



DIRECTION DES ETUDES ET DES
SERVICES ACADEMIQUES.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE D'INGENIEUR
DE L'EQUIPEMENT RURAL**

Présenté par :

HOFFER Homéakéké Komlan

Thème

*Comparaison de différents schémas de modélisation
hydrologique au pas de temps mensuel.*

Professeurs responsables : LAROCHE Christophe
MAR Lamine Amadou

Promotion 2005

Je souhaite pour finir souligner à quel point j'ai apprécié d'avoir rencontré et côtoyé tous les amis de la 34^{ième} promotion : Une bande de joyeux lurons avec qui j'ai partagé des moments de bonheur mémorables ; Ces amis venant d'horizons et de pays variés qui ont tous laissé leurs empreintes en moi.

AUTEUR : HOFFER Homéakéké Komlan

Professeurs responsables : LAROCHE Christophe ; MAR Lamine Amadou

THEME :

Comparaison de différents schémas de modélisation hydrologique au pas de temps mensuel.

RESUME :

Les modèles pluie – débit sont des outils performants, bien que toujours perfectibles, pour répondre aux besoins de la gestion et de la prévision des ressources en eau et de leur évolution. A partir de données en temps réel ou de prévisions de précipitation, ils sont capables d'évaluer le débit et son évolution en un point donné du cours d'eau. Mais les faibles connaissances que nous avons des processus élémentaires de transformation de pluie en débit, ainsi que les fortes variabilités spatiales et temporelles des caractéristiques physiques du bassin, des précipitations, de l'évapotranspiration, font que les modèles ne représentent jamais le fonctionnement exact du bassin.

Par conséquent il faudrait trouver parmi les modèles GR2 ou 3M celui qui s'approche au mieux des réalités des bassins versants d'Afrique de l'Ouest et du Centre. Sur un échantillon de soixante bassins nous avons retenu seize bassins, en raison de quatre bassins par régime climatique.

De l'analyse des résultats il ressort que le modèle GR3M de Mouehli est le plus performant et le plus robuste. Les modèles GR3M de Kabouya et GR2M de Makhlof simulent aussi bien les débits sur les bassins versants retenus. Pour le modèle GR2M de Mouehli, nous avons obtenu des valeurs de critères de Nash négatives sur les bassins versants du régime tropical. Ce qui signifie que ce modèle ne s'adapte pas aux bassins de ce régime climatique.

Pour ce qui concerne l'estimation du volume écoulé sur un bassin versant, les modèles GR3M de Kabouya et de Mouehli semblent les mieux adaptés. Alors que celui de

Mouehli GR2M n'est pas du tout conseillé pour une quelconque évaluation des ressources en eau sur les bassins versants du régime tropical.

Les modèles sont plus performants et plus robustes sur les bassins versants les plus arrosés. Existe-t-il une corrélation entre l'évolution des qualités d'un modèle et les régimes climatiques sur lesquels le modèle est appliqué ?

Mots clefs : Modèles hydrologiques : GR2 et 3M, Comparaison, Performance, Robustesse, Bassins versants, évaluation de ressource en eau.

Sommaire :

Remerciements :	3
RESUME :	4
Liste des figures :	7
Liste des tableaux :	8
Liste d'annotations	9
Introduction générale	10
1 - Objectifs de l'étude	11
2 - Méthodologie générale	12
3 - Contenu du rapport.....	13
I - Description de l'Echantillon	13
I.1- Régime hydrologique	13
I.1.1 - Régime sahélien.....	14
I.1.2 - Régime tropical pur	15
I.1.3 - Régime tropical de transition.....	15
I.1.4 - Régime équatorial de transition.....	15
I.2- Choix d'un échantillon de bassins	16
I.3- Quelques critiques de l'échantillon de données	17
I.4- Identification des sous périodes de l'étude.....	18
II - présentation des modeles GR2M, GR3M et leurs applications	19
II.1- Relation pluie – débit	19
II.2- Modélisation pluie – débit	19
II.3- Présentation des modèles GR	20
II.3.1 - Présentation du modèle GR2M : Version de Makhoulf	21
II.3.2 - Présentation du modèle GR2M : Version de Mouehli	25

- II.3.3 - Présentation du modèle GR3M : Version de Kabouya..... 28
- II.3.4 - Présentation du modèle GR3M : Version de Mouehli 31
- II.4- Les variables des modèles GR..... 32
 - II.4.1 - La pluie..... 32
 - II.4.2 - L'évapotranspiration..... 32
 - II.4.3 - Le débit..... 32
 - II.4.4 - Les paramètres des modèles 33
- II.5- Les facteurs limitant l'application des modèles 34
- III - méthodologie de modelisation 35**
 - III.1- Choix de la fonction critère 35
 - III.2- Description de la méthode d'optimisation..... 37
 - III.2.1 - Cellule cible à définir 38
 - III.2.2 - Cellules variables..... 38
 - III.2.3 - Contraintes..... 38
 - III.2.4 - Option du solveur 38
 - III.3- Initialisation du système et période de mise en route 39
- IV - Méthodologie de comparaison..... 40**
 - IV.1- La performance..... 41
 - IV.2- La robustesse 42
 - IV.3- Estimation de la ressource disponible. 42
 - IV.4- Etude de l'influence de la superficie des bassins sur la performance des modèles 43
- V - presentation et analyse des resultats de la comparaison..... 43**
 - V.1- Analyse des résultats des modèles sur les bassins testés 44
 - V.1.1 - Bassins du régime sahélien..... 44
 - V.1.2 - Bassins du régime tropical pur 47
 - V.1.3 - Bassins du régime tropical de transition..... 51
 - V.1.4 - Bassins du régime équatorial de transition 54
 - V.1.5 - Conclusion..... 57
 - V.2- Analyse comparative des modèles..... 59
 - V.2.1 - Analyse de l'influence des périodes sur la performance et la robustesse des modèles . 59
 - V.2.2 - Comparaison des modèles de l'estimation de la ressource disponible 60

Liste des tableaux :

Tableau 1 : liste des bassins versants 17

Tableau 2 : Récapitulation de la performance et de la robustesse des modèles sur les bassins du régime Sahélien 47

Tableau 3: récapitulation de la performance et de la robustesse des modèles sur les bassins du régime tropical pur..... 50

Tableau 4: Récapitulation de la performance et de la robustesse des modèles sur les bassins du régime Tropical de Transition..... 54

Tableau 5: Récapitulation de la performance et de la robustesse des modèles sur les bassins du régime équatorial de Transition..... 57

Tableau 6: Comparaison des modèles: Performance et robustesse 58

Tableau 7: Comparaison des erreurs relatives sur les volumes annuels moyens d'eau écoulée 60

La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire, ou à l'une des différentes facettes du risque hydrologique. Elle est censée pouvoir décrire de manière aussi fidèle que possible les différentes étapes de la transformation pluie débit et en particulier les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages. Elle est sensée aussi fournir des informations exploitables pour le dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, d'ouvrages de protection contre les crues ou pour la gestion hydrologique du bassin versant étudié. Elle est d'autant plus nécessaire que la croissance économique est forte et la consommation d'eau importante, obligeant à gérer au mieux ces ressources. Elle est indispensable, quelque soit le degré de développement national, pour atténuer les effets des catastrophes naturelles telles que les crues et la sécheresse.

Le rythme relativement lent des processus hydrologiques et leur décalage par rapport aux processus météorologiques, plus rapides, rendent possible la prévision de certains aspects du cycle hydrologique.

Le modèle hydrologique GR2M a été utilisé sur une cinquantaine de bassins versants d'Afrique de l'ouest et du centre (source : EIER). Les performances souvent encourageantes de ce modèle sont pourtant quelques fois en deçà des espérances. La qualité souvent incertaine des données hydrologiques utilisées (pluie et débit) peut expliquer en partie ce phénomène. Toutefois, sur certains bassins versants, les paramètres optimisés du modèle semblent sortir de la plage de variation admise ; Ceci pourrait s'expliquer aussi par le choix initial du schéma de modélisation (version Makhoulf). D'autres schémas existent et méritent d'être testés, tels que les autres version de GR(2 ou3)M.

1 -Objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail est de comparer les quatre versions de GR notamment les versions de Makhoulf, Mouehli (GR2M et GR3M) et celle de Kabouya à travers une sélection de bassins versants représentatifs des différentes situations rencontrées : régimes hydrologiques différents, petits et grands bassins, peu de lacune...

Pour cela, pour chaque version du modèle, la manière de retranscrire les écoulements à l'exutoire des bassins versants testés sera appréhendée.

On tentera aussi de comparer l'évolution des paramètres optimisés des modèles en fonction de l'information hydrométrique disponible lors de la phase de calage et utiliser les paramètres optimisés en phase de validation.

2 -Méthodologie générale

Notre approche méthodologique est axée sur la comparaison de quatre modèles conceptuels déterministes au pas de temps mensuel.

Recherche documentaire

Cette phase nous a permis de cerner le sujet dans sa globalité :

- Se familiariser avec les termes hydrologiques

Nous avons révisé les définitions et revu les sens des mots qui interviennent dans le concept hydrologique.

- Comprendre la modélisation hydrologique : son but et ses objectifs

Il s'agit de connaître la nécessité de la modélisation et d'évaluer les résultats attendus

- Comprendre le fonctionnement des versions des modèles GR et leur application

Découvrir l'architecture des différents modèles et avoir un premier aperçu de leur structure.

Maîtrise de l'outil de modélisation

- Comparer l'architecture des modèles afin de bien appréhender les différents points qui existent au niveau de leur structure.
- Sélectionner les bassins versants qui seront retenus pour la suite du travail :

Parmi la soixantaine de bassins disponibles nous allons essayer d'en retenir une quinzaine qui constitueront les données de base de notre étude. L'échantillon doit être représentatif des différentes situations rencontrées : régimes hydrologiques ; petits et grands bassins...

- Elaborer une méthodologie de modélisation

Pour bien optimiser le temps, cette phase consiste à simuler sur le tableur EXCEL les différents modèles à utiliser

- Elaborer une méthodologie de comparaison des quatre modèles

Pour pouvoir comparer ces modèles, il faut au premier abord poser des conditions ou des critères. Il nous revient de choisir les bases des critères qui évalueront ces différents modèles.

- Quelques essais de modélisation

Modélisation Pluie – Débit sur les modèles

Ce travail consiste à appliquer les quatre modèles sur les bassins versants retenus.

Comparaison des modèles

Il sera fait une analyse comparative des résultats issus des quatre modèles suivant les critères qui seront retenus. L'évaluation de la performance et de la robustesse de chaque modèle sera appréhendée.

3 -Contenu du rapport

Le présent rapport gravite autour de quatre points qui reflètent la méthodologie adaptée pour la réalisation du travail. Il s'agit de la description de l'échantillon des bassins versants et de la présentation des différents modèles ; de la méthodologie de modélisation et de comparaison et enfin de la présentation et de l'analyse des différents résultats issus de la modélisation.

I - DESCRIPTION DE L'ECHANTILLON

Nous allons présenter les différents types du régime hydrologique et les caractéristiques de l'écoulement sur les bassins versants.

I.1- Régime hydrologique

Le régime hydrologique d'un cours d'eau est déterminé par la répartition des précipitations dans le temps et par les caractéristiques de son bassin versant. Ces caractéristiques comportent d'une part, les facteurs concernant le sol du bassin à savoir : la constitution du

sol (texture et structure), la couverture végétale, la pente, l'hydrographie, et d'autre part, les divers facteurs climatologiques propres au bassin intervenant dans le processus d'évaporation. En Afrique Noire, les précipitations se reproduisent à intervalles réguliers et sont bien groupées ; le terrain est généralement imperméable, de sorte que les diagrammes saisonniers des débits sont souvent voisins des diagrammes de précipitations observées. Les régimes hydrologiques seront donc principalement caractérisés à partir des critères climatologiques.

En effet la zone d'étude dans le cas de cette étude se caractérise par des régimes tropicaux et équatoriaux. Le climat tropical est caractérisé essentiellement par une saison sèche et saison de pluie, toutes deux bien marquées. Indépendamment de la rareté des précipitations, la saison sèche est caractérisée par de grands écarts de température : nuits relativement froides, journées chaudes, alors que la saison des pluies présente de faibles écarts de température et des moyennes assez faibles. Le climat équatorial se caractérise par deux saisons des pluies bien distinctes. La transition est insensible entre régime tropical et régime équatorial. Le climat se modifie, en effet, de façon progressive du nord au sud, modification marquée par l'importance relative de la petite saison sèche.

En Afrique, les régimes hydrologiques présentent certains points communs. Ils évoluent progressivement, en liaison avec le phénomène désigné sous le vocable de « mousson », du régime équatorial au régime tropical, sans que cette évolution soit troublée par d'importants reliefs. Les périodes de crues se produisent en plein été boréal dans les régimes à une seule période de hautes eaux où encadre le milieu de l'été dans les régimes à deux saisons de pluies. Un autre point commun est la faible irrégularité interannuelle constatée, fortement liée à la mousson (Paturel et al, 1999).

