



THEME :
TESTS DE DIFFERENTS MODELES
HYDROLOGIQUES JOURNALIERS SUR UN
ENSEMBLE DE BASSINS VERSANTS DE L'AFRIQUE
DE L'OUEST.

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT
OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES

Présenté et soutenu publiquement le 23 Juin 2014 par :
Mahamoudou WANDAOGO

Travaux encadrés par : Dr. Jean Emmanuel PATUREL
Chargé de recherche à l'IRD rattaché à 2iE
Co-encadreurs : Dial NIANG
Lawani MOUNIROU
Enseignants chercheurs à 2iE.

Membre de jury:

Dr. Abdoulaye DIARRA

M. Kouassi AMANI

Dr. Jean Emmanuel PATUREL

M. Tazen FOWE

M. Abdrahamane GADO

Dédicace

A ma très chère famille, pour votre confiance et votre soutien à mon égard.

Remerciements

Un mémoire est tout sauf une aventure individuelle : je ne saurais donc mettre un point final à ce manuscrit sans remercier tous ceux qui, de près ou de loin, y ont contribué.

Je remercie très chaleureusement **M. Jean-Emmanuel Paturel**, Chargé de recherche IRD en accueil au LEAH/CCR « EC », Hydrologue modélisateur, pour son encadrement, son soutien et sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

J'adresse ma profonde reconnaissance à **M. Lawani Adjadi MOUNIROU** et **M. Dial NIANG** enseignants chercheurs à 2iE pour le suivi et les différentes suggestions.

Je remercie mon Co-stagiaire **M. Inoussa BELEMBAOGO** pour son esprit d'équipe et de collaboration.

J'adresse ma reconnaissance à tous les étudiants de M2/IRH de la promotion 2013 - 2014 et tout le personnel du 2iE sans distinction.

Je remercie également le personnel du SP/PAGIRE pour leur écoute et leur soutien.

Liste des abréviations

CREC : Centre de Recherches et d'Etudes de Chatou

GR : Génie Rural

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

SIEREM: Système d'Information Environnemental sur les Ressources en Eau et leur Modélisation

SP/PAGIRE : Secrétariat Permanent du Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau.

Résumé

Le 2iE souhaite mettre en place une plateforme de modélisation hydrologique s'appuyant sur différents modèles pluie-débit. Les modèles pluie – débit sont des outils qui évaluent le débit et son évolution en un point donné d'un bassin versant. Cependant, les modèles ne représentent jamais le fonctionnement exact du bassin. D'où la nécessité de trouver à travers des tests les modèles hydrologiques à pas de temps journalier qui représentent au mieux les relations pluie-débit des bassins versants de l'Afrique de l'Ouest.

Au total neuf (09) modèles (ARNO, MARTINE, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J, GR5J et BOORMAN) ont été testés sur dix-sept (17) bassins versants de l'Afrique de l'Ouest.

Il ressort des modèles ARNO, CEQUEAU, GR3J, GR4J et BOORMAN reproduisent aussi bien les débits de crue que les débits d'étiage. Par contre, les modèles MARTINE, GARDENIA et GR5J reproduisent mieux les débits de crue que les débits d'étiage, et inversement pour le modèle CREC.

Les modèles ARNO, MARTINE, CREC, GARDENIA et BOORMAN donnent de bons résultats lorsque leurs paramètres sont optimisés par la méthode du Simplex. Les modèles CEQUEAU, GR3J, GR5J, GR4J donnent les mêmes paramètres optimisés, que ce soit la méthode du Simplex ou la méthode de Rosenbrock.

Les modèles ARNO, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J et BOORMAN sont à caler préférentiellement en période sèche et à valider en période humide.

MARTINE et GR5J sont considérés préférentiellement de façon inverse.

Si un classement des modèles devait être proposé, il serait celui-ci, du meilleur au moins bon : sur les périodes avant 1970 et après 1970, CEQUEAU, GR3J, BOORMAN, ARNO, GR4J, CREC, GR5J, GARDENIA et MARTINE. Celui sur les périodes avant 1980 et après 1980 donne : BOORMAN, CEQUEAU, GR3J, ARNO, GR4J, GR5J, GARDENIA, MARTINE.

Mots Clés :

1-Modèle hydrologique Journalier

2- Afrique de l'Ouest

3 -Calage

4- Validation

5- Performance

6-ARNO, MARTINE, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J, GR5J et BOORMAN

ABSTRACT

The 2iE wishes to set up a hydrological platform of modeling being based on various rainfall-runoff models. The models are tools which evaluate the flow and its evolution of the watershed. However, the models do not represent the exact functioning of the watershed. Hence they need to find through testing daily hydrological models that best represent the rainfall-runoff relationship watershed of West Africa.

In total nine (09) models (ARNO, MARTINE, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J, GR5J and BOORMAN) were tested on seventeen (17) watersheds of West Africa.

It appears the models ARNO, CEQUEAU, GR3J, GR4J and BOORMAN reproduce well the flood flows that low flows. For cons, the models MARTINE GARDENIA and GR5J reproduce better flood flows that low flows and vice versa for the CREC model.

The Models ARNO, MARTINE, CREC, GARDENIA and BOORMAN give good results when their parameters are optimized by the method of Simplex The models CEQUEAU GR3J, GR5J, GR4J give the same optimized parameters, either the Simplex method or the method of Rosenbrock.

ARNO, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J and BOORMAN models are preferentially to calibrate in dry period and validate in wet period. MARTINE and GR5J are considered preferentially in reverse.

If a classification model should be proposed, it would be this one, from best to worst for the periods before 1970 and after 1970: CEQUEAU, GR3J, BOORMAN, ARNO, GR4J, CREC, GR5J, GARDENIA and MARTINE. That the periods before 1980 and after 1980 gives: BOORMAN, CEQUEAU, GR3J, ARNO, GR4J, GR5J, GARDENIA, MARTINE.

Key words :

1-Daily hydrological model

2-West Africa

3-calibration

4-Validation

5- performance

6-ARNO, MARTINE, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J, GR5J et BOORMAN

Table des matières	
Dédicace.....	i
Remerciements.....	ii
Liste des abréviations.....	iii
Résumé.....	iv
ABSTRACT.....	v
Table des matières.....	1
Liste des tableaux.....	4
Listes des figures.....	5
Introduction générale	6
Problématique.....	6
Objectifs	6
Méthodologie générale	7
I Les modèles hydrologiques	8
I.1 Classification des modèles hydrologiques	8
I.1.1. Modèles stochastiques	9
I.1.2. Modèles déterministes	9
I.1.3. Modèles paramétriques.....	9
I.1.4. Modèles à base physique	10
I.1.5. Modèles analytiques	10
I.1.6. Modèles empiriques	10
I.1.7. Modèles conceptuels	10
I.1.8. Modèles globaux ou distribués.....	10
I.2 Choix des modèles	11
I.2.1. Modèle ARNO	11
I.2.2. Modèle GR3J, GR4J et GR5J.....	11
I.2.3 Modèle CEQUEAU.....	12
I.2.4 Modèle CREC	12
I.2.5 Modèle GARDENIA.....	12
I.2.6 Modèle MARTINE.....	12
I.2.7 Modèle Boorman	13
I.3 Opération de calage et de validation	13
I.4 Fonction objectif ou critère	13
I.5 Méthodes d'optimisation.....	15

I.5.1 Principe de la méthode du simplex.....	15
I.5.2 Principe de la méthode de Rosenbrock	15
I.6 Initialisation des réservoirs et période de mise en route	16
I.7 Les facteurs limitant l'application des modèles	16
II Matériels et méthodologie de test.....	17
II.1 Les bassins versants	17
II.2 Présentation des données d'entrées	17
II.2.1 Débits observés	17
II.2.2 Pluie	18
II.2.3 ETP.....	18
II.2.4 logiciels informatiques utilisés pour les tests	19
3 Méthodologie de test	21
II.3.1 La performance	21
II.3.2 La robustesse.....	21
II.3.3 Le temps de simulation	21
II.3.4 Représentation des résultats	22
III Résultats et interprétations	23
III.1 Résultats globaux des tests	23
III.2 Temps de simulation	42
III.3 Classification des modèles	43
Conclusion générale.....	45
Bibliographies	46
ANNEXE 1 : Description du modèle ARNO	I
ANNEXE 2 : Description du modèle GR3J, GR4J et GR5J	IV
ANNEXE 3 : Description du modèle CEQUEAU.....	XI
ANNEXE 4 : Description du modèle CREC	XIII
ANNEXE 5 : Description du modèle GARDENIA.....	XV
ANNEXE 6 : Description du modèle MARTINE	XVII
ANNEXE 7 : Description du modèle Boorman.....	XIX
ANNEXE 8 : Bassins versants du Benin	XXI
ANNEXE 9 : Bassins versants du Burkina Faso	XXII
ANNEXE 10 : Bassins versants de la Côte d'Ivoire.....	XXIII
ANNEXE 11 : Bassins versants du Mali	XXIV
ANNEXE 12 : Bassins versants du Niger.....	XXV

ANNEXE 13 : Valeurs issues de la simulation du modèle ARNO	XXVI
ANNEXE 14 : Valeurs issues de la simulation du modèle MARTINE.....	XXVII
ANNEXE 15 : Valeurs issues de la simulation du modèle CEQUEAU.....	XXVIII
ANNEXE 16 : Valeurs issues de la simulation du modèle CREC	XXIX
ANNEXE 17 : Valeurs issues de la simulation du modèle GARDENIA.....	XXX
ANNEXE 18 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR3J.....	XXXI
ANNEXE 19 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR4J.....	XXXII
ANNEXE 20 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR5J.....	XXXIII
ANNEXE 21 : Valeurs issues de la simulation du modèle BOORMAN	XXXIV

Liste des tableaux

Tableau 1 : Modèles avec le nombre de paramètres à caler.....	13
Tableau 2 : Bassins versants sélectionnés, périodes des données utilisées et Taux de lacune des débits observés	17
Tableau 3 : Dates de début et de fin des opérations de calage et validation des bassins versants	23
Tableau 4 : Récapitulatif des résultats de calages/validations	24
Tableau 5 : Date de début et de fin des opérations de calage/validation des bassins pour les périodes avant 1970 et après 1970	28
Tableau 6: Interprétation des résultats du calage pour la période humide.....	29
Tableau 7 : Interprétation des résultats du calage pour la période sèche.....	30
Tableau 8 : Interprétation des résultats de validation pour la période humide	31
Tableau 9 : Interprétation des résultats de validation pour la période sèche	32
Tableau 10 : Date de début et de fin des opérations de calage/validation des bassins pour les périodes avant 1980 et après 1980	34
Tableau 11 : Interprétation des résultats de calage pour la période fort débit	36
Tableau 12 : Interprétation des résultats de validation pour la période faible débit	37
Tableau 13 : Interprétation des résultats de calage pour la période faible débit.....	38
Tableau 14 : Interprétation des résultats de validation pour la période fort débit	39
Tableau 15 : Temps médian en fonction des modèles	42
Tableau 16 : Valeurs issues de la simulation du modèle ARNO	XXVI
Tableau 17 : Valeurs issues de la simulation du modèle MARTINE	XXVII
Tableau 18 : Valeurs issues de la simulation du modèle CEQUEAU	XXVIII
Tableau 19 : Valeurs issues de la simulation du modèle CREC.....	XXIX
Tableau 20 : Valeurs issues de la simulation du modèle GARDENIA	XXX
Tableau 21 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR3J	XXXI
Tableau 22 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR4J	XXXII
Tableau 23 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR5J	XXXIII
Tableau 24 : Valeurs issues de simulation du modèle BOORMAN.....	XXXIV

Listes des figures

Figure 1 : Composantes d'un modèle (Singh, 1995)	8
Figure 2 : Classification des modèles (Singh, 1995)	9
Figure 3 : Schéma descriptif de l'outil utilisé pour les tests	20
Figure 4 : Schéma d'une moustache	22
Figure 5 : Représentation en boîte à moustaches des performances en calage/validation en fonction du critère NS choisi	25
Figure 6 : Représentation en boîte à moustaches des performances en calage en fonction de la méthode d'optimisation choisi	27
Figure 7 : Histogramme de la pluviométrie moyenne journalière pour les périodes avant 1970 et après 1970	28
Figure 8 : Résultats du calage pour la période humide	29
Figure 9 : Résultats du calage pour la période sèche	30
Figure 10 : Résultats de validation pour la période humide	31
Figure 11 : Résultats de validation pour la période sèche.....	32
Figure 12 : Résultats de robustesse des modèles sur les périodes humide et sèche.....	33
Figure 13 : Histogramme des débits moyen pour les périodes avant 1980 et après 1980	35
Figure 14 : Résultats du calage pour la période de fort débit	36
Figure 15 : Résultats de validation pour la période de faible débit.....	37
Figure 16 : Résultats du calage pour la période faible débit.....	38
Figure 17 : Résultats de validation pour la période fort débit.....	39
Figure 18 : Résultats de robustesse des modèles en considérant le période fort débit et la période faible débit pour les bassins non sahéliens.....	40
Figure 19: Résultats de robustesse des modèles en considérant le période fort débit et la période faible débit pour les bassins sahéliens.....	41
Figure 20 : Représentation en moustache des temps de simulation en fonction des modèles	42
Figure 21 : Histogramme pour le classement des modèles en considérant la période humide et la période sèche.....	43
Figure 22 : Histogramme pour le classement des modèles en considérant la période de fort débits et la période de faible débit	44
Figure 23 : Schéma du modèle ARNO (Perrin, 2000).....	II
Figure 24 : Schéma du modèle GR3J (Perrin, 2000)	V
Figure 25 : Schéma du GR4J et GR5J (Moine, 2008)	VIII
Figure 26 : Schéma du modèle CEQUEAU (Perrin, 2000)	XI
Figure 27 : Schéma du modèle CREC (Perrin, 2000).....	XIII
Figure 28 : Schéma du modèle GARDENIA (Perrin, 2000)	XV
Figure 29 : Schéma du modèle MARTINE (Perrin, 2000).....	XVII
Figure 30 : Schéma du BOORMAN (Perrin, 2000).....	XX
Figure 31 : Bassins versants du Benin	XXI
Figure 32 : Bassins versants du Burkina Faso	XXII
Figure 33 : Bassins versants de la Côte d'Ivoire.....	XXIII
Figure 34 : Bassins versants du Mali	XXIV
Figure 35 : Bassins versants du Niger.....	XXV

Introduction générale

L'apparition et l'essor des modèles pluie-débit ont commencé dans les années soixante (Nascimento, 1995). En général, la modélisation hydrologique est l'application d'expressions mathématiques et logiques qui définissent les relations quantitatives entre les caractéristiques de l'écoulement (sorties) et les facteurs influant sur ces valeurs (entrées). Cette définition englobe un large éventail de méthodes. À un extrême se trouvent les techniques purement empiriques, dites «boîtes noires», dont le but n'est pas de modéliser la structure interne et la réponse physique du bassin versant mais uniquement de rapprocher les entrées et les sorties du système que constitue un bassin versant. À l'autre extrême, des techniques font intervenir des ensembles complexes d'équations, fondées sur les lois physiques et les concepts théoriques régissant les processus hydrologiques. Entre ces deux extrêmes se situent divers modèles. Ces modèles traitent généralement le bassin dans sa globalité.

Grâce aux progrès importants réalisés dans le domaine de l'informatique et des Systèmes d'Informations Géographiques, une autre voie de modélisation s'est ouverte : les modèles hydrologiques distribués qui utilisent une description de plus en plus complète du bassin versant et des termes du cycle hydrologique.

Le modèle hydrologique est un outil incontournable dans la compréhension de la dynamique d'un bassin versant, dans l'utilisation rationnelle des ressources en eau de ce bassin et dans la lutte contre les catastrophes naturelles liées aux crues. Le souci de la modélisation pluie-débit est de mettre à la disposition des utilisateurs (aménageurs, ingénieurs,...) un outil simple permettant l'estimation des débits.

Problématique

L'impact des variabilités climatiques et des activités humaines est un sujet prioritaire compte tenu des conséquences parfois dramatiques que celui-ci peut engendrer. Les implications sur les ressources en eau sont fortes et touchent, à leur tour, de très nombreux secteurs d'activités. Ainsi, l'évolution des ressources en eau pour les états de l'Afrique de l'Ouest est une question préoccupante tant pour le développement économique (agriculture, énergie hydroélectrique) que pour le devenir des populations (santé, alimentation en eau potable, sécurité alimentaire). Les états de l'Afrique de l'Ouest sont très sensibles aux situations extrêmes (inondation, sécheresse) en raison de leur structure économique, sociale et démographique. Ces situations extrêmes engendrent des déplacements massifs de population, une paralysie économique et, dans les situations les plus graves, famines et pertes de vies humaines. L'évolution des ressources en eau est par conséquent au cœur des préoccupations des états de l'Afrique occidentale mais aussi de la communauté scientifique.

Pour répondre à ces besoins, le 2iE souhaite bâtir une chaîne de traitement de données hydro-climatiques qui va des données de pluie jusqu'au données d'écoulement. Ainsi il est nécessaire d'identifier quels pourraient être les modèles hydrologiques journaliers à implémenter au sein de cette chaîne.

Objectifs

L'objectif global se résume à identifier les modèles hydrologiques journaliers qui donnent une meilleure représentation de la relation pluie-débit des bassins versants de l'Afrique de l'Ouest. Il s'agit spécifiquement de fournir à travers une évaluation de performance et de sensibilité :

- un outil de recherche et d'enseignement : utilisé pour représenter la relation pluie-débit, pour confronter les différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants aux mesures.
- un outil de prédétermination des débits de crue ou d'étiage : connaissance de la fréquence des débits de crue (supérieurs à un seuil de risque par exemple) ou des faibles débits (inférieurs à un débit réservé par exemple) qui risquent de se produire, et sur quelle durée. Cette connaissance peut permettre le dimensionnement d'ouvrages et de réservoirs ou d'aménagements dans le lit du cours d'eau ;
- un outil d'extrapolation : reconstitution de séries de débits plausibles (les données de pluie étant souvent disponibles sur des périodes beaucoup plus longues que les débits), données utilisées par exemple pour le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zones inondables ;
- un outil de prévision des crues et des étiages : il s'agit d'évaluer par avance (avec un délai de quelques heures à quelques jours), connaissant l'état du bassin, les débits de crues susceptibles de présenter des risques (inondation) ou les débits d'étiages pouvant demander de mettre en place une gestion particulière de la ressource (par des barrages-réservoirs par exemple) pour assurer l'approvisionnement en eau ou la préservation de la vie halieutique. On s'inscrit ici dans une démarche d'analyse en continu du bassin.

Ainsi les modèles qui seront retenus vont servir de base à une plateforme de modélisation hydrologique au pas de temps journalier pour le 2iE.

Méthodologie générale

Notre approche méthodologique est structurée de la façon suivante :

- recherche bibliographique : cette phase a permis de cerner le sujet dans sa globalité, de se familiariser avec les termes hydrologiques, de découvrir plusieurs modèles hydrologiques avec leur description complète (but du modèle, structures, description mathématiques...).
- écrire les différents modèles sous Matlab : il s'agit de programmer les différents modèles découverts sous Matlab enfin de les rendre sous forme d'outils facilement utilisables. Ceci permettra de faire aisément les différents tests qui seront détaillés ci-dessous.
- rassembler des données hydroclimatiques sur un grand nombre de bassins versants d'Afrique de l'Ouest. Ce sont des données d'entrée/sortie des différents modèles, essentiellement la pluie, l'évapotranspiration et les débits observés.
- définir une méthodologie de comparaison de ces modèles
- tester ces différents modèles selon les critères de comparaison précédemment définis
- analyser les résultats
- définir une hiérarchie entre les modèles hydrologiques selon les différents critères.

I Les modèles hydrologiques

Depuis l'apparition de la modélisation hydrologique, de nombreux modèles ont été développés en fonction des objectifs recherchés. Selon Singh (1995), un modèle est représenté par la figure 1.

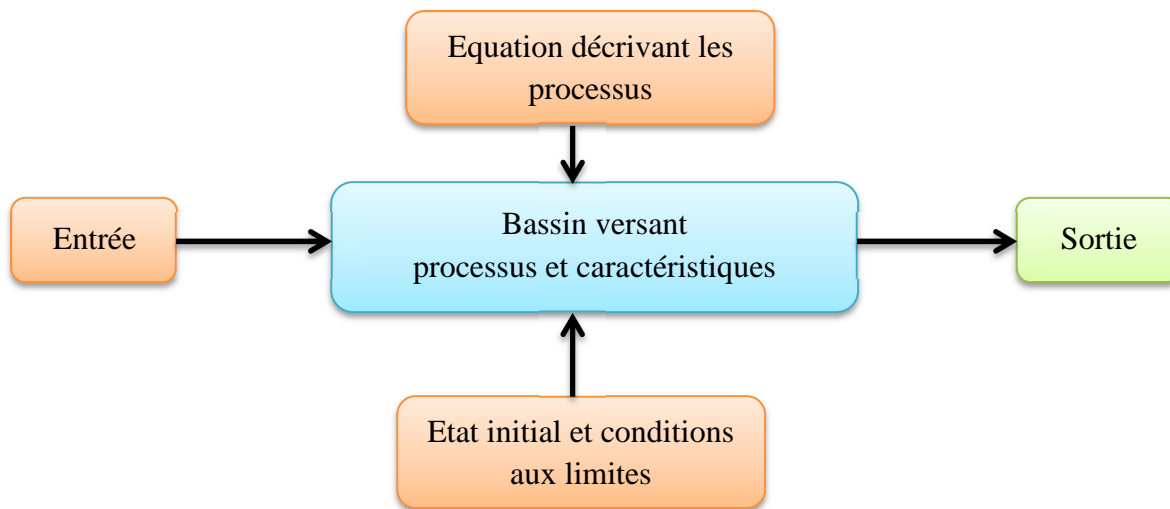


Figure 1 : Composantes d'un modèle (Singh, 1995)

I.1 Classification des modèles hydrologiques

Les différents choix d'élaboration des modèles hydrologiques ont engendré une multitude de modèles exploitables dont chacun est doté de champs d'application et de validité restreints.

Les différences portent notamment sur les options de simulation en termes de discrétisation spatiale : les modèles globaux et les modèles distribués. De plus, ils diffèrent au niveau de l'expression des phénomènes hydrologiques, liés soit à des équations empiriques, soit à des équations physiques, soit à une simplification plus ou moins poussée de ces équations physiques (approche conceptuelle).

Ainsi, beaucoup de classifications des modèles ont été proposées et il y a presque autant de classifications que d'hydrologues. A titre d'exemple, Refsgaard et Storm (1996) classent les modèles hydrologiques en trois catégories : les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles distribués à base physique.

La difficulté de trouver une classification unifiée provient du fait que la grande diversité des approches entraîne une grande diversité des caractéristiques des modèles (Perrin, 2000). Néanmoins, les critères de classification des modèles reposent principalement sur la représentation de l'espace, du temps et des processus décrits (Singh, 1995 ; Payraudeau, 2002).

Ainsi, la classification proposée par Singh (1995) est représentée par la figure 2. C'est celle-ci que nous retiendrons.

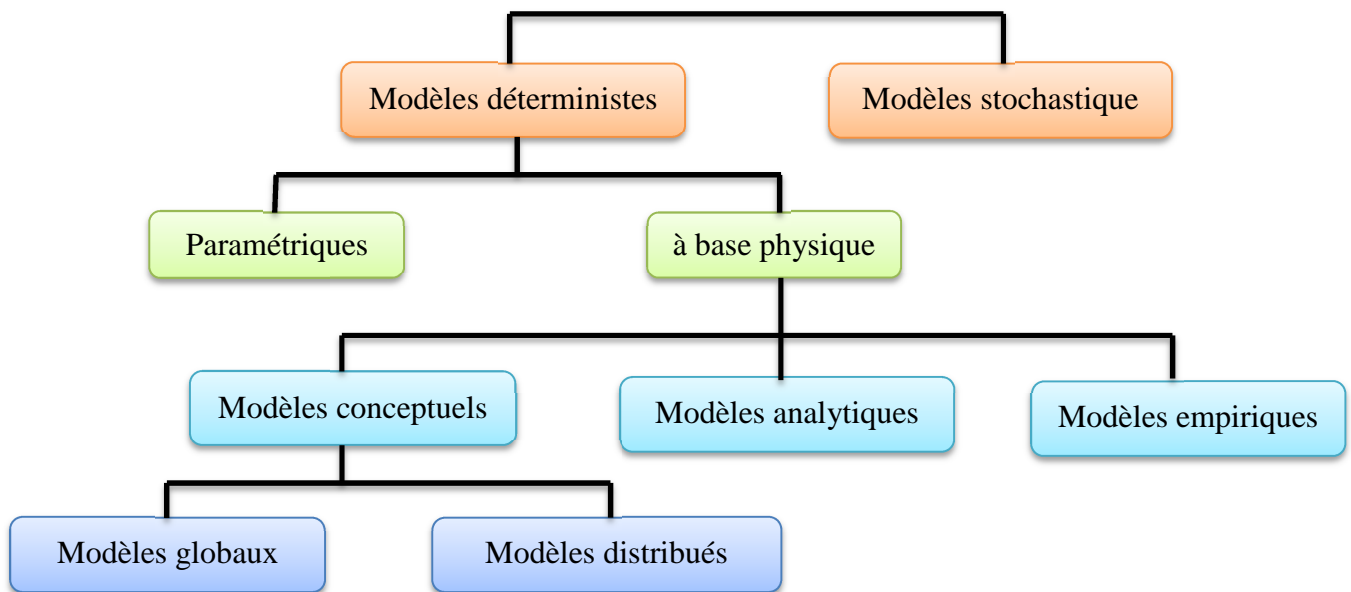


Figure 2 : Classification des modèles (Singh, 1995)

1.1.1. Modèles stochastiques

Les modèles stochastiques représentent la nature aléatoire des phénomènes hydrométéorologiques à l'aide de distributions statistiques. La modélisation stochastique peut être envisagée dans le cas où il y a des incertitudes sur les données ou parfois même sur les processus mis en jeu. Ainsi on peut considérer 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.

1.1.2. Modèles déterministes

Un modèle est dit déterministe (par opposition à stochastique) si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire, c'est à dire résultant soit de l'observation soit de grandeurs reconstituées. Ces modèles s'appuient sur la description du bassin versant et prennent en compte une ou plusieurs de ses caractéristiques physiques (pente, superficie, type de sol, occupation du sol, ...). La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Les modèles déterministes ont pour application la prévision hydrologique pour la gestion des ouvrages hydrauliques ou pour la prévision des crues, la délimitation des zones inondables et bien d'autres.

1.1.3. Modèles paramétriques

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

1.1.4. Modèles à base physique

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comporte idéalement aucun paramètre. L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

Ces modèles utilisent les équations qui décrivent la physique des processus hydrologiques : infiltration avec l'équation de Green et Ampt ou le modèle de Philip, évapotranspiration avec la formule de Penman, écoulement dans les zones saturée et non saturée avec les équations de Boussinesq et de Richards ou encore écoulement à surface libre avec les équations de Barré de Saint-Venant. Ces équations s'appuient sur des paramètres physiques mesurables, comme la conductivité hydraulique des sols à saturation, qui ne nécessitent pas, en théorie, d'être calibrés.

1.1.5. Modèles analytiques

Ce sont des modèles pour lesquels les relations 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 corrélation entre les variables. Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables.

1.1.6. Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont fondés sur les relations observées entre les entrées et les sorties de l'hydrosystème considéré. Ils ne décrivent ni le fonctionnement du système, ni les causes du phénomène hydrologique considéré. Ils utilisent des équations développées et ajustées sur la base des données obtenues sur le système pour exprimer les relations entre variables d'entrée et de sortie du système (relation pluie débit).

1.1.7. Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels se fondent sur quelques simplifications du cycle de l'eau tout en considérant le bassin versant comme un ensemble de réservoirs interconnectés.

