

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : MODELISATION PLUIE-DEBIT EN HYDROLOGIE	5
Introduction :	6
I.1 Le cycle hydrologique :	6
I.2 Synthèse bibliographique :	9
I.3.1 Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie-débit :	14
I.4 Utilisation des modèles :	22
CHAPITRE II : PRESENTATION DU CADRE PRYSIQUE	24
Introduction :	25
II.1 Le bassin du fleuve Sénégal en amont de Bakel :	26
II.2 Description du bassin en amont de Bafing, du Bakoye et de la Falémé :	27
II.3 Les stations hydrométriques :	27
CHAPITRE III : PRESENTATION DES MODELES HYDROLOGIQUES PLUIE-DEBIT GR4J ET GR2M.....	29
Introduction :	30
III. Présentation des modèles GR4J et GR2M :	30
III.1 Historique :	30
III.2 Description du modèle pluie débit journalier GR4J :	32
III.3 Description du modèle pluie débit mensuel GR2M :	36
III.4 Procédure expérimentale utilisée en modélisation :	39
III.5 Evaluation de la performance d'un modèle :	41
CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS DES SIMULATIONS.....	43
IV .Simulation du GR4J et GR2M aux différents sous-bassins :	46
IV 1. Sous-bassin de Gourbassi :	46
IV 2. Sous-bassin de Bafing Makana :	51

IV 3. Sous-bassin d'Oualia :	55
IV 4. Sous-bassin d'Oualia :	59
Conclusion :	64
CONCLUSION GENERALE	65
PERSPECTIVES	67
Références Bibliographiques.....	69



Listes des figures :

Figure 1: Representation du cycle de l'eau (internet)	6
Figure 2 : Schema global de la relation pluie-debit gadiaga (1997)	15
Figure 3 : Relation entre les modeles pluie-debit (gaume, 2000)	17
Figure 4: Reseau hydrographique du fleuve senegal en amont de bakel (source sierem)	25
Figure 5: Le bassin du fleuve senegal en amont de bakel (source siriem).....	26
Figure 6 : Structure et mode de fonctionnement du modele GR4J (cemagref).....	32
Figure 7 : Structure et mode de fonctionnement du modele GR2M (cemagref).....	37
Figure 8 : Application du GR4J au sous – bassin du bakoye a oualia : evolution des criteres.	47
Figure 9: GR4J a gourbassi: evolution des parametres.	47
Figure 10 : Hydrogramme de transformation de la pluie en debit par le modele de GR4J.....	48
Figure 11 : Evolution des parametres.....	50
Figure 12: GR2M a gourbassi : Evolution des criteres	50
Figure 13 : Hydrogrammes de transformation de la pluie en debit par le modele de GR2M..	50
Figure 14 : GR4J a bafing makana: Evolution des criteres.....	52
Figure 15 : GR4J a bafing makana: Evolution des parametres.....	52
Figure 16 : Hydrogrammes de transformation de la pluie en debit par le modele de GR4J	52
Figure 17 : GR2M a bafing makana: Evolution des parametres.....	54
Figure 18 : GR2M a bafing makana: Evolution des criteres.....	54
Figure 19 : Hydrogrammes de transformation de la pluie en debit par le modele de GR2M ..	54
Figure 20 : GR4J a oualia evolution des criteres	56
Figure 21 : GR4J a oualia evolution des parametres.....	56
Figure 22 : Hydrogrammes de transformation de la pluie en debit par le modele de GR4J	56
Figure 23 : GR2M a oualia: Evolution des parametres.....	58

Figure 24 : GR2M a oualia: Evolution des criteres.....	58
Figure 25 : Hydrogramme de transformation de la pluie en debit par le modele de GR2M....	58
Figure 26 : GR4J a oualia (toukoto) evolution des parametres.....	60
Figure 27 : GR4J a oualia(toukoto) evolution des criteres.....	60
Figure 28 : Hydrogrammes de transformation de la pluie en debit par le modele de	60
Figure 29 : GR2M a oualia (toukoto) evolution des parametres.....	62
Figure 30 : GR2M a oualia (toukoto) evolution des criteres.....	62
Figure 31 : Hydrogrammes de transformation de la pluie en debit par le modele de GR2M..	62

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Classification des erreurs en modelisation hydrologique selon leur nature	14
Tableau 2 : Exemple de caracteristiques des modeles pluie-debit	17
Tableau 3 : Tableau recapitulatif des donnees pluviometriques et hydrometriques des sous-bassins etudies.....	28
Tableau 4 : Lacunes sur les pluies et les debits :	45
Tableau 5 : Calage et validation du GR4J au bassin de gourbassi	46
Tableau 6 : Calage et validation du GR2M au bassin de gourbassi.....	49
Tableau 7 : Calage et validation du GR4J au bassin de bafing makana.....	51
Tableau 8 : Calage et validation du GR2M au bassin de bafing makana.....	53
Tableau 9 : Calage et validation du GR4J au bassin d'oualia.....	55
Tableau 10 : Calage et validation du GR2M au bassin d'oualia.....	57
Tableau 11 : Calage et validation du GR4J au bassin d'oualia.....	59
Tableau 12 : Calage et validation du GR2M au bassin d'oualia.....	61
Tableau 13 : Parametres optimaux retenus par bassin pour le GR4J	63
Tableau 14 : Parametres optimaux retenus par bassin pour le GR2M.....	63

Liste des abréviations

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine.

ETP : Evapotranspiration Potentielle

GR1A : Génie Rural à 1 paramètre Annuel

GR2M : Génie Rural à 2 paramètres Mensuels

GR3J : Génie Rural à 3 paramètres journaliers

GR4J : Génie Rural à 4 paramètres journaliers

HU1 : Hydrogramme unitaire 1

HU2 : Hydrogramme unitaire 2

SIEREM : Système d'Information Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisations

SWAT : Soil And Water Assessment Tool

TOPMODEL : TOPography-based hydrological MODEL

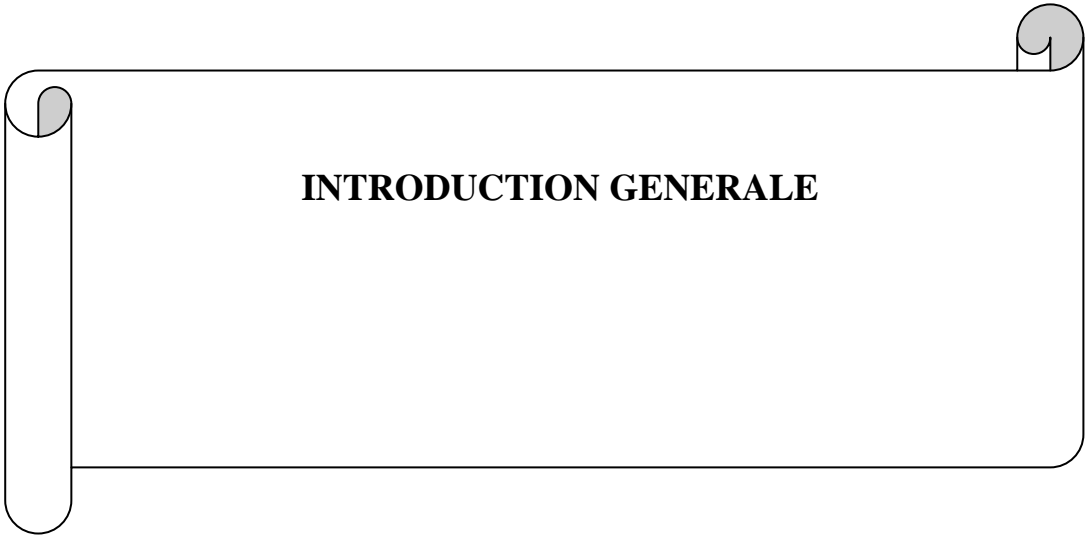
UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : MODELISATION PLUIE-DEBIT EN HYDROLOGIE	5
Introduction :	6
I.1 Le cycle hydrologique :	6
I.1.1 Mécanisme du cycle de l'eau :	6
I.1.2 Le bilan hydrique :	7
I.2 Synthèse bibliographique :	9
I.3.1 Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie-débit :	14
I.3.2 Objectif de l'étude d'évaluation de l'incertitude des débits calculés :	15
I.3.3 Mise au point d'un modèle pluie-débit :	15
I.3.4 classification et exemples de certains modèles :	16
I.3.4.2 Modèles déterministes :	18
I.3.4.3 Modèles à base physique :	18
I.3.4.4 Modèles paramétriques :	18
I.3.4.5 Modèle empiriques :	19
I.3.4.6 Modèles analytiques :	19
I.3.4.7 Modèles conceptuels :	19
I.3.4.8 Modèles globaux (ou boîtes noires) :	19
I.3.4.9 Modèles Spatialisés (distribués) :	20
I.3.4.9.1 Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés :	20
I.3.4.9.2 Modèles physiques spatialisés :	20
I.4 Utilisation des modèles :	22
I.4.1 La modélisation comme outil de recherche :	22
I.4.2 La modélisation comme outil de prévision :	22
I.4.3 La modélisation comme outil d'extrapolation :	22

CHAPITRE II : PRESENTATION DU CADRE PRYSIQUE	24
Introduction :	25
II.1 Le bassin du fleuve Sénégal en amont de Bakel :	26
II.2 Description du bassin en amont de Bafing, du Bakoye et de la Falémé :	27
II.2.1 Le réseau hydrographique :	27
II.2.1.1 Le Bafing :	27
II.2.1.1.2 Le Bakoye :	27
II.2.1.1.3 La Falémé :	27
II.3 Les stations hydrométriques :	27
CHAPITRE III : PRESENTATION DES MODELES HYDROLOGIQUES PLUIE-DEBIT GR4J ET GR2M.....	29
Introduction :	30
III. Présentation des modèles GR4J et GR2M :	30
III.1 Historique :	30
III.1.1 Le <input type="checkbox"/> pas de temps journalier	30
III.1.2 Pas de temps mensuel :	31
III.2 Description du modèle pluie débit journalier GR4J :	32
III.2.1 Description mathématique :	32
III.3 Description du modèle pluie débit mensuel GR2M :	36
III.3.1 Description mathématique :	37
III.4 Procédure expérimentale utilisée en modélisation :	39
III.4.1 Phase de calage :	39
III.4.2 Phase de contrôle :	40
III.4.3 Phase de validation :	40
III.5 Evaluation de la performance d'un modèle :	41
III.5.1 Une approche qualitative :	41
III.5.2 Une approche quantitative :	41

CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS DES SIMULATIONS.....	43
CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS DES SIMULATIONS.....	43
IV .Simulation du GR4J et GR2M aux différents sous-bassins :	46
IV 1. Sous-bassin de Gourbassi :.....	46
IV 1.1 Simulation du GR4J :.....	46
IV 1.2 Simulation du GR2M :	48
IV 2. Sous-bassin de Bafing Makana :	51
IV 2.1 Simulation avec le GR4J :.....	51
IV 2.2 Simulation avec le GR2M :.....	53
IV 3. Sous-bassin d'Oualia :.....	55
IV 3.1 Simulation avec le GR4J (Station de KITA) :.....	55
IV 3.2 Simulation avec le GR2M (Station de KITA) :	57
IV 4. Sous-bassin d'Oualia :.....	59
IV 4.1 Simulation avec le GR4J (Station de Toukoto) :.....	59
IV 4.2 Simulation avec le GR2M (Station de Toukoto) :.....	61
Conclusion :.....	64
CONCLUSION GENERALE	65
PERSPECTIVES	67
Références Bibliographiques.....	69



INTRODUCTION GENERALE

L'eau est présente sur Terre depuis sa formation, en mouvement permanent entre ses différents réservoirs. Elle est indispensable à l'éclosion de la vie et à son maintien au sein des écosystèmes aquatiques et sur les continents. Elle est nécessaire à de nombreuses activités et de réalisations humaines.

Ainsi elle s'inscrit au cœur de la civilisation humaine. D'après Mouelhi (2003) citant le « Monde diplomatique » 2002, l'eau n'est pas seulement une ressource, elle est un enjeu de civilisation et un potentiel économique considérable.

Mais son exploitation intensive liée à la consommation domestique, industrielle, agricole, au loisir etc., et la pollution croissante des réserves, les besoins grandissants d'une population mondiale en plein croissance pose problème. Ainsi un manque permanent enduré par certains pays, sa répartition géographique inégale et sa mauvaise gestion est souvent source de conflits juridiques et politiques entre les Etats. Ce manque entraîne aussi des phénomènes de désertification et d'exode de populations. Si elle est trop abondante, elle devient source d'inondations et de catastrophes naturelles. Ces problèmes liés à l'eau soulèvent de nombreuses interrogations à s'avoir :

Que va devenir cette fragile ressource ?

Quelles sont les modalités de sa préservation ?

Quels sont les risques de pénurie encourus par notre planète ?

Le manque d'eau est-il susceptible de générer de nouveaux conflits entre états ?

Les hommes sont amenés à trouver des réponses adéquates à ces différentes interrogations pour sauvegarder cette ressource naturelle qui est une grâce du maître de l'univers sur eux.

C'est dans ce contexte et pour amener leur contribution à la réponse à ces interrogations que les hydrologues ont mis sur pied des outils permettant de mieux cerner le fonctionnement des hydro systèmes naturels et les devenir de l'eau dans son environnement.

L'utilisateur de ces instruments peut bénéficier ainsi d'une meilleure connaissance de la répartition spatiale et temporelle des flux d'eau, de matières et des composés qu'elle véhicule à l'échelle du bassin. La connaissance du cours d'eau et de son débit est un instrument indispensable à la gestion des systèmes aquatiques (notamment pour la prévision des débits, la prédétermination des crues, l'aménagement et la construction des ouvrages hydrauliques, les études des changements climatiques et la prévision et les impacts des catastrophes naturelles). Les hydrologues se sont attachés, depuis plus d'un siècle, à essayer de comprendre les processus de génération des débits et le fonctionnement du bassin versant (entité hydrologique de production et de transfert des écoulements) en vue d'établir des modèles pour les simulations des relations pluie-débit.

Le Sénégal à l'instar des pays de l'Afrique de l'Ouest et centrale, a connu une variabilité climatique qui s'est traduite par une tendance à la baisse des précipitations et un déficit à partir des années 1970. Ces processus se sont accrus par la suite et le déficit pluviométrique a eu une conséquence sur les cours d'eau. Pour faire face à cette situation, les pays frontaliers du bassin du fleuve Sénégal ont construit deux barrages sur le fleuve Sénégal : le barrage de Diama dans la vallée pour stopper la montée marine et relever le plan d'eau en vue de satisfaire aux besoins d'irrigation et le barrage de Manantali sur le Bafing pour laminer la crue sur le Bafing, permettant l'irrigation, la navigation et la production d'énergie électrique.

La Falémé étant le plus important affluent rive gauche du fleuve Sénégal, sa contribution à l'écoulement de ce fleuve est très appréciable. Cet affluent n'étant pas pour le moment contrôlé ; la connaissance de ces apports et sorties est essentielle à la gestion des ressources en eau du fleuve Sénégal et devrait permettre une meilleure planification des tâches du barrage de Manantali pour faire face aux objectifs qui lui sont assignés. Ceci passe par une connaissance du fonctionnement hydrologique de son bassin versant, en particulier la détermination de la relation pluie-débit en vue de prévoir les crues sur cet affluent mais également de prédéterminer ces crues dans les études d'impact.

Dans ce mémoire nous essayerons de simuler les débits de certains sous-bassins du fleuve Sénégal notamment de la Falémé, du Bafing et du Bakoye en utilisant les modèles hydrologiques conceptuels globaux à réservoir comme le GR4J et le GR2M développés au CEMAGREF d'Anthony. C'est des mécanismes rationnels reproduisant au mieux le comportement d'un bassin versant sous l'action combinée de deux variables de forçage : les précipitations et l'évapotranspiration.

Ainsi le **premier chapitre**, sera consacré à la modélisation hydrologique : synthèse bibliographique sur la modélisation pluie-débit, les enjeux, les différents types de modèles et l'utilisation des modèles hydrologiques

Dans le **deuxième chapitre**, nous ferons une présentation du cadre physique : Bassin versant du fleuve Sénégal en amont de Bakel.

Dans le **troisième chapitre**, nous présenterons les modèles pluie-débit GR4J et GR2M.

Dans le **quatrième chapitre**, nous essayerons d'appliquer ces modèles (GR4J et GR2M) aux sous-bassins du Bafing en amont de Bafing Makana, du Bakoye en amont d'Oualia, de la Falémé en amont de Gourbassi.

Et en fin nous terminerons ce mémoire par une **conclusion générale et les perspectives** qui feront le point sur le travail effectué, les suites et orientations à donner à la modélisation pluie-débit des sous-bassins utilisés.



CHAPITRE I :
MODELISATION PLUIE-
DEBIT EN HYDROLOGIE

Introduction :

La résolution des problèmes liée à la gestion des bassins versants notamment l'aménagement des ponts et des barrages, la prévision des conséquences des inondations, nécessite une parfaite connaissance de leurs étiages et de leurs crues. Dans cette optique, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits et d'estimation des eaux à l'échelle d'un bassin versant devient nécessaire. Ainsi dans ce chapitre nous ferons une synthèse bibliographique, puis donnés les enjeux de la modélisation hydrologique et la présentation des différents types de modèles les plus utilisés et enfin l'utilisation de ces modèles. Mais avant d'entamer cette revue, il est utile de donner un bref rappel sur le cycle hydrologique qui est la base de toute modélisation hydrologique.

I.1 Le cycle hydrologique :

I.1.1 Mécanisme du cycle de l'eau :

Le cycle de l'eau (fig. I.1) est sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains.

Le mouvement de l'eau entre les différentes phases du cycle hydrologique est irrégulier dans l'espace et dans le temps pouvant produire des extrêmes d'inondations et de sécheresses.

La détermination de la variation et l'intensité de ces éventuels extrêmes sont d'une grande importance pour l'hydrologue. (Bedient ; 1988).

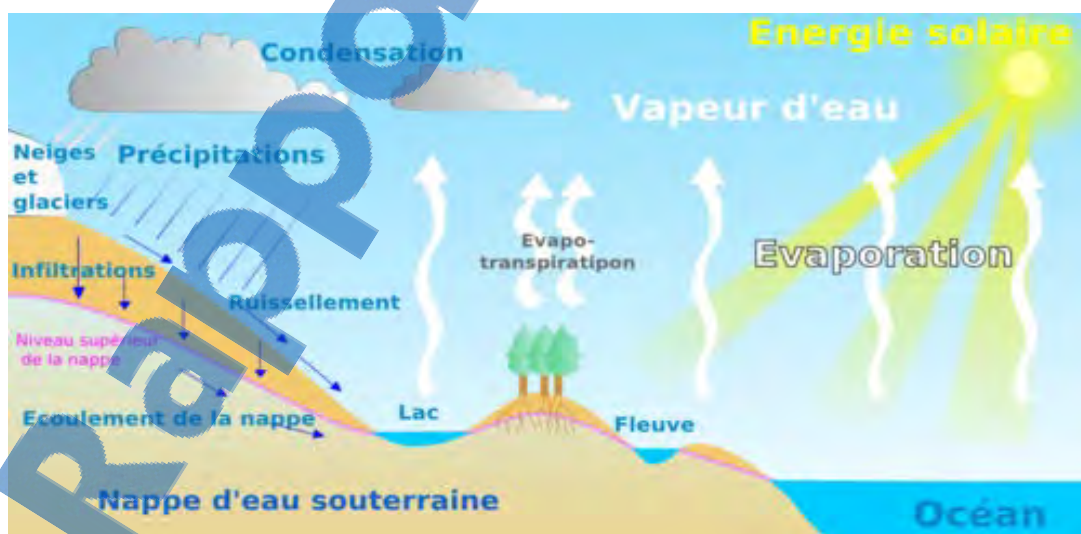


Figure 1: Représentation du cycle de l'eau (www.eau-direct.com/cycle/cycle.html)

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet un refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère.