Les critères de classification utilisés sont ceux utilisés par J RODIER dans son ouvrage intitulé « Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo »

1.1.1 - Régime sahélien

Le régime sahélien est compris entre les isohyètes 300 et 750 mm. Il présente souvent une très longue saison sèche et des crues sporadiques donnant lieu à une durée totale d'écoulement faible. Généralement, en ce qui concerne les cours d'eau ayant leur source ou origine en zone sahélienne, on constate une forte irrégularité inter annuelle et de faibles débits de crues. Pour ce qui est des cours d'eaux tropicaux débouchant en zone sahélienne,

(Niger) la dégradation hydrographique devient très marquée, d'autant plus que, très souvent, ces fleuves abordent d'anciennes cuvettes lacustres. Les plaines d'inondation sont alors extrêmement étendues. De nombreux affluents se forment qui rejoignent parfois le lit principal après des pertes importantes par évaporation, se perdent dans les dépressions fermées où ils constituent des lacs permanents ou non, comme le cas du Niger ou peuvent être capté par d'autres cours d'eau. Les conséquences importantes de ces différents phénomènes sont la régularisation des débits de crue et une considérable perte d'eau par évaporation et infiltration.

1.1.2 - Régime tropical pur

Il présente une saison de hautes eaux de juillet à début Octobre et une saison de basses eaux de début décembre à début juin. Il est limité aux Nord, aux isohyètes 750 à 800 mm et au Sud, aux isohyètes 1200 à 1300.

1.1.3 - Régime tropical de transition

Il se distingue du régime tropical pur par une saison de hautes eaux beaucoup plus longue et une saison de basses eaux bien moins sévère. On distingue une autre variante du régime de transition celle dite dahoméenne ; elle est caractérisée par des précipitations plus faibles que précédemment. Les étiages sont beaucoup plus rigoureux que dans le régime de transition. Les modules sont plus faibles. A cet égard, ce régime ressemble beaucoup plus au régime tropical pur. La différence essentielle est une période de hautes eaux plus longue, mais pas plus au total (Rodier, 1964). L'abondance annuelle dans les cours d'eau dépend plus de la répartition de la pluviométrie que du total enregistré sur l'année. Cela explique la forte irrégularité inter annuelle observée et des valeurs très différentes des débits maxima d'une année à une autre. Les étiages sont très rigoureux et la période de hautes eaux est plus longue que dans le cas du régime tropical de transition.

1.1.4 - Régime équatorial de transition

Nous avons ainsi seize bassins versants dont les caractéristiques sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

Régime	Nom de l'exutoire	Nom du cours d'eau	Pluviométrie moyenne annuelle	% de lacune	Superficie (km ²)	Chronique de débits observés
Sahélien	Alcongou	Gorouol	397	0,0%	42 444	1960 - 1982
	Garbe Koukou	Sirba	579	13,5%	38 871	1955 - 1995
	Dolbel	Gorouol	429	4,1%	7 505	1960 - 1995
	Kakassi	Dargol	455	12,9%	7 460	1956 - 1994
Tropical pur	Logozohe	Klou	1 049	4,8%	15 368	1951 - 1986
	Mbahiakro	Bandama	1 098	0,9%	15 368	1953 - 1993
	Tchoa	Tandjilé	1 016	6,9%	6 670	1953 - 1994
	Yendere	Comoé	1 094	0,7%	6 288	1955 - 1992
Tropical de transition	Amou	Amou Oblo	1 291	2,0%	197	1956 - 1990
	Ebeva	Amoutchou	1 230	2,9%	408	1956 - 1990
	Iradoukou	Kouroukélé	1 376	0,0%	1 820	1961 - 1992
	Lamakara	Kara	1 320	0,9%	1 502	1953 - 1990
Equatoriale de transition	Faranah	Niger	1 892	8,9%	3 171	1955 - 1995
	Pont de Magba	Mape	1 799	0,9%	4 259	1951 - 1980
	kankan	Niger	1 729	0,0%	10 047	1950 - 1995
	Baro	Niandan	1 748	0,0%	13 078	1950 - 1995

Tableau 1 : liste des bassins versants

I.3- Quelques critiques de l'échantillon de données

Dans notre échantillon, des problèmes sur les données sont évidemment présents. L'observation des lacunes hydrologiques sur un bassin, même si elles n'interviennent pas dans le calcul des fonctions objectif, peuvent considérablement influencer les résultats obtenus. Pour certaines sous – périodes la plage des chroniques de débit n'est pas assez conséquente pour pouvoir faire un calage et une validation de cinq ans pour chaque phase. Donc pour éviter une éventuelle influence de la période de calage sur la performance des modèles, nous avons retenu une période de calage de cinq ans et de période rétrécie en phase de validation allant jusqu'à deux ans pour le bassin de Kouroukélé à Iradougou. Par exemple sur ce bassin nous avons seulement des données à partir de 1961, ainsi pour la sous période humide qui serait de 1961 à 1968, il faudrait considérer une année de mise en route en plus cinq ans de période de calage ce qui ne laisse que deux ans de période de validation.

I.4- Identification des sous périodes de l'étude

De l'analyse bibliographique sur la variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale, il semble se dégager que la sécheresse actuelle est intervenue au début des années 1970. Les auteurs parlent de rupture climatique autour des années 1970. Cette rupture se traduit par une diminution nette de la pluviométrie.

En phase avec la chute des précipitations annuelles une importante diminution des écoulements a été observée, plus dans les régions tropicales que les régions équatoriales. Afin de mieux cerner l'influence du climat sur les qualités des modèles, nous avons divisé en deux sous – périodes les chroniques de débits observés ; avant et après la rupture climatique.

La période humide qui est la période d'observation avant 1970 est caractérisée par une pluviométrie importante ; la période sèche est celle qui commence à partir de 1970 et est caractérisée par une période de sécheresse.

Etant donné que la rupture climatique n'est pas observée juste en 1970 mais aux alentours des années 70, nous avons jugé opportun de considérer des sous – périodes avant 1968 et après 1972 pour ne pas tenir compte d'une éventuelle période de transition. Par conséquent nous avons retenu une période humide avant 1968 et une période sèche après 1972. Sur chaque sous – période nous avons fait des simulations en phase de calage et en validation.

II - PRESENTATION DES MODELES GR2M, GR3M ET LEURS APPLICATIONS

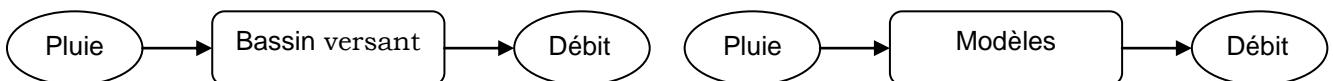
Les modèles pluie-débit sont des outils de représentation du fonctionnement hydrologique des bassins versants. S'ils donnent un cadre d'analyse et de compréhension de ce fonctionnement, ils sont par ailleurs utiles pour de nombreuses applications, tant dans le domaine de la recherche que dans le domaine de l'hydrologie opérationnelle.

II.1- Relation pluie – débit

La connaissance de la relation qui permet de transformer la pluie en débit est un élément fondamental de la gestion quantitative de la ressource en eau.

II.2- Modélisation pluie – débit

Très souvent, il y a insuffisance de données de débits alors que les données pluviométriques sont généralement abondantes. Il apparaît donc nécessaire, en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau par une connaissance plus précise des quantités d'eau disponible, de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie – débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.



Réalité

Modélisation

Généralement, un modèle est composé d'une architecture, des spécifications et d'une structure.

- ❖ L'architecture est la façon dont sont assemblés les différents opérateurs du modèle ;
- ❖ Les spécifications désignent les formes mathématiques données à ces opérateurs ;

indique le nombre de paramètres du modèle ; la dernière lettre, le pas de temps : J, pour journalier, M, pour mensuel. Modélisation hydrologique : Présentation des modèles GR2M et GR3M et leur application.

En effet, les auteurs du modèle parlaient en premier lieu d'un modèle conceptuel. Mais, dans la dernière publication (Edijatno et al. 1999), ils ont classé les modèles GR dans la catégorie des modèles empiriques pour les raisons suivantes : l'interprétation des variables internes du modèle (on doit s'abstenir de relier une variable de modèle à une mesure précise sur terrain) ; la présence de plusieurs paramètres fixés ; une représentation qui n'a parfois pas de lien direct avec le concept de cycle hydrologique.

Nous présenterons ci – dessous les versions de GR2M de Makhoulf et de Mouehli, et les versions de Mouehli et de Kabouya GR3M chacun de ces modèles de simulation de débits ont comme variables d'entrées la pluie, l'évapotranspiration potentielle et les données liées au stockage de l'eau dans le sol.

II.3.1 - Présentation du modèle GR2M : Version de Makhoulf

Le modèle GR2M a été élaboré au CEMAGREF sur un ensemble de bassins français (Makhoulf, 1994). La particularité de ce modèle réside dans sa simplicité ainsi que dans le nombre relativement faible de ses paramètres. Ce modèle « conceptuel global » de simulation de débits fonctionne au pas de temps mensuel et comporte deux paramètres X_1 et X_2 dont les valeurs sont déduites d'une période d'apprentissage durant laquelle sont comparés les débits observés et ceux calculés par le modèle grâce à la seule connaissance des pluies et de l'évapotranspiration potentielle de chaque mois. A travers ces valeurs, on vise bien sûr à réduire l'écart entre débits observés et débits calculés. Le modèle GR2M est constitué :

- D'un réservoir sol quadratique qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale A. La capacité A représente la capacité de rétention en eau du sol. La fonction de production équilibre au mieux le bilan en volume du bassin versant ; elle traduit la plus ou moins bonne aptitude du bassin versant à produire des écoulements.
- D'un réservoir eau gravitaire (linéaire) qui régit la fonction de transfert. La distribution des débits dans le temps (ici au pas de temps mensuel) est assurée par la fonction de transfert. Cette fonction rend compte du décalage dans le temps entre la pluie et les écoulements.

Le mode de fonctionnement du modèle GR2M peut se résumer de la façon suivante :

- Une fraction de la pluie mensuelle participe à l'écoulement direct,
- Le niveau du réservoir sol évolue en fonction de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle,
- La vidange progressive du réservoir eau gravitaire produit l'écoulement lent.

Les deux entrées pluie (P) et l'évapotranspiration (ETP) sont modulées dans la même proportion et concomitamment en multipliant les valeurs de ces entrées par un coefficient X_1 ($0 < X_1 < 1$) qui est le premier paramètre du modèle à estimer.

Ensuite, on soustrait une même quantité U à la pluie modulée ($P' = X_1 \cdot P$) et à l'évapotranspiration potentielle modulée ($ETP' = X_1 \cdot ETP$) du mois considéré. La quantité U est de la forme :

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

Ces opérations effectuées sur la pluie et l'évaporation modulées donnent respectivement :

$$P_n = X_1 \times P - U = P' - U \quad E_n = X_1 \times ETP - U = ETP' - U$$

Soit H le niveau du réservoir sol en début du pas de temps (début du mois i). Une partie de P_n augmente le niveau H du réservoir qui devient H_1 tel que :

$$H_1 = \frac{H + A \times V}{1 + \frac{H \times V}{A}} \quad \text{avec} \quad V = \tanh \frac{P_n}{A}$$

Le complément de P_n est donc : $P_e = P_n - (H_1 - H)$

Sous l'effet de E_n , le niveau H_1 du réservoir diminue et devient H_2 :

$$H_2 = \frac{H_1 \times (1 - W)}{1 + W \times \left(1 - \frac{H_1}{A}\right)} \quad \text{avec} \quad W = \tanh \frac{E_n}{A}$$

H_2 correspond au niveau du réservoir sol au début du pas de temps suivant. L'évapotranspiration réelle ETR peut être déduite par différence des niveaux du réservoir sol juste avant et après l'excitation de E_n

$$ETR = H_1 - H_2$$

Le réservoir eau gravitaire reçoit une partie $(1 - \alpha)P_e$ tandis que $\alpha \times P_e$ s'écoule directement. Si S est le niveau du réservoir eau gravitaire au début du mois i, S augmente et devient S_1 :

$S_1 = S + (1 - \alpha)P_e$. Le débit délivré par ce réservoir linéaire est Q_g tel que :

$$Q_g = X_2 \times S_1 \text{ avec } 0 < X_2 < 1. X_2 \text{ étant le second paramètre du modèle.}$$