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 est un parfait exemple de modèle conceptuel.

1.1.8. Modèles globaux ou distribués

Selon la manière de considérer le territoire étudié et les processus hydrologiques, on parle de modèle global ou de modèle distribué. Le modèle global décrit le bassin versant comme une et une seule entité hydrologique. Le modèle distribué décrit le bassin versant de façon relativement fine en fonction de la variabilité spatiale des processus (courbe de niveaux, plan inclinés et éléments drainants, unités hydrologiques indépendantes, unités hydrologiques représentatives). Les processus hydrologiques sont simulés pour l'ensemble du bassin versant.

I.2 Choix des modèles

Le choix d'un modèle est une étape délicate dans la mesure où nous n'avons pas d'idée au préalable des processus hydrologiques qui peuvent intervenir dans le bassin. En général, un essai de modélisation est fait pour connaître les processus importants dans un bassin.

Blöschl et Grayson (2000) illustrent bien la relation conceptuelle entre le niveau de complexité du modèle, la disponibilité des données et la performance du modèle.

De ce fait, les modèles qui seront retenus ont été choisis en fonction de leurs domaines d'application, leur demande en données d'entrées, leur degré d'application et de la qualité des résultats escomptés.

I.2.1. Modèle ARNO

Ce modèle a été développé à Institute for Hydraulic Construction, University of Bologna, Bologna en Italie par Todini en 1996. Il offre des applications variées : prédiction, prévision de crues en temps réel, effet de changements environnementaux.

Il a été appliqué initialement au bassin de la rivière Arno en Toscane dont la superficie est d'environ 4000 km².

Franchini et Pacciani (1991) ont montré que ARNO donnait de meilleurs résultats que les modèles Stanford, Sacramento, Tank et Xinanjiang.

La version retenue dans le cadre de ce travail comporte huit (08) paramètres. La description de cette version est en annexe 1.

I.2.2. Modèle GR3J, GR4J et GR5J

Les modèles hydrologiques GR (Génie Rural) sont des modèles empiriques élaborés au Cemagref (aujourd'hui IRSTEA) au début des années 1980. Leurs constructions se sont faites sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

Le modèle GR5J (modèle du Génie Rural à 5 paramètres au pas de temps Journalier) fut publié pour la première fois par Ma et al. (1990). Plusieurs versions améliorées furent proposées comme celle de Le Moine (2008). C'est la dernière version que nous avons rencontré lors de nos recherches bibliographiques. Ainsi, cette version a été retenue, sa description est en annexe 2.

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres au pas de temps Journalier) a connu plusieurs versions, proposées successivement par 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. Nous proposons d'utiliser la version de Perrin et al. (2003), sa description est en annexe 2.

Pour GR3J (modèle du Génie Rural à 3 paramètres au pas de temps Journalier), nous retenons la version proposée par Edijatno et al. (1999). La description de cette version est en annexe 2.

Ces modèles ont eu de nombreuses applications notamment avec Servat et Dezetter (1992) qui les ont testés en Côte d'Ivoire. Nascimento (1995) a utilisé ces modèles pour la mise en évidence d'effet de changements environnementaux. Yang et al. (1995) ont également appliqué ces modèles pour la gestion de barrages-réservoirs.

1.2.3 Modèle CEQUEAU

Publié pour la première fois par Girard et al. (1972), le modèle a été conçu à Institut National de la Recherche Scientifique l'INRS-Eau Québec. La première version comptait onze (11) paramètres. Il existe des versions dérivées comportant un nombre variable de paramètres. Nous avons retenu la version utilisée par Perrin (2000), la description de cette version est donnée en annexe 3.

Le modèle CEQUEAU a connu de nombreuses applications, notamment au Canada avec des données météo radar pour la prévision (Fortin et al., 1987), la gestion de réservoirs artificiels (Morin et al., 1975), la simulation en climat semi- aride en Mauritanie (Girard, 1975) et l'évaluation de l'impact d'aménagements au Burkina Faso avec Desconnets et al. (1998). Ayadi et Bargaoui (1998) ont utilisé le modèle pour la modélisation des écoulements de l'oued Miliane.

1.2.4 Modèle CREC

Le modèle a été conçu au Laboratoire d'Hydrologie Mathématique à Montpellier par Cormary et Guilbot (1973). Le modèle existe sous deux versions à l'origine : une version réduite comportant 5 paramètres et une version complète à 10 paramètres. Néanmoins il existe des versions améliorées comportant des paramètres variables en nombre, par exemple la version utilisée par Perrin en 2000 qui comporte 6 paramètres.

Ce modèle fut utilisé par :

- Cormary et Guilbot (1973) pour une étude des relations pluie-débit sur les Bassins Versants Représentatifs Expérimentaux (BVRE) de la Diège (225 km²), d'Orgeval (104 km²) et de l'Hallue (219 km²) ;
- Drogue et al. (1982) sur 9 bassins versants karstiques du sud de la France ;
- Servat et Dezetter (1991) sur un bassin tunisien (13,9 km²), 2 bassins burkinabés (67,8 et 971 km²) et 4 bassins ivoiriens (443 à 4700 km²).

Nous retenons la version de Perrin (2000) et sa description se trouve en annexe 4.

1.2.5 Modèle GARDENIA

Modèle conçu par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), il est publié pour la première fois par Thiery (1982). La version initiale compte 5 paramètres. Dès lors des versions comportant un nombre variable de paramètres ont été engendrées ; par exemple celle utilisée par Perrin (2000) comprend 6 paramètres.

Thiery (1982) l'a utilisé pour mettre en évidence les effets des activités humaines.

Filippi et al. (1990) ont utilisé le modèle sur dix bassins au Burkina Faso pour évaluer la recharge des aquifères en climat Soudano-Sahélien.

Nous retenons une version à cinq paramètres. La description est faite en annexe 5.

1.2.6 Modèle MARTINE

Mazenc et al. (1984) développèrent le modèle MARTINE au BRGM. Ce modèle permet de prendre en compte l'influence de la géomorphologie.

Ce modèle fut appliqué aux bassins versants de Grande Bretagne (Mazenc et al., 1984).

La version utilisée comporte six (06) paramètres et est décrite en annexe 6.

1.2.7 Modèle Boorman

Le modèle fut développé à l'Institut Hydrologique de Wallingford par Bonvoisin et Boorman (1992). Il existe plusieurs versions du modèle ; se distinguent entre autres le modèle B (5 paramètres) et le modèle C (3 paramètres). Nous optons pour le modèle B compte tenu de la disponibilité de sa description mathématique. Par ailleurs ce modèle a été testé sur 25 bassins (25-1616 km²), en Angleterre. La description est faite en annexe 7.

Tableau 1 : Modèles avec le nombre de paramètres à caler

Nom du modèle	Nombre de paramètres
ARNO	8
MARTINE	6
CEQUEAU	8
CREC	5
GARDENIA	5
GR3J	3
GR4J	4
GR5J	5
BOORMAN	5

Au total neuf (09) modèles ont été retenus et le nombre des paramètres des modèles varie entre 3 et 8 (Tableau 1).

I.3 Opération de calage et de validation

Le calage consiste à sélectionner le jeu de paramètres d'un modèle de façon à ce que celui-ci simule le comportement hydrologique du bassin versant de la meilleure façon possible (Madsen, 2000).

L'opération de calage consiste donc à trouver des valeurs des paramètres du modèle qui minimise l'erreur de modélisation sur une période considérée.

La validation porte sur l'application des modèles sur les données qui n'ont pas été utilisées lors de calage des modèles.

I.4 Fonction objectif ou critère

Le critère est l'objet numérique de référence lors d'un calage d'un modèle. Il doit tendre vers une valeur donnée (minimum, maximum, ou constante donnée) lorsque les valeurs calculées tendent vers les valeurs observées. Les fonctions privilégiées par les utilisateurs pour calibrer un modèle hydrologique sont généralement basées sur des mesures d'erreur élaborées autour d'écart entre débits observés et débits pondérés par un coefficient variable.

Les critères existent sous multiples formes dans la littérature, à titre d'exemple : le critère de Nash et Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) ; Le critère de Fortin (Fortin et al., 1971). L'étude comparative entre les différentes formes de critères, mené par Servat et al. (1989), a montré que le critère de Nash-Sutcliffe s'impose comme celui qui, globalement, permet d'accéder au meilleur calage. Par ailleurs, Gupta et al. (1998) stipulent que le critère de Nash-Sutcliffe est l'un des plus utilisés en hydrologie.

En considérant les transformations possibles sur les débits, le critère de Nash-Sutcliffe (NS) existe sous trois formes. En fonction de l'objectif poursuivi par le modélisateur, le choix peut s'opérer entre :

- NS (Q) évalue l'aptitude du modèle à simuler plus particulièrement les débits de crue,
- NS (lnQ) évalue l'aptitude du modèle à simuler plus particulièrement les débits en période d'étiage.
- NS (\sqrt{Q}) évalue l'aptitude du modèle à simuler l'ensemble des débits.

Il est à noter que les résidus d'un modèle ne sont généralement pas homoscedastiques, c'est-à-dire que leur variance est dépendante de la valeur du débit. La transformation en racine carré du débit réduit le caractère de non-homoscedasticité. Cette transformation a été utilisée par Chiew et al. (1993) et Perrin (2000).

Écriture du critère de Nash- Sutcliffe avec \sqrt{Q}

NS est formé à partir du critère des moindres carrés défini par :

$$\sum (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{sim,i}})^2$$

et d'un modèle de référence correspondant à la variance de la série observée définie par :

$$\sum (\sqrt{Q_{obs,i}} - moy(\sqrt{Q_{obs}}))^2$$

avec $Q_{obs,i}$: débit journalier observé au jour i,

moy : opérateur moyenne,

$Q_{sim,i}$: débit journalier simulé au jour i,

où la série des débits observés correspond à une période choisie et la série des débits simulés correspond à la même période.

Ainsi, NS s'écrit :

$$NS = 1 - \frac{\sum (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{sim,i}})^2}{\sum (\sqrt{Q_{obs,i}} - moy(\sqrt{Q_{obs}}))^2}$$

On en déduit les autres formulations possibles du NS selon les transformations effectuées sur les débits :

Avec les Log des débits :

$$NS = 1 - \frac{\sum (\ln(Q_{obs,i}) - \ln(Q_{sim,i}))^2}{\sum (\ln(Q_{obs,i}) - moy(\ln(Q_{obs})))^2}$$

Sans transformation :

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum (Q_{obs,i} - moy(Q_{obs}))^2}$$

En assimilant le terme du critère des moindres carrées à un terme de variance résiduelle, on remarque que NS traduit une certaine efficacité (ou rendement) du modèle, comparable au coefficient de détermination d'une régression. Par suite la valeur de NS permet d'apprécier le calage du modèle.

La référence au modèle de référence donne une efficacité relative et sans dimension permettant des comparaisons de performance entre modèles et/ou entre bassins.

I.5 Méthodes d'optimisation

L'optimisation vient du latin optimum qui signifie le meilleur et consiste à déterminer le meilleur élément d'un ensemble au sens d'un critère quantitatif donné.

L'optimisation des paramètres des systèmes non-linéaires, comme les modèles pluie-débit, est une étape délicate. Certains auteurs s'accordent à dire que la qualité des paramètres d'un modèle dépend notamment de la puissance et de robustesse de l'algorithme utilisé (Duan et al., 1992).

Pour cela, nous penchons vers les méthodes du Simplex et de Rosenbrock pour ce travail. Ce choix trouve sa justification dans la mesure où ces méthodes sont les plus utilisées en hydrologie et qu'elles offrent l'avantage d'éviter le calcul du gradient, ce qui est intéressant lorsque la fonction n'est pas différentiable ou que le calcul du gradient représente un coût très important. Elles adoptent une stratégie itérative dans laquelle partant d'un point de l'espace des paramètres, on se déplace dans une direction qui améliore continûment la valeur de la fonction critère jusqu'à ne plus pouvoir générer d'amélioration (Perrin, 2000).

D'où l'intérêt d'examiner les principes de ces méthodes.

1.5.1 Principe de la méthode du simplex

Un simplex est un polyèdre régulier à $n + 1$ sommets dans un espace à n dimensions (E^n). Dans le cas de la recherche du minimum d'une fonction critère $f(x)$, on peut sélectionner des valeurs de x en des points de l'espace E^n situé aux sommets d'un simplex. La fonction critère peut être évaluée en chacun des sommets du simplex. On peut alors faire une projection du point présentant la valeur la plus élevée (dans le cas d'une minimisation du critère) passant par le barycentre des autres sommets. Ce point est alors supprimé et un nouveau simplex obtenu par réflexion peut être constitué à partir des points restants et du nouveau point projeté. L'utilisation de cette procédure, à savoir l'élimination systématique du sommet présentant la valeur la plus élevée de la fonction critère et de quelques règles permettant de réduire la taille du Simplex, permet une recherche directe à pas fixe mais à direction variable. Nelder et Mead (1965) ont adapté la méthode au problème local par accroissement ou contraction selon que l'on se rapproche ou non du minimum.

1.5.2 Principe de la méthode de Rosenbrock

Partant d'un point donné, cette méthode procède par une recherche unidimensionnelle successive le long d'un jeu de n directions orthonormées dans l'espace des paramètres à optimiser. La recherche débute en introduisant une modification d'un pas de Δx_1 dans la première direction, correspondant à l'axe du premier paramètre. Dans le cas d'une minimisation d'un critère, si la valeur de la fonction critère à ce nouveau point est inférieure ou égale à la valeur du point précédent (succès) le pas Δx_1 est alors multiplié par un facteur α positif, et on remplace ce premier point par ce nouveau point. Si la valeur est supérieure à celle du point précédent (échec) le premier point n'est pas remplacé et le pas de recherche Δx_1 est multiplié par un facteur β négatif. Rosenbrock recommande l'utilisation de $\alpha = 3$ et $\beta = -0.5$.

Cela signifie que lorsqu'on se déplace dans une direction sur un axe, le pas de recherche est multiplié par 3 dans la même direction ($\alpha > 0$) et lorsqu'on se déplace dans une mauvaise direction, le pas de recherche est divisé par 2 ($\beta < 0$) dans direction opposée.

Ce processus se poursuit jusqu'à enregistrer un succès suivi d'un échec. On change alors le système d'axe. Le point d'arrivée celui où la valeur du critère est la plus faible depuis le début du processus sert à définir le premier axe du nouveau système d'axe. On répète le processus jusqu'à ce qu'on enregistre à nouveau un succès suivi d'un échec sur chaque axe. L'arrêt de la méthode s'effectue à partir d'un nombre donné d'étapes de recherches (ou itérations) ou lorsque les variations de la fonction critère reste inférieure à une valeur donnée.

Remarque: Ces méthodes dont les principes sont décrits ci-dessus, ne s'appliquent pas sans limites. En effet, elles ont leurs limites lorsqu'il y a de multiples valeurs optimales présentant ainsi plusieurs zones de convergences (Beven et Binley, 1992 ; Duan et al., 1992). Pour y remédier, Servat et Dezetter (1991, 1992) ont proposé dans leurs travaux sur la Côte d'Ivoire de combiner ces 2 méthodes : méthode de Rosenbrock suivi de la méthode du simplex.

Des travaux sur l'influence du jeu de paramètres de départ ont révélé que plus le jeu initial de paramètres est éloigné du jeu optimum de paramètre, moins la méthode réussit à converger vers cet optimum (Ibitt et O'Donnell, 1971 ; Gupta et Sorooshian, 1985 ; Hendrickson et al., 1988 ; Tanakamaru, 1995).

Pour éviter ces 2 écueils, nous proposons un choix automatique préliminaire des valeurs initiales des paramètres à optimiser. Ce choix s'opère à travers un programme de minimisation que nous avons élaboré. Ce programme balaie l'espace des paramètres à un pas d'espace qui est fonction du nombre d'itérations souhaitées pour déterminer le minimum de la fonction critère. Ainsi, les valeurs initiales des paramètres pour le modèle se trouvent voisines de celles correspondant au minimum de la fonction critère. Ces valeurs initiales sont contenues dans la zone de convergence globale. Les tests menés sur les dix-sept bassins ont montré qu'au-delà de cent (100) itérations le minimum de la fonction critère ne change plus.

I.6 Initialisation des réservoirs et période de mise en route

Dans notre cas où les modèles comportent des réservoirs, cette phase d'initialisation consiste 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 longueur de la période retenue pour ce travail est de un (01) an. Elle consiste à ne prendre en compte que les résultats après une durée d'observation fixée au préalable.

I.7 Les facteurs limitant l'application des modèles

Parmi ces facteurs, on note des modifications des conditions physiques du bassin induites par les activités humaines. Ainsi, l'implantation d'un réservoir sur une rivière, ou 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, ou 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. On fait l'hypothèse que leur influence est négligeable.

II Matériels et méthodologie de test

II.1 Les bassins versants

Le choix des bassins est fonction de leur superficie et de la disponibilité des données.

La superficie est un critère important puisque le pas de temps journalier nous oriente vers des bassins de petite et moyenne taille, c'est-à-dire des bassins pour lesquels le temps de concentration est de l'ordre de quelques jours et inférieurs au mois.

Nous avons retenu 17 bassins versants répartis dans cinq pays : le Bénin (trois (3) bassins – figure 31), le Burkina Faso (cinq (5) bassins – figure 32), la Côte d'Ivoire (cinq (5) bassins – figure 33), le Mali (deux (2) bassins – figure 34) et le Niger (deux (2) bassins – figure 35).

II.2 Présentation des données d'entrées

En fonction des modèles choisis, les données d'entrée/sortie se réduisent aux données de pluie, d'évapotranspiration (ETP) et de débits observés au pas de temps journalier.

II.2.1 Débits observés

Les débits moyens journaliers sont estimés aux stations hydrométriques (la localisation des stations hydrométriques est répertoriée sur les cartes de localisation des bassins versants). Ces données proviennent de la banque SIEREM (site : <http://www.hydrosociences.fr/sierem/>) gérée par IRD/HSM (Institut de Recherche pour le Développement / UMR HydroSciences Montpellier). Quelques caractéristiques de ces données sont données dans le tableau 2.

Tableau 2 : Bassins versants sélectionnés, périodes des données utilisées et Taux de lacune des débits observés

bassin principal	nom de la station hydrométrique (Nom du Cours d'eau)	Surface (km ²)	Période de disponibilité des données	Lacune (débit observé)
Niger	Bougouni	15236	1957-1980	7%
Comoé	Yendere	5930	1962-1990	10%
Volta	Wayen	20159	1956-1990	23%
Volta	Samandeni	4454	1961-1990	15%
Volta	Nobere	7851	1967-1990	50%
Sassandra	Nibehibe	7280	1977-1995	14%
Coufo	Lanhountalanta	1680	1962-1992	13%
Niger	Koriziena	2887	1970-1990	52%
Niger	Kakassi	7460	1963-1982	16%
Oueme	Kaboua	9600	1963-1992	30%
Niger	Iradoukou	1990	1977-1995	0%
Bandama	Fetekro	10000	1977-1995	4%
Sénégal	Fadougou	9300	1979-1990	0%
Niger	Dolbel	7505	1962-1980	8%
Sassandra	Bafingdala	5930	1977-1995	0%
Agneby	Mbesse	975	1977-1995	2%
Niger	Route Kandi Banikoara	8150	1963-1991	13%

Les lacunes (tableau 2) ne sont pas prises en compte lors de la phase d'optimisation des paramètres.

II.2.2 Pluie

En tant qu'activité météorologique, la pluviométrie consiste 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.

Dans notre cas, la pluviométrie est exprimée en mm/jour. Les données considérées proviennent de diverses stations synoptiques proches ou sur nos bassins versants. Elles ont été mises à notre disposition par HSM.

II.2.3 ETP

L'Evapotranspiration (ET) est la quantité d'eau transférée vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. La notion d'Evapotranspiration Potentielle (ETP), introduite par Thornthwaite en 1948, est une valeur calculée à l'aide des formules mathématiques. Il existe plusieurs formules qui permettent d'estimer l'ETP, Les ETP pour les bassins du Burkina (Koriziéna, Nobéré, Samandeni, Wayen et Yendéré) sont issues des mesures journalières des ETP Penman faites aux stations synoptiques proches de ces bassins. Celles des bassins de la Côte d'Ivoire (Fétékro, Nibéhibe, Bafingdala, Iradougou et Mbesse) sont des interpolations des mesures décennales des ETP Penman des stations synoptiques voisines de ces bassins. Il en est de même pour les bassins du Mali (Fadougou) et du Niger (Dolbel et Kakassi).

Les ETP des bassins du Bénin (Lanhounta-Lanta, Route Kandi-Banikoara et Kaboua) n'étaient pas disponible et nous avons eu recours à la formule d'Oudin pour leurs déterminations. Cette formule à l'avantage, d'après Oudin (2004), de garantir les meilleures simulations de débits. Son intérêt réside aussi dans le fait qu'elle nécessite peu de données d'entrée.

$$\begin{cases} ETP = \frac{R_e T_a + 5}{\rho \gamma 100} & \text{si } T_a + 5 > 0 \\ ETP = 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

ETP: Evapotranspiration potentielle

R_e : le rayonnement extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2}\text{j}^{-1}$)

T_a : température moyenne journalière de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

γ : la chaleur latente de vaporisation (MJ kg^{-1})

ρ : la densité de l'eau (kg m^{-3})

Les données d'ETP, selon les bassins, n'obéissent pas forcément à la même formulation : Penmann ou Oudin. L'expérience montre que bien souvent les modèles sont peu sensibles à cette variable. Et comme notre objectif premier est de tester des modèles hydrologiques, nous pouvons donc raisonnablement penser que cela aura peu d'influence sur les performances des modèles.

II.2.4 logiciels informatiques utilisés pour les tests

Les logiciels utilisés pour tester les modèles sont Excel de Microsoft et Matlab. Les modèles sont programmés sous Matlab et les commandes des opérations sont faites sous Excel. Les opérations se résument à : calage-validation, calage simple, validation simple, choix entre la méthode du Simplex et de Rosenbrock (pour l'optimisation), choix du critère de Nash avec des transformations possibles de la variable débit (débit, racine du débit, logarithme du débit), renseignement des périodes de calage et de validation. Les résultats des simulations sont affichés dans les feuilles Excel et les graphiques sont enregistrés. Une description sommaire de l'outil est donnée par la figure 3.

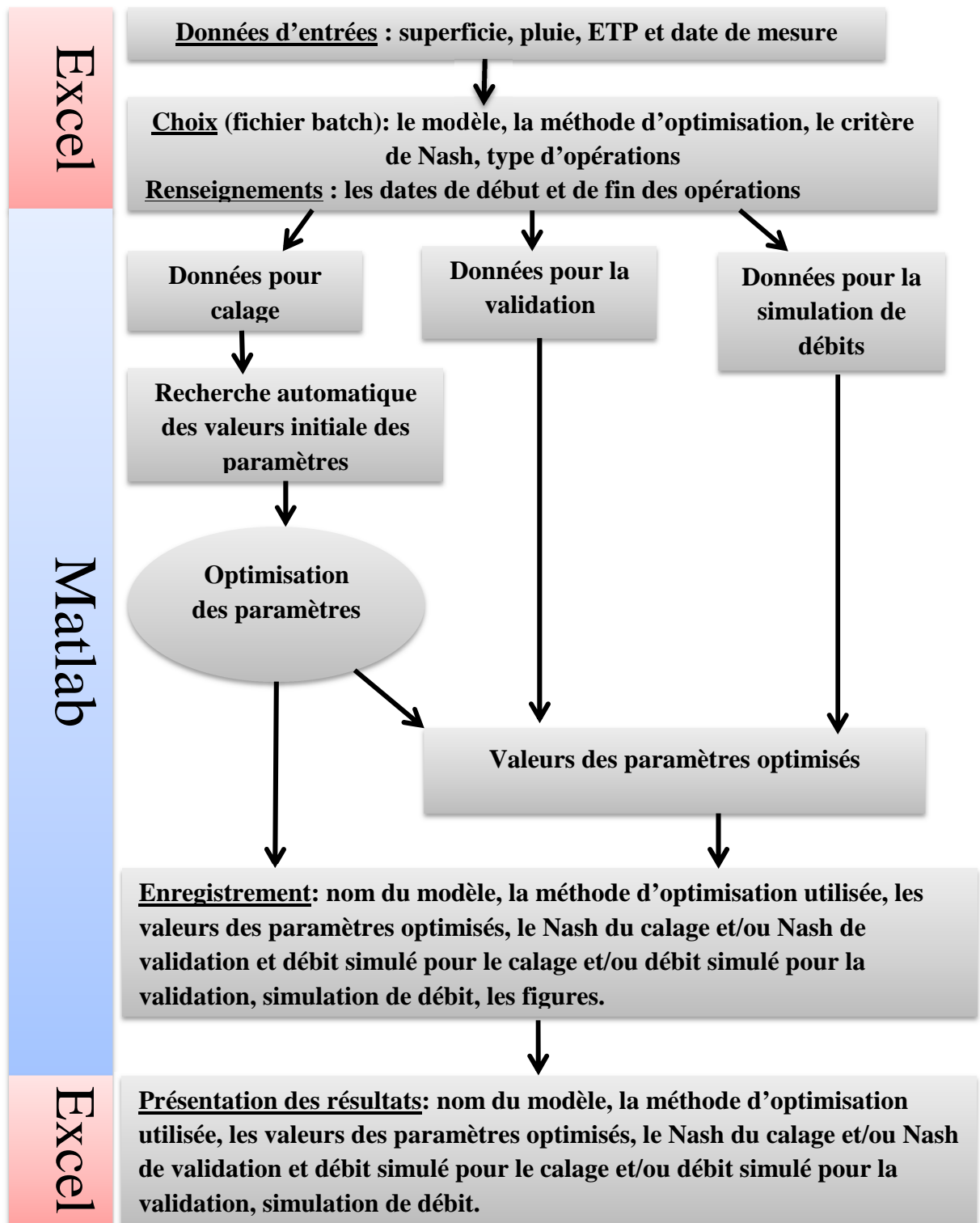


Figure 3 : Schéma descriptif de l'outil utilisé pour les tests

3 Méthodologie de test

Pour tester ces différents modèles, nous avons fait un choix sur quelques critères simples.

II.3.1 La performance

Le calage consiste à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres du modèle pour reproduire au mieux la réponse observée. Afin d'apprécier le calage on a introduit la notion de performance.

Un modèle est dit performant s'il est capable de bien retranscrire en phase de calage les débits observés sur un bassin. Dans un premier temps, la comparaison va porter sur le critère NS en phase calage. Pour cela, les conditions proposées et utilisées par Hoffer (2005) ont été retenues :

- si $NS > 0.8$ alors le modèle est bon sur la période.
- si $0.7 < NS \leq 0.8$ alors le modèle est satisfaisant
- si $0.6 < NS \leq 0.7$ alors le modèle est acceptable
- si $0.5 < NS \leq 0.6$ alors le modèle est peu acceptable
- si $NS \leq 0.5$ alors le modèle est mauvais.

En général on attend d'un modèle hydrologique que son critère NS soit supérieur à 0.8 (Perrin, 2000).

II.3.2 La robustesse

Le calage indique que le modèle choisi est un outil d'interpolation satisfaisant mais il ne permet pas de juger des capacités d'extrapolation du modèle, de sa performance lorsqu'il est utilisé avec des données qui n'ont pas servi à son calage. C'est l'objet de la validation. Le contrôle de la performance du modèle se fait sur une période où les jeux de données n'ont pas servi à son calage. La robustesse peut se mesurer par l'écart entre la performance en validation et la performance en calage.

A l'instar de la performance, la robustesse est l'une des qualités les plus importantes et les plus souhaitables des modèles.