La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes (Réserve Utilisable). Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine. Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau.

L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique.

I.1.2 Le bilan hydrique :

On peut schématiser le phénomène continu du cycle de l'eau en trois phases :

- les précipitations,
- le ruissellement de surface et l'écoulement souterrain,
- l'évaporation.

Il est intéressant de noter que dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. Il s'ensuit que l'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique peut se faire à l'aide d'une équation appelée "bilan hydrologique" qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps. Le temporel introduit la notion de l'année hydrologique. En principe, cette période d'une année est choisie en fonction des conditions climatiques. Ainsi en fonction de la situation météorologique des régions, l'année hydrologique peut débuter à des dates différentes de celle du calendrier ordinaire. Au niveau de l'espace, il est d'usage de travailler à l'échelle d'un bassin versant ; mais il est possible de raisonner à un autre niveau (zone administrative, entité régionale, etc.).

L'équation du bilan hydrique se fonde sur l'équation de continuité et peut s'exprimer comme suit, pour une période et un bassin donnés :

$$P + S = R + E + (S \pm \Delta S) \quad (1.1)$$

Avec :

P : précipitations (liquide et solide) [mm],

S : ressources (accumulation) de la période précédente (eaux souterraines, humidité du sol, neige, glace) [mm],

R : ruissellement de surface et écoulements souterrains [mm],

E : évaporation (y compris évapotranspiration) [mm],

S \pm ΔS : ressources accumulées à la fin de la période [mm].

On exprime généralement les termes du bilan hydrique en hauteur d'eau (mm par exemple), on parle alors de lame d'eau (précipitée, écoulée, évaporée, stockée, etc.). Cette équation exprime simplement que la différence entre le débit d'eau entrant et le débit d'eau sortant d'un volume donné (par exemple un bassin versant) au cours d'une période déterminée est égale à la variation du volume d'eau emmagasinée au cours de la dite période. Elle peut s'écrire encore sous la forme simplifiée suivante :

$$E = I - O \pm \Delta S \quad (1.2)$$

Avec :

E : évaporation [mm] ou [m³],

I : volume entrant [mm] ou [m³],

O : volume sortant [mm] ou [m³],

ΔS : variation de stockage [mm] ou [m³].

Si le bassin versant naturel est relativement imperméable, la variation de stock sur une période donnée peut être considérée comme nulle ($\Delta S=0$). Dès lors, on peut introduire le déficit d'écoulement D dans l'équation qui s'écrit :

$$I - O = D \quad (1.3)$$

Ce déficit d'écoulement représente essentiellement les pertes dues à l'évaporation. Il peut être estimé à l'aide de mesures ou de méthodes de calcul. A titre illustratif, les formules de Turc et Coutagne sont les suivantes :

Formule de Turc

$$D = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (1.4)$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle

T : température moyenne annuelle [°C].

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3.$$

Formule de Coutagne

$$D = P - m \cdot P^2 \quad (1.5)$$

Avec :

D : déficit d'écoulement [mm],

P : pluie annuelle [mm],

m = 1 / (0.8 + 0.16 T) : coefficient régional (m = 0.42 pour la France).

La connaissance du déficit d'écoulement permet d'évaluer le comportement du système ou la fiabilité des données sensées le décrire, par comparaison entre les valeurs du déficit calculées directement et les valeurs estimées dans un bassin versant plus grand.

I.2 Synthèse bibliographique :

Nascimento (1991) a utilisé le modèle conceptuel pluie-débit GR3J pour modéliser les processus du cycle hydrologique dans des cours d'eau intermittents. Des essais de changement du modèle ont été réalisés après la mise en évidence des « raisons des inadéquations du modèle dans la représentation de phénomènes dans quelques bassins ». Ce qui la conduit à choisir la version à 4 paramètres pour représenter ces processus.

Edijatno et al. (1999) présentent le modèle GR3J et font remarquer que malgré sa simplicité et son faible nombre de paramètres, il est aussi performant qu'un modèle plus complexe comme la version simplifiée à 5 paramètres de TOPMODEL.

Ce modèle s'est révélé être un outil important de gestion de l'eau aussi bien dans le cas des bassins de rétention que dans la détection de l'altération du cycle hydrologique due à l'action de l'homme. Cependant il ne peut toute fois pas être utilisé pour les prédictions de longues durées.

Uhlenbrook et al. (1999) ont utilisé le modèle HBV sur un bassin versant montagneux du Sud-ouest de l'Allemagne pour quantifier les incertitudes dues à l'identification d'une structure représentative et à la détermination des paramètres d'un modèle conceptuel pluie-débit. Le calage a été fait sur une période de 10 ans, avec des paramètres générés de façon aléatoire, grâce à la procédure de Monte Carlo qui a donné de bons résultats des débits stimulés comparativement aux débits observés. Les auteurs se sont rendus compte que la difficulté dans l'identification de la structure du modèle engendre des incertitudes qui sont légèrement inférieures à celles due aux paramètres du modèle.

Berthier (2005) se propose dans son travail de quantifier les incertitudes des débits calculés par un modèle conceptuel pluie-débit. Etant donné que la modélisation est une représentation imparfaite de réponse du bassin versant, il est nécessaire de connaître l'ordre de grandeur des incertitudes. Et l'auteur a utilisé les modèles TOPMO et GR4J pour la simulation des débits et la détermination des incertitudes a été faite grâce à deux méthodes :

- ✓ Méthode dérivée de la méthode de Monte Carlo basée sur une approximation linéaire des écarts-types des paramètres du modèle.
- ✓ Méthode GLUE basée sur l'échantillonnage par ordre d'importance. L'auteur l'a ensuite utilisé en faisant simplement le rapport $\frac{Q_{\text{observé}}}{Q_{\text{calculé}}}$. Alors que les méthodes

classiques de détermination des erreurs n'ont pas donné de résultats satisfaisants contrairement à celui proposé par l'auteur.

Plantier (2003) cherche à déterminer la part des caractéristiques physiques d'un bassin versant pour la comparaison des approches globale et semi-distribuée en modélisation pluie-débit. Il en arrive à la double conclusion suivante :

- ✓ Si la distribution des paramètres est associée à celle des pluies, on obtient des simulations meilleures qu'une approche globale ;

- ✓ Si par contre la distribution des paramètres est associée à une pluie globale (moyenne sur l'ensemble du bassin versant), les résultats d'une telle simulation sont moins bons que ceux obtenus à partir d'une approche globale.

Oddos (2002) cherche à déterminer l'intérêt de l'approche semi-distribuée par rapport à l'approche globale en modélisation pluie-débit. L'auteur a utilisé quatre modèles de structures différents que sont : HBV (9 paramètres), TOPMODEL (7 paramètres), GR4J (4 paramètres) et IHACES (7 paramètres).

L'auteur a déterminé un certain nombre de paramètres qui permettent d'obtenir de meilleures résultats dans une approche semi-distribuée. Il conclut que trois paramètres jouent un rôle important sur la performance du modèle. Ces trois paramètres sont tous liés à l'évènement pluvieux. Ceux sont : Le coefficient de corrélation n°1, le coefficient de corrélation n°2 et l'indice de similarité des pluies.

Giustolisi et Laucelli (2005) précise que pour construire un modèle, il est important de bien comprendre les caractéristiques structurales du modèle à partir du quel il est conçu. Ils ont utilisés le réseau des Neurones Artificiels pour pouvoir y apporter des améliorations. Ils se sont rendu compte que les performances du modèle sont influencées par le type de bruit et propriétés mathématiques de celui-ci. Par ailleurs, ils constatent également que le grand nombre de paramètres et la présence de bruits non gaussiens gênent la généralisation du modèle.

Ollivier (2004) a utilisé deux modèles pluie-débits (GR4J et TOPMODEL) sur le bassin de la Seine dans le but de faire de la prévision et de ramener le délai de celle-ci à trois jours. En effet, en 1910 ce cours d'eau a connu une crue centennale dont les dégâts étaient très importants. La survenue d'une telle crue de nos jours entraînerait des dégâts qui sont estimés à environ 12 milliards d'euro. Dans sa phase de prévision, le but recherché par l'auteur était de trouver une méthode appropriée de mise à jour. Des erreurs relatives importantes ont été remarquées en ce qui concerne les faibles débits. Cela est certainement dû aux digues et barrage de navigation, ouvrages qui posent des problèmes dans la mesure des débits dans un bassin versant.

Trouillet (2006) a utilisé le modèle hydrologique GR4J pour simuler le comportement hydrologique du bassin du H aouz. Ce bassin a préalablement fait et la thèse d'Anne Chaponnière et le mémoire d'Alexandre Duclaux s'inscrivent dans ce cadre. Ces derniers ont utilisé le SWAT, qui est un modèle déterministe semi-distribué à base physique et se sont

confrontés à des difficultés liées à la complexité du modèle. En effet ce modèle comporte un grand nombre de paramètres physiques dont le manque de matériel a rendu difficile les mesures. Ce modèle aboutit ainsi à la surparamétrisation due au grand nombre de ces paramètres et par conséquent à l'équilibre c'est-à-dire à l'obtention de plusieurs paramètres optimaux (Miossec, 2004), bien que quelques-uns seulement de ces paramètres ont une influence réelle sur les résultats. Ainsi, Trouillet s'est proposé d'utiliser un modèle simple, le GR4J, pour caractériser le comportement de ce bassin et de faire une comparaison avec les résultats obtenus à partir du modèle de SWAT.

Paysan (2007) a cherché à étudier l'influence de la prise en compte d'ouvrages (barrages,...) sur la structure du modèle global GR4J. Le résultat optimal auquel est parvenu l'auteur n'a pas nécessité un ajout de paramètres qui serait à l'origine de la complexification du modèle. L'auteur n'a pas pu mettre en évidence le lien entre la méthode de prise en compte des barrages-réservoirs et certaines caractéristiques physiques du bassin versant, mais ce rapport a été difficile à trouver et il a proposé une solution générique. La procédure utilisée lui a permis de se rendre compte de la « sensibilité à la disponibilité des données de stockages ainsi qu'aux transferts interbassins inconnus ». Le résultat a été au-delà de son attente car plusieurs auteurs disaient que les modèles globaux étaient inadéquats pour l'évaluation des impacts d'aménagements (Sharma et Luxmoore, 1979 ; Freeze, 1980 ; Abbott et al, 1986 ; Amboise, 1998 ; Sivapalan et al. 2002).

Perrin (2000) dans son approche comparative, arrive à la conclusion que même le plus simple des modèles à réservoir donne des résultats nettement supérieurs à ceux obtenus avec un modèle à boîte noire « ne comprenant pas de schéma interne de suivi d'humidité du bassin ». Au cours l'amélioration de la structure du modèle à trois paramètres journaliers (GR3J), l'auteur a abouti à un modèle à quatre paramètres journaliers (GR4J) qui a été jugé plus performant.

Oudin (2004) a utilisé quatre modèles plus-débits (GR4J et les versions globales des modèles HBV, IHACRES et TOPMODEL) en vue d'améliorer la prise en compte de l'évapotranspiration potentielle. L'auteur s'est rendu compte de la faible sensibilité des modèles concernant la formule utilisée pour la détermination de l'EPT. Finalement l'auteur a suggéré l'utilisation d'une entrée simple d'ETP plutôt que d'utiliser des formules qui dans la plupart sont très demandeuses de données. Ce résultat est très important surtout en contexte opérationnel car on ne cherche dans ce cas des données d'entrée datées qui sont le plus souvent difficiles à trouver. Dans ce même contexte, souvent une seule station située à

proximité au moins suffit. Ces modèles anéantissent la différence entre ETP datées et ETP interannuelles par les réservoirs de production du modèle pluie-débit. De tels modèles se comportent ainsi comme des « filtres passe-bas » qui atténuent les entrées des données climatiques.

I.3 Les enjeux de la modélisation hydrologique

Un des plus grands problèmes dans de nombreuses applications hydrologiques est la détermination de l'écoulement d'un cours d'eau à partir de données physiques comme : la pluie, la température, le vent et des caractéristiques du bassin. Cet écoulement est non seulement requis pour la prévision des crues, mais aussi pour la prédiction d'un effet d'un changement d'un bassin, et en général pour l'aménagement des ressources en eau (RAUDKIVI, 1979).

La détermination des débits par transformation des pluies peut être définie à l'aide d'une modélisation mathématique.

Il est essentiel de noter qu'un modèle hydrologique n'a pas pour but de serrer au plus près la réalité physique des phénomènes qui se déroulent dans un bassin versant, mais de constituer un outil pour résoudre des problèmes pratiques sur les ressources en eau. Il s'agit d'une représentation volontairement simplifiée, pour être commode d'emploi, d'un phénomène ou d'un ensemble de phénomènes (JACQUET, 1971).

Ceci étant, un modèle doit satisfaire du mieux possible certains critères de qualité, entre autres :

- ✓ **Précision** : qualité fondamentale d'un modèle
- ✓ **robustesse** : capacité à garder une précision acceptable même dans des conditions extrêmes
- ✓ **universalité** : possibilité d'utiliser le modèle pour des bassins très différents
- ✓ **richesse** : intégration d'un grand nombre de caractéristique permettant une grande différenciation des comportements d'un bassin à l'autre.
- ✓ **Adaptabilité** : possibilité de corriger le modèle pour tenir compte de nouvelles données sur le bassin modélisé
- ✓ **Mesurabilité** : possibilité de mesurer des paramètres, permettant d'utiliser le modèle sans calage (cas extrême)
- ✓ **Intelligibilité** : capacité d'être compris et analysé pour permettre notamment d'élucider les cas de défaillance du modèle
- ✓ **simplicité** : facilité d'utilisation
- ✓ etc.

(LINSLEY, 1982 ; WOOLHISER et BRAKENSIEK, 1982 ; EDF –CEMAGFEF, 1983 ; MICHEL, 1989).

I.3.1 Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie-débit :

Tout modélisateur sait que son modèle n'est pas trop exact, donnant parfois même des résultats plus ou moins éloignés d'une réalité. Pour utiliser son modèle et ainsi prendre des décisions, l'utilisateur doit connaître l'ordre de grandeur des inexactitudes de son modèle et ainsi de pouvoir quantifier et annoncer ces incertitudes.

Les origines des erreurs peuvent être diverses et (Perrin, 2002) propose ce tableau :

Tableau 1 : Classification des erreurs en modélisation hydrologique selon leur nature

Type d'erreur	Nature d'erreur
Incertitudes des données d'entrée	Erreurs au moment de la collecte des données et de leurs traitements, mauvaise représentation de la variabilité spatio-temporelle.
Incertitudes du modèle	Le modèle reste une représentation grossière d'un système naturel complexe
Incertitudes des paramètres du modèle	Dépend du choix de la fonction objectif, des performances d'optimisation, des échantillons des données du calage

Les sources d'erreurs génèrent des incertitudes à chaque étape du processus de modélisation, et sont propagées tout le long de la procédure (du calage à l'application).

Malgré le potentiel important des modèles, ces outils restent encore assez faiblement utilisés pour la gestion opérationnelle de l'eau. Parmi les multiples obstacles ;

Le principal problème est probablement le peu de communication entre les modélisateurs et les gestionnaires. Les gestionnaires, peu familiarisés avec les méthodes de modélisation et les techniques informatiques, sont peu disposés à mettre en œuvre des procédures qui leur semblent mystérieuses et secrètes.

Un deuxième obstacle qui peut limiter l'utilisation des modèles pour la gestion de l'eau, est probablement le manque de données suffisantes pour le calage du modèle.

Enfin l'absence de possibilités d'apprécier quantitativement l'incertitude des prévisions est un troisième obstacle, (Petruscu Maftai, 2002).

I.3.2 Objectif de l'étude d'évaluation de l'incertitude des débits calculés :

Tout scientifique sait que des résultats ne sont pleinement exploitables que s'ils sont associés à une barre d'erreur, symbolisée par le signe qui suit les résultats « \pm ». On appelle cela un intervalle de confiance. Cette notion d'intervalle de confiance a un rôle essentiel dans la communication des résultats scientifiques. Pour certains, cette valeur qui borne le résultat a au tant d'importance, voire plus, que le résultat lui-même. Chaque prédiction devrait être associée à une incertitude (Beven, 1996).

Les résultats sont et resteront toujours nécessairement empreints d'une marge d'incertitude, tout particulièrement en ce qui concerne l'estimation des risques à venir. La description de l'état des connaissances devrait donc inclure celle des incertitudes. Il s'agit là d'un domaine où les possibilités de malentendu entre les rédacteurs et les lecteurs sont particulièrement importantes (Petit, 2005).

Enfin, il faut reconnaître qu'avec les techniques de mesure actuellement disponibles à l'hydrologiste, il y a peu d'espoir d'obtenir des descriptions de données d'entrée très précises.

I.3.3 Mise au point d'un modèle pluie-débit :

La détermination d'un modèle pluie-débit comporte deux étapes (figure I.2) :

- ✓ Un bilan vertical, ou fonction de production, dans lequel on détermine la lame ruisselée (pluie nette) à partir des précipitations brutes après avoir enlevé les différentes pertes.
- ✓ Un bilan horizontal, ou fonction de transfert, qui décrit la distribution dans le temps du volume d'eau obtenu précédemment.

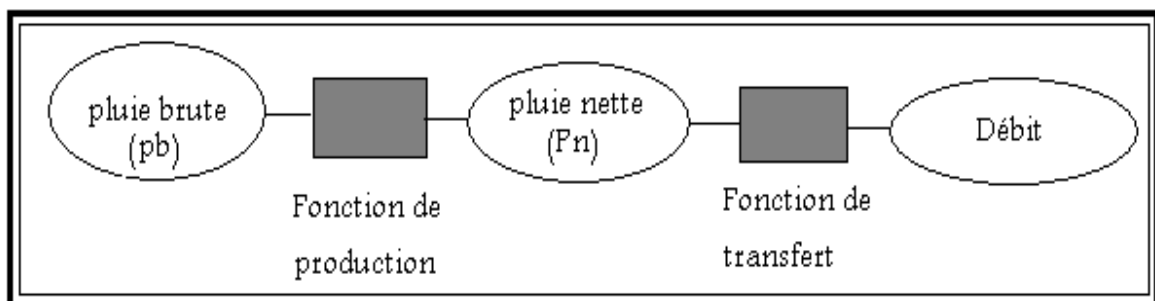


Figure 2 : Schéma global de la relation Pluie-Débit GADIAGA (1997)

I.3.3.1 Fonction de production :

La détermination de cette fonction va nécessiter l'évaluation et la prise en compte des différents termes du bilan hydrologique, sur tout ou une partie du bassin versant, à savoir :

$$P = Pn + Pertes \quad (1.6)$$

Du point de vue de l'hydrologie de surface, les différentes pertes sont :

- ✓ L'interception par la végétation, et le stockage dans les dépressions naturelles,
- ✓ L'alimentation de la nappe par infiltration profonde. On utilise en pratique l'infiltration maximale (à saturation).
- ✓ L'évapotranspiration et l'évapotranspiration journalière du sol, que l'on peut par approximation prendre égale à celle donnée par la formule de PENMANN.

I.3.3.2 Fonction de transfert :

La fonction de transfert permet de déterminer la réponse du bassin versant à une pluie efficace. Elle représente l'étalement dans le temps des débits issus d'une pluie efficace donnée (ROCHE, 1965). La fonction de transfert la plus classique est l'hydrogramme unitaire, qui représente la réponse du bassin à une pluie unitaire (VEN TE CHOW et al, 1998).

I.3.4 classification et exemples de certains modèles :

Il existe déjà, dans la littérature hydrologique, de nombreux modèles pour déterminer la réponse d'un bassin versant à la précipitation. Beaucoup de qualificatifs sont disponibles pour les caractériser : déterministe, physique, stochastique, statistique, probabiliste, conceptuel, empirique, linéaire, non linéaire, global, distribué, continu, événementiel,

Parmi les modèles existants, on peut citer les noms de modèles les plus connus : le modèle à réservoirs en cascades de NASH, le modèle STANFORD, O'DONNELL, SSARR, USDAHL, MONASH, GIRARD, BILIK, CREC, GR, Chacun à son interprétation des cheminements de l'eau et de leur représentation plus ou moins compliquée. Ils demandent en général une certaine expérience de la part de l'utilisateur pour les comprendre et les appliquer.

