi-arides, faisant intervenir le climat, le sol ou encore la végétation.

Les grilles d'ETP utilisées sont notamment issues du même travail de thèse.

Parmi les différents types de grilles d'ETP pouvant être utilisés dans le modèle, le choix a été fait en fonction des données fournissant le meilleur calage. Celles-ci sont issues des formules de Penman.

3.5.2.3 Les données hydrologiques

Ces données sont primordiales dans la relation pluie-débit. Elles correspondent aux débits mesurés à l'exutoire. La disponibilité de ce type de données va largement conditionner les périodes utilisées dans les phases de validation et de calage.

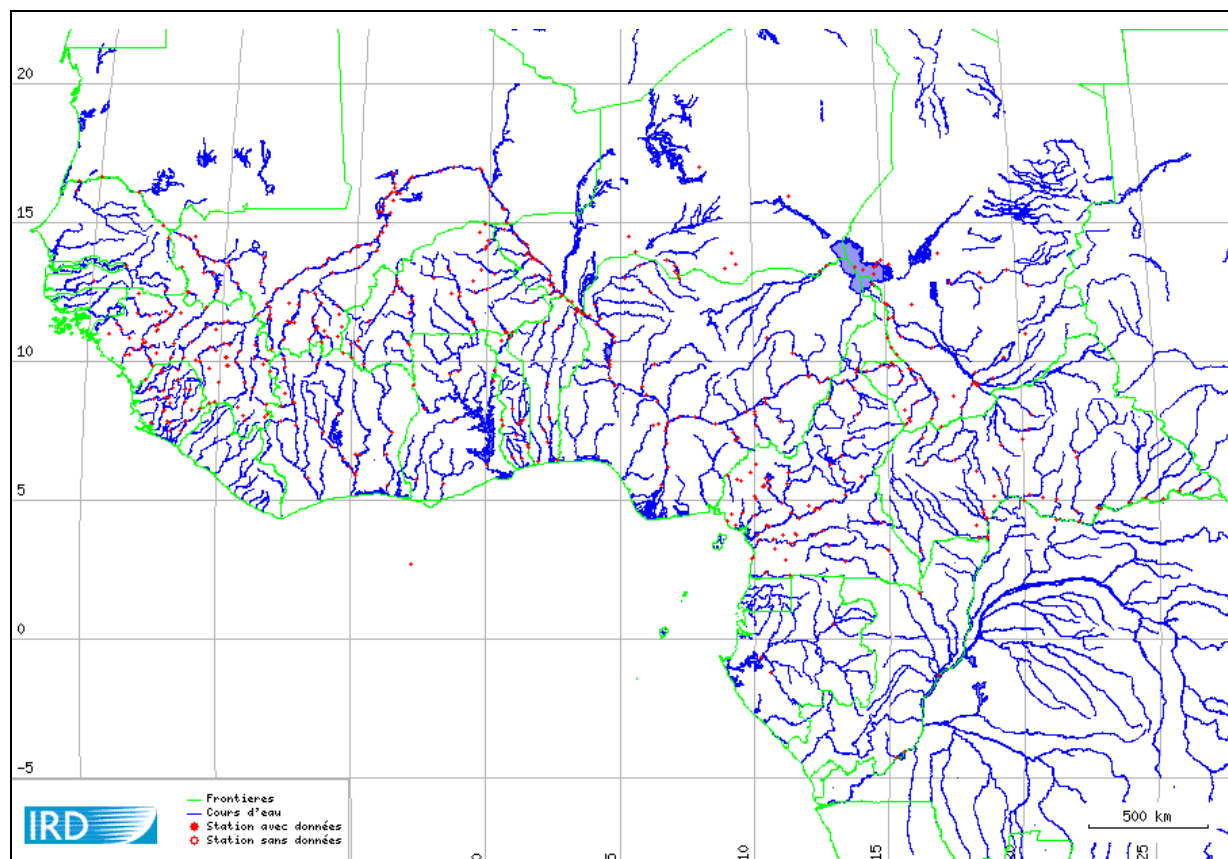


Figure 18 - Carte des stations hydrométriques et du réseau hydrographique de l'Afrique de l'Ouest

Chapitre 4

METHODOLOGIE ET EXPLOITATION DES RESULTATS

Les modèles hydrologiques pluie-débit se révèlent généralement des outils difficiles à utiliser, tant pour un hydrologue non spécialiste de la modélisation que pour un non informaticien. Ils demandent en effet, très souvent, des manipulations de fichiers longues et fastidieuses ainsi que la connaissance approfondie du programme et de son langage de programmation. En outre, les résultats obtenus sont rarement exploitables directement, et il faut fréquemment avoir recours à l'aide externe de tableurs graphes ou de logiciels de traitements statistiques. Or, les modèles hydrologiques sont aujourd'hui des outils indispensables à toutes les études et recherches dans le domaine de l'estimation, de la valorisation et de la gestion des ressources en eau.

La question qui se pose concrètement est de savoir si, oui ou non, l'amélioration de la prise en compte de la donnée de sol dans la modélisation de la relation pluie-débit met en évidence une différence notable au niveau de la fonction critère, donc, ici, du Nash.

Dans le cas d'un réel résultat positif et d'une amélioration nette du critère de Nash, l'objectif serait d'étendre ce travail à d'autres bassins situés dans d'autres régions d'Afrique, et d'analyser, par la suite, avec ce modèle, la variabilité de l'écoulement compte tenu de la sécheresse persistante.

4.1 Modélisation de la relation pluie-débit par GR2M

Peu importe le mode utilisé, qu'il soit global ou distribué, nous avons choisi de travailler uniquement avec le modèle GR2M pour sa robustesse et sa facilité d'adaptation du mode global au mode distribué.

Le but ici n'est pas de réaliser des prévisions ou des simulations mais une reconstitution des débits associés aux précipitations historiques observées suivant différents types de découpages spatiaux.

4.1.1 Choix des périodes de Calage/Validation

Nous avons fait le choix d'un découpage dans la majorité des cas en fonction de la période de rupture des séries climatiques. Celle-ci se situe aux environs de 1970. Nous avons donc effectué dans un premier temps un calage sur la période humide et une validation sur la période sèche (Découpage 1) puis, à l'inverse, un calage sur la période sèche et une validation sur la période humide (Découpage 2), lorsque cela était possible.

Un cas particulier est à noter pour la station hydrométrique de Goulombo où la période des données disponibles s'étend de 1972 à 1995, donc uniquement sur la période sèche. Nous avons donc choisi de sectionner la série en deux parties de durées équivalentes (1972-1984 / 1985-1995) suivant la technique du double échantillonnage (Chapitre 3).

Le schéma ci-dessous met en évidence ce découpage.

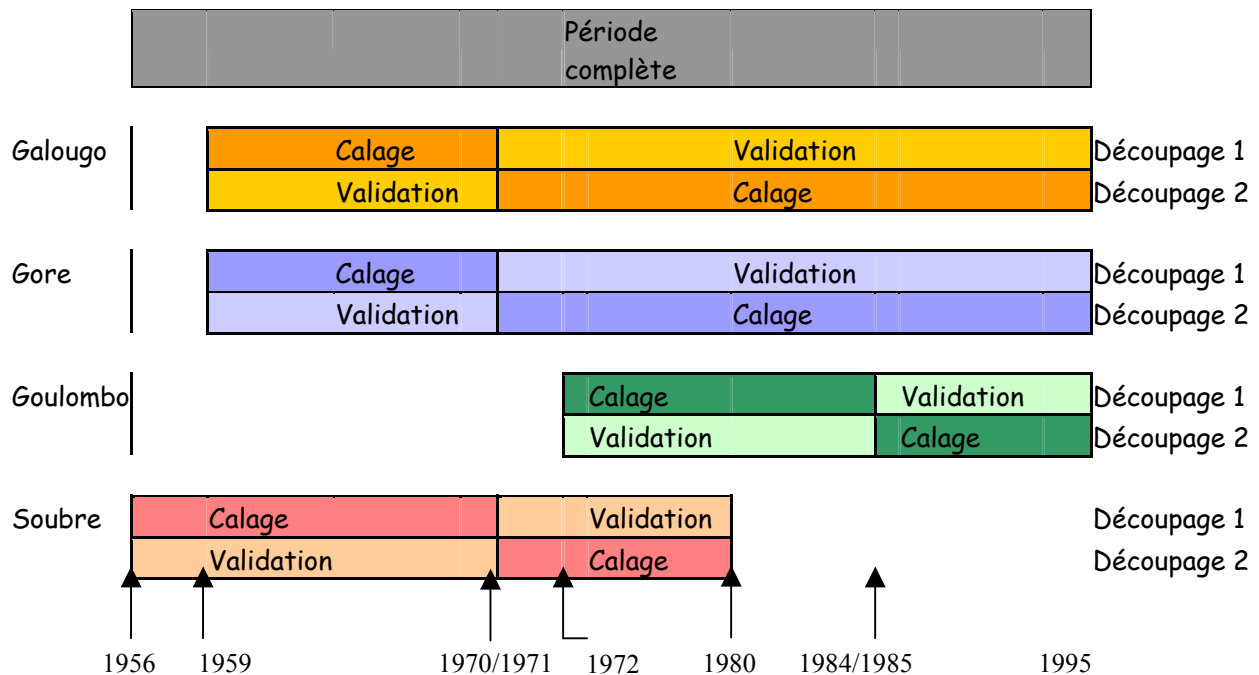


Figure 19 : Différents découpages des périodes utilisées en calage et validation.

4.1.2 Le modèle global

La première étape a été de réaliser une première modélisation de la relation pluie-débit en mode global. A ce niveau, on considère le bassin versant comme une seule entité aux propriétés uniformes.

4.1.1.1 GR2MGlobal sous Excel

GR2M demande souvent l'utilisation de logiciels tableurs-grapheurs afin d'exploiter les résultats obtenus. Ici, nous avons fait le choix de travailler directement sous Excel et de recadrer les formules des différents réservoirs dans chacune des cases.

Description du modèle :

La succession des cases en interconnexion sur chaque ligne correspond aux différentes redistributions de la donnée pluie dans chaque réservoir et cela, jusqu'à l'obtention du débit calculé.

Chaque colonne va ainsi décrire cette redistribution pour chaque mois considéré sur toute la série chronologique étudiée.

Les variables indépendantes sont la pluie (P) et l'évapotranspiration (ETP)

Les variables dépendantes sont les débits simulés à l'exutoire (Qc).

Le tableur a été agencé de manière à avoir les données de débits sur une ligne et les données de temps en colonne.



Un des objectifs de cette méthode est de pouvoir tracer directement sous Excel un graphique retraçant les débits calculés en fonction du temps (hydrogrammes) et les rapporter à ceux réellement mesurés à la sortie du réservoir S. Cela permet ainsi une bonne approche visuelle de la restitution des débits calculés par rapport aux mesurés.

Dans un deuxième temps, l'utilisation du solveur d'Excel permet un calage des paramètres du modèle, en vue d'optimiser le critère de Nash.

La tolérance est fixée à 5%, la précision à 10^{-5} et le nombre d'itérations possibles à 1000.

GALOUGO				
Période de calage / optimisation de Nash	59-70	71-95	59-70	71-95
Méthode utilisée	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	X_1 - X_2 -A à caler	X_1 - X_2 -A à caler
X1	0.99670	0.75011	1.00000	0.74767
X2	0.63548	0.71076	0.63553	0.71130
A	96	96	96.011	96.015
Nash(59-70)	94.45	81.42	94.45	81.14
Nash(71-95)	58.15	88.03	57.28	88.02

GORE				
Période de calage / optimisation de Nash	59-70	71-95	59-70	71-95
Méthode utilisée	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	X_1 - X_2 -A à caler	X_1 - X_2 -A à caler
X1	0.7256	0.5804	0.7367	0.5836
X2	0.5725	0.6948	0.5474	0.6790
A	187	187	186.970	187.997
Nash(59-70)	83.75	77.05	83.67	77.30
Nash(71-95)	61.34	70.19	60.19	70.18

GOULOMBO				
Période de calage / optimisation de Nash	72-84	85-95	72-84	85-95
Méthode utilisée	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	X_1 - X_2 -A à caler	X_1 - X_2 -A à caler
X1	0.4390	0.4116	0.4405	0.4137
X2	0.5549	0.5964	0.5505	0.5842
A	149	149	148.999	149.001
Nash(59-70)	83.89	83.01	83.89	83.13
Nash(71-95)	63.83	64.49	63.76	64.51

SOUBRE				
Période de calage / optimisation du nash	56-70	71-80	56-70	71-80
Méthode utilisée	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	(x_1 - x_2 à caler -A fixé /moy BV)	X_1 - X_2 -A à caler	X_1 - X_2 -A à caler
X1	0.489165806	0.384092329	0.535988772	0.384092267
X2	0.55113	0.55992	0.54290	0.55992
A	177	177	227.23	177.0005
Nash(56-70)	86.94	75.56	87.25	75.56
Nash(71-80)	59.12	77.94	53.65	77.94

Tableau 9 : Résultats fournis par GR2M en global sous Excel

1^{ère} étape : A fixé - x_1 et x_2 à caler.

Nous avons donc cherché à caler, par la fonction solveur d'Excel, les deux paramètres x_1 et x_2 du modèle, en ayant comme point de départ, une valeur fixée à 0.2.

La valeur de A (ou Smax), correspond à la valeur moyennée à l'échelle du bassin, en pondérant les valeurs de chaque polygone de sol par leur superficie respective, et cela, pour l'ensemble du bassin.

Les cellules variables sont x_1 et x_2 et la cellule à optimiser est le critère de Nash pour la période considérée avec une valeur maximum recherchée égale à 100.

Les contraintes imposées au solveur sont $0 < x_1 < 1$ et $0 < x_2 < 1$.

2^{ème} étape : A - x_1 et x_2 à caler.

Dans ce cas, trois paramètres sont à caler en vue d'optimiser le critère de Nash.

Les cellules variables sont donc x_1 , x_2 et A. Les données de départ sont $x_1 = 0.2$, $x_2 = 0.2$ et A égal à la valeur moyennée sur le bassin.

Les contraintes imposées au solveur sont $0 < x_1 < 1$ et $0 < x_2 < 1$ et $A > 0$.

Résultats obtenus :

Dans le 1^{er} cas, lorsque l'on fait varier que 2 paramètres, le solveur fournit de bons résultats avec des valeurs de Nash dans la majorité des cas supérieurs à 70.

On trouve un meilleur calage et une meilleure validation sur la période humide que sur la période sèche.

Dans le deuxième cas, lorsque les 3 paramètres sont à caler, le solveur ne fournit pas de résultats réguliers et cela quelles que soient les options de recherche et d'estimations utilisées.

D'une part, le solveur va être fortement influencé par les paramètres de départ. Les résultats ne seront donc pas fiables puisque l'optimisation des paramètres va varier en fonction des nombres inclus dans les cellules de départ.

D'autre part, les méthodes d'itérations successives se retrouvent "bloquées dans des trous" et les valeurs optimisées se retrouvent très proches des données de sol initiales.

Ici, nous cherchions, en faisant varier ces trois paramètres à voir si la donnée de sol moyennée sur l'ensemble du bassin versant permettait une bonne approximation ou si, au contraire, le Nash était fortement amélioré en considérant A comme une variable à caler.

Excel et ses fonctionnalités ne permettent pas d'obtenir des résultats cohérents, ce logiciel ne semble donc pas bien adapté à la modélisation de la relation pluie-débit.

4.1.1.2 Programmation GR2M Global

Les résultats fournis par Excel nous ont amené à construire un programme spécifique, en vue d'obtenir des résultats plus satisfaisants.