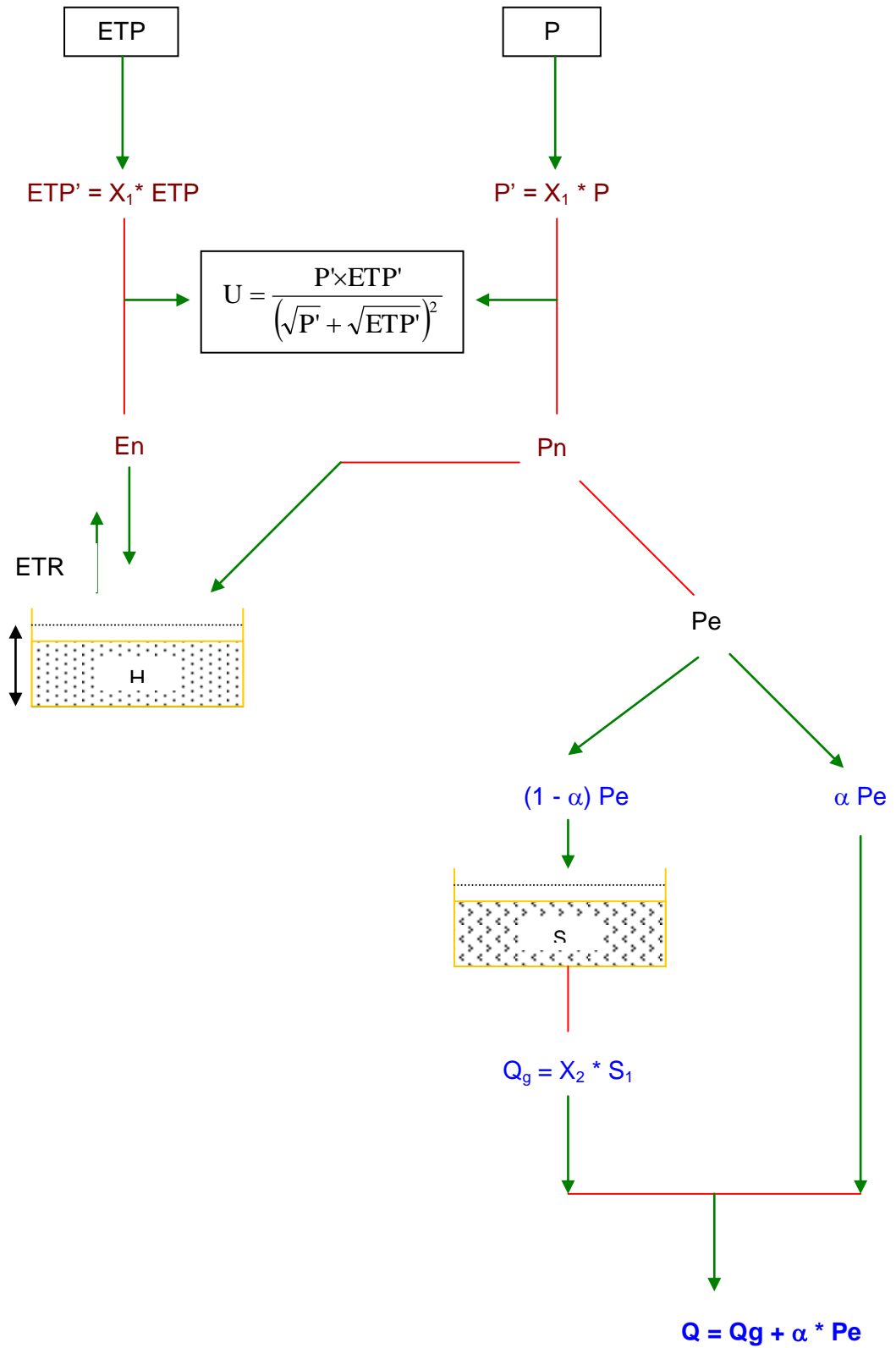
Le niveau S_2 du réservoir à la fin du mois i est alors : $S_2 = S_1 - Q_g$.

L'écoulement total Q s'écrit : $Q = Q_g + \alpha \times P_e$

« A » représente la superficie des bassins et la valeur « α » est nulle.

L'architecture du modèle GR2M est représentée sur la figure suivante Figure 1 :

11/10/2005 11:00:00 AM



Posant $W = \text{Tanh} \frac{P}{X_2}$, le niveau H_1 devient H_2 sous l'action de l'ETP (Opération 3) :

$$H_2 = \frac{H_1 \times (1 - W)}{1 + W \left(1 - \frac{H_1}{X_2}\right)}$$

Par percolation H_2 devient H_m à la fin du mois m (Opération 4) . H_m est donnée par la formule suivante :

$$H_m = \frac{H_2}{\left[1 + \left(\frac{H_2}{X_2}\right)^{2.5}\right]^{0.4}} \quad \text{et} \quad P_s = H_2 - H_m$$

Le réservoir S dont le niveau en début du mois est S devient S_1 (Opération 5) donné par la formule suivante :

$$S_1 = S + P_e + P_s$$

Sous l'effet de la vidange propre et des échanges souterrains S_1 devient S_2 donné par la formule :

$$S_2 = \frac{S_1}{X_1 + \frac{S_1}{50}} \quad S_2 \text{ devient le niveau du réservoir en début du mois suivant.}$$

L'échange, F (Opération 6) qui agit sur le réservoir R est donné par la formule suivante :

$$F = 50 \times (1 - X_1) \times \text{Ln} \left(1 + \frac{S_1}{X_1 \times 50}\right)$$

Le débit écoulé à la fin du mois m est donné par la formule suivante :

$$Q = (S_1 - S_2) + F$$

L'architecture du modèle GR2M version de Mouelhi (2002) est représentée sur la figure suivante, Figure 2 :

⊗ 11.000 / 2.000 / 3.000 / 4.000 / 5.000 / 6.000 / 7.000 / 8.000 / 9.000 / 10.000 / 11.000 / 12.000 / 13.000 / 14.000 / 15.000 / 16.000 / 17.000 / 18.000 / 19.000 / 20.000 / 21.000 / 22.000 / 23.000 / 24.000 / 25.000 / 26.000 / 27.000 / 28.000 / 29.000 / 30.000 / 31.000 / 32.000 / 33.000 / 34.000 / 35.000 / 36.000 / 37.000 / 38.000 / 39.000 / 40.000 / 41.000 / 42.000 / 43.000 / 44.000 / 45.000 / 46.000 / 47.000 / 48.000 / 49.000 / 50.000 / 51.000 / 52.000 / 53.000 / 54.000 / 55.000 / 56.000 / 57.000 / 58.000 / 59.000 / 60.000 / 61.000 / 62.000 / 63.000 / 64.000 / 65.000 / 66.000 / 67.000 / 68.000 / 69.000 / 70.000 / 71.000 / 72.000 / 73.000 / 74.000 / 75.000 / 76.000 / 77.000 / 78.000 / 79.000 / 80.000 / 81.000 / 82.000 / 83.000 / 84.000 / 85.000 / 86.000 / 87.000 / 88.000 / 89.000 / 90.000 / 91.000 / 92.000 / 93.000 / 94.000 / 95.000 / 96.000 / 97.000 / 98.000 / 99.000 / 100.000

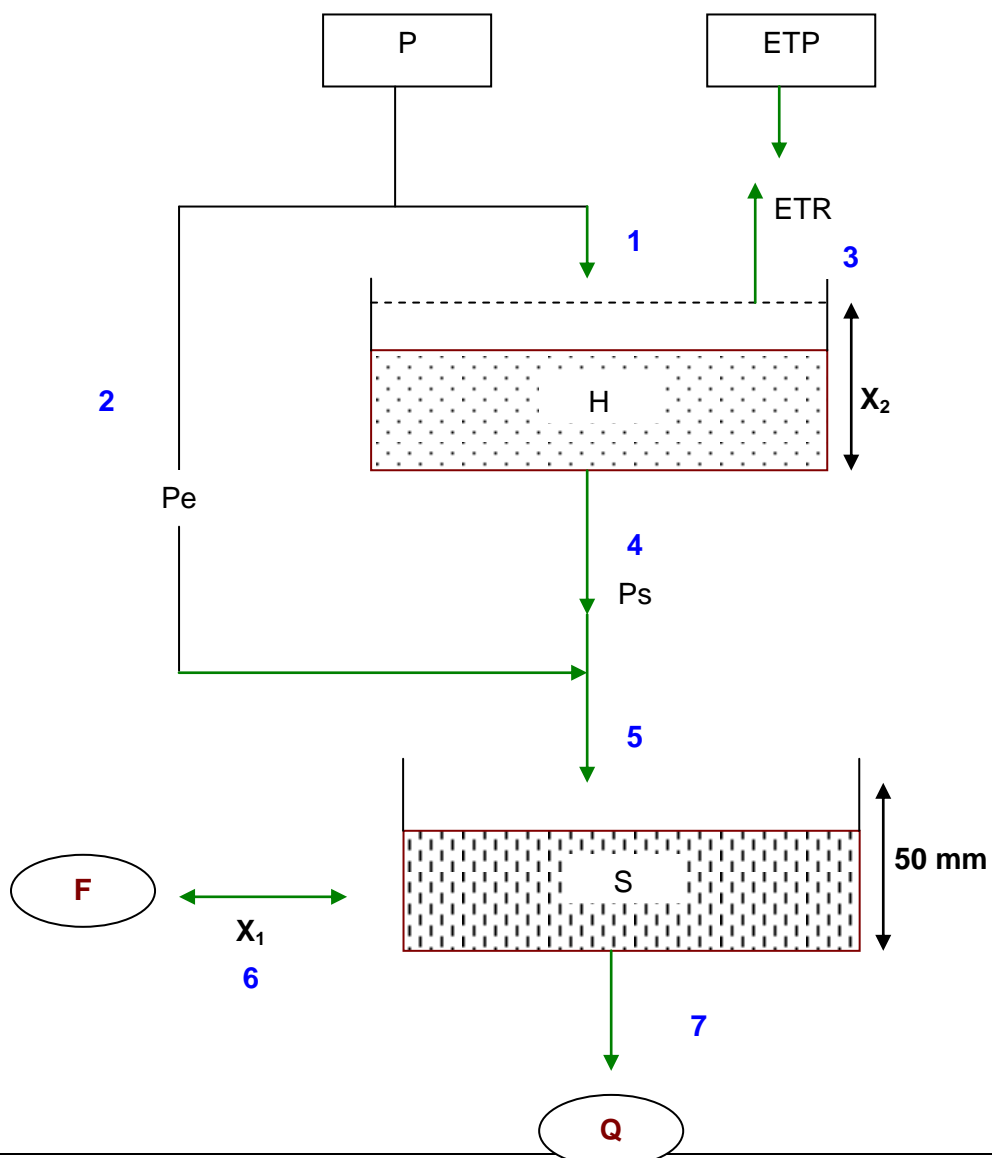


Figure 2: Architecture du modèle GR2M (Version de Mouehli, 2002)

II.3.3 - Présentation du modèle GR3M : Version de Kabouya

Suite aux travaux de Kabouya (1990, 1991) et de Makhoulf (1994), une variante à trois paramètres GR3M a été proposée. Ce modèle est très proche des autres modèles déjà présentés. Il est caractérisé par :

U

ne phase partielle 'd'ajustement' des données qui se traduit par un paramètre lié seulement à l'évapotranspiration. Contrairement au modèle GR2M version de Makhoulf, où le paramètre concerne la pluie et l'évaporation potentielle ;

une nouvelle forme d'interception **Z** ;

Contrairement au modèle GR2M de Makhoulf, le modèle de Kabouya présente un écoulement pseudo - direct caractérisé par son coefficient noté $\alpha = 0,5$.

Comme pour le modèle GR2M, il s'agit d'un modèle à deux réservoirs. Un réservoir 'Sol' caractérisé par le paramètre **A** qui représente sa capacité maximale et un réservoir linéaire de routage caractérisé par le paramètre **B**. En revanche, le troisième paramètre **C** est introduit plutôt pour 'corriger' l'évapotranspiration **ETP**, de la manière suivante :

$$ETP' = C \times ETP \quad \text{et} \quad Z = \frac{P \times ETP'}{P + ETP'}$$

L'obtention des valeurs de toutes les variables qui interviennent dans le modèle est possible grâce aux expressions mathématiques issues du modèle GR2M version de Makhoulf.

© 11 2005 / 2006 / 2007 / 2008 / 2009 / 2010 / 2011 / 2012 / 2013 / 2014 / 2015 / 2016 / 2017 / 2018 / 2019 / 2020 / 2021 / 2022 / 2023 / 2024 / 2025 / 2026 / 2027 / 2028 / 2029 / 2030 / 2031 / 2032 / 2033 / 2034 / 2035 / 2036 / 2037 / 2038 / 2039 / 2040 / 2041 / 2042 / 2043 / 2044 / 2045 / 2046 / 2047 / 2048 / 2049 / 2050 / 2051 / 2052 / 2053 / 2054 / 2055 / 2056 / 2057 / 2058 / 2059 / 2060 / 2061 / 2062 / 2063 / 2064 / 2065 / 2066 / 2067 / 2068 / 2069 / 2070 / 2071 / 2072 / 2073 / 2074 / 2075 / 2076 / 2077 / 2078 / 2079 / 2080 / 2081 / 2082 / 2083 / 2084 / 2085 / 2086 / 2087 / 2088 / 2089 / 2090 / 2091 / 2092 / 2093 / 2094 / 2095 / 2096 / 2097 / 2098 / 2099 / 2100