Pour ironiser, Perrin (2002) disait qu'il y a presque autant de classifications que d'hydrologues. Le tableau I.2 propose de classer les différents types de modèles selon leurs

caractéristiques (Clarke, 1973 ; Ambroise, 1998 ; Andréassian, 2002 ; Perrin, 2002 ; Oudin, 2004).

Tableau 2 : Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit

Caractéristique	Types de modèle
Selon la nature de la variable	Modèle déterministe (variables non aléatoires) Modèle stochastique (variables aléatoires)
Traitement de l'espace (Homogénéité du bassin)	Modèle global Modèle semi-distribué (ou semi-global) Modèle spatialisé
Fondement théorique et approche de développement	Modèle empirique Modèle conceptuel Modèle à base physique

Ainsi Gaume en 2000 propose un schéma donnant les différentes relations entre les modèles pluie-débit.

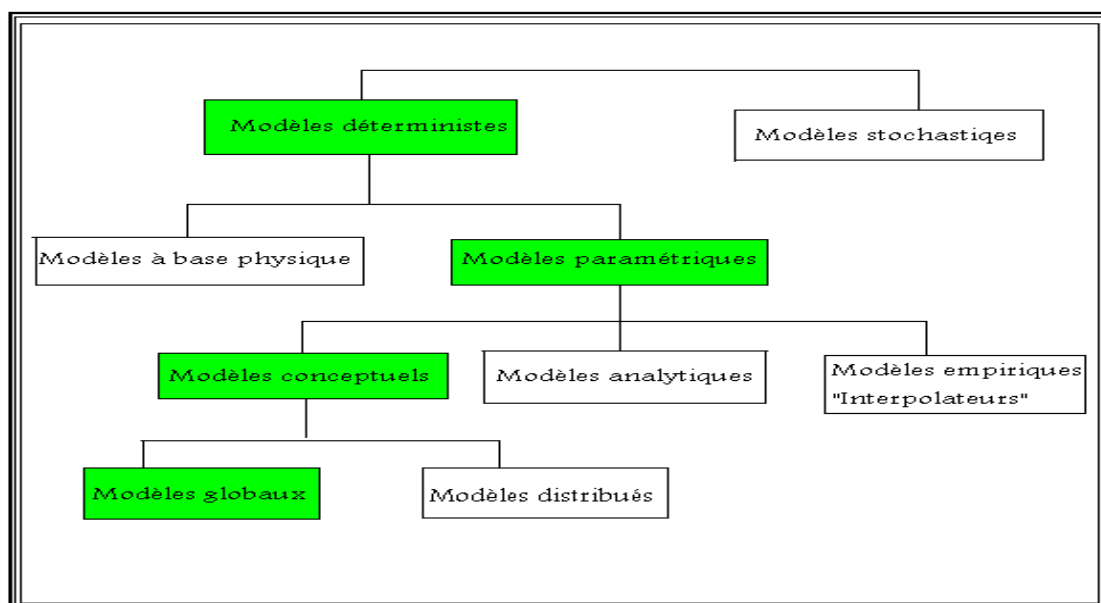


Figure 3 : Relation entre les modèles pluie-débit (Gaume, 2000)

I.3.4.1 Modèles stochastiques :

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée dans l'hydrologie. Ainsi Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions. Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premiers moments (VAUCLIN 1991).

I.3.4.2 Modèles déterministes :

Un modèle est dit déterministe si aucune de ces grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variables indépendantes d'entrées du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variable permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple : le niveau de remplissage des différents « réservoirs » d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeurs des sols...) et de paramètres, une valeur de réalisation unique des variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits stimulés à l'exutoire d'un bassin versant) (MAFTAI 2002).

I.3.4.3 Modèles à base physique :

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens strict en hydrologie. Certains modèles comme le SHE tendent à s'en rapprocher.

L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voir impossible l'utilisation de tels modèles. La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatives de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage et deviennent, de fait, des paramètres et non des données. (Maison, 2000).

I.3.4.4 Modèles paramétriques :

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

I.3.4.5 Modèle empiriques :

Le type de fonction reliant les variables est fixé à priori (fonctions polynômes, fonctions sigmoïdes). Le niveau de complexité (nombre de fonctions à utiliser, ordre du polynôme) étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajoutant le mieux aux données mesurées. (GAUME 2000).

I.3.4.6 Modèles analytiques :

Ce sont des modèles pour lesquels, la relation entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est celui des modèles linéaires : Les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélations entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relation non linéaires entre les variables. (GAUME 2000).

I.3.4.7 Modèles conceptuels :

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoir interconnectés. Il serait plus judicieux de regrouper ces modèles sous la dénomination (Modèle conceptuel à réservoir). Plus précisément, quand la structure du système et les lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système est simplifié. Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de d'écrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. A travers de ce type de modélisation, sont construites des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié (débit, concentration...) à partir des variables d'entrée (pluie, fertilisation...). Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement. Le modèle CEQUEAU (Morin) est un parfait exemple de modèle conceptuel.

I.3.4.8 Modèles globaux (ou boîtes noires) :

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, facile à utiliser et à calibrer.

La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue. Un exemple de ce type de modèle est le modèle IHRACRES (Litellwood 2002).

I.3.4.9 Modèles Spatialisés (distribués) :

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondent à des différentes écoles hydrologiques sont en phase avancés de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties, où les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des morphologies naturelles (découpage en sous bassin) ou hydrologiques (aires contributives).

Nous pouvons classer les modèles spatialisés en trois grands types :

- ✓ Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés ;
- ✓ Modèles physiques spatialisés ;
- ✓ Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés ;

I.3.4.9.1 Modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés :

Les modèles conceptuels spatialisés ou semi-spatialisés représentent un grand progrès sur les modèles globaux quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne du bassin. Le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles ou sous-bassins) considérés comme homogènes, qui se vident les un dans les autres de l'amont en aval. Ainsi, on a la possibilité de tenir compte de la répartition spatiale des facteurs et de suivre la genèse et propagation des débits à l'intérieur du bassin ; c'est le cas du modèle CEQUEAU (Morin) et du modèle HEC-HMS.

I.3.4.9.2 Modèles physiques spatialisés :

Les modèles à base physique spatialisés sont des modèles qui décrivent les mécanismes internes d'un bassin versant ayant comme base les lois de la mécanique, de la physique, de la thermodynamique, etc. Du point de vue théorique, ces modèles sont indépendants de tout calage par ce que leurs paramètres sont mesurables. Ils permettent une description théorique unifiée de la plus part des flux observés dans un bassin versant et servant à modéliser les principaux processus hydrologiques comme :

- ✓ L'écoulement de surface à partir des équations de Saint-Venant ;
- ✓ L'écoulement en milieu saturé avec à partir des équations de Darcy ;
- ✓ L'écoulement en milieu non saturé à partir des équations de Richards ;
- ✓ L'évapotranspiration à partir des équations de conservation ou de relation entre flux.

Ces modèles sont complexes à mettre en œuvre et exigent d'importantes qualités de données. Elles ne peuvent traiter les grands bassins en raison de leur grande homogénéité morphologique et météorologique. Parmi ces modèles on peut citer le modèle SHE.

I.3.4.9.3 Modèles physiques conceptuels semi-spatialisés :

Pour dépasser les limites de chacune des approches précédentes (modèles conceptuels peu réalistes, modèles à base physiques trop complexes), il est intéressant d'essayer une modélisation hydrologique qui peut être :

- ✓ A base physique, fondés sur des processus réels mais simplifiés ;
- ✓ Semi-spatialisée, fondé sur une discrétisation en unités relativement homogènes, qui permettent de tenir compte de la variabilité spatiale de la structure du bassin versant.

La méthode de discrétisation varie d'un modèle à l'autre : mailles carrés, sous bassins versants, éléments de versant, plan versant et canal, unités hydrologiques ou aires contributives (modèle TOPMODEL).

I.4 Utilisation des modèles :

Au cours de ces dernières années, les efforts de la recherche pour la compréhension du cycle hydrologique dans les milieux naturels, associés aux développements de l'informatique, se sont concrétisés par l'apparition d'une multitude de modèles mathématiques. On peut distinguer trois types d'utilisation de modèles mathématiques en hydrologie (GAUME 2000).

I.4.1 La modélisation comme outil de recherche :

La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.

I.4.2 La modélisation comme outil de prévision :

Elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. Il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables indépendantes (pluie, débits amont) et les variables dépendantes (débits aval), et font appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

I.4.3 La modélisation comme outil d'extrapolation :

Elle permet la reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certains cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables dans le cadre d'un plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies, éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique de pluie-couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares. La modélisation des phénomènes et comportement hydrologiques des bassins versants est incontournable dès lors qu'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau et aux différents risques hydrologiques. Cette modélisation est sensée d'écrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Elle est sensée fournir aussi des informations sur le dimensionnement des ouvrages hydrologiques. Les recherches sur la modélisation pluie – débit continuent encore, et ont tendance à approfondir la description physique des processus réels tels qu'ils se produisent

sur le terrain. Il est l'objet dans ce mémoire de DEA de travailler sur le GR4J et le GR2M que nous allons développer dans le chapitre suivant.



CHAPITRE II : PRESENTATION DU CADRE PRYSIQUE

Introduction :

Le bassin versant du fleuve Sénégal comprend deux parties distinctes :

✓ Le bassin supérieur

Le cours supérieur avec les trois branches-mères de la Falémé, du Bafing et du Bakoye draine le massif du Fouta Djallon et le haut plateau mandingue. Ce bassin amont à l'exutoire de Bakel couvre une superficie de 220 000 km². Il se partage entre les quatre républiques de Guinée, du Mali, de la Mauritanie et du Sénégal (figure 11).

✓ Le bassin inférieur

La vallée alluviale que le fleuve aborde à la hauteur de Bakel : le fleuve Sénégal est formé par la réunion du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé, à 255 km en amont de Bakel. Elle s'étend depuis Bakel jusqu'à l'embouchure sur une longueur de 800 km.

Le régime du fleuve Sénégal est caractérisé par une saison pluvieuse de Juillet à Octobre, qui culmine fin Août début Septembre, et se termine en Octobre et une période de basses eaux, pendant laquelle le niveau du fleuve décroît régulièrement

Le fleuve est très irrégulier : des crues exceptionnelles très dévastatrices (1870, 1906, 1950 et plus récemment, 1999, 2005) ont été observées, à côté des étiages très sévères (1970, 1982). Sa régularisation par le biais d'aménagements hydrauliques. (Rapport Soussou SAMBOU, 2009)



Figure 4: Réseau hydrographique du fleuve Sénégal en amont de Bakel (Source SIEREM)

II.1 Le bassin du fleuve Sénégal en amont de Bakel :

Le bassin du fleuve Sénégal amont de Bakel (Figure II. 2) ou bassin du Sénégal supérieur s'étend de la latitude 10°21 à la latitude 17°N environ et est compris entre les méridiens 7°W et 12°20'W. Sa forme est sensiblement ovoïde, et il est réparti entre la Guinée, le Mali, la Mauritanie et la Guinée. Il s'étend sur une superficie d'environ 218000km² sur les 300000km² environ que compte le bassin total (Kane A., 1985).

Le Fleuve Sénégal en amont de Bakel est constitué par la jonction du Bafing et du Bakoye près de Bafoulabé. Long de 760 km ; le Bafing a un bassin versant de 38400km² et fournit la majeure partie des écoulements du fleuve Sénégal (40% à 60%) des apports. Le Bafing prend sa source en Guinée, dans le massif du Fouta Djallon, à 800 m d'altitude. Le Bafing est considéré comme étant la branche mère du fleuve Sénégal. Le Bakoye (640m) prend naissance en territoire guinéen, au Nord Ouest de Siguiri, près de la limite méridionale du plateau Mandingue, à 760 m d'altitude. Il reçoit le Baoulé en rive droite, avant de se jeter dans le Bafing. A partir de la confluence à Bafoulabé, le fleuve prend la dénomination « Fleuve Sénégal ». Il reçoit alors la Falémé (bassin versant de 29000km²), son plus important affluent rive gauche, qui prend sa source à 800 m d'altitude dans la région du Fouta Djallon en Guinée. Deux autres affluents intermittents en rive droite complètent le réseau hydrographique du Haut Bassin : il s'agit du Karakoro, de la Kolombiné et du Gorgol.

La station de Bakel contrôle la quasi-totalité des écoulements de la basse vallée.

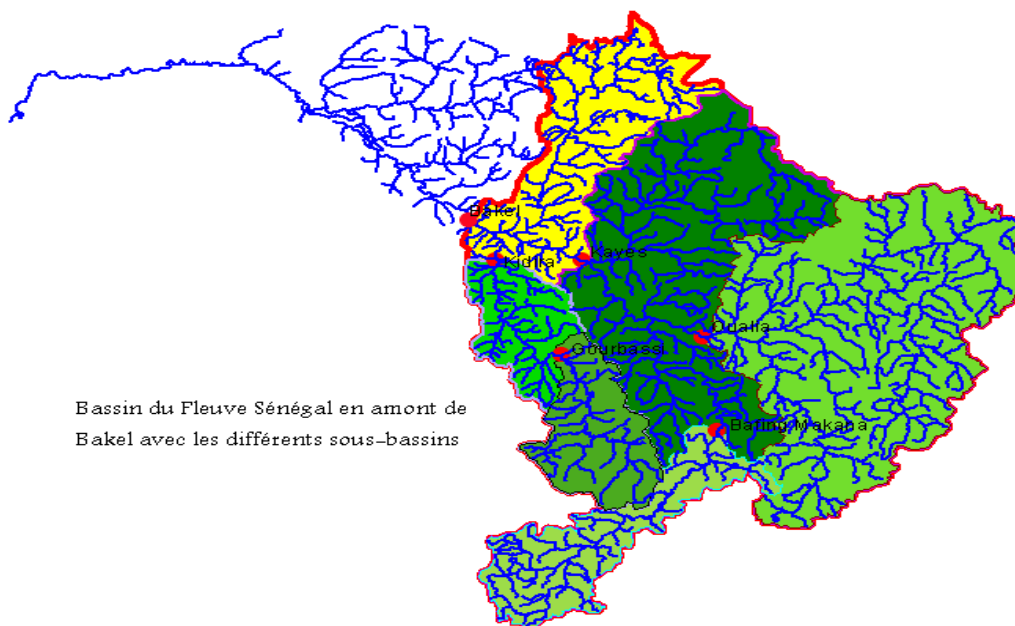


Figure 5: Le bassin du fleuve Sénégal en amont de Bakel (Source SIRIEM)

Dans ce chapitre, nous nous limiterons à une présentation des caractéristiques générales du haut bassin du Sénégal déjà écrites en partie par C. ROCHETTE (1974) dans la monographie : le bassin du fleuve Sénégal.

II.2 Description du bassin en amont de Bafing, du Bakoye et de la Falémé :

Le bassin du fleuve Sénégal en amont de Bakel, ou bassin du Sénégal supérieur, s'étend de la latitude 10°21N à la latitude 17°N environ, et est compris entre le méridien 7°W et 12°20W. Il se partage entre les trois républiques de la Guinée, du Mali et du Sénégal.

II.2.1 Le réseau hydrographique :

Le fleuve Sénégal en amont de Bakel est formé par la jonction du Bafing et du Bakoye à Bafoulabé. Le réseau hydrographique comprend de l'amont vers l'aval.

II.2.1.1 Le Bafing :

Bien que son bassin-versant total ne soit que de 38400 km² (18% du haut bassin), le Bafing peut être considéré comme la branche mère du fleuve Sénégal. Il prend sa source à quelques 800 m d'altitude dans le Fouta Djallon en Guinée.

II.2.1.1.2 Le Bakoye :

Avec un bassin de 85000 km², le Bakoye prend sa source à environ 760 m d'altitude au nord-ouest de Siguiri en Guinée. Le Bakoye décrit de multiples méandres et reçoit le Baoulé côté rive droite avant de se jeter dans le Bafing un peu en amont de Bafoulabé.

II.2.1.1.3 La Falémé :

Affluent du Sénégal, la Falémé a, dans l'ensemble, une orientation de son cours sensiblement parallèle à celui du Bafing. Elle prend sa source à 800 m d'altitude. La Falémé, plus que les autres fleuves, avec un bassin de 29000 km².

II.3 Les stations hydrométriques :

On peut décomposer le bassin du Sénégal en amont de Bakel en plusieurs sous-bassins. Chaque sous-bassin est tel qu'il est possible d'y effectuer un bilan complet des entrées et sorties.

Dans ce qui va suivre, nous nous limiterons à la présentation, pour chacun des sous-bassins avec lesquels nous allons travailler, les diverses stations ayant bénéficié d'une longue série de mesures et permettant d'évaluer les apports en eau des différents sous-bassins.

- ✓ Le Bafing, à Dibia, avec une superficie de 33000 km². Les stations considérées sont celles de Dakka-Saïdou, Bafing-Makana, Soukoutali et Dibia, toutes situées sur le Bafing.
- ✓ Le Bacoye, à Oualia, couvrant une superficie de 84000 k m². Une station considérée, celle d'Oualia, contrôle les apports du Bacoye et ses affluents.
- ✓ La Falémé, à Kidira, couvrant une superficie de 28900 km². Une station est considérée, celle de Kidira.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des données pluviométriques et hydrométriques des sous-bassins étudiés.

Données pluviométriques				
Stations	Codes	Longitudes	Latitudes	Altitudes
Bafing	1270001600	-10,25	-10,25	239
Makana				
Gourbassi	1270015700	-11,633	13,4	79
Kidira	1380013000	-12,2167	14,4667	35
Oualia	1270036780	-10,3833	13,6	130
Données hydrométriques				
Stations	Codes	Longitudes	Latitudes	Altitudes
Bafing	1272601215	-10,2667	12,55	
Makana				
Gourbassi	1272601606	-11,6333	13,7	
Kidira	1382601609	-12,205007	14,454661	19
Oualia	1272601412	-10,3833	13,6	108

**CHAPITRE III : PRESENTATION DES MODELES HYDROLOGIQUES PLUIE-
DEBIT GR4J ET GR2M**

Introduction :

Dans cette partie nous essayerons de faire une présentation des modèles de simulation du Génie Rural fonctionnant aux pas de temps annuel et journalier. En effet pour répondre aux questions liées à la simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant, à la gestion d'ouvrages et à la prévision des crues ou des étiages, le Cemagref a commencé à développer au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR). Ces modèles permettent de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel, 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ils ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

III. Présentation des modèles GR4J et GR2M :

III.1 Historique :

III.1.1 Le pas de temps journalier :

Au début des années 80, Claude Michel (1983) a engagé au Cemagref une réflexion sur la modélisation pluie-débit à partir du modèle CREC, un modèle à neuf paramètres développé au Laboratoire d'Hydrologie de l'Université de Montpellier (Cormary et Guilbot, 1973). Partant de cette structure, des simplifications ont été faites, dans le but d'obtenir un modèle à peu de paramètres, sans amoindrir les performances du modèle initial en termes de simulation des débits. Une structure simple à deux réservoirs a ainsi été proposée, avec un seul paramètre correspondant à une capacité maximale identique de ces deux réservoirs dans le cas du bassin versant de l'Orgeval (Michel, 1983). De façon plus générale, ce premier modèle était un modèle à deux paramètres, GR2, avec un paramètre pour chaque capacité de réservoir.

Utilisé par Loumagne (1988) et Devred (1989), ce modèle a ensuite été repris par Edijatno (1987, 1991) qui a, par une démarche résolument empirique, amélioré sa structure en modifiant notamment la fonction de production et en ajoutant un troisième paramètre, constante de temps d'un hydrogramme unitaire. Le nouveau modèle journalier GR3 (Edijatno et Michel, 1989) fut testé sur un échantillon de 110 bassins versants français et donna des résultats satisfaisants en comparaison avec quelques modèles plus complexes. Des relations sommaires entre descripteurs climatiques du bassin et valeurs des paramètres du modèle ont aussi pu être établies.