Nous avons ainsi cherché, tout comme avec Excel, à faire varier dans un premier temps les deux paramètres x_1 et x_2 , puis, dans un second temps x_1 , x_2 et A.

La méthode d'optimisation choisie est issue des résultats fournis par les tests menés dans le cadre de la thèse de Sandra Ardoin, qui ont montré que le critère de Nash était optimisé en utilisant les méthodes de Rosenbrock et de Nelder et Mead (ou simplex) enchaînés.

Ainsi, l'optimum issu de la méthode de Rosenbrock sert de point de départ pour la méthode du Simplex. Nous appellerons donc cet agencement la méthode "Rosen-Simplex".

Le modèle utilisé reste GR2M, les variables d'entrée sont la pluie et l'ETP et celles de sorties sont les débits mesurés.

Cette programmation est appelée GR2Mglobal.exe.

Exploitation des résultats obtenus par GR2Mglobal.exe :

Le calage et la validation suivent les même découpages que pour Excel.

Pour chaque période calée, deux options de choix du nombre de variables nous ont permis d'obtenir deux types de résultats. La première correspond au calage de 2 paramètres (x_1 et x_2), la donnée "sol" A étant fixée par la moyenne pondérée sur l'ensemble du bassin. La deuxième ne tient pas compte de cette pondération et cherche à caler A afin d'optimiser le Nash.

Gore	5970-3	5970-2	7195-3	7195-2	5995-3	5995-2
A	316	187	285	187	273	187
X1	0.821	0.727	0.662	0.580	0.711	0.642
X2	0.616	0.571	0.740	0.696	0.667	0.632
Nash (optimisation)	84.777	83.753	78.855	77.049	76.948	75.965
Nash (validation)	63.720	61.156	70.903	70.186		

Galougo	5970-3	5970-2	7195-3	7195-2	5995-3	5995-2
A	185	96	90	96	200	96
X1	0.613	0.512	0.377	0.385	0.567	0.445
X2	0.611	0.554	0.594	0.600	0.640	0.577
Nash (optimisation)	95.879	93.689	86.024	86.149	89.815	87.412
Nash (validation)	65.713	42.126	79.066	71.282		

Goulombo	7284-3	7284-2	8595-3	8595-2	7295-3	7295-2
A	218	149	211	149	211	149
X1	0.507	0.440	0.474	0.414	0.488	0.428
X2	0.579	0.554	0.607	0.583	0.589	0.566
Nash (optimisation)	84.481	83.893	83.750	83.139	75.089	74.525
Nash (validation)	64.426	63.783	65.061	64.513		

Soubre	5670-3	5670-2	7180-3	7180-2	5680-3	5680-2
A	285	177	225	177	274	177
X1	0.541	0.490	0.409	0.385	0.510	0.462
X2	0.587	0.555	0.567	0.556	0.592	0.565
Nash (optimisation)	87.747	86.937	77.827	77.837	86.555	85.783
Nash (validation)	60.020	60.583	76.699	75.666		

Tableau 10 : Résultats obtenus par GR2Mglobal.exe ; le terme 5970-2 indique la période de calage et le nombre de paramètres à caler.

Les résultats obtenus par GR2Mglobal.exe mettent en évidence que le fait de jouer sur trois paramètres variables (x_1 , x_2 et A) n'améliore que très peu le critère de qualité (moins de 1% en moyenne). Pour deux bassins versants, le Nash obtenu en calant les 3 paramètres est sensiblement plus faible (de l'ordre de 10^{-2}) : Soubre sur la période 71-80 et Galougo sur la période 71-95.

Le A augmente fortement dans la majorité des cas, se situant dans une fourchette comprise entre 185 et 285 mm. Une exception est retrouvée pour Galougo en calage sur la période sèche ou le A diminue légèrement pour passer de 96 à 90 mm.

On peut expliquer ces résultats par le phénomène d'équifinalité décrit dans le chapitre 3 (Hreiche, 2003). Ainsi, plusieurs jeux de paramètres pourront fournir un Nash équivalent.

GR2M est un modèle conceptuel et donc ne prend pas en compte les mécanismes extrêmement complexes mettant en jeu un grand nombre de grandeurs physiques.

Le choix des variables pertinentes (x_1 et x_2) est une hypothèse émise lors de la réalisation du modèle, reliée à la qualité des résultats obtenus en terme d'optimisation (Hreiche, 2003). Le fait de rajouter une troisième variable (A) à optimiser, n'améliore que peu le modèle et l'augmentation nette de sa valeur peut être expliquée par le problème d'équifinalité inhérente à la structure même du modèle.

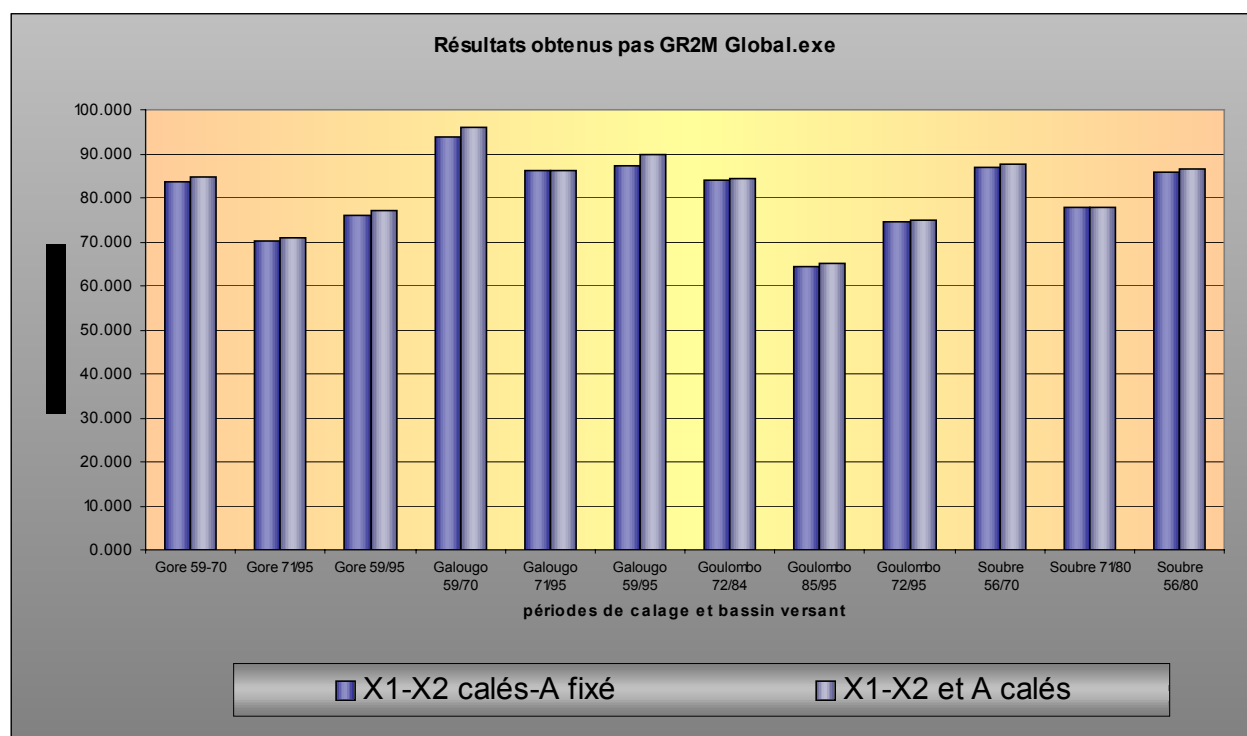


Figure 20 – Histogramme des valeurs de Nash obtenus en fixant ou en calant A, pour chaque sous-bassin choisi et pour les deux types de découpages des périodes de validations-calages.

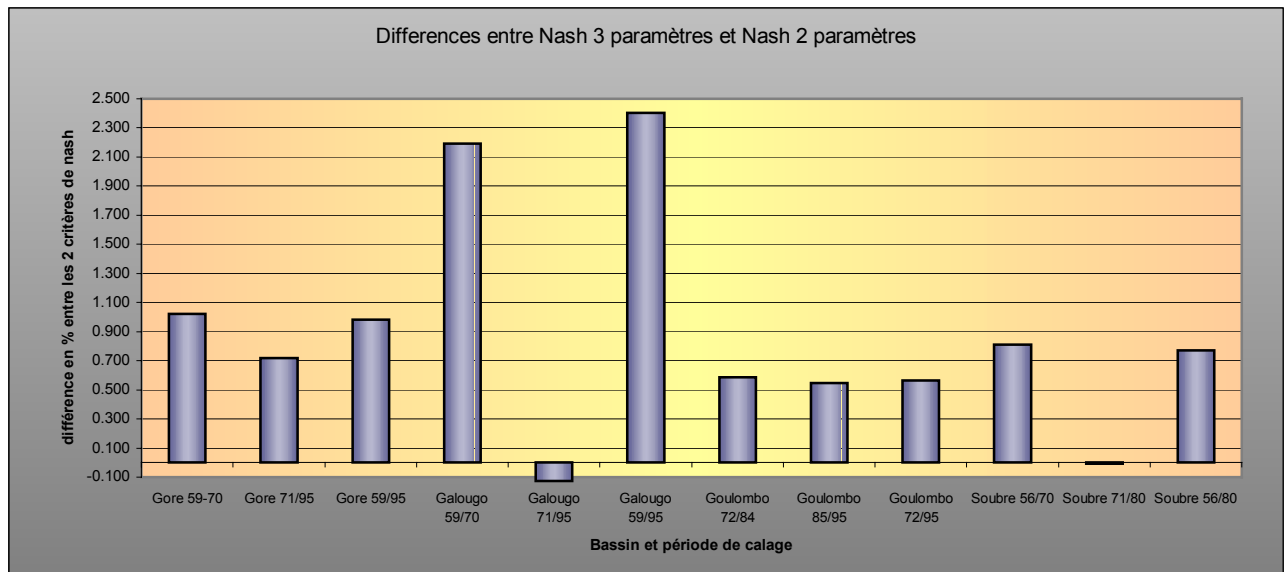


Figure 21 – Histogramme des différences obtenues entre le Nash pour A calé et le Nash pour A fixé.

4.1.3 Le modèle semi-distribué

Dans ce cas, le bassin va être subdivisé en plusieurs sous-entités aux propriétés uniformes et l'hétérogénéité du cadre physique va être prise en compte dans les données.

La distribution s'effectue sur les données pluie, ETP et réserve en eau du sol A.

Cependant, par construction, un modèle distribué est un assemblage de sous-modèles globaux. Ici, nous l'appliquerons sur des mailles carrées élémentaires d'un demi-degré carré. Ce découpage est basé sur une représentation des bassins versants en parcelles fictives, ces niveaux de découpages n'ayant pas un ordre hiérarchique les uns par rapport aux autres. Cependant, la complexité du maillage rend les mesures nécessaires au modèle, très difficiles à mettre en œuvre. Les mesures de pluie et d'ETP ne sont pas connues à l'échelle de la maille. On passera donc par une discrétisation spatiale des données d'entrée du système (pluie-ETP) à l'échelle de la maille choisie.

Dans un premier temps, on travaillera avec A distribué à l'échelle de la maille, par un logiciel de modélisation, Modmens. Dans un deuxième temps, on cherchera uniquement à affiner la donnée de sol en la distribuant à l'échelle du polygone de sol intra maille défini par la carte FAO, à l'aide d'une nouvelle programmation appelée ModMens_dist (Ce paramètre A est, en temps normal fixé dans les modèles par la valeur obtenue en effectuant une moyenne pondérée sur l'ensemble du bassin versant étudié).

Dans ce dernier cas, les données de pluie et d'ETP resteront distribuées à l'échelle du demi-degré.

Ici, la question qui se pose concrètement est de savoir si oui ou non, l'amélioration de la prise en compte de la donnée "sol" dans la relation de la modélisation pluie-débit rend compte d'une différence notable au niveau du critère de Nash.

On cherche à analyser le comportement du modèle face à l'insertion de différentes fonctions de production en prenant en compte différentes valeurs de A. L'objectif, dans le cas d'une nette amélioration serait d'étendre ce travail à d'autres bassins.

4.1.3.1 GR2M sous ModMens.

ModMens est un programme de modélisation mensuelle de la relation pluie-débit au demi-degré carré. A partir d'une série de données, il permet de calculer les débits à l'exutoire après passage à travers différents réservoirs imbriqués, pour plusieurs types de modèles (Modèles de Conway, Yates et GR2M).

Son interface simple permet de sélectionner le modèle à utiliser, les répertoires de données, le choix du pas de temps, les méthodes d'optimisations et les séries chronologiques de calage et de validation à prendre en compte.

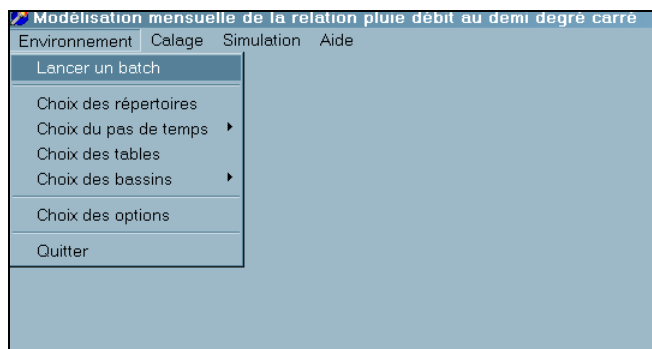


Figure 22 : Interface du logiciel Modmens

Les données d'entrée dans le système sont :

Choix des tables de données :

- La pluie issue des données CRU (Climate Research Unit ; University of East Anglia Norwich, UK),
- L'évapotranspiration ou ETP issue des formules de Penmann (Allen *et al.*, 1998),
- La capacité de rétention en eau des sols (A) issue de la carte de la FAO (Digital Soil Map Of The World And Derived Soil Properties, FAO, 2002) et noté FAOmax,
- Le débit observé à l'exutoire pour la période considérée tiré de la banque de données SIEREM (IRD).

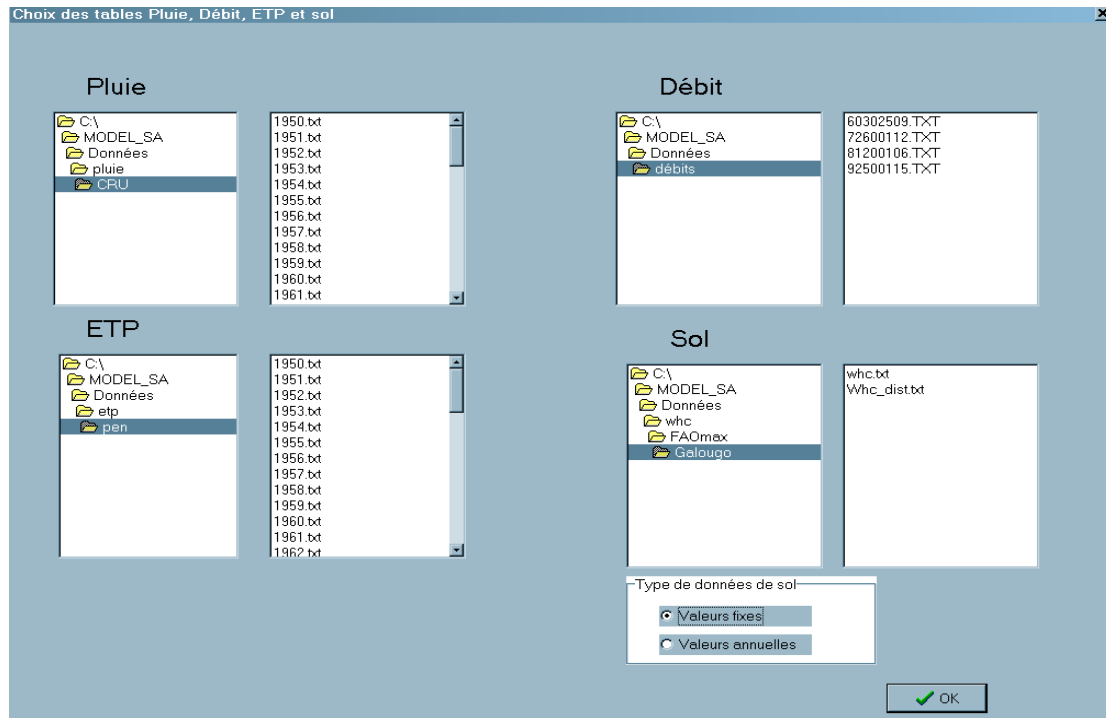


Figure 23 : illustration du choix des tables de données proposées par Modmens.