Le test de la robustesse s'appuie sur le Differential Split Sample Test (Klemes, 1986) qui préconise des conditions hydrométéorologiques de calage et de validation différentes. Ainsi, les périodes de calage et de validation ont été choisies en se référant à des études menées par Paturel et al. (1997) définissant une rupture des séries de précipitations autour de l'année 1970 et celle des écoulements autour de deux dates 1970 et 1980. Nous identifierons donc :

- P1 : la période avant 1970,
- P2 : la période après 1970,
- P3 : la période avant 1980,
- P4 : la période après 1980.

II.3.3 Le temps de simulation

Le temps considéré est le temps d'exécution de chaque modèle pour chaque bassin. Cela permet de classer les modèles en ordre croissant en termes de rapidité. Pour appréhender ce temps, les modèles utiliseront les mêmes données pour l'exécution.

II.3.4 Représentation des résultats

Nous proposons les résultats sous forme de représentation en « boîtes à moustaches »..

Généralités sur la représentation en « boîtes à moustaches »

Les « boîtes à moustaches » permettent de représenter simplement un certain nombre de caractéristiques statistiques d'un échantillon :

-médiane

Supposons une liste de N données rangée par ordre croissant.

Si $N=2n+1$, la médiane est la donnée de rang $n+1$;

Si $N=2n$, la médiane est la demi somme des données de rang n et de rang $n+1$.

-**Le premier quartile (Q1)** : est la plus petite donnée de la liste telle qu'au moins un quart des données de la liste sont inférieures ou égales à Q1.

-**Le troisième quartile (Q3)** : est la plus petite donnée de la liste telle qu'au moins les trois quarts des données de la liste sont inférieures ou égales à Q3.

On appelle diagramme en boîte, ou boîte à moustache d'une série, la représentation graphique de la figure 4.

Elle est composée de deux rectangles et de deux segments dont les longueurs correspondent aux paramètres de la série, représentés sur un axe gradué.

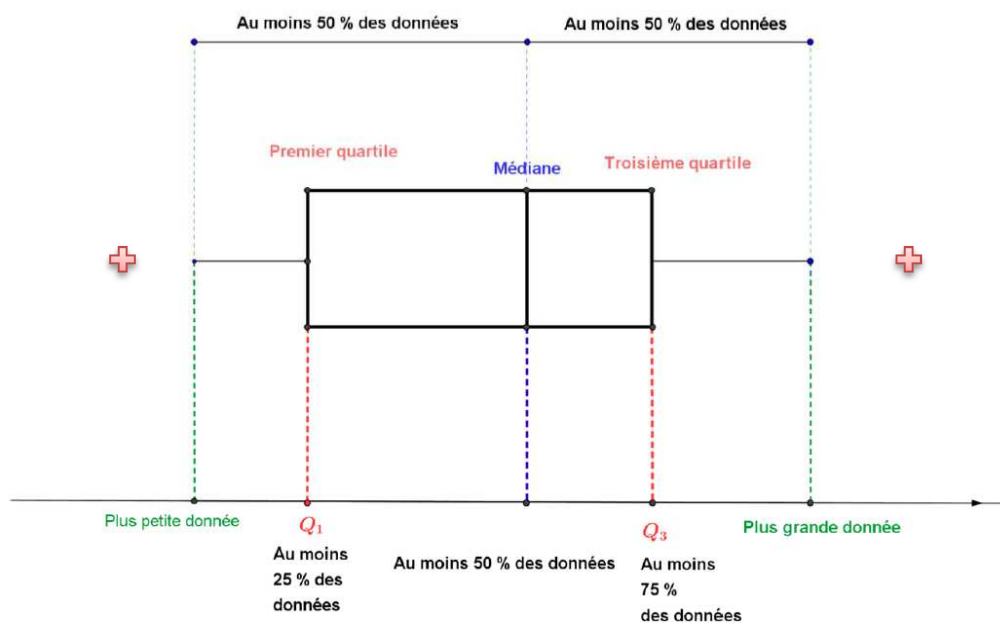


Figure 4 : Schéma d'une moustache

Les croix apparaissent lorsqu'il y a des valeurs exceptionnelles. Une valeur est dite exceptionnelle si l'écart entre cette valeur et les valeurs adjacentes (médiane, et quartiles) est élevée. Les croix représentent les valeurs minimales ou maximales qui sont situées au-delà des valeurs adjacentes. S'il existe au moins une croix au-dessus de la moustache, c'est la valeur du neuvième décile qui remplace la valeur maximale. S'il existe au moins une croix en dessous de la moustache, c'est la valeur du premier décile qui remplace la valeur minimale. L'absence de queue dans certaines moustaches existe dans les cas où la valeur minimale (respectivement maximale) est égale au premier quartile (respectivement troisième quartile).

III Résultats et interprétations

III.1 Résultats globaux des tests

Nous considérons les périodes du tableau 3 pour réaliser les différents calages/validations dont les résultats sont donnés dans le tableau 4.

Tableau 3 : Dates de début et de fin des opérations de calage et validation des bassins versants

Bassins	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation
Bougouni	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980
Yendere	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990
Wayen	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990
Samandeni	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990
Nobere	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Nibehibe	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Lanhountalanta	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992
Koriziena	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Kakassi	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982
Kaboua	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992
Iradougou	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Fetekro	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Fadougou	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990
Dolbel	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980
Bafingdala	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Mbesse	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Route Kandi Bani Koara	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991

Le choix des dates de début et de fin des opérations de calage et validation ont été faites en fonction de la disponibilité des données des bassins (tableau 3).

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats de calages/validations

Modèles	version NS	CALAGE				VALIDATION				Perte de performance
		Q1	Médiane	Q3	Max NS	Q1	Médiane	Q3	Max NS	
ARNO	NS(Q)	35.38	50.25	57.19	84.54	0.59	12.02	40.11	48.65	38.23
	NS(ln(Q))	32.97	46.40	61.43	81.86	-39.47	26.91	32.68	58.79	19.49
	NS(\sqrt{Q})	47.59	57.26	66.34	86.09	15.13	39.43	48.08	65.76	17.83
MARTINE	NS(Q)	-17.31	-2.93	40.76	87.45	-49.74	-17.05	4.05	74.68	14.11
	NS(ln(Q))	-13.25	19.49	54.90	90.61	-86.52	-25.67	-1.31	75.26	45.17
	NS(\sqrt{Q})	-5.64	26.13	48.30	90.37	-53.27	-10.06	6.26	77.09	36.18
CERQUEAU	NS(Q)	31.00	48.51	66.02	91.81	-16.70	8.71	31.06	80.19	39.80
	NS(ln(Q))	34.07	59.82	64.31	83.86	12.91	23.21	40.37	62.37	36.60
	NS(\sqrt{Q})	37.82	63.10	77.25	90.12	16.30	34.37	59.04	84.47	28.73
CREC	NS(Q)	13.93	45.02	60.08	77.28	-69.63	3.54	26.84	63.20	41.48
	NS(ln(Q))	37.18	48.28	56.26	78.86	-3.52	26.54	39.10	61.95	21.75
	NS(\sqrt{Q})	-2.13	51.91	42.85	80.01	-28.35	19.90	42.85	68.90	32.01
GARDENIA	NS(Q)	-7.96	-1.96	0.46	23.80	-28.59	-12.53	-6.67	-0.62	10.58
	NS(ln(Q))	-50.36	-18.87	26.14	74.74	-435.77	-45.58	-23.03	50.63	26.70
	NS(\sqrt{Q})	-14.58	-9.41	5.75	66.84	-51.33	-34.03	-23.49	49.31	24.63
GR3J	NS(Q)	-164.14	-3.28	29.11	75.43	-218.58	-41.39	12.81	73.67	38.11
	NS(ln(Q))	19.30	40.76	64.83	75.58	-68.36	-4.08	37.95	68.12	44.84
	NS(\sqrt{Q})	-101.61	41.62	74.38	88.88	-115.81	25.87	59.90	73.23	15.75
GR4J	NS(Q)	-8574.70	-1808.47	18.04	84.53	-15059.60	-2557.41	-237.46	66.82	748.94
	NS(ln(Q))	-419.38	-77.32	-51.81	65.15	-540.78	-157.60	-102.25	23.46	80.28
	NS(\sqrt{Q})	-11657.78	-38.75	22.25	89.31	-1810.03	-62.14	4.00	36.91	23.39
GR5J	NS(Q)	-22.79	-7.97	19.79	62.00	-173.18	-24.21	-13.86	11.77	16.24
	NS(ln(Q))	-244.75	-153.66	-92.96	68.90	-278.89	-168.44	-114.46	10.01	14.78
	NS(\sqrt{Q})	-96.17	-53.31	-5.98	80.93	-77.85	-42.94	-11.60	46.49	-10.37
BOORMAN	NS(Q)	-24.21	-19.25	-5.69	92.97	-60.52	-17.62	-8.71	82.33	-1.62
	NS(ln(Q))	-90.99	-12.47	28.80	65.59	-100.34	-62.63	-40.37	23.35	50.16
	NS(\sqrt{Q})	22.61	56.06	71.23	86.75	-2.06	30.78	53.53	80.74	25.28

Le tableau 4 donne les statistiques des valeurs de Nash pour le calage et la validation obtenues en fonction du modèle après les tests réalisés sur les dix-sept bassins versant de l'Afrique de l'Ouest

- 1= ARNO
- 2= MARTINE
- 3= CEQUEAU
- 4= CREC
- 5= GARDENIA
- 6= GR3J
- 7= GR4J
- 8= GR5J
- 9= BOORMAN

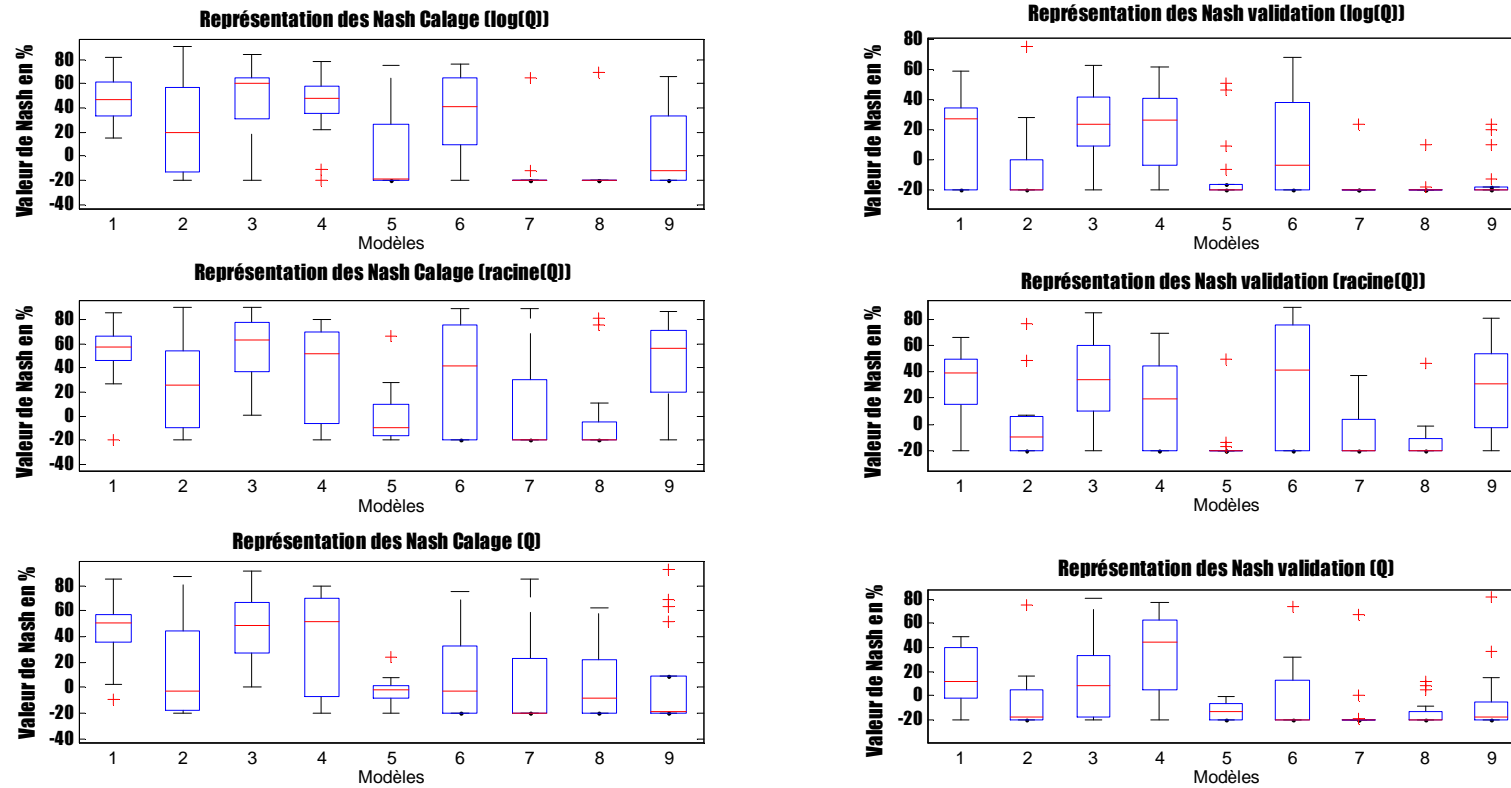


Figure 5 : Représentation en boîte à moustaches des performances en calage/validation en fonction du critère NS choisi

Interprétation (figure 5):

Il ressort que les modèles ARNO, CEQUEAU, GR3J, GR4J et BOORMAN ont des NS en calage et validation meilleurs lorsqu'ils utilisent le critère $NS(\sqrt{Q})$. Par contre, MARTINE, GR5J et GARDENIA ont de meilleurs résultats avec $NS(Q)$. Quant au modèle CREC, il présente de meilleurs résultats avec le critère $NS(\ln(Q))$.

En termes de robustesse, ces modèles sont plus robustes avec le critère $NS(\sqrt{Q})$. On déduit que :

- les modèles MARTINE, GARDENIA sont plus robustes lorsqu'ils utilisent le critère $NS(Q)$;
- les modèles ARNO, CEQUEAU, GR3J, GR4J et BOORMAN sont plus robustes avec le critère $NS(\sqrt{Q})$;
- le modèle CREC est robuste avec $NS(\ln(Q))$.

On déduit que ARNO, CEQUEAU, GR3J, GR4J et BOORMAN simulent aussi bien les débits de crue que les débits d'étiage. Par contre MARTINE, GARDENIA, GR5J simulent mieux les débits de crue et CREC mieux les débits d'étiages.

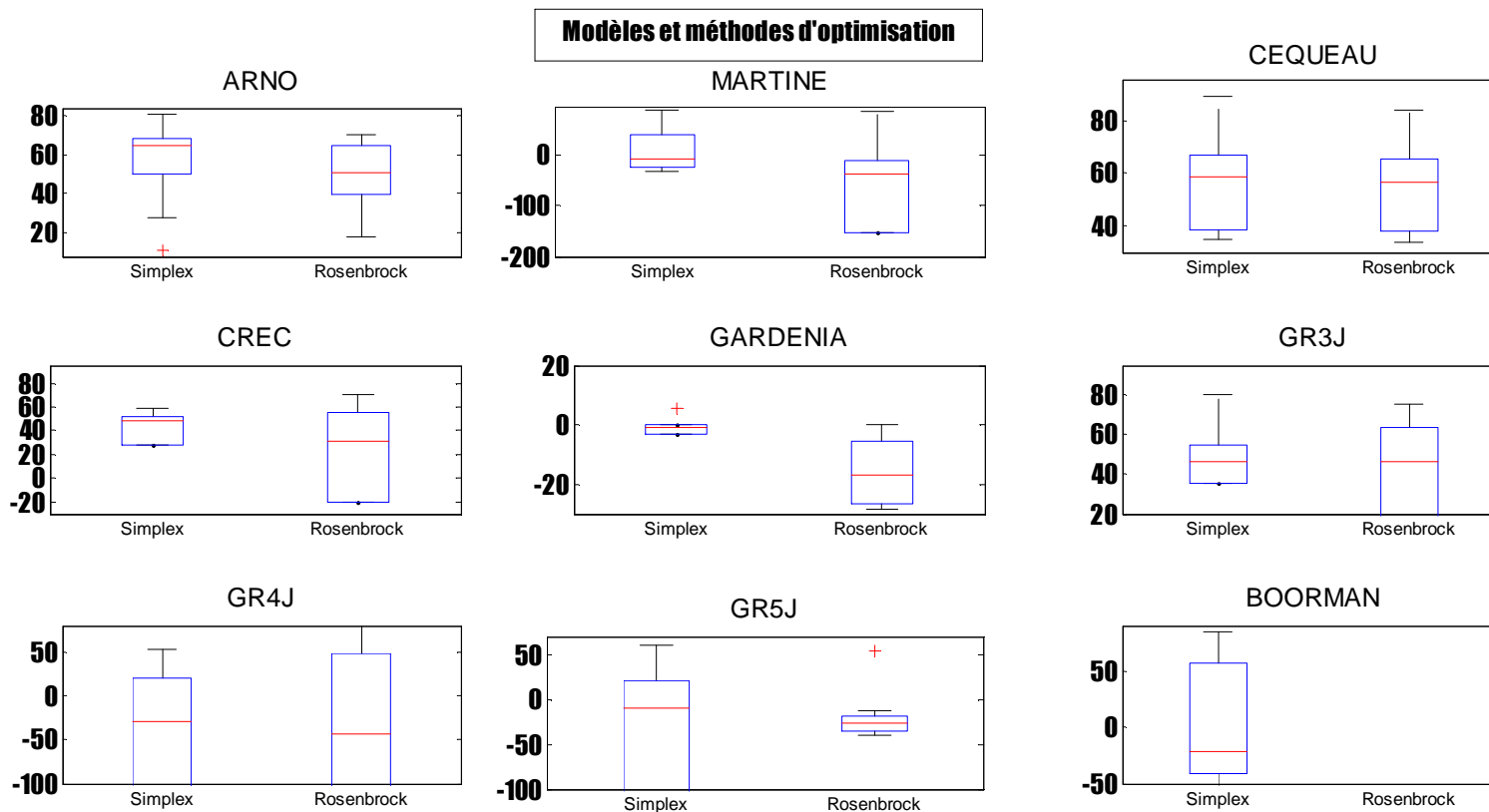


Figure 6 : Représentation en boîte à moustaches des performances en calage en fonction de la méthode d'optimisation choisi

En considérant les valeurs des médians et les intervalles interquartiles, on déduit de la figure 6 que les modèles ARNO, MARTINE, CREC, GARDENIA et BOORMAN donnent de meilleurs résultats avec la méthode de Simplex que la méthode de Rosenbrock, quant à CEQUEAU, GR3J, GR4J et GR5J, ils sont indépendantes de ces deux méthodes puisque les écarts entre ces méthodes sont peu significantes .

Considérons les périodes P1 et P2. La répartition de ces périodes en fonction des bassins est donnée par le tableau 5.

Tableau 5 : Date de début et de fin des opérations de calage/validation des bassins pour les périodes avant 1970 et après 1970

Bassins	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation
Bougouni	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980
Yendere	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990
Wayen	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990
Samandeni	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990
Nobere	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Lanhountalanta	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992
Kakassi	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982
Kaboua	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992
Dolbel	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980
Route kandi banikoara	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991

➤ Pluviométrie en fonction des périodes P1 et P2

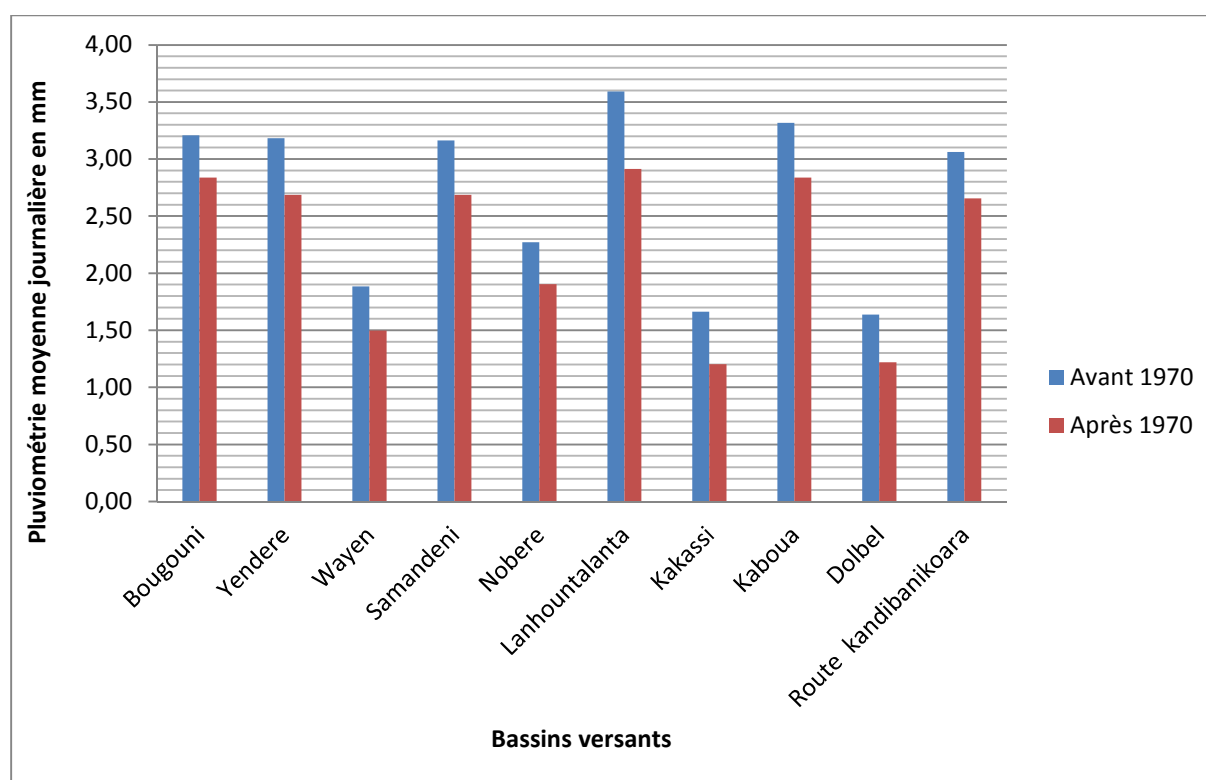


Figure 7 : Histogramme de la pluviométrie moyenne journalière pour les périodes avant 1970 et après 1970

On constate une baisse de la pluviométrie moyenne journalière aux niveaux de tous les bassins versants. Cela confirme une baisse de la pluie autour des années 70 qui se poursuit au-delà des années 80 (Paturol et al., 1994; Mahé et al., 1996). Pour la suite, P1 désigne la période humide et P2 la période sèche.

➤ Performance

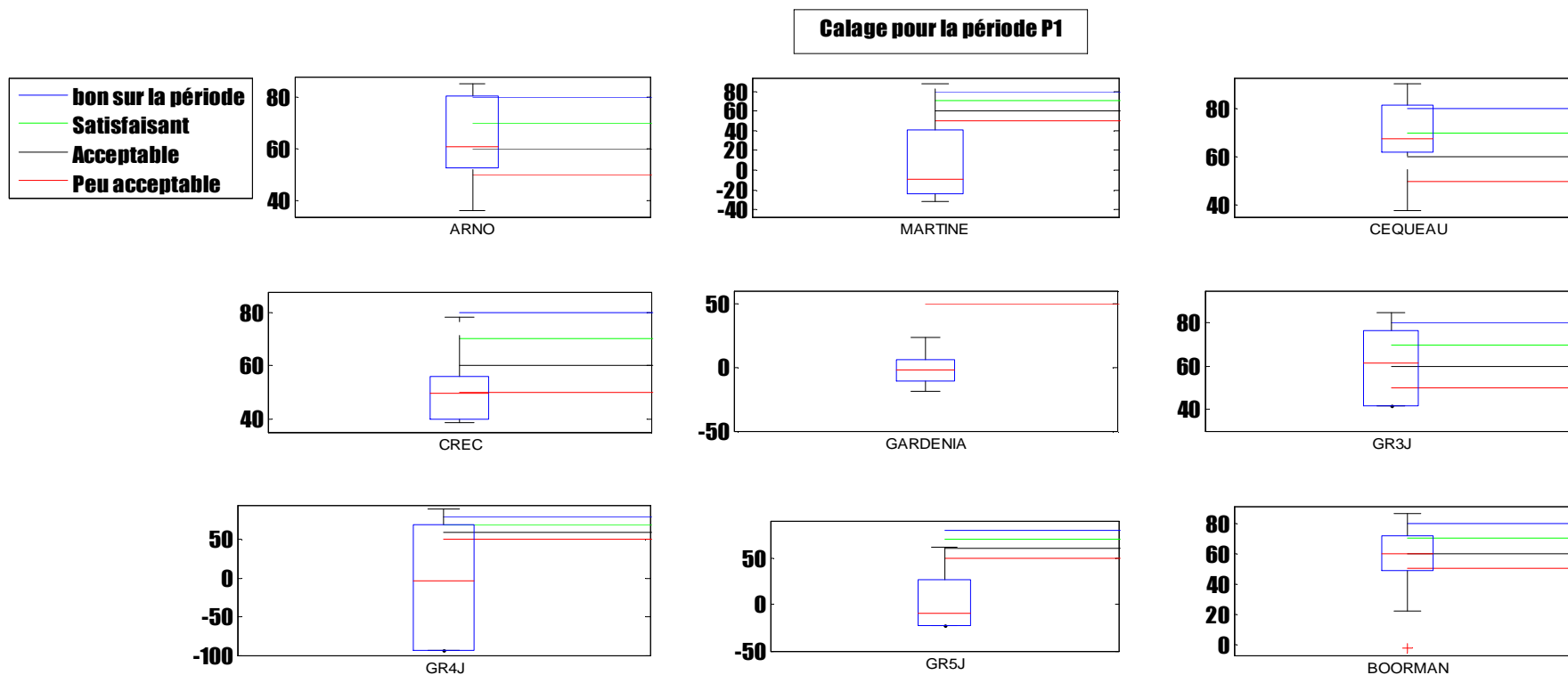


Figure 8 : Résultats du calage pour la période humide

Tableau 6: Interprétation des résultats du calage pour la période humide

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	ARNO, CEQUEAU, GR3J et BOORMAN	ARNO, CEQUEAU, GR3J, GR4J, CREC et BOORMAN
acceptable	ARNO, CEQUEAU, GR3J et BOORMAN	ARNO, CEQUEAU, GR3J GR4J et BOORMAN
Satisfaisant		ARNO, CEQUEAU, GR3J GR4J et BOORMAN
Bon sur la période		ARNO et CEQUEAU