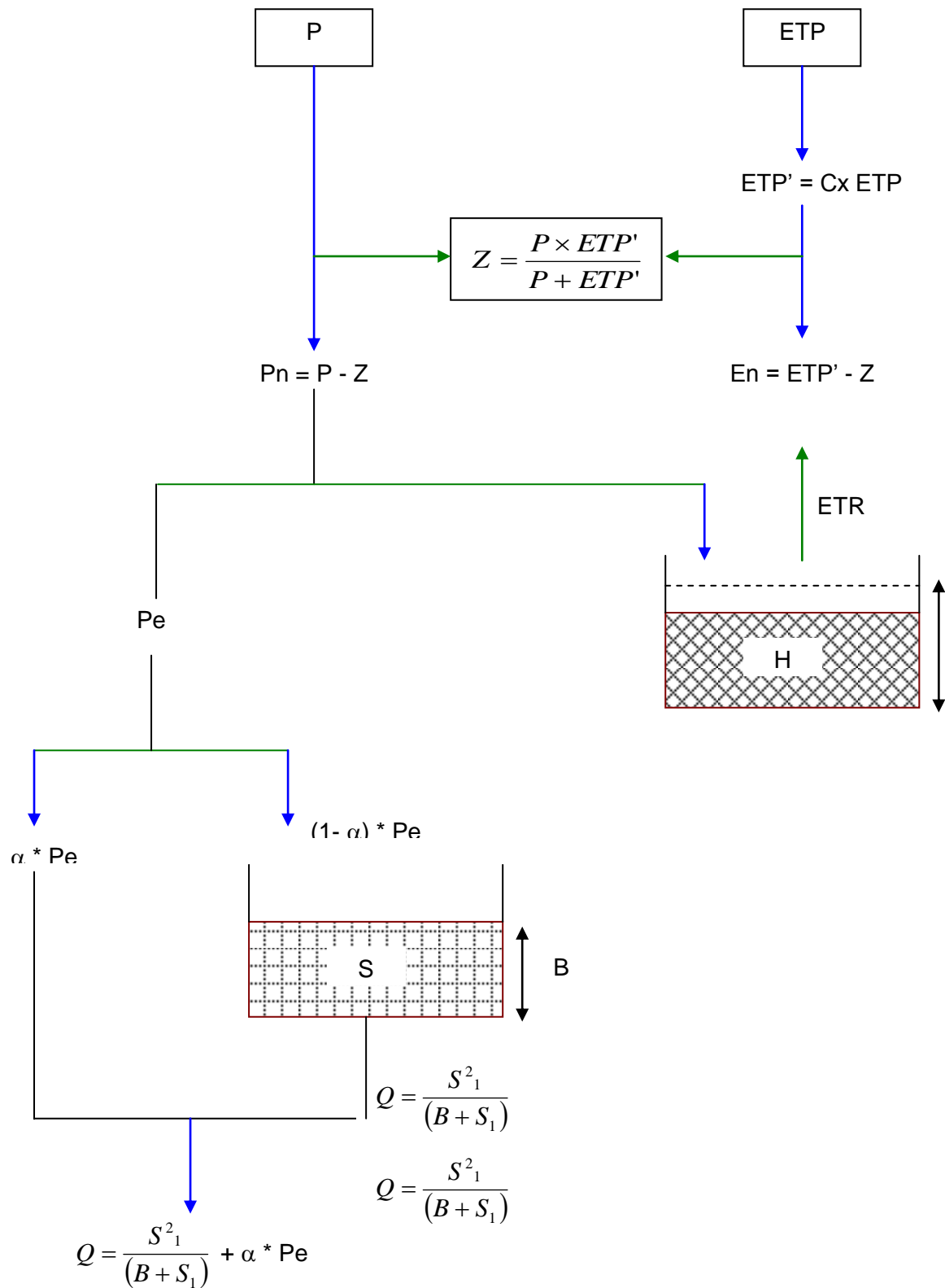


Figure 3: Architecture du modèle GR3M (Ancienne version, Kabouya, 1991)

Cette version est différente de la précédente par l'absence de l'écoulement direct et du paramètre B qui devient le coefficient de vidange. L'architecture du modèle GR3M nouvelle version est représentée sur la figure suivante, Figure 4.

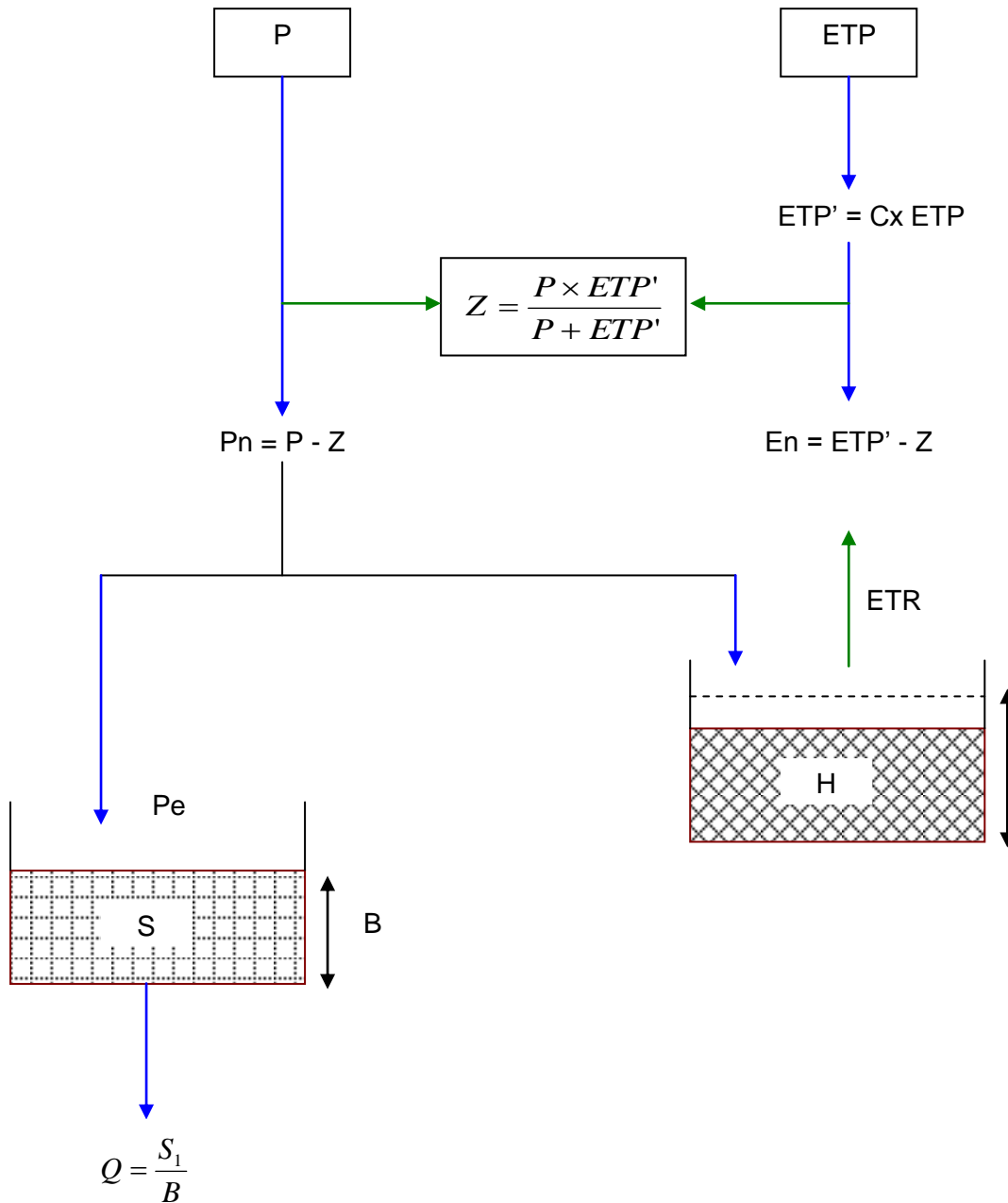


Figure 4: Architecture du modèle GR3M amélioré (Mouehli,2002)

II.4- Les variables des modèles GR

Les variables intervenant dans les différents modèles GR.

II.4.1 - La pluie

En tant qu'activité météorologique, la *pluviométrie* consiste presque toujours à mesurer une hauteur de précipitations pendant un intervalle de temps, c'est à dire qu'elle ne permet d'atteindre que le cumul des précipitations au cours de l'intervalle de temps considéré. On a coutume d'exprimer les précipitations journalières, mensuelles ou annuelles en millimètre par jour, par mois ou par an, réservant généralement l'expression en intensité (mm/h) à des intervalles de temps plus courts. L'usage a également consacré la *pluviométrie* comme l'étude de la répartition et du régime des précipitations. (Hubert, 1996).

Dans notre cas, la pluviométrie (P) est exprimée en *mm/mois*. Elle représente la hauteur d'eau tombée sur le bassin versant considéré et intégrant la distribution spatio-temporelle.

II.4.2 - L'évapotranspiration

L'Evapotranspiration Potentielle (ETP) est la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant. La valeur de l'évapotranspiration potentielle est fonction de l'énergie disponible (Margat, septembre 1997). Elle est estimée par une mesure par un évaporomètre ou déduite par des formules empiriques telles que celles de Penman (1968), Morton (1983). L'unité de l'évapotranspiration est le *mm/mois*.

II.4.3 - Le débit

Suite à une pluie tombée sur le bassin versant, tout un mécanisme complexe d'interaction de phénomènes hydrologiques et climatologiques se met en œuvre. Il se traduit par une circulation, directe ou indirecte, de l'eau à travers le sol ou le sous-sol en passant par les cours d'eau secondaires puis principaux, et finissant par l'exutoire du bassin versant. A l'échelle globale du bassin versant, le débit à l'exutoire traduit la réaction de tout le bassin suite à une pluie. Il est mesuré par différentes techniques hydrométriques, par exemple : le jaugeage par moulinet ou le jaugeage chimique. Ce débit est exprimé en mètre cube par

seconde (m³ /s) que nous ramènerons au besoin en millimètre par mois, pour une uniformisation de toutes les variables.

Les données de débit pour notre étude sont issues de la base de données de l'équipe de recherche hydrologique de l'EIER.

II.4.4 - Les paramètres des modèles

Les modèles GR sont des modèles sans lien direct avec la physique des processus hydrologiques. Leurs paramètres ne sont donc pas directement mesurables sur le terrain. Cependant, dans la plupart des applications d'hydrologie opérationnelle, les bassins versants sont non jaugés et l'utilisation de modèles pluie-débit présuppose une détermination des paramètres des modèles sans avoir recours au calage.

Il s'agit ici d'une approche explicative de quelques variables qui interviennent dans l'algorithme des modèles GR étudiés. Rappelons que les auteurs (Edijatno *et al*, 1999), ont suggéré : « on doit s'abstenir de relier une variable de modèle à une mesure précise sur terrain ».

II.4.4.1 - Ajustement des valeurs des deux entrées ETP et/ou P

Les variables d'entrée des modèles ETP et P (respectivement ETP) sont ajustées par le même paramètre multiplicatif X_1 , premier paramètre du modèle GR2M, (respectivement par C troisième paramètre du modèle GR3M) afin de donner respectivement P' et ETP' (respectivement ETP'). Ce paramètre agit comme un coefficient correcteur des variables entrantes du modèle. Pourquoi ajuste-on les variables P et ETP ?

A l'origine, les auteurs ont constaté qu'il y avait un grand écart entre les données entrantes et les données sortantes. Afin de réduire cet écart, il a été proposé non seulement de réduire les données P et ETP respectivement (ETP) qui constituent les deux véritables variables d'entrée, mais aussi laisser le modèle décider de quelle valeur corrective il a besoin.

Il faut souligner que ces dispositions ne sont pas la conséquence d'une conceptualisation de la transformation pluie – débit, mais qu'elles se sont imposées aux modélisateurs concernés comme leur semblant la meilleure façon de contribuer à améliorer l'ensemble des critères d'appréciation sur les bassins traités.

Interception et pertes initiales

Elle se traduit par une quantité U qui permet de calculer les quantités de pluie et d'évapotranspiration nettes participant effectivement à l'écoulement. En effet, seule une partie de la pluie tombée participe à l'écoulement et seule une partie de l'évapotranspiration potentielle soustrait de l'eau dans le réservoir sol.

A leur arrivée au sol, les précipitations rencontrent d'abord la végétation qui arrête une partie : c'est l'interception. L'interception constitue un premier niveau de stockage ; par la suite, l'eau retenue est évaporée et va s'inscrire comme pertes par évapotranspiration. Une partie de la pluie qui atteint le sol est stockée dans les dépressions imperméables du sol d'où elle est considérée comme pertes par évaporation. La fonction U permet alors de traduire ces phénomènes physiques de l'eau au niveau du bassin versant.

II.4.4.2 - Les paramètres X_2 , B , V et W

Le paramètre X_2 est le coefficient de vidange du réservoir eau gravitaire dans le cas du modèle GR2M version de Makhoulouf. Dans le cas du modèle GR2M version de Mouehli, la capacité maximale de rétention du réservoir sol est notée X_2 . Le paramètre B désigne respectivement la capacité et le coefficient de vidange du réservoir linéaire eau gravitaire des modèles GR3M ancienne et nouvelle version.

Les paramètres V et W désignent respectivement les coefficients de remplissage et de vidange du réservoir sol des modèles GR étudiés.

II.5- Les facteurs limitant l'application des modèles

On note des modifications des conditions physiques du bassin induites par les activités humaines. Ainsi, l'implantation d'un réservoir sur une rivière, d'ouvrages de dérivation d'une partie du débit pour des besoins en irrigation, des pompages pour subvenir aux besoins d'adduction en eau potable, des changements d'occupation des sols ou de pratiques agricoles (changement de couvert végétal, drainage, imperméabilisation de surfaces), peuvent très rapidement avoir une influence significative voire majeure sur le comportement hydrologique du bassin. Les bassins non soumis à de telles influences sont de plus en plus rares. Notre échantillon compte des bassins soumis à des modifications de ce genre. Par exemple sur les cours d'eau au Burkina Faso on assiste ces derniers temps à une prolifération de construction de retenues d'eau. Il est évident qu'il sera très difficile, voire

impossible pour les modèles de rendre compte du comportement artificialisé du bassin observé après la construction de ces retenues.

III - METHODOLOGIE DE MODELISATION

La prévision hydrologique consiste à estimer l'évolution des phénomènes hydrologiques. Elle est d'autant plus nécessaire que la croissance économique est forte et la consommation d'eau importante, obligeant à gérer au mieux ces ressources. Elle est indispensable, quel que soit le degré de développement national, pour atténuer les effets des catastrophes naturelles telles que les crues et la sécheresse.

La mise en oeuvre et la validation d'un modèle comme GR requiert a priori une quantité importante de données. Une phase de calibration afin d'obtenir, essentiellement les propriétés hydrodynamiques à l'échelle des unités élémentaires, sera certainement nécessaire et la robustesse de cette dernière devra être étudiée avec soin.