Choix du pas de temps utilisé : mensuel

Choix du modèle utilisé : Gr2M

Paramètres à caler :

En raison de l'influence du point de départ des paramètres à caler, x_1 et x_2 sont fixés à une valeur de 0.2.

Méthode d'optimisation :

Rosen-Simplex.

Critère de qualité:

Notre attention s'est avant tout porté sur la valeur du critère de qualité, le Nash, estimé ici en pourcentage et dont l'optimum est 100%.

Exploitation des résultats :

L'histogramme ci-dessous met en évidence les résultats en calage et en validation suivant les deux types de découpages (figure 22).

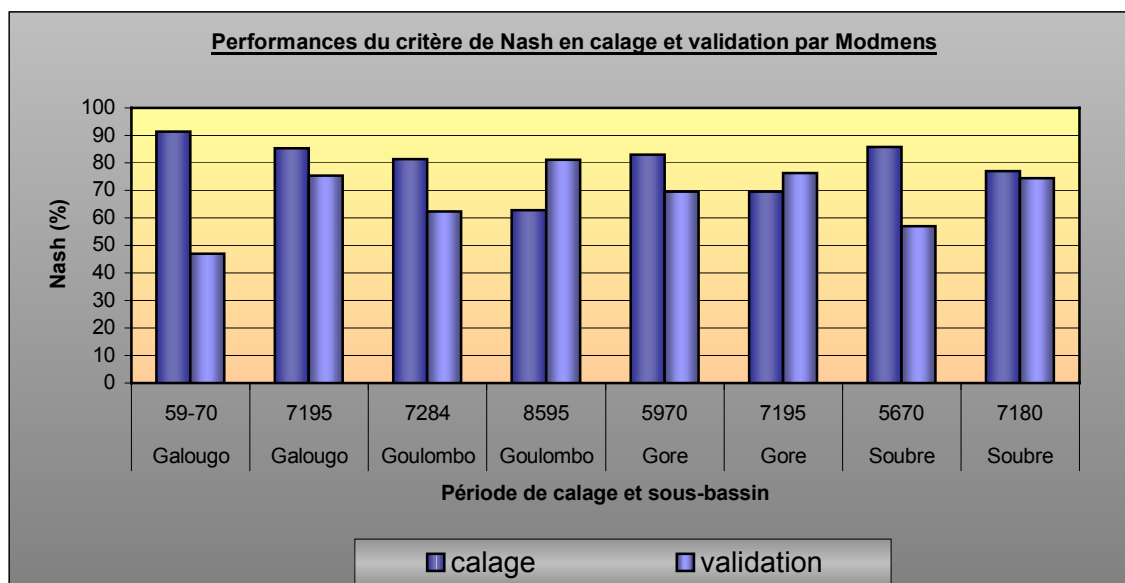


Figure 24 : performance du critère de Nash en validation et en calage par Modmens

On sait d'après des études précédentes que très souvent, le critère de jugement d'un modèle se détériore très sensiblement lorsque l'on passe de la période de calage à la période de contrôle. On peut constater ici, d'après l'observation du critère de Nash, que les calages et les validations sur la période humide, donc pour l'ensemble des bassins versants à l'exception de Goulombo, sont meilleurs que ceux retrouvés sur la période sèche.

Le modèle GR2M restitue de manière plus fidèle les débits calculés par rapport à ceux observés en calant ou en validant sur la période humide. Le critère de qualité pour la période sèche, que ce soit en calage ou en validation, est nettement moins bon et on atteint même des valeurs de Nash en validation, pour Galougo sur la période 2, inférieures à 50 % mettant en évidence une mauvaise restitution des débits simulés par rapport à ceux observés. Comme la phase de validation (contrôle) permet de mettre en évidence la robustesse d'un modèle, il aurait été intéressant de comparer les résultats obtenus ici avec ceux tirés d'autres modèles pour les mêmes bassins versants et découpages calage/validation. Le manque de temps ne permet pas d'effectuer cette comparaison mais d'autres études déjà menées dans le domaine des modèles pluie-débits montrent la robustesse du modèle GR2M comparé à d'autres modèles globaux (Dezetter, 1991 ; Maklouf, 1994; Perrin, 2000).

Notamment, une thèse en cours (Mouelhi., 2002) réalise une analyse comparative de plusieurs modèles pluie-débit au pas de temps mensuel. Sur la base d'un critère de performance Cr3, basé sur le quantile (30%) de la distribution des valeurs de Nash, a permis une classification de la qualité du modèle GR2M (Annexe 2).

Le modèle le plus performant, en se basant sur ce critère est GR2M (Maklouf, 1994). Il semble donc le plus approprié à la modélisation mensuelle réalisée par Modmens.

4.1.3.2 Modélisation sous Excel à l'échelle de la maille

En vue d'approcher la modélisation intra-maille (figure 23), en distribuant A à l'échelle du polygone de sol, nous avons choisi de travailler dans un premier temps avec Excel sur quatre mailles-test les plus représentatives de la disparité et diversité de la donnée sol (Chapitre 2.4) de chaque sous-bassin choisi précédemment.

Les données d'entrée :

- Le passage de la pluie P et de l'ETP s'effectue à travers chaque polygone de sol, mais les données sont calculées initialement à la maille.

Les paramètres :

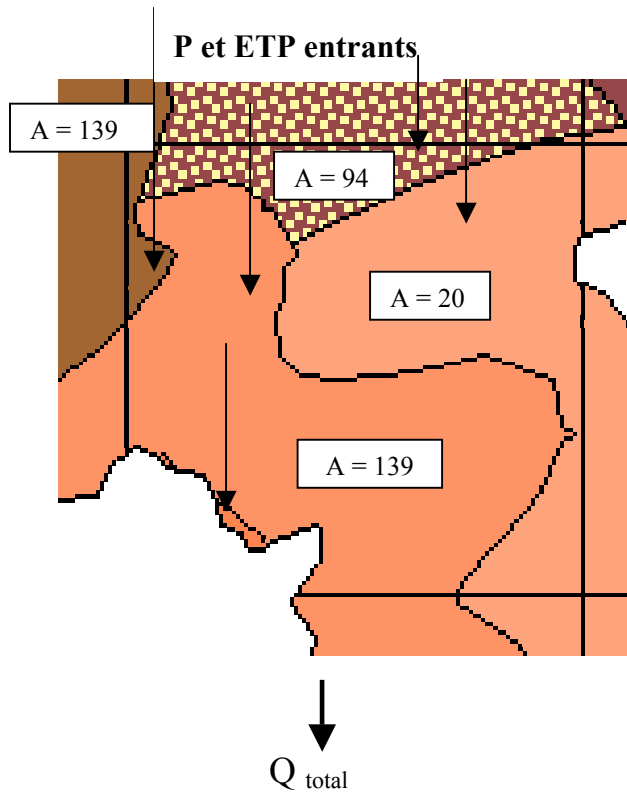
- Les paramètres x_1 et x_2 sont calés. Leurs valeurs proviennent des résultats obtenus par leur optimisation dans Modmens, à l'échelle de la maille sur toute la série chronologique de données.

A l'échelle de la maille, l'absence de données de débits observés sur la maille ne nous permet pas de calculer le critère de Nash, nous comparerons donc les débits calculés entre la distribution intra-maille (Excel) et le mode global sur la maille (Modmens).

Cette différence est exprimée en mm.

Les hydrogrammes obtenus ne permettent pas une bonne représentation visuelle de ces différences, les périodes de données étant trop importantes pour les mettre en évidence. Certains zooms sur de petites périodes pourront mettre en relief les différences obtenues.

Modèle semi-distribué intra-maille



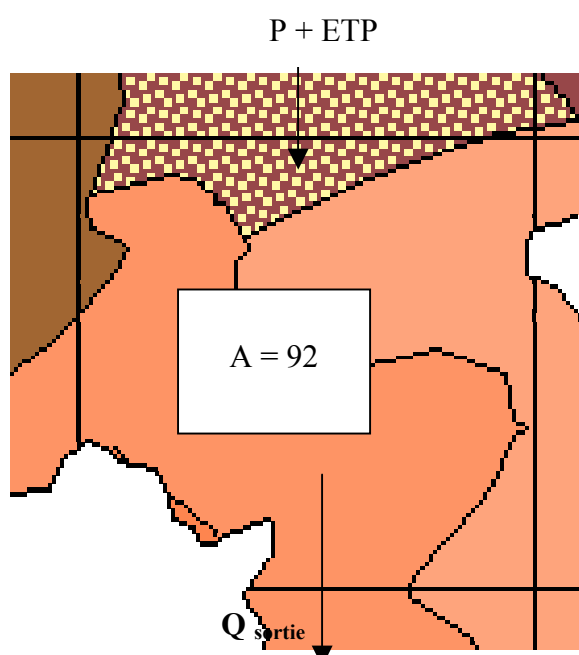
La pluie et l'ETP, calculés à l'échelle de la maille, entrent dans chaque polygone "sol"

On obtient un débit sortant de chaque polygone sol

Sur chaque polygone sol, les entrées (P, ETP) et les sorties (Q) sont représentées par des scalaires

Agrégation des débits en sortie des polygones constitutifs de la maille

Mode global sur une maille



P et ETP entrent dans la maille

A correspond à la moyenne pondérée par la superficie sur la maille

On obtient directement le débit calculé en sortie

Figure 25 : Représentation schématique de la distribution des données à l'échelle de la maille suivant le mode distribué intra-maille ou le mode global sur une maille. Exemple de la maille 1225N1225O du bassin Goulombo.

Résultats obtenus en intra-maille dans Excel et comparés aux résultats en mode global sur une maille dans Modmens :

Galougo –Maille 1175N0750

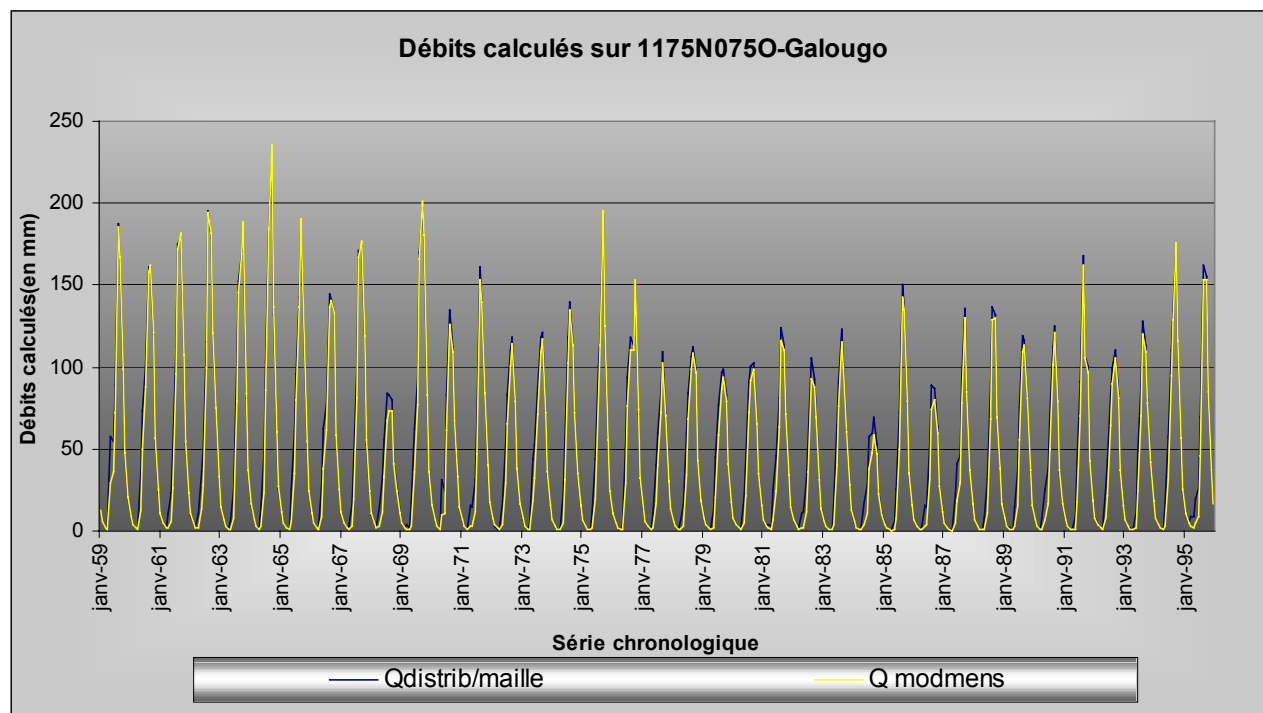


Figure 26 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 1175N0750

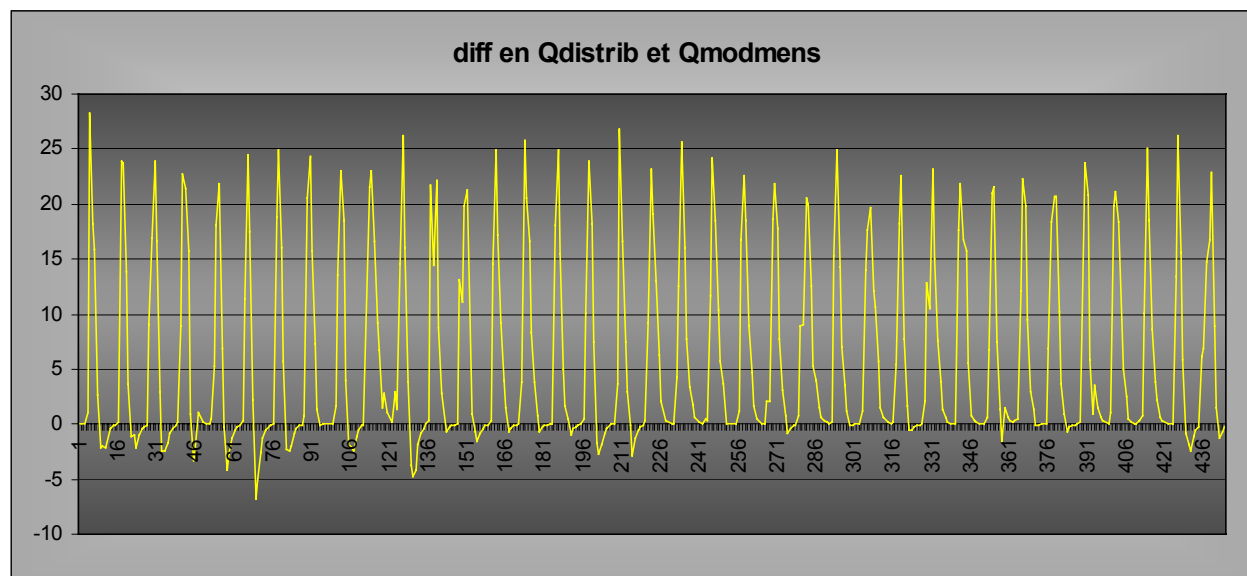


Figure 27 : Différence (δ) entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 1175N0750.