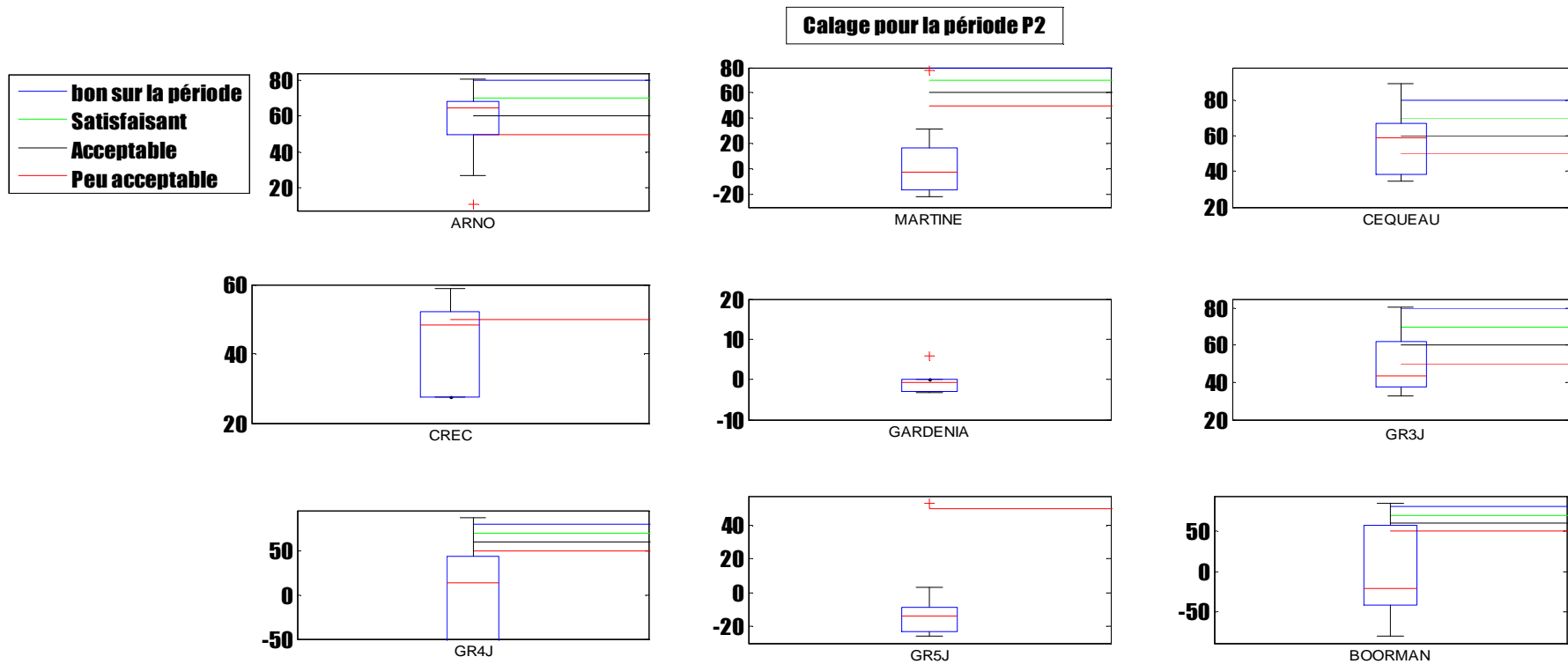


Figure 9 : Résultats du calage pour la période sèche

Tableau 7 : Interprétation des résultats du calage pour la période sèche

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	ARNO et CEQUEAU	ARNO, CEQUEAU, GR3J, CREC et BOORMAN
acceptable	ARNO et CEQUEAU	ARNO, CEQUEAU, GR3J et BOORMAN
Satisfaisant	-	-
Bon sur la période	-	-

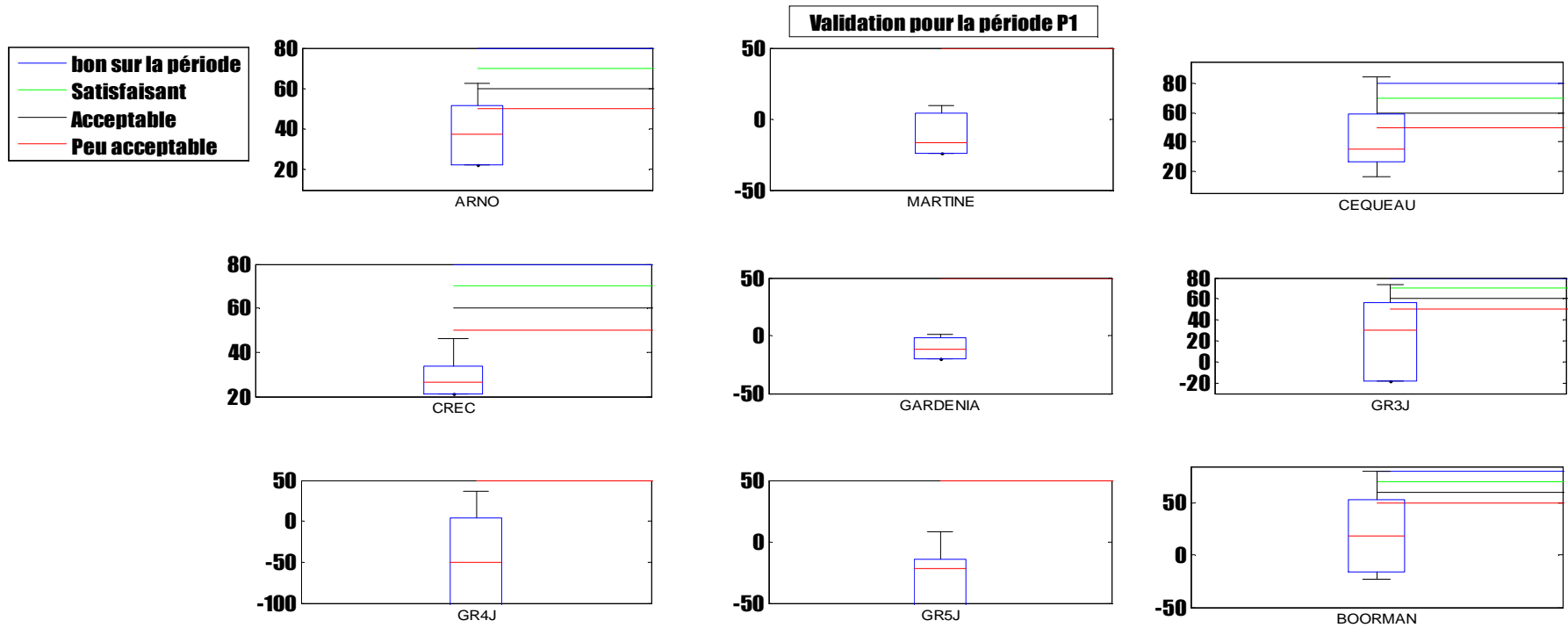


Figure 10 : Résultats de validation pour la période humide

Tableau 8 : Interprétation des résultats de validation pour la période humide

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	-	ARNO, CEQUEAU, GR3J et BOORMAN
acceptable		CEQUEAU
Satisfaisant		
Bon sur la période		

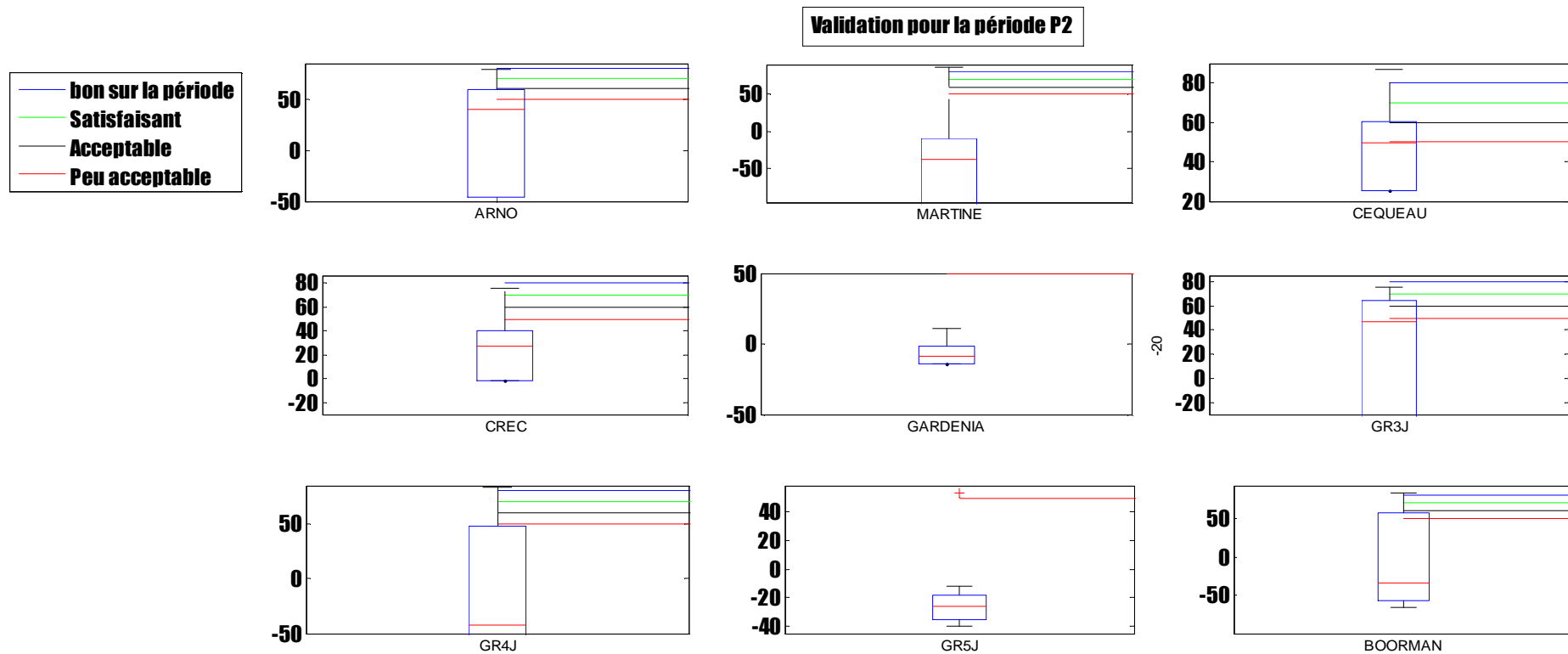


Figure 11 : Résultats de validation pour la période sèche

Tableau 9 : Interprétation des résultats de validation pour la période sèche

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	CEQUEAU et GR3J	ARNO, CEQUEAU, GR3J, BOORMAN, et GR4J
acceptable	-	CEQUEAU, GR3J et BOORMAN
Satisfaisant	-	-
Bon sur la période	-	-

En considérant les figures 8 à 11, on déduit que les modèles ARNO, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J et BOORMAN ont tendance à être plus performants pour un calage sur P2 et une validation sur P1, quant à MARTINE et GR5J, ils semblent performant pour un calage sur P1 et une validation sur P2. Pour affiner ces résultats, la robustesse est examinée de plus près.

➤ Robustesse

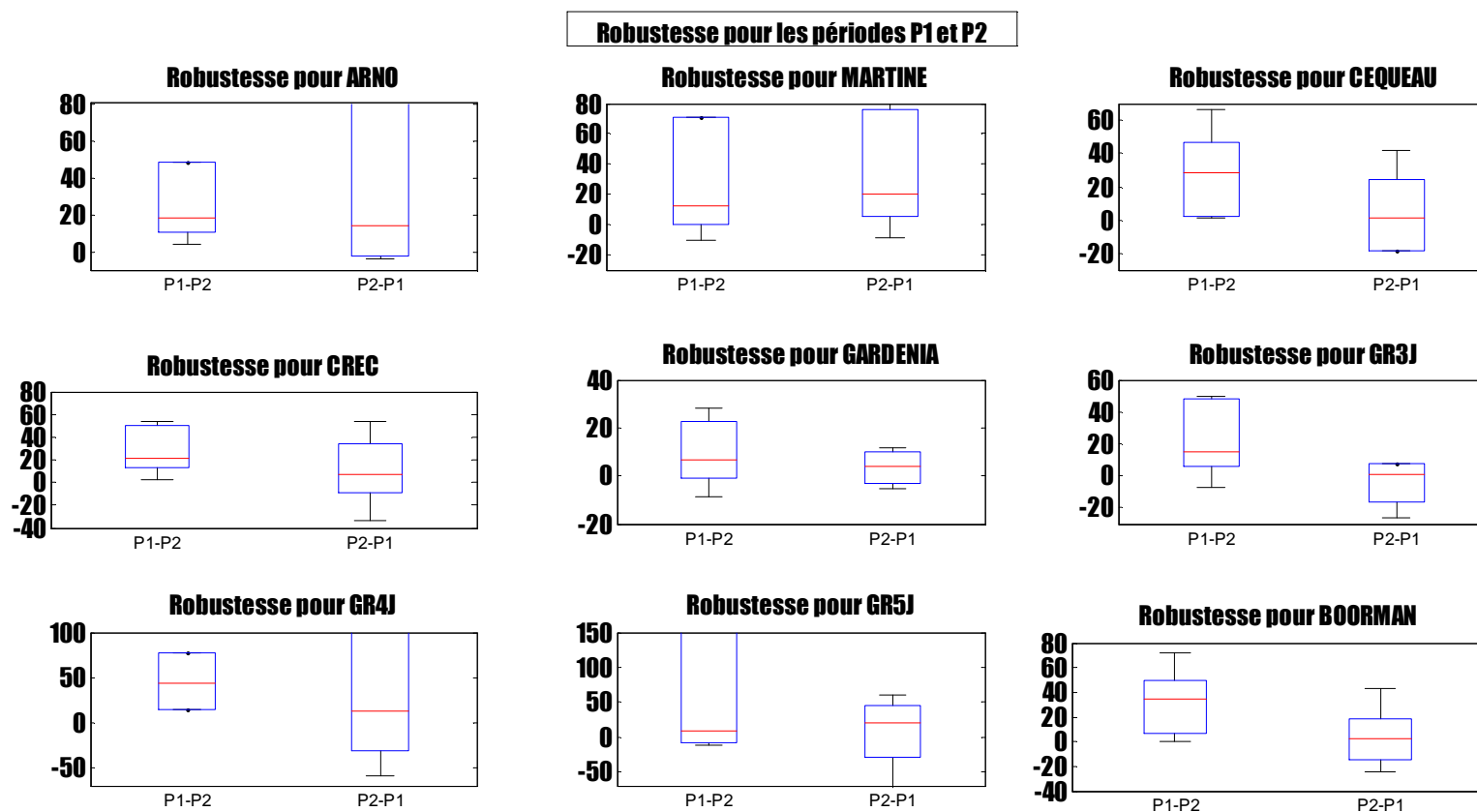


Figure 12 : Résultats de robustesse des modèles sur les périodes humide et sèche.

On déduit de la figure 12 que les modèles ARNO, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J et BOORMAN présentent des pertes en performances moins élevée pour un calage sur P2 et une validation sur P1. Pour MARTINE et GR5J, leurs pertes en performance sont moins élevées pour un calage sur P1 et une validation sur P2.

D'après notre échantillon de bassins et de données, il est préférable de caler ARNO, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J et BOORMAN en période sèche et valider en période humide. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Coron et al. (2012) et Vaze et al. (2011) sur des bassins australiens. De plus, ces résultats confirment ceux obtenus par Ouermi (2013) dans ces travaux de mémoire de master.

Quant à MARTINE et GR5J, il est préférable de les caler sur une période humide et valider sur une période sèche.

- ❖ Considérons les périodes P3 et P4. La répartition de ces périodes en fonction des bassins est donnée par le tableau 10.

Tableau 10 : Date de début et de fin des opérations de calage/validation des bassins pour les périodes avant 1980 et après 1980

Bassins	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation
Yendere	01/01/1962	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Wayen	01/01/1966	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Samandeni	01/01/1961	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Nobere	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Nibehibe	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Lanhountalanta	01/01/1962	01/01/1980	01/01/1980	01/01/1992
Koriziena	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990
Kakassi	01/01/1963	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1982
Kaboua	01/01/1963	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1992
Iradougou	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Fetekro	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Fadougou	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990
Bafingdala	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Mbesse	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995
Route kandi bani koara	01/01/1963	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1991

- Débit en fonction des périodes P3 et P4

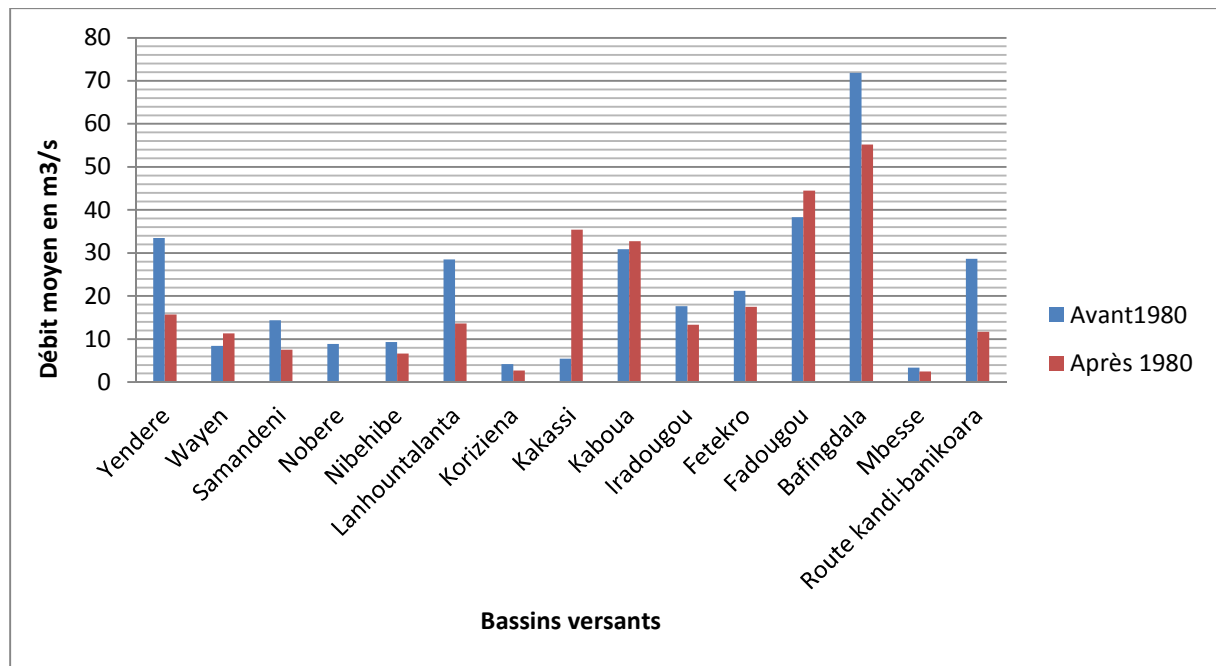


Figure 13 : Histogramme des débits moyen pour les périodes avant 1980 et après 1980

On constate une baisse de débit pour tous les bassins exceptés les bassins de Wayen, Kakassi, Fadougou et de Kaboua. Ainsi, les bassins de Wayen et de Kakassi présentent de faibles débits pour la période P1 (avant 1970) et de forts débits pour la période P2. Le reste des bassins se comportent de façon inverse. Ces observations sont conformes aux résultats observés par Mahé et Paturel (1999) sur les bassins an zone sahélienne et non sahéliennes qui ont mis en évidence le paradoxe sahélien (Sighomnou et al., 2013)

➤ Performance

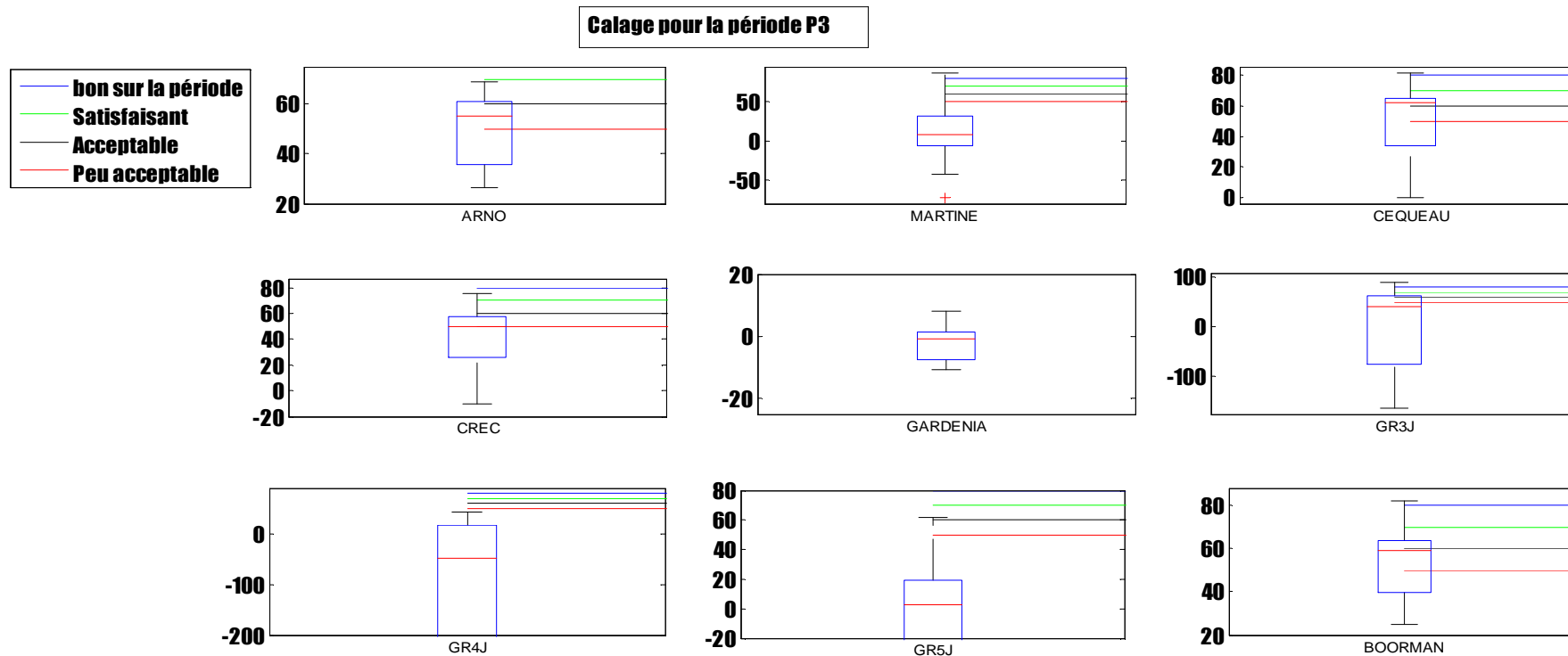


Figure 14 : Résultats du calage pour la période de fort débit

Tableau 11 : Interprétation des résultats de calage pour la période fort débit

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	ARNO, CEQUEAU, CREC et BOORMAN	ARNO, CEQUEAU, GR3J, CREC et BOORMAN
acceptable	CEQUEAU et BOORMAN	ARNO, CEQUEAU, GR3J et BOORMAN
Satisfaisant		
Bon sur la période		

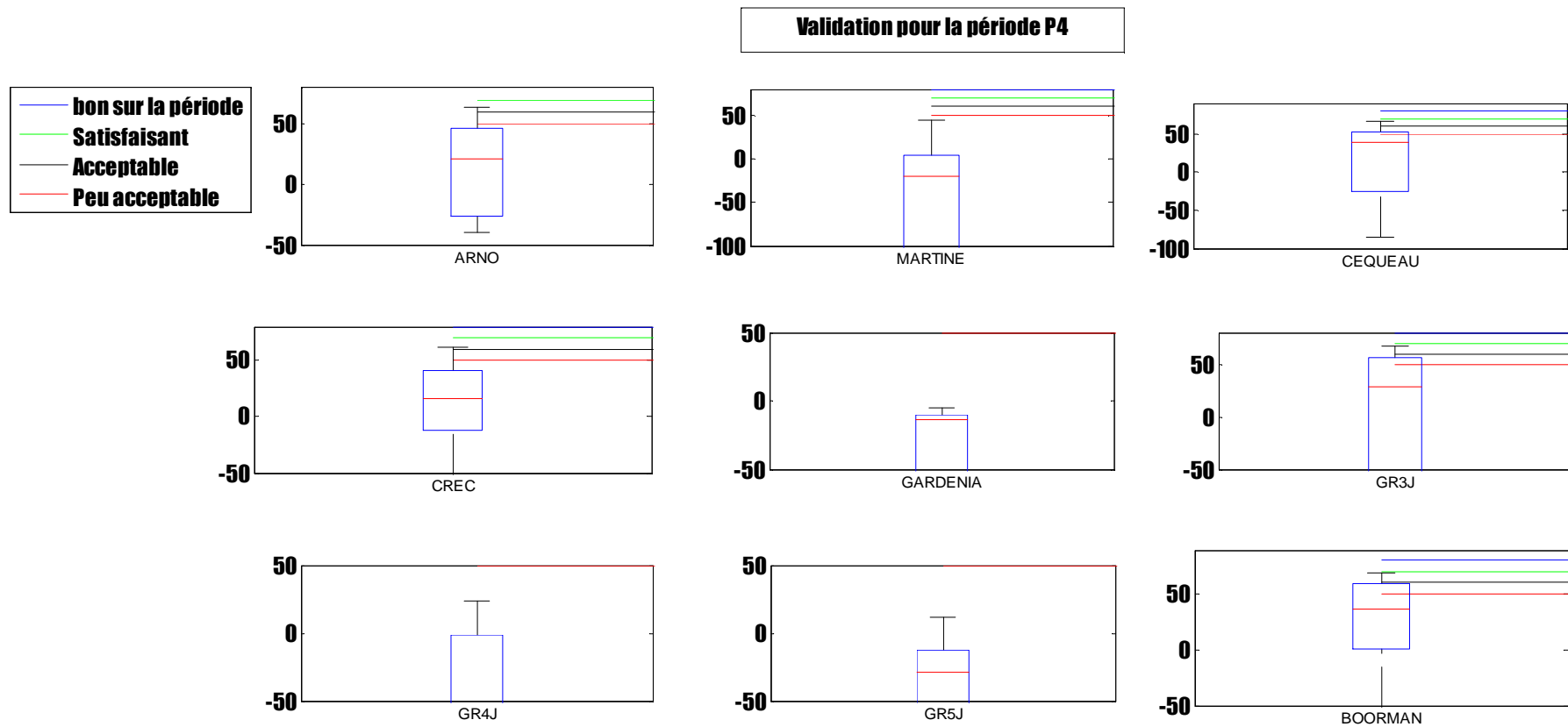


Figure 15 : Résultats de validation pour la période de faible débit

Tableau 12 : Interprétation des résultats de validation pour la période faible débit

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	-	CEQUEAU, GR3J, BOORMAN
acceptable	-	BOORMAN
Satisfaisant	-	
Bon sur la période	-	

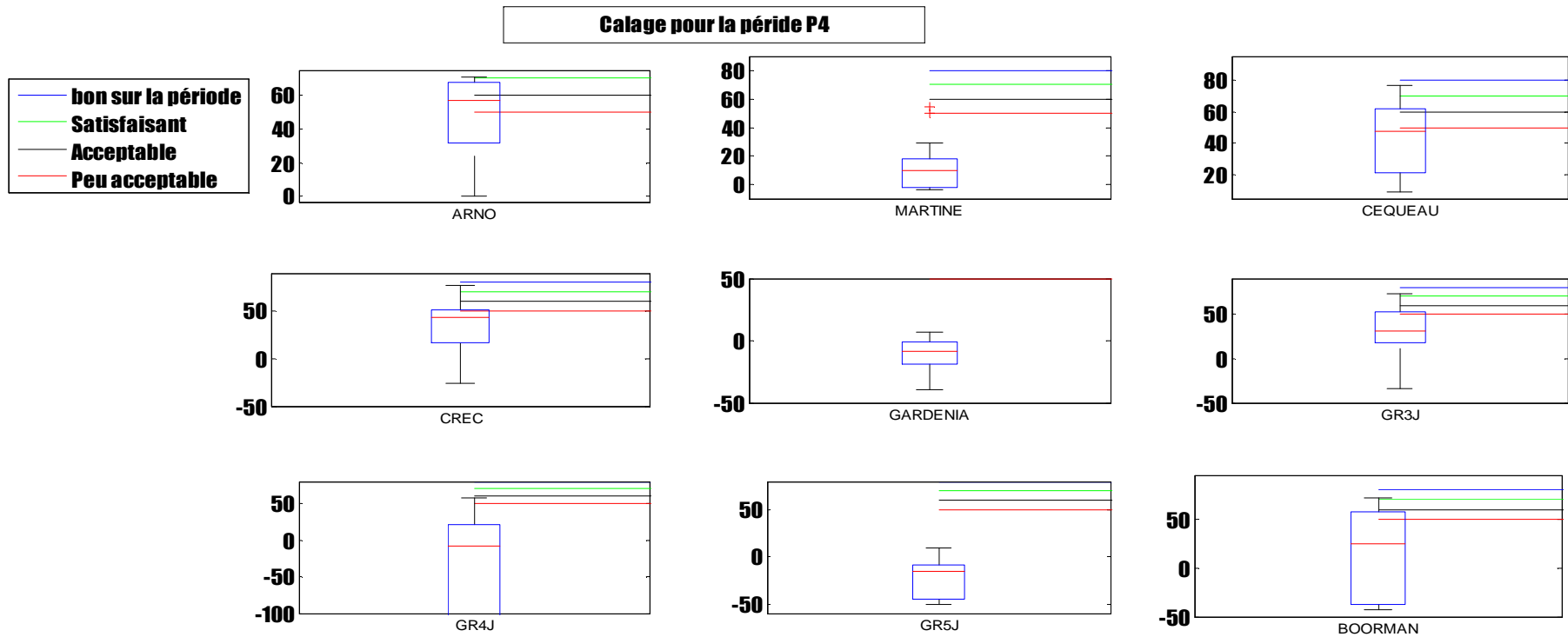


Figure 16 : Résultats du calage pour la période faible débit

Tableau 13 : Interprétation des résultats de calage pour la période faible débit

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	ARNO	ARNO, CEQUEAU, CREC, GR3J, BOORMAN
acceptable	-	ARNO, CEQUEAU,
Satisfaisant	-	-
Bon sur la période	-	-

