



ETUDE DE LA TRANSPOSABILITE DES
PARAMETRES DE MODELES HYDROLOGIQUES DANS
UN CONTEXTE DE CHANGEMENT GLOBAL :
Cas des bassins de l'Afrique de l'ouest et centrale

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INFRASTRUCTURES HYDRAULIQUES
OPTION : .Eaux Agricoles

Présenté et soutenu publiquement le 24 Juin 2013] par

Kiswendsida Samiratou OUEMI

Travaux dirigés par : Dr Jean-Emmanuel PATUREL

Chargé de recherches à l'IRD rattaché à 2ie

Dr Harouna KARAMBIRI

Directeur de l'école doctorale du 2ie

**CENTRE COMMUN DE RECHERCHE « Eau et climat » au laboratoire Hydrologie et
Ressource en Eau (LEAH)**

Jury d'évaluation du stage :

Président : Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : Dr Dial NIANG
Dr Lawani MOUNIROU
Dr Jean-Emmanuel PATUREL

Promotion [2012/2013]

DEDICACE

A mes chers parents, Monsieur et Madame OUERMI, pour tous les sacrifices consentis à mon égard depuis ma naissance

A mon oncle, Mamadou OUEDRAOGO qui vient de nous quitter. Tonton Samadi, ton soutien et tes conseils me manqueront. Ton visage et ta voix resteront à jamais

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Ensuite, nous tenons à remercier sincèrement le Docteur Jean-Emmanuel PATUREL, notre encadreur, pour sa confiance, sa patience, sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Nous remercions aussi le Docteur Harouna KARAMBIRI, notre directeur de mémoire, pour nous avoir fait confiance et accepté de suivre de près dans notre travail.

Nous tenons particulièrement à remercier M Ousmane Roland YONABA, pour son aide et ses conseils qui ont contribué à améliorer notre travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous les membres de ma famille, ma sœur Aminata et mes frères Mahomed et Souleymane, pour leur soutien moral.

Nous sommes aussi reconnaissants à tous mes camarades de classe pour les bons moments passés ensemble particulièrement à tous les étudiants de la M2 Infrastructures Hydrauliques de la promotion 2012-2013 et à Léon GNISSIEN.

Nous remercions également tout le personnel du 2iE qui nous a accordé son hospitalité et sa collaboration durant toute notre période d'étude au sein de leur établissement. A tous nos amis et connaissances que nous n'avons pas pu citer ici, qui de près ou de loin nous ont soutenus pendant ce stage; qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

RESUME

La présente étude traite de la transposabilité et de la sensibilité des paramètres de trois versions des modèles GR dans un contexte de changement global. Nous sommes parvenus au constat qu'il y a une baisse de la pluie annuelle moyenne et des écoulements autour des années 1970 et 1980. La performance de calage des trois versions est fonction de la pluviométrie moyenne et de la taille du bassin. Le transfert des paramètres dans le temps entraîne des baisses de performance liées aux variations des variables hydro-climatiques de la période de calage à la période de validation. Le transfert des paramètres d'une période sèche à une période humide donne de meilleures performances que le cas contraire. Aussi, le transfert des paramètres d'une période de conditions hydro-climatiques variées vers une période de conditions hydro-climatiques moins variées que celles de la période de calage donne de meilleures performances que le cas inverse. L'analyse de la sensibilité des paramètres montre, pour GR2M-Mo, que le paramètre X2 est plus sensible que le paramètre X1. Concernant GR2M-MK2, le paramètre X1 est plus sensible que X2. Les paramètres X1 et X2 de GR2M-MK3 sont sensibles quoique X1 soit plus sensible que X2. Le paramètre X3 n'est pas sensible. La sensibilité de X1 ayant considérablement changé de GR2M-MK2 à GR2M-MK3, nous pensons que les paramètres X1 et X3 sont liés. Aussi, les paramètres semblent plus sensibles sur la période après 1980 que sur les autres périodes. Ils sont plus sensibles sur la période 1970-1980 que sur la période avant 1970. Le transfert des paramètres d'une période D vers une période R donnent d'autant plus de meilleures performances que la sensibilité des paramètres sur la période D est plus élevée que celle de la période R.

Mots clés :

1. Transposabilité de paramètres
2. Afrique de l'Ouest et Centrale
3. Changement global
4. Sensibilité des paramètres
5. Simulations
6. Calage
7. Validation

ABSTRACT

The current case study reports about the transferability and sensitivity parameters of three versions of GR models in a context of global change. A decrease was found in mean annual rainfall and runoff around the 1970s and 1980s. The timing performance of the three versions was found to be a function of the average rainfall and the size of the basin. Transfer parameters over time causes poor performance related to changes in hydro-climatic variables in the calibration period in the validation period. The transfer of parameters from a dry period to a wet period gives better performance than the other way round. Also, transfer settings from one period to another period with less various hydro-climatic conditions than the calibration period gives better performance than the reverse. The sensitivity analysis showed the parameters for the Mo-GR2M X2 parameter is more sensitive than the parameter X1. As for GR2M on-MK2, the parameter X1 was found to be more sensitive than X2. Parameters X1 and X2 GR2M MK3 are also sensitive although X1 appears to be more sensitive than X2. The X3 parameter is not sensitive. The sensitivity of X1 having considerably changed from GR2M-MK2 to GR2M-MK3, we believe that the parameters X1 and X3 are related. Also, parameters seems to be more sensitive on the period after year 1980, then from 1970 to 1980 and then finally in the period up to 1970. Transferring settings from a D period to a R period gives even better performance when the sensitivity of parameters on the period D is higher than on the period R.

Keywords:

1. Parameters transposability
2. West and central Africa
3. Global Change
4. Parameters sensitivity
5. Simulations
6. Calibration
7. Validation

Liste des abréviations:

CATCHMOD : Catchment Modelisation

CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts

CRU: Climatic Research Unit

CV: Coefficient de variation

DSST: Differential Split Sample Test

DWBM: Dynamic Water Balance Model

En : Evapotranspiration nette

ETP Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

FAO : Fonds Alimentaire de l'organisation des Nations Unies

GR : Modèles du Génie rural à pas mensuel

GR2M-MO : Version de Mouelhi à 2 paramètres du modèle du Génie rural à pas mensuel

GR2M-MK2 : Version de Makhoul à 2 paramètres du modèle du Génie rural à pas mensuel

GR2M-MK3: Version de Makhoul à 3 paramètres du modèle du Génie rural à pas mensuel

GCM : Modèles globaux de circulation atmosphérique

HSM-SIEREM: HydroSciences Montpellier- Système d'Information Environnementales sur les Ressources en Eaux en Afrique pour leur Modélisation

NSE: Nash et Sutcliffe Error

P: Pluie

Pn: Pluie nette

PBT: Proxy Basin Test

DSST: Proxy Differential Split Sample Test

SST: Split Sample Test

SIMHYD: Simulation Hydrologique

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
Remerciements.....	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT.....	iv
Liste des abréviations.....	v
Liste des tableaux.....	9
Liste des Figures.....	10
I. INTRODUCTION.....	14
II. ETAT DE L'ART : Revue de littérature sur le changement global et la transposabilité des paramètres de modèles.....	15
III. HYPOTHESES ET OBJECTIFS DE TRAVAIL.....	17
IV. MATERIEL ET METHODES.....	17
IV.1 ZONE D'ETUDE.....	17
IV.2 MODELES.....	21
IV.2.1 MODELE GR2M : Version de Makhlouf.....	21
IV.2.2 MODELE GR2M : Version de Mouelhi(2003).....	25
IV.3 DONNEES.....	26
IV.4 METHODOLOGIE.....	29
IV.4.1 LE DIFFERENTIAL SPLIT SAMPLE TEST (DSST).....	29
IV.4.2 METHODE D'OPTIMISATION ET CRITERE DE QUALITE.....	30
IV.4.3 METHODOLOGIE D'ANALYSE DES RESULTATS.....	31
V. RESULTATS ET ANALYSES.....	33
V.1 ANALYSE DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES.....	33
V.2 ANALYSE DES PERFORMANCES DE CALAGE.....	36
V.2.1 ENTRE PERIODES.....	36
V.2.2 ENTRE MODELES.....	37

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

V.2.3	ENTRE BASSINS.....	38
V.3	ANALYSE DES PERFORMANCES EN VALIDATION.....	47
V.3.1	ENTRE PERIODES.....	47
V.3.2	EN FONCTION DES VARIATIONS DE LA PLUVIOMETRIE.....	49
V.4	ANALYSE DE LA SENSIBILITE DES PARAMETRES.....	53
VI.	CONCLUSION.....	59
	BIBLIOGRAPHIE.....	60
	ANNEXES.....	62

Liste des tableaux

Tableau 1a: Taux de lacune (%) par bassins	21
Tableau 1b: Caractéristiques des bassins versants étudiés.....	22
Tableau 1c: Centiles et critères de distribution de quelques caractéristiques des bassins versants étudiés.....	23
Tableau 2 :_Récapitulatif des efficacités en calage pour les trois versions de GR2M.....	31
Tableau 3 : Performances de calage par versions	32
Tableau 4a : Comparaison de calavt70-val70-80 et cal7080-valavt70.....	42
Tableau 4b : Comparaison de calt7080-valap80 et calap80-val7080.....	43
Tableau 4c : Comparaison de calavt70-valap80 et de calap80-valavt70.....	43

Liste des Figures

Figure 1a : Localisation des têtes bassins versants (Afrique de l'ouest).....	18
Figure 1b: Localisation des têtes bassins versants (Afrique de l'ouest).....	12
Figure 1c: Localisation des bassins versants intermédiaires niveau 1 (Afrique de l'ouest)....	13
Figure 1d: Localisation des bassins versants intermédiaires niveau 1 (Afrique centrale).....	13
Figure 1 ^e : Localisation des bassins versants intermédiaires niveau 2.....	14
Figure 1f: Localisation des bassins versants principaux	14
Figure 2a : Schéma de fonctionnement de la version de Makhoulf	24
Figure 2b: Schéma du fonctionnement du modèle de Mouelhi.....	19
Figure 3 : Schématisation du differential split sample test.....	30
Figure 4 : Représentation de paramètres identifiable et non identifiable	32
Figure 5a : Représentation des pluies moyennes par période et par bassin.....	33
Figure 5b: Représentation des écart-types de pluies par période et par bassin.....	28
Figure 5c: Représentation des coefficients de variation interannuelle par période et par bassin.....	28
Figure 6a : Représentation des écoulements moyens par période et par bassin	35
Figure 6b: Représentation des écart-types des écoulements par période et par bassin.....	29
Figure 6c: Représentation des coefficients de variation des écoulements par période et par bassin.....	30
Figure 7a: Représentation de la performance de calage en fonction de la pluie moyenne (Version de Mouelhi).....	32
Figure 7b: Représentation de la performance de calage en fonction de la pluie moyenne (Version de Makhoulf 2 Paramètres).....	32
Figure 7c: Représentation de la performance de calage en fonction de la pluie moyenne (Version de Makhoulf 2 Paramètres).....	33
Figure 7d: Performance de calage des têtes de bassins versants pour la période avant 1970 (Version de Makhoulf 2 Paramètres).....	40
Figure 7 ^e : Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 1 pour la période avant 1970 (Version de Makhoulf 2 Paramètres).....	34

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Figure 7f: Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 2 pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres).....	35
Figure 7g: Performance de calage des bassins versants principaux pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres).....	35
Figure 7h: Performance de calage des têtes de bassins versants pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres).....	36
Figure 7i: Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 1 pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres).....	36
Figure 7j: Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 2 pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres).....	37
Figure 7k: Performance de calage des bassins versants principaux pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres).....	37
Figure 7l: Performance de calage des têtes de bassins versants pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi).....	38
Figure 7m: Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 1 pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi).....	38
Figure 7n: Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 2 pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi).....	39
Figure 7o: Performance de calage des bassins versants principaux pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi).....	39
Figure 8a: Représentation de la performance de calage en fonction de la superficie (Version de Makhlouf 2 Paramètres).....	40
Figure 8b: Représentation de la performance de calage en fonction de la superficie (Version de Makhlouf Paramètres).....	40
Figure 8c: Représentation de la performance de calage en fonction de la superficie (Version de Mouelhi).....	41
Figure 9a: Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives de pluies moyennes annuelles entre périodes de calage et de validation (Version de Mouelhi).....	44
Figure 9b: Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives de pluies moyennes annuelles entre périodes de calage et de validation (Version de Makhlouf 2 Paramètres).....	44

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Figure 9c: Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives de pluies moyennes annuelles entre périodes de calage et de validation (Version de Makhoulf 3 Paramètres).....	45
Figure 9d: Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives d'écart- type de pluies entre périodes de calage et de validation (Version de Mouelhi).....	46
Figure 9e: Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives d'écart- type de pluies entre périodes de calage et de validation (Version de Makhoulf 2 Paramètres).....	46
Figure 9f: Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives d'écart- type de pluies entre périodes de calage et de validation (Version de Makhoulf 3 Paramètres).....	47
Figure 10a: Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X1 de GR2M-MO.....	48
Figure 10b: Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X2 de GR2M-MO.....	48
Figure 10c: Représentation des performances de simulations en fonction des paramètres X1 et X2 de GR2M-MK2.....	49
Figure 10d: Représentation des performances de simulations en fonction des paramètres X1 et X2 de GR2M-MK3.....	49
Figure 10e: Représentation des performances de simulations en fonction des paramètres X3 de GR2M-MK3.....	50
Figure 11a: Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X1 de GR2M-MK2 par période.....	50
Figure 11b: Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X2 de GR2M-MK2 par période.....	51
Figure 12: Représentation de courbes iso-valeurs de NSE en fonction des paramètres X1 et X2 et pour le bassin de Dioila ; en noir pour la période avant 70, en rouge pour la période après 80.....	52

Annexes :

Annex1 : Répartition géographique des performances de calage

Annexe2 : Représentation de la performance de calage en fonction des écart-types de pluies

Annexe3 : Représentation de la performance de calage en fonction des coefficients de variation de pluies

Annexe4 : Représentation de la performance de calage en fonction des écoulements moyens

Annexe5 : Représentation de la performance de calage en fonction des écart-types des écoulements

Annexe6 : Représentation de la performance de calage en fonction des coefficients de variation des écoulements

Annexe7 : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des CV de pluies entre périodes de calage et de validation

Annexe 8 : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des écoulements moyens entre périodes de calage et de validation

Annexe 9 : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des écart- types des écoulements entre périodes de calage et de validation

Annexe 10 : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des CV des écoulements entre périodes de calage et de validation

Annexe 11 : Hydrogrammes des bassins étudiés

I. INTRODUCTION

« L'eau c'est la vie » dit-on. En effet, elle est non seulement nécessaire à la vie mais elle est aussi utilisée dans beaucoup d'activités humaines. Aussi, est-elle puisée sans retenue dans les ressources disponibles tant à la surface qu'en souterrain. Cependant, les ressources en eau, certes renouvelables, sont limitées avec des besoins de plus en plus croissants. Aussi, leur renouvellement est-il influencé en quantité et en qualité par les changements climatiques et les changements environnementaux dus aux actions de l'homme : on parle alors de changements globaux. De ce fait, la gestion des ressources en eau s'impose et devient même un des enjeux majeurs de notre siècle. Toutefois, pour mieux la réussir, il est nécessaire de pouvoir évaluer à long terme les ressources en eau afin de mieux développer les politiques en la matière. Pour ce faire, les scientifiques utilisent souvent une approche de scénarii qui se décomposent en quatre étapes : (1) le choix d'un scénario ou de plusieurs scénarii de changement global à partir de modèle de circulation global, (2) l'utilisation de modèles globaux de circulation atmosphérique (GCMs), (3) la réduction des sorties de GCMs à une échelle pouvant être utilisée pour l'hydrologie, et (4) l'utilisation de modèles hydrologiques de transformation Précipitations-Ecoulements à l'échelle du bassin versant. Chacune de ces approches comporte des incertitudes. Notre étude utilisera la quatrième approche à savoir l'utilisation de modèles hydrologiques pour des simulations d'écoulements à l'échelle du bassin versant.