III.1- Choix de la fonction critère

La modélisation conceptuelle des bassins versants comporte un certain nombre de paramètres identifiés généralement avec un critère de choix à partir de séries de mesures de pluie et de débit du bassin. Ainsi pour garder une certaine cohérence avec certains travaux hydrologiques déjà menés, notre choix de la fonction critère s'est porté sur le critère de Nash pour trois raisons principales:

- Une étude comparative entre différentes formes de critères a été effectuée par Servat et al. (1989) et a montré que le critère de Nash s'impose comme celui qui globalement permet d'accéder au meilleur calage.

- Lors de ses travaux de recherche au sein du Cemagref, Perrin (2000) a utilisé le même critère, après une étude comparative avec d'autres formes de fonctions critères, en vue d'une amélioration du modèle GR4J.
- Le même critère est utilisé dans les travaux de recherche au sein de l'EIER (Mounirou 2003).

En effet l'efficacité du modèle est en partie conditionnée par la qualité du calage (qui dépend des données disponibles). Celui-ci correspond le plus souvent à une optimisation sous contrainte : le critère le plus couramment utilisé est le critère de Nash. Un critère de Nash de 1 dénote un calage parfait sans erreur (qui n'est bien sûr pas toujours possible). Un critère de Nash de 0 dénote un calage médiocre.

Le choix du critère dépend en fait de l'objectif choisi pour le modèle : Nash (Q) évalue majoritairement l'aptitude du modèle à simuler des débits de crue, alors que Nash (lnQ) focalise surtout sur les écarts en période d'étiage. Compromis entre ces deux extrêmes, Nash (\sqrt{Q}) permet d'avoir un critère d'évaluation objectif qui ne donne pas démesurément plus de poids aux faibles débits qu'aux forts. Utilisé pour le calage du modèle, c'est d'ailleurs le critère qui offre le plus de robustesse pour la validation (Perrin, 2000). C'est donc le critère que nous utiliserons dans notre étude.

Nous avons ainsi choisi le critère de Nash (racine de Q) qui s'écrit :

$$\text{Nash}(\sqrt{Q}) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_{cal}^i} - \sqrt{Q_{obs}^i})^2}{\sum_{i=1}^N (\sqrt{Q_{obs}^i} - \sqrt{Q_{obs}^i})^2} \right] \text{ en \%}$$

Avec Q_{cal}^i et Q_{obs}^i désignant respectivement les débits calculés et observés. Q_{moy}^i est le débit moyen observé sur l'ensemble de la période de calage. Le modèle ajusté est d'autant meilleur que le critère de Nash est proche de 100.

Cette expression permet de réduire l'importance des forts débits dans l'évaluation de la simulation. On rééquilibre ainsi le poids des débits d'étiage par rapport à celui des débits de crue.

En plus de fonction critère de Nash, et pour pouvoir évaluer le volume d'eau écoulée nous avons utilisé l'erreur relative moyenne sur le volume.

$$Err = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|V_{cal}^i - V_{obs}^i|}{V_{obs}^i}$$

Avec V_{obs} non nul

N : Nombre d'année de la période considérée

V_{cal} : Volume annuel calculé

V_{obs} : Volume annuel observé

Le modèle simule bien le volume écoulé d'autant plus que l'erreur relative moyenne tend vers 0.

III.2- Description de la méthode d'optimisation

Le critère de Nash, permettant de quantifier objectivement la qualité d'une simulation sur une période donnée, pourra par ailleurs être utilisé comme critère à optimiser dans l'algorithme de calage automatique des paramètres du modèle. L'algorithme utilisé est une méthode de calage « pas à pas », qui consiste à faire varier les paramètres l'un après l'autre, de sorte que chaque modification de paramètre permette d'augmenter la valeur du Nash sur la période de calage.

Lorsqu'on ne peut plus accroître le critère de Nash, on dit que le modèle est calé. Le jeu de paramètres à cette valeur du Nash correspond aux paramètres caractéristiques du bassin versant ; ils sont censés intégrer, de façon généralement implicite, les caractéristiques physiques et les singularités du bassin versant, lui conférant le type de comportement hydrologique représenté par la série de données dont on dispose. Une fois le modèle calé sur une période donnée, dite période de calage, on peut procéder à une étape de contrôle (ou validation), qui consiste à évaluer les performances du modèle (avec les paramètres trouvés lors du calage) sur une autre période. On obtient alors le critère de Nash en contrôle.

La méthode d'optimisation utilisée est le solveur sous Microsoft Excel. Il permet de rechercher la valeur optimale d'une formule dans une cellule cible, de la feuille de calcul. Il fonctionne avec un groupe de cellules associées, soit directement, soit indirectement, à la formule de la cellule cible. Il adapte les valeurs des cellules que nous souhaitons modifier, appelées cellules variables, pour fournir le résultat spécifié à partir de la formule de la cellule

cible. Les contraintes pour limiter les valeurs susceptibles d'être utilisées comme modèles par le solveur sont posées, et ces contraintes font référence à d'autres cellules qui ont une incidence sur la formule de la cible.

III.2.1 - Cellule cible à définir

On spécifie la cellule cible à laquelle on souhaite attribuer une valeur maximale du critère de Nash. Cette cellule contient la formule de Nash.

III.2.2 - Cellules variables

On spécifie les cellules susceptibles d'être modifiées jusqu'à ce que les contraintes du modèle soient satisfaites et que la cellule indiquée dans la zone cellule cible à définir atteigne sa cible. Les cellules variables doivent être liées directement ou indirectement à la cellule cible.

Dans le cas des modèles GR2M de Mouehli, GR3M de Mouehli et Kabouya, les cellules variables contiennent directement les paramètres du modèle sur lesquelles se fera l'optimisation. Pour GR2M de Makhlof, ces cellules contiennent les dérivés des paramètres initiaux à partir d'une relation analytique simple, de manière à ce que la fonction de critère soit définie à partir des paramètres ayant des domaines variables comparables. Les auteurs proposent comme paramètres dérivés A1 et A2 respectifs des paramètres initiaux X1 et X2 pour le modèle GR2M. Ainsi on a :

$$\begin{aligned} A1 &= \ln(X_1) & \Rightarrow X1 &= \exp(A_1) \\ A2 &= \ln\left(\frac{X_2}{1-X_2}\right) & \Rightarrow X2 &= \frac{\exp(A_2)}{1+\exp(A_2)} \end{aligned}$$

III.2.3 - Contraintes

Elles permettent de limiter les valeurs susceptibles que peuvent prendre les paramètres.

III.2.4 - Option du solveur

Elles permettent de contrôler les fonctionnalités avancées du processus de résolution du problème, de charger ou d'enregistrer les définitions du problème et de définir des paramètres pour la résolution de problèmes linéaires et non linéaires. Chaque option est associée à un paramètre par défaut qui est adapté à la plupart des problèmes.

III.3- Initialisation du système et période de mise en route

Elle consiste à prédéfinir des valeurs initiales pour les paramètres du modèle avant de passer à la phase d'optimisation. Dans notre cas où les modèles comportent des réservoirs, cette phase d'initialisation consiste aussi à prédéfinir les niveaux initiaux de ceux-ci avant le calage.

Généralement cet état initial est défini de façon arbitraire. Cependant, le choix d'un état initial peut influencer le jeu optimal de paramètres du modèle ainsi que sa performance. Pour remédier à cette contrainte, on choisit généralement une période de mise en route.

La période de mise en route est donc une solution au problème du choix arbitraire des niveaux initiaux des réservoirs au début de la période test. Elle consiste à ne prendre en compte que les résultats après une durée d'observation fixée au préalable.

Etant donné que les différents régimes hydrologiques n'ont pas les mêmes volumes de stockage, nous avons pensé ne pas retenir une période de mise en route pour les bassins du sahel, parce que le volume du réservoir sol est nul au début de chaque saison de pluie. Mais il nous semble indispensable pour que la plate-forme de comparaison soit unique durant toute la démarche, de retenir une période de mise en route d'un an pour tous les régimes hydrologiques. Une année de mise en route équivaut à douze observations au pas de temps mensuel.

calage et validation sur chaque sous période. Nous comparerons les valeurs du critère de Nash et l'erreur relative de volume aussi bien pour les périodes de calage que de validation

IV.1- La performance

Un modèle permet de reproduire des chroniques de débit Q_{calc} à partir de données (les entrées du modèle) de pluie P et d'évapotranspiration potentielle ETP . Le modèle sera d'autant plus satisfaisant que les débits Q_{calc} seront proches des débits Q_{obs} effectivement observés.

Apprécier la validité du modèle consiste donc à juger de la proximité des deux séries chronologiques Q_{obs} et Q_{calc} . Pour ce faire, nous avons considéré deux approches possibles.

Un modèle est dit performant s'il est capable de bien retranscrire en phase de calage les débits observés sur un bassin. Nous allons dans un premier temps comparer les critères de Nash en phase calage. Et Pour mieux apprécier la précision des résultats nous allons supposer les conditions suivantes :

- Si $Nash > 0,8$ alors le modèle est bon sur la période.
- Si $0,7 < Nash \leq 0,8$ alors le modèle est satisfaisant
- Si $0,6 < Nash \leq 0,7$ alors le modèle est acceptable
- Si $0,5 < Nash \leq 0,6$ alors le modèle est peu acceptable
- Si $Nash \leq 0,5$ alors le modèle est mauvais.

Nous avons deux sous – périodes de calage et il faudrait comparer les modèles sur ces deux sous – périodes.

- Si le modèle en phase de calage est bon sur les deux sous périodes alors il est « très performant »
- Si le modèle en phase de calage est bon sur l'une des deux sous – périodes et satisfaisant sur l'autre alors il est « performant ».
- Si le modèle en phase de calage est satisfaisant sur les deux sous – périodes alors il est « moins performant ».

Les modèles qui ont des valeurs de critères de Nash $\leq 70\%$ sur les deux sous périodes ne nous intéressent pas, ils sont considérés comme étant « mauvais ». Parce qu'en général on attend d'un modèle hydrologique que son critère de Nash soit supérieur à 80% (Perrin 2000).

Sur les seize bassins versants retenus, les modèles qui ont totalisé le plus grand nombre de qualifications de modèles « très performants » sont les plus performants.

IV.2- La robustesse

Le calage indique que le modèle choisi est un outil d'interpolation satisfaisant, il ne permet pas de juger des capacités d'extrapolation du modèle : de ses performances lorsqu'il est utilisé avec des données qui n'ont pas servi à son calage. C'est l'objet de la validation. Le contrôle des performances du modèle sur des jeux de données n'ayant pas servi à son calage donne cependant quelques indications sur les capacités d'extrapolation du modèle.

A l'instar de la performance, la robustesse est l'une des qualités les plus importantes et les plus souhaitables des modèles. On évalue la robustesse d'un modèle par sa capacité de fournir des performances de même qualité qu'en phase d'optimisation.

- Si le modèle en validation est bon sur les deux sous – périodes alors il est très robuste.
- Si le modèle en phase de validation est bon sur l'une des deux sous – périodes et satisfaisant sur l'autre alors il est robuste.
- Si le modèle en phase de validation est satisfaisant sur les deux sous – périodes alors il est moins robuste.

Sur les seize bassins versants retenus, les modèles qui ont totalisé le plus grand nombre de qualifications de modèles « très robustes » sont les plus robustes.

IV.3- Estimation de la ressource disponible.

Nous allons calculer l'erreur relative moyenne sur le volume d'eau écoulé annuel (Err_{moy}). Nous avons déjà cette valeur sur chaque sous – période (Err_i). Err_{moy} est la moyenne pondérée des Err_i affectée du nombre d'années de la sous – période concernée et de (1 - % de lacune des débits).

$$Err_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} a * b}{\sum_{i=1}^{N_p} b}$$

Ce volet fait le poids du présent rapport, il regroupe tous les commentaires et analyses que nous pouvons tirer des résultats de simulation des modèles.

V.1- Analyse des résultats des modèles sur les bassins testés

Il s'agit dans ce paragraphe d'analyser le comportement des modèles GR sur chaque bassin versant. Nous allons identifier le modèle le plus performant, le plus robuste et le modèle qui reconstitue le mieux les débits observés dans la vision d'une meilleure estimation de la ressource en eau. Ainsi pour chaque régime climatique nous allons relever les modèles qui s'adaptent à ces bassins versants.

V.1.1 - Bassins du régime sahélien

Cf : annexes 2

V.1.1.1 - Bassin de Gourouol à Acongou

L'observation du critère de Nash permet de rendre compte que le calage est de bonne qualité pour tous les modèles sur ce bassin. Seul le modèle GR3M de Kabouya a un critère de Nash inférieur à 80% en phase calage sur la période humide (avant 1968). Les trois autres modèles reconstituent assez bien les débits observés sur le bassin de Gourouol. Mais la plus forte valeur du critère de Nash en phase de calage (90,1%) est obtenue avec le modèle GR3M de Mouehli.

Les valeurs obtenues en phase de contrôle sont pour la plupart inférieures à celles obtenues en phase de calage. Ces valeurs varient entre 70% et 80%. Seul le modèle GR3M de Kabouya a gardé une valeur du critère de Nash de 80% en phase de validation sur la période humide. Mais le modèle GR2M de Makhoulouf paraît le plus robuste car ayant les deux valeurs du critère de Nash en validation supérieures à 77%.