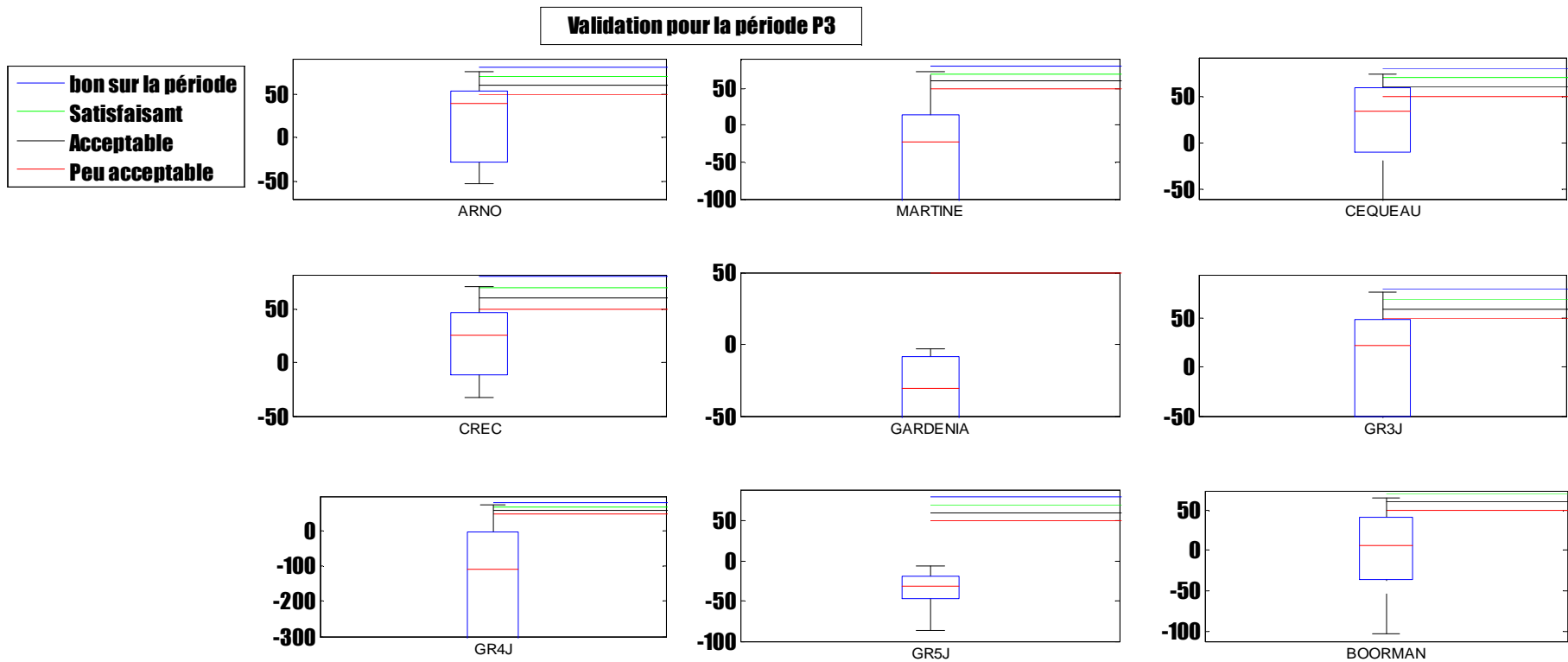


Figure 17 : Résultats de validation pour la période fort débit

Tableau 14 : Interprétation des résultats de validation pour la période fort débit

	50% des bassins	25% des bassins
Peu acceptable	-	ARNO, CEQUEAU et GR3J
acceptable	-	-
Satisfaisant	-	-
Bon sur la période	-	-

Compte tenu du comportement de la relation pluie-débit des bassins versants en zone sahélienne et en zone non sahélienne en fonction des périodes P3 et P4 la robustesse est étudiée en deux étapes.

Dans un premier temps, l'étude de la robustesse va porter sur les bassins non sahéliens : Yendéré, Samandeni, Nobéré, Nobéré, Lanhountalanta, Koriziéna, Iradougou, Fétékro, Bafingdala, Mbesse et Route Kandi-banikoara.

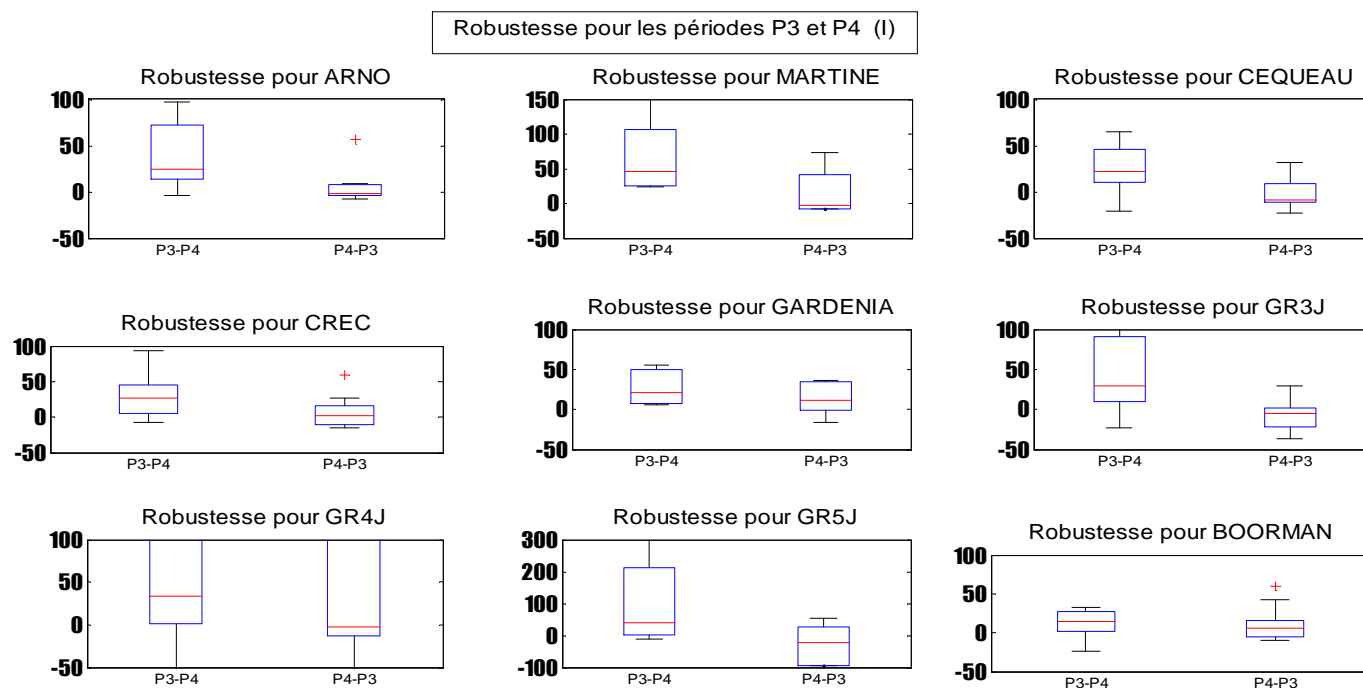


Figure 18 : Résultats de robustesse des modèles en considérant la période fort débit et la période faible débit pour les bassins non sahéliens

Les pertes en performance sont faibles lorsque les modèles sont calés sur P4 et validés sur P3. Il est donc préférable pour ces bassins de les caler en période de fort débit et de les valider en période de faible débit et ce quelque soit le modèle choisi.

L'étude de la robustesse sur les bassins de Wayen, Kakassi, Fadougou et de Kaboua a donné les mêmes résultats (figure 18) : il est préférable pour ces bassins de les caler en période de fort débit et de les valider en période de faible débit et ce quelque soit le modèle choisi.

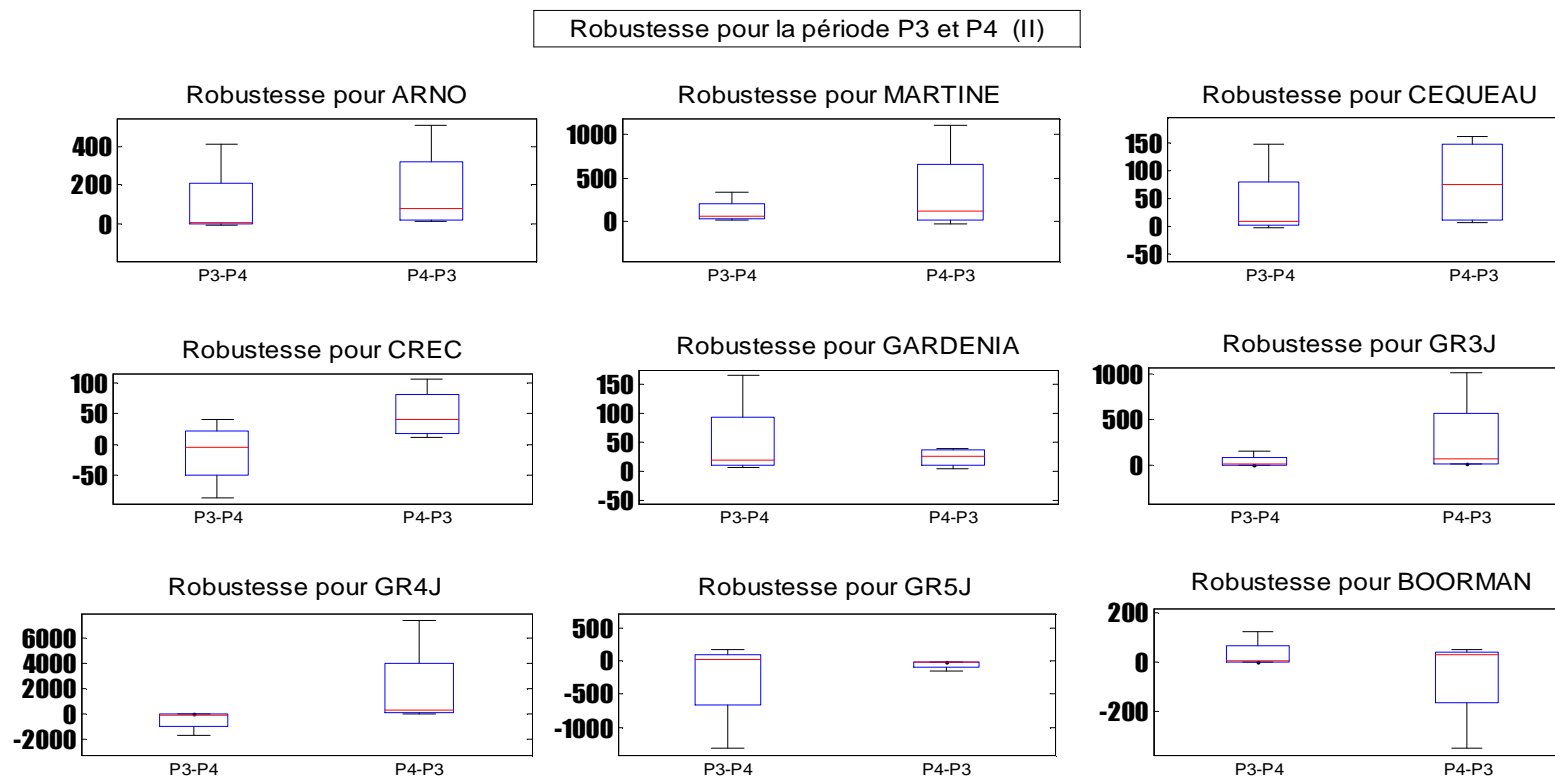


Figure 19: Résultats de robustesse des modèles en considérant le période fort débit et la période faible débit pour les bassins sahéliens

III.2 Temps de simulation

Le temps de simulation considéré est le temps que met chaque modèle pour tourner pour chaque bassin. Pour les 17 bassins et les 9 modèles, les temps de simulation sont représentés par la figure 19:

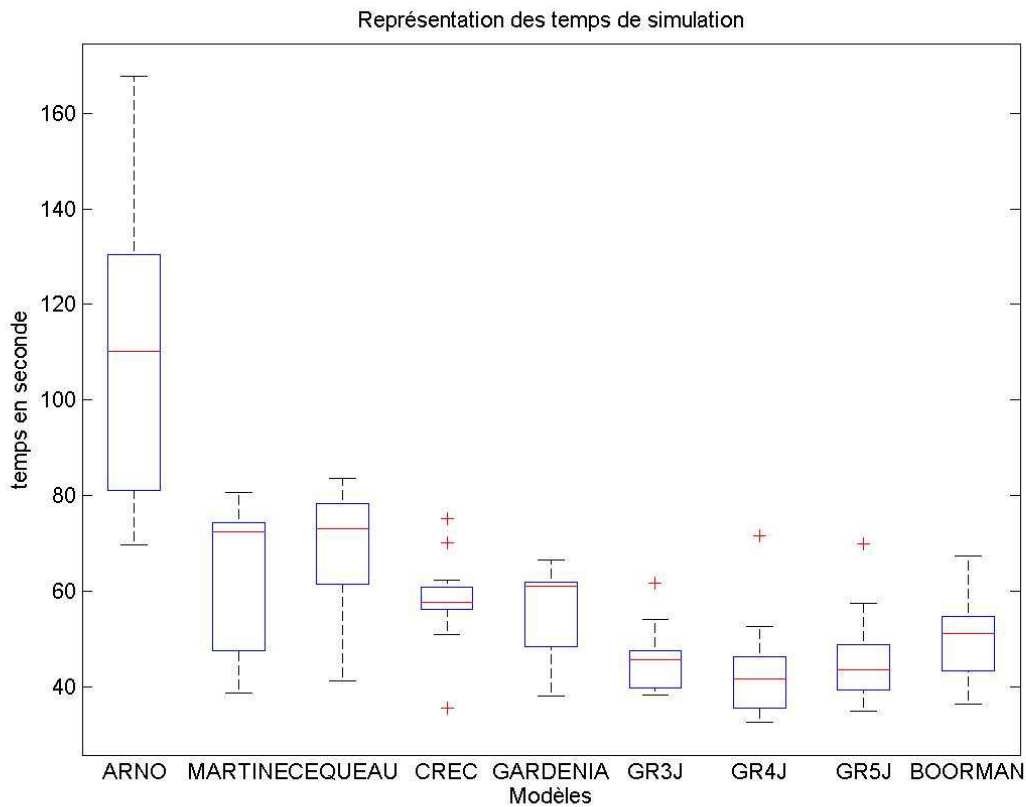


Figure 20 : Représentation en moustache des temps de simulation en fonction des modèles

Il ressort que les modèles ARNO et CEQUEAU mettent plus de temps de calcul pour une même opération. Cela peut se justifier par le nombre élevé de paramètres à optimiser et/ou par la complexité des modèles pour les méthodes d'optimisation adoptées (Rosenbrock et Simplex).

Tableau 15 : Temps médian en fonction des modèles

modèles	Nombre de paramètres	temps médian en s
ARNO	8	110,19
MARTINE	6	72,4
CEQUEAU	8	73,04
CREC	5	57,65
GARDENIA	5	61,02
GR3J	3	45,67
GR4J	4	41,67
GR5J	5	43,51
BOORMAN	5	51,1

Le tableau 15 confirme la relation entre le nombre de paramètres à caler et le temps de simulation pour tous les modèles exceptés les modèles GR.

Pour les modèles ayant le même nombre de paramètres, la complexité (description mathématique du modèle) influence le temps de simulation. Parlant de complexité, le modèle ARNO est plus complexe que le modèle CEQUEAU.

Pour les modèles à cinq (05) paramètres le niveau de complexité diminue de CREC à BOORMAN en passant par GARDENIA.

III.3 Classification des modèles

Pour effectuer le classement, nous procédons par comptage du nombre d'apparition de chaque modèle dans les tableaux d'interprétation. Pour une bonne visualisation, le compteur de chaque modèle est initialisé à 1 point. A chaque apparition d'un modèle dans un tableau 6 à 9, le compteur marque 1 point de plus donne droit à un point. Par la suite, on totalise le nombre de point de chaque modèle, on représente un histogramme des points cumulés en fonction des modèles et on procède à un classement.

On utilise le temps de simulation dans le cas où les modèles présentent un même nombre de points cumulés.

Ainsi, pour le calage sur une période humide en termes de précipitations et la validation sur une période sèche en termes de précipitations, le classement donne par ordre décroissant : **CEQUEAU, GR3J, BOORMAN, ARNO, GR4J, CREC, GR5J, GARDENIA et MARTINE** (figure 20).

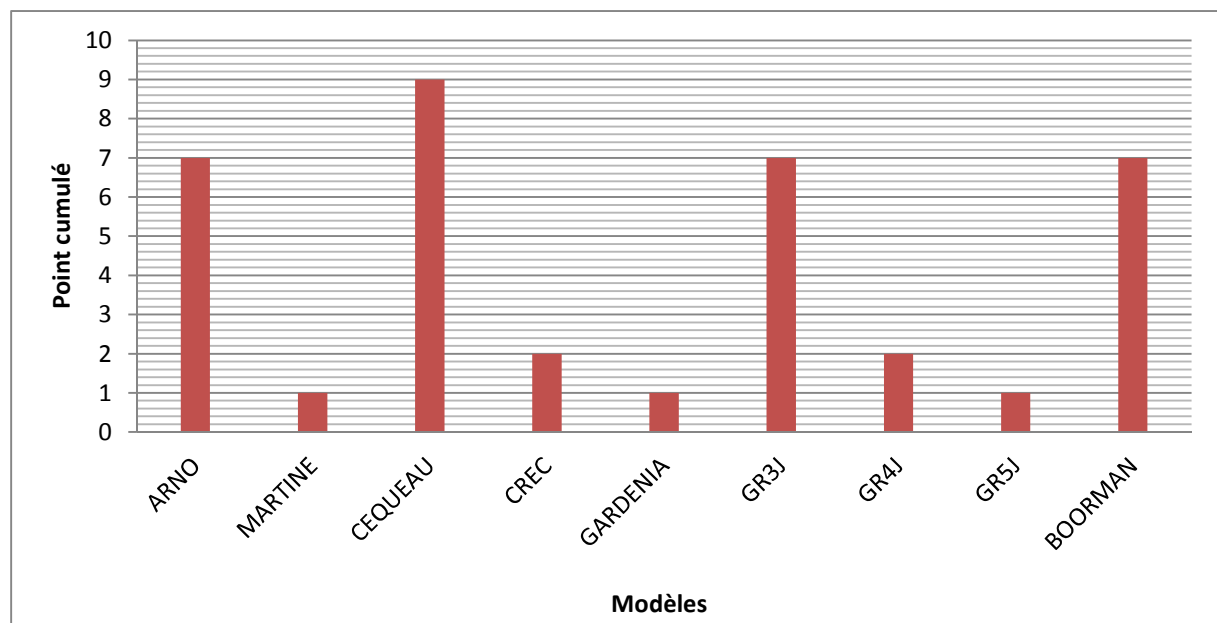


Figure 21 : Histogramme pour le classement des modèles en considérant la période humide et la période sèche

En considérant un calage en période de fort débit et une validation en période de faible débit, la figure 21 donne le classement par ordre décroissant : **BOORMAN, CEQUEAU, GR3J, ARNO, GR4J, GR5J, GARDENIA, MARTINE**.

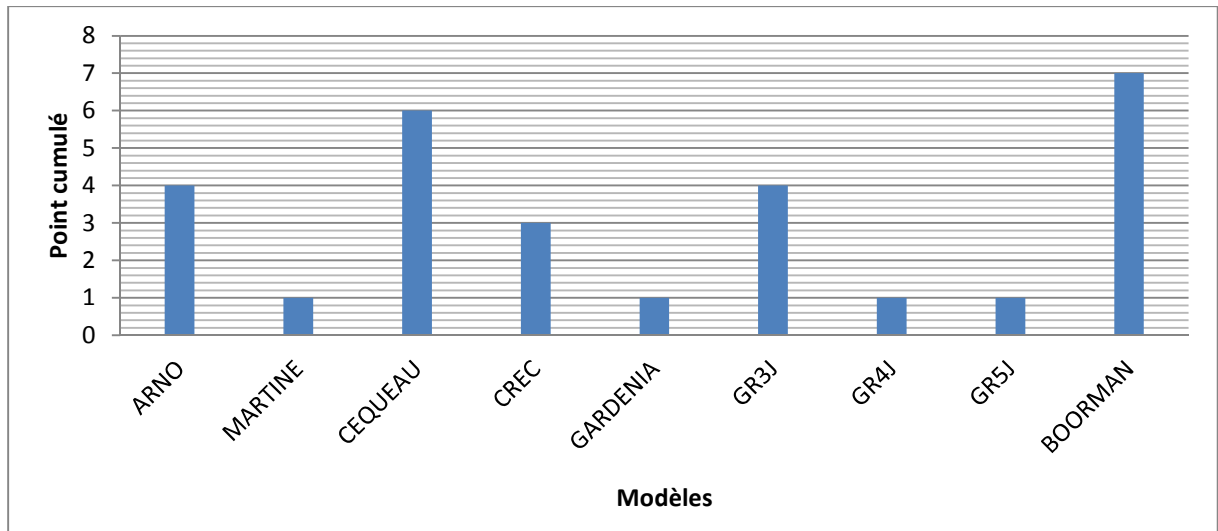


Figure 22 : Histogramme pour le classement des modèles en considérant la période de fort débits et la période de faible débit

Conclusion générale

Cette étude a permis de tester les modèles ARNO, MARTINE, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J, GR5J, BOORMAN en utilisant le Differential-Split-Sample Test proposé par Klemes (1986). Ces tests ont été réalisés sur dix-sept (17) bassins versants repartis dans cinq (05) pays de l'Afrique de l'Ouest.

Pour réaliser ces tests, un outil a été conçu en utilisant le logiciel MatLab et Excel. Les modèles sont programmés sous MatLab et la gestion des différentes opérations (Calage et Validation, calage simple, validation simple, simulation de débit) se fait à travers un fichier Batch sous Excel.

Il ressort des différents tests sur les dix-sept bassins que les modèles ARNO, CEQUEAU, GR3J, GR4J et BOORMAN reproduisent aussi bien les débits de crue que les débits d'étiage. Par contre, les modèles MARTINE, GARDENIA et GR5J reproduisent mieux les débits de crue que les débits d'étiage, et inversement pour le modèle CREC.

Les modèles ARNO, MARTINE, CREC, GARDENIA et BOORMAN donnent de bons résultats lorsque leurs paramètres sont optimisés par la méthode du Simplex. Les modèles CEQUEAU, GR3J, GR5J, GR4J donnent les mêmes paramètres optimisés, que ce soit la méthode du Simplex ou la méthode de Rosenbrock.

Les modèles ARNO, CEQUEAU, CREC, GARDENIA, GR3J, GR4J et BOORMAN sont à caler préférentiellement en période sèche et à valider en période humide. MARTINE et GR5J sont considérés préférentiellement de façon inverse.

Si un classement des modèles devait être proposé, il serait celui-ci, du meilleur au moins bon : sur les périodes avant 1970 et après 1970, CEQUEAU, GR3J, BOORMAN, ARNO, GR4J, CREC, GR5J, GARDENIA et MARTINE. Celui sur les périodes avant 1980 et après 1980 donne : BOORMAN, CEQUEAU, GR3J, ARNO, GR4J, GR5J, GARDENIA, MARTINE.

Le temps de simulation croît avec le nombre de paramètres des modèles utilisés excepté les modèles GR, ce qui est normal. Ce temps croît de CEQUEAU à ARNO pour les modèles à huit (08) paramètres et décroît de CREC à BOORMAN en passant par GARDENIA pour les modèles à cinq (05) paramètres.

Au terme de cette analyse globale, en termes de perspectives, nous projetons de regarder de plus près la sensibilité de ces modèles par rapport aux données d'entrées et la transposabilité spatiale de ces modèles. De plus, nous prévoyons des tests sur d'autres bassins versants et l'exploration d'autres modèles.

Bibliographies

- Abdulla F.A., Lettenmaier D.P. et Liang X. "Estimation of the ARNO model baseflow." *Journal of Hydrology*, 222, 1999: 37-54.
- al., Daniel Signomnou et. *La crue de 2012 à Niamey: un paroxysme du paradoxe du Sahel? Sécheresse 2013;24:3-13*. 2013.
- Ardoin-BarDin, Sandra. "Variabilité hydroclimatiques et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne." Thèse de doctorat, 2004, 440p.
- Ayadi M. et Bargaoui Z. "Modélisation des écoulements de l'oued Miliane par le modèle CEQUEAU." *Hydrological Sciences Journal*, 43(5), 1998: 741-758.
- Beven K. et Binley A. "The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction." *Hydrological processes*, vol. 6, 1992: 279-298.
- Blöschl G. et Grayson R. B. "Spatial modelling of catchment dynamics. ." *Catchment hydrology: observation and modelling.*, 2000: 51-81.
- Boorman D.B et Bonvoisin N.J. *Daily rainfall-runoff modelling as an aid to the transfer of hydrological parameters*. Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 1992.
- Chiew F.H.S., Stewardson M.J. et McMahon T.A.,. "Comparison of six rainfallrunoff modelling approaches." *Journal of Hydrology*, 147, 1993: 1-36.
- Cormary Y. et Guilbot A. "Etude des relations pluie-débit sur trois bassins versants d'investigation." *IAHS Madrid Symposium, IAHS Publication n°108*, 1973: 265-279.
- Coron L., Andreassian V. , Perrin C., Lerat J, Vaze J, Bourqui M., et Hendrickx F.,. "Crash testing hydrological model in constricted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments,." *Water Resources Research*, vol. 48, 2012.
- Desconnets J.C., Diallo A., Traore O., Chene J.M. et Morin G. "Exemple d'application du modèle CEQUEAU-ONU: évaluation de l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé, Burkina Faso." *IAHS Publication n°252*, 1998: 375-385.
- Dezetter, Alain. "Modélisation globale de la relation pluie-débit.Application en zone de savane soudanaise (Nord-Ouest de la CÔTE d'IVOIRE)." Thèse de doctorat, 1991,428p.
- Duan Q., Sorooshian S., Gupta V. K.,. "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research*.vol. 28, n° 4, 1992: 1015-1031.
- Edijatno. "Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier." Thèse de doctorat, 1991,242p.