L'utilisation du modèle hydrologique a pour objectif de déterminer l'évolution des ressources en eau dans le futur. Elle consiste en un calage de paramètres sur une période de référence et en une validation sur la période voulue. Le calage des paramètres prend non seulement en compte les modifications climatiques mais aussi celles environnementales. Les modifications environnementales sont souvent liées à la pression démographique en Afrique de l'Ouest et Centrale. Elles évoluent dans le temps et ont une très grande implication dans la modification de la relation Pluie-Débit. En effet, elles modifient grandement le coefficient de ruissellement. Ainsi, un modèle peut être très performant en calage mais pauvre en extrapolation dans le temps : on parle de transposabilité des paramètres dans le temps. L'objet de notre travail est l'étude de la transposabilité des paramètres dans le temps dans un contexte de changement global sur les bassins de l'Afrique centrale et occidentale. Il s'agit de déterminer la période propice au calage pour une simulation acceptable des écoulements du futur.

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Dans le présent document, nous ferons d'abord le point sur l'état des études sur les changements globaux et la transposabilité des paramètres de modèles. Ensuite, nous énoncerons nos hypothèses et déclinons objectifs d'étude. Puis, nous présenterons les matériels et les méthodes employés. Nous terminerons avec la présentation des résultats et des analyses.

II. ETAT DE L'ART : Revue de littérature sur le changement global et la transposabilité des paramètres de modèles

Depuis 1970, le climat a changé en Afrique de l'Ouest et dans une partie de l'Afrique centrale (diminution globale de la pluviométrie, diminution globale des écoulements sauf en région sahélienne, augmentation globale de la température moyenne journalière). En plus de ces changements climatiques, le régime hydrologique des rivières a été modifié par les changements environnementaux imputables à l'homme contraint, par l'accroissement de la population, de poser des actions telles que la déforestation, l'extension des terres agricoles, la construction de barrages, lesquelles se répercutent sur le régime hydrologique. (G. Mahé et al. 2013). Une étude menée par HydroSciences Montpellier a confirmé les observations sur les changements hydro climatiques en Afrique de l'Ouest et Centrale et a abordé la question de la relation pluie-débit : *comment a-t-elle évolué en fonction de ces changements.* « Si on fait l'hypothèse que la stabilité des paramètres d'un modèle peut signifier stabilité des processus de transformation de pluie en débit, la variabilité climatique n'implique pas toujours une modification du comportement hydrologique d'un bassin » concluent Lubès-Niel et al. (2003). Cependant, dans 66% des cas, on observe une modification significative d'un point de vue statistique des jeux de paramètre de part et d'autre de ces changements climatiques. De même, les travaux menés par HSM dans le cadre d'études d'impact du changement climatique observé depuis 1970 sur un grand nombre de bassins versants d'Afrique de l'Ouest et Centrale (Dezetter et al. 2008) ont montré qu'il était préférable de caler le modèle GR2M-version Makhoul sur une période sèche et de l'utiliser en simulation sur une période humide. Notre étude suscite la problématique suivante : comment caler les paramètres pour avoir une précision acceptable ?

Gan et Burges (1990a, 1990b), travaillant sur cinq bassins américains de moins de 0.5 km², notent que le modèle hydrologique SMA offre de moins bonnes performances en prévision d'écoulement lorsque les paramètres calés sur une période sèche passent à une période

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale humide. Ils suggèrent donc d'utiliser avec précaution les jeux de paramètres calés dans un contexte de changement climatique, en précisant que les paramètres sont dépendants de la période de calage. Wilby (2005) constate aussi la même chose sur des bassins crayeux du Sud-Est de l'Angleterre : si on cale le modèle CATCHMOD en période de forts écoulements, les débits sont mieux reproduits sur des périodes de faibles écoulements que l'inverse. Par contre, Vaze et al. (2010), travaillant sur des bassins australiens de 50 à 2000 km² dans le cas d'études d'impact climatique, trouvent l'inverse. Ils précisent qu'il serait mieux que la moyenne annuelle des précipitations projetées ne soit pas plus sèche de 15% ou plus humide de 20% que la moyenne annuelle de la période d'observation qui a servi au calage et que, les modèles hydrologiques soient calés sur des périodes de plus de vingt ans. Li et al (2011) ayant travaillé sur 30 bassins autrichiens avec les modèles DWBM et SYMHYD, pensent qu'il est préférable de caler les paramètres sur une période humide (sèche) si l'on veut simuler des données pour une période humide (sèche). Mais ils trouvent de meilleures performances lorsque les paramètres sont calés sur une période humide et validés sur une période sèche. Les écoulements sont cependant surestimés (sous-estimés) lorsque le modèle est calé sur une période humide (sèche) et validé sur une période sèche (humide).

Par ailleurs, Coron et al, (2012) déclarent que: «l'utilisation d'un modèle dans des conditions différentes de celles où il a été calé, repose sur une hypothèse de transposabilité des paramètres, c'est-à-dire la possibilité d'utiliser les paramètres d'un modèle dans des conditions différentes de celles de sa construction, le modèle gardant une précision acceptable.» Aussi, trouvent-ils que le transfert des paramètres d'un modèle dans le temps peut présenter un niveau significatif d'erreurs dans les simulations et indiquent l'incertitude accrue dans les diverses applications pratiques de ces modèles (simulation d'écoulements, prévisions, conception, gestion de réservoir, évaluations d'impact de changement de climat, etc.). Wagener et al. (2001) précisent que ces incertitudes seraient dues aux erreurs liées à la structure même des modèles et des paramètres calés. Ceci parce que les modèles existant ne font pas la meilleure utilisation de l'information disponible. Brigode et al. (2013) renchérissent en disant que les incertitudes liées aux simulations d'écoulements et aux prévisions sont principalement dues au manque de robustesse des modèles.

Il convient à présent d'énoncer des hypothèses d'une part et de présenter des objectifs d'autre part.

III. **HYPOTHESES ET OBJECTIFS DE TRAVAIL**

Nous émettons l'hypothèse qu'il est possible d'utiliser les paramètres d'un modèle dans des conditions différentes de celles du calage et obtenir des résultats acceptables en validation : on parle ici de la transposabilité des paramètres.

L'objectif général est de parvenir à déterminer le degré de transposabilité des paramètres dans le temps dans un contexte de changement global. Il sera question ici de savoir à la fin de cette étude :

- s'il est possible de transposer les paramètres dans le temps sur les bassins de l'Afrique centrale et occidentale.
- si les paramètres sont transposables dans le temps, auquel cas, il sied de trouver la période propice pour le calage des paramètres afin d'obtenir une performance acceptable. Si les paramètres ne sont pas transposables, en trouver les raisons.
- déterminer le degré de sensibilité de chaque paramètre dans le but d'expliquer pourquoi les paramètres sont transposables ou non.

Une telle analyse, pour tendre à l'efficience, nécessite une certaine procédure.

IV. **MATERIEL ET METHODES**

IV.1 **ZONE D'ETUDE**

Notre zone d'étude est constituée de bassins versants de l'Afrique de l'Ouest et Centrale. La zone étant connue pour ses conditions climatiques contrastées dans le temps (Paturel et al. 1997), le choix des bassins a été fait de telle sorte à représenter autant que possible les différents régimes climatiques présents dans la zone. Notre choix s'est alors porté sur trente-huit (38) bassins. Le taux de lacune des données de débits n'a pas été forcément une contrainte. Nous reviendrons sur ce point plus loin.

Nos bassins sont situés à l'intérieur de cinq (5) pays d'Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Guinée Conakry, Mali et le Niger) et de deux (2) pays d'Afrique Centrale (Centrafrique et Tchad). Ce sont des sous bassins du Bandama (3), du Chari (2), de la Comoé (5), du Congo(2), du Kolente (1), du Konkouré(1), du Niger(17), de la Sassandra(3) et de la Volta (4). D'un point de vue climatique, ces bassins sont sahéliens, tropicaux purs, tropicaux de transition et équatoriaux guinéens. Leurs écoulements sont avant tout influencés par les

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale précipitations. Les figures 1a, 1b, 1c et 1d montrent l'emplacement des bassins versants sur le continent africain.

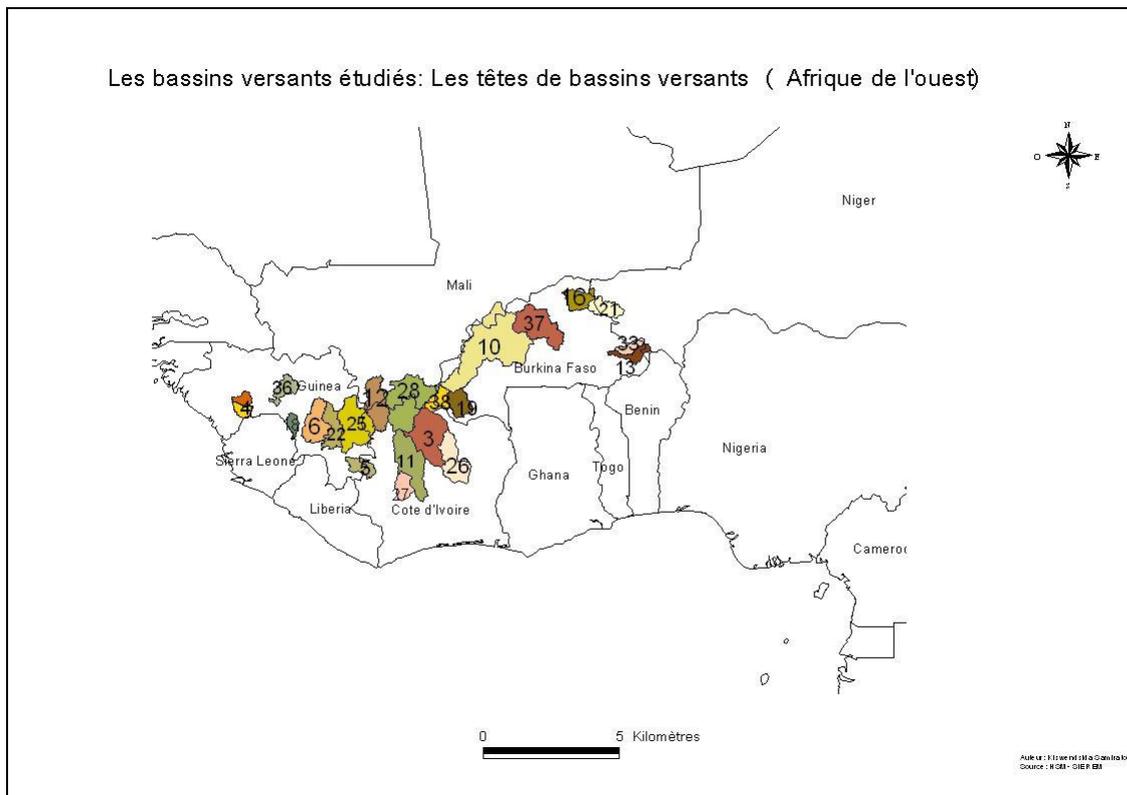


Figure 1a : Localisation des têtes bassins versants (Afrique de l'ouest)

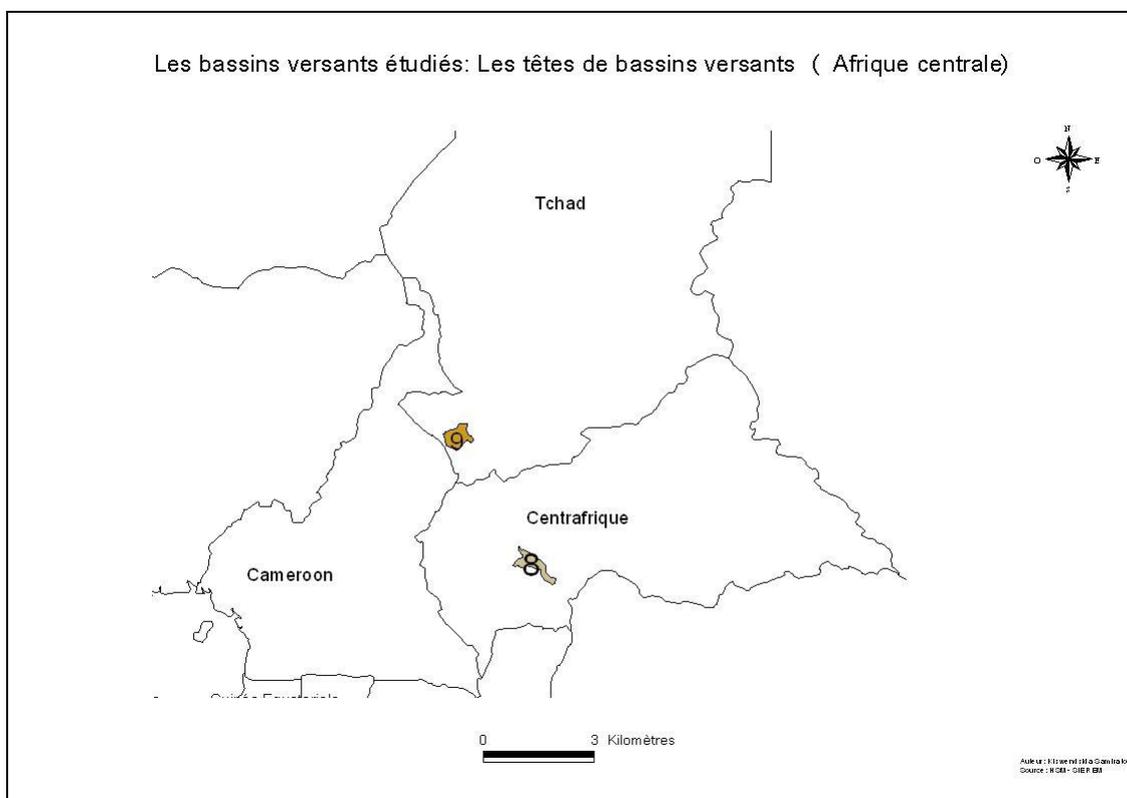


Figure 2b : Localisation des têtes bassins versants (Afrique centrale)