Les quatre modèles estiment bien la ressource en eau en phase calage qu'en phase de validation. Les erreurs relatives commises sur le volume annuel en phase de validation sont généralement supérieures à 50%. Ces modèles ne sont pas assez performants pour une bonne estimation du volume écoulé sur le bassin de Gourouol. La plus faible valeur de l'erreur relative moyenne sur le volume est obtenue avec le modèle GR2M de Makhoulouf et elle est de 53%.

V.1.1.2 - Bassin de Sirba à Garbe Kourou

Sur ce bassin versant, les valeurs du critère de Nash en phase de calage sont relativement plus faibles en période humide qu'en période sèche. Seuls les modèles GR2M de Makhoulf et GR3M de Mouehli ont des valeurs supérieures à 70%. On remarque que la valeur du critère de Nash du modèle GR2M de Mouehli n'est que 37.1%. Visiblement les modèles GR2M de Makhoulf et GR3M de Mouehli paraissent les plus adaptés en phase de calage pour le bassin de Sirba.

En phase de validation les modèles GR2M de Makhoulf et GR3M de Mouehli ont tous deux des valeurs du critère de Nash supérieures à 60% sur la période humide (avant 1968) et supérieures à 70% sur la période sèche (après 1972). Alors que les deux autres modèles, celui Mouehli GR2M et de Kabouya GR3M, ont des valeurs du critère de Nash faibles de l'ordre 30% sur la période humide. Sur ce bassin, on retient les modèles GR2M de Makhoulf et GR3M de Mouehli comme étant les plus robustes.

Les erreurs relatives moyennes sur le volume annuel de tous les modèles sont supérieures à 50%. L'erreur relative la plus faible de 51,8% est obtenue par le modèle GR3M de Kabouya. Il reste le modèle qui estime tant bien que mal la ressource en eau sur le bassin de Sirba.

V.1.1.3 - Bassin de Gorouol à Dolbel

Les calages effectués sur la période humide sont de bonne qualité, les valeurs du critère de Nash sont toutes supérieures à 80%. Alors qu'on remarque une dégradation de ces valeurs en phase de calage sur la période sèche. Mais on retient que tous les modèles sont d'une performance acceptable en phase de calage sur le bassin de Gorouol.

En phase de validation, à part le modèle GR2M de Makhoulf qui a des valeurs du critère de Nash légèrement inférieures à 80%, les autres modèles relèvent une bonne reconstitution des débits observés.

Les erreurs relatives moyennes sur le volume sont relativement plus faibles en période humide qu'en période sèche. La moyenne de ces valeurs donne l'erreur relative la plus faible avec le modèle GR2M de Mouehli.

V.1.1.4 - Bassin de Dargol à Kakassi

Les calages effectués sur la période sèche sont de meilleure qualité que ceux effectués sur la période humide. Pour les modèles GR2M de Makhlouf et GR3M de Mouehli les valeurs de critère de Nash sont toutes supérieures à 80% en phase de calage. Même si le modèle GR2M de Mouehli a la plus forte valeur en phase de calage après 1972, il n'est pas le plus performant car la valeur de critère de Nash en période humide est inférieure à 70%. Visiblement Les modèles GR2M de Makhlouf et GR3M de Mouehli sont les plus performants sur ce bassin versant.

En phase de validation, tous les quatre modèles ont des valeurs de critère de Nash supérieures à 72%, ils tous robustes ; mais le modèle GR2M de Mouehli paraît le plus robuste parce qu'il a ces deux valeurs de critère de Nash en validation supérieures à 77%, et atteint 81,4% en période sèche.

Les erreurs relatives moyennes sur le volume sont importantes et varient entre 40 et 50%. La plus faible erreur est donnée par le modèle GR2M de Makhlouf et est de 42%.

Synthèse

Bassin Versant	GR2M Makhlouf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya		GR2M Makhlouf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Alcongou	T_P	T_P	T_P	P	Nombre T_P	2	1	2	0
	M_R	M_R	R	M_R	Nombre P	1	1	2	3
Garbe Koukou	P	X	P	X	Nombre M_P	1	1	0	0
	X	X	X	X					
Dolbel	M_P	P	P	P	Nombre T_R	0	1	1	1
	R	T_R	T_R	T_R	Nombre R	1	1	1	0
Kakassi	T_P	M_P	T_P	P	Nombre M_R	2	1	1	2



Tableau 2 : Récapitulation de la performance et de la robustesse des modèles sur les bassins du régime Sahélien

T_P : Très Performant ; P : Performant ; M_P : Moins Performant X : mauvais

T_R : Très Robuste ; R : Robuste ; M_R : Moins Robuste

D’après le tableau 2, les modèles GR3M de Mouehli et de Kabouya semblent les plus adaptés aux bassins du régime sahélien en phase de calage. Il reste le plus performant et le plus robuste sur le régime sahélien.

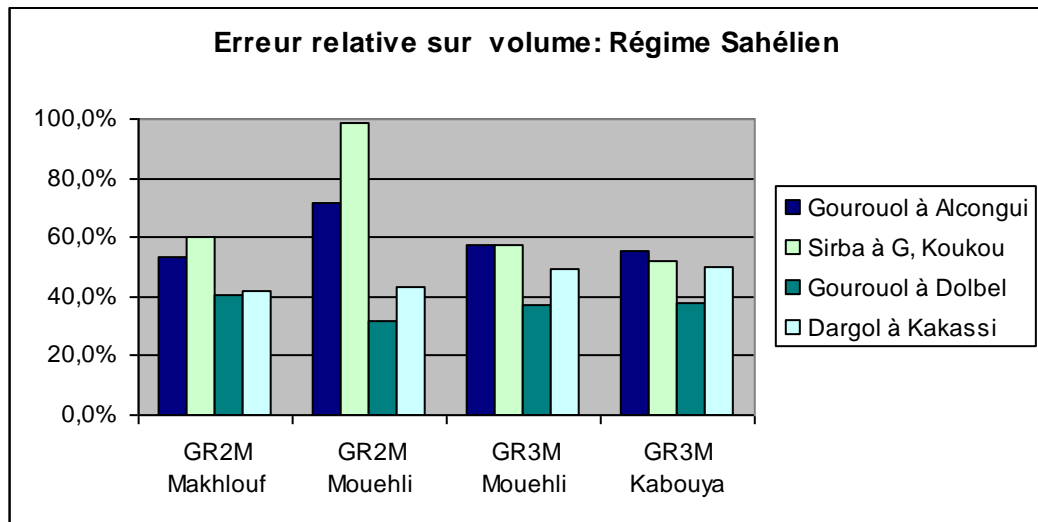


Figure 5 : Erreur relative sur volume: Régime Sahélien

Les modèles GR3M de Kabouya, de Mouehli et GR2M de Makhoulouf sont ceux qui minimisent le plus l’erreur relative sur les bassins du régime sahélien.

V.1.2 - Bassins du régime tropical pur

Cf. annexe 3

V.1.2.1 - Bassin de Klou à Logozohe Pont

Sur ce bassin versant, les modèles GR3M ont un bon comportement. Ils ont des valeurs de critère Nash en phase de calage qui sont supérieures à 80%. Au moment où le modèle GR2M de Makhoulouf a des valeurs de critère de Nash un peu proches de 70%, l’autre modèle GR2M de Mouehli n’arrive pas à bien retranscrire les débits observés. Ses valeurs en phase

de calage sont inférieures à 40%. Ainsi nous avons retenu les modèles de GR3M comme étant les plus performants sur ce bassin.

Les mêmes modèles qui avaient de bonne qualité en phase de calage, ont gardé cette précision en phase de validation. C'est ainsi que les modèles GR3M de Mouehli et de Kabouya ont des valeurs de critère de Nash supérieures 80% sur les deux sous périodes de l'étude. Quant aux modèles GR2M de Makhoulf et de Mouehli, ils ont vu leurs valeurs de critères de Nash augmentées, mais toujours relativement faible pour le modèle de Mouehli.

Dans la retranscription de volume écoulé, seul le modèle GR3M de Kabouya a une erreur relative inférieure à 30%, alors que l'erreur relative sur le volume de modèle GR2M de Mouehli dépasse même les 190%.

V.1.2.2 - Bassin de Bandama à Mbahiakro

On n'arrive pas à optimiser les valeurs de critères de Nash de modèle GR2M de Mouehli sur ce bassin. Pour ce modèle les paramètres sont insuffisants pour donner des valeurs positives du critère de Nash ; les valeurs de critère de Nash sont inférieures à zéro. A part ce modèle qui n'arrive à retranscrire les débits observés, les autres modèles ont des valeurs de critère de Nash supérieures à 80%. Sur la période humide, les valeurs de critères de Nash sont supérieures à celles obtenues sur la période sèche. Les modèles GR3M de Mouehli et Kabouya et GR2M de Makhoulf sont performants. Pour le modèle GR3M de Mouehli, on a enregistré la plus forte valeur de critère de Nash au calage qui est de 92,3% ; il est le modèle le plus performant sur le bassin de Bandama à Mbahiakro.

A part le modèle GR2M de Mouehli qui n'arrive pas à être optimisé sur ce bassin, les autres modèles ont des valeurs de critère de Nash supérieures à 80%, voire 90% pour le modèle GR3M de Mouehli en phase de validation, les 3 autres modèles sont robustes. Il est par conséquent le modèle le plus robuste sur le bassin de Bandama à Mbahiakro.

Deux modèles arrivent à bien évaluer le volume d'eau écoulé avec une erreur relative de moins de 30%, il s'agit des modèles GR3M de Mouehli et Kabouya. Compte tenu de l'incapacité d'optimisation du modèle GR2M de Mouehli, celui-ci a vu la valeur de l'erreur relative sur le volume dépasser les 1 000%.

optimiser les valeurs de critère Nash en phase de calage, il a également obtenu des erreurs relatives très grossières sur le volume d'eau écoulée.

Synthèse

Bassin Versant	GR2M Makhoulouf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Logozohe	P	X	P	T_P
	M_R	X	T_R	T_R
Mbahiakro	P	X	T_P	T_P
	T_R	X	T_R	T_R
Tchoa	P	X	T_P	P
	X	X	M_R	M_R
Yendere	T_P	X	T_P	T_P
	T_R	X	T_R	T_R

	GR2M Makhoulouf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Nombre T_P	1	0	3	3
Nombre P	3	0	1	1
Nombre M_P	0	0	0	0

Nombre T_R	2	0	3	3
Nombre R	0	0	0	0
Nombre M_R	1	0	1	1

Tableau 3: récapitulation de la performance et de la robustesse des modèles sur les bassins du régime tropical pur

T_P : Très Performant ; P : Performant ; M_P : Moins Performant X : mauvais

T_R : Très Robuste ; R : Robuste ; M_R : Moins Robuste

D'après le tableau 3, les modèles GR3M de Mouehli et de Kabouya sont les plus performants et les plus robustes sur les bassins versants du régime tropical pur. Alors que le modèle GR2M de Mouehli n'est pas du tout adapté aux bassins versants du régime tropical pur.

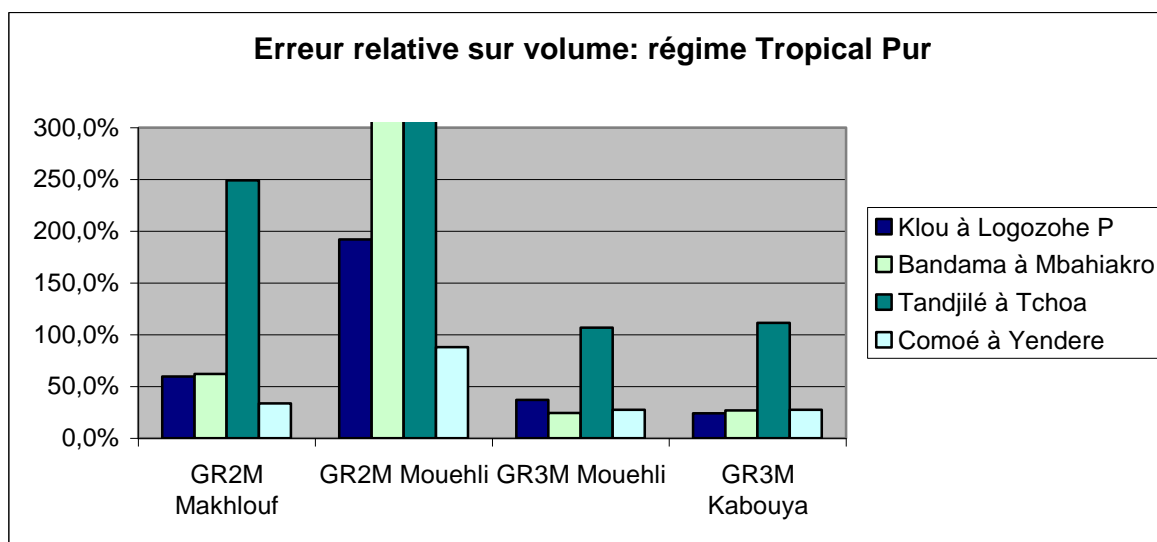


Figure 6: Erreur relative sur volume: Régime Tropical Pur

Les modèles GR3M de Mouehli et de Kabouya sont les deux modèles qui retranscrivent au mieux le volume annuel écoulé sur les bassins du régime tropical pur.

V.1.3 - Bassins du régime tropical de transition

Cf. annexes 4

V.1.3.1 - Bassin de Amou Oblo à Amou

Les valeurs de critères de Nash en phase de calage sont toutes inférieures à 70% et tournent autour de 65%. Le modèle GR3M de Kabouya paraît le plus performant, car ces deux valeurs sont supérieures aux autres valeurs de critère de Nash sur les deux sous périodes.