- Edijatno, Nascimento N.O., Yang X., Makhoulf Z. et Michel C. "a daily watershed model with three free parameters." *Hydrological Sciences Journal*, 44(2), 1999: 263-277.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhoulf, Z. et Michel, C. "GR3J: a daily watershed model with three free parameters." *Hydrological Sciences Journal*, 44(2), 1999: 263-277.
- Eric Servat et Alain Dezetter. *SIMPLE et ROSEN :Deux méthodes d'optimisation non linéaire*. 1988, 40p.
- Filippi C., Milville F. et Thiery D. "Evaluation de la recharge des aquifères en climat Soudano-Sahélien par modélisation hydrologique globale: application à dix sites au Burkina Faso." *Hydrological Sciences Journal*, 35(1), 1990: 29-48.
- Fortin J.P., Charbonneau R., Lefevre J. et Girard G.,. "Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation." *IAHS Publication n° 101*,, 1971: 548-557.
- Fortin J.P., Proulx H. et Bellon A. "Utilisation des données d'un radar météorologique pour la simulation des écoulements en rivière à l'aide d'un modèle hydrologique matriciel." *Journal of hydrology*, 90, 1987: 327-350.
- Franchini M. et Pacciani M. "Comparative analysis of several conceptual rainfall runoff." *Journal of Hydrology*, 122,, 1991: 161-219.
- Frédéric Edem K. D. AHADJI. "Analyse de quelques modèles hydrologiques comportant explicitement une prise en compte d'échange entre eaux de surface et eaux souterraines – Zoom sur le Burkina Faso." MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : INFRASTRUCTURES ET RESEAUX HYDRAULIQUES (EAU SOUTERRAINE), 2013, 95p.
- Gil Mahé, Jean Emmanuel Paturel,. "1896-2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of sahelian river." *C. R. Geoscience 341 (2009)*, 1999: 538-546.
- Girard G. "Application du modèle à discrétisation spatiale à un bassin versant semidésertique." *IAHS Publication n°115*,, 1975: 104-114.
- Girard G., Morin G. et Charbonneau R. "Modèle précipitations-débits à discrétisation." *Cahiers ORSTOM, Série Hydrologie*, IX(4),, 1972: 35-52.
- Gnouma, Raouf. "Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques:application au bassin versant de l'Yzeron." Thèse de doctorat, 2006, 448p.
- Gupta H.V., Sorooshian S. et Yapo P.O.,. "Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information." *Water Resources Research*, 34(4),, 1998: 751-763.

- Gupta V.K. et Sorooshian S. "The relationship between data and the precision of parameter estimates of hydrologic models." *Journal of Hydrology*, 81,, 1985: 57-77.
- Hendrickson J.D., Sorooshian S. et Brazil L.E.,. "Comparison of Newton-type and direct search algorithms for calibration of conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research*, 24(5),, 1988: 691-700.
- Hoffer Homéakéké Komlan. "Comparaison de différents schémas de modélisation hydrologique au pas de temps mensuel." MEMOIRE DE FIN D'ETUDE D'INGENIEUR DE L'EQUIPEMENT RURAL., 2005, 66p.
- Ibbitt R.P. et O'Donnell T. "Designing conceptual catchment models for automatic fitting methods." *IAHS Publication n° 101*,, 1971: 462-475.
- Jeffrey C. Lagarias, James A. Reeds, Margaret H. Wright et Paul E. "Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions." *SIAM J. OPTIM.* Vol. 9, No. 1, 1998: 12-147.
- Klemes V. "Operational testing of hydrological simulation models." *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 31, n°1, 1986: 13-24.
- Laglaine V., Berod D., Devred D. et Musy A.,. "Modélisation déterministe de la crue extrême d'un bassin versant de montagne avec." *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 7, n° 3, 1994: 285-308.
- Ludovic Oudin. "Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global." Thèse de doctorat, 2004, 495p.
- Ma Z.C., Leviandier T. et Ferry M.,. "Fitting a conceptual hydrologic model accounting for nitrate loss in an agricultural representative basin." *Proceedings of the Conference on Hydrological research basins and the environment*. Wageningen,, 1990, pp: 319-327.
- Madsen H. "Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives." *Journal of Hydrology*, vol.235, n° 3-4, 2000: 276-288.
- Mazenc B., Sanchez M. et Thiery D. "Analyse de l'influence de la physiographie d'un bassin versant sur les paramètres d'un modèle hydrologique global et sur les débits caractéristiques à l'exutoire." *Journal of Hydrology*, 69, 1984: 97-118.
- Michel C. *Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux*. Cemagref, Antony., 1989.
- Nascimento N.O. "Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant." Thèse de Doctorat, 1995, 550p.
- Nash J. A. et Sutcliffe J. V. "River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, vol 10, 1970: 282-290.

- Nelder J.A. et Mead R. "A Simplex method for function minimisation." *The Computer Journal*, 7(4), 1965: 308-313.
- Nicolas Le Moine. "Le bassin versant de surface vu par le souterrain :une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit ?" Thèse de doctorat, 2008, 348p.
- Ouermi, Kiswendsida Samiratou. "Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement climatique global :Cas des bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale." Mémoire pour l'obtention du master en Infrastructures hydrauliques. Option : Eaux Agricoles., 2013,107p.
- Paturel J. E., Ouédraogo M. et Mahé G., "Influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique de grands bassins versants en Afrique de l'Ouest." *Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer Schemes and Large-Scale Hydrological Models (Proceedings of a symposium held during the Sixth IAHS Scientific Assembly at Maastricht. The Netherlands, July 2001) IAHS Publ. no. 270.* 2001. 209-214.
- Paturel J. E., Ouédraogo M. et Servat E., "Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne." *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Cote d'Ivoire, November 1998), IAHS Publ. no. 252.* 1998. 315-321.
- Payraudeau S. "Modélisation distribuée des flux d'azote sur de petits bassins versants." Thèse de doctorat, 2002, 225p.
- Perrin Charles. "Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit." Thèse de doctorat, 2000,536p.
- Refsgaard J. C. et Storm B. " Chapter 3: Construction, calibration and validation of hydrological models." *Distributed Hydrological Modelling. Kluwer Academic Publishers.*, 1996: 41-42.
- Servat E. et Dezetter A. "Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le nord-ouest de la Côte d'Ivoire." *Hydrologie Continentale* 7(2), 1992: 129-142.
- Servat, Eric. *Présentation de trois modèles globaux conceptuels déterministes: CREC 5, MODGLO et MODIBI.* 1986, 59p.
- Singh V. P. "Computer models of Watershed Hydrology." *Water Resources publications, Highlands Ranch, Colorado, USA.*, 1995.
- Tanakamaru H. "Parameter estimation for the Tank Model using global optimisation." *Trans. JSIDRE*, 178,, 1995: 103-112.

Thiery D. "Utilisation d'un modèle global pour identifier sur un niveau piézométrique des influences multiples dues à diverses activités humaines." *IAHS Publication n° 136*, 1982: 71-77.

Todini, E., "The ARNO rainfall-runoff model." *Journal of Hydrology*, 175,, 1996: 339-382.

Vaze J., Post D. A., Chiew F.H.S., Perraud J.-M. , Viney N.R. et Teng J., "Climate non-stationarity: Validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies." *Journal of Hydrology*, 394, 2010: 447-457.

Yang X., Parent E., Michel C. et Roche P.A., "Comparison of real-time reservoir-operation techniques." *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(5), 1995: 345-351.

ANNEXE 1 : Description du modèle ARNO

Les paramètres

La version du modèle ARNO qui sera utilisé compte neuf (08) paramètres :

X1 : constante de routage du ruissellement de surface

X2 : constante de drainage inférieur

X3 : paramètre d'humidité

X4 : constante de drainage supérieur

X5 : paramètre humidité à saturation

X6 : constante de vidange pour infiltrations

X7 : constante de routage linéaire des infiltrations

X8 : paramètre seuil d'infiltration

Structure

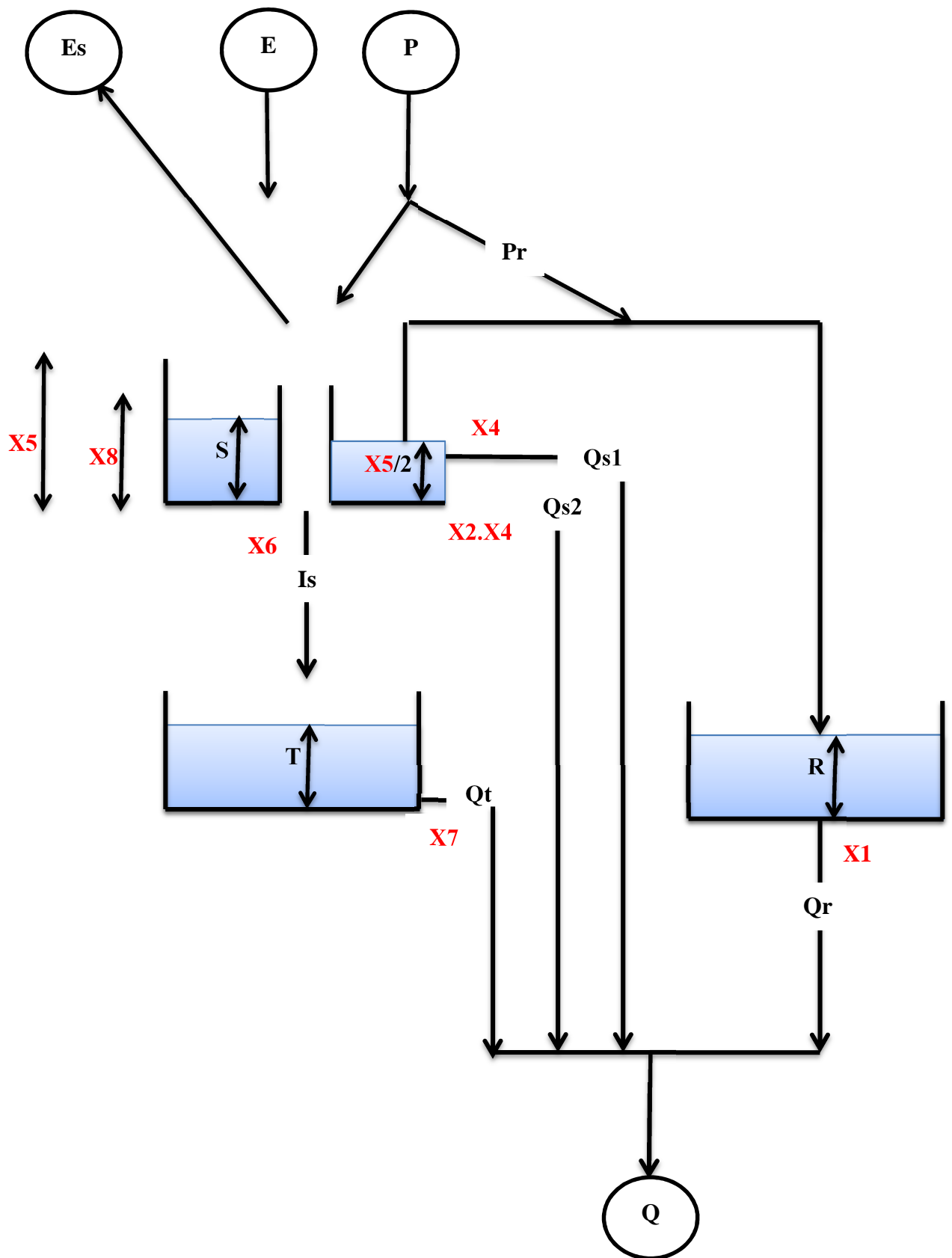


Figure 23 : Schéma du modèle ARNO (Perrin, 2000)

Description mathématique

La surface totale du bassin **S** est divisée en deux parties l'une représentant la surface imperméable **S_I** et l'autre représentant la surface perméable **S_P**.

Ce qui donne $XF1 = \frac{S_I}{S_P}$.

$$\text{si } P \geq E, \quad Pn = P - E, \quad Es = E$$

Le débit de surface **Pr** est la somme de deux termes d'écoulement : le premier représente le ruissellement sur les parties imperméables du bassin versant et le deuxième représente le débit produit par les surfaces perméables en fonction de l'état d'humidité du sol moyen **S** sur le bassin versant et en fonction du paramètre humidité à saturation **X5**. **Pr** a pour expression générale :

$$\text{si } Pn < (1 + X3) \cdot X5 \cdot \left(1 - \frac{S}{X5}\right)^{\frac{1}{1+X3}}$$

$$Pr = Pn - (1 - XF1) \cdot \left\{ (X5 - S) - X5 \left[\left(1 - \frac{S}{X5}\right)^{\frac{1}{1+X3}} - \frac{Pn}{(1+X3) \cdot X5} \right]^{X3+1} \right\};$$

$$\text{si } Pn \geq (1 + X3) \cdot X5 \cdot \left(1 - \frac{S}{X5}\right)^{\frac{1}{1+X3}};$$

$$Pr = Pn - (1 - XF1)(X5 - S)$$

$$\text{si } P < E \quad Pr = 0;$$

Il n'y a pas de ruissellement de surface et l'évapotranspiration réelle **Es** est alors égale :

$$Es = P + (E - P) \cdot (1 - XF1) \frac{1 - \frac{S}{X3 \cdot X5} - \left(1 - \frac{S}{X5}\right)^{\frac{1}{1+X3}}}{1 + \frac{1}{X3} - \left(1 - \frac{S}{X5}\right)^{\frac{1}{1+X3}}};$$

$$S = \max(0, S + P - Pr - Es);$$

L'autre composante de vidange du réservoir sol est l'infiltration **Is** par percolation :

$$Is = \frac{\max(0, S - X8)}{X6}; \quad S = S - Is;$$

$$Qs1 = \frac{\max(0, S - \frac{X5}{2})}{X4}; \quad S = S - Qs1;$$

$$Qs2 = \frac{S}{X2 \cdot X4}; \quad S = S - Qs2;$$

$$Qs0 = \max(0, S - X5); \quad S = S - Qs0; \quad Pr = Pr + Qs0;$$

$$R = R + Pr; \quad Qr = \frac{R}{X1}; \quad R = R - Qr;$$

$$T = T + Is; \quad Qt = \frac{T}{X7}; \quad T = T - Qt;$$

$$Q = Qt + Qr.$$

ANNEXE 2 : Description du modèle GR3J, GR4J et GR5J

- GR3J

Les paramètres

X1: temps de base de l'hydrogramme unitaire (en jour)

X2: coefficient d'échange souterrain

X3: capacité à jour du reservoir de routage (en mm)

Structure

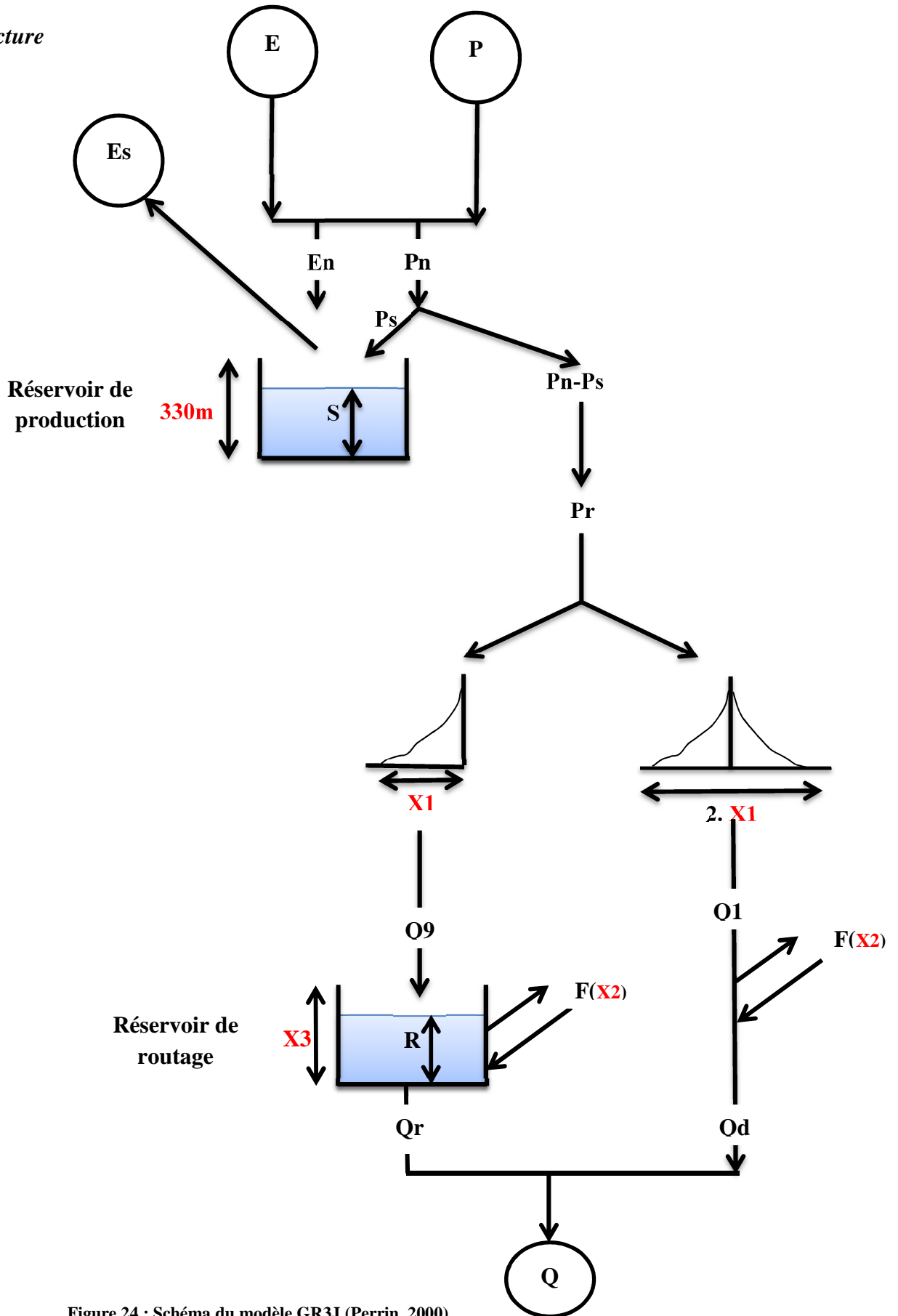


Figure 24 : Schéma du modèle GR3J (Perrin, 2000)

Description mathématique

$$\text{Si } P \geq E, \quad P_n = P - E, \quad E_n = 0$$

$$P_s = \frac{P_n \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{330}\right)^2\right)}{1 + \frac{P_n}{330} \cdot \left(1 + \frac{S}{330}\right)}$$

$$\text{Si } P < E, \quad E_n = E - P, \quad P_n = 0$$

$$E_s = \frac{E_n \cdot \frac{S}{330} \left(2 - \frac{S}{330}\right)}{1 + \frac{E_n}{330} \left(2 - \frac{S}{330}\right)}$$

$$S = S + P_s - E_s$$

$$P_r = P_n - P_s$$

P_r est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire **HU1** et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique **HU2**. **HU1** et **HU2** dépendent du même paramètre **X1**, temps de base de **HU1** exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en **S** notées respectivement **SH1** et **SH2**, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. **SH1** est définie en fonction du temps par:

$$\begin{cases} 0 \leq j \leq X1, & SH1(j) = \left(\frac{j}{X1}\right)^5 \\ j > X1, & SH1(j) = 1 \end{cases}$$
$$\begin{cases} 0 \leq j \leq X1, & SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X1}\right)^5 \\ X1 < j \leq 2 \cdot X1, & SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X1}\right)^5 \\ j > 2X1, & SH2(j) = 1 \end{cases}$$

Les ordonnées de **HU1** et **HU2** sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1)$$

où **j** est un entier.

A chaque pas de temps **k**, les sorties **Q9** et **Q1** des deux hydrogrammes

correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0.9 \sum_{i=1}^{\text{int}(X1)+1} UH1(i) * Pr(k - i + 1)$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum_{j=1}^{\text{int}(2.X1)+1} UH2(i) * Pr(k - j + 1)$$

où int designe la partie entière.

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3} \right)^4$$

$$Qd = \max(0, Q1(k) + F);$$

$$R = \max(0, R + Q9(k) + F)$$

$$Qr = R - (R^{-4} + X3^{-4})^{-\frac{1}{4}};$$

$$R = R - Qr$$

$$Q = Qr + Qd$$

- GR4J et GR5J

Les paramètres

X1: capacité du réservoir de production (en mm)

X2: coefficient d'échange souterrain

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

X4: temps de base de l'hydrogramme unitaire (en jour)

X5: seuil d'échange souterrain (complément de paramètre pour le GR5J)

Structure

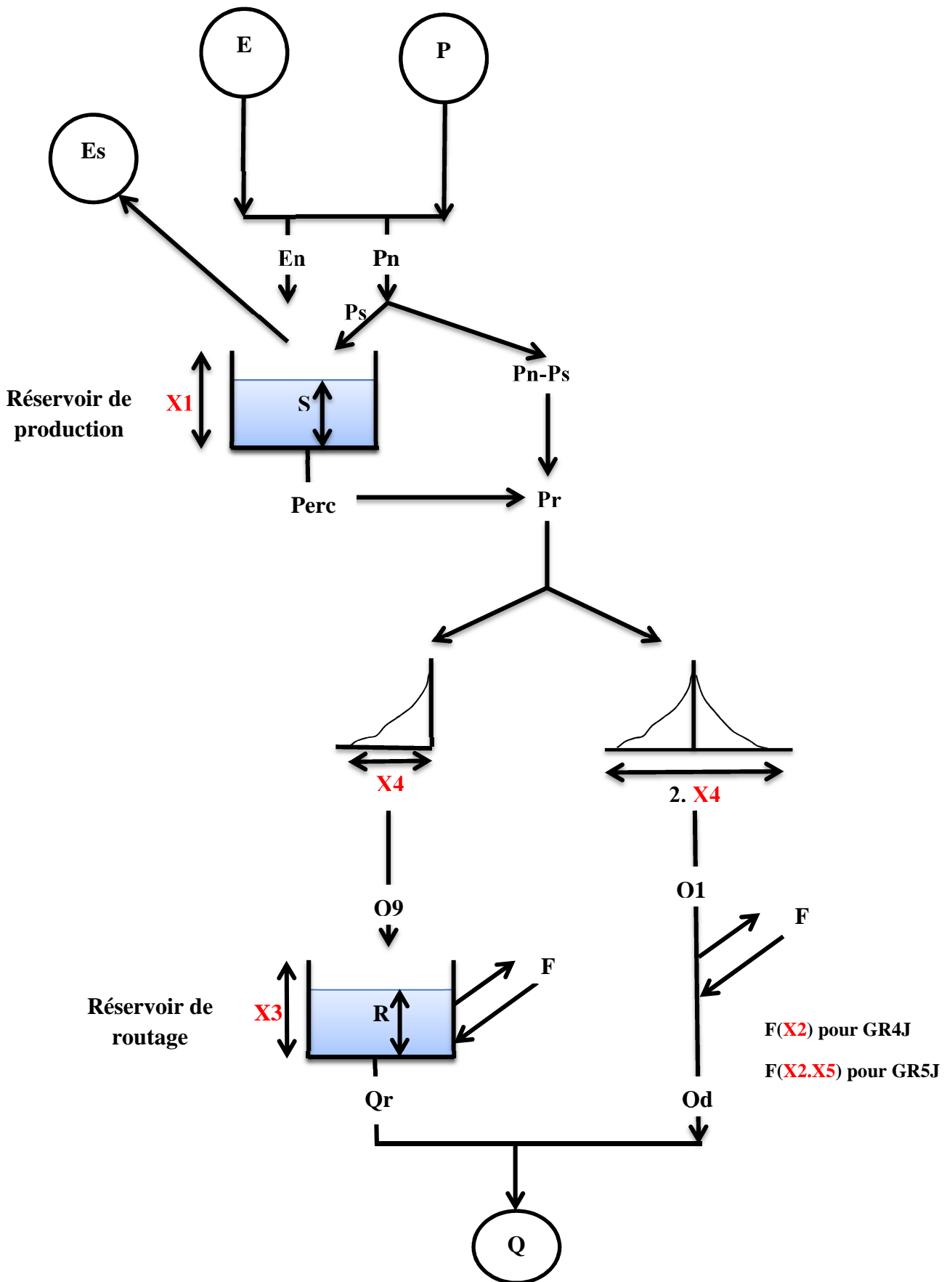


Figure 25 : Schéma du GR4J et GR5J (Moine, 2008)

Description mathématique

$$\text{Si } P \geq E, \quad P_n = P - E, \quad E_n = 0$$

$$P_s = \frac{P_n \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2\right)}{1 + \frac{P_n}{X1} \cdot \left(1 + \frac{S}{X1}\right)}$$

$$\text{Si } P < E, \quad E_n = E - P, \quad P_n = 0$$

$$E_s = \frac{E_n \cdot \frac{S}{X1} \left(2 - \frac{S}{X1}\right)}{1 + \frac{E_n}{X1} \left(2 - \frac{S}{X1}\right)}$$

$$\text{Perc} = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} X1\right)^{\frac{1}{4}}\right); \quad S = S - \text{Perc}$$

$$Pr = \text{Perc} + P_n - P_s$$

Pr est divisée en deux composantes d'écoulement, 90 % étant routés par un hydrogramme unitaire **HU1** et un réservoir de routage et 10 % par un hydrogramme unitaire symétrique **HU2**. **HU1** et **HU2** dépendent du même paramètre **X4**, temps de base de **HU1** exprimé en jours.

Les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en **S** notées respectivement **SH1** et **SH2**, qui correspondent aux fonctions cumulées de l'hydrogramme. **SH1** est définie en fonction du temps par:

$$\begin{cases} 0 \leq j \leq X4, & SH1(j) = \left(\frac{j}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ j > X4, & SH1(j) = 1 \end{cases}$$
$$\begin{cases} 0 \leq j \leq X4, & SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ X4 < j \leq 2 \cdot X4, & SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X4}\right)^{\frac{5}{2}} \\ j > 2X4, & SH2(j) = 1 \end{cases}$$

Les ordonnées de **HU1** et **HU2** sont alors calculées par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1)$$

où **j** est un entier.

A chaque pas de temps k , les sorties $Q9$ et $Q1$ des deux hydrogrammes correspondent à la convolution des pluies antérieures par la clé de répartition donnée par l'hydrogramme discrétisé et sont calculées par :

$$Q9(k) = 0.9 \sum_{i=1}^{\text{int}(X4)+1} UH1(i) * Pr(k - i + 1)$$

$$Q1(k) = 0.1 \sum_{j=1}^{\text{int}(2.X4)+1} UH2(i) * Pr(k - j + 1)$$

où **int** désigne la partie entière.