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

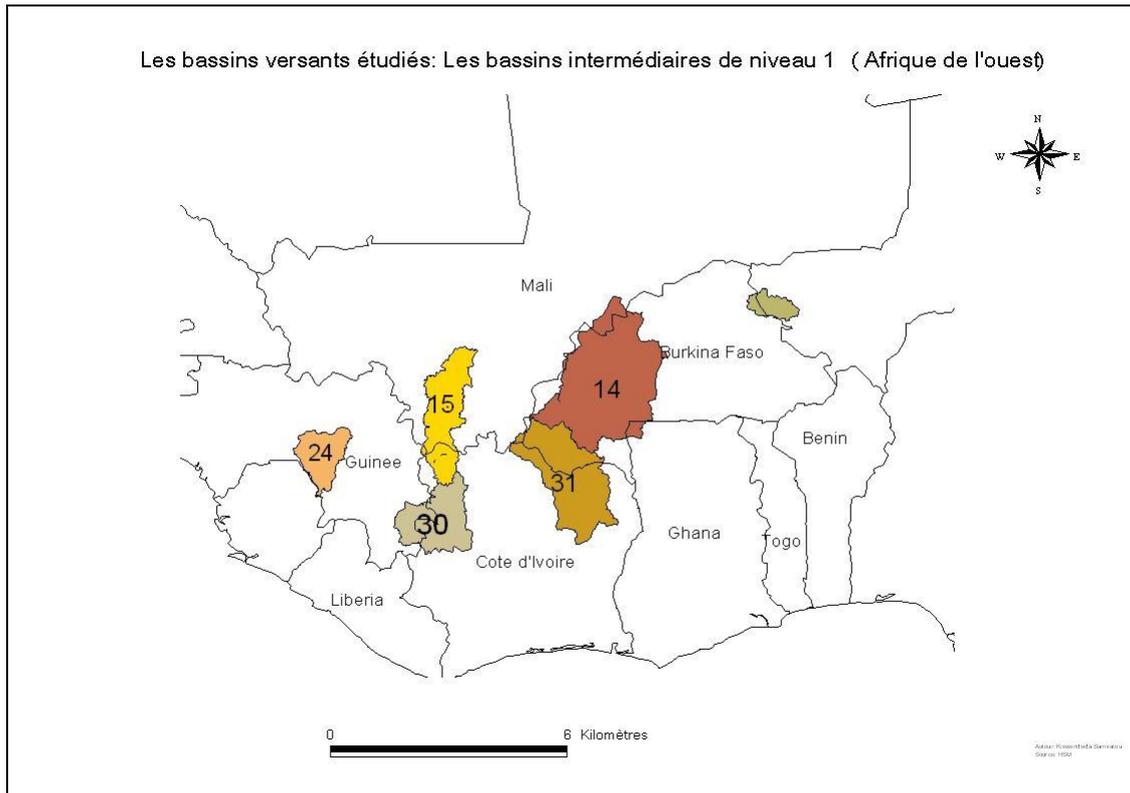


Figure 1c : Localisation des bassins versants intermédiaires niveau 1 (Afrique de l'ouest)

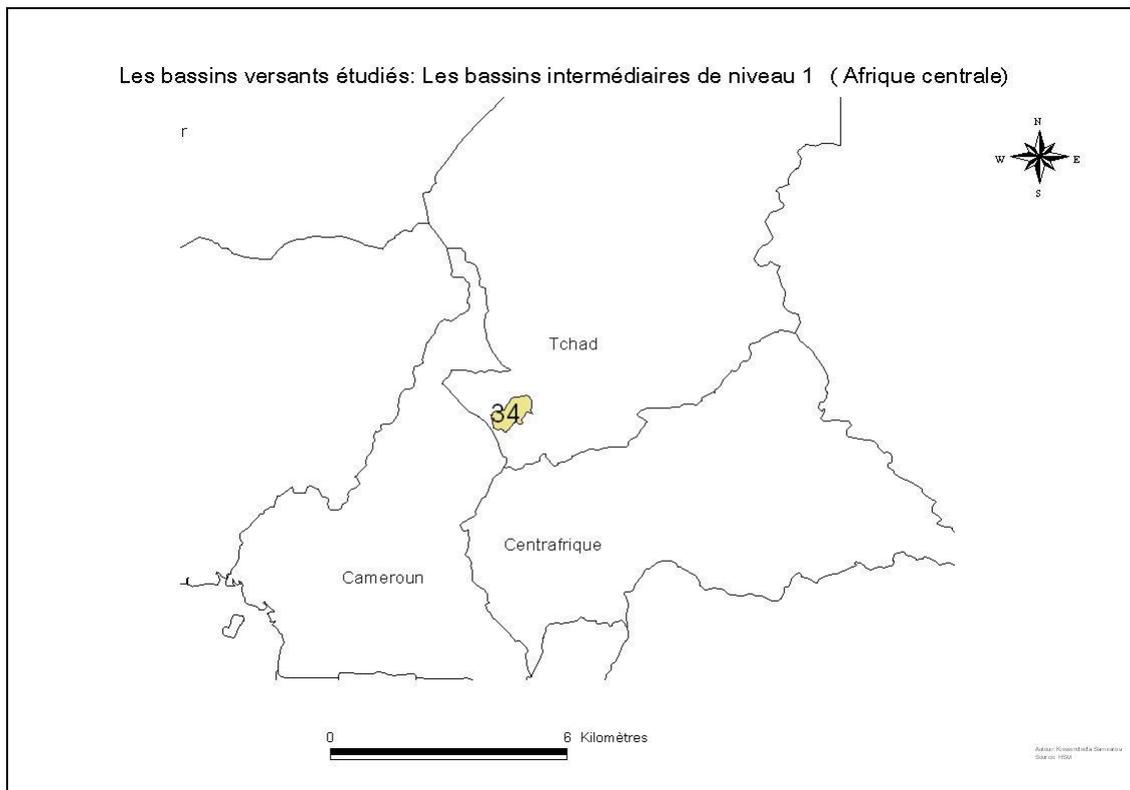


Figure 1d : Localisation des bassins versants intermédiaires niveau 1 (Afrique centrale)

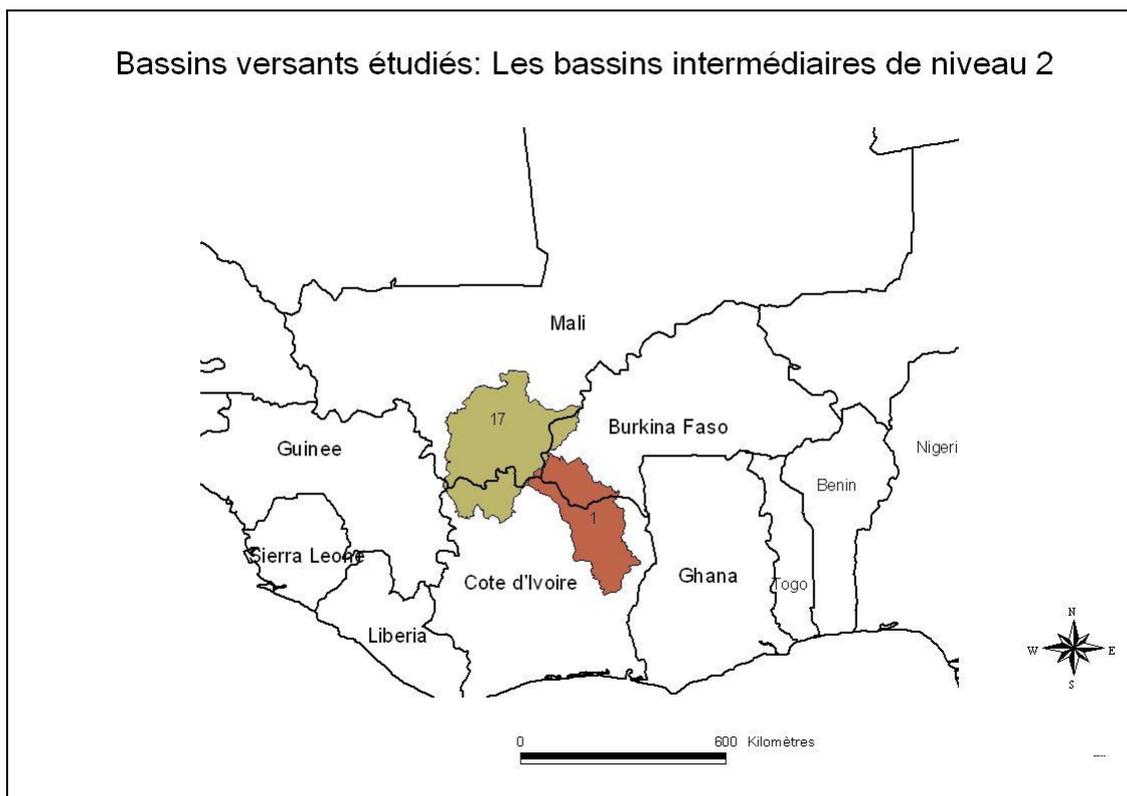


Figure 1^e : Localisation des bassins versants intermédiaires niveau 2

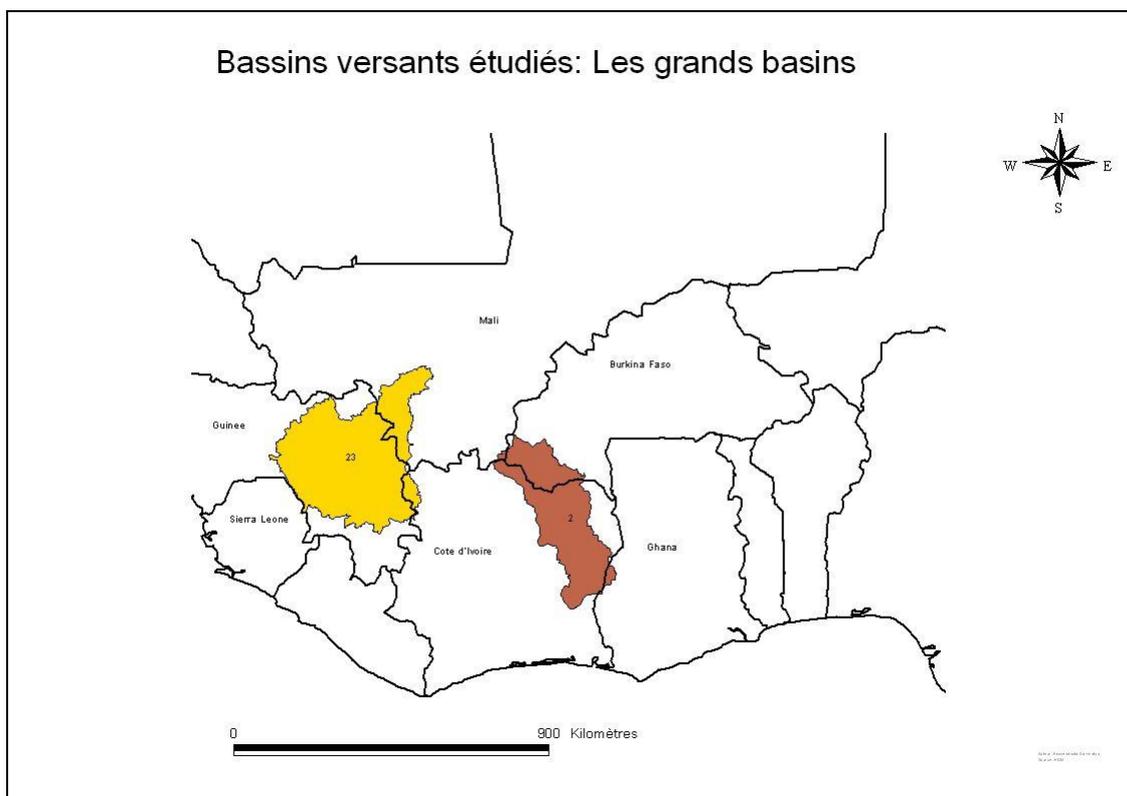


Figure 1^f : Localisation des bassins versants principaux

IV.2 MODELES

Les modèles GR (modèles hydrologique du génie rural) utilisés ici sont des modèles de simulations débit-pluies proposés par le CEMAGREF (CEntre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts) aujourd'hui IRSTEA (Institut de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture). Ces modèles ont une approche simplifiée mais originale et pragmatique du cycle hydrologique. Un mécanisme rationnel reproduisant au mieux le comportement global d'un bassin versant sous l'action combinée de deux variables de forçage essentielles (précipitations et demande évaporatoire de l'air) a été construit progressivement, en testant l'efficacité de chaque nouvelle modification. Dans cette étude, nous utiliserons deux versions aux pas de temps mensuel à deux paramètres et une version au pas de temps mensuel à trois paramètres de ces modèles.

IV.2.1 MODELE GR2M : Version de Makhlof

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

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

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

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

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

Les deux entrées pluie (P) et l'évapotranspiration (ETP) sont modulées dans la même proportion et concomitamment en multipliant les valeurs de ces entrées par un coefficient X_1 ($0 < X_1 < 1$) qui est le premier paramètre du modèle à estimer. Ensuite, on soustrait une même quantité U à la pluie modulée ($P' = X_1 * P$) et à l'évapotranspiration potentielle modulée ($ETP' = X_1 * ETP$) du mois considéré. La quantité U est de la forme :

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

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

$$\underline{P_n = X_1 \times P - U = P' - U} \quad \underline{\text{et} \quad E_n = X_1 \times ETP - U = ETP' - U}$$

Soit A le niveau maximal du réservoir-sol ; et H le niveau de ce réservoir en début du pas de temps (début du mois i) ; une partie de P_n augmente le niveau H du réservoir qui devient H_1 tel que :

$$H_1 = \frac{H + A \times V}{1 + \frac{H \times V}{A}}$$

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

$$\text{Le complément de } P_n \text{ est donc : } P_e = P_n - (H_1 - H)$$

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

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

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

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

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

$$ETR = H_1 - H_2$$

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

$$S_1 = S + (1 - \alpha)P_e .$$

Le débit délivré par ce réservoir linéaire est Q_g tel que :

$$Q_g = X_2 \times S_1$$

Avec $0 < X_2 < 1$. X_2 étant le second paramètre du modèle.