En validation, les modèles ont vu leurs valeurs de critère de Nash augmentées ; elles tournent autour de 70%. Le modèle GR3M de Mouehli est le plus robuste car il a les valeurs les plus fortes sur les deux sous périodes.

Tous les modèles retranscrivent bien le volume écoulé avec des erreurs relativement faibles de l'ordre de 25%.

V.1.3.2 - Bassin de Ebeva à Amoutchou

Sur ce bassin versant, les valeurs de critères de Nash en phase de calage sont supérieures à 80%, seul le modèle GR2M de Mouehli a un critère de 73% en phase de calage sur la période sèche. Mais nous n'arrivons pas à optimiser le modèle GR2M de Mouehli sur ce bassin. Toutes ses valeurs de critère de Nash en phase de calage sont des nombres négatifs. S'il faudrait classer les modèles sur ce bassin selon leur performance, GR3M de Mouehli apparaît le plus performant parce qu'il a des valeurs de critères de Nash qui sont supérieures aux autres valeurs sur les deux sous périodes de l'étude.

En phase de validation on remarque le même comportement du modèle GR2M de Mouehli qui obtient toujours les valeurs négatives du critère de Nash. Par contre les autres modèles ont de bonnes valeurs de critères de Nash supérieures à 80% en validation sur la période humide et des valeurs relativement faibles sur la période sèche ; ces valeurs sont de l'ordre de 47% pour le modèle GR3M de Kabouya, de 37% pour le modèle GR3M de Mouehli et de 12% pour le modèle GR2M de Makhoulf. Le modèle GR3M de Kabouya semble le plus robuste en période humide.

A part l'erreur relative du modèle GR2M de Mouehli qui sort de l'ordinaire, les autres modèles retranscrivent au mieux le volume annuel écoulé avec des erreurs relatives voisines de 10% en validation sur la période humide. Mais ce qui n'est pas le cas en période sèche, nous remarquons sur cette période ces erreurs supérieures à 70%. Le modèle GR3M de Kabouya a la plus faible erreur relative moyenne sur les deux périodes est de 47%.

V.1.3.3 - Bassin de Kouroukélé à Iradougou

Toutes les valeurs de critères de Nash des modèles sont de l'ordre 80%, excepté le modèle GR2M de Mouehli qui a des valeurs faibles de 53%. Les deux modèles GR3M ont leurs valeurs supérieures à 90% en phase de calage sur les deux sous périodes de l'étude. Il ressort de la comparaison des valeurs de critère de Nash sur ce bassin que ce sont les modèles GR3M qui sont les plus performants.

En phase de validation les modèles ont conservé les mêmes qualités qu'en phase de calage. Seul le modèle GR2M de Mouehli a des valeurs de critères de Nash inférieures à 80%. Sur ce bassin les modèles GR3M sont sans doute les plus robustes, parce qu'ils gardent des valeurs de critères de Nash en phase de validation supérieures par rapport à celles des autres modèles.

L'erreur relative moyenne sur le volume annuel est de l'ordre de 74% pour le modèle GR2M Mouehli alors qu'elle n'est que de l'ordre 20% pour les autres modèles.

V.1.3.4 - Bassin de Lamakara à Kara

Tous les quatre modèles ont des valeurs de critères de Nash supérieures à 90% en phase de calage ; seul le modèle GR2M de Makhoulf a des valeurs inférieures mais tout même supérieures à 86%. Les modèles reconstituent bien les débits observés sur ce bassin versant. Sur ce bassin il serait fastidieux de dégager le modèle le plus performant. Mais on remarque tout de même un bon comportement des modèles GR3M.

En phase de validation, nous retenons les mêmes comportements des modèles qu'en phase de calage. Les valeurs de critères de Nash sont toutes supérieures à 80%. Seul le modèle GR3M de Mouehli a ses valeurs supérieures à 90% sur les deux sous périodes. Par conséquent il est le plus robuste sur ce bassin versant.

Tous les modèles ont des erreurs relatives faibles de l'ordre de 18%. Les deux modèles de Mouehli ont une même valeur de 17,6 qui reste la plus faible erreur relative moyenne obtenue sur le bassin de Lamakara.

Synthèse

Bassin Versant	GR2M Makhoulf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Amou	X	X	X	X
	X	R	R	R
Ebeva	P	X	T_P	T_P
	X	X	M_R	M_R
Iradougou	T_P	X	T_P	T_P

	GR2M Makhoulf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Nombre T_P	2	1	3	3
Nombre P	1	0	0	0
Nombre M_P	0	0	0	0

Nombre T_R	2	1	2	2
------------	---	---	---	---

Toutes les valeurs de critère de Nash en phase de calage sur ce bassin sont supérieures à 85%. Le modèle GR3M de Mouehli se révèle être le plus performant sur ce bassin, car ses valeurs de critère de Nash dépassent les autres valeurs sur les sous périodes de l'étude.

En phase de validation les valeurs de critères de Nash sont supérieures à 80% sur l'une des sous périodes pour chaque modèle. Seul le modèle GR3M a gardé ces valeurs supérieures à 85% sur les deux sous périodes. Par conséquent il se révèle être le plus robuste sur ce bassin versant.

L'erreur relative moyenne sur le volume écoulé annuel est faible et de l'ordre 30% pour tous les modèles. Elle est de 25% pour le modèle GR3M de Kabouya qui est la plus faible erreur ; donc ce modèle retranscrit mieux le volume écoulé que les trois autres modèles sur le bassin du Niger à Faranah.

V.1.4.2 - Bassin de Niandan à Baro

Les valeurs de critères de Nash en phase de calage sur la période humide sont toutes supérieures à 90% ; alors que celles observées sur la période sèche en ont deux supérieures, et deux autres inférieures à 90%. Le modèle GR3M de Mouehli a des valeurs qui sont supérieures autres valeurs sur les deux sous périodes. Il apparaît le plus performant de tous les quatre modèles sur ce bassin versant.

Les valeurs du critère de Nash en phase de validation sont supérieures à 80% sur les deux sous périodes. Ce qui signifie que les modèles sont robustes sur ce bassin. Mais le modèle GR3M de Mouehli reste le plus robuste sur le bassin de Niandan à Baro.

L'erreur relative moyenne sur le volume écoulé annuel varie de 16% à 38% pour les modèles. C'est le modèle GR3M de Mouehli qui évalue le mieux le volume écoulé sur ce bassin avec une erreur relative de 16%.

V.1.4.3 - Bassin de milo à Kankan

C'est seulement sur ce bassin que nous avons remarqué que toutes les valeurs de critères de Nash en phase de calage comme en phase de validation sont supérieures à 80%. En

phase de calage seules deux valeurs sur huit sont inférieures à 90%. Les modèles GR2M de Makhoulf et GR3M de Mouehli sont les plus performants sur le bassin de Milo.

Toutes les valeurs de critère de Nash étant supérieures à 80% en phase validation. Et étant le seul modèle à pouvoir garder ses valeurs supérieures à 90% sur les deux sous périodes, le modèle GR3M de Mouehli apparaît donc comme le plus robuste sur le bassin de Milo à Kankan.

L'erreur relative sur le volume écoulé est relativement faible pour tous les modèles. Elle évolue de 13% à 30%. La plus faible valeur est obtenue par le modèle GR2M de Makhoulf.

V.1.4.4 - Bassin de Mape à Pont de Magba

Seul le modèle GR2M de Mouehli a une des valeurs en phase de calage inférieure à 80% ; Les autres valeurs en phase de calage sont toutes supérieures à 82%. Le modèle GR2M de Makhoulf est le plus performant étant donné que ces deux valeurs sont les plus fortes sur les sous périodes.

En phase de validation, toutes les valeurs de critère de Nash sont supérieures à 80%. Les deux modèles de GR2M et le modèle GR3M de Mouehli sont les plus robustes sur ce bassin.

L'erreur relative sur le volume écoulé est inférieure à 20% pour tous les modèles. Elle est de l'ordre de 10% pour le modèle GR2M de Mouehli et de 17% pour les autres modèles.

Synthèse

Les résultats de la comparaison des modèles sur les bassins du régime équatorial sont résumés dans le tableau suivant : tableau 5.

Bassin Versant	GR2M Makhlouf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Faranah	T_P	T_P	T_P	T_P
	R	R	T_R	R
Pont de Magba	T_P	P	T_P	T_P
	T_R	T_R	T_R	T_R
kankan	T_P	T_P	T_P	T_P
	T_R	T_R	T_R	T_R
Baro	T_P	T_P	T_P	T_P
	T_R	R	T_R	T_R

	GR2M Makhlouf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Nombre T_P	4	3	4	4
Nombre P	0	1	0	0
Nombre M_P	0	0	0	0

Nombre T_R	3	4	4	3
Nombre R	1	0	0	1
Nombre M_R	0	0	0	0

Tableau 5: Récapitulation de la performance et de la robustesse des modèles sur les bassins du régime équatorial de Transition

T_P : Très Performant ; P : Performant ; M_P : Moins Performant
 T_R : Très Robuste ; R : Robuste ; M_R : Moins Robuste

Le modèle GR3M de Mouehli est le plus performant et le plus robuste sur les bassins versants du régime équatorial de transition.

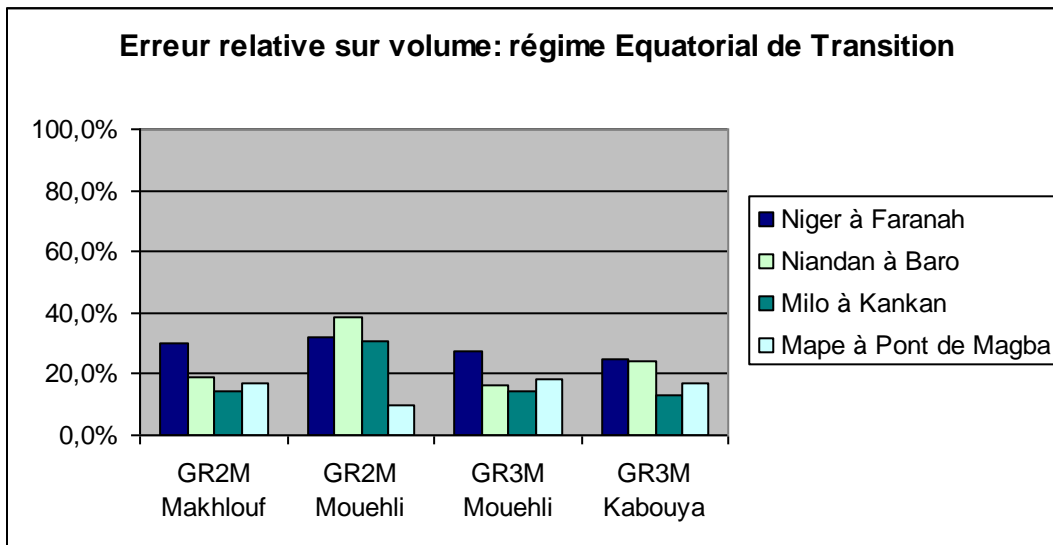


Figure 8: Erreur relative sur volume: Régime Equatorial de Transition.

V.1.5 - Conclusion

L'analyse des résultats que nous avons effectuée a permis de mettre en évidence un lien entre l'évolution du comportement hydrologique et l'évolution de la précipitation. Il apparaît une corrélation marquée entre les régimes climatiques et l'évolution des qualités des modèles. Au fur et à mesure qu'on change de régime du sahel vers l'équateur (la zone la plus arrosée) on remarque une augmentation des valeurs de critère de Nash : Nous passons de dix-huit (18) valeurs supérieures à 80% sur les bassins du régime sahélien à trente une (31) sur les bassins du régime équatorial en phase de calage sur un total de trente deux (32) valeurs.

En phase de validation la différence est plus marquée ; huit (08) valeurs sont supérieures à 80% sur les bassins du régime sahélien contre vingt-huit (28) sur les bassins du régime équatorial de transition sur un total de trente-deux (32) valeurs.

Les résultats de la comparaison des modèles sur l'ensemble des bassins versants sont résumés dans le tableau suivant : tableau 6.

	GR2M Makhoulf	GR2M Mouehli	GR3M Mouehli	GR3M Kabouya
Nombre T_P	9	6	12	10
Nombre P	5	1	3	4
Nombre M_P	1	1	0	0

Nombre T_R	7	4	10	9
Nombre R	2	4	2	2
Nombre M_R	2	1	3	4

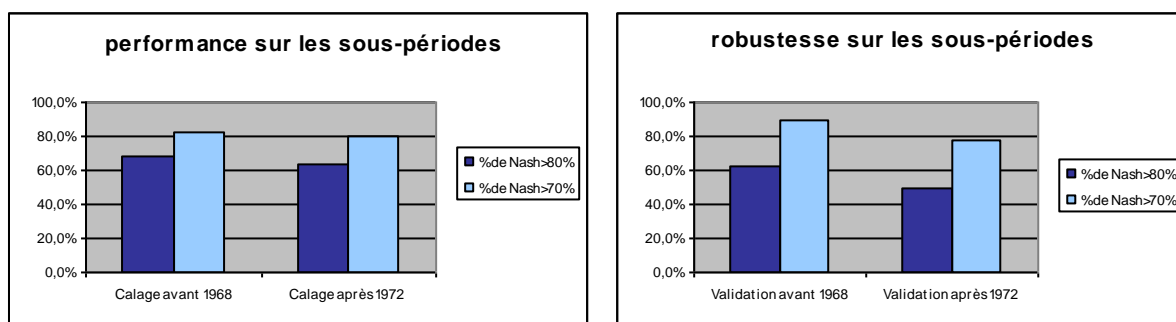
Tableau 6: Comparaison des modèles: Performance et robustesse

Le modèle GR3M de Mouehli est le plus performant et le plus robuste de tous les modèles ; suivi du modèle GR3M de Kabouya à performance égale avec le modèle GR2M de Makhoulf, mais qui est plus robuste que ce dernier. Le modèle GR2M de Mouehli n'est pas adapté aux bassins versants du régime tropical pur et tropical de transition.