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3} \right)^{\frac{7}{2}} \text{ ----- (pour GR4J)}$$

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3} - X5 \right) \text{ ----- (pour GR5J)}$$

$$Qd = \max(0, Q1(k) + F); \quad R = \max(0, R + Q9(k) + F)$$

$$Qr = R = R - (R^{-4} + X3^{-4})^{-\frac{1}{4}}; \quad R = R - Qr$$

$$Q = Qr + Q$$

ANNEXE 3 : Description du modèle CEQUEAU

Les paramètres

- X1 : seuil d'infiltration
- X2 : seuil de vidange du premier réservoir
- X3 : constante de vidange d'infiltration
- X4 : constante de vidange latérale supérieure du réservoir sol
- X5 : capacité maximum du réservoir sol
- X6 : constante de vidange inférieure du réservoir souterrain
- X7 : seuil de vidange du réservoir souterrain
- X8 : constante de vidange latérale inférieure du réservoir sol

Structure

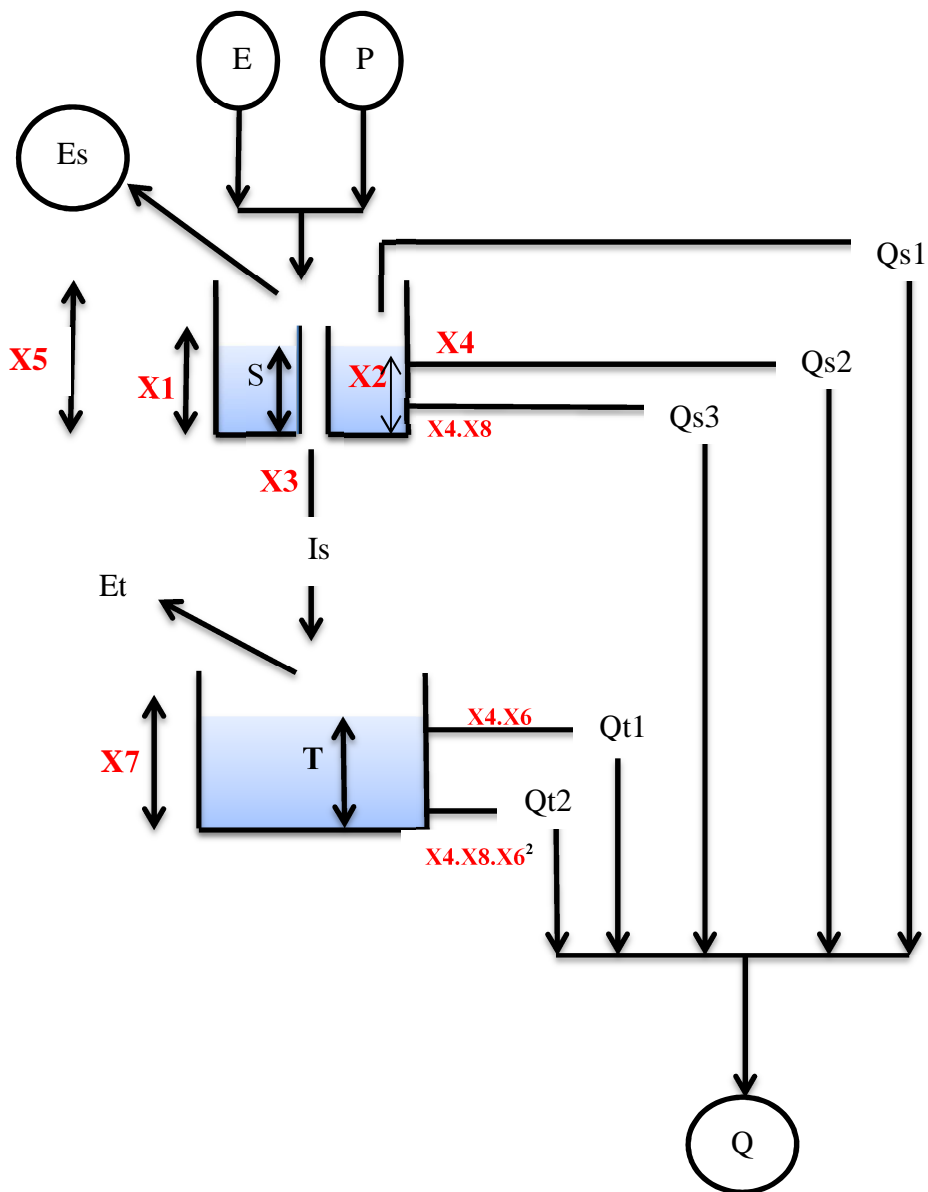


Figure 26 : Schéma du modèle CEQUEAU (Perrin, 2000)

Description mathématique

-Réservoir sol

$$S = S + P$$

$$E_s = \min(S, E \cdot \min(1, 2 \cdot S / X_5))$$

$$S = S - E_s \qquad E' = E - E_s$$

$$I_s = \frac{\max(0, S - X_1)}{X_3} \qquad S = S - I_s$$

$$Q_{s2} = \frac{\max(0, S - X_2)}{X_4} \qquad S = S - Q_{s2}$$

$$Q_{s3} = \frac{S}{X_4 \cdot X_8} \qquad S = S - Q_{s3}$$

-Réservoir eau souterraine

$$T = T + I_s$$

$$Q_{t1} = \frac{\max(0, T - X_7)}{X_4 \cdot X_6} \qquad T = T - Q_{t1}$$

$$Q_{t2} = \frac{T}{X_4 \cdot X_8 \cdot X_6^2} \qquad T = T - Q_{t2}$$

$$E_t = \min(T, E' \cdot \min(1, \frac{T}{X_7}))$$

$$T = T - E_t$$

-Débit total

$$Q = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} + Q_{t1} + Q_{t2}$$

ANNEXE 4 : Description du modèle CREC

Paramètre

On retient une version à 6 paramètres, comme la version réduite de CREC.

Paramètre X1 : capacité maximale du réservoir de routage

Paramètre X2 : paramètre de percolation linéaire du réservoir eau souterraine

Paramètre X3 : capacité maximale du réservoir sol

Paramètre X4 : Paramètre de séparation de la pluie brute et de rendement de l'ETP

Paramètre X5 : paramètre de vidange linéaire du réservoir de routage

Structure

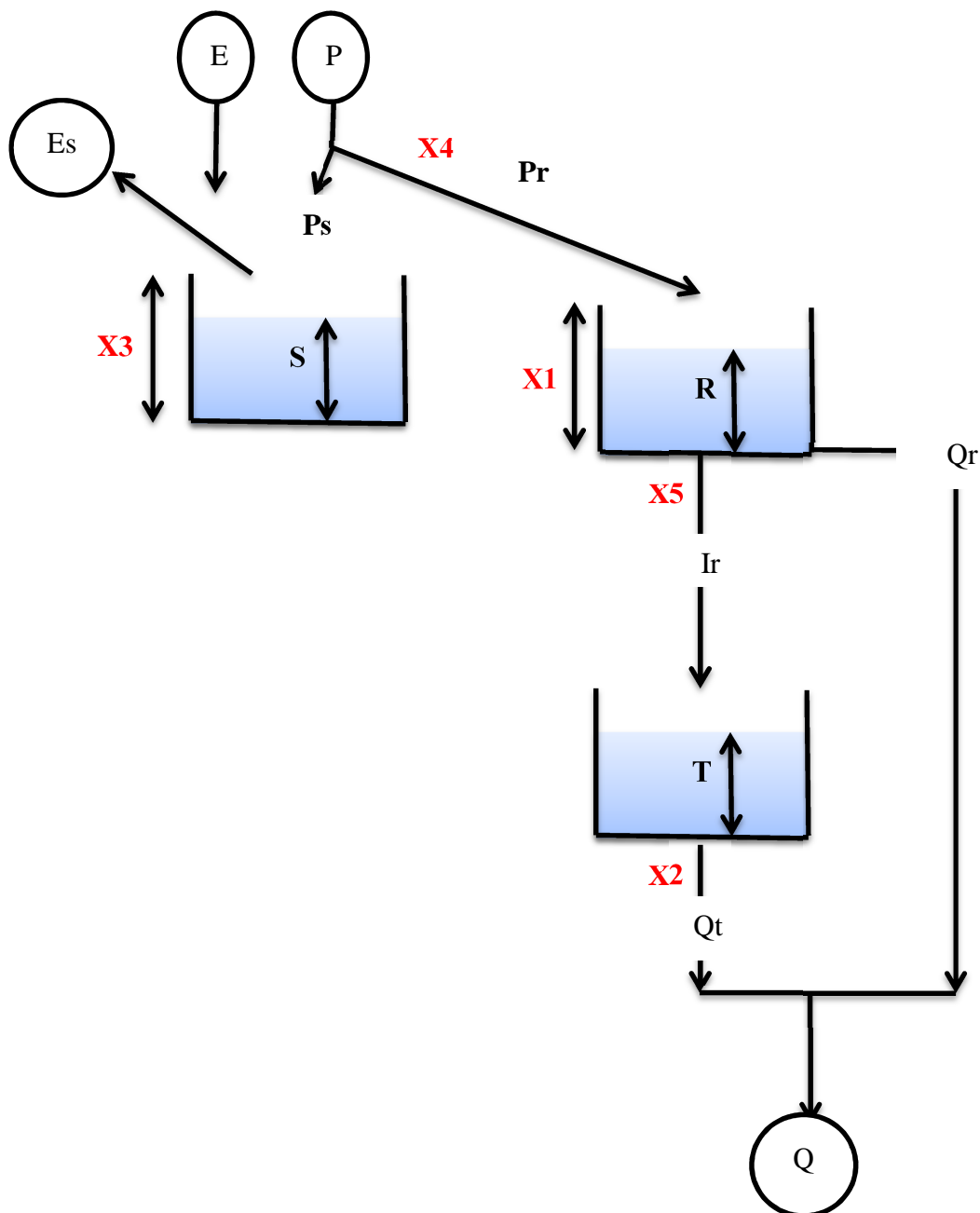


Figure 27 : Schéma du modèle CREC (Perrin, 2000)

Description mathématique

-Réservoir sol

$$Pr = \frac{P}{1 + \exp\left(\frac{X3 - S}{X4}\right)}$$

$$Ps = P - Pr$$

$$S = S + Ps$$

$$Es = \frac{E}{1 - \exp\left(-\frac{S}{XF}\right)}$$

$$S = \max(0, S - Es)$$

-Réservoir de routage

$$R = R + Pr$$

$$Qr = \frac{R^2}{R + X1}$$

$$R = R - Qr$$

$$Ir = \frac{R}{X5}$$

$$R = R - Ir$$

-Réservoir eau souterraine

$$T = T + Ir$$

$$Qt = T / X2$$

$$T = T - Qt$$

-Débit total

$$Q = Qr + Qt$$

avec XF est fixé à 245mm (derive d'un niveau de reservoir)

ANNEXE 5 : Description du modèle GARDENIA

Paramètre

X1 : capacité du réservoir de surface

X2 : constante de percolations linéaires

X3 : paramètre de vidange latérale du réservoir sol

X4 : constante de vidange linéaire du réservoir souterrain

X5 : coefficient de correction des ETP

Structure

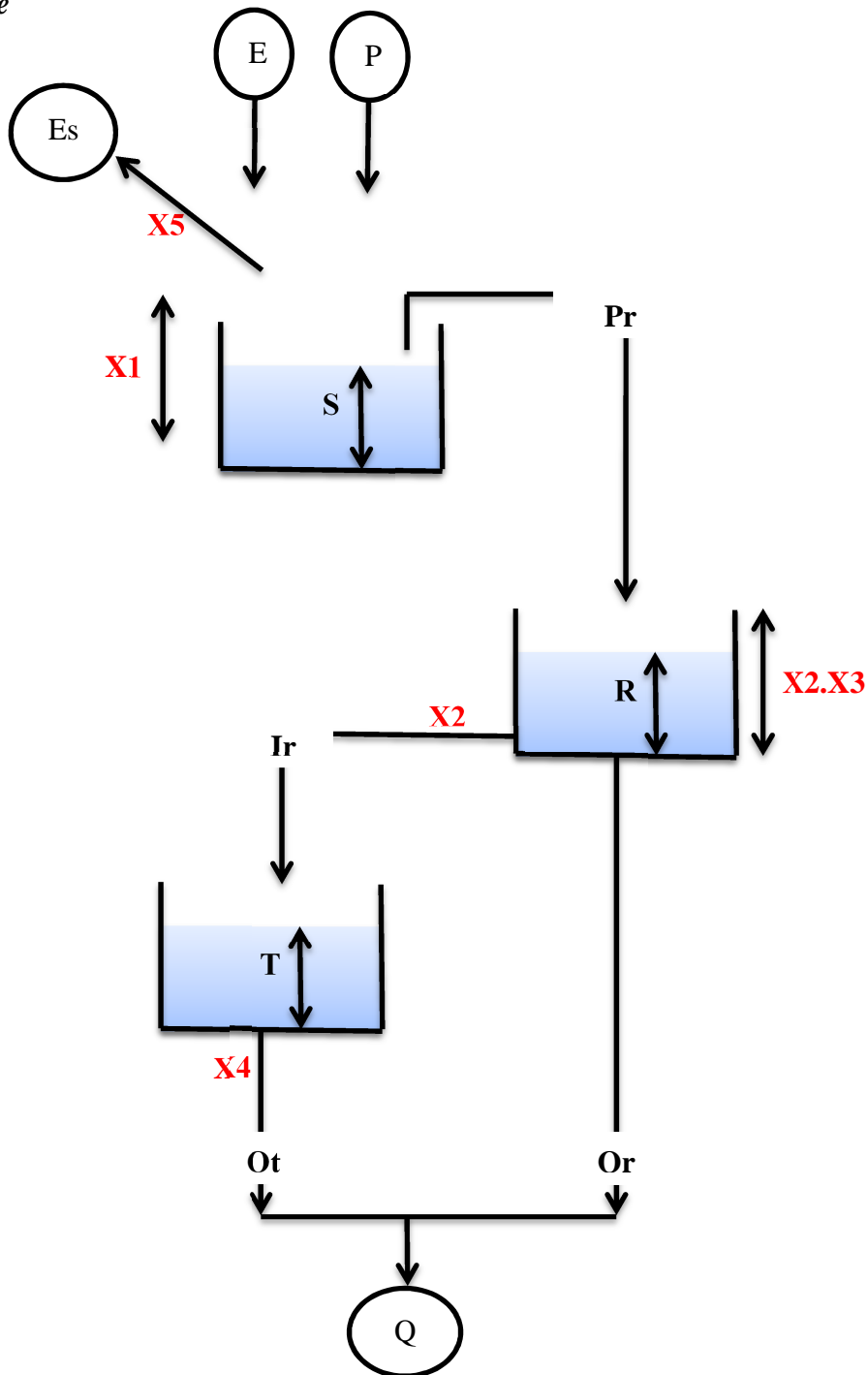


Figure 28 : Schéma du modèle GARDENIA (Perrin, 2000)

Description mathématique

-Réservoir de surface

Le réservoir de surface reçoit la pluie brute et est soumis à l'évapotranspiration potentielle ETP corrigée d'un coefficient **X5**. Le réservoir est caractérisé par sa capacité maximale **X1**. L'excès de pluie **Pr** alimente le réservoir sol sous-jacent.

$$S = S + P$$

$$Pr = \max(0, S - X1)$$

$$Es = X5. E$$

$$S = S - Pr$$

$$S = S - Es$$

-Réservoir sol

Le réservoir sol reçoit l'excédent du réservoir de surface et se vidange d'une part dans le réservoir

eau-souterraine par percolations de façon linéaire et d'autre part de façon quadratique en un débit de surface **Qr**.

$$R = R + Pr$$

$$Qr = \frac{R^2}{R + X2. X3}$$

$$R = R - Qr$$

-Réservoir eau souterraine

$$Ir = \frac{R}{X2}$$

$$T = T + Ir$$

$$Qt = \frac{T}{X4}$$

$$R = R - Ir$$

$$T = T - Qt$$

-Débit total

$$Q = Qt + Qr$$

ANNEXE 6 : Description du modèle MARTINE

Paramètre

X1 : capacité du réservoir superficiel

X2 : capacité du réservoir intermédiaire

X3 : capacité du réservoir de routage quadratique

X4 : constante de vidange du réservoir souterrain

X5 : coefficient de partage

X6 : constante de vidange du réservoir intermédiaire

Structure

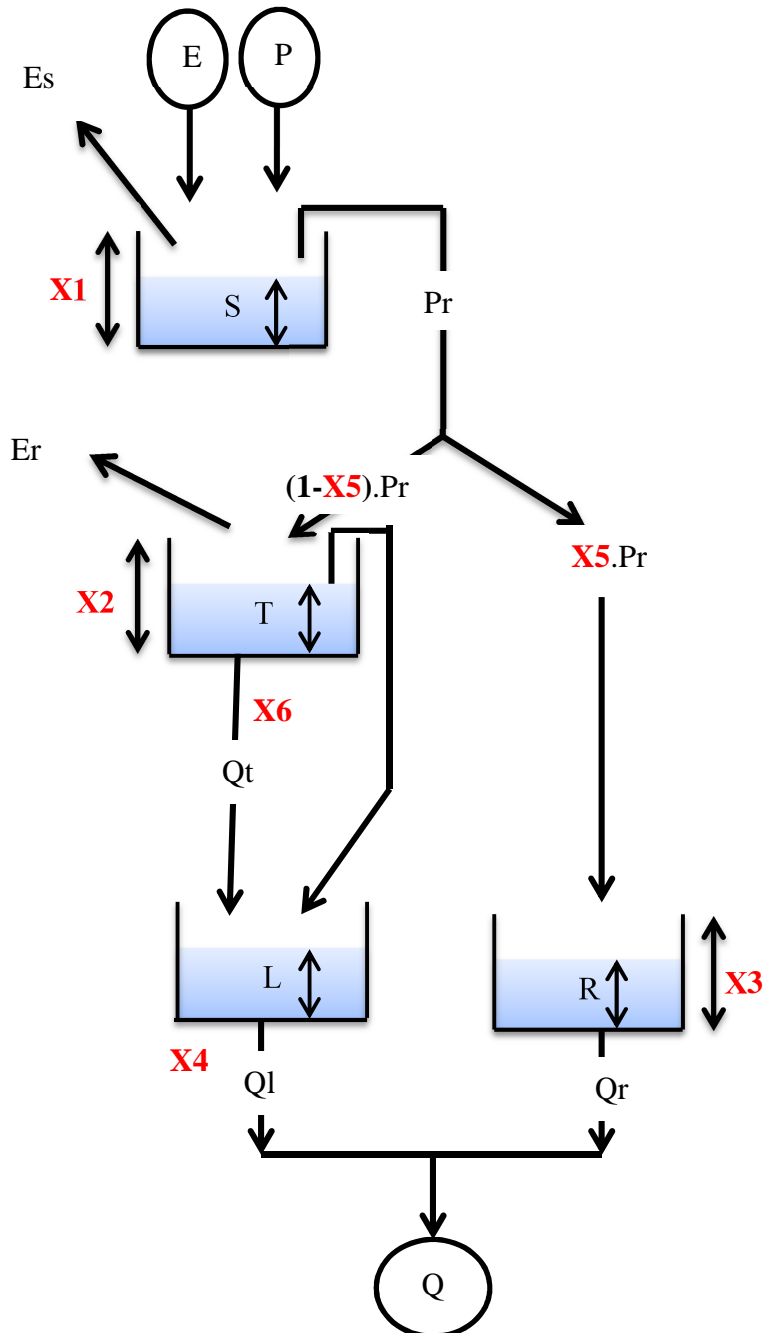


Figure 29 : Schéma du modèle MARTINE (Perrin, 2000)

Description mathématique

-Réservoir superficiel

Le réservoir superficiel de capacité **X1**, reçoit la pluie brute et est soumis à l'ETP. L'excédent est séparé en deux composantes suivant un coefficient de partage **X5**.

$$S = S + P$$

$$Pr = \max(0, S - X1)$$

$$Es = \min(S, E)$$

$$Er = E - Es$$

$$S = S - Pr$$

$$S = S - Es$$

-Réservoir quadratique

$$R = R + X5.Pr$$

$$Qr = \frac{R^2}{R + X3}$$

$$R = R - Qr$$

-Réservoir intermédiaire

$$T = T + (1 - X5).Pr$$

$$Qt1 = \frac{T}{X6}$$

$$Qt2 = \max(0, T - X2)$$

$$T = T - Qt1$$

$$T = T - Qt2$$

-Réservoir eau souterraine

$$L = L + Qt1 + Qt2$$

$$Ql = \frac{L}{X4}$$

$$L = L - Ql$$

-Débit total

$$Q = Ql + Qr$$

ANNEXE 7 : Description du modèle Boorman

Paramètre

X1 : paramètre d'infiltration

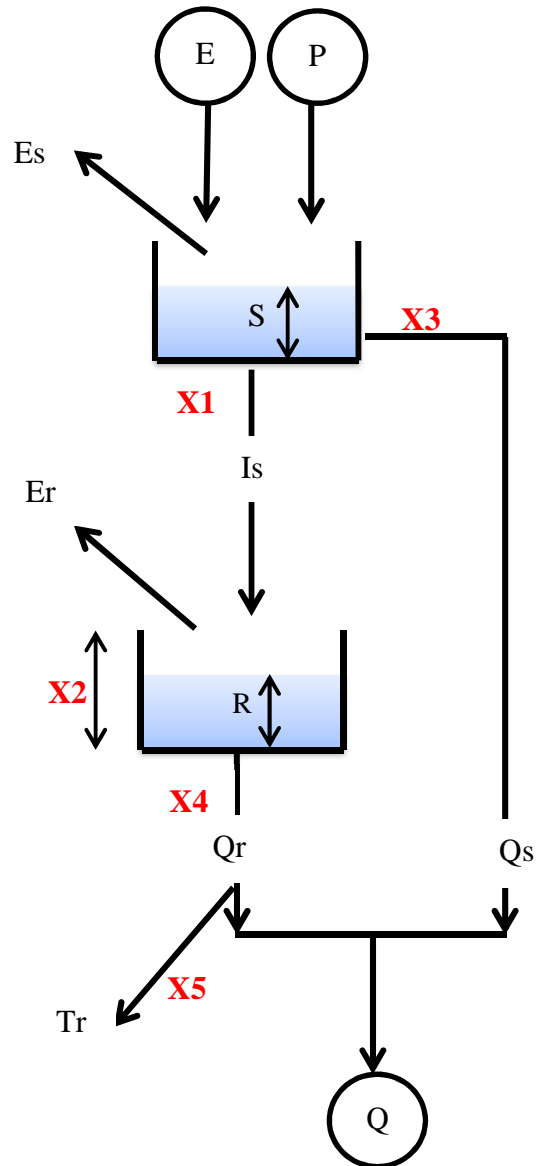
X2 : capacité de la couche inférieure du réservoir sol

X3 : constante de vidange linéaire du réservoir sol

X4 : constante de vidange du réservoir inférieur

X5 : paramètres de percolations profondes

Structure



Description mathématique

-Couche supérieure du réservoir sol

—

-Couche inférieure du réservoir sol

—

-Débit total

Figure 30 : Schéma du BOORMAN (Perrin, 2000)