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

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

La figure 2a présente l'architecture du modèle de Makhoulouf:

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

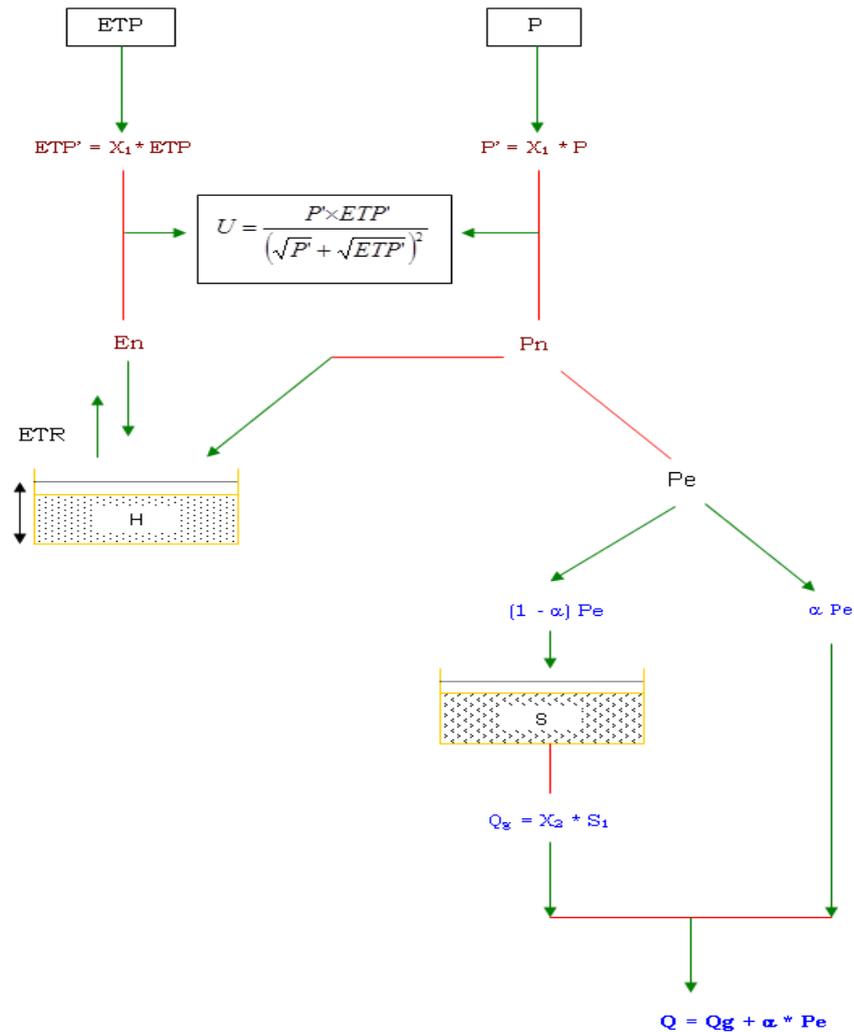


Figure 3a : Schéma de fonctionnement de la version de Makhoulf

Différentes applications de ce modèle à 4 paramètres (X_1 , X_2 , A et α) en Afrique de l'Ouest et Centrale ont montré que :

- α pouvait être posé comme étant nul (pas d'écoulement direct). C'est cette version que nous appellerons par la suite Makhoulf-3 paramètres
- A pouvait être assimilé à une capacité de rétention en eau du Sol ; donnée que l'on peut dériver de la carte des sols du monde de la FAO. C'est cette version que nous appellerons par la suite Makhoulf-2 paramètres, α étant fixé à 0.

IV.2.2 MODELE GR2M : Version de Mouelhi(2003)

Ce modèle est caractérisé par deux fonctions :

- Une fonction de production qui s'articule autour d'un réservoir 'Sol' de capacité maximale X_1 , paramètre à caler. Cette version ne présente ni phase d'interception partielle comme pour le cas du modèle de Makhlouf. Une percolation du réservoir Sol vers le transfert est assurée par une fonction dépendant de l'état du stock 'H'. Cette percolation suit une loi de vidange du réservoir sol de capacité maximale X_1 et d'exposant de vidange de 3.5.
- Une fonction de transfert représentée par un réservoir à vidange quadratique de capacité fixée. Ce réservoir est modifié par un échange souterrain, dont le coefficient X_2 est le deuxième paramètre à optimiser.

C'est un modèle à deux paramètres : le premier X_1 est la capacité maximale du réservoir 'Sol'. Le paramètre de vidange quadratique a été fixé à **60 mm** et le deuxième X_2 , est le coefficient d'échange souterrain. L'échange souterrain a remplacé la phase d'interception partielle présente dans le modèle de Makhlouf et assurée par une fonction issue de l'analyse du pas de temps pluriannuel (Mouelhi, 2002). Ainsi, le paramètre d'échange a remplacé le paramètre qui était censé corriger la pluie brute et l'évapotranspiration potentielle dans le modèle de Makhlouf. La figure 2b montre le fonctionnement du modèle de Mouelhi :

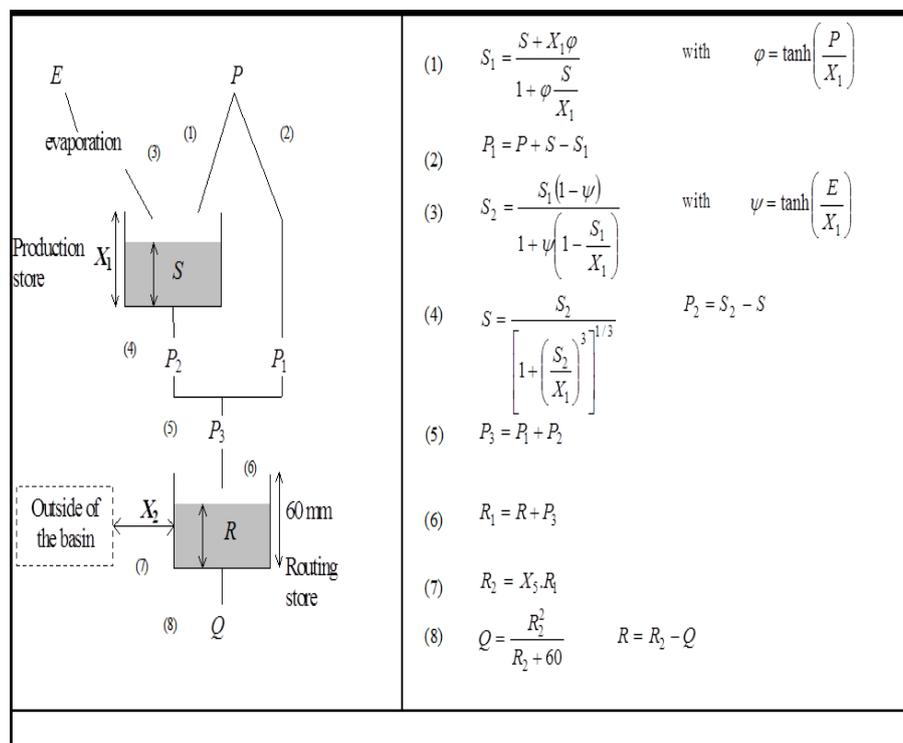


Figure 2b : Schéma de fonctionnement du modèle de Mouelhi

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Nota Bene : les paramètres X1 de Makhoulf et de Mouelhi ne sont pas les mêmes !

IV.3 DONNEES

Les modèles testés ici utilisent comme données d'entrée, des données mensuelles de pluie, d'évapotranspiration potentielle (ETP) et d'une variable assimilée à la capacité de rétention en eau du sol pour les deux versions de GR2M et des données mensuelles de pluies et d'ETP uniquement pour la version Makhoulf de GR3M. Aussi, avons-nous choisi d'utiliser la capacité de rétention en eau maximale du sol mensuelle comme entrée de capacité de rétention en eau du sol. En effet, des études antérieures menées sur l'utilisation de la version de Makhoulf 2 paramètres montrent de meilleures performances avec cette variable.

Les données de pluies et d'ETP proviennent du CRU (Climatic Research Unit). L'ETP a été calculé par la formule de Penman. Les données pour la pluie et l'ETP couvrent la période allant de 1901 à 2010.

Les données de la capacité en rétention en eau de sol proviennent de la FAO. Elles vont de 1925 à 1998.

Les données de débits proviennent de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) du Burkina Faso pour les stations hydrométriques situées sur le territoire burkinabé, les autres données ayant été obtenues via HSM-SIEREM. Le réseau hydrométrique s'est particulièrement développé dans les années 1950. Les séries de données obtenues ont beaucoup de lacunes. Ce qui constitue une grande difficulté pour le calage et la validation. La période de données pour les débits s'étale au minimum de 1962 à 1998. Par ailleurs, des études antérieures ont montré que, le taux de lacune des données de débit n'avait pas une grande influence sur le calage des paramètres pour la version de Makhoulf à 2 paramètres. Il suffisait d'avoir une série de données contenant de manière bien définie les hautes et les basses eaux du bassin pour avoir un bon calage. Le tableau 1a présente le taux de lacunes des bassins par période.

Tableau 1a : Taux de lacune (%) par bassins

Nom de la station	Taux de lacunes (%)			Nom de la station	Taux de lacunes (%)		
	Avant 1970	1970-1980	Après 1980		Avant 1970	1970-1980	Après 1980
Akakomoekro	2	8	14	Iradoukou	2	0	6
Aniassue pont	22	20	7	Kakassi	10	10	24
Bada	0	12	0	Kankan	17	3	12
Badera	76	16	19	Koulikoro	0	0	2
Bafingdala	7	0	2	Kouroussa	26	34	42
Baro	9	28	55	Mandiana	20	17	39
Boali ICOT	4	7	13	Mbahiakro	3	0	0
Boali Poste	0	3	26	Nibehibe	6	15	24
Bologo	61	31	32	Pankourou	0	3	7
Boromo	74	45	52	Samandeni	53	34	25
Bouaflé	8	20	19	Semien	11	6	0
Bougouni	17	0	9	Serebou	2	4	0
Campement W	0	9	14	Siguiri	0	0	0
Dapola	30	4	34	Tamou	7	4	55
Dioila	25	0	12	Tchoa	11	32	34
Dolbel	0	10	3	Tera	0	0	14
Douna	4	0	6	Tinkisso	37	6	65
Faranah	31	28	29	Wayen	29	18	11
Folonzo	57	28	16	Yendéré au Pont	22	18	11

Les bassins étudiés ont connu une baisse des pluies autour des années 1970, et une baisse des écoulements autour de 1970 et 1980. Ce qui nous a amené à choisir trois périodes d'essai : Avant 1970, 1970-1980 et Après 1980. La pluie moyenne annuelle pour l'ensemble des bassins est de 1 341 mm pour la période avant 1970, 1 205 mm pour 1970-1980, et 1 135 mm pour la période après 1980, l'évapotranspiration annuelle est respectivement de 1 844 mm, 1 833 mm et 1 842 mm et l'écoulement moyen annuel d'environ 200m³/s pour la période avant 1970, 130 m³/s pour la période 1970-1980 et 100m³/s pour la période après 1980. Le tableau 1b fait la synthèse les caractéristiques de chaque bassin étudié. Le tableau 1c récapitule les centiles et les critères de distribution de l'ensemble des bassins.

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Tableau 1b : Caractéristiques des bassins versants étudiés

Nom de la station	N° du bassin	Superficie	Bassin	Rivière	Pluie moyenne annuelle			Débits moyens annuels			Début de la série	Fin de la série
					Avant 70	70-80	Après 80	Avant 70	70-80	Après 80		
Akakomoe Kro	1	58305	Comoé	Comoe	1207,6	1072,5	1032,7	236319	136022	113108	1956	1998
Aniassue pont	2	70636	Comoé	Comoe	1169,7	1100,1	1054,5	255124	154466	112729	1954	1998
Bada	3	23809	Bandama	Bandama	1374,4	1200,9	1087,8	151564	74775	58398	1962	1997
Badera	4	3198	Kolenté	Kolenté	2254,8	1951,7	1935,0	94854	63176	66695	1958	1993
Bafingdala	5	6049	Sassandra	Bafing	1743,9	1745,6	1662,3	68641	52340	59252	1961	1998
Baro	6	13080	Niger	Niandan	1877,8	1788,2	1627,6	266744	212796	209491	1947	1998
Boali ICOT	7	44,47	Congo	Mbali	1567,7	1477,5	1418,7	60566	45044	36678	1964	1990
Boali Poste	8	4594	Congo	Mbali	1329,9	1255,7	1233,5	65206	45373	26537	1964	1993
Bologo	9	4098	Chari	Tandjilé	1088,6	1046,2	1004,3	11438	7161	5090	1950	1994
Boromo	10	54499	Volta	Mouhoun	874,8	754,5	766,9	66671	59689	46452	1955	1998
Bouaflé	11	21264	Bandama	Maraoué	1438,4	1196,0	1159,0	97067	68015	47394	1954	1998
Bougouni	12	14966	Niger	Baoulé Bani	1403,1	1271,9	1168,7	137426	75266	50437	1957	1998
Campement W	13	5391	Niger	Tapoa	1262,1	750,7	711,9	1154	878	1135	1963	1995
Dapola	14	86566	Volta	Mouhoun	924,8	822,5	818,0	137	86	71	1955	1998
Dioila	15	32431	Niger	Baoulé Bani	1292,8	1131,6	1065,6	283474	95666	66150	1954	1998
Dolbel	16	7505	Niger	Gorouol	546,8	434,4	421,8	8735	7701	8960	1961	1995
Douna	17	101225	Niger	Bani	1209,4	1065,2	1013,2	701772	245053	182887	1950	1998
Faranah	18	3171	Niger	Niger	1962,5	1956,9	1845,3	79978	78531	43109	1956	1998
Folonzo	19	8366	Comoé	Comoe	1187,8	1050,7	1003,6	11456	13689	12249	1965	1998
Iradouyou	20	1820	Niger	kouroukéle	1592,3	1458,8	1213,7	24573	14834	14037	1963	1996
Kakassi	21	7460	Niger	Dargol	577,9	471,4	439,7	4626	5784	4825	1957	1995
Kankan	22	10047	Niger	Milo	1865,2	1780,6	1608,6	218993	180000	132683	1939	1998
Koulikoro	23	19730	Niger	Niger	1637,9	1351,5	1380,6	1613872	1243714	863390	1925	1998
Kouroussa	24	17164	Niger	Niger	1790,5	1740,2	1618,1	293613	221315	140235	1948	1998
Mandiana	25	21095	Niger	Sankarani	1697,8	1552,9	1394,1	263120	257802	131795	1956	1998
Mbahiakro	26	15368	Bandama	Nzi	1285,8	1129,4	1017,7	57675	31226	29741	1957	1997
Nibehibe	27	6230	Sassandra	Lobo	1539,0	1423,6	1274,1	14991	11283	3143	1961	1998
Pankourou	28	30474	Niger	Bagoé	1388,4	1172,5	1106,1	281195	101224	78383	1957	1998
Samandeni	29	4454	Volta	Mouhoun	1127,0	1003,4	990,9	14284	14681	12516	1955	1998
Semien	30	29900	Sassandra	Sassandra	1648,5	1568,1	1414,7	266312	196637	183336	1954	1998
Serebou	31	50587	Comoé	Comoe	1235,9	1060,5	1019,9	223258	104514	100706	1954	1997
Siguiri	32	69735	Niger	Niger	1691,8	1606,5	1504,7	1212406	875335	663216	1950	1998
Tamou	33	3839	Niger	Diamango u	804,4	712,3	672,9	3750	2539	906	1962	1995
Tchoa	34	6670	Chari	Tandjilé	1133,9	1027,7	984,9	18043	11739	11513	1954	1994
Tera	35	2684	Niger	Dargol	560,6	450,0	424,1	3091	1002	3268	1961	1995
Tinkisso	36	6551	Niger	Tinkisso	1685,7	1491,8	1383,1	90927	55780	63839	1956	1998
Wayen	37	20241	Volta	Nakambé	737,3	614,5	605,0	45142	25970	22130	1955	1998
Yendéré au Pont	38	6288	Comoé	Leraba	1266,8	1128,0	1081,4	48098	25723	22020	1955	1998