Exploitation des résultats:

Les δ obtenus entre les débits calculés en global et en semi-distribué sur la maille sont de l'ordre de +25mm. La somme de ces δ sur la série chronologique étudiée est égale à +2475mm. Les débits obtenus en distribuant A sont donc supérieurs à ceux obtenus en pondérant sa valeur sur la maille.

L'importance du volume produit par la fonction de production évolue en sens inverse de la donnée sol qui, rappelons-le, correspond à la hauteur d'eau comprise dans le réservoir sol S. Plus celle-ci est faible, plus la notion de transfert perd de son intérêt.

On s'intéresse donc ici uniquement à la fonction de production.

Cette maille présente plus de 70 % de sa superficie avec un $A = 20$ mm en raison de sa situation sur une zone de socle fissurée mais peu perméable et une végétation de type forêt tropicale humide. Cette situation peut expliquer le fait que les débits soient plus importants en mode distribué qu'en mode global. Bien que le modèle soit de type conceptuel et que les hétérogénéités physiques et les caractéristiques tel que la géologie ou la végétation ne soient pas prises en compte, celles-ci interviennent au niveau de la donnée sol relevé par la FAO. Cela nous permet de comprendre pourquoi une grande partie de la maille présente un A très faible.

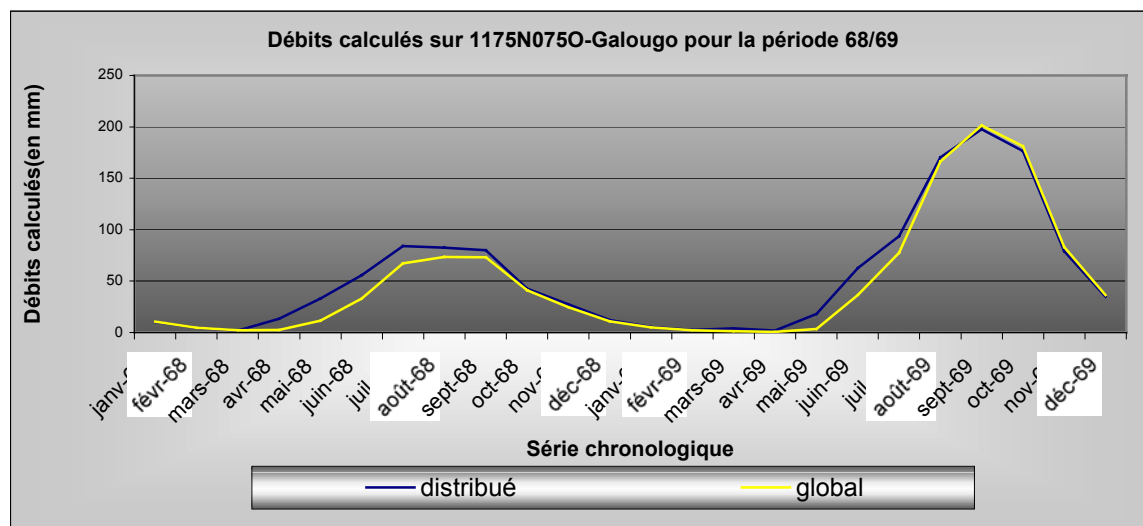


Figure 28 : Zoom sur les hydrogrammes distribué et global des années 1968 et 1969

En analysant de plus près les hydrogrammes, on s'aperçoit que le δ devient notable pour les années à très faible pluviométrie, inférieures à 300 mm pour la saison des pluies de juillet comme l'illustre la figure 26 pour l'année 1968. La distribution à la maille restitue dans ce cas des débits plus importants. L'accumulation des δ va donc se faire sur les fortes années de sécheresses.

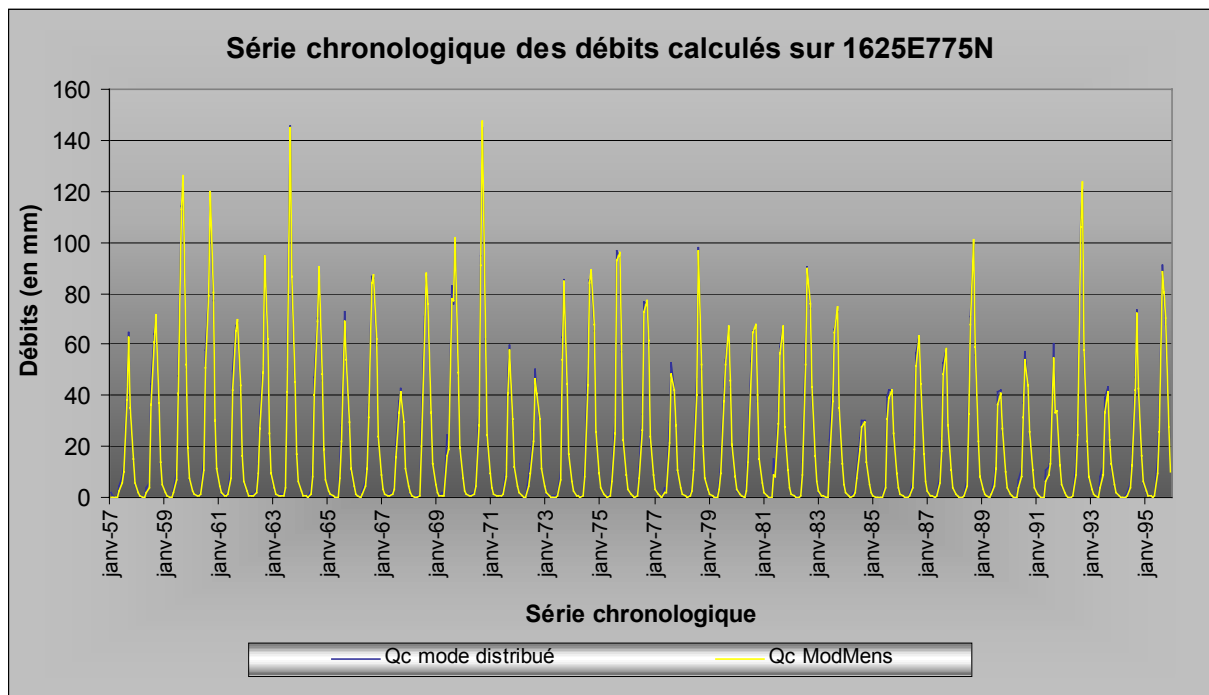
Gore-1625E775N

Figure 29 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 1625N775N

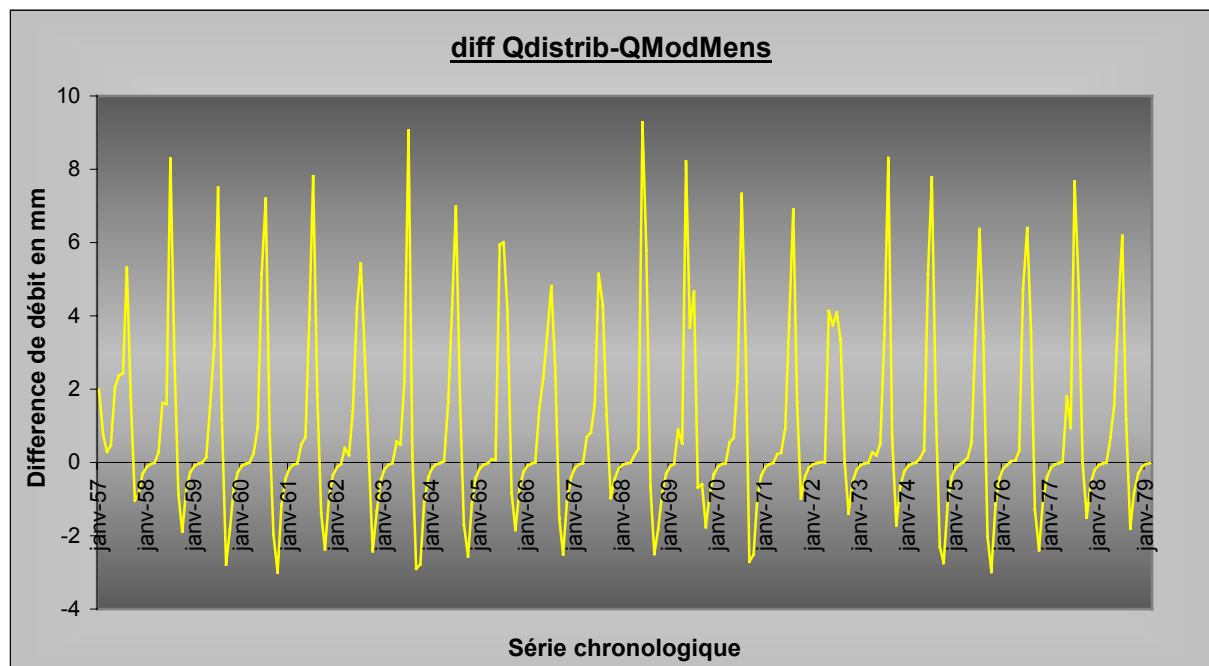


Figure 30 : Différence entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 1625N775N

Exploitation des résultats:

Cette maille présente 2 types de sols majeurs ; le premier occupe 50 % du bassin versant avec un A de 92 mm, le deuxième, occupe 36 % de la maille avec un A de 360 mm, donc des hauteurs de réservoirs sol importants sur toute la maille. Un fort A va engendrer une diminution du volume produit. et de surcroît, la zone climatique dans laquelle se situe la maille (Savane arborée) présente de faibles précipitations.

Dans ce cas, les δ vont de -2 à $+10$ mm. La somme des δ est nettement plus faible que pour Galougo, vaut 411 mm.

Les différences entre les deux modes sont quasi nulles sur l'ensemble de la période, à l'exception des années à faibles pluviométries où la pointe de crue de l'hydrogramme est plus importante en mode distribué (figure 31).

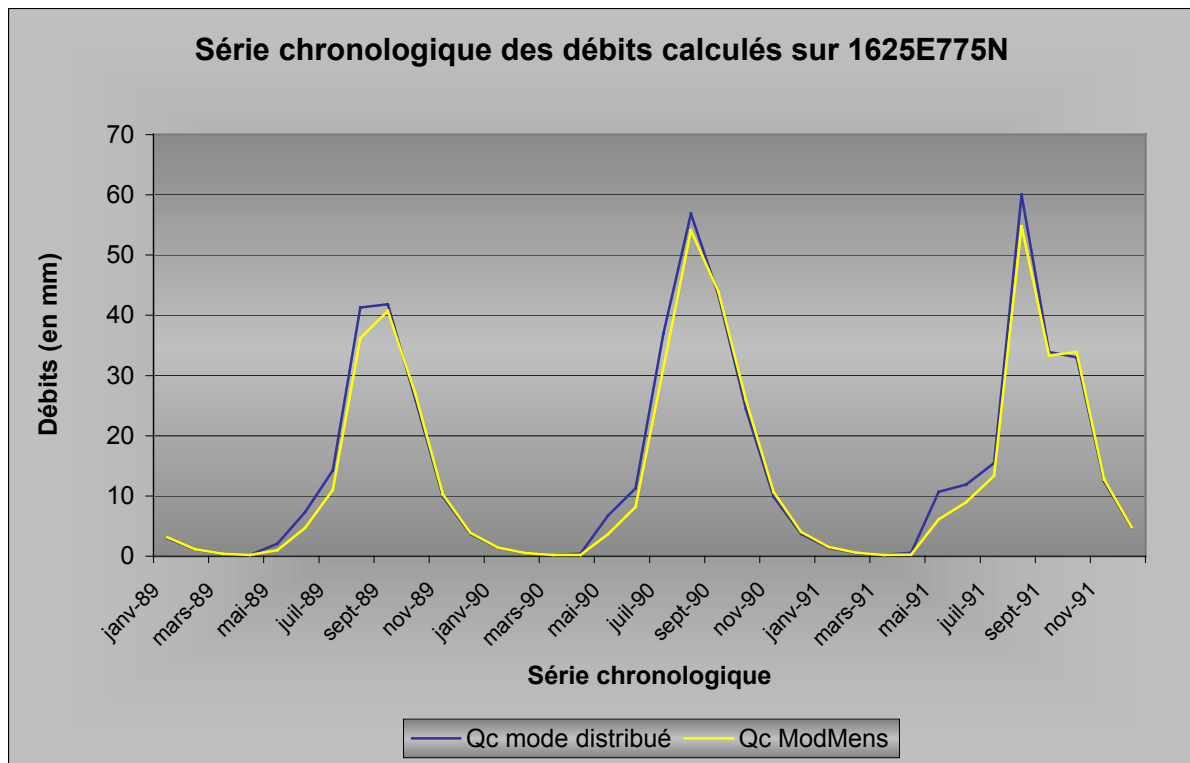


Figure 31 : Zoom sur les hydrogrammes distribué et global de l'année 1989 à 1991.