Dans une perspective de constante amélioration de cette structure, Nascimento (1991, 1995) a isolé des bassins intermittents pour lesquels le modèle avait du mal à fournir des résultats corrects, et a introduit dans le modèle un quatrième paramètre gouvernant des échanges ‘souterrains’ pour répondre aux exigences de bonne reproduction des débits. Le nouveau modèle GR4 a fourni sur un échantillon de 120 bassins de meilleures performances que la version antérieure à trois paramètres. Parallèlement aux travaux de Nascimento (1995), Makhoulf (1994) a mené des recherches sur l’explication des paramètres du modèle GR4J sur des bassins de Moselle et de Bretagne et a également donné quelques voies pour le traitement de la neige sur les bassins de la Moselle.

Plus récemment, Edijatno *et al.* (1999) ont proposé une nouvelle version à trois paramètres du modèle journalier. Cette version, dans laquelle la capacité du réservoir de production est fixe, est très similaire à la version proposée par Nascimento (1995) avec des fonctions de production et d’échange légèrement modifiées. Enfin, Perrin (2000) et Perrin *et al.* (2003) ont proposé une version améliorée de ce modèle journalier, comportant quatre paramètres et permettant notamment d’améliorer la simulation des étiages avec l’introduction d’une percolation issue du réservoir de production du modèle.

III.1.2 Pas de temps mensuel :

Des premiers essais de modélisation à pas de temps mensuel avec un modèle pluie-débit simple avaient été effectués par Rifaat (1980) sur le bassin de l’Orgeval. Par la suite, Kabouya (1990) a mis au point un modèle mensuel GR3M, à trois paramètres, pour l’appliquer à des problèmes d’évaluation de la ressource en eau en Algérie septentrionale (Kabouya et Michel, 1991). Makhoulf (1994) a également travaillé sur un modèle mensuel en proposant une version à deux paramètres, le modèle GR2M (Makhoulf et Michel, 1994), qui a par la suite été améliorée par Mouelhi (2003)

Par la suite, Mouelhi (2003) a repris la chaîne de modélisation à pas de temps mensuel, annuel et pluriannuel, en essayant d’identifier l’adaptation des structures des modèles au pas de temps de fonctionnement, et en recherchant les cohérences de structures entre ces différents pas de temps. Il a ainsi pu proposer un modèle mensuel (GR2M) à deux paramètres, un modèle annuel (GR1A) à un paramètre et un modèle interannuel sans paramètres à caler. Des descriptions détaillées du modèle mensuel (GR2M) sont fournies par Mouelhi *et al.* (2006a, 2006b).

III.2 Description du modèle pluie débit journalier GR4J :

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) est un modèle pluie débit global à quatre paramètres. Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Edijatno et Michel (1989), Edijatno (1991), Nascimento (1995), Edijatno *et al.* (1999), Perrin (2000), Perrin (2002) et Perrin *et al.* (2003) qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle.

C'est la version de Perrin *et al.* (2003) qui est présentée ici. Bien que GR4J soit un modèle empirique, sa structure l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui permet de tenir compte des conditions antérieures et d'en assurer un fonctionnement en continu. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage, des hydrogrammes unitaires ainsi qu'une fonction d'ouverture sur l'extérieur non atmosphérique permettant de simuler le gros du comportement hydrologique du bassin.

Le modèle GR4J a certaines fonctions communes avec le modèle GR2M (par exemple la fonction de production liée au réservoir sol). Son module de routage est cependant plus sophistiqué qu'au pas de temps mensuel.

III.2.1 Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la Figure II.1. P_k est la pluie journalière du jour k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

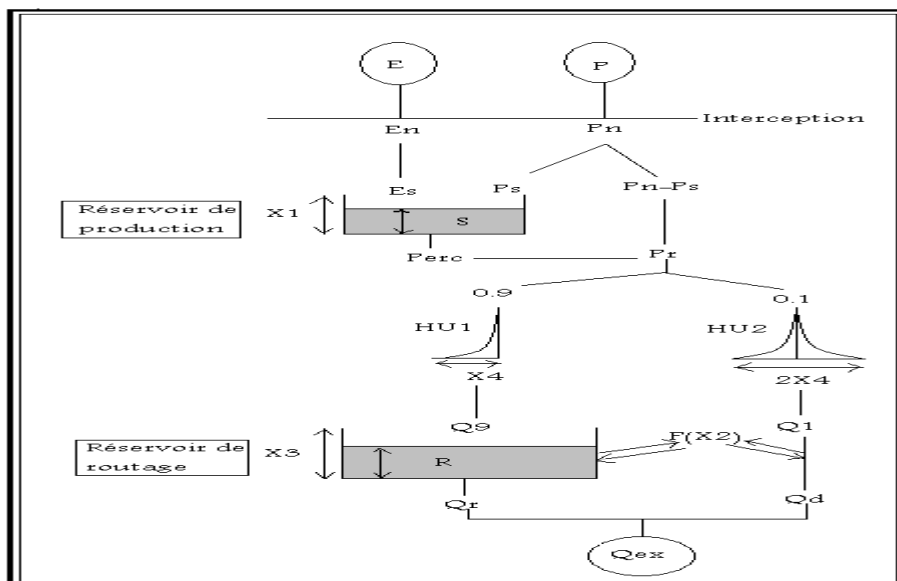


Figure 6 : Structure et mode de fonctionnement du modèle GR4J (CEMAGREF)

Le modèle a quatre paramètres optimisables que sont :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm)

X3 : capacité à un jour du réservoir de routage (mm)

X4 : temps de base de l'hydrogramme unitaire *HU1* (j)

On désigne par **P (mm)** la hauteur de la pluie et par **E (mm)** l'évapotranspiration potentielle (ETP).

P est une estimation de la pluie de bassin et **E** peut être issue d'une courbe d'ETP moyenne interannuelle. Les équations suivantes correspondent aux équations intégrées sur un pas de temps.

La première opération est la **neutralisation** de **P** par **E** pour déterminer une pluie nette **P_n** et une évapotranspiration nette **E_n** calculée par :

$$\checkmark \text{ Si } P > E, \text{ alors } P_n = P - E \quad \text{et} \quad E_n = 0 \quad (2.1)$$

$$\checkmark \text{ Si } P < E, \text{ alors } P_n = 0 \quad \text{et} \quad E_n = E - P \quad (2.2)$$

Dans le cas où **P_n** est différente de zéro, une partie **P_s** de **P_n** alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad (2.3)$$

Où **X1** (mm) et **S** sont respectivement la capacité maximum et le niveau du réservoir de production.

Dans le cas contraire, lorsque **E_n** est différent de zéro, une quantité d'évaporation **E_s** est retirée du réservoir de production. Elle est donnée par :

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \quad (2.4)$$

Le contenu du réservoir est mis à jour par :

$$S = S - E_s + P_s \quad (2.5)$$

Une percolation $Perc$ sort du réservoir de production et alimente l'écoulement. Elle est donnée par la relation :

$$P_{perc} = S \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4 S}{9 X_1} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}} \right\} \quad (2.6)$$

Le contenu du réservoir est de nouveau mis à jour par :

$$S = S - Perc \quad (2.7)$$

La quantité d'eau Pr qui atteint finalement la partie routage du modèle est :

$$Pr = Perc + (P_n - P_s) \quad (2.8)$$

Pr est divisé en deux composantes d'écoulement Q_1 et Q_9 . Q_9 (90 %) étant routés par un hydrogramme unitaire $HU1$ et alimente le réservoir de routage. Q_1 (10 %) rejoint l'exutoire après routage par un unique hydrogramme unitaire $HU2$ (débit Q_d).

$HU1$ et $HU2$ dépendent du même paramètre X_4 , temps de base de $HU1$ exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S (cumul de la proportion de la pluie unitaire traitée par l'hydrogramme en fonction du temps) notées respectivement $SH1$ et $SH2$.

$SH1$ est définie en fonction du temps par :

$$\text{Pour } t = 0 \text{ on a : } SH1(t) = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{Pour } 0 < t < X_4 \text{ on a : } SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4} \right)^{\frac{1}{2.15}} \quad (2.10)$$

$$\text{Pour } t > X_4 \text{ on a : } SH1(t) = 1 \quad (2.11)$$

SH2(t) est définie en fonction du temps par:

$$\text{Pour } t = 0 \text{ on a : } SH2(t) = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{Pour } 0 < t < X4 \text{ on a : } SH2(t) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (2.13)$$

$$\text{Pour } X4 < t < 2X4 \text{ on a : } SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad (2.14)$$

$$\text{Pour } t > 2X4 \text{ on a : } SH2(t) = 1 \quad (2.15)$$

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad (2.16)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad (2.17)$$

Où j est un entier.

A chaque pas de temps i , les sorties Q_9 et Q_1 des deux hydrogrammes sont calculées par :

$$Q_9(i) = 0,9 \cdot \sum_{k=1}^l UH1(k) \cdot P_r(i - k + 1) \quad (2.18)$$

$$Q_1(i) = 0,1 \cdot \sum_{k=1}^m UH2(k) \cdot P_r(i - k + 1) \quad (2.19)$$

Où $l = \text{int}(X4) + 1$ et $m = \text{int}(2 \cdot X4) + 1$, avec $\text{int}(\cdot)$ désignant la partie entière.

Un **échange** souterrain en eau (perte ou gain) **F** se produit entre le système modélisé et le milieu extérieur. Elle est donnée par :

$$F = X_2 \cdot \left(\frac{R}{X_3}\right)^{7/2} \quad (2.20)$$

où R est le niveau dans le réservoir, X_3 la capacité à un jour du réservoir et X_2 le coefficient d'échange en eau qui peut être positif dans le cas d'apports, négatif dans le cas de pertes vers des nappes profondes ou nul.

Le niveau dans le réservoir de routage est mis à jour en ajoutant la sortie $Q9$ de l'hydrogramme $HU1$ et F :

$$R = \max (0 ; R + Q9 + F) \quad (2.21)$$

Il se vidange ensuite en une sortie Qr donnée par :

$$Q_r = R \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{x_3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (2.22)$$

Le niveau dans le réservoir devient :

$$R = R - Qr \quad (2.23)$$

La sortie $Q1$ de l'hydrogramme $HU2$ est soumise au même échange pour donner la composante d'écoulement Qd :

$$Qd = \max (0 ; Q1 + F) \quad (2.24)$$

Le débit total Q du cours d'eau calculé par le modèle est alors donné par :

$$Q = Qr + Qd \quad (2.25)$$

III.3 Description du modèle pluie débit mensuel GR2M :

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhoulf (1994), Makhoulf et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006b), qui ont permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006b) qui paraît la plus performante. Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

III.3.1 Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la Figure II.2. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes:

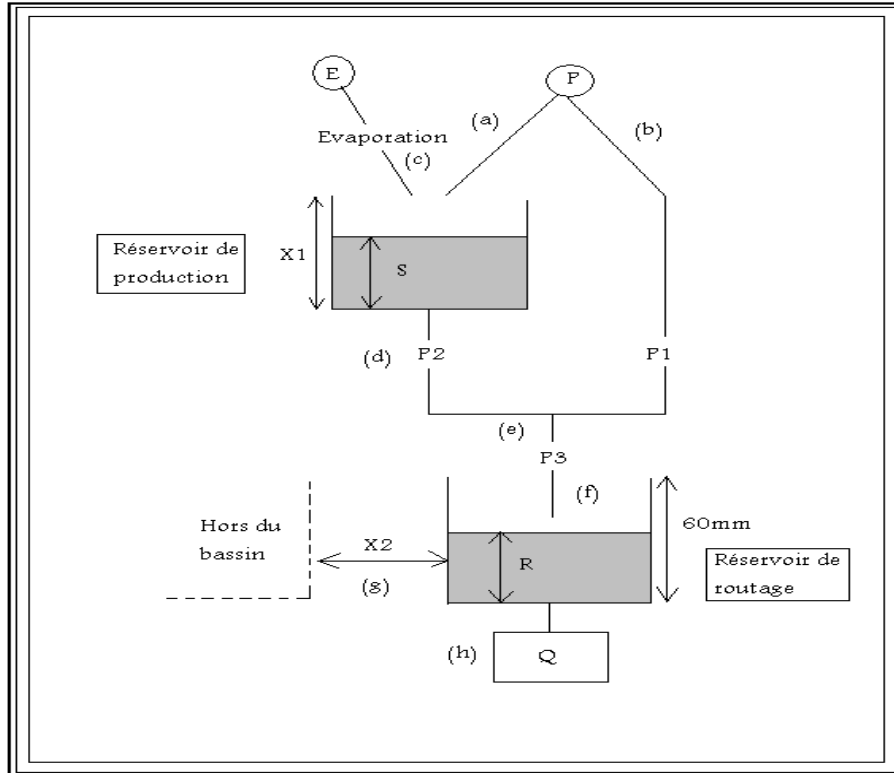


Figure 7 : Structure et mode de fonctionnement du modèle GR2M (CEMAGREF)

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X1 : capacité du réservoir de production (mm)

X2 : coefficient d'échanges souterrains (mm)

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps, très similaire à celui existant dans le modèle GR4J. Du fait de la pluie P , le niveau S dans le réservoir devient S_1 défini par :

$$S_1 = \frac{S + X_1 \varphi}{1 + \varphi \frac{S}{X_1}} \quad \text{Où} \quad \varphi = \tanh\left(\frac{P}{X_1}\right) \quad (2.25)$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie P_1 en excès est donnée par :

$$P_1 = P + S - S_1 \quad (2.26)$$

Du fait de l'évapotranspiration, le niveau S_1 devient S_2 :

$$S_2 = \frac{S_1(1-\psi)}{1+\psi\left(1-\frac{S_1}{X_1}\right)} \quad \text{Où} \quad \psi = \tanh\left(\frac{E}{X_1}\right) \quad (2.27)$$

E est l'évapotranspiration potentielle. Le réservoir se vidange ensuite en une percolation P_2 et son niveau S , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S = \frac{S_2}{\left[1+\left(\frac{S_2}{X_1}\right)^3\right]^{1/3}} \quad \text{et} \quad P_2 = S_2 - S \quad (2.28)$$

La pluie totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad (2.29)$$

Le niveau R dans le réservoir devient alors R_1 :

$$R_1 = R + P_3 \quad (2.30)$$

Un terme d'échange en eau est alors calculé par :

$$F = (X_2 - 1).R_1 \quad (2.31)$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R_2 = X_2.R_1 \quad (2.32)$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60 m m, se vidange suivant une fonction quadratique. Le débit est donné par:

$$Q = \frac{R_2^2}{R_2 + 60} \quad (2.33)$$

et le niveau du réservoir est enfin mis à jour par:

$$R = R_2 - Q \quad (2.34)$$

En effet les modèles GR fonctionne autours de deux réservoirs, de production (ou réservoir sol) et de routage sur lesquels les ajustements et interception se font différemment sur les entrées. Les entrées de ces modèles sont soumises d'une manière ou d'une autre à des ajustements et/ou interceptions qui permettent d'éviter leur effet brutal dans le modèle. Ils jouent ainsi un rôle modérateur sur les entrées de ces modèles.

III.4 Procédure expérimentale utilisée en modélisation :

La modélisation se fait suivant trois phases qui sont la phase de calage, la phase de contrôle et la phase de validation.

III.4.1 Phase de calage :

C'est la phase d'optimisation au cours de laquelle la modèle extrait, grâce aux données d'entrée et de sortie, des informations permettant d'attribuer des valeurs aux paramètres en vue de reproduire le comportement du système naturel (Canelo, 19898 in Nascimento, 1991 ; Cishahayo, 1995 ; Madsen, 2000).

Le modèle n'a pas pour but de générer des séries des débits parfaitement identiques à celles des débits observés, la phase de calage permet de réduire les écarts entre les deux séries de débits. Une bonne compréhension des caractéristiques physiques telles que le sol et la végétation permet une meilleure attribution des valeurs des paramètres du modèle (Wilk et Hughes, 2002).

Il est nécessaire de déterminer les conditions initiales du système concerné. Cette phase d'initialisation consiste à donner des valeurs arbitraires aux systèmes non mesurables sur le terrain. En ce qui concerne les modèles GR4J et GR2M, elles représentent le niveau des deux

réservoirs de production et de routage. Il est possible que l'initialisation soit faite par la méthode dite du « spin up » qui consiste à faire tourner le modèle en considérant comme valeurs initiales en entrée, les valeurs finales obtenues en sorties d'une initialisation précédente. Ce qui permet d'éviter la phase de mise en route (Trouillet, 2006).

III.4.2 Phase de contrôle :

Elle consiste en une détection, sur le comportement des paramètres, de la présence d'éventuelles erreurs résiduelles, la vérification de l'architecture et de la structure du modèle.

On fait l'analyse des paramètres en terme de valeur absolue, de variance, de corrélation des paramètres et de sensibilité.

La valeur absolue d'un paramètre doit être en rapport soit avec une caractéristique physique du bassin versant qu'il présente, soit avec des valeurs du même paramètre dans des bassins comparables, soit encore avec une moyenne régionale.

La variance doit être faible sinon les paramètres du terrain et ceux considérés dans le modèle ne seraient pas identiques.

Une corrélation forte et une convergence lente lors du calage sont la preuve de la similarité entre la structure calée dans le modèle et la structure qu'elle représente dans sa réalité sur le terrain.

La sensibilité du modèle se mesure en calculant la dérivée partielle d'une variable d'état ou de la fonction critère par rapport à chaque paramètre ou à chaque variable d'entrée. Ceci permet d'évaluer selon la sensibilité de chacun d'eux (variables d'entrée ou paramètres), les erreurs dues aux variables d'entrée et aux paramètres sur les variables de sortie.

Ce contrôle peut aboutir à des modifications de l'architecture et de la structure du modèle.

III.4.3 Phase de validation :

Elle consiste à appliquer le modèle ainsi calé et contrôlé sur des périodes autres que celles ayant servis au calage.

III.5 Evaluation de la performance d'un modèle :

La performance d'un modèle est sa capacité à pouvoir générer des résultats qui s'approchent mieux de la réalité du terrain (critère de qualité), à conserver la qualité de ses résultats aussi bien au calage qu'au contrôle (robustesse) et à s'adapter à un autre bassin versant (fiabilité) (Miossec, 2004).

Deux approches permettent d'évaluer la performance d'un modèle :

III.5.1 Une approche qualitative :

Il s'agit d'un calage manuel fastidieux qui renferme une part de subjectivité (due au jugement de l'observateur) car elle est basée sur l'observation de la chronique des débits calculés par le modèle par rapport à celles des débits mesurés (ou observés).

III.5.2 Une approche quantitative :

Elle permet un calage automatique basé sur la formulation mathématique de la fonction critère, ce qui est beaucoup plus rapide, plus objectif et exempt de jugement de l'observateur (Nascimento, 1999 ; Serna, 2005). Le critère le plus connu et le plus utilisé avec les modèles conceptuelles pluies débit est le critère de **Nash** et **Sutcliff** (1970) qui s'exprime de la manière suivante (2.1) ou de ses variantes ou bien par minimisation de l'erreur quadratique de modélisation donnée par la relation (2.2):

$$Nash(Q) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum_i (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \right] \quad (2.1)$$

$$E = \sum_i (Q_{i,cal} - Q_{i,obs})^2 \quad (2.2)$$

$Q_{i,obs}$ débit observé ou mesuré au jour i ;

$Q_{i,cal}$ débit calculé ou simulé au jour i ;

$\overline{Q_{obs}}$ moyenne des débits mesurés durant la période d'observation.

Pour un critère de Nash = 100, la simulation est dite parfaite (ce qui est rare ou impossible à atteindre) et la simulation est de moins en moins bonne au fur et à mesure que le critère de Nash diminue. Cependant, le résultat de ce critère est à relativiser car même lorsqu'il est égal à 84%, il y a environ 40% d'erreur relative.