V.2- Analyse comparative des modèles

V.2.1 - Analyse de l'influence des périodes sur la performance et la robustesse des modèles

Sur les deux sous périodes climatiques que nous avons considérées pour notre étude, nous voulons vérifier s'il y a une corrélation entre les périodes dites sèche ou humide et les qualités d'un modèle. Les résultats sont consignés sur la figure 9.



	% de Nash \geq 80%	% de Nash \geq 70%
Calage avant 1968	68,8%	82,8%
Validation avant 1968	62,5%	89,1%
Calage après 1972	64,1%	79,7%
Validation après 1972	50,0%	78,1%

Figure 9: Performance et Robustesse des modèles sur les périodes

Nous analysons sur cette figure un possible lien entre l'évolution du comportement hydrologique et les sous périodes climatiques (périodes sèche et humide).

Nous remarquons à travers ce tableau qu'en phase de calage, 68,8% des valeurs de critères de Nash obtenues en période humide sont supérieures à 80%, alors que ce pourcentage n'est que de 64,1% en période sèche. De même le pourcentage des valeurs de critère de Nash supérieures à 70% est de 82,8% sur la période humide contre 79,7% la période sèche.

Par conséquent, on constate que la performance des modèles au calage est liée à la quantité d'eau tombée. Plus la pluviométrie est importante, plus la probabilité est forte d'avoir une valeur de critère de Nash est élevée.

Les mêmes remarques sont faites sur la phase de validation ; Plus de 62% de valeurs de critère de Nash sur la période humide sont supérieures à 80%, contre 50% sur la période sèche. Aussi est il que 89,1% de valeurs de critère de Nash sont supérieures à 70% en période humide contre 78,1% en période sèche.

Il est clair qu'une relation de cause à effet lie la pluie et la robustesse des modèles. Plus la pluviométrie est importante, mieux les modèles simulent les débits observés.

Nos résultats confirment donc nos intuitions de la section précédente : il apparaît bien un lien entre le changement de comportement hydrologique et les qualités des modèles.

V.2.2 - Comparaison des modèles de l'estimation de la ressource disponible

Le but final du présent travail est de proposer un outil qui simule mieux les débits observés dans la vision d'une meilleure estimation de la ressource en eau, avec les seize sous-bassins versants étudiés. Comme il s'agit d'une estimation de volume nous nous sommes intéressés seulement aux erreurs relatives sur le volume en phase de validation. Pour chaque modèle nous avons calculé la moyenne des erreurs relatives. Les résultats sont représentés sur la figure suivante : figure 10.

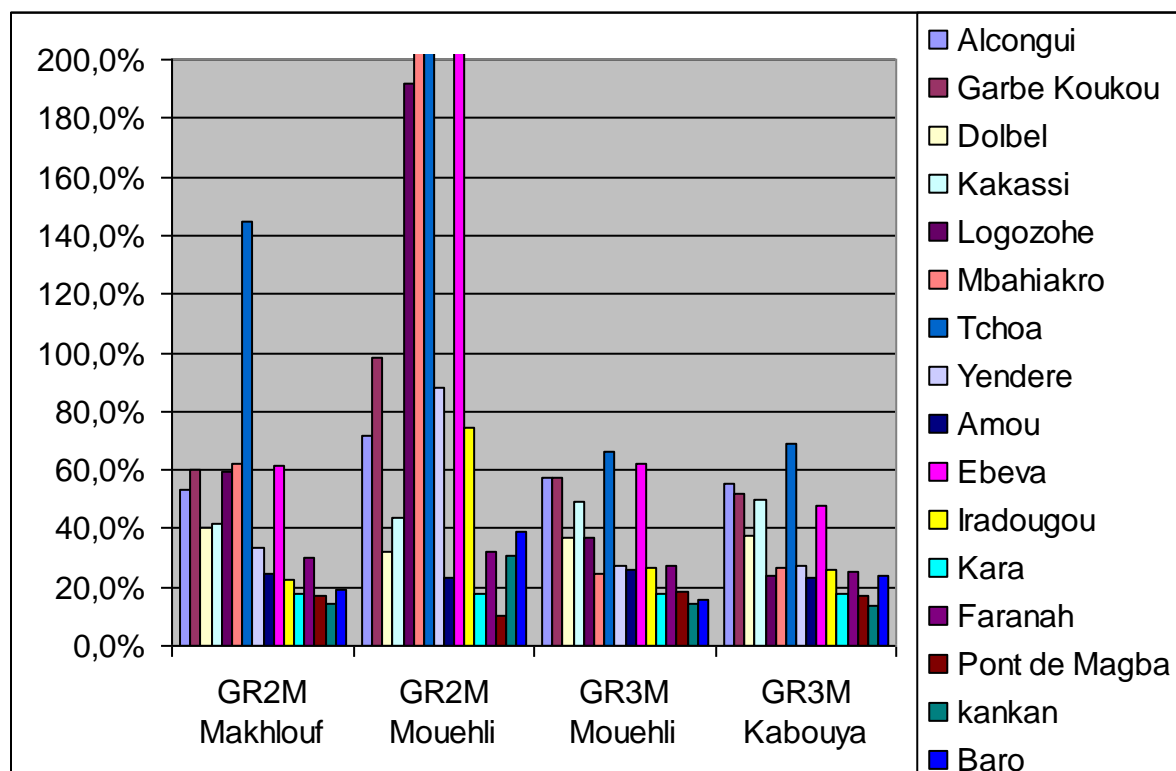


Figure 10: Erreurs relatives moyennes sur les volumes annuels moyens d'eau écoulée

Un examen minutieux de cette graphique permet de constater que les modèles GR3M sont presque à égalité lorsqu'il s'agit de retranscrire le volume moyen annuel d'eau écoulée. En effet sur les sous - bassins étudiés, le modèle GR3M de Kabouya estime mieux le volume moyen annuel d'eau écoulée sur six sous - bassins contre quatre pour le modèle GR3M de Mouehli. C'est seulement sur le bassin de Tchoa que les modèles GR3M de Mouehli et de Kabouya ont des erreurs relatives supérieures à 60%. Le modèle GR2M de Makhlouf a des résultats aussi proches de ceux obtenus par les modèles GR3M. Aussi avons nous remarqué que le modèle GR2M de Mouehli n'arrive pas estimé correctement la ressource en eau sur les bassins du régime tropical.

Avons-nous aussi remarqué que les erreurs relatives les plus faibles sont notées sur les bassins du régime équatorial de transition.

Si les modèles GR3M sont presque à performance égale pour l'estimation du volume annuel d'eau écoulé, il est meilleur d'utiliser celui de Kabouya pour une quelconque évaluation des ressources en eau sur les bassins versants de l'Afrique de l'Ouest et du Centre.

V.2.3 - Analyse de l'influence des lacunes observées dans les séries hydrométriques

Dans les calculs de critère de Nash, nous n'avons pas tenu compte des lacunes. Par conséquent, il ne devrait pas avoir une influence des lacunes sur la performance des modèles. Mais force est de constater que sur toutes les sous périodes où le pourcentage de lacunes est nul, nous retrouvons au moins trois modèles (mise à part le modèle GR2M de Mouehli) qui ont toutes leurs valeurs de critères de Nash supérieures à 80%. Il serait subjectif de tirer rapidement une conclusion, parce que nous avons toutefois obtenu des valeurs de critère de Nash qui sont élevées aussi bien que sur les bassins comportant des lacunes.

V.2.4 - Analyse de l'influence de la superficie des bassins versants sur la performance des modèles

Peut-on lier l'évolution des qualités des modèles à la superficie d'un bassin versant ? C'est à cette question que nous essayerons de répondre dans cette partie du document. A priori

nous ne pouvons pas dégager une corrélation entre superficie de bassin versant et les qualités d'un modèle.

Sur les bassins des régimes tropicaux et équatoriaux de transition; les modèles se comportent mieux sur les bassins ayant des superficies plus élevées, alors qu'ils ne conservent pas les mêmes qualités sur les autres régimes climatiques. Plutôt sur les bassins du régime sahélien, les modèles ont des valeurs plus élevées sur les petits bassins que sur les grands.

Y a-t-il une relation entre la superficie et l'évolution de la précision des modèles? L'échantillon est trop petit pour tirer une conclusion ; mais avons-nous remarqué, que le plus petit des bassins versants a enregistré les plus faibles valeurs de critère de Nash ; Pas même une seule valeur supérieure à 80%.

Cependant il apparaît d'après l'analyse des résultats qu'il n'y a pas de corrélation entre la superficie des bassins et l'estimation du volume écoulé.

Conclusion générale

Nous présentons ici un bilan des résultats obtenus au cours de cette étude. Sur les seize bassins versants que nous avons retenus pour la comparaison des quatre modèles GR2M et GR3M, nous avons remarqué que ces modèles n'ont pas les mêmes qualités sur les régimes climatiques, sur les sous – périodes de l'étude et sur les bassins ayant les mêmes ordres de grandeur de superficie.

Il ressort des résultats des simulations sur les différents bassins versants que le modèle GR3M de Mouehli se révèle sans nul doute le plus performant et le plus robuste. Il a les meilleurs résultats de critère de Nash sur tous les bassins des régimes climatiques. Et il est bien souvent talonné par le modèle GR3M de Kabouya qui mérite d'être classé comme étant le deuxième modèle. A chaque fois que les valeurs de critères de Nash des deux modèles de GR3M appartiennent à une même classe de performance ou de robustesse, les valeurs du modèle GR3M de Mouehli sont toujours supérieures à celles du modèle GR3M de Kabouya. Après suit le modèle GR2M de Makhlouf qui obtient des résultats pas trop écartés de ceux obtenus par les modèles hydrologiques GR3M. Mais nous avons remarqué que le modèle GR2M de Mouehli n'est pas du tout adapté aux bassins des régimes tropicaux purs et de transition. Notons également que les modèles fonctionnent mieux sur les bassins du régime équatorial que sur les régimes tropicaux et plus encore que sur le régime sahélien.

Nous avons analysé une éventuelle influence des sous – périodes de l'étude sur les qualités de modèles. Une relation de cause à effet lie la pluie et la robustesse des modèles. Plus la pluviométrie est importante, mieux les modèles simulent les débits observés.

Lorsque nous comparons les modèles à travers l'évaluation des volumes moyens annuels d'eau écoulée, le modèle GR3M de Kabouya se comporte mieux que ceux de Mouehli GR3M et de Makhoulouf GR2M qui présentent des résultats aussi bons que le modèle GR3M de Kabouya. Le modèle GR2M de Mouehli n'est pas du tout indiqué pour une quelconque évaluation des ressources en eau de surface des bassins du régime tropical.

Le concept de modélisation hydrologique de Mouehli GR3M apparaît prometteur car les résultats obtenus sont encourageants en terme de restitution des différentes composantes du cycle hydrologiques (débit dans la rivière, estimation de ressources en eau). Mais rappelons que les erreurs de mesure, les limites des modèles et la variabilité naturelle des phénomènes météorologiques qui influent sur les systèmes hydrologiques sont à l'origine parfois de l'incertitude qui entache les prévisions hydrologiques.

Bibliographie :

- Charles PERRIN, thèse 2000: Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative
- Safouana MOUEHLI, thèse 2002: Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier
- Lawani Adjadi MOUNIROU, rapport d'activité 2003 – 2004 : Approche de la relation Pluie – Débit avec quatre (04) Modèles GR dans le contexte d'évolution des normes hydrologiques en Afrique occidentale et centrale, application au régime sahélien.
- Pacôme NONFODJI, mémoire EIER 2004: Comparaison de deux outils de modélisation hydrologique au pas de temps mensuel. Essai d'application dans un contexte opérationnel avec peu voire pas de données hydro- pluviométriques. Application au Burkina Faso



- Baké Gnanman Félicité CHABI-GONNI, mémoire EIER 2003 : Synthèse hydrologique sur la vallée du Kou. Mise en place d'un système de suivi et d'évaluation de la ressource
- Nigg U : Hydrologie : fascicule pour illustrer le cours (EIER / MRE) ;
- Braud et al, atelier 2001: Modélisation hydrologique du bassin versant de l'Ouémé à l'aide du modèle POWER
- Baines .A : Application du modèle GR3 à l'évaluation des ressources en eau de quelques bassins versants du Burkina Faso.
- DUBREUIL : Initiation à l'analyse hydrologique (dix exercices suivis des corrigés)
- TOUNKARA : Modélisation débit – durée – fréquence (Qdf) appliquée aux grands bassins versants de l'Afrique
- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne : Linéaire et non linéaire des réponses des bassins versants : comparaison des modèles hydrologiques.
- GOULA Bitié : Modélisation hydrologique de bassin versant.
- Marc PLANTIER, mémoire ENGEES 2003 : Prise en compte de caractéristiques physiques du bassin versant pour la comparaison des approches globale et semi-distribuée en modélisation Pluie – Débit
- Jean Emmanuel PATUREL et al, Etude de stabilité des paramètres d'un modèle hydrologique global dans un contexte de variabilité climatique
- J. RODIER , 1964 : Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo

Annexes :