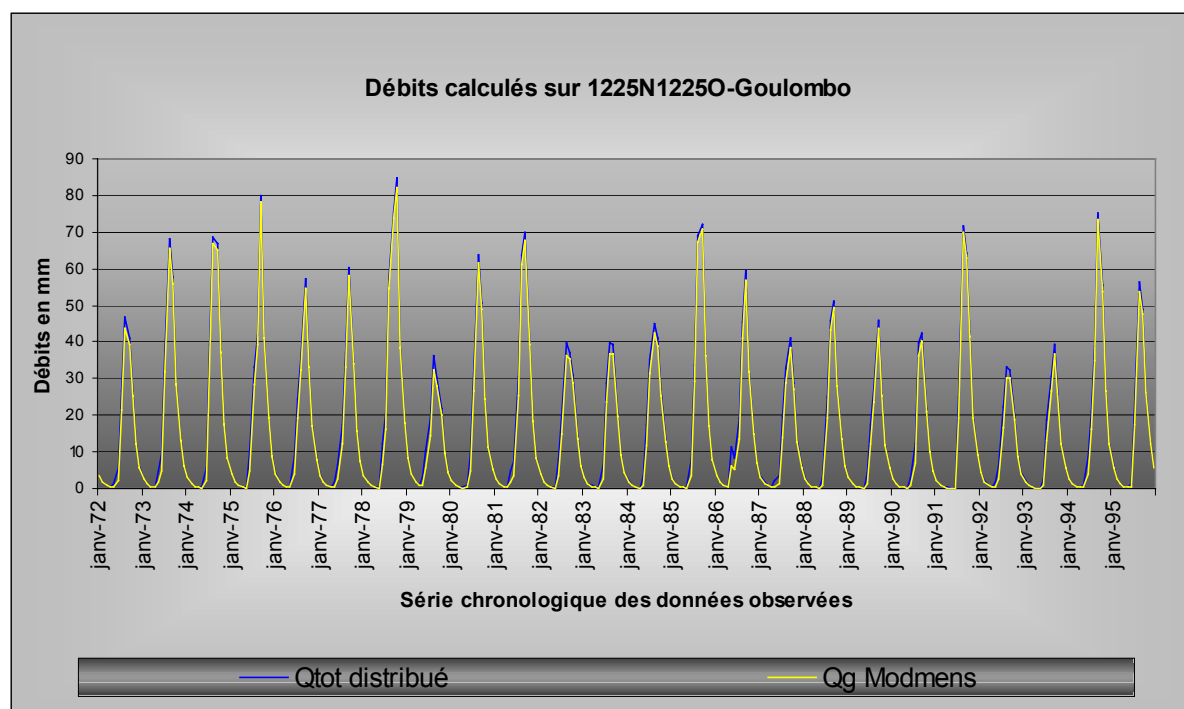
Goulombo-1225N1225O

Figure 32 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 1225N1225O

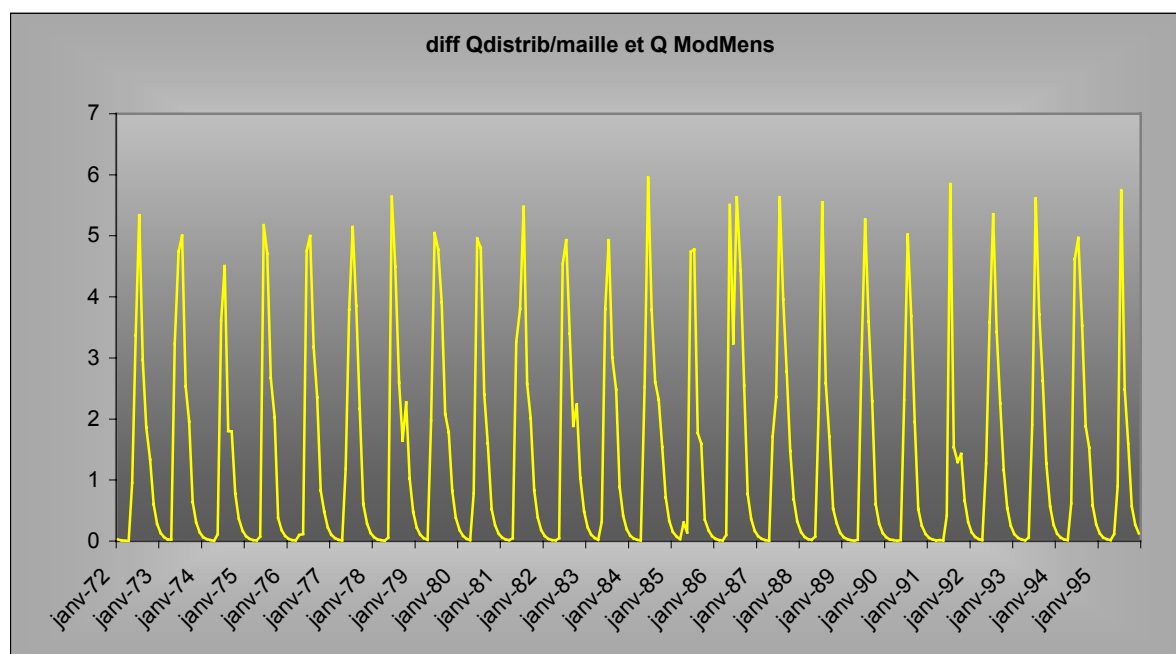


Figure 33 : Différence entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 1225N1225N

Exploitation des résultats :

35.35% du bassin versant présente un $A=20$ mm et 50% un $A=139$ mm. La végétation sur cette maille est de type intermédiaire de forêt saisonnière.

Cependant, là encore, la somme des δ est faible (402 mm). Les δ sont toujours positifs donc, le Q distribué est toujours plus important que le Q global mais l'écart est très faible (jusqu'à 6 mm en moyenne).

La différence entre les deux fonctions de production est minimisée par le fait que la zone présente une faible pluviométrie sur l'ensemble de la zone. Les δ vont donc être réduits. Les δ les plus importants sont retrouvés pour les années à très faible pluviométrie, donc très faible débit (inférieur à 40 mm).

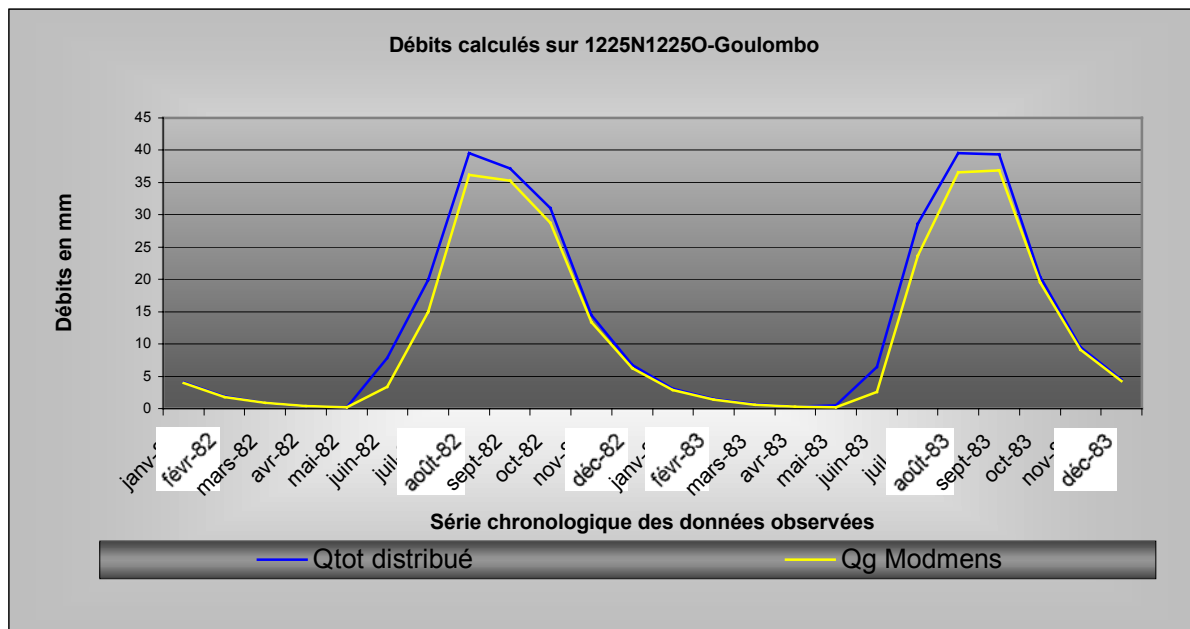


Figure 34 : Zoom sur les hydrogrammes distribué et global des années 1982 à 1983.

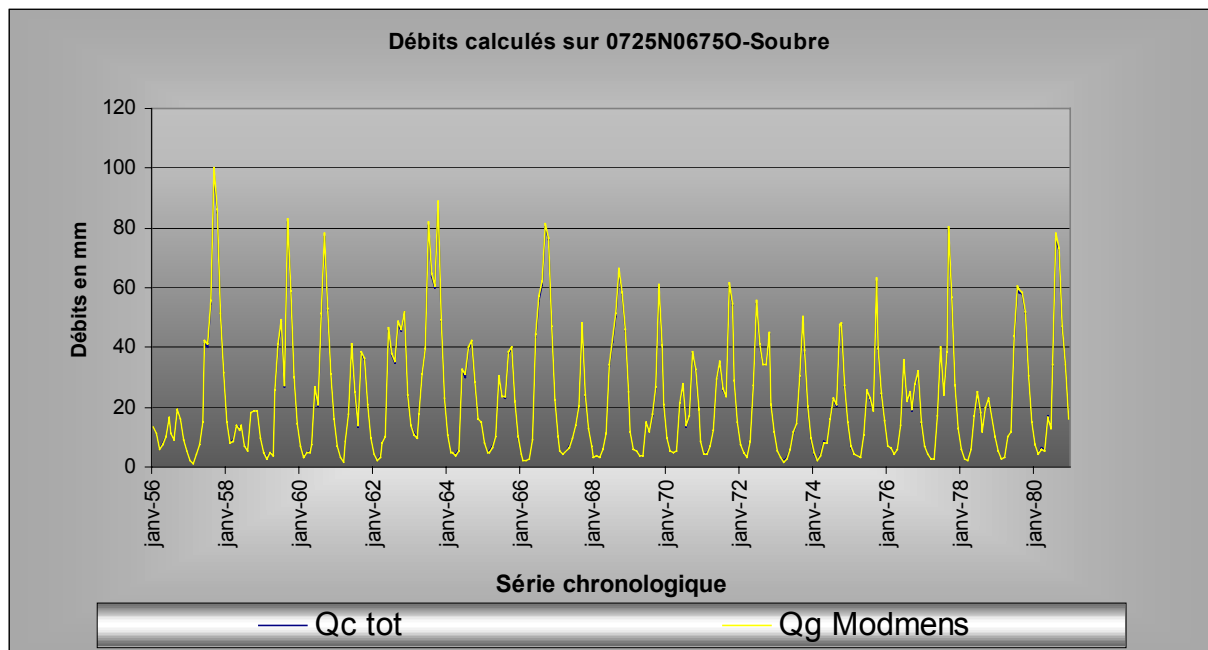
Soubre- 0725N0675O

Figure 35 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 0725N0675O

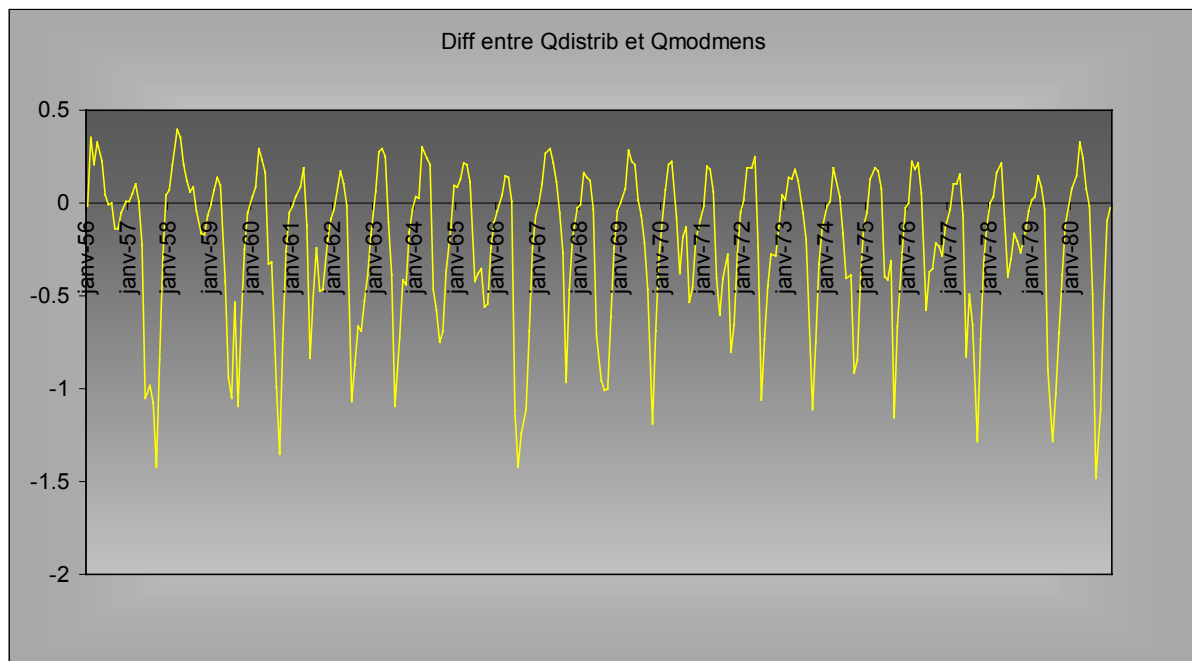


Figure 36 : Différence entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 0725N0675O

Exploitation des résultats :

Pour cette maille, les différences sont quasi-toujours négatives, même si le delta est très faible (au maximum $\delta = -1.5$ mm).

Cette maille présente l'intérêt d'avoir un fort degré d'hétérogénéité de sols avec six types de sols distincts, mais les valeurs de A sont assez importantes avec une moyenne de 153 mm, engendrant une baisse du volume produit.

La végétation sur la maille est de type forêt tropicale humide mais les lames écoulées n'excèdent pas les 100 mm. La sommation de ces δ négatifs est égale à -67 mm.

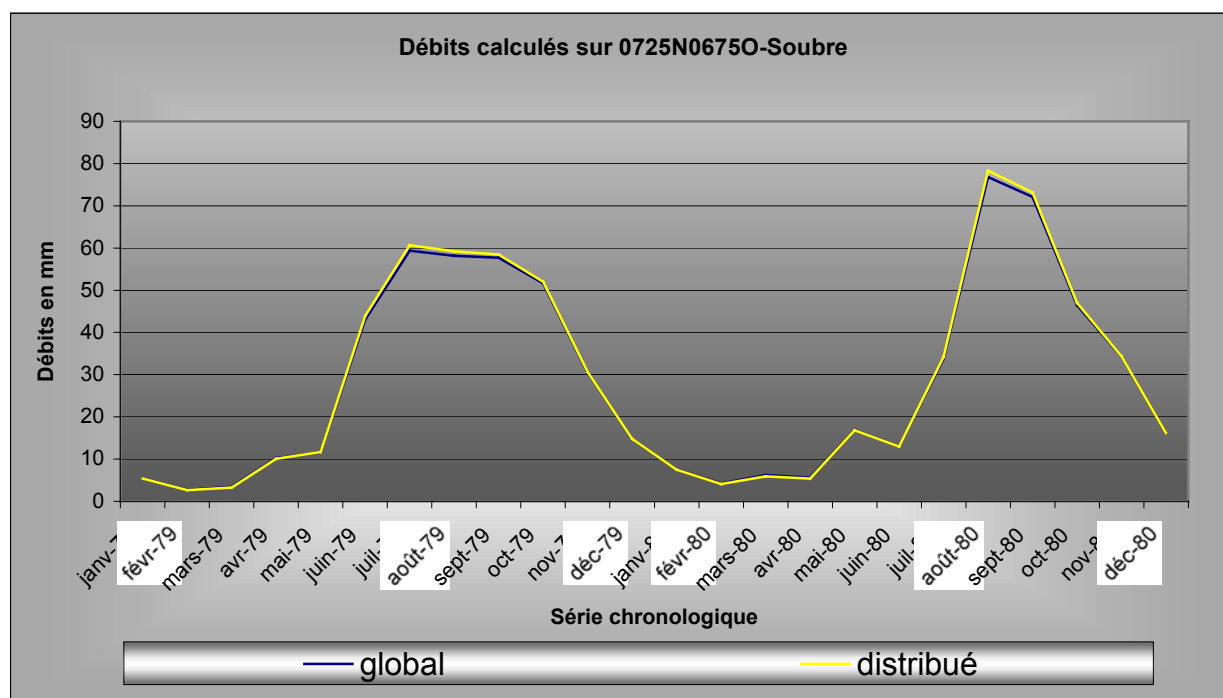


Figure 37 : Zoom sur les hydrogrammes distribué et global des années 1979 à 1980.

Les δ les plus négatifs se retrouvent sur les hydrogrammes des années les plus sèches. Ainsi, pour les années 1979-1980, période de mise en place de la sécheresse, la pointe des hydrogrammes est inférieure en mode distribué. Dans cette configuration, la forte baisse de la pluviométrie sera mieux pris en compte en mode global.

Conclusion sur l'apport de la modélisation distribuée intramaille sur la donnée sol et la modélisation globale à l'échelle de la maille :

Plusieurs paramètres vont entrer en jeu dans les différences obtenues entre ces deux types de modélisation, on retiendra que les différences les plus notables sont retrouvées sur les zones à forte pluviométrie (de type tropicale humide) et lorsque la donnée A est faible (de l'ordre de 20 mm). Dans ce cas, la fonction de production joue un rôle important et les différences de débits obtenues sont notables. Dans les autres cas, pour les zones à faible pluviométrie et pour une fonction de production minimisée, les différences sont quasi-nulles, voire négatives pour les années très déficitaires en eau et dont la donnée A est forte.