L'annulation de ce critère de Nash correspond à une performance d'un modèle dit « naïf » qui considère une valeur constante pour les débits calculés par le modèle, cette valeur étant égale à la moyenne des débits observés ($\overline{Q_{obs}}$) sur toute la période d'observation.

Une valeur négative du critère de Nash donne une simulation plus mauvaise que dans le cas d'un modèle « naïf ».

Cette expression de Nash déterminée directement à partir des débits observés et calculés donne beaucoup d'importance aux débits élevés (débits de crue). Il est impossible d'atténuer l'importance de ces débits élevés en déterminant un Nash (\sqrt{Q}) qui est donné par l'expression suivante (2.3).

$$Nash(\sqrt{Q}) = 100 \left[1 - \frac{\sum_i (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{i,cal}})^2}{\sum_i (\sqrt{Q_{i,obs}} - \sqrt{Q_{obs}})^2} \right] \quad (2.3)$$

Cette expression, quant à elle, donne l'importance aux débits moyens c'est-à-dire qu'il donne de l'importance autant aux débits élevés qu'aux débits faibles.

Une troisième expression de Nash donne l'importance aux débits faibles d'étiage c'est la Nash ($\ln Q$). On remplace (\sqrt{Q}) par $\ln Q$. Dans ce cas, pour éviter l'impossibilité due à une valeur nulle de débit, on ajoute à celui-ci le quatrième du module sur les données observées (Berthier, 2005).

On estime que la simulation est de mauvaise qualité lorsque le critère de Nash est faible, elle est acceptable lorsque l'on a un Nash > 70% et cette simulation est dite parfaite pour un Nash = 100% (Trouillet, 2006).

**CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS DES
SIMULATIONS**



**CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS DES
SIMULATIONS**

Les résultats présentés ci-dessous sont obtenus des simulations réalisées sur le bassin du fleuve Sénégal en amont de Bakel, du sous-bassin du Bafing en amont de Bafing Makana, du Bacoye en amont d'Oualia et de la Falémé en amont de Gourbassi. Les stations pluviométriques et hydrométriques utilisées sont celles de Kita, de Kéniéba et de Toukoto. L'évaluation de la performance des modèles s'est fait à partir des critères de Nash.

Etant donné que le critère de Nash peut donner une plus grande importance soit aux débits élevés ($Nash(Q)$), soit aux débits moyens ($Nash(\sqrt{Q})$), soit encore aux débits faibles ($Nash(\ln Q)$). Ces modèles permettent aussi de faire une évaluation du type de débits qui sont simulés.

Avant d'entamer ce chapitre, nous allons essayer de faire une petite critique sur les données obtenues. En effet, nous avons obtenue les hauteurs de pluies enregistrées à la station de Kita de 1931 à 1995. Dans nos simulations nous avons pris la période 1966 à 1983 pour le Bafing et l'Oualia, car les autres années présentes beaucoup de lacunes. De même pour la station de Kéniéba, la période des enregistrements s'étend de 1942 à 1991 et nous avons travaillé sur la période 1982 à 1993 pour la Gourbassi (Tableau 4).

Ces mêmes genres de lacunes se retrouvent sur les débits. Or la période de simulation choisie doit être excepte de lacunes de pluie et d'évapotranspiration potentielle, ce pendant des lacunes dans les débits n'étant, elles pas gênantes.

Tableau 4 : Lacunes sur les pluies et les débits :

	Pluies KENIEBA	KITA	Toukoto	Gourbassi	Débits Oualia	Bafing Makana	ETP KITA
1930							
1931							
1932							
1933							
1934							
1935							
1936							
1937							
1938							
1939							
1940							
1941							
1942							
1943							
1944							
1945							
1946							
1947							
1948							
1949							
1950							
1951							
1952							
1953							
1954							
1955							
1956							
1957							
1958							
1959							
1960							
1961							
1962							
1963							
1964							
1965							
1966							
1967							
1968							
1969							
1970							
1971							
1972							
1973							
1974							
1975							
1976							
1977							
1978							
1979							
1980							
1981							
1982							
1983							
1984							
1985							
1986							
1987							
1988							
1989							
1990							
1991							
1992							
1993							
1994							
1995							

IV .Simulation du GR4J et GR2M aux différents sous-bassins :

IV 1. Sous-bassin de Gourbassi :

IV 1.1 Simulation du GR4J :

Nous avons fait nos simulations en faisant varier la longueur de la période de calage de 2, 3, 5 et 6 ans pour tous les bassins utilisés. Les résultats obtenus par l'activation du solveur en utilisant les paramètres proposés dans le readme (dans la version Excel du modèle) sont données dans les tableaux (5 à 12).

Tableau 5 : Calage et validation du GR4J au bassin de Gourbassi

Longueur de calage		Paramètres initiaux							
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄				
1966-1968		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1969		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1970		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1971		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1972		5,90	0,00	4,50	0,20				
longueur de la période de mise en route (année)		Sorties du modèle							
		Paramètres				Critères de validation			
Phase de calage	Phase de validation	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Nash h(Q)	Nash (√Q)	Nash (lnQ)	Bilan
1966-1968	1969-1983	7,32	-0,15	3,39	0,80	43,5	71,1	68,3	84
1966-1969	1970-1983	7,29	-0,19	3,45	0,80	43,9	72,4	69,4	85,4
1966-1970	1971-1983	7,27	-0,21	3,43	0,78	39,1	70,7	68,4	84,5
1966-1971	1972-1983	7,25	-0,19	3,02	1,40	44,2	72,2	71,9	87,6
1966-1972	1973-1983	7,21	-0,15	2,92	1,40	48,2	71,7	71,3	86,5

L'analyse du tableau 5 montre que les paramètres X₁ et X₄ sont pratiquement stables pour toute les longueurs de période de mise en route choisies. Tandis que les paramètres X₂ et X₃ ne sont stables que pour les 2, 3, 5 et 6 années de calages, ainsi pour 4 ans de calage ils subissent une légère variation. Les critères de validations sur les Nash (Q) et Nash (lnQ) sont acceptables bien vraie que les trois premières années de calage sont égales à 68 et 69% (inférieures à 70%). Cependant les Nash (√Q) ne sont pas du tout bon (Figure 8).

La période de crue correspond à la phase de calage 1966-1969 de même que celle des eaux moyennes. Tandis que la période des étages correspond à 1966-1971 (Figure 9). Les hydrogrammes représentés (Figure 10) montre les écarts entre les débits observés et celles simulés.

Figure 8 : Application du GR4J au sous – bassin du Bakoye à Oualia : Evolution des critères.

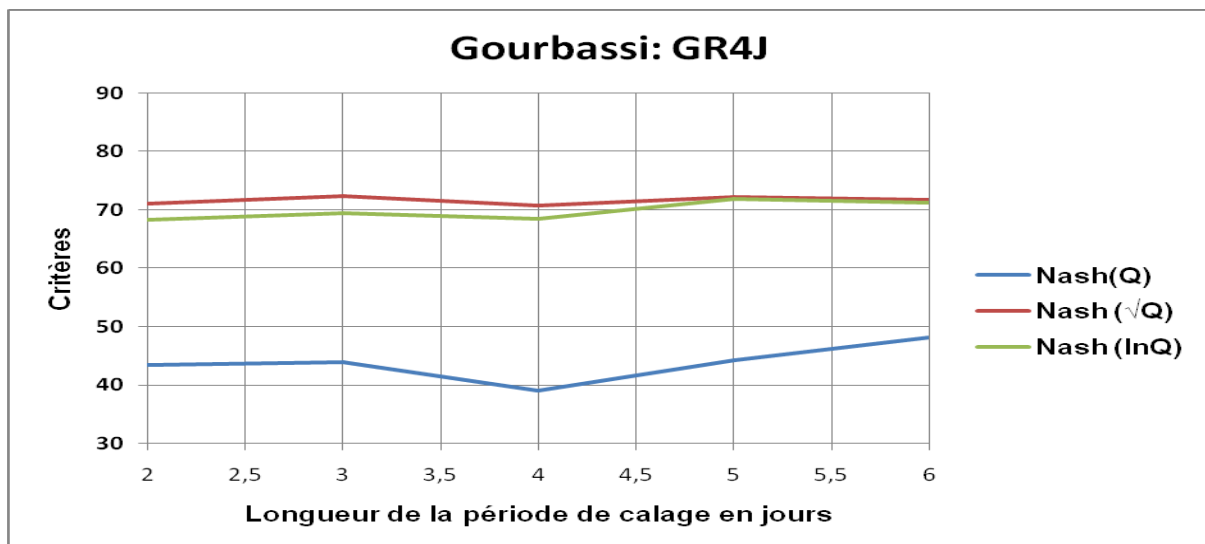


Figure 9: GR4J à Gourbassi: Evolution des paramètres.

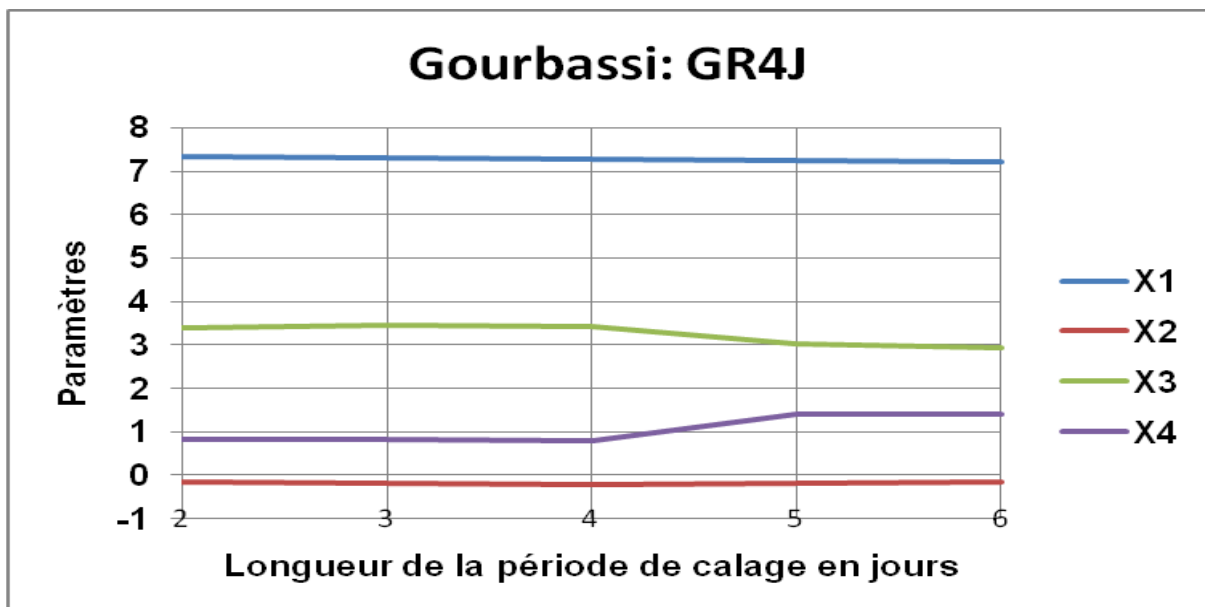
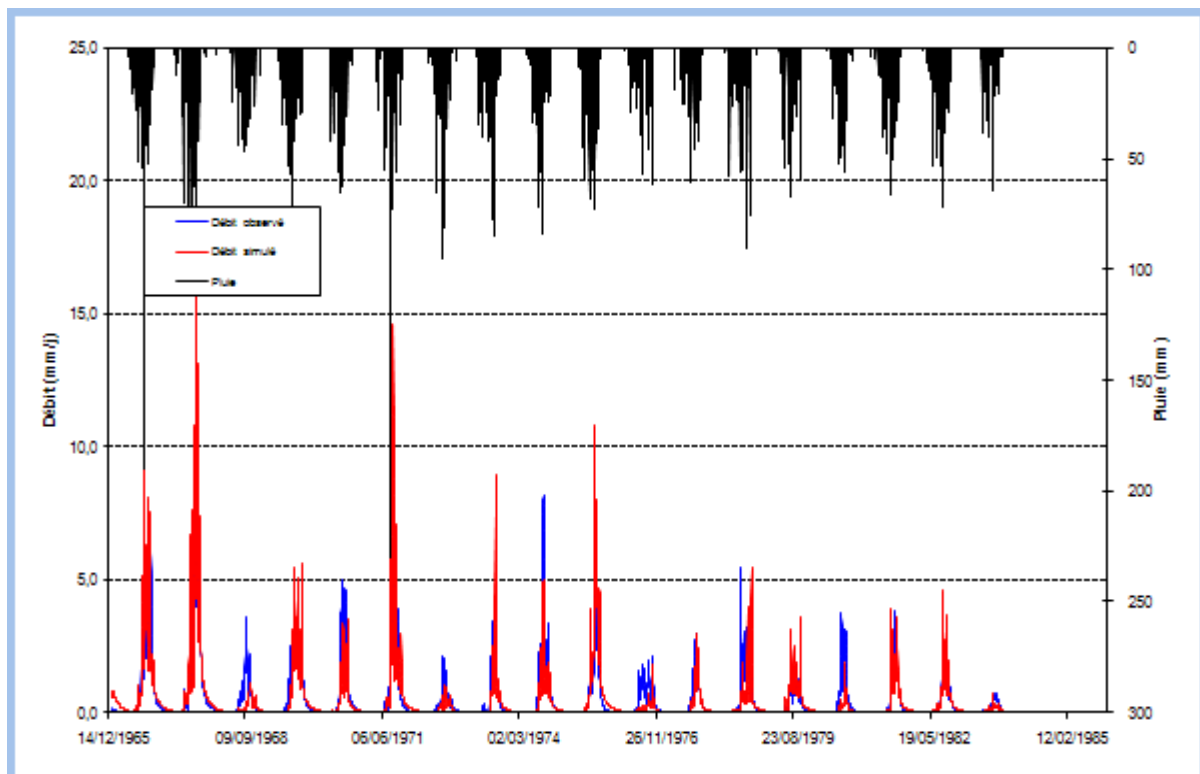


Figure 10 : hydrogramme de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR4J

Calage 1966-1971 Validation 1972-1983



IV 1.2 Simulation du GR2M :

Pour le GR2M les paramètres réels X_1 et X_2 sont obtenus à partir des paramètres transformés x_1 et x_2 de la manière suivante :

$X_1 = e^{x_1}$. Tandis que X_2 correspond directement à la transformée de x_2 .

Avec la même longueur de période (GR4J) et en utilisant les paramètres proposés dans le readme nous obtenons le tableau IV -3 ci-dessous.

Tableau 6 : Calage et validation du GR2M au bassin de Gourbassi

Longueur de calage		Paramètres initiaux					
Périodes		x ₁	x ₂				
1966-1968		6,00	1,00				
1966-1969		6,00	1,00				
1966-1970		6,00	1,00				
1966-1971		6,00	1,00				
1966-1972		6,00	1,00				
longueur de la période de mise en route (année)		Sorties du modèle					
Phase de calage	Phase de validation	Paramètres		Critères de validation			
		X ₁	X ₂	Nash (Q)	Nash (√Q)	Nash (lnQ)	Bilan
1966-1968	1969-1983	6,88	0,68	78,3	87,2	90,2	93,7
1966-1969	1970-1983	6,85	0,67	80,3	89,5	92,5	94,7
1966-1970	1971-1983	6,85	0,67	80,1	89,4	92,6	94,7
1966-1971	1972-1983	6,81	0,66	77,9	88,6	92,6	94,5
1966-1972	1973-1983	6,85	0,65	79,6	88,5	92,1	94,4

Contrairement au GR4J, ici tous les deux paramètres sont stables (Figure 11) et les critères de validations dépassent même le minimum du Nash attendu (70%) et varie de 78 à 90% (Figure 12). La période de crue correspond à la phase de calage 1966-1969 de même que celle des eaux moyennes. Tandis que les étages correspondent à deux phases de calages 1966-1970 et 1966-1971.

En effet pour faire des prévisions sur le bassin versant de, il serait plus judicieux de choisir le GR2M qui donne des paramètres plus stables et critères répondants plus aux Nash voulus. Les hydrogrammes représentés (Figure 13) montre les faibles écarts entre les débits observés et celles simulés.

Figure 11 : Evolution des paramètres.

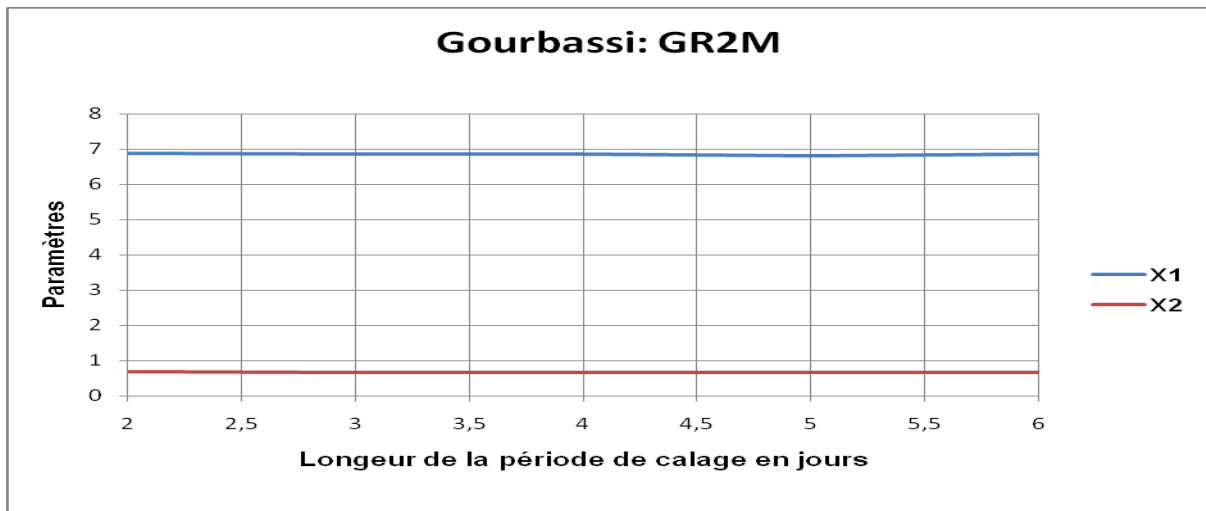


Figure 12: GR2M à Gourbassi : Evolution des critères

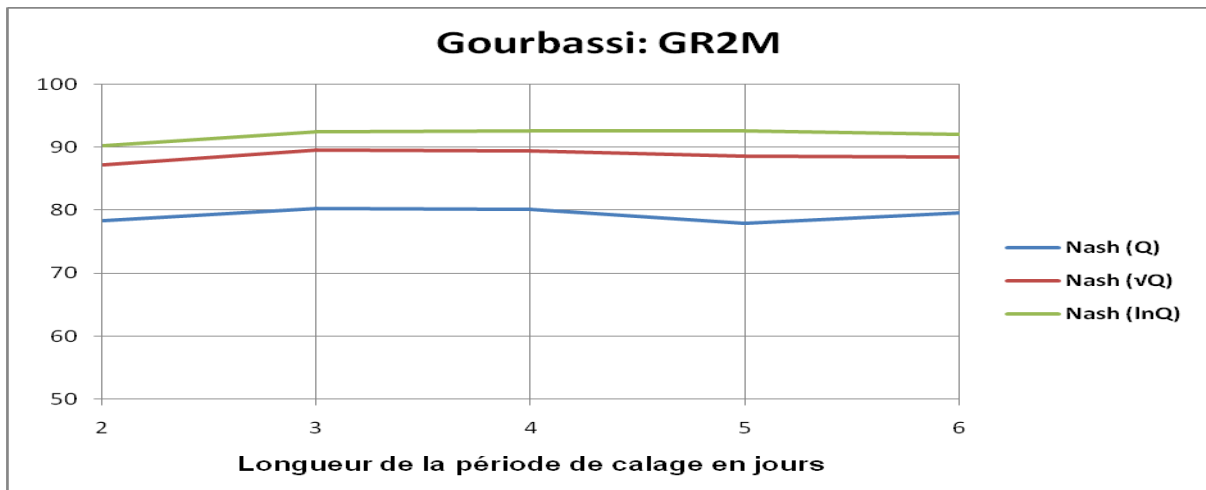
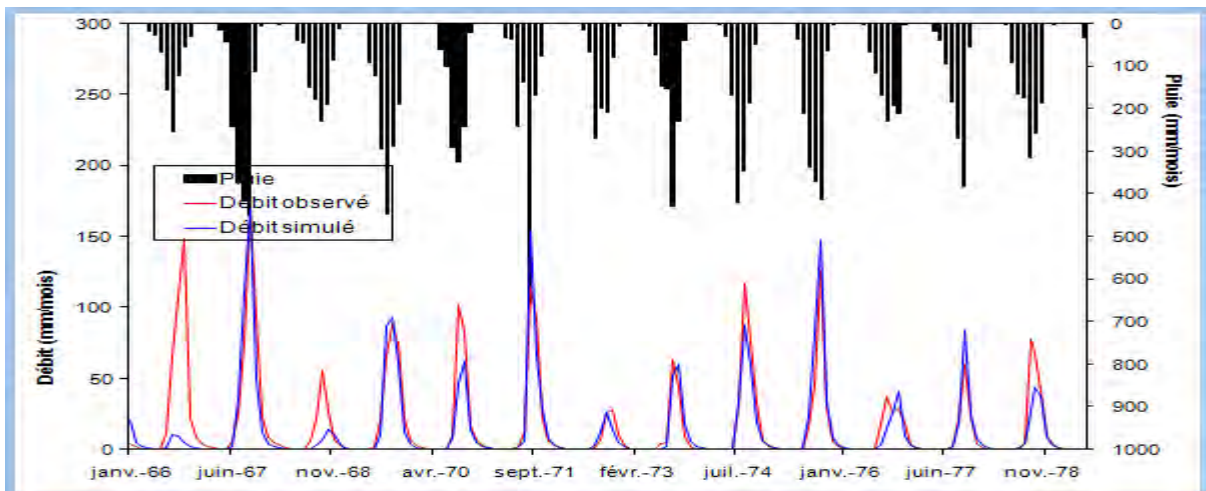


Figure 13 : hydrogrammes de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR2M.