Dans la présentation des résultats qui suivront, les bassins seront représentés par leur numéro.

Tableau 1c : Centiles et critères de distribution de quelques caractéristiques des bassins versants étudiés

Statistiques	Pluie moyenne annuelle (mm)			ETP moyenne annuelle (mm)			Débits moyens annuels (L/s)			Superficie (Km ²)
	Avant 1970	1970-1980	Après 1980	Avant 1970	1970-1980	Après 1980	Avant 1970	1970-1980	Après 1980	
Moyenne	1341.7	1205.7	1135.9	1844.2	1833.6	1842.2	195612.3	129016.4	97351.4	25085.4
Ecart-type	402.8	407.4	374.8	376.7	379.2	373.2	325031.1	237970.6	170126.1	29978.3
CV	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	1.7	1.8	1.7	1.2
Min	546.8	434.4	421.8	1335.0	1302.5	1332.0	1154.0	878.0	905.6	1820.0
Max	2254.8	1956.9	1935.0	2777.0	2759.0	2778.0	1613871.7	1243713.5	863390.0	120332.0
10 ^{ème} centile	784.3	682.9	652.5	1467.7	1456.0	1469.6	7502.2	6748.3	4358.2	3671.0
90 ^{ème} centile	1813.0	1756.1	1620.9	2436.0	2415.4	2424.3	286515.6	228436.8	183021.5	69874.3
Médiane	1311.3	1152.1	1084.6	1747.2	1746.0	1766.5	85452.2	61432.9	48915.9	11568.0

IV.4 METHODOLOGIE

L'objet de notre travail est d'étudier la transposabilité des paramètres entre des périodes climatiquement et environnementalement contrastées. Pour cela, les modèles ont été évalués en utilisant le Differential Split Sample Test (Klemes, 1986) dans le but de voir leurs comportements dans des conditions de calage-validation différentes. La baisse de performance provoquée par ce transfert sera analysée ainsi que l'identifiabilité des paramètres.

IV.4.1 LE DIFFERENTIAL SPLIT SAMPLE TEST (DSST)

Le DSST consiste à caler les paramètres d'un modèle sur une période donnée et à les valider sur une autre période ayant des conditions différentes (pas forcément que des conditions climatiques) de celles de la période de calage. Il permet d'évaluer le modèle dans des conditions contrastées.

La méthode comporte généralement trois étapes :

1. l'identification des périodes d'essai selon une caractéristique climatique ou environnementale (Température, Précipitations, Taux de couverture végétale, etc.)
2. l'application de l'essai de calage-validation
3. la comparaison des performances de validation pour évaluer si elles changent de manière significative quand les caractéristiques climatiques et/ou environnementales diffèrent entre les périodes de calage et les périodes de validation.

Les périodes ont été choisies en se référant à des études ultérieures sur notre zone d'étude (Paturol et al. 1997b) fixant la rupture des précipitations autour de l'année 1970 et celle des

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale
 écoulements autour de deux dates 1970 et 1980 ; d'où les périodes d'essai que nous avons retenues :

- la période avant 1970
- la période 1970-1980
- la période après 1980

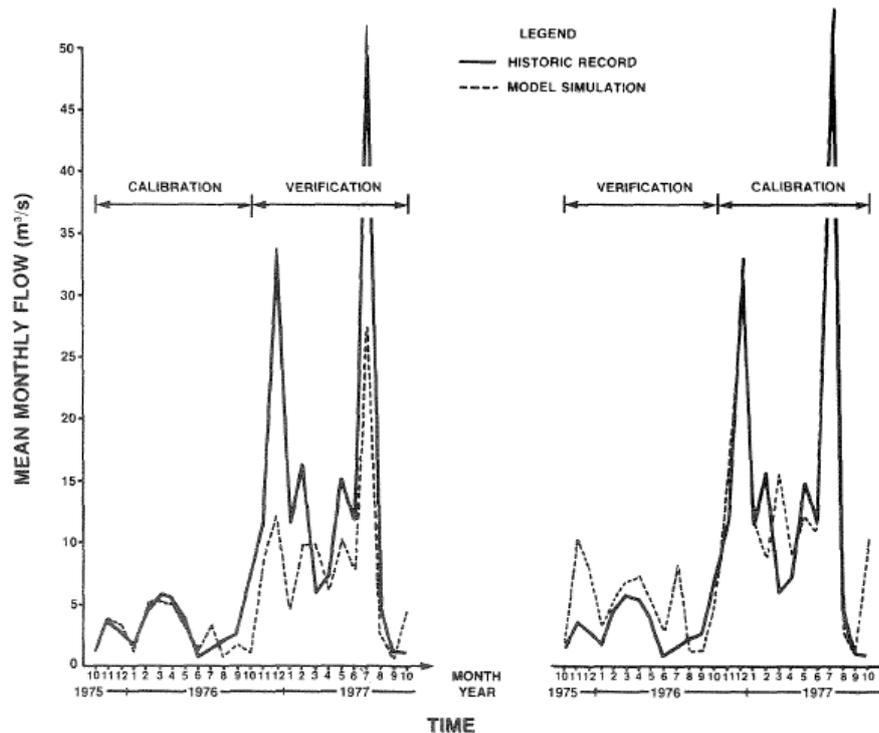


Figure 4 : Schématisation du differential split sample test

Diverses variables de climat peuvent être employées dans l'analyse des résultats (les précipitations annuelles ou saisonnières moyennes, l'ETP ou la température, le nombre d'événements extrêmes de pluie ou de sécheresse, l'index d'aridité,...). Ici nous avons axé notre analyse sur la variable Pluie avec des statistiques calculées au cours des périodes d'essai. Nous avons quantifié l'évolution des pluies à travers le temps par une comparaison des moyennes, des écart-types et des coefficients de variation des différentes périodes considérées dans cette étude.

IV.4.2 METHODE D'OPTIMISATION ET CRITERE DE QUALITE

Pour chacun des bassins versants étudiés, les paramètres des différentes versions du modèle GR2M ont été calibrés de manière à maximiser la fonction objective de Nash et Sutcliffe (NSE) qui s'écrit :

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

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

Avec $Q_{obs,i}$ l'écoulement observé au ième mois

$Q_{sim,i}$ l'écoulement simulé du ième mois

$Q_{m,obs}$ l'écoulement moyen de toute la période de calage.

NSE tend vers 1 lorsque les débits simulés tendent vers les débits observés. Une période d'initialisation de deux ans est employée au début de la période de calage.

Les paramètres ont été optimisés en utilisant une combinaison de deux méthodes :

- La méthode de Rosenbrock réputée pour son efficacité au début de la recherche de la solution optimum. Elle fournit un premier jeu de paramètres initiaux.
- La méthode du Simplex ou Nelder & Mead pour affiner la recherche déjà faite par la méthode Rosenbrock.

Nous avons rencontré quelques problèmes lors du calage des paramètres avec la version de Mouelhi. Certains de ces problèmes semblent être dus à la plage de définition du paramètre X1 de Mouelhi : X1 doit être positif sans être borné

IV.4.3 METHODOLOGIE D'ANALYSE DES RESULTATS

IV.4.3.1 Analyse des performances

Les performances de calage seront comparées entre elles selon les périodes, les versions et les statistiques de la pluviométrie et des écoulements des différents bassins. Les statistiques utilisées sont entre autres la moyenne annuelle, l'écart-type annuel et le coefficient de variation interannuel des différentes périodes. Nous essayerons d'établir un lien potentiel entre ces éléments et la performance de calage.

Les performances de validation seront analysées afin de déterminer la période la plus appropriée pour le calage lorsque l'on veut faire un transfert de paramètres dans le temps. Pour ce faire, les baisses de performance en validation seront comparées deux à deux :

- les performances de validation de la période avant 70 sur la période 70-80 et celles de la période 70-80 sur la période avant 70 sont comparées entre elles,
- les performances de la période 70-80 sur la période après 80 et de la période après 80 sur la période 70-80 seront comparées entre elles,

- les performances de la période avant 70 sur la période après 80 et la période après 80 sur la période avant 70 seront aussi comparées entre elles.

Ces variations de performances seront aussi analysées en fonction des variations de pluviométrie et des écoulements entre les périodes de calage et de validation. Des différences relatives concernant les moyennes annuelles, les écart-types et les coefficients de variation interannuels seront calculés (par exemple 20% de précipitations en moins de la période X à la période Y pour le bassin Z) (Coron et al. 2012).

IV.4.3.2 Analyse de la sensibilité des paramètres

L'étude de la sensibilité d'un modèle en termes de performance vis-à-vis de ses paramètres permet d'aborder la notion d'identifiabilité des paramètres. *Plus le modèle est sensible à un paramètre, plus le paramètre est identifiable.* Pour cette étude, une simulation de Monte Carlo a été réalisée avec 1000 passages : chaque passage est effectué avec des valeurs de paramètres générés aléatoirement. Pour chaque période, chaque ensemble de paramètres a été utilisé pour simuler l'écoulement. 10% de meilleures simulations en termes de Nash ont été retenues. Les paramètres retenus ont ensuite été classés en dix (10) classes d'étendue égale selon leur gamme respective. Pour chaque paramètre, une distribution de fréquence cumulée de la distribution est calculée à partir des jeux de paramètres de comportement filtrés et le graphique des fréquences cumulées tracé. Un paramètre non identifiable a une distribution de densité uniforme (Wagener, 2004). La courbe de densité cumulée aura donc une pente proche de 1/1 pour un paramètre non identifiable et la pente sera éloignée de 1/1 pour un paramètre identifiable. La figure 4 représente des courbes de performances en fonction de valeurs de paramètres, le premier étant un paramètre identifiable et le second, un paramètre non identifiable.

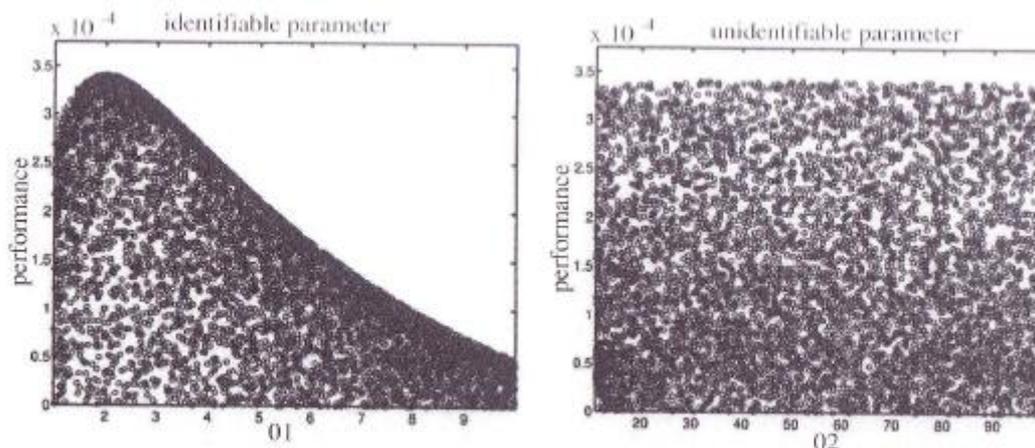


Figure 5 : Représentation de paramètres identifiable et non identifiable

V. RESULTATS ET ANALYSES

V.1 ANALYSE DES VARIABLES HYDROCLIMATIQUES

L'ETP n'a pas été pris en compte dans cette analyse car des recherches sur certaines versions du GR montrent que celle-ci n'aurait pas beaucoup d'influence sur les sorties (Paturel et al. 2006).

La figure 5a montre les pluies moyennes des bassins étudiés sur les différentes périodes d'étude. Nous constatons que les pluies moyennes de la période avant 1970 sont supérieures à celles de 1970-1980 ; elles aussi à leur tour, supérieures à celles d'après 1980. Cela confirme une baisse de la pluie autour des années 70 qui se poursuit au-delà des années 80 (Paturel et al (1994) ; Mahé et al (1996)).