ANNEXE 8 : Bassins versants du Benin

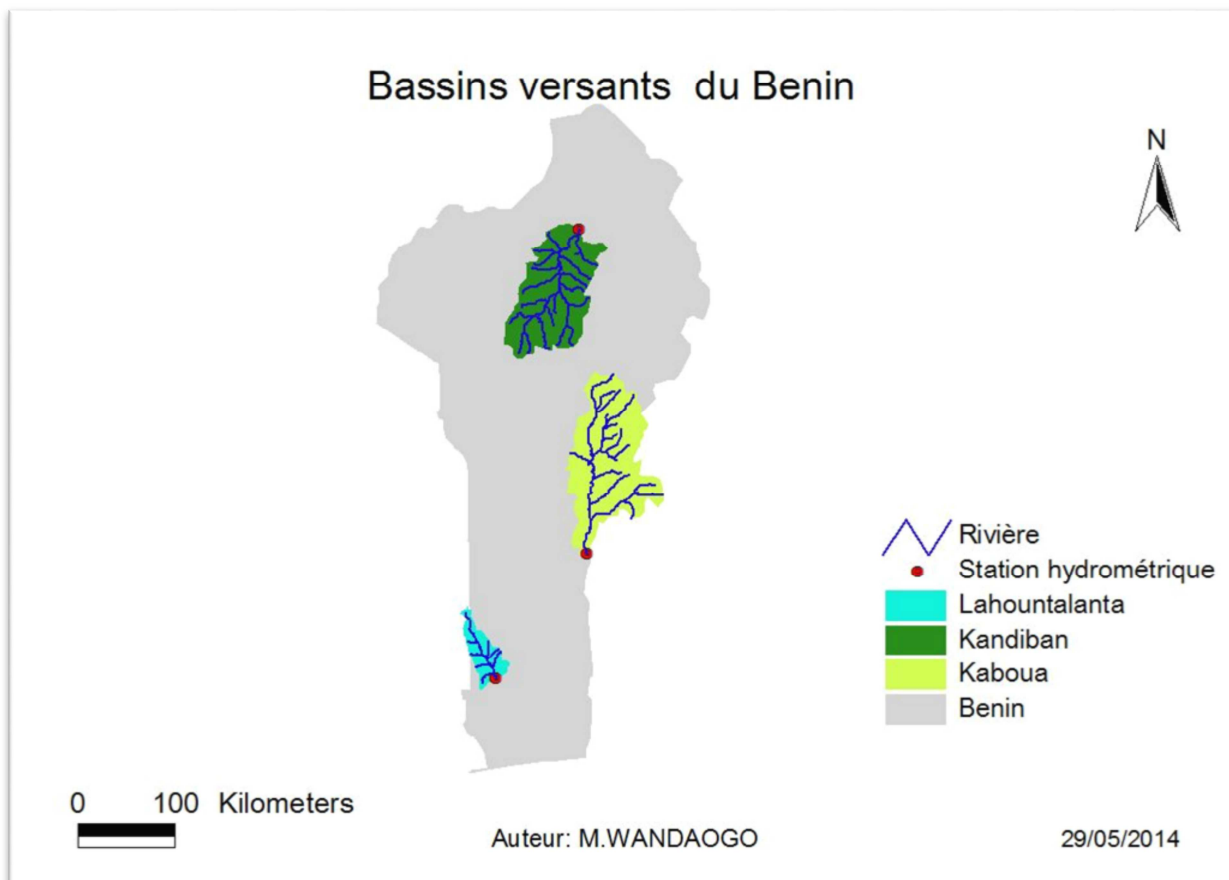


Figure 31 : Bassins versants du Benin

ANNEXE 9 : Bassins versants du Burkina Faso

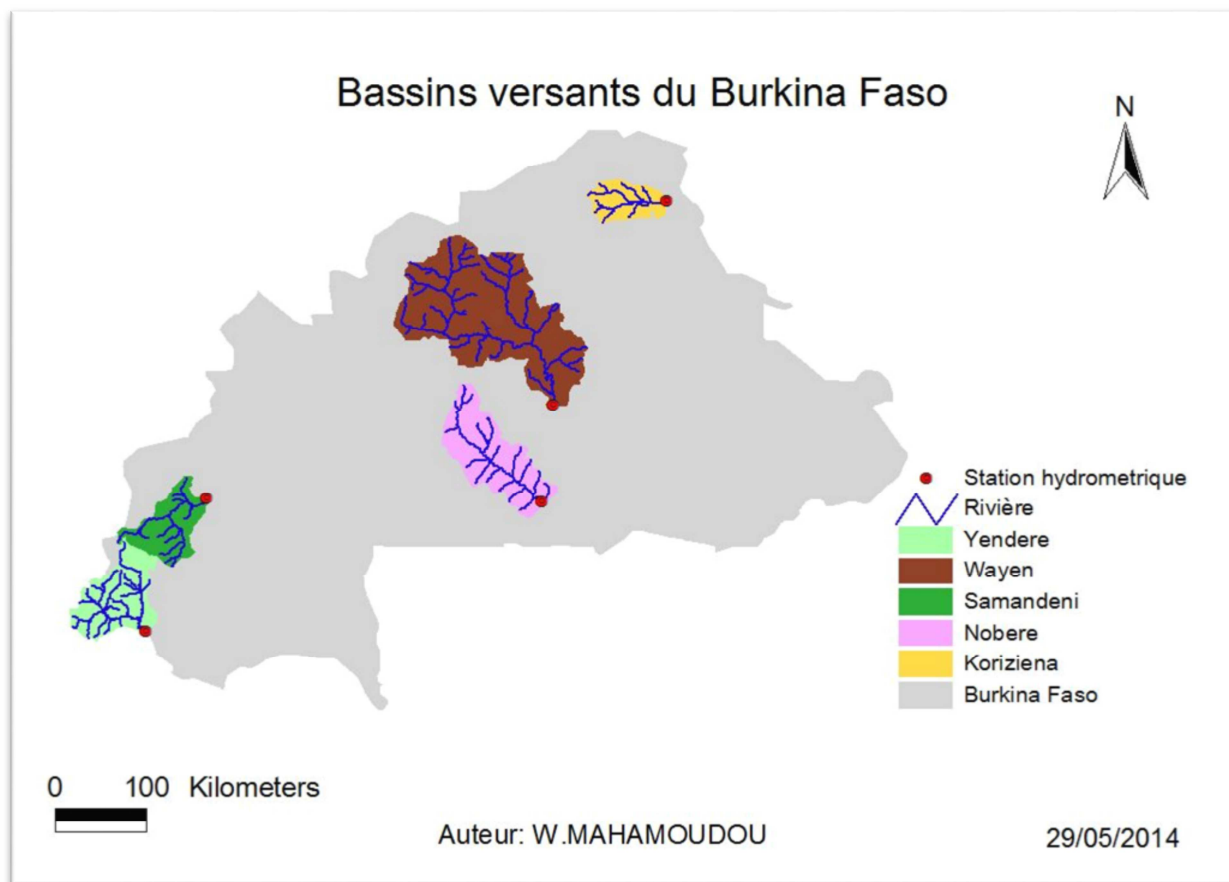


Figure 32 : Bassins versants du Burkina Faso

ANNEXE 10 : Bassins versants de la Côte d'Ivoire

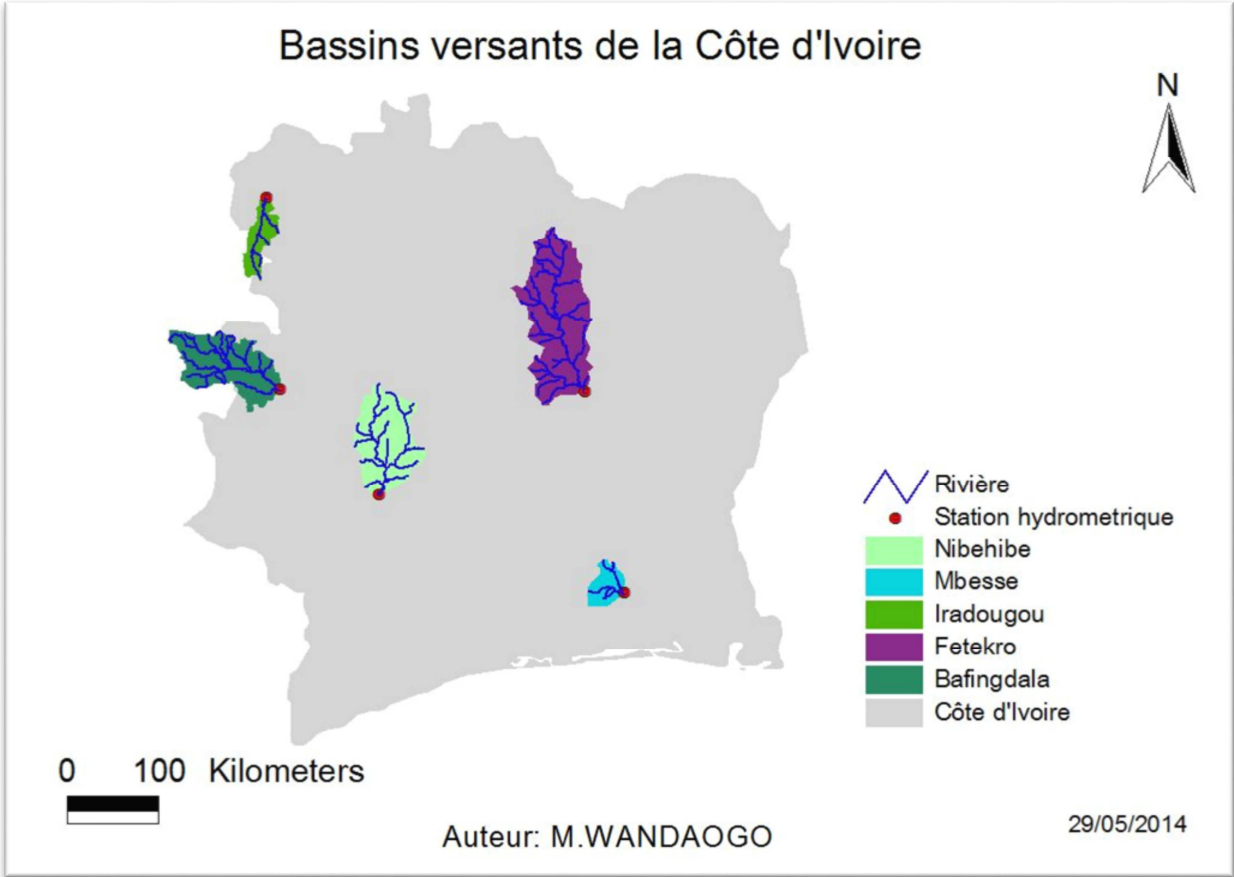


Figure 33 : Bassins versants de la Côte d'Ivoire

ANNEXE 11 : Bassins versants du Mali

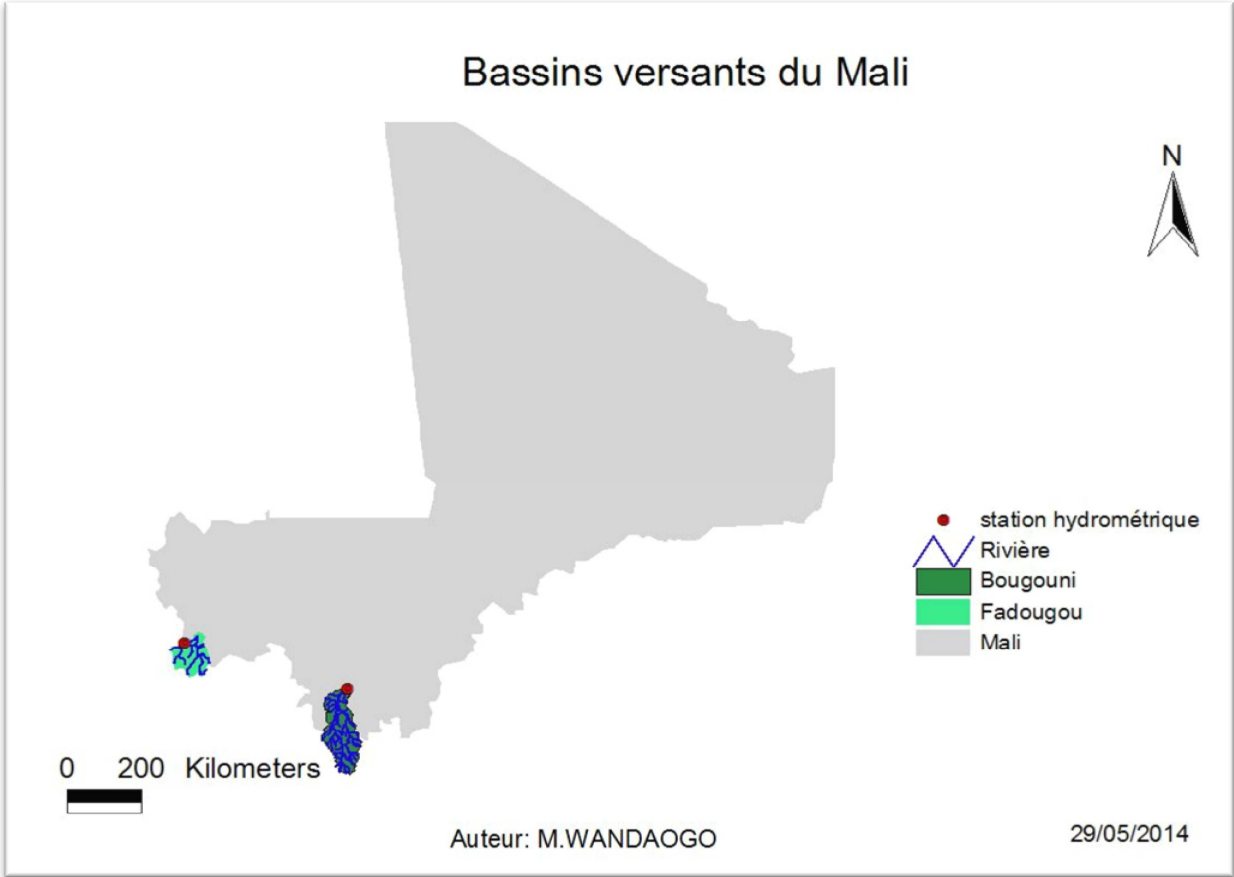


Figure 34 : Bassins versants du Mali

ANNEXE 12 : Bassins versants du Niger

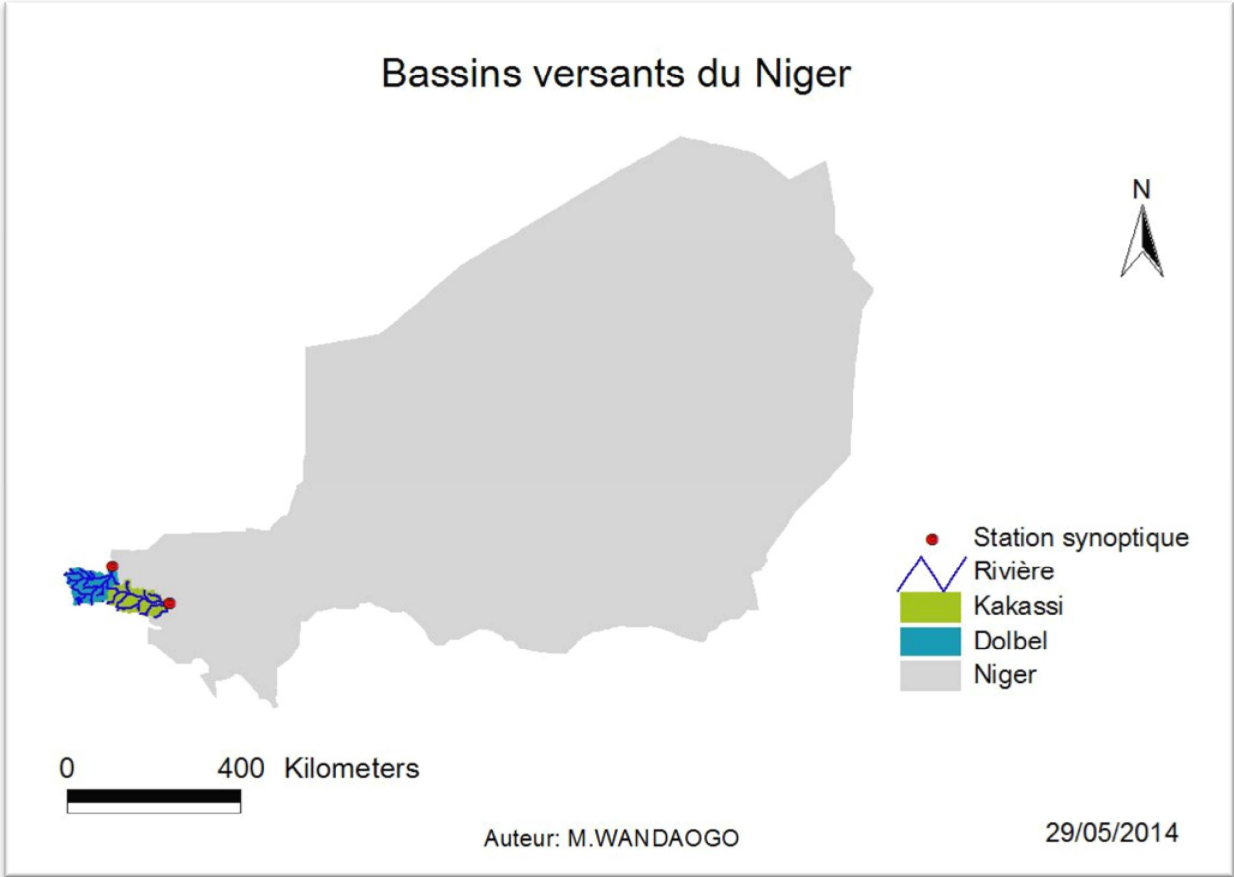


Figure 35 : Bassins versants du Niger

ANNEXE 13 : Valeurs issues de la simulation du modèle ARNO

Tableau 16 : Valeurs issues de la simulation du modèle ARNO

Modèle	Méthode		valeurs des paramètres																
ARNO	Simplexe		Bassin	surface	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
			Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	86,0858296	65,7423426	45,00	3,28	-0,05	1,82	8,59	350,84	44,45	1070,00
			Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	69,0395675	20,3182723	34,88	1,46	-0,02	2,22	32,76	75,09	16,03	8,40
			Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	55,7613098	40,5060923	17,22	0,00	-0,27	0,00	2362,25	174,37	19,74	16,69
			Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	82,3285903	39,4263378	40,84	2,60	0,09	2,83	64,42	952,31	19,90	-12,92
			Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	61,3104529	-2214863,9	9,95	1,33	-0,09	3,66	226,89	75,16	14,10	12,42
			Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	50,671966	13,8297275	27,83	1,74	0,03	5,99	509,26	578,53	14,61	4,36
			Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	57,2555895	48,0841878	26,13	1,38	0,32	1,61	52,15	51,65	14,82	1,74
			Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	65,6624754	63,2975998	10,07	2,62	-0,06	7,69	107,78	608,52	0,34	18,47
			Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	36,2273251	22,3317142	20,02	1,22	-0,06	0,60	3600,26	497,14	19,88	1020,18
			Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	47,5880074	35,8090042	42,07	11,98	0,25	8,02	585,29	-4303,74	0,61	-34,00
			Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	66,3403748	44,0188516	41,97	1,45	0,22	1,18	34,95	70,41	1,19	13,96
			Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	42,4158544	15,1329987	36,30	1,25	0,12	1,07	63,91	484,56	28,00	7,22
			Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	59,2381191	55,5015405	62,59	1,35	0,29	0,02	19,79	86,28	27,35	8,08
			Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	80,3730701	65,7592314	10,39	24,38	0,29	0,73	280,35	4081,84	4,42	4,84
			Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-30,870679	-26,842997	58,74	1,10	0,39	0,61	34,64	171,82	1,49	3,84
			Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	26,7455031	-8,905591	49,18	1,84	0,26	1,72	71,88	405,88	5,77	2,77
			Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	56,8713003	41,2488226	18,22	3,35	-0,31	1,33	176,00	19,84	26,09	9,34

ANNEXE 14 : Valeurs issues de la simulation du modèle MARTINE

Tableau 17 : Valeurs issues de la simulation du modèle MARTINE

Modèle	Méthode		valeurs des paramètres														
MARTINE	Rosen		Bassin	surface	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4	X5	X6
			Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	90,37	77,09	61,38	1213,54	1000,11	26,21	0,16	17,57
			Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	73,81	7,10	259,44	1199,61	19372024,40	4,19	0,30	20,01
			Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-67,49	-50,36	292,66	9,62	5,00	2,00	0,36	9,75
			Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	48,30	-9,00	354,34	1200,69	1000,00	800,00	0,59	882,32
			Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	8,32	-1805311,09	487,27	1200,00	1000,00	800,00	0,50	900,00
			Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-68,49	-284,40	1900,00	58,08	1000,00	10,06	0,51	20,00
			Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	38,65	3,25	220,29	181,85	171,08	1,43	0,04	11,85
			Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	23,35	-10,06	87,52	22,03	86,31	800,22	0,52	900,01
			Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	-25,38	-41,50	1002,73	10,00	5,00	2,00	0,50	20,00
			Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	26,13	-53,27	451,91	1199,95	999,95	799,95	0,49	899,95
			Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	69,63	6,48	355,42	1199,85	999,83	1,00	0,29	28,49
			Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-5,64	-34,45	659,09	1200,00	1000,00	800,00	0,51	900,00
			Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	85,21	48,29	55,26	1197,27	999,74	10,06	0,36	35,04
			Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	26,78	-8,66	162,73	1200,15	85,40	800,00	0,77	900,00
			Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-43,07	-164,22	1417,09	1200,10	1000,00	654,91	0,50	55,56
			Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-0,47	-60,58	334,55	1200,00	1000,00	800,00	0,50	28,89
			Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	26,45	6,26	258,89	1200,28	1000,00	800,00	0,55	900,00

ANNEXE 15 : Valeurs issues de la simulation du modèle CEQUEAU

Tableau 18 : Valeurs issues de la simulation du modèle CEQUEAU

Modèle	Méthode	valeurs des paramètres																
CEQUEAU	Simplexe	Bassin	surface (km2)	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
		Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	90,12	84,47	303,08	482,44	23,29	55,81	32171,88	1,06	14,41	82,38
		Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	82,98	16,30	3,70	2366,02	0,95	63,13	8,18	0,92	202,88	11,87
		Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	63,58	28,64	8,10	170,83	0,90	510,01	122,68	6,15	44,53	2,82
		Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	81,15	34,37	19,83	19,42	0,99	88,61	5470,96	4,09	210,05	3,07
		Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	63,10	-7885,89	-562,36	10512,31	116,41	12779,71	765,22	72,35	753,27	0,03
		Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	0,15	-31,42	15,19	46,77	2,44	529,58	79,75	662,60	11,90	10,32
		Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	61,42	59,04	0,00	1689,97	1,04	15,72	152,72	8,73	320,88	15,02
		Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	45,34	66,54	0,03	2384,96	9,74	16,01	91,43	17,76	4,03	13,07
		Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	71,10	26,62	56,06	287,77	2,57	378,94	173,81	0,87	53,32	19,08
		Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	37,82	35,81	16,52	1048,71	4,84	46,83	190,88	11,96	11,46	10,38
		Iradouougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	81,58	43,29	16,46	844,91	0,83	23,81	1486,10	5,26	482,00	11,33
		Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	33,59	23,43	10,00	800,00	5,00	104,04	98,59	12,02	15,96	17,98
		Fadouougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	77,25	64,97	26,44	62,30	1,05	12,56	355,30	4,26	73,91	11,51
		Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	76,60	55,24	30,80	35,12	1,00	20,53	30,61	6,81	80,35	7,14
		Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	2,15	-8,36	10,00	65,86	5,00	148,59	145,45	5,00	254,34	800,00
		Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	8,87	-39,13	10,00	60,77	5,00	193,13	75,15	12,02	576,16	17,98
		Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	62,00	60,78	0,16	1000,23	1,00	59,78	223,41	3,61	76,16	5,96

ANNEXE 16 : Valeurs issues de la simulation du modèle CREC

Tableau 19 : Valeurs issues de la simulation du modèle CREC

Modèle	Méthode	valeurs des paramètres													
CREC	Simplexe	Bassin	surface	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4	X5
		Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	71,06075334	48,21	4350,99	32,90	0,01	0,01	24,42
		Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	76,87492994	27,94	8592,76	18,09	0,00	0,00	15,10
		Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-71,6963804	-86,51	58,75	737,01	0,42	0,11	49,12
		Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	80,01019908	19,90	1551,42	39,47	0,32	0,10	2,62
		Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	-109,827024	-140813,78	30,00	700,00	1,00	0,10	5,00
		Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-384,851399	-543,13	1501,64	33,84	1,07	0,11	4,47
		Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	53,21077337	35,71	1027,80	32,70	0,28	0,10	690,58
		Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	56,54461571	42,85	284,55	324,22	0,32	0,09	755,16
		Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	-1702,90989	-1491,79	10,00	26,06	1,00	1,00	5,00
		Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	41,83177682	11,78	4184,59	35,87	0,05	0,02	10,40
		Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	69,53429265	60,81	1577,23	47,67	0,28	0,10	0,94
		Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	31,79137382	7,79	1000,00	26,06	0,46	0,10	12,02
		Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	74,7961462	68,90	1073,66	38,39	0,19	0,10	11,67
		Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	68,19947987	62,27	1949,36	8,68	0,00	0,00	5,63
		Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-2,12581064	-10,87	1254,03	748,08	0,29	0,13	1,41
		Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	23,15439097	-28,35	1035,00	26,32	0,36	0,10	707,00
		Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	51,90796872	22,47	6869,95	27,47	0,00	0,00	6,49

ANNEXE 17 : Valeurs issues de la simulation du modèle GARDENIA

Tableau 20 : Valeurs issues de la simulation du modèle GARDENIA

Modèle	Méthode	valeurs des paramètres											
GARDENIA	Simplexe	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4	X5
Bassin	surface												
Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	66,84	49,31	616,07	602,89	10,01	27,27	27,27
Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	27,49	-41,20	1776,98	336,43	16,06	1108,30	1108,30
Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-13,77	-27,52	1209,30	14,04	14,04	900,00	900,00
Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	5,75	-34,03	998,39	151,91	16,71	1718,39	1718,39
Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	-19,58	-834752,99	1031,01	900,00	113,48	50,20	50,20
Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-55,00	-321,10	957,36	1051,39	11,20	10,48	10,48
Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	-21,64	-23,49	499,90	945,00	14,04	32,12	32,12
Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	-7,78	-17,22	1200,00	900,00	900,00	900,00	900,00
Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	-14,58	-22,99	1200,00	366,62	14,04	14,04	14,04
Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	-0,20	-61,82	994,80	945,00	113,48	900,00	900,00
Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	23,94	-80,31	1224,00	918,00	23,54	23,54	23,54
Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-13,65	-42,92	1020,54	921,82	14,03	13,98	13,98
Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	23,95	-51,33	1071,44	913,25	13,98	12,94	12,94
Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	-9,41	-24,67	1200,00	240,05	5,00	900,00	900,00
Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	2,20	-25,79	278,62	805,75	1002,40	42,24	42,24
Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-19,65	-45,78	1037,39	874,79	14,59	14,55	14,55
Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	-10,38	-13,59	1200,00	900,00	23,08	41,16	41,16

ANNEXE 18 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR3J

Tableau 21 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR3J

Modèle	Méthode		valeurs des paramètres											
GR3J	Rosen		Bassin	surface	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3
			Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	79,65	73,23	2,59	3,99	249,31
			Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	74,26	24,90	2,97	-43,55	519,79
			Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-303,99	-296,88	2,97	-1,00	3000,00
			Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	81,76	37,19	3,00	-73,85	489,18
			Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	40,17	-1871919,54	2,55	-73,89	104,83
			Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	5,23	-54,44	2,71	-165,06	150,90
			Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	74,38	63,70	2,81	-19,29	123,62
			Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	40,28	63,34	2,82	-7,77	42,37
			Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	-328,82	-15,69	2,91	-493,17	131,08
			Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	41,62	25,87	2,99	-164,85	1078,77
			Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	88,88	59,90	2,97	-55,73	527,43
			Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-162,78	-264,50	2,97	-1,00	69,90
			Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	78,84	66,68	2,97	-0,04	103,12
			Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	59,58	38,65	2,53	-13,47	56,62
			Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-101,61	-115,81	2,97	-1,00	3000,00
			Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-125,45	-260,79	2,97	-1,00	99,80
			Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	58,16	45,45	2,83	-19,27	171,22

ANNEXE 19 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR4J

Tableau 22 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR4J

Modèle	Méthode		valeurs des paramètres												
GR4J	Rosen		Bassin	surface	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4
			Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	89,31	36,91	691,25	-5,07	189,82	39,50
			Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	69,12	4,00	1146,07	-54,48	136,20	39,40
			Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-11657,78	-2263,00	1200,00	-1,00	40,00	2,97
			Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	78,39	1,39	773,63	-164,89	897,64	15,34
			Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	-93,34	-63181890,31	418,15	-301,90	380,35	2,44
			Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-3374,83	-5633,63	1200,00	-1,00	40,00	2,97
			Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	-31,66	-62,14	237,73	-76874,69	40,00	2,51
			Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	-629,15	-1810,03	568,28	-1,00	40,00	3,00
			Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	-5060,82	-868,83	1200,00	-1,00	3000,00	2,97
			Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	-24,97	-38,74	347,92	-165,05	190,04	2,53
			Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-0,61	0,31	137,10	-55,70	189,65	2,66
			Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-4010,96	-3410,36	202,76	-1,00	69,90	0,10
			Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	-38,75	18,15	962,30	-54,59	105,91	3,45
			Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	52,26	17,38	210,29	-164,48	285,83	3,72
			Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-416,98	-397,61	1200,00	-1,00	3000,00	2,97
			Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	22,25	5,11	358,27	-20,92	16,40	39,50
			Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	-388,10	-901,95	1200,00	-1,00	69,90	2,97

ANNEXE 20 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR5J

Tableau 23 : Valeurs issues de la simulation du modèle GR5J

Modèle	Méthode		valeurs des paramètres													
GR5J	Rosen		Bassin	surface	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4	X5
			Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	80,93	46,49	1108,30	0,62	1173,59	15,10	0,90
			Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	75,41	-1,78	651,00	-2,71	758,35	5,08	-0,40
			Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-96,17	-57,81	215,45	0,99	40,25	11,28	9,60
			Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-62,19	-106,81	1122,17	-0,73	132,72	38,73	-5,65
			Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	-53,31	-10,01	964,00	8,14	286,72	-2,97	5,85
			Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-93,57	-73,92	1126,25	-15,50	44,63	8,05	-196,25
			Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	-3,78	-2,63	198,08	1,22	69,99	3,42	3,52
			Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	-787,69	-512,63	1104,65	-0,05	40,00	3,00	0,50
			Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	-26,22	-42,94	1023,00	4,89	3004,20	7,17	904,20
			Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	-15,31	-30,79	1199,81	2,73	371,96	16,85	1,50
			Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	11,17	-11,60	200,28	1,17	219,72	3,52	3,67
			Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-5,98	-37,11	1109,64	4,90	277,99	2,59	1,46
			Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	-132,54	-72,63	1073,48	5,01	43,14	5,94	2299,99
			Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	-36,37	-33,26	1100,79	121,73	44,18	6,04	27,93
			Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-467,56	-475,54	1200,00	-1,00	3000,00	2,97	0,50
			Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-91,20	-77,85	776,00	-3,37	57,15	2,88	-4,86
			Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	-441,46	-1001,20	1200,00	0,23	69,90	2,97	0,50

ANNEXE 21 : Valeurs issues de la simulation du modèle BOORMAN

Tableau 24 : Valeurs issues de simulation du modèle BOORMAN

Modèle	Méthode		valeurs des paramètres													
Boorman	Simplexe		Bassin	surface	Lacune	Début calage	Fin de calage	début validation	Fin validation	Nash calage	Nash validation	X1	X2	X3	X4	X5
			Bougouni	15236	7%	01/01/1957	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1980	86,75	80,74	9,35	66,08	105,85	27,99	1,29
			Yendere	5930	10%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	74,68	24,84	13,51	91,14	87,05	18,65	0,97
			Wayen	20159	23%	01/01/1966	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	-2,29	-2,06	4,39	76,58	320,32	0,00	1,00
			Samandeni	4454	15%	01/01/1961	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1990	61,48	30,78	4,26	66,72	359,84	0,00	1,00
			Nobere	7851	50%	01/01/1967	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	60,51	-1756,69	6,28	70,21	404,96	0,00	1,00
			Nibehibe	7280	14%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	46,13	36,77	6,77	61,09	893,20	0,00	1,00
			Lanhountalanta	1680	13%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/01/1992	71,77	64,93	6,04	83,56	124,78	0,00	1,00
			Koriziena	2887	52%	01/01/1970	01/01/1980	01/01/1980	01/12/1990	40,96	53,53	4,05	4,05	227,93	0,00	1,00
			Kakassi	7460	16%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1982	56,06	-2,68	4,06	4,06	273,73	0,00	1,00
			Kaboua	9600	30%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/03/1992	22,61	-10,95	4,06	4,06	287,14	0,00	1,00
			Iradougou	1990	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	76,65	54,46	4,09	5,77	141,15	0,00	1,00
			Fetekro	10000	4%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	30,72	18,75	7,66	7,03	230,50	0,00	1,00
			Fadougou	9300	0%	01/01/1979	01/01/1980	01/01/1980	01/03/1990	-23,13	31,89	7,66	7,03	230,50	0,00	1,00
			Dolbel	7505	8%	01/01/1962	01/01/1970	01/01/1970	01/09/1980	71,23	47,11	8,69	5,11	223,18	0,00	1,00
			Bafingdala	5930	0%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	-115,49	-65,13	8,69	5,11	234,34	0,00	1,00
			Mbesse	975	2%	01/01/1977	01/01/1980	01/01/1980	01/09/1995	12,72	10,42	8,69	5,11	234,34	0,00	1,00
			Route kandi banikoara	8150	13%	01/01/1963	01/01/1970	01/01/1970	01/12/1991	57,76	60,16	8,69	5,11	246,05	0,00	1,00