Calage 1966-1969 Validation 1970-1983



IV 2. Sous-bassin de Bafing Makana :

IV 2.1 Simulation avec le GR4J :

Tableau 7 : Calage et validation du GR4J au bassin de Bafing Makana

Longueur de calage		Paramètres initiaux							
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄				
1966-1968		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1969		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1970		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1971		5,90	0,00	4,50	0,20				
1966-1972		5,90	0,00	4,50	0,20				
longueur de la période de mise en route (année)		Sorties du modèle							
		Paramètres				Critères de validation			
Phase de calage	Phase de validation	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Nas h(Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan
1966-1968	1969-1983	-9,26	-4,41	6,62	2,20	70,6	83,4	81,4	92,6
1966-1969	1970-1983	-8,07	-4,40	6,61	2,21	70,4	83,3	81,5	92,4
1966-1970	1971-1983	-8,81	-4,45	6,62	2,21	70,5	83,5	81,6	92,5
1966-1971	1972-1983	-8,89	-4,48	6,63	2,22	71,1	83,7	81,6	92,6
1966-1972	1973-1983	-10,85	-4,5	6,63	2,23	70,9	83,4	81,3	92,5

Les résultats de simulation obtenus avec le GR4J sur le Bafing montrent du caractère très stable des paramètres sauf pour X₄ qui varie légèrement (Figure 14). Les Nash obtenus sont aussi stables et d'une bonne estimation variant de 70 à 81% (Figure 15). La période de crue correspond à la phase de calage 1966-1971 de même que celle des eaux moyennes. Tandis que les étages correspondent aux périodes 1966-1970 et 1966-1971. Les hydrogrammes représentés (Figure 16) montre les faibles écarts entre les débits observés et celles simulés.

Figure 14 : GR4J à Bafing Makana: Evolution des critères

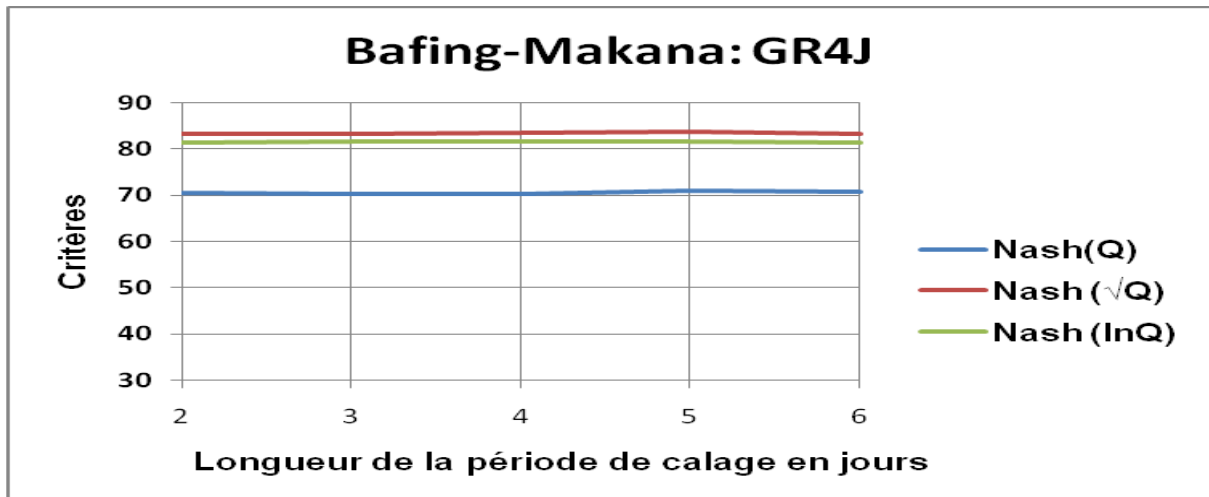


Figure 15 : GR4J à Bafing Makana: Evolution des paramètres.

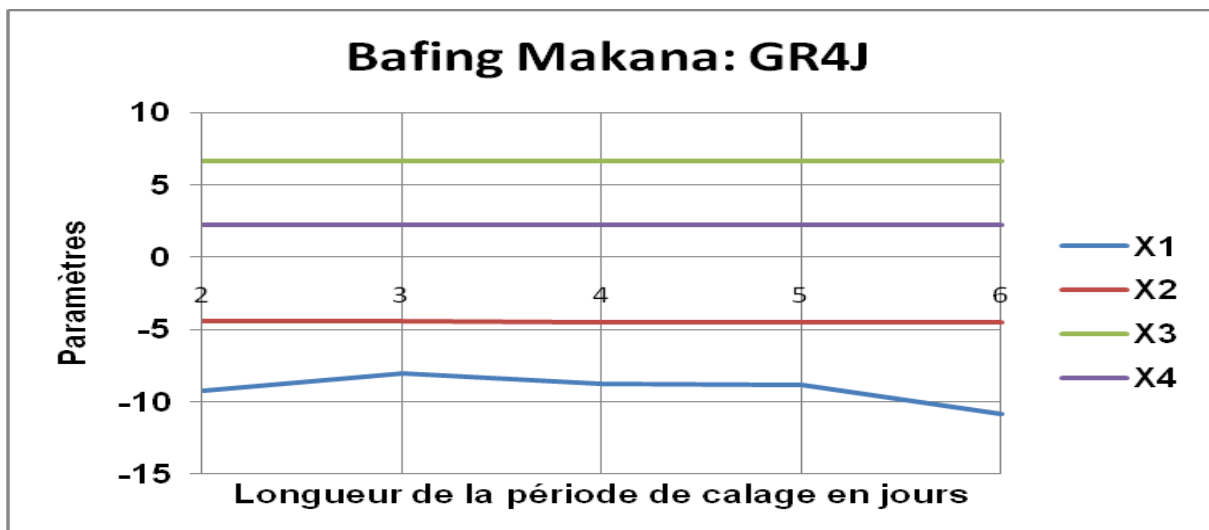
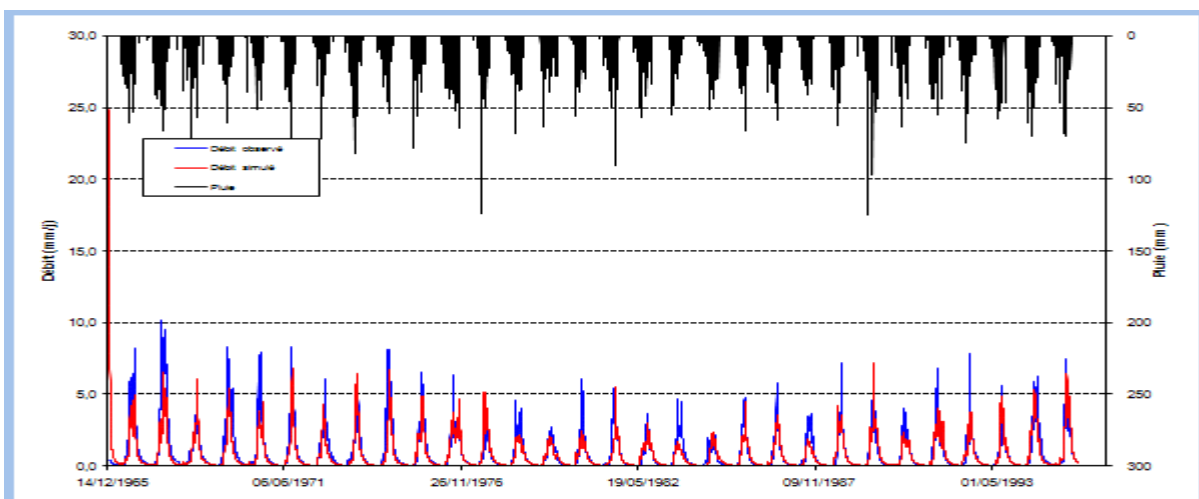


Figure 16 : hydrogrammes de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR4J

Calage 1966-1971 Validation 1972-1983



IV 2.2 Simulation avec le GR2M :

Tableau 8 : Calage et validation du GR2M au bassin de Bafing Makana

Longueur de calage		Paramètres initiaux					
Périodes		x ₁	x ₂				
1966-1968		6,00	1,00				
1966-1969		6,00	1,00				
1966-1970		6,00	1,00				
1966-1971		6,00	1,00				
1966-1972		6,00	1,00				
longueur de la période de mise en route (année)		Sorties du modèle					
Phase de calage	Phase de validation	Paramètres		Critères de validation			
		X ₁	X ₂	Nash (Q)	Nash (√Q)	Nash (lnQ)	Bilan
1966-1968	1969-1983	6,91	1,34	72,8	75,0	53,0	101,4
1966-1969	1970-1983	6,90	1,33	72,5	75,0	53,1	101,2
1966-1970	1971-1983	6,95	1,33	72,6	74,5	52,2	101,4
1966-1971	1972-1983	7,00	1,33	72,7	73,7	50,8	101,6
1966-1972	1973-1983	6,94	1,31	75,0	76,1	53,9	101,0

Les résultats obtenus avec le GR2M sur le Bafing sont moins bons que ceux obtenus avec le GR4J. Cependant les Nash (Q) et Nash (√Q) sont bons variant de 72 à 76% contrairement aux Nash (lnQ) qui donnent de faibles valeurs environ 53% (Figure 18). Les paramètres X₁ et X₂ sont assez stables (Figure 17). La période de crue correspond à la phase de calage 1966-1972 de même que celle des eaux moyennes et les étages. Les hydrogrammes représentés (Figure 19) montre les faibles écarts entre les débits observés et celles simulés.

Figure 17 : GR2M à Bafing Makana: Evolution des paramètres.

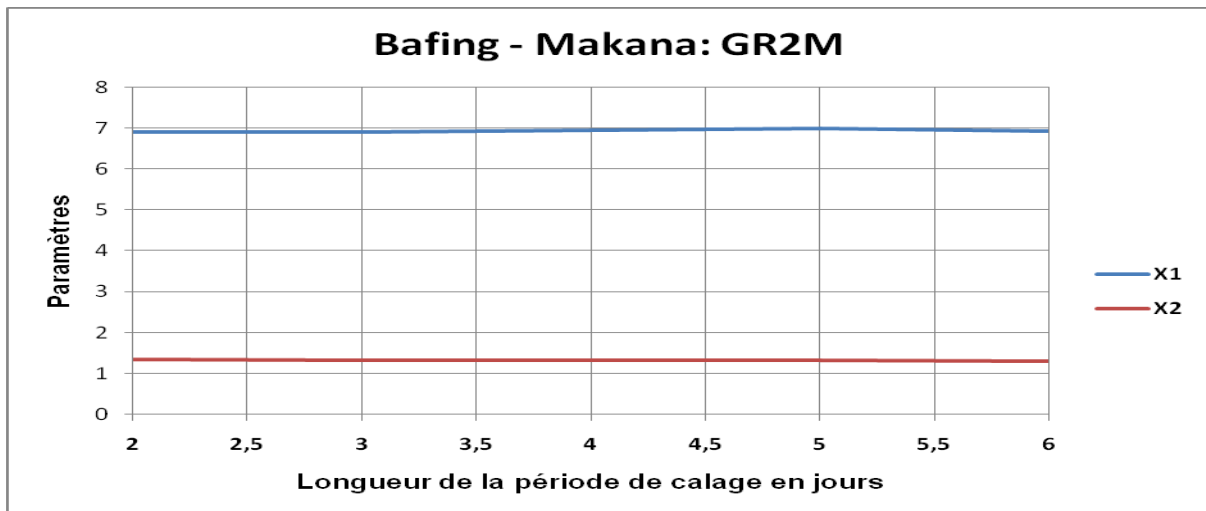


Figure 18 : GR2M à Bafing Makana: Evolution des critères.

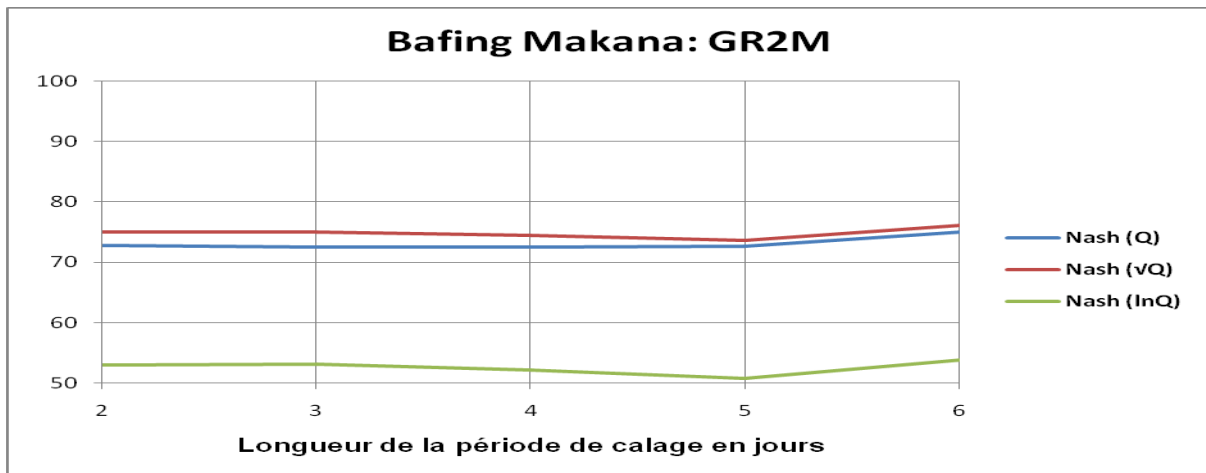
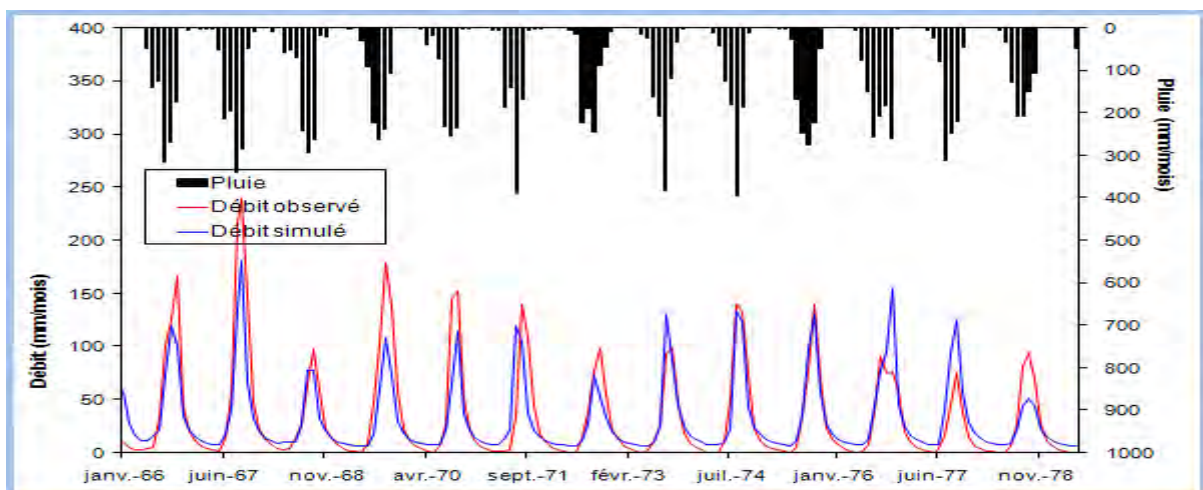


Figure 19 : hydrogrammes de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR2M

Calage 1966-1968 Validation 1969-1983



IV 3. Sous-bassin d'Oualia :

IV 3.1 Simulation avec le GR4J (Station de KITA) :

Tableau 9 : Calage et validation du GR4J au bassin d'Oualia

Longueur de calage		Paramètres initiaux							
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄				
1982-1984		5,90	0,00	4,50	0,20				
1982-1985		5,90	0,00	4,50	0,20				
1982-1986		5,90	0,00	4,50	0,20				
1982-1987		5,90	0,00	4,50	0,20				
1982-1988		5,90	0,00	4,50	0,20				
longueur de la période de mise en route (année)		Sorties du modèle							
		Paramètres				Critères de validation			
Phase de calage	Phase de validation	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Nas h(Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan
1982-1984	1985-1993	6,50	-0,41	0,39	0,13	38,7	70	70,8	87,9
1982-1985	1986-1993	4,12	-3,84	5,75	0,61	65,1	77,7	75,1	87,7
1982-1986	1987-1993	4,13	-4,06	5,79	0,63	66,1	78,7	75,3	88,7
1982-1987	1988-1993	6,71	0,20	3,05	-0,16	37,9	67,5	68,1	83,2
1982-1988	1989-1993	7,00	0,08	2,93	-0,12	39,5	60,4	54,5	73,3

Les résultats obtenus avec Oualia à la station de Kita ne sont pas du tout fameux comparés aux autres bassins. Les paramètres ne sont pas stables (Figure 20). Les critères d'évaluation sont faibles pour la plupart (Figure 21). La période de crue correspond à la phase de calage 1982-1986 de même que celle des eaux moyennes et les étages. Les hydrogrammes représentés (Figure 22) montre les écarts entre les débits observés et celles simulés. L'augmentation de la longueur de période de mise en route ne produit pas de meilleurs critères que les périodes courtes. Cela pourrait être dû du fait que la station choisie est hors du bassin, ce qui peut influencer sur les pluies.