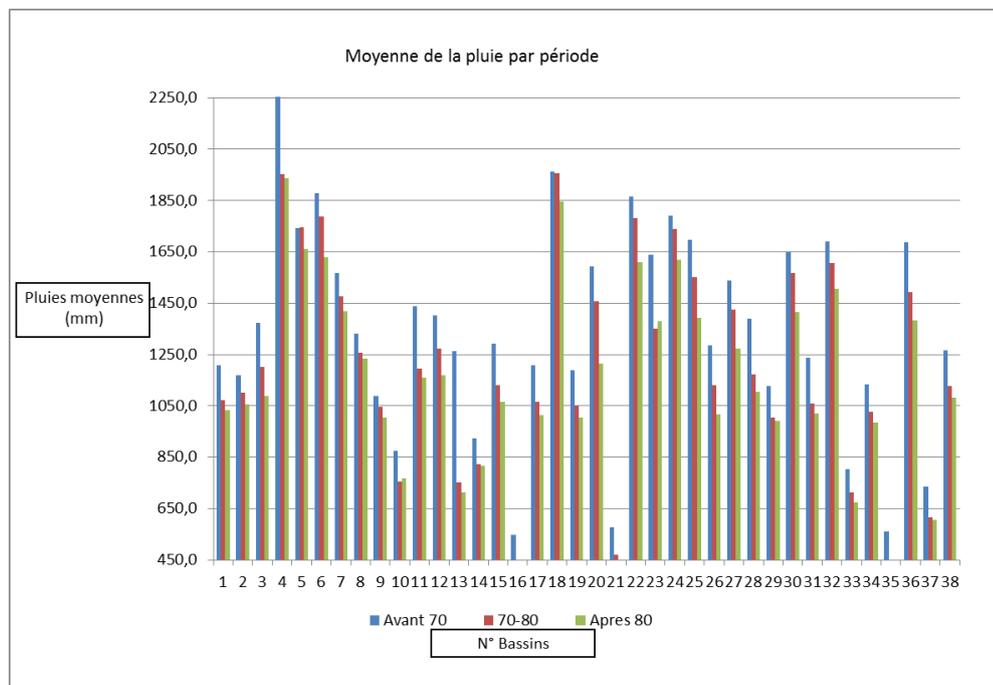


Figure 6a : Représentation des pluies moyennes (mm) par période et par bassin

Les figures 5b et 5c présentent les écart-types et les coefficients de variation interannuels des pluies annuelles. Elles montrent un écart-type et un CV de la période 70-80 plus faible que ceux des autres périodes. Cela peut s'expliquer par la longueur de la période 70-80 qui est la plus courte et qui implique que les pluies annuelles ne sont pas trop dispersées au cours de cette période. Pour la période après 80, nous observons les écart-types et les coefficients de variation interannuels les plus élevés. Cette période se caractérise effectivement par la présence de nombreux extrêmes, des années très pluvieuses et des années très sèches.

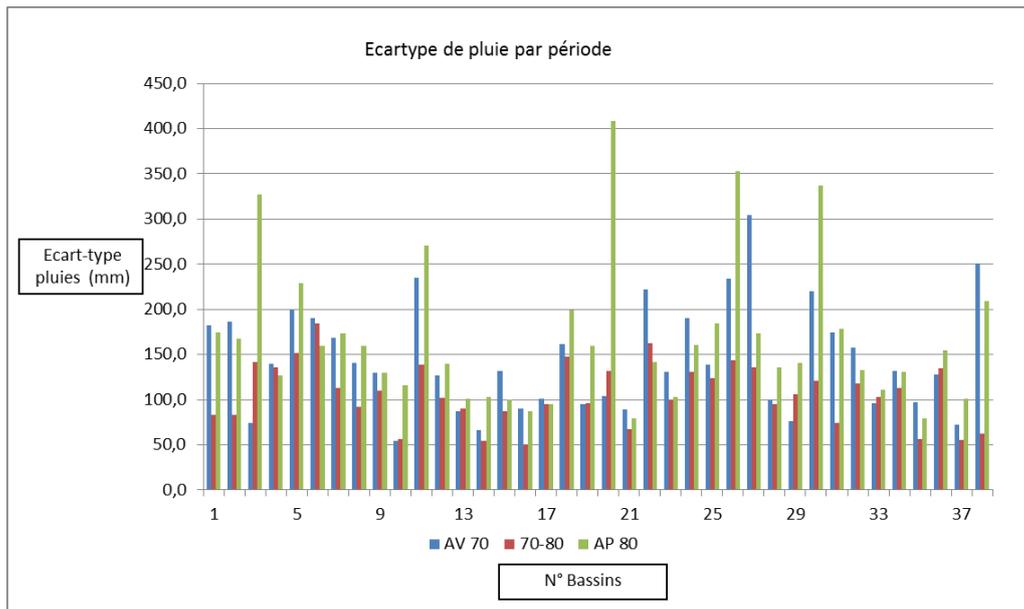


Figure 5b : Représentation des écart-types des pluies (mm) par période et par bassin

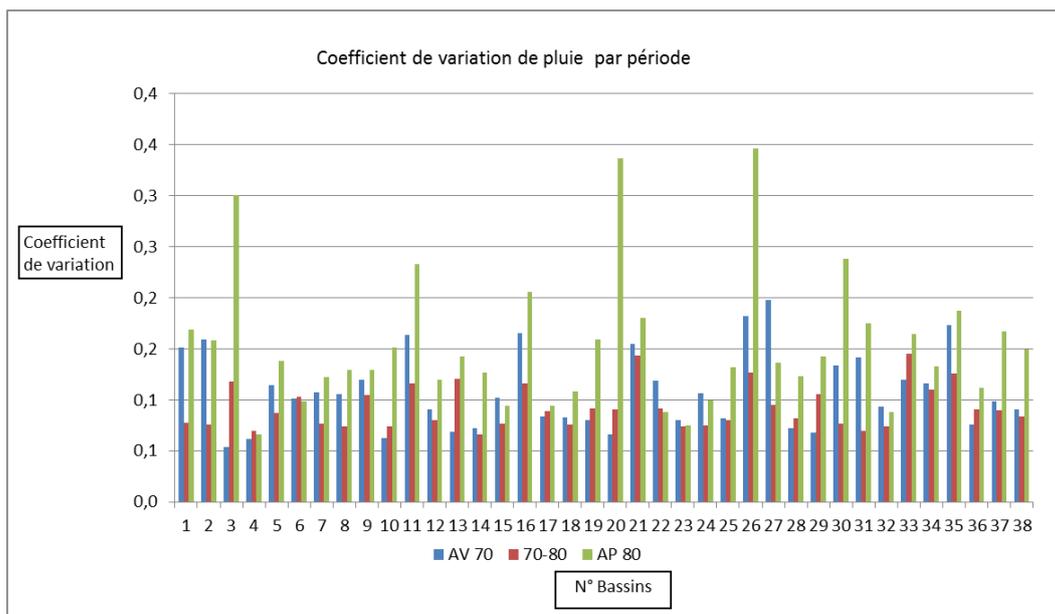


Figure 5c : Représentation des coefficients de variation de pluies par période et par bassin

Les figures 6a, 6b et 6c présentent les écoulements moyens, les écart-types et les coefficients de variation des écoulements de nos bassins par période. Les moyennes annuelles des écoulements observés montrent aussi une baisse des écoulements autour de 1970 et de 1980. Cette baisse coïncide avec la baisse de la pluie autour de ces 2 dates. A noter que la diminution des écoulements est amplifiée par rapport à la diminution des pluies. Concernant les écart-types et les coefficients de variation sur les périodes avant 1970, 1970-1980 et après 1980, nous faisons les mêmes observations que celles des pluies : des écart-types et coefficients de variation faibles sur 1970-1980 et élevés sur après 1980.

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

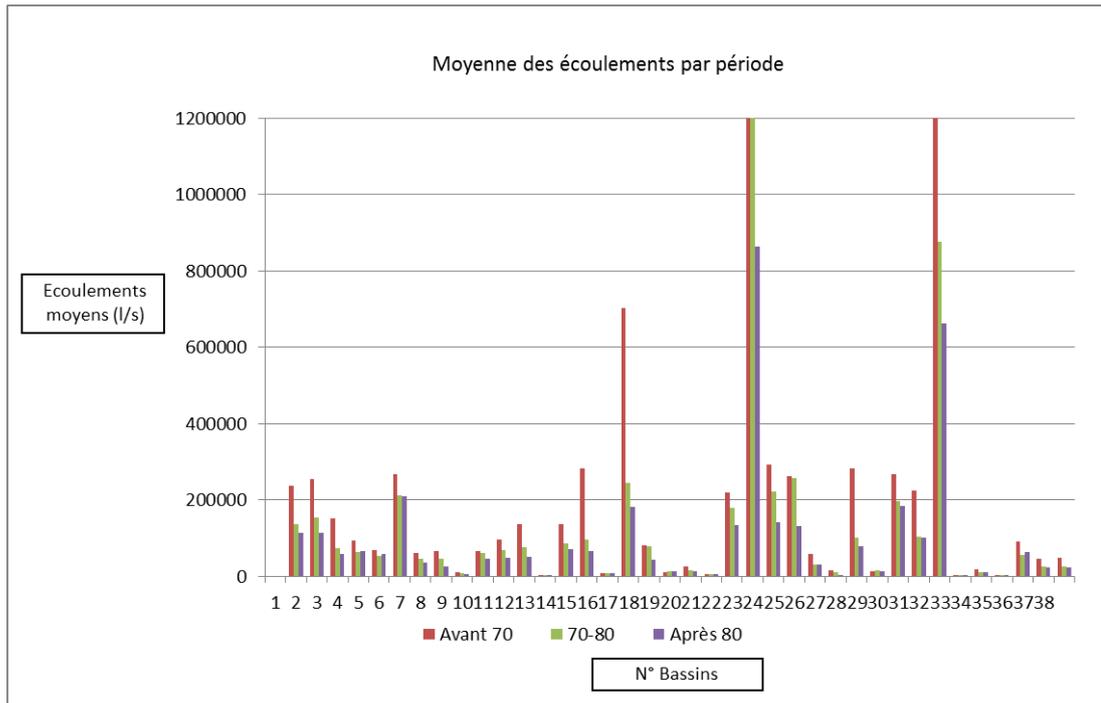


Figure 7a : Représentation des écoulements moyens (l/s) par période et par bassin

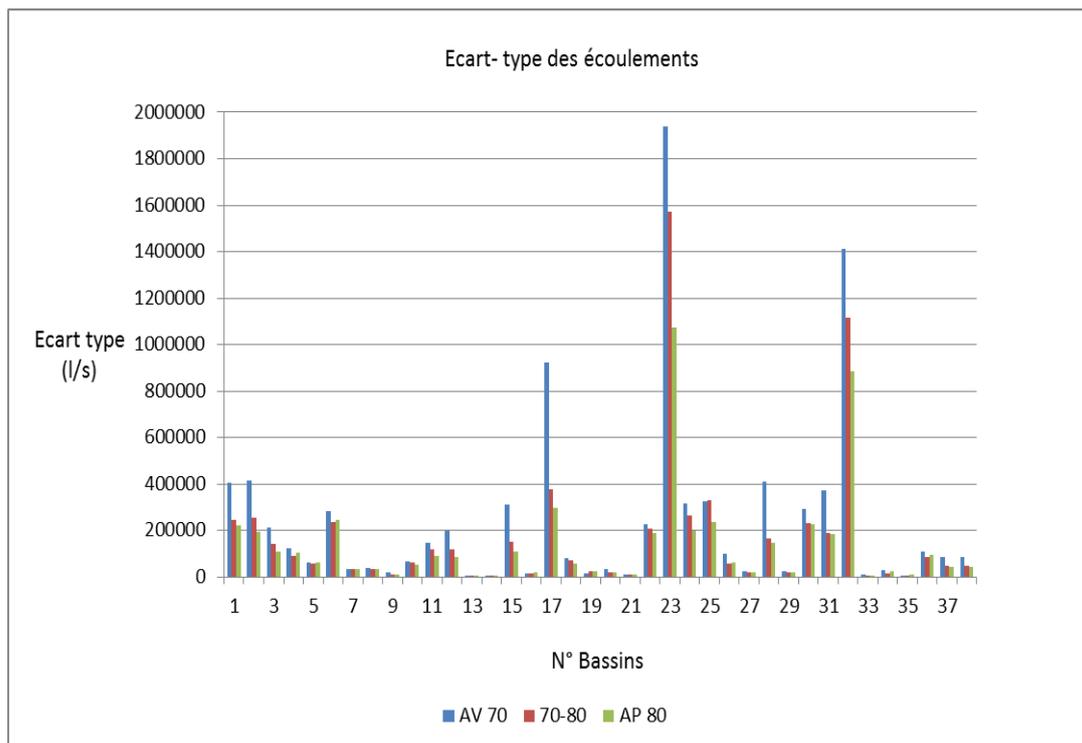


Figure 6b : Représentation des écart-types écoulements (l/s) par période et par bassin

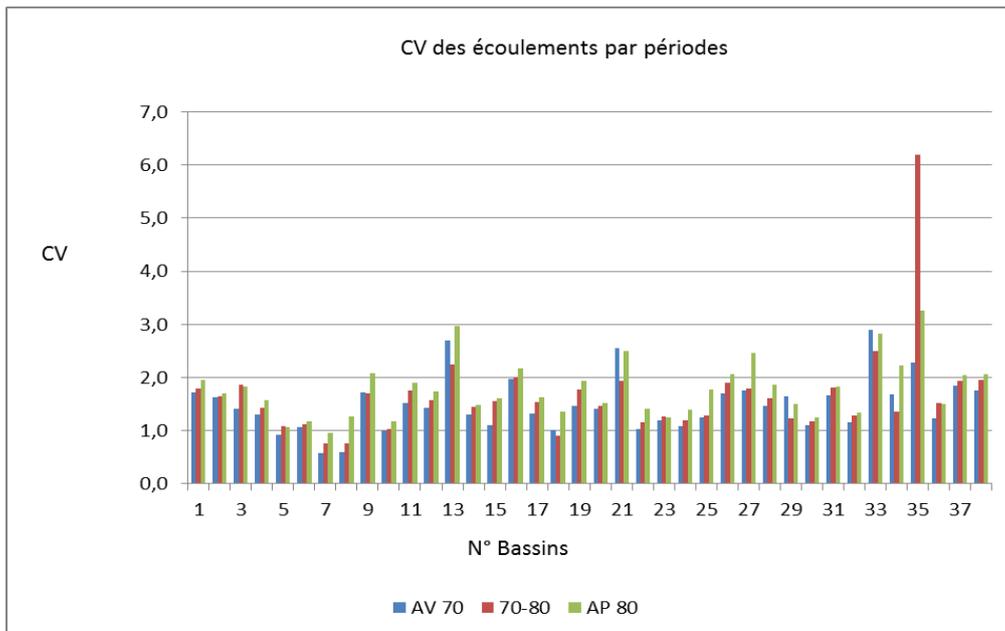


Figure 6c : Représentation des coefficients de variation des écoulements par période et par bassin

V.2 ANALYSE DES PERFORMANCES DE CALAGE

V.2.1 ENTRE PERIODES

Le tableau 2 présente les statistiques des performances des modèles GR2M pour les versions de Mouelhi (GR2M-Mo), de Makhoulf 2 Paramètres (GR2M-MK2) et de Makhoulf 3 Paramètres (GR2M-MK3).

Nous avons procédé à un comptage des meilleures performances de calage entre les périodes, pour les différentes versions de GR2M. Pour GR2M-MK2 et GR2M-MK3, les modèles se caleraient mieux sur avant 1970 et 1970-1980 ; pour GR2M-Mo, c'est sur la période 1970-1980. En considérant uniquement les performances moyennes et médianes des calages, c'est sur la période 1970-1980 que les modèles se caleraient le mieux. Cela peut paraître normal puisque cette période est plus courte que les autres et que la dispersion est la plus faible (écart-type et CV sont les plus faibles des 3 périodes). De même, au moins 90% des bassins étudiés ont une efficacité en calage supérieure à 50 sur la période 1970-1980 ; ce qui n'est pas le cas pour les autres périodes.

Tableau 2 : Récapitulatif des efficacités en calage pour les trois versions de GR2M

	GR2M-MK2			GR2M-MK3			GR2M-Mo		
	Avant 1970	1970-1980	Après 1980	Avant 1970	1970-1980	Après 1980	Avant 1970	1970-1980	Après 1980
Dénombrement	18	16	4	18	16	4	12	20	6
Moyenne	69.20	74.86	65.10	70.57	76.63	66.38	67.35	74.65	65.10
Ecart-type	25.77	18.51	16.86	26.13	18.16	17.54	27.43	17.48	16.80
CV	0.37	0.25	0.26	0.37	0.24	0.26	0.41	0.23	0.26
Min	-12.88	18.93	8.41	-6.28	23.85	7.00	-17.46	15.23	7.93
Max	96.50	92.07	89.10	97.12	94.70	92.54	91.82	92.51	89.07
10 ^{ème} centile	35.54	52.12	42.41	34.44	50.09	41.86	30.72	55.22	46.55
90 ^{ème} centile	89.29	89.34	82.86	91.49	90.80	84.93	88.61	87.88	82.92
Médiane	80.54	82.89	69.83	81.97	85.10	71.12	79.37	80.58	68.56

Entre les périodes avant 1970 et après 1980, les calages sont meilleurs sur la première période, la période la plus humide.

NB : Les trois versions de GR2M ne se calent pas bien sur la période avant 70 sur les bassins de Boali ICOT et de Bologo (Nash-Sutcliffe négatif) et de Boromo (Nash-Sutcliffe voisin de 20). Cela peut être dû à une mauvaise qualité des données (présence importante de lacunes – cas de Bologo et de Boromo) ou au régime hydro-climatique des bassins : des études antérieures ont montré que les modèles GR2M-MK2 et GR2M-MK3 se calent mal sur les bassins ayant deux saisons de pluies (cas de Boali ICOT). Sur les périodes qui suivent, les calages sont de meilleure qualité pour ces 3 bassins.

V.2.2 ENTRE MODELES

De la même manière que plus haut, nous avons procédé à un comptage des meilleures performances de calage entre les versions de GR2M par bassins au sein de chaque période. GR2M-MK3 semble être la plus performante. De même, en considérant les performances moyennes et les quantiles, cette version est la plus performante. Cela peut s’expliquer peut-être par le plus grand nombre de paramètres à caler.

De même, GR2M-MO serait plus performante que GR2M-MK2.

Tableau 3 : Performances de calage par versions

	Makhlouf 2 Paramètres			Makhlouf 3 Paramètres			Mouelhi		
	Avant 1970	1970-1980	Après 1980	Avant 1970	1970-1980	Après 1980	Avant 1970	1970-1980	Après 1980
Dénombrement	5	4	5	30	23	21	3	11	12

V.2.3 ENTRE BASSINS

Les performances en calage entre les différents bassins ont été analysées en fonction de la moyenne des pluies, de l'écart-type et du coefficient de variation des pluies et des écoulements (ne figurant pas ici), de la taille des bassins et du taux de lacune (ne figurant pas ici).

Les figures 7a, 7b et 7c montrent les performances de calage en fonction de la pluie moyenne annuelle.

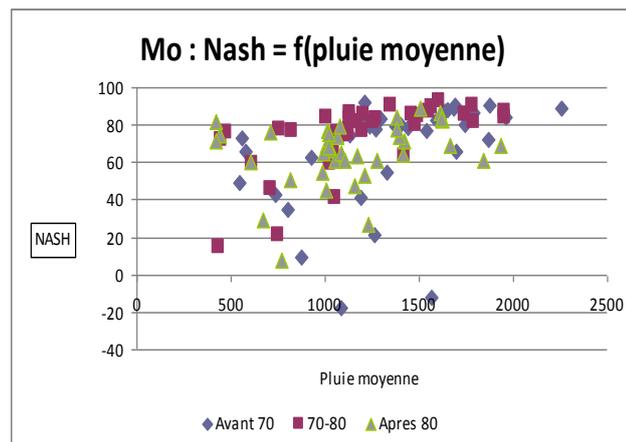


Figure 7a : Représentation de la performance de calage en fonction de la pluie moyenne (Version de Mouelhi)

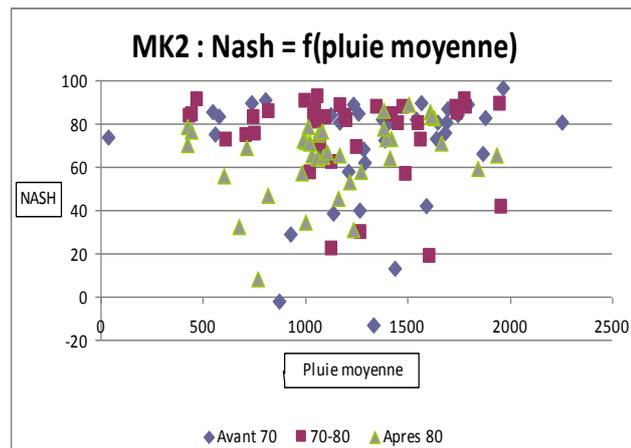


Figure 7b : Représentation de la performance de calage en fonction de la pluie moyenne (Version de Makhoulf 2 Paramètres)

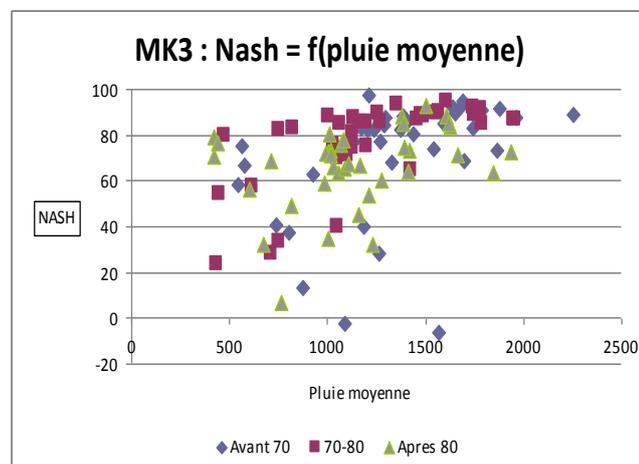


Figure 7c : Représentation de la performance de calage en fonction de la pluie moyenne (Version de Makhoulf 3 Paramètres)

Pour GR2M-MK3 et GR2M-Mo, le faisceau de points semble se restreindre avec l'augmentation des valeurs de la pluie moyenne par bassin : il y a moins de dispersion des valeurs de Nash-Sutcliffe au fur et à mesure que la pluie moyenne des bassins augmente. Cela est moins évident pour GR2M-MK2. Pour GR2M-Mo et GR2M-MK3, il semble que plus la pluviométrie annuelle du bassin est élevée, plus le Nash-Sutcliffe est élevé.

Ces résultats peuvent être dus à notre échantillonnage de bassins qui comporte plus de bassins de taille petite à moyenne qu'élevée. Les figures 7d à 7l montrent la répartition géographique des performances de calage de la période avant 1970 (Pour les autres figures représentant les performances de calage des autres périodes, confère annexes). Sur ces cartes, nous faisons le même constat que ci-dessus. Les bassins situés dans les zones humides (équatoriale et tropicale humide) semblent avoir des performances de calage élevée. La performance en calage pourrait être liée à la pluviométrie du bassin.

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l’Afrique de l’Ouest et Centrale

Performance de calage des têtes de bassins: Période Avant 70 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

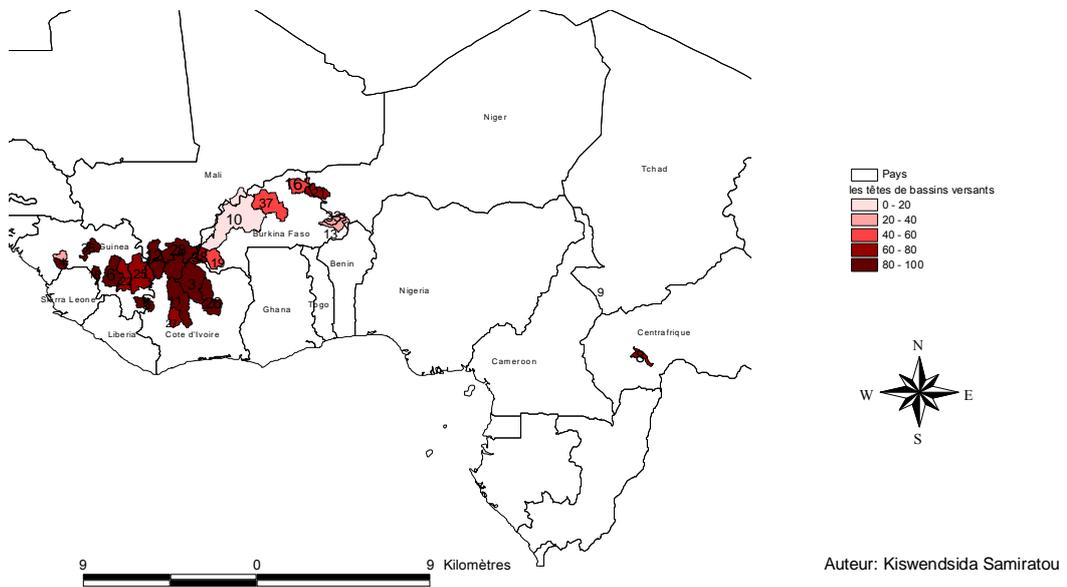


Figure 8d: Performance de calage des têtes de bassins versants pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

Performance de calage des bassins intermédiaires de niveau 1: Période Avant 70 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

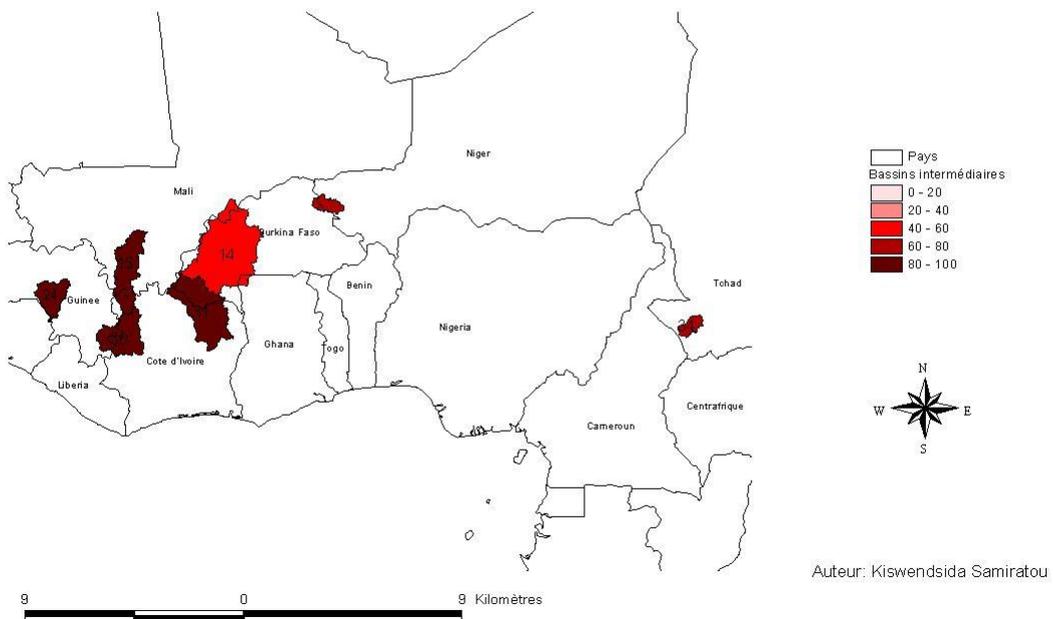


Figure 7^e : Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 1 pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l’Afrique de l’Ouest et Centrale

Performance de calage des bassins intermédiaires niveau 2: Période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

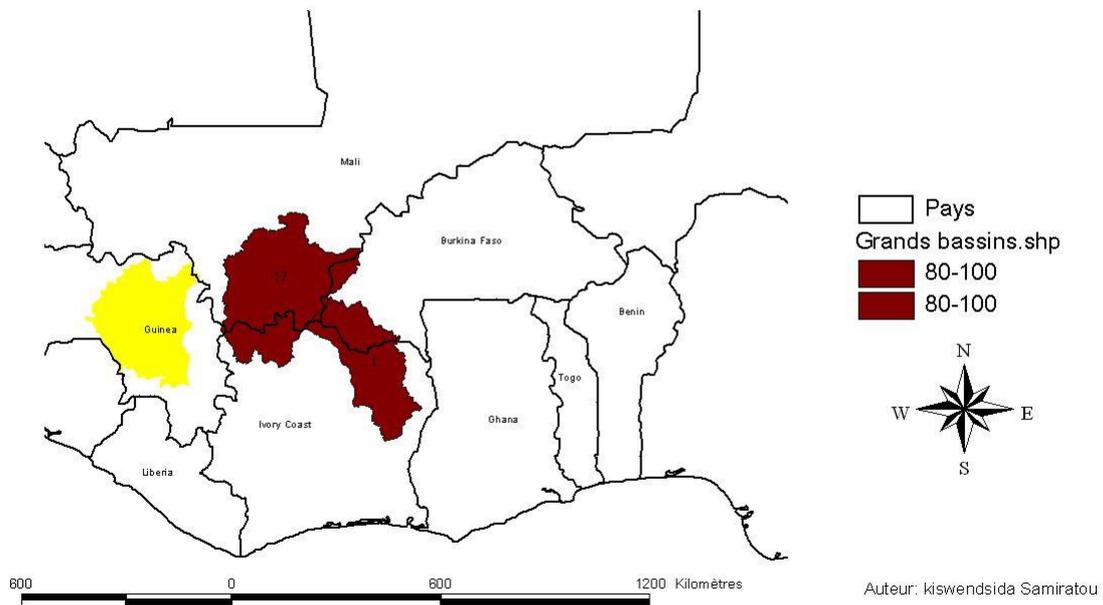


Figure 7f : Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 2 pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