4.1.3.3 Modmen_dist

Les valeurs de débits observées ne sont connues qu'à l'exutoire de chaque sous-bassin. Ainsi, afin de pouvoir comparer les critères de Nash des différentes options de modélisation, l'intérêt était d'appliquer cette méthode de distribution intramaille sur l'ensemble des mailles de chaque sous-bassin versant, afin d'obtenir un débit total calculé à l'exutoire, correspondant à la somme des débits sur chaque maille cumulés sur l'ensemble du bassin versant.

Pour y parvenir, une nouvelle programmation a été réalisée sur la base de la même architecture que Modmens, mais où la donnée de sol est distribuée intramaille sur chaque polygone de sol. Ce nouveau programme est appelé "Modmens_dist".

Les résultats issus de cette programmation sont schématisés dans l'histogramme ci-dessous (figure 35).

Résultats modmens-dist	Galougo	Galougo	Goulombo	Goulombo	Gore	Gore	Soubre	Soubre
Période de calage	59-70	7195	7284	8595	5970	7195	5670	7180
x1	0.444834	0.318327	0.382657	0.366259	0.724807	0.571940	0.48155	0.37646
x2	0.551243	0.582033	0.521384	0.543271	0.558745	0.670964	0.55077	0.550331
Nash (calage)	90.556	84.414	80.899	62.317	82.754	68.858	85.67	76.966
Nash (validation)	43.852	73.911	62.004	80.556	59.239	75.649	56.861	74.291

Résultats modmens	Galougo	Galougo	Goulombo	Goulombo	Gore	Gore	Soubre	Soubre
Période de calage	59-70	7195	7284	8595	5970	7195	5670	7180
x1	0.454856	0.324658	0.399909	0.383088	0.724349	0.574286	0.48203	0.376926
x2	0.55462	0.595462	0.52656	0.548016	0.566393	0.685460	0.55159	0.551956
Nash (calage)	91.324	85.463	81.415	62.684	83.132	69.42	85.774	77.089
Nash (validation)	47.052	75.237	62.385	81.082	69.42	76.192	56.957	74.41

Tableau 11 : Résultats obtenus avec Modmens et Modmens_dist

Les Nash obtenus en calage par les deux méthodes sont quasi-identiques à 1% près, les volumes distribués par Modmens et Modmens_dist sont donc quasi-identiques et dans ce cadre, la distribution de la donnée sol n'apporte pas une nette amélioration comparée au modèle comparé en global.

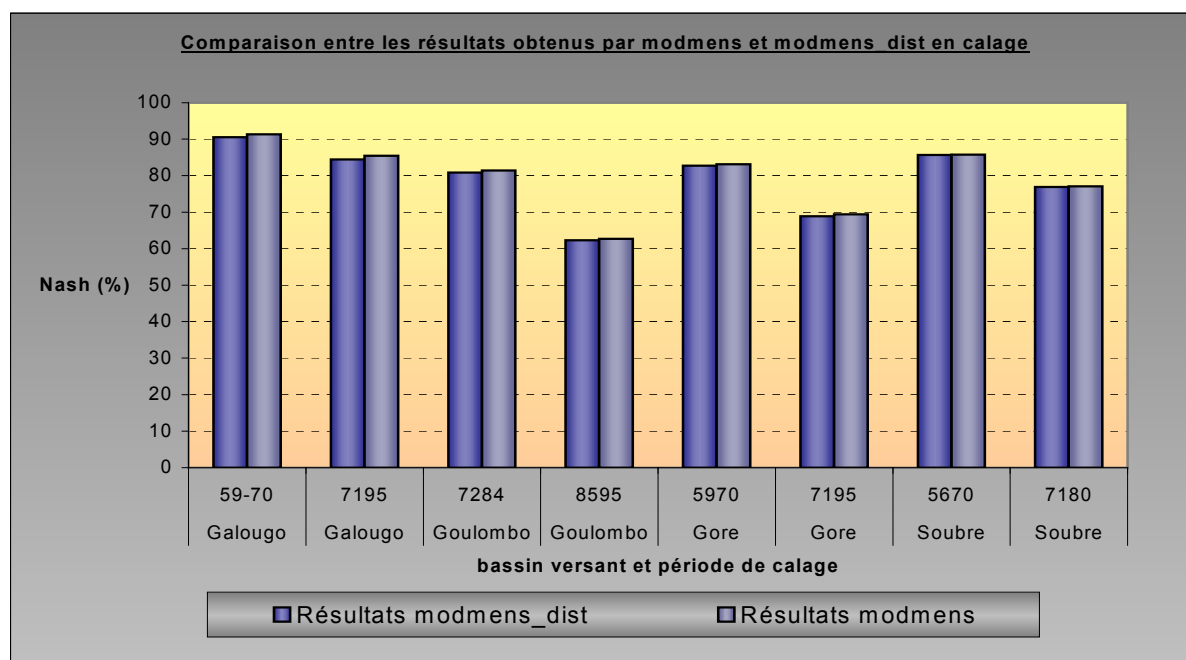


Figure 37 : Histogramme des Nash obtenus par Modmens et Modmens_dist en calage pour les 4 bassins versants étudiés et les deux types de découpages.

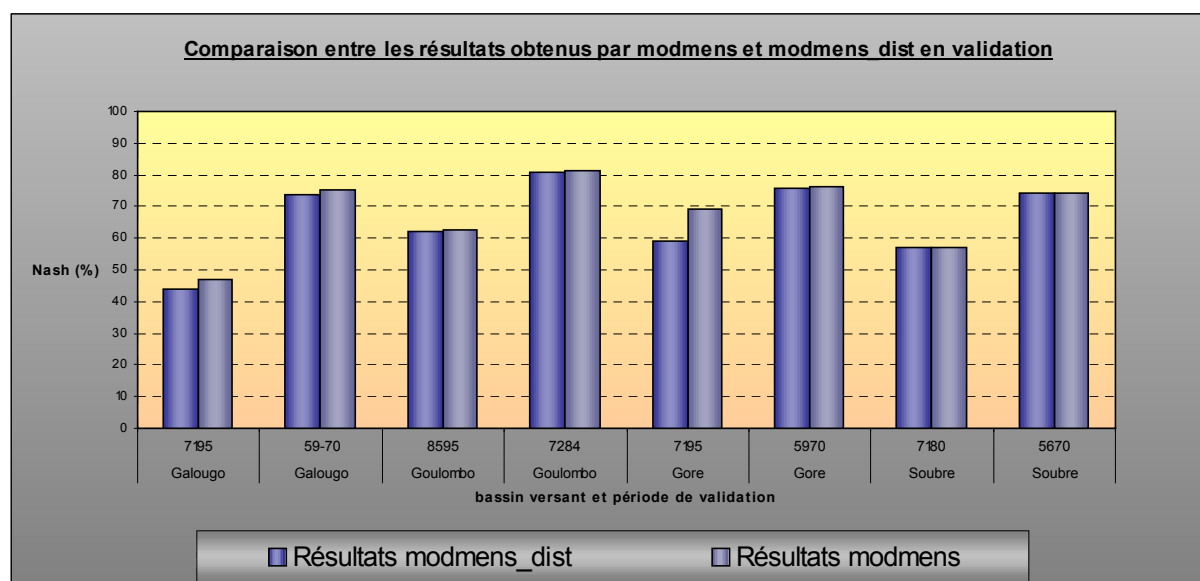


Figure 38 : Histogramme des Nash obtenus par Modmens et Modmens_dist en validation pour les 4 bassins versants étudiés et les deux types de découpages.

Lorsque l'on analyse les critères de Nash en validation, la majorité des bassins présentent des Nash quasi-similaires, cependant, on retrouve une exception pour le bassin de Gore en calant sur la période sèche et en validant sur la période humide où l'écart entre les Nash est de près de 10 %. Cela peut être expliqué par les mois de pointe de crue qui s'ajoutent et font varier le Nash. Ces résultats montrent que, à l'échelle d'un bassin versant, le Nash est meilleur lorsque la donnée n'est pas distribuée sur chaque polygone de sol, et cela que ce soit en calage ou en validation.

Conclusion sur la méthode utilisée et perspectives :

Nous avons pu montrer dans cette étude qu'aucun des bassins versants n'a montré une meilleure restitution hydrologique par l'utilisation d'une approche semi-distribuée en matière de donnée de sol par comparaison avec une approche globale.

On peut donc en conclure qu'avec ce type de modèle et les entrées dont on dispose, raffiner la connaissance du compartiment sol n'apporte aucune amélioration significative du critère de qualité du modèle.

Le modèle utilisé ici, GR2M, est un modèle extrêmement robuste, l'inconvénient est qu'il peut présenter une zone d'équifinalité assez grande. Distribuer la donnée sol dans ce cadre risque de contraindre le calage possible des paramètres du modèle et ainsi de limiter l'optimisation possible du critère de Nash.

Les essais auxquels nous avons procédé montrent clairement que le Nash en mode semi-distribué, que ce soit par un découpage par maille ou intramaille, est toujours moins bon que celui retrouvé en mode global à l'échelle du bassin versant. Il serait donc intéressant d'appliquer ces méthodes avec d'autres types de modèles conceptuels après évaluation de l'équifinalité propre à l'algorithme.

Il serait également judicieux de chercher à améliorer les performances du modèle en travaillant sur les données d'entrée comme la pluie, c'est à dire, sur les mêmes lames mensuelles mais en les distribuant de manière plus fine au sein des mailles. Une redistribution de l'ETP serait aussi envisageable dans cette optique.

Par ailleurs, il semble important de pouvoir, dans un avenir proche, prendre en compte l'évolution de la donnée sol, surtout dans en zone de socle où l'affleurement de bandes granitiques et schisteuses engendre des phénomènes d'induration, se traduisant par des formations de surfaces cuirassées imperméables. Pour cela, même si les résultat obtenus en mode semi-distribué à l'échelle de la maille sont moins satisfaisant qu'en mode global, nous les conserverons en vue de prendre en compte l'évolution ultérieure du sol.

Cette étude mériterait donc d'être développée et approfondie, en travaillant avec d'autres modèles, sur d'autres fonctions de production, mais aussi en étendant la zone d'étude à d'autres secteurs géographiques à couverture pédologique hétérogène.

Toutefois, les résultats obtenus ici permettent de conclure sur le fait que le modèle conceptuel GR2M, qui développe une approche globale, reste un modèle performant et facilement applicable aux grands bassins d'Afrique de l'Ouest et Centrale.

Conclusion générale:

Ces dernières années, une des questions sensibles au cœur des grands débats mondiaux concerne les réserves en eau douce. Mener une réflexion sur la manière d'en optimiser l'utilisation à l'avenir apparaît désormais incontournable. Cet intérêt va de pair avec celui manifesté depuis une vingtaine d'années pour l'étude du climat et de sa variabilité. Or, les implications de cette variabilité sur les ressources en eau sont particulièrement fortes, avec des répercussions qui touchent de nombreux secteurs d'activité. L'analyse et la caractérisation précise de ces manifestations constituent donc aujourd'hui un domaine de recherche d'actualité, en ce sens qu'il doit déboucher sur l'élaboration de scénarios permettant l'estimation et la gestion durable des ressources en eau. Ceci est d'autant plus vrai dans les régions tropicales, généralement fragilisées d'un point de vue environnemental par une forte pression anthropique, une dégradation des sols, etc.

L'étude de la variabilité hydrologique qui résulte de celle du climat, et le développement d'une modélisation pertinente de la relation pluie-débit, qui permette d'en rendre compte, afin d'évaluer l'impact de différents scénarios sur la gestion des ressources en eau, constituent donc le projet de recherches sur lequel l'équipe VAHYNE travaille actuellement. Il concerne prioritairement des bassins versants de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de km², échelle de la planification et de l'action en matière de ressources en eau.

Le continent africain, très fragilisé, se révèle être un objet d'étude approprié pour traiter de la variabilité et de la modélisation des ressources en eau dans la mesure où son développement repose en grande partie sur la maîtrise de celles-ci. En outre, les bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale, qui subissent depuis plus de trente ans une sécheresse persistante, ont permis de collecter une masse importante de données qui a servi de support aux travaux présentés ici.

Dans le domaine de la modélisation conceptuelle globale de la relation pluie-débit, encore relativement peu explorée en régions tropicales, l'acquisition de nombreuses informations quant à l'utilisation de ces modèles, la prédétermination de leurs paramètres, l'influence des fonctions critères utilisées sur les résultats obtenus, la transposabilité des algorithmes, leur fiabilité et leur robustesse, ou encore la cohérence de leurs comportements à différentes échelles d'espace ont permis de travailler à l'obtention des calages les plus stables.

Même dans un contexte de variabilité climatique, les résultats fournis par ces modèles ne nous permettent pas de conclure à une évolution de la relation pluie-débit (Niel et al, 2003). Dans ce cadre, on peut aujourd'hui envisager la possibilité d'utiliser ces modèles calés dans des scénarios de type prospectifs, en mentionnant les hypothèses et les limites de cette approche.

L'étude réalisée ici avait pour but d'apporter une réflexion sur l'utilisation d'une modélisation conceptuelle dans une approche semi-distribuée, appliquée à des bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale de plusieurs milliers de km², en comparaison avec l'approche globale utilisée habituellement.

Les résultats issus de cette étude mettent en évidence que la distribution des données sol au sein d'un modèle robuste de type conceptuel, tel que GR2M, ne permet pas d'affiner les paramètres et n'améliore pas les performances du critère de qualité du modèle.

C'est, en tout cas, vrai pour ce type d'outils, les données d'entrée (Pluie, ETP) disponibles et ces bassins versants africains.

D'autres expérimentations pourraient être développées ailleurs pour corroborer ou infirmer ces résultats.

Références bibliographiques

- ADEJUWON, J.O., BALOGUN, E.E., ADEJUWON S.A., 1990, On the annual and seasonal patterns of rainfall fluctuations in sub-saharian West-Africa, *Journal of Climatology* , 10, pp.839-848.
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998, Crop evapotranspiration- guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- ARDOIN S., DEZETTER A., SERVAT E., MAHE G., PATUREL J.E., DIEULIN C., BOYER, J.F, 2003, Analyse de la variabilité des ressources en eau en Afrique de l'ouest sahélienne par modélisation hydrologique à grands pas de temps et d'espace. Int. Conf. on the Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions, Montpellier, France, 1-4 Avril 2003. Poster.
- ARDOIN, S., DEZETTER, A., SERVAT, E., BOCQUILLON, C., 2001, Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain: Definition of new loss functions for lumped rainfall-runoff models in semiarid African environment. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, Vol. 333, Issue 10, 30 Nov. 2001, p. 611-616.
- ARNAUD, J. C., VENNETIER P., 1978, Atlas de la Cote d'Ivoire. *Editions Jeune Afrique*. Paris.
- AUBREVILLE, A. 1965. Principes d'une systématique des formations végétales tropicales. *Adansonia*, 5(2): 153-196pp.
- AUBREVILLE, A., 1949, Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Paris Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, 255 p.
- AVENARD J.M., BONVALLOT J., LATHAM M., RENARD-DUGERDIL M., RICHARD J., 1974, Aspects du contact forêt savane dans le centre et l'ouest de la Côte d'Ivoire. Etude descriptive. *Trav. et dot. de l'ORSTOM*, no 35, Paris, 254-532 pp.
- BAUDEZ, J.C., 1997, Déterminants hydrologiques régionaux pour la gestion et la prévision des ressources en eau. Rapport de DEA, Paris 6. 77 pp.
- BEN YAMED B et al., Atlas Jeune Afrique du continent africain, éd. du Jaguar, Paris 1993
- BILLON B. et al, 1974, Monographies hydrologiques n°2 : le bassin du fleuve Chari, ORSTOM, Paris, 452 p.
- BILLON, B. et al, 1967, Monographies hydrologiques du Logone, tome I, 1^{ère} partie, ORSTOM, Paris, 102 p.
- BRACHET, F., 2002, Fonction de production dans un modèle pluie-débit en zone sahélienne. Rapport de projet Industriel de fin d'étude. Montpellier: Maison des Sciences de l'Eau, 27 p.
- CARBONNEL J.P et HUBERT P., 1992, Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Remise en cause de la stationnarité des séries. L'aridité, une contrainte au développement, Ed. ORSTOM, 37-51.
- CHAPERON P., 1973, Etude hydrologique du bassin continental du fleuve Gambie : première campagne (juin 1972-mars 1973) ORSTOM et OMVG, Dakar (Sénégal), 69 p.
- 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. Montpellier, USTL, , 422 p.
- EDITJANO., 1987, Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Mémoire de DEA. DEA Sciences et Techniques de l'Eau.
- EDITJANO., 1991, Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat en Sciences et Techniques de l'Eau. Strasbourg: CEMAGREF Division Hydrologie groupement d'Antony. Institut de Mécanique des fluides de l'Université de Strasbourg, ENITRTS de Strasbourg, 242 p. Annexes 633p.