Figure 20 : GR4J à Oualia Evolution des critères

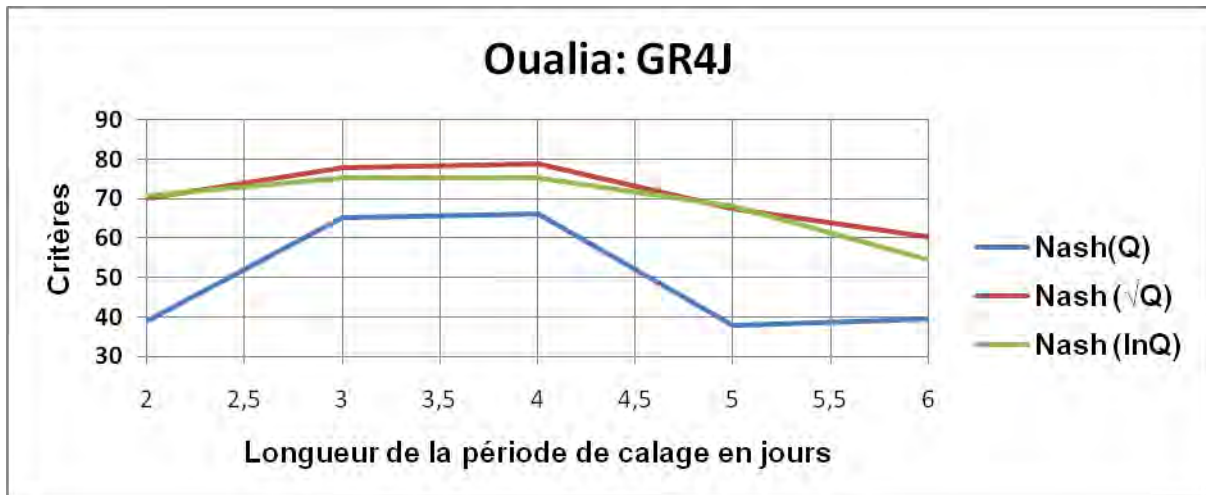


Figure 21 : GR4J à Oualia Evolution des paramètres

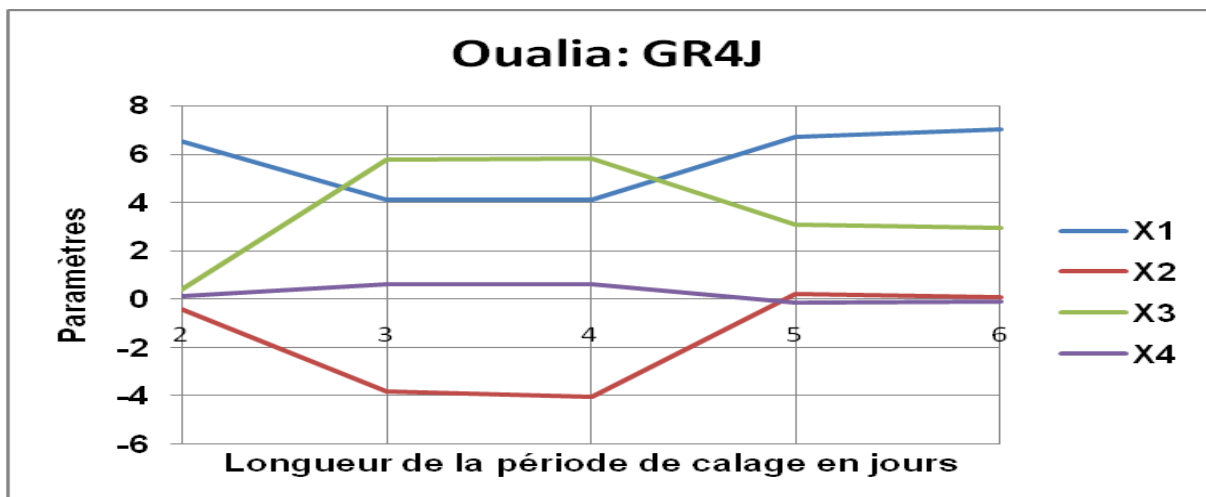
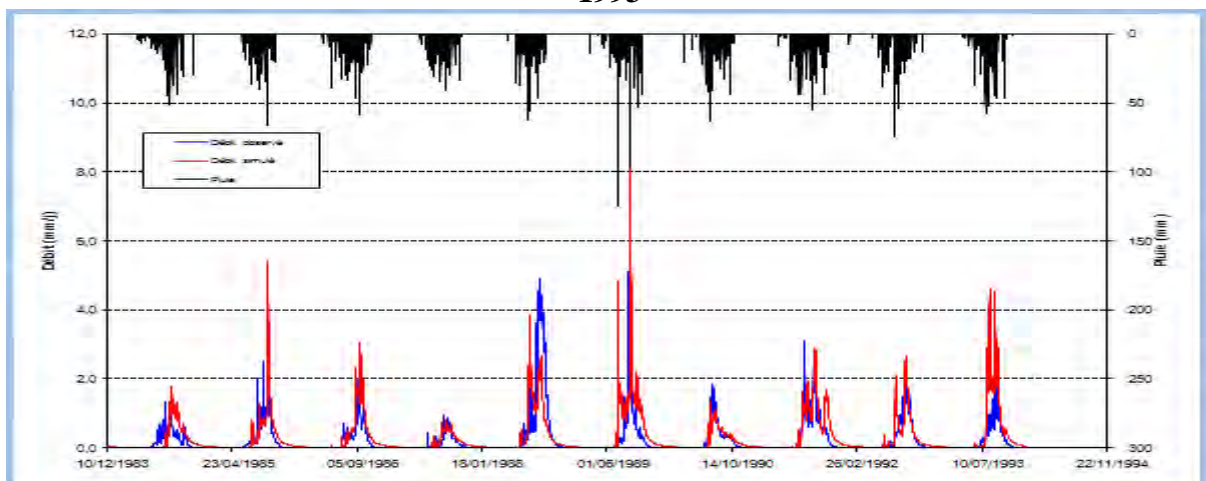


Figure 22 : hydrogrammes de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR4J

Calage 1982-1986 Validation 1987 - 1993



V 3.2 Simulation avec le GR2M (Station de KITA) :

Tableau 10 : Calage et validation du GR2M au bassin d'Oualia

Longueur de calage		Paramètres initiaux					
Périodes		x ₁	x ₂				
1982-1984		6,00	1,00				
1982-1985		6,00	1,00				
1982-1986		6,00	1,00				
1982-1987		6,00	1,00				
1982-1988		6,00	1,00				
longueur de la période de mise en route (année)		Sorties du modèle					
Phase de calage	Phase de validation	Paramètres		Critères de validation			
		X ₁	X ₂	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan
1982-1984	1985-1993	6,09	0,26	51,0	78,2	83,4	90,6
1982-1985	1986-1993	6,11	0,26	52,1	80,2	87,2	91,6
1982-1986	1987-1993	6,20	0,26	52,1	79,8	87,8	91,0
1982-1987	1988-1993	6,17	0,25	54,9	81,6	88,6	91,6
1982-1988	1989-1993	6,20	0,25	54,9	81,6	89,9	91,3

Ici les paramètres sont stables (Figure 23), de même que les Nash (\sqrt{Q}) et Nash (lnQ) sont bien estimés et varient de 78 à 89% (Figure 24), contrairement aux Nash (Q) dont le maximum est de 59%. La période de crue correspond aux phases de calage 1982-1987 et 1982-1988 de même que celle des eaux moyennes. Alors que la période des étiages correspond à 1982-1988. Les hydrogrammes représentés (Figure 25) montre les faibles écarts entre les débits observés et celles simulés.

Figure 23 : GR2M à Oualia: Evolution des paramètres

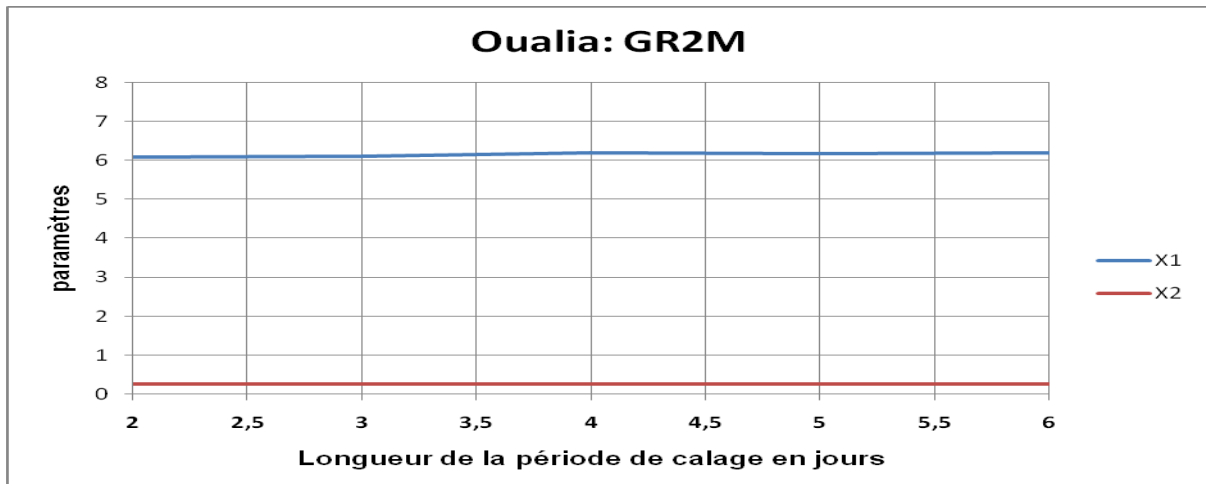


Figure 24 : GR2M à Oualia: Evolution des critères

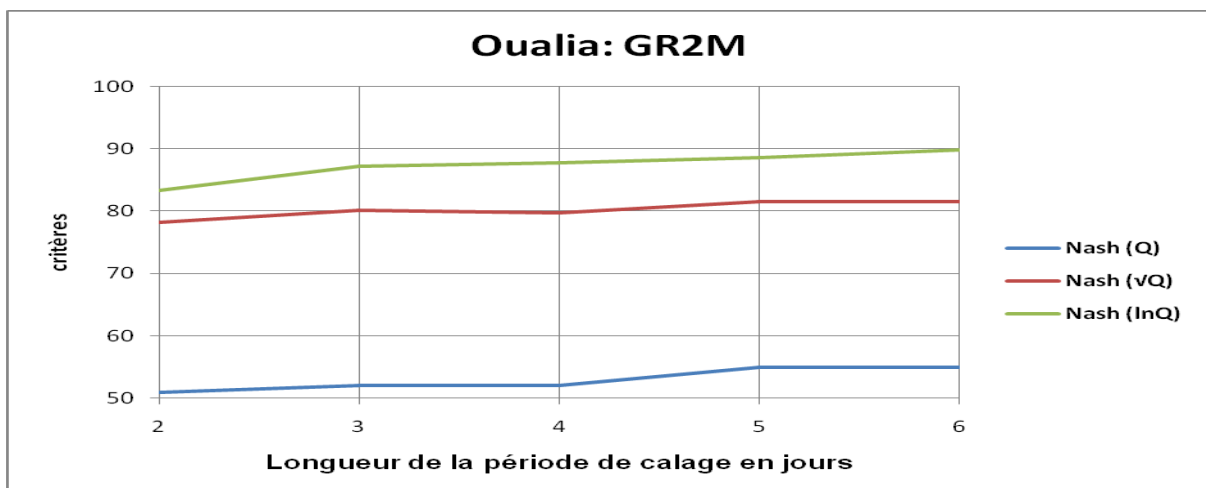
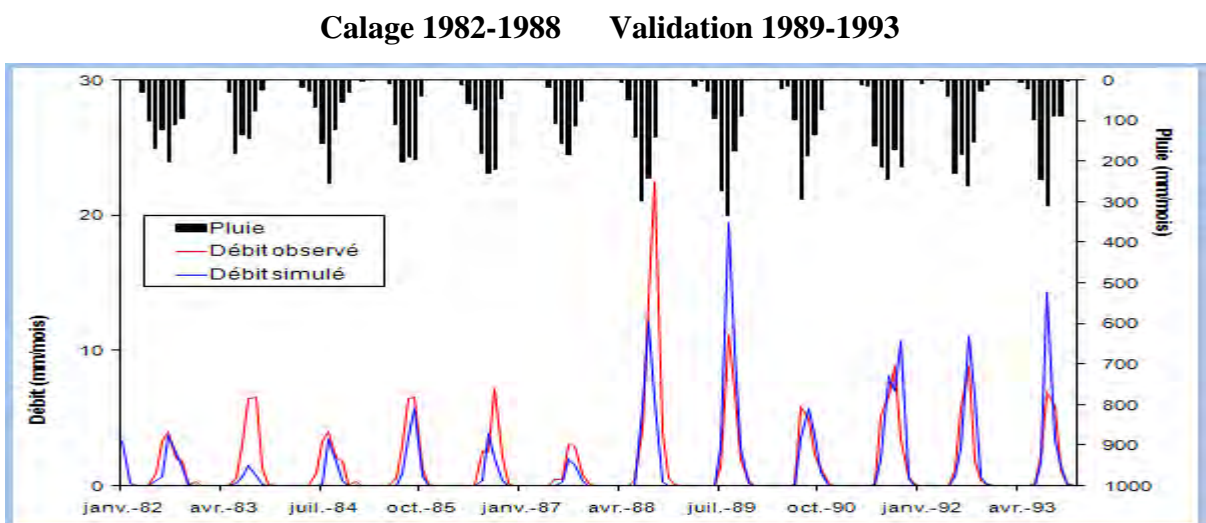


Figure 25 : hydrogramme de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR2M



IV 4. Sous-bassin d'Oualia :

IV 4.1 Simulation avec le GR4J (Station de Toukoto) :

Tableau 11 : Calage et validation du GR4J au bassin d'Oualia

Longueur de calage		Paramètres initiaux							
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄				
1982-1984		5,90	0,00	4,50	0,20				
1982-1985		5,90	0,00	4,50	0,20				
1982-1986		5,90	0,00	4,50	0,20				
1982-1987		5,90	000	4,50	0,20				
1982-1988		5,90	000	4,50	0,20				
longueur de la période de mise en route (année)		Paramètres				Critères d'évaluation			
Phase de calage	Phase de validation	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Nas h(Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan
1982-1984	1985-1993	7,32	0,20	0,91	0,64	-0,6	25,6	22,4	53,1
1982-1985	1986-1993	7,21	0,24	1,12	-0,25	0,8	25,6	20,6	51,8
1982-1986	1987-1993	-6,10	-5,28	5,95	1,40	7,2	30,3	37,5	56,3
1982-1987	1988-1993	-10,14	-5,26	5,89	1,56	8,2	36,7	50,1	60,3
1982-1988	1989-1993	-8,96	-5,03	5,79	1,37	5,6	37,7	49,8	61,7

Les résultats sont très mauvais. Ainsi les critères d'évaluation (Figure 27) sont très faibles par rapport à la normale et parfois même négatives, avec des paramètres très instables (Figure 26). La période de crue correspond à la phase de calage 1982-1987 de même que celle des eaux moyennes et des étiages. Les hydrogrammes représentés (Figure 28) montre les écarts entre les débits observés et celles simulés.

Figure 26 : GR4J à Oualia (Toukoto) Evolution des paramètres

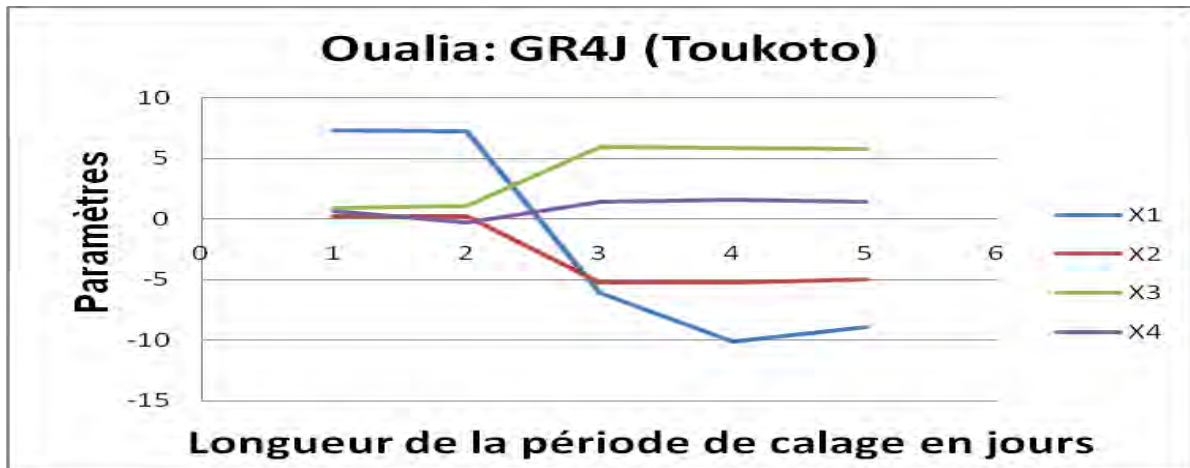


Figure 27 : GR4J à Oualia(Toukoto) Evolution des critères

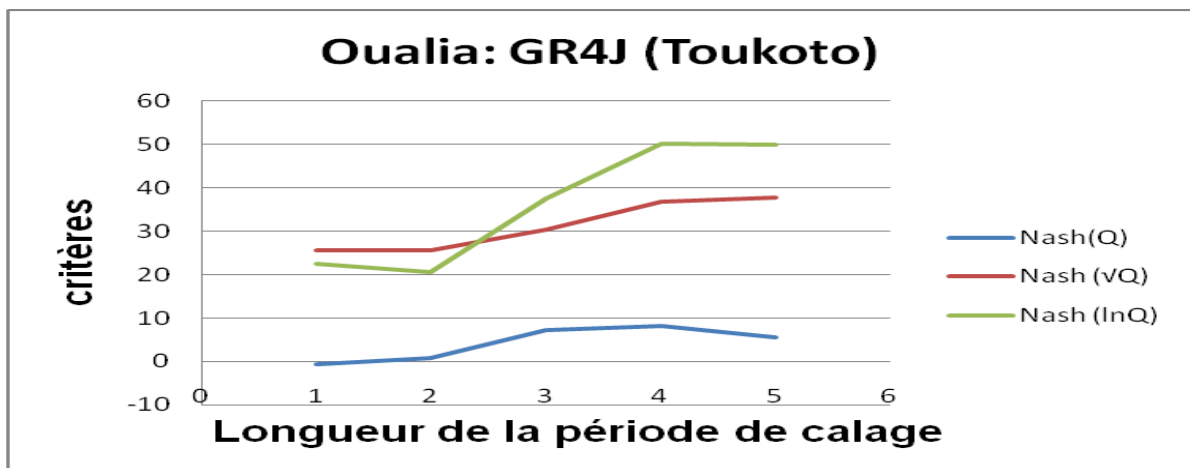
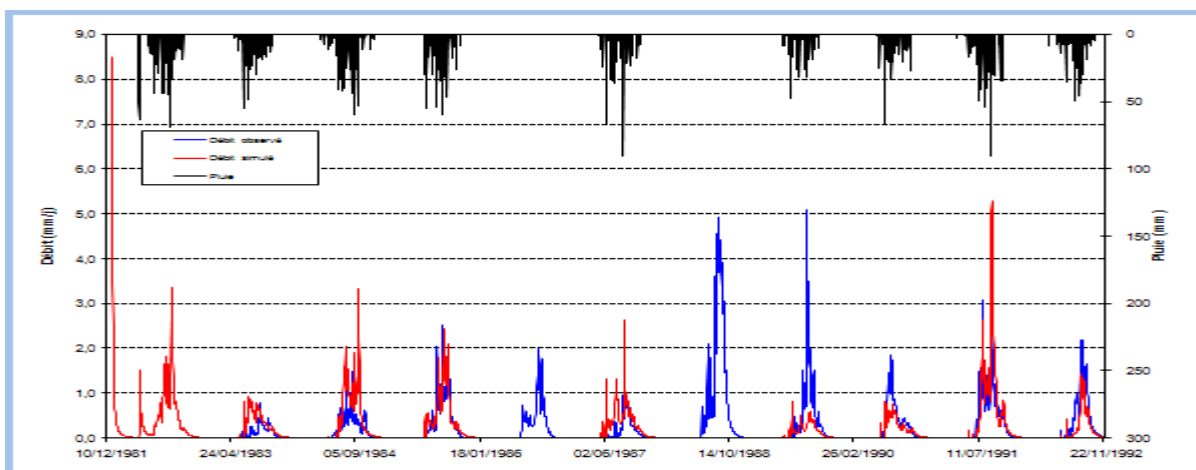


Figure 28 : hydrogrammes de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR4J Calage 1982-1987 Validation 1988-1993



IV 4.2 Simulation avec le GR2M (Station de Toukoto) :

Tableau 12 : Calage et validation du GR2M au bassin d'Oualia

Périodes		Paramètres initiaux					
		X ₁	X ₂				
1982-1984		6,00	1,00				
1982-1985		6,00	1,00				
1982-1986		6,00	1,00				
1982-1987		6,00	1,00				
1982-1988		6,00	1,00				
Périodes		Sorties du modèle					
		Paramètres		Critères de validation			
Phase de calage	Phase de validation	X ₁	X ₂	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan
1982-1984	1985-1993	5,97	0,28	10,8	56,6	70,5	79,2
1982-1985	1986-1993	5,91	0,28	5	53,2	69,2	77,2
1982-1986	1987-1993	5,96	0,29	7,7	56,9	72,4	79,4
1982-1987	1988-1993	5,62	0,27	13	59,5	72,1	80,4
1982-1988	1989-1993	5,54	0,26	10	58,3	70,8	80,2

Avec le GR2M nous avons une légère amélioration des résultats. Les paramètres sont plus stables (Figure 29) et les caractères plus proches de 70% surtout les Nash (lnQ) (Figure 30) La période de crue correspond à la phase de calage 1982-1987 de même que celle des eaux moyennes. Alors que la période des étiages correspond à 1982-1986. Les hydrogrammes représentés (Figure 31) montre les écarts entre les débits observés et celles simulés.