Performance de calage des grands bassins : Période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

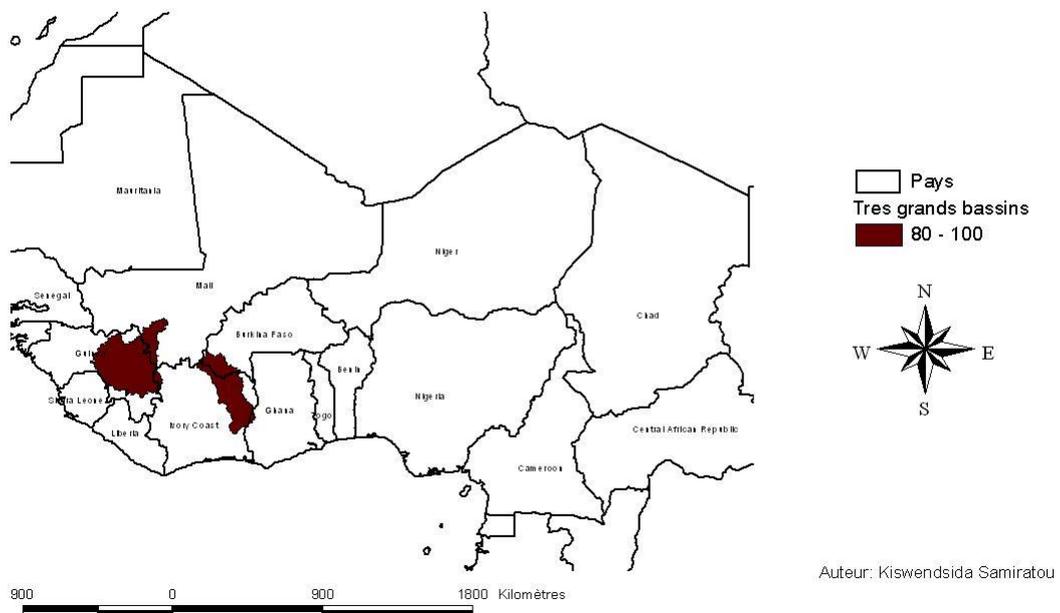
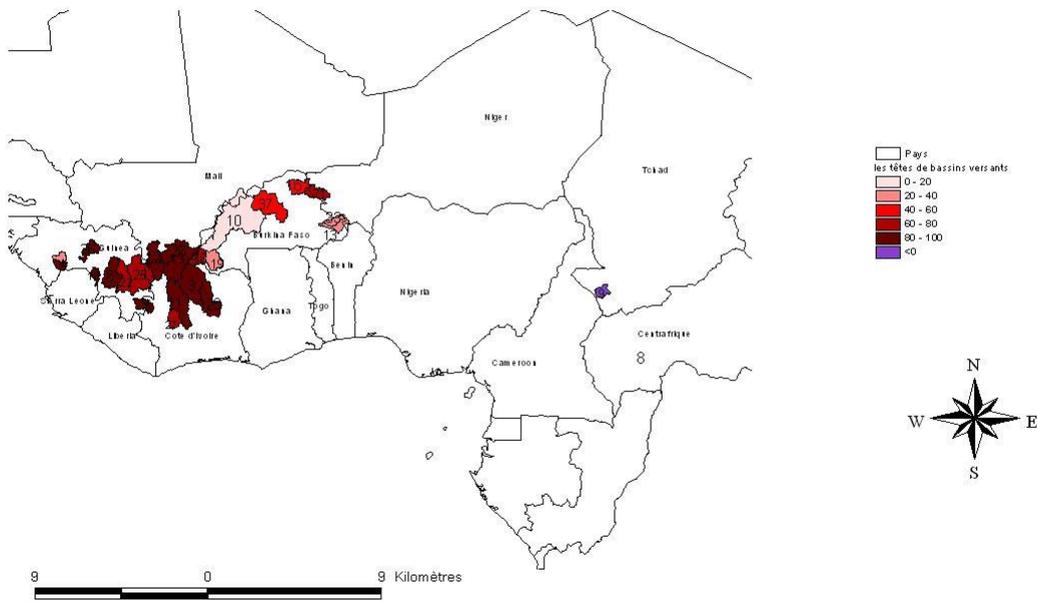


Figure 7h : Performance de calage des bassins versants principaux pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l’Afrique de l’Ouest et Centrale

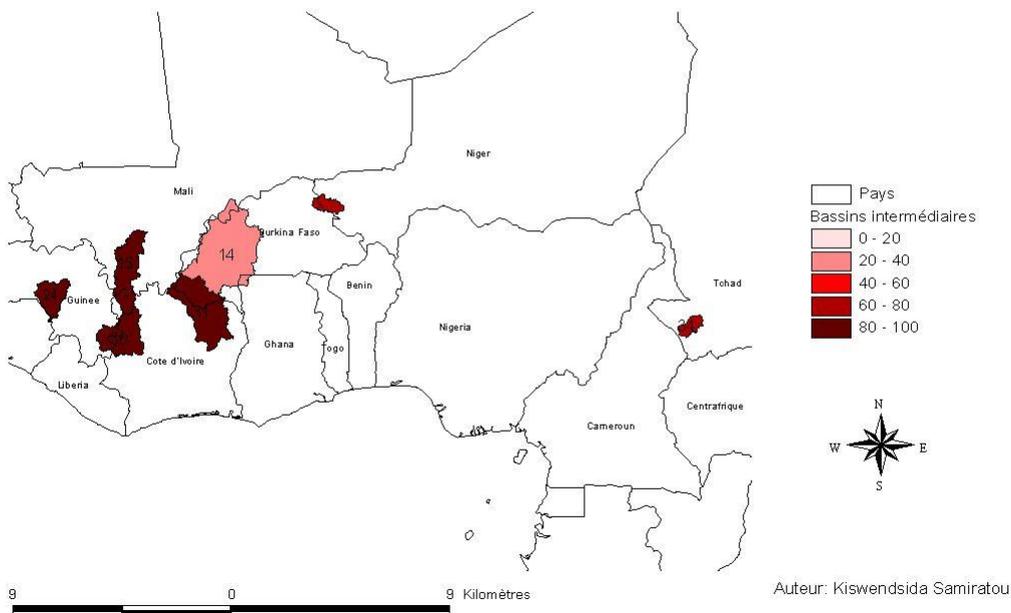
Performance de calage des têtes de bassins : Période Avant 70 (Version Makhlouf 3 Paramètres)



Auteur: Kiswendsida Samiratou

Figure 7i : Performance de calage des têtes de bassins versants pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

Performance de calage des bassins intermédiaires de niveau 1: Période avant 70 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)



Auteur: Kiswendsida Samiratou

Figure 7j : Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 1 pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l’Afrique de l’Ouest et Centrale

Performance de calage des bassins intermédiaires de niveau 2: Période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

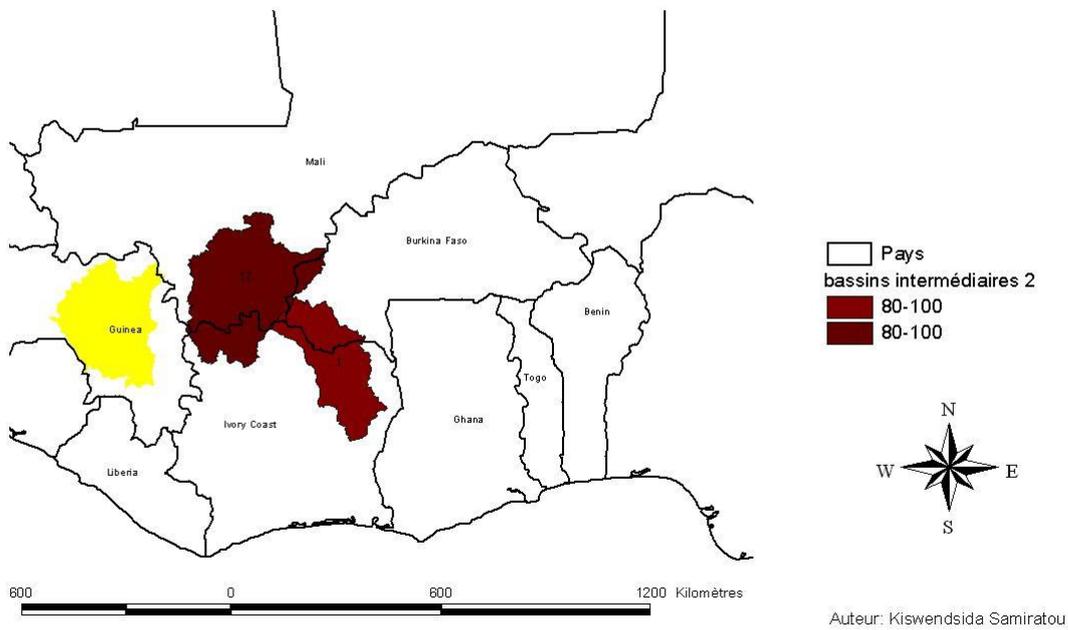


Figure 7k : Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 2 pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

Performance de calage des grands bassins : Période avant 70 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

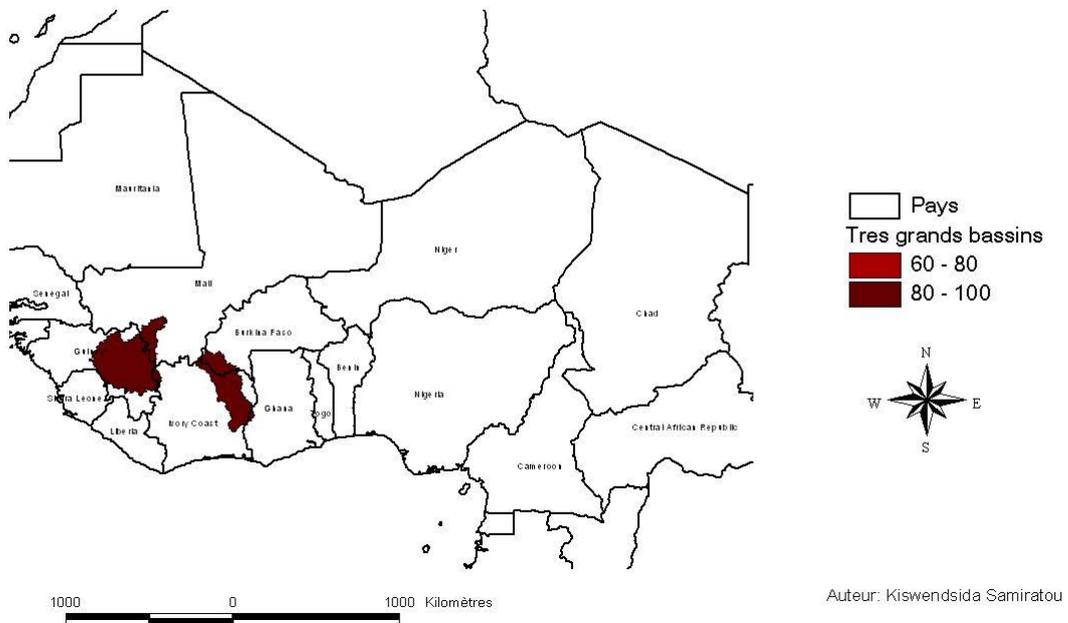


Figure 7L : Performance de calage des bassins versants principaux pour la période avant 1970 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l’Afrique de l’Ouest et Centrale

Performance de calage des têtes de bassins: Période Avant 70 (Version de Mouelhi)

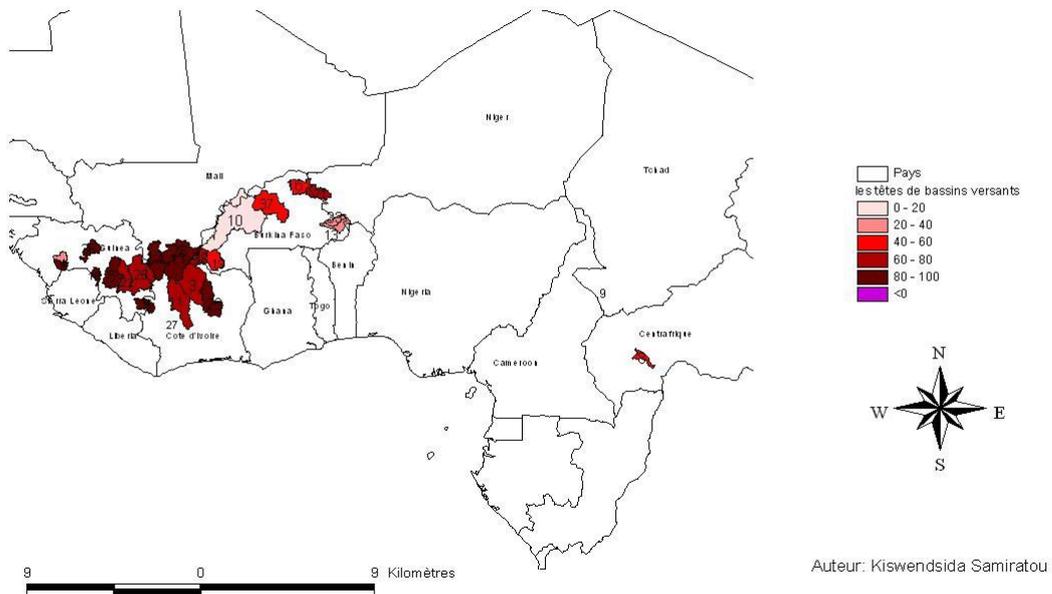


Figure 7m : Performance de calage des têtes de bassins versants pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi)

Performance de calage des bassins intermédiaires de niveau 1: Période Avant 70 (Version de Mouelhi)