- EDITJANO., MICHEL, C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La houille Blanche, 1989, n°2: 113-121.
- EDITJANO., NASCIMENTO, N., YANG, X., MAKHLOUF, Z. and MICHEL, C., 1999, GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrologic. Sciences. Journal. , 44 2, pp. 263–278.
- FAO/UNESCO, 1974-1981. Soil Map of the World, Ten volumes, UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- GLEICK, P.H., 1996, Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. Journal of hydrology, 88 (1986) 97-116.
- GLEICK, P.H., 1998, The World's Water 1998–1999; The Biennial Report on Freshwater Resources; Island Press, Covelo, USA, XII+307 p., paperback, ISBN 1-559-63592-4 .
- HREICHE, A., 2003, Modélisation conceptuelle en climat méditerranéen. Exemple provisoire et incomplet de thèse de doctorat. Université de St Joseph, Faculté d'Ingénierie. Berouth; UM2.
- HUBERT, P., CARBONNE, J.P., CHAUCHE, A., 1989, Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. Journal of hydrology, 110: 349-367.
- HULME M., 1996b. Climate change and southern Africa: an exploration of some potential implications in the SADC region. CRU/WWF. Geophysical research Letters, vol. 23, n°1, 61-64.
- HULME, M., 1996a. Recent climatic change in the world's drylands. Geophysical research Letters, vol. 23, n°1, 61-64.
- KOFFI, B., GREGOIRE, M., MAHE, G., LACAUX, J.P., 1995, Remote sensing of bush fire dynamics in Central Africa from 1984 to 1988: analysis in relation to regional vegetation and pluviometric patterns, Atmospheric Research, Volume 39, Issues 1-3, October 1995, p. 179-200.
- LAMAGNAT J.P. et al, 1990, Monographies hydrologiques du fleuve Gambie, ORSTOM et OMVG, Dakar (Sénégal), 247 p.
- LAVABRE, J., CAMBON, J.P., FOLTON, C., MAKHLOUF, Z., MICHEL, C., Loieau : a software for the regional estimate of water supply - Application to the determination of reference flows in the French Mediterranean. CEMAGREF AIX EN PROVENCE OIAX - CEMAGREF ANTONY HYAN. Ingénieries n° 12, décembre 1997, p. 59-66
- LERIQUE J., 1977-04, Aménagement intégré du fleuve Gambie, mission pluridisciplinaire, terme de référence : hydrologie, Orstom, Dakar (Sénégal), 43 p.
- L'Hôte Y., Mahe G., Some B., Triboulet J.P., 2002, analysis of a sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. Hydrological Sciences Journal, Vol. 47 (4), 563-572pp.
- LUBES H., MASSON J.M., SERVAT E., PATUREL J.E., KOUAME B., BOYER J.F., 1994, Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par applications de tests statistiques. Etude bibliographique, ORSTOM Montpellier, programme Iccare, rapport 3, 21 p.
- LUBES-NIEL, H., MASSON, J.M., PATUREL, J.E., SERVAT E., 1998, Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. Rev. Sci. Eau ,11 (3) : 383-408
- LUBÈS-NIEL H., PATUREL J.E., SERVAT E., 2003 "study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability". journal of hydrology, 278 /1-4, PP 211 - 228.

- MAHE, G., CITEAU, J., 1993, Relation océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique Satellitaire*, n°44, 34-54 p.
- MAHE, G., OLIVRY, J.C., 1991, Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale du mensuel à l'interannuel. *IASH Publ.*, 201, 163-172.
- MAKHLOUF, Z., MICHEL C., 1994, A two-parameter monthly water balance model for French watersheds., *Journal of hydrology*, Vol. 162, issues 299-318.
- MAKHLOUF, Zoubir., 1994, Compléments sur le modèle pluie-débit GJ et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Docteur es Sciences. Orsay: Université de Paris XI ORSAY, CEMAGREF d'Antony, 249 p. Annexes 426 pp.
- MICHEL, C. Détermination des débits de référence. Etiage et module. Application au département de Seine et Marne. Calcul du QMNA5 et du module avec le modèle GR2M-quadratique, 1996, 205 p.
- MOUEHI, S., 2002, Modélisation pluie- débit au pas de temps mensuel. Rapport d'avancement de thèse. Sept 2002. Ingénieur en Génie Rural de l'ESIER. ENGREF- CEMAGREF
- NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models. *J. Hydrol.*, 273, 282-290pp.
- NICHOLSON, S.E., 1994, Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent. *The Holocene* 4, 2, 121-131 pp.
- OLIVRY J.C., BRICQUET J.P., MAHE, G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide. In *Hydrology of Warm Humid Region (Proc Yokohama Symposium July 1993)*. *IASH Publ.* n°216, 67-68 pp.
- OUEDRAOGO, M., 2001, Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'ouest: Analyse des conséquences d'une sécheresse persistantes : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat en Mécanique, Génie mécanique, Génie civil. Montpellier: Université Montpellier II, 231 p. Annexes 257 p.
- PATUREL, J.E., SERVAT, E., LUBES-NIEL, H., DELATTRE, M.O., 1997, Climatic variability and long rainfall series analysis in non-Sahelian Western and Central Africa, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, Volume 325, Issue 10, November 1997, p.779-782
- PATUREL, J.E., SERVAT, E., VASSILIADIS., 1995, Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data -- case of the GR2M model, *Journal of Hydrology*, Volume 168, Issues 1-4, June 1995, p.111-125
- PERRAUD (A.), 1971. - Le milieu naturel de la Côte-d'Ivoire. Les sols : 269-391. *Mém. ORSTOM* no 50. Carte pédologique au 1/500.000.
- PERRIN, C., 2000, Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Docteur de l'INPG Spécialité: Mécanique des Milieux géophysiques et Environnement. Antony: CEMAGREF d'Antony, 276 p. Annexes 518 p.
- PETTITT, A.N., 1979, A non-parametric approach to the change- point problem, *Applied stat.*, 28, 2, 126-135.
- ROCHETTE, C., 1974, Monographies hydrologiques n°1 : Le bassin du fleuve Sénégal, *ORSTOM*, Paris, 440 p.
- SERVAT, E., PATUREL, J.E., KOUAME, B., TRAVAGLIO, M., OUEDRAOGO, M., BOYER, J.F., LUBES-NIEL, H., FRITSCH, J.M., MASSON J.M., MARIEU B., 1998, Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth century*, *IASH Publ.* Vol. 252, Issues 323-327.
- SERVAT, E., PATUREL, J.E., LUBES-NIEL, H., KOUAME, B., MASON, J.M., 1997a, Variability of rainfall regimes in non-Sahelian West and Central Africa, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, Vol. 324, Issue 10, May 1997, p. 835-838

SERVAT, E., PATUREL, J.E., LUBES-NIEL, H., KOUAME, B., MASON, J.M., 1997b, Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire, *Journal of Hydrology*, Vol. 191, Issues 1-5, 1997.

SERVAT, E., PATUREL, J.E., LUBES-NIEL, H., KOUAME, B., MASON, J.M., 1997, Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part II: an integrated regional approach, *Journal of Hydrology*, Vol. 191, Issues 16-36.

SERVAT, E., PATUREL, J.E., LUBES-NIEL, H., KOUAME, B., TRAVAGLIO, M., MARIEU, B. Regarding the reduction of flow in Western and Central Africa, *Comptes Rendus de L'Académie des Sciences - Séries IIA - Earth and Planetary Science*, Vol. 325, Issue 9, Nov. 1997, Pages 679-682

TAPSOBA D., BOBEE B., 2002, Quelques caractéristiques événementielles des régimes pluviométriques ponctuels ouest-africains au cours de deux périodes climatologiques contrastées (1951-1970 et 1971-1990). Application de la loi composée Poisson/ exponentielle (LCPE) ou du modèle de la loi des fuites (LDF) aux pluies journalières. *Sécheresse* n°2, vol. 13, juin 2002. Cahiers d'études de la recherche francophone.

TAPSOBA Dominique, 1997, Caractérisation Événementielle des Régimes Pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement. Thèse de Docteur es Sciences-Spécialité Hydrologie. Orsay: Université de Paris-XI (Orsay), 113 p. Annexes 138 p.

VENNETIER P et al., Atlas de la Côte d'Ivoire. (2ème ed.) Paris : Jeune Afrique, 1983.

XUE Y., 1997. Biosphere feedback on regional climate in tropical North Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **123**, pp. 1483–1515.

Sites Internet:

CEMAGREF Déterminants hydrologiques régionaux pour la gestion et la prévision des ressources en eau [en ligne].Disponiblesur<http://www.lisc.clermont.cemagref.fr/Labo/activite_recherche/projets/Projets_terminees/TheMeMobilisateurEvaluationModeles/P97ressourceeau.htm > (consulté le 17.04.03)

Liste des figures

- Figure 1 : Localisation des grands ensembles hydrographiques étudiés
- Figure 2 : Exemple de carte des sols (d'après la carte de la FAO) et du découpage spatial au demi-degré carré et mise en évidence des redondances.
- Figure 3 : Sélection visuelle du nombre de sol par maille pour chaque grande unité hydrographique
- Figure.4-a-b-c-d : Description des différentes étapes de sélection des sous-bassins versant présentant le degré d'hétérogénéité de la donnée "sol" le plus important
- Figure 5 : Bassin de Gore
- Figure 6 : Bassin de Goulombo
- Figure 7 : Bassin de Soubré
- Figure 8 : Bassin de Galougo
- Figure 9 : Localisation des sous bassins étudiés sur la carte de la des régions climatiques et végétation associée
- Figure 10 : Localisation de la maille choisie sur le bassin de Gore
- Figure 11 : Localisation de la maille choisie sur le bassin de Galougo
- Figure 12 : Localisation de la maille choisie- Bassin versant de Goulombo
- Figure 13 : Localisation de la maille choisie pour le sous-bassin Soubré.
- Figure 14 : Résultats en terme de meilleurs calages pour l'ensemble des données sur les 41 bassins pour les sous-populations de pluie, d'ETP et de WHC.
- Figure 15 : Informations directes du sol contenu dans la carte de la FAO (Soil Map of the World., 2002)
- Figure 16 : Architecture du Modèle GR2M
- Figure 17 : Représentation schématique de la technique du double échantillon
- Figure 18 : Carte des stations hydrométriques et du réseau hydrographique de l'Afrique de l'Ouest.
- Figure 19 : Différents découpages des périodes utilisées en calage et validation
- Figure 20 : Histogramme des valeurs de Nash obtenus en fixant ou en calant A, pour chaque sous-bassin choisi et pour les deux types de découpages des périodes de validations-calages.
- Figure 21 : Histogramme des différences obtenues entre le Nash pour A calé et le Nash pour A fixé.
- Figure 22 : Interface du logiciel Modmens
- Figure 23 : illustration du choix des tables de données proposées par Modmens.
- Figure 24 : performance du critère de Nash en validation et en calage par Modmens
- Figure 25 : Représentation schématique de la distribution des données à l'échelle de la maille suivant le mode distribué intra-maille ou le mode global sur une maille. Exemple de la maille 1225N1225O du bassin Goulombo.
- Figure 26 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 1175N075O
- Figure 27 : Différence entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 1175N075O.
- Figure 28 : Zoom sur les hydrogrammes distribué et global des années 1968 et 1968
- Figure 29 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 1625N775N
- Figure 30 : Différence entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 1625N775N
- Figure 31 : Zoom sur les hydrogrammes distribué et global de l'année 1989 à 1991.
- Figure 32 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 1225N1225O
- Figure 33 : Différence entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 1225N1225N
- Figure 34 : Zoom sur les hydrogrammes distribué et global des années 1982 à 1983.
- Figure 35 : Comparaison entre les hydrogrammes issus des modes semi-distribué et global sur la maille 0725N0675O
- Figure 36 : Différence entre hydrogramme distribué et hydrogramme global pour la maille 0725N0675O
- Figure 37 : Histogramme des Nash obtenus par Modmens et Modmens_dist en validation pour les 4 bassins versants étudiés et les deux types de découpages.
- Figure 38 : Histogramme des Nash obtenus par Modmens et Modmens_dist en calage pour les 4 bassins versants étudiés et les deux types de découpages.

Liste des tableaux

Tableau 1-a : Diminution des précipitations en Afrique de l'Ouest et Centrale (Moyenne de la période 1970-1989 comparée à la période 1950-1969)

Tableau 1-b : Diminution du débit des rivières en Afrique de l'Ouest et Centrale (Moyenne de la période 1970-1989 comparée à la période 1950-1969)

Tableau 2 : Nombre de sous-bassins par unité hydrographique

Tableau 3-a-b-c-d : Mise en évidence du pourcentage de mailles à haut degré d'hétérogénéité de la donnée "sol" par sous-bassins versants

Tableau 4 : Description des quatre sous-bassins retenus dans le cadre de notre étude

Tableau 5 a-b : Caractéristiques de la maille 1625E775N

- a- Description des superficies pour chaque type de sol et FAOmax correspondant ;
- b- Caractéristiques de la maille considérée.

Tableau 6 a-b : Caractéristiques de la maille 1175N1075O.

- a- Description des superficies pour chaque type de sol et FAOmax correspondant ;
- b- Caractéristiques de la maille considérée.

Tableau 7 a-b : Caractéristiques de la maille 1225N1225O.

- a- Description des superficies pour chaque type de sol et FAOmax correspondant ;
- b- Caractéristiques de la maille considérée.

Tableau 8 a-b : Caractéristiques de la maille 1175N1075O.

- a- Description des superficies pour chaque type de sol et FAOmax correspondant ;
- b- Caractéristiques de la maille considérée

Tableau 9 : Résultats fournis par GR2M en global sous Excel

Tableau 10 : Résultats obtenus par GR2Mglobal.exe ; le terme 5970-2 indique la période de calage et le nombre de paramètres variables

Tableau 11 : Résultats obtenus par Modmens et Modmens_dist.

SIGLES ET ABREVIATIONS

CRU : Climate Research Unit

FAO : Food and Agriculture Organization

SIEREM : Système d'information environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation.

SIG : Système d'information géographique

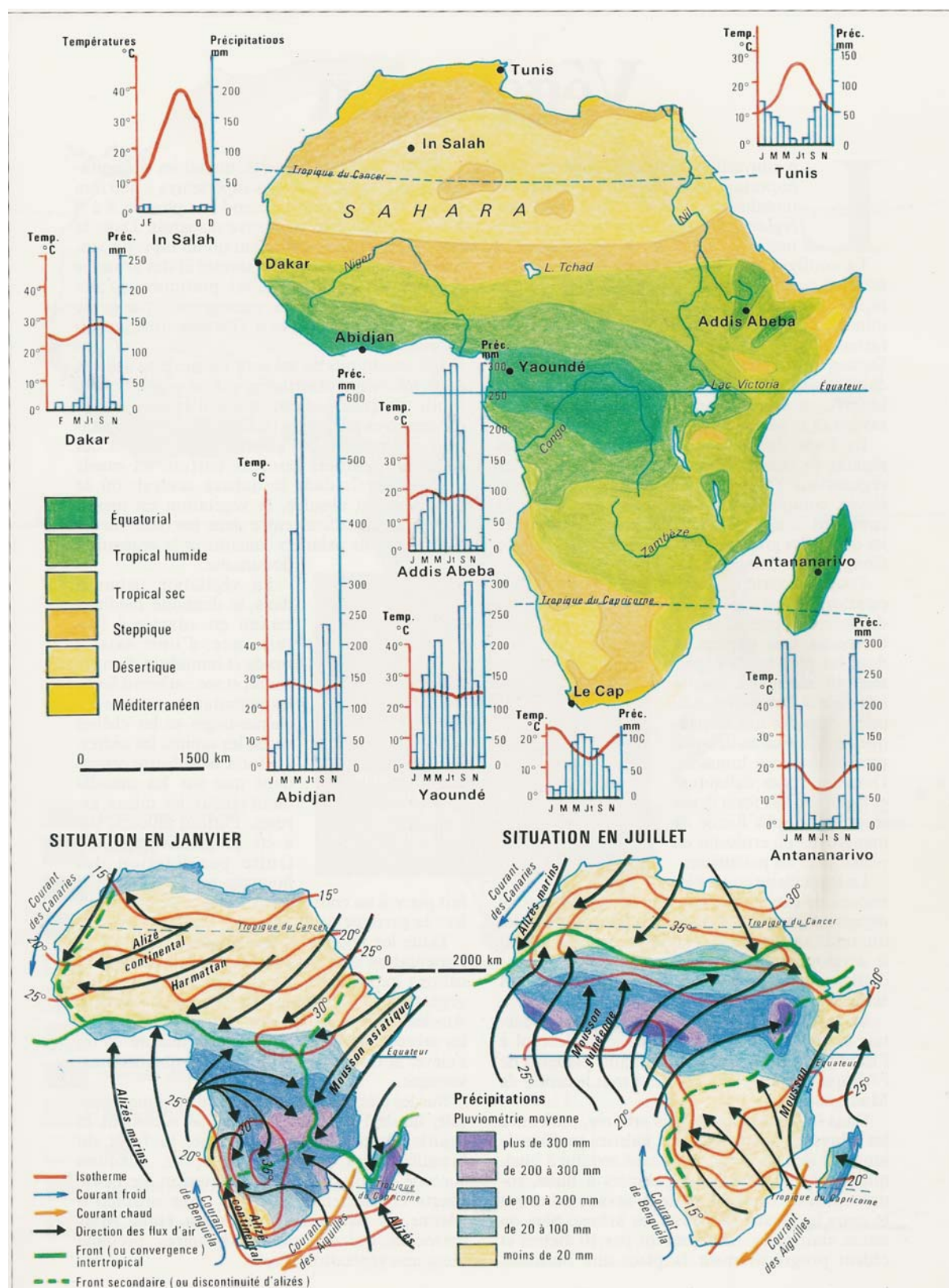
UNESCO : United Nations Educational, Scientific and cultural Organization

VAHYNE : Analyse de la Variabilité Hydrologique et impacts sur les ressources en Eau.

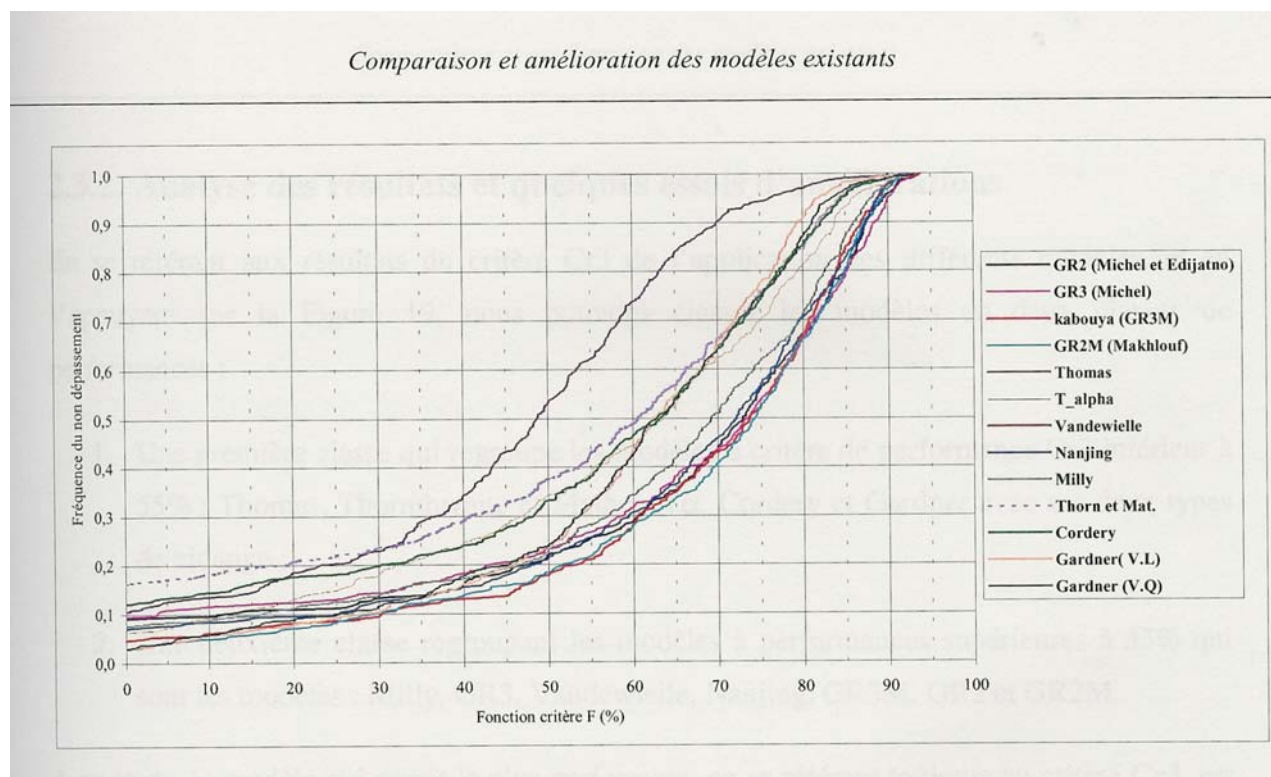
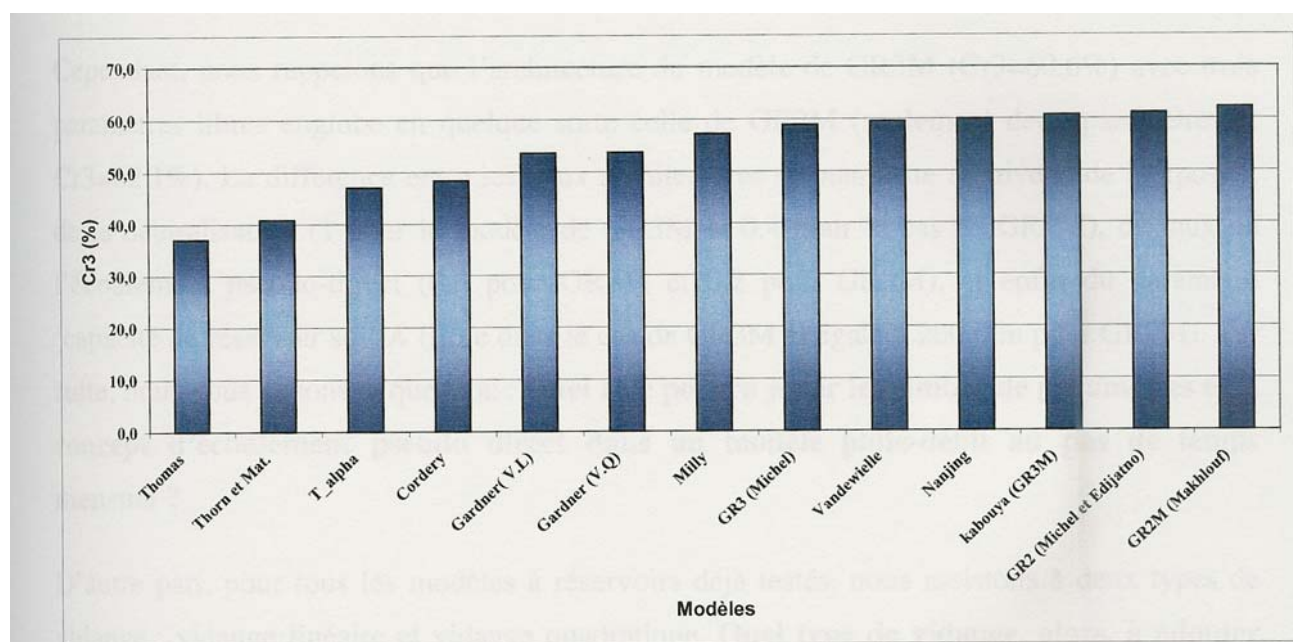
WBM : Water Balance Model

ZICT : Zone de convergence Inter-tropicale.

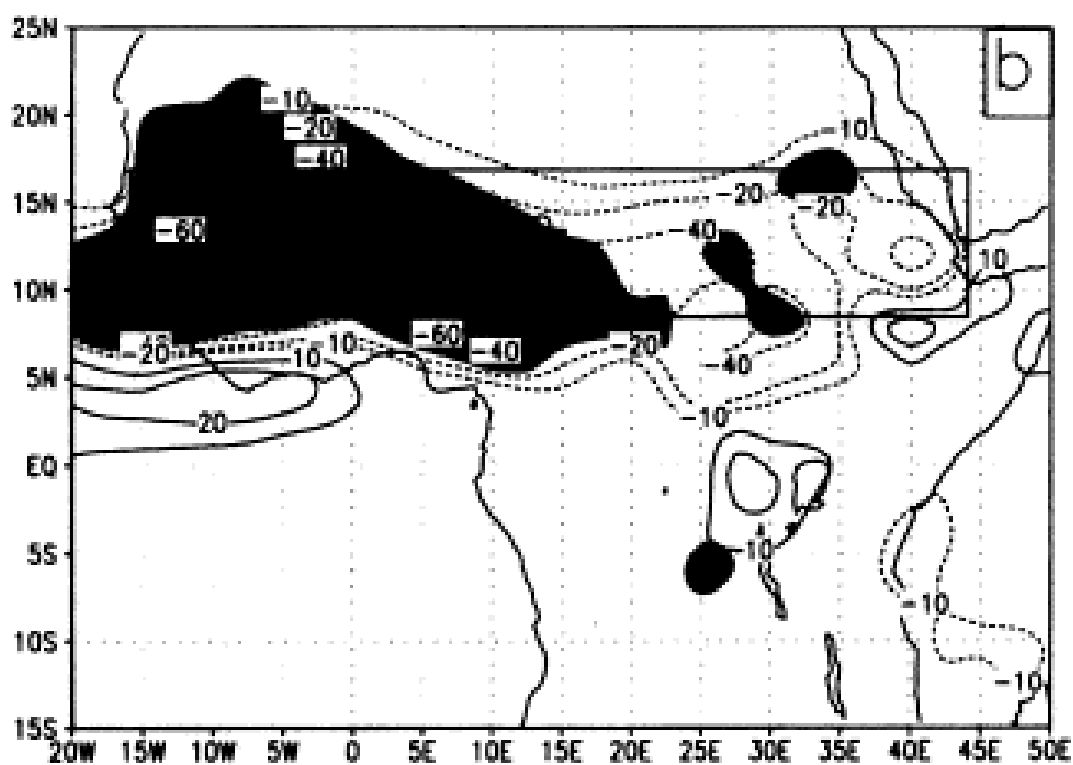
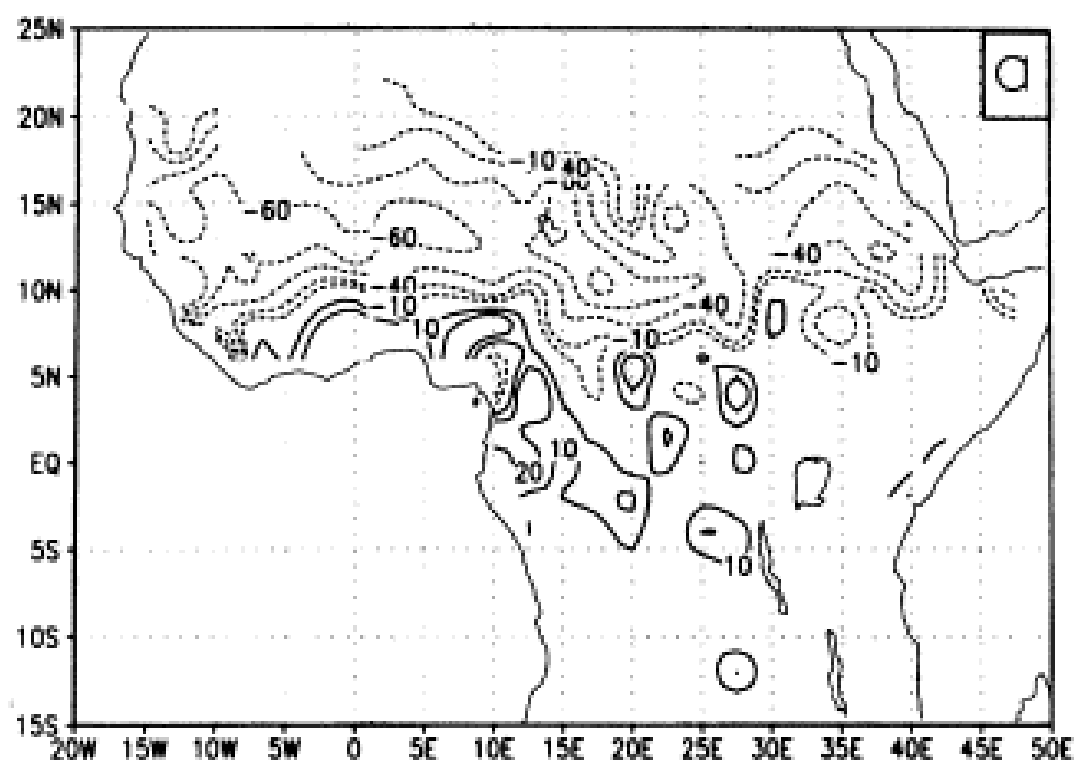
Annexe 1 : Typologie des climats et pluviométrie du continent africain (Atlas jeune Afrique, 1993)



Annexe 2 :

A : Distribution des performances des modèles retenus (tiré de Hreiche, 2003)B: Classement des différents modèles selon le critère CR3

Annexe 3 : Observation (a) et simulation par modélisation (b) des anomalies de précipitations pour la période 195-1980. (Source: Xue, 1997)



Annexe 4 : Relief du Sénégal et mis en évidence du réseau hydrographique de la Sassandra et du barrage de Guyo en amont de Soubré. (Tiré de Atlas Jeune Afrique- Côte d'Ivoire)