Figure 29 : GR2M à Oualia (Toukoto) Evolution des paramètres

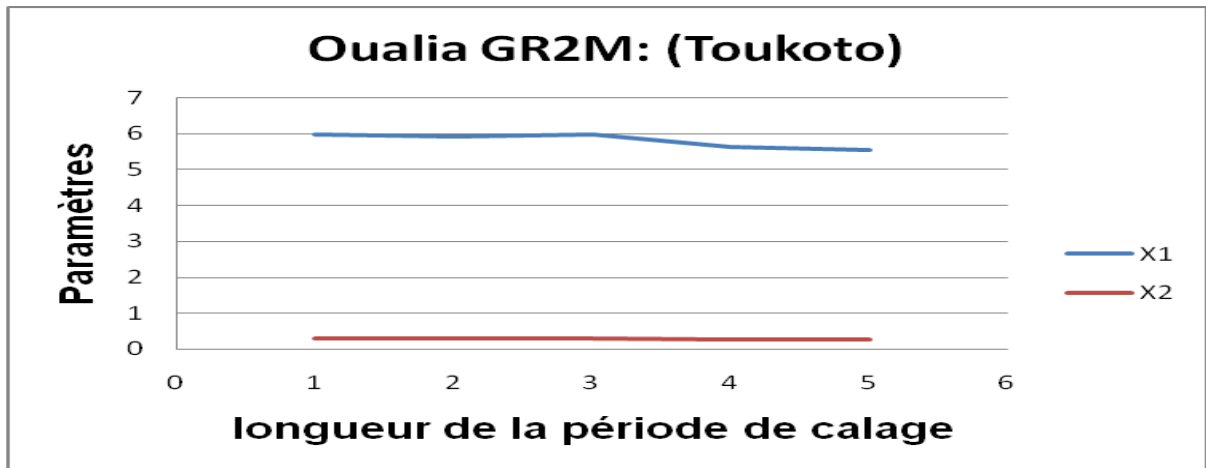


Figure 30 : GR2M à Oualia (Toukoto) Evolution des critères

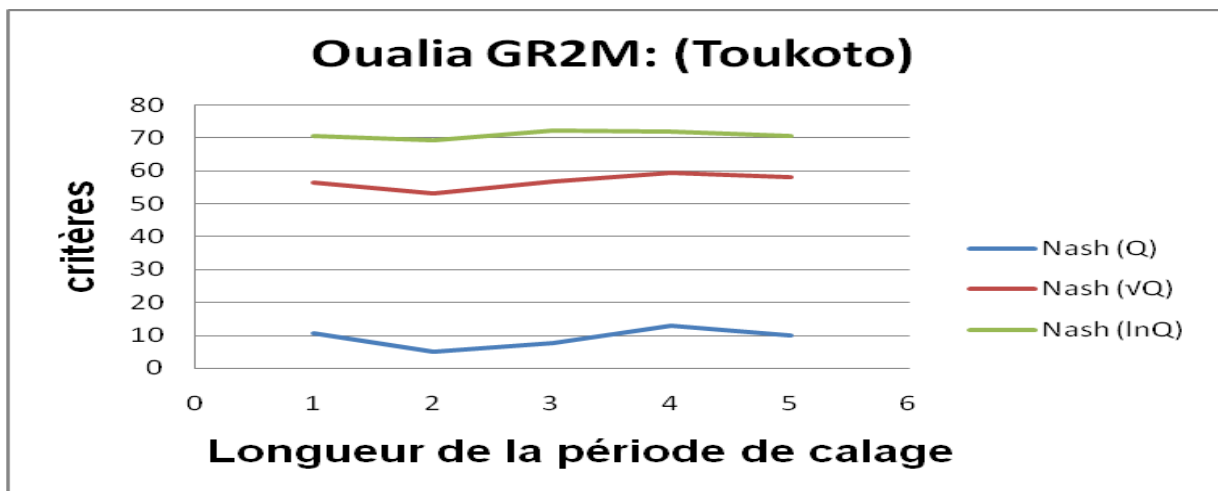


Figure 31 : hydrogrammes de transformation de la pluie en débit par le modèle de GR2M

Calage 1982-1986 Validation 1987-1993

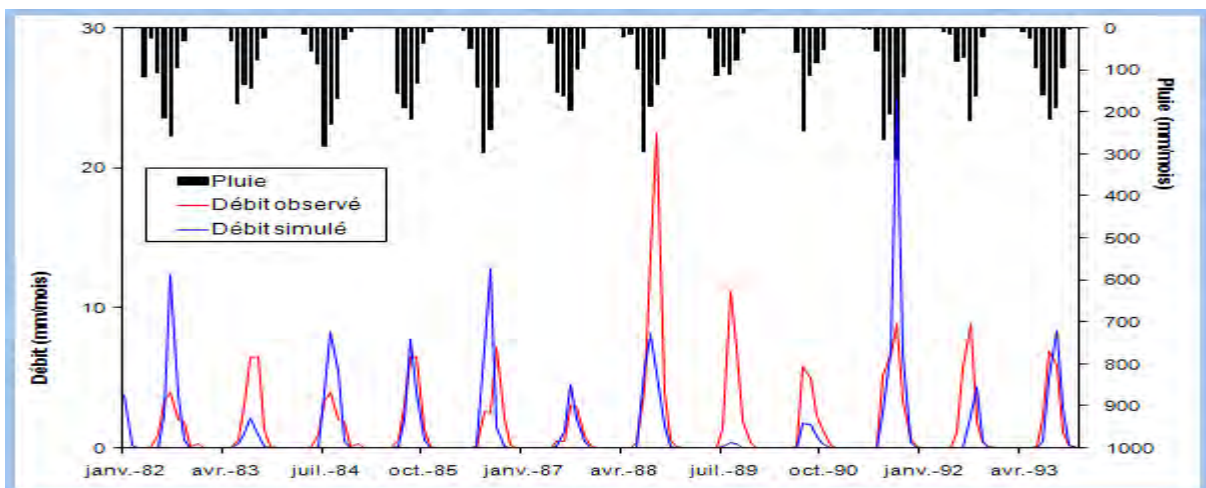


Tableau 13 : Paramètres optimaux retenus par bassin pour le GR4J

Stations	Paramètres optimaux				Critères de validation			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan
Gourbassi	7,29	-0,19	3,45	0,80	43,9	72,4	69,4	85,4
Bafing Makana	-8,89	-4,48	6,63	2,22	71,1	83,7	81,6	92,6
Oualia	4,13	-4,06	5,79	0,63	66,1	78,7	75,3	88,7

Tableau 14 : Paramètres optimaux retenus par bassin pour le GR2M

Stations	Paramètres optimaux		Critères de validation			
	X ₁	X ₂	Nash (Q)	Nash (\sqrt{Q})	Nash (lnQ)	Bilan
Gourbassi	6,85	0,67	80,1	89,4	92,6	94,7
Bafing Makana	6,94	1,31	75,0	76,1	53,9	101,0
Oualia	6,20	0,25	54,9	81,6	89,9	91,3

Conclusion :

Nous avons pour chaque bassin et sur la période retenue fait varier la longueur de la période de calage et de validation et calculé les paramètres et les différents critères de qualité. Nous avons rassemblé pour chaque bassin dans un tableau les paramètres des modèles GR4J et GR2M ainsi que les critères de qualité retenus (Tableaux 5 à 12). Pour chacun des critères nous avons retenu les valeurs optimales des critères sur le bassin considéré. Les résultats ont montré que :

Avec le GR4J nous avons :

Pour les sous bassins de la Falémé à Gourbassi et du Bafing à Bafing Makana, les paramètres tout comme les critères varient peu. On observe le contraire pour le Bakoye à Oualia. Pour les trois sous bassins, le critère de Nash calculé sur la racine carrée est généralement plus élevé ; il est suivi du critère de Nash calculé sur le logarithme népérien des débits. Le critère calculé sur les débits naturels est plus faible comparé aux autres.

Les trois critères sont plus élevés pour le bassin du Bafing à Bafing Makana, sous bassin sur lequel ils dépassent 70%, allant même jusqu'à plus de 80% quand on considère le critère de Nash calculé sur la racine carrée et le logarithme des débits. Pour le sous bassin du Bakoye à Oualia, on note un décrochement de l'ensemble des critères à partir d'une longueur de calage de 3 jours.

Le critère de Nash calculé sur les débits est très faible, voire mauvais dans certains cas. Le modèle GR4J aura tendance à mal reproduire les débits élevés.

Avec le GR2M nous avons comme précédemment :

Représenté l'évolution des paramètres en fonction de la longueur de calage et de la période de validation. Pour les 3 bassins, nous notons que :

Les paramètres varient peu

Les critères de qualité sont généralement plus élevés comparés à ceux obtenus pour le GR4J

Le critère de qualité calculé sur la racine carrée est généralement meilleur (plus de 70% pour les trois bassins)

Les critères sont meilleurs pour la station de Gourbassi.



**CONCLUSION
GENERALE**

Ce travail s'est effectué dans le cadre de recherches développées dans le laboratoire d'hydraulique et de la Mécanique des fluides du Département de Physique de l'UCAD. IL avait comme objectif de faire une modélisation pluie débit sur le Fleuve Sénégal en vue de comprendre le comportement de ses différents sous bassins et de pouvoir faire des prévisions contre les catastrophes naturelles. Ainsi nous avons utilisés des modèles pluie débits comme le GR4J et le GR2M développés au CEMAGREF au début des années 1980 par Claude Michel (1983) à partir du modèle CREC. En effet ces deux modèles sont utilisés au profit des autres du fait de leurs simplicités, de leurs efficacités et de leurs nombres de paramètres réduits (4) pour le GR4J et (2) pour le GR2M.

Les simulations que nous avons faites avec les trois sous bassins (Oualia, Gourbassi et Bafing Makana) en utilisant ces deux modèles nous ont donnés de résultats satisfaisants pour Gourbassi et Bafing, pour le cas d'Oualia les résultats ne sont pas fameux ; ceci s'expliquerait du fait que la station pluviométrique utilisée se trouve hors du bassin. Les critères d'évaluation pour valider ces modèles sont ceux de Nash et Sutcliffe (1970) qui sont évalués à 70%. Avec le GR4J les résultats sont satisfaisants comme nous l'avons tantôt pour ces sous bassins sauf Oualia. Cependant avec le GR2M les simulations sont bons pour n'importe lequel de ces sous bassins ce peut être expliqué par la stabilité de ces paramètres contrairement au GR4J. Dans nos simulations nous avons fait varier la longueur des périodes pour voir la variation des paramètres avec ces dernières (longueur des périodes). Ainsi nous remarquons plus la longueur de la période est longue mieux sont les résultats.

La différence observée entre ces deux modèles n'est pas de nature à mettre une quelconque doute sur la qualité de ces modèles. C'est ainsi que le modèle GR2M peut être suffisant pour des projets qui ne demandent pas de grandes précisions, pour lesquels les valeurs grossières ne posent pas de grands problèmes.

PERSPECTIVES

Dans nos perspectives nous essayerons :

De restituer les lacunes présentes parfois dans nos données ;

D'essayer simuler tous les sous bassins du fleuve Sénégal et si possible de la Gambie ;

D'utiliser le modèle SWAT pour compte des conditions climatiques ;

De faire une prévision sur une longue période voir vingtaine à trentaine d'années.

De compiler le code fortran pour avoir les paramètres réels des sous bassins étudiés et diminuer les écarts entre les débits simulés et calculés.

Faculté des sciences et techniques/Département de physique

Prénom et Nom : **Masseck BOYE**

Titre : **Modélisation de la relation pluie-débit dans le bassin amont du fleuve Sénégal.**

Nature du mémoire : **Diplôme d'Etudes Approfondies en Hydraulique et Mécanique des Fluides**

Date et lieu de soutenance : **30 Novembre 2009 à la FST/UCAD**

Composition du jury :

Président : M. Aboubaker Chedikh	BEYE	Professeur Titulaire	FST/UCAD
Membres : M. Joseph	SARR	Maître de conférences	FST/UCAD
M. Soussou	SAMBOU	Maître Assistant	FST/UCAD
M. Gora	NDIAYE	Ingénieur hydrologue	DGPRE

Résumé : La modélisation hydrologique qui permet de mieux comprendre le comportement hydrologique des bassins versants est devenu un outil incontournable dans la gestion des ressources en eau. Elle fournit aux décideurs une aide précieuse dans la planification des ressources en eau. Dans ce mémoire, nous avons utilisé deux modèles pluie – débit globaux, le GR4J et le GR2M développés au CEMAGREF vers les années 1980 par Claude MICHEL, ainsi revu par Perrin et al. en 2003. Ces deux modèles sont très utilisés de par leur simplicité et du peu de paramètres qu'ils utilisent. Le calage et la validation de ces modèles ont été faits sur les sous bassins de la Falémé à Gourbassi (1966 à 1993), du Bakoye à Oualia (1982 à 1993), et du Bafing à Bafing Makana (1966 à 1983). Les résultats obtenus sont généralement satisfaisants, même si le GR2M conduit à des critères de qualités meilleurs. Les contre performances des modèles notées ouvrent des perspectives d'amélioration dans le futur. L'avènement des modèles climatiques permet d'utiliser ces modèles dans la gestion à long terme des ressources en eau.

Mots clés : bassin versant ; fleuve Sénégal ; modèles hydrologiques ; modèle pluie-débit ; GR4J ; GR2M, critères de Nash ; calage, validation ; optimisation ; cycle de l'eau

Références Bibliographiques

- BADJI Ansou Malang (2008)** : Mémoire de DEA sur la modélisation de la relation pluie-débit et prévision des crues et des étiages sur l'exemple du bassin versant de la Falémé.
- Berthier (2005)** : Quantification des incertitudes des débits calculés par un modèle pluie débit empirique. Mémoire de Master 2^{ème} année Science de la terre, spécialité hydrologie, Hydrogéologie et Sols ; Université Paris Sud 11 ; 54 pages.
- Claudia Rojas Serna (2005)** : Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ?
- Cormary, Y. et Guilbot, A. (1973)**. Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d'investigation. Proceedings of the IAHS Madrid Symposium, IAHS Publ. 108, 265-279.
- Devred, D. (1989)**. Etude pluviométrique du bassin de la Sambre. Etude hydrologique du sous-bassin de la Solre. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille - Flandre – Artois, 382 p.
- Edijatno (1987)**. Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur (Strasbourg), Cemagref (Antony).242p.
- Edijatno (1991)**. Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier (Elaboration of a simple daily rainfall-runoff model). Ph.D. dissertation, Louis Pasteur University (Strasbourg) / Cemagref (Antony), France, 625 p.
- Edijatno et Michel, C. (1989)**. Un modèle pluie-débit à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2, 113-121.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhlouf, Z. et Michel, C. (1999)**. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2), 263-278.
- GADIAGA Adama (1997)** : Mémoire de DEA sur la recherche d'un modèle pluie-débit sur un micro-bassin en zone sahélienne.
- Kabouya, M. (1990)**. Modélisation pluie-débit aux pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat Thesis, Université Paris Sud Orsay, 347 pp.
- Kabouya, M. et Michel, C. (1991)**. Monthly water resources assessment, application to a semi-arid country. Revue des sciences de l'Eau, 4(4), 569-587.
- KANE Alioune 1985** : Thèse de doctorat D'état sur le fleuve Sénégal.

- Loumagne, C. (1988).** Prise en compte d'un indice de l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit. Thèse de Doctorat, Université de Paris Sud (Orsay), Cemagref (Antony), 200 p.
- Makhlouf, Z. (1994).** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat. Université de Paris XI Orsay / Cemagref (Antony), 228 p.
- Makhlouf, Z. et Michel, C. (1994).** A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.
- Malanda Nimy E. N. (2008) :** Thèse doctorale, étude statistique et modélisation pluie-débit à l'aide des modèles conceptuels globaux GR4J et GR2M. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 73p
- Michel, C. (1983).** Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre. *La Houille Blanche*, 1, 39-44.
- Mouelhi, S., 2003.** Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF, Cemagref Antony, France, 323 pp.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V. (2006a)** Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *J. Hydrol.* 318(1-4), 200-214, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.014.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. et Andréassian, V. (2006b)** Linking stream flow to rainfall at the annual time step: the Manabe bucket model revisited. *J. Hydrol.* 328, 283-296, doi:10.1016/j.jhydrol.2005.12.022.
- Musy A. :** Cours d'hydrologie générale.
- Nascimento, N.O. (1991).** Adaptation d'un modèle conceptuel journalier (GR3J) aux bassins versants de cours d'eau intermittents. Mémoire de DEA, ENPC, ENGREF, Université Paris Val de Marne, 89p.
- Nascimento, N.O. (1995).** Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat, CERGRENE / ENPC, Paris, France, 550 p.
- Oddos A. (2002) :** Intérêt d'une approche semi-distribuée par rapport à une approche globale en modélisation pluie-débit. Diplôme d'ingénieur de l'ENGEES et DEA Mécanique et Ingénierie, option : « Sciences de l'eau » ; université Louis Pasteur, Strasbourg ; 98p.
- Oudin L. (2004) :** Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse Doctorat ; Ecole Nationale du Génie Rural, des eaux et Forêts, centre de Paris ; 495p.

- Paysan J. L. (2007) :** Prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle global pluie-débit. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Centre de Paris ; 256p.
- Perrin, C. (2000).** Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony), 530 p.
- Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003).** Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology* 279(1-4), 275-289.
- Plantier M. (2003) :** Prise en compte de caractéristiques physiques du bassin versant pour la comparaison des approches globales et semi-distribuées en modélisation pluie-débit. Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES et DEA Mécanique et Ingénierie, option : « Sciences de l'eau » ; université Louis Pasteur, Strasbourg ; 93p.
- Rochette C. (1974) :** Le bassin du fleuve Sénégal. Monographie hydrologique ; ORSTOM, Paris, pp. 307-312.
- Serna C.R. (2005) :** Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? Thèse Doctorat, Cemagref d'Antony, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 320p
- Trouillet T. (2006) :** Modélisation hydrologie du bassin versant de la Rehraya (Maroc). Master 2, Recherche Eaux Environnement ; Université Montpellier II ; 38p.
- Uhlenbrook S. Seibert J. Leibundgut C. Rodhe A. (1999) :** Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. *Hydrological Sciences journal*, 44(5) ; pp 779-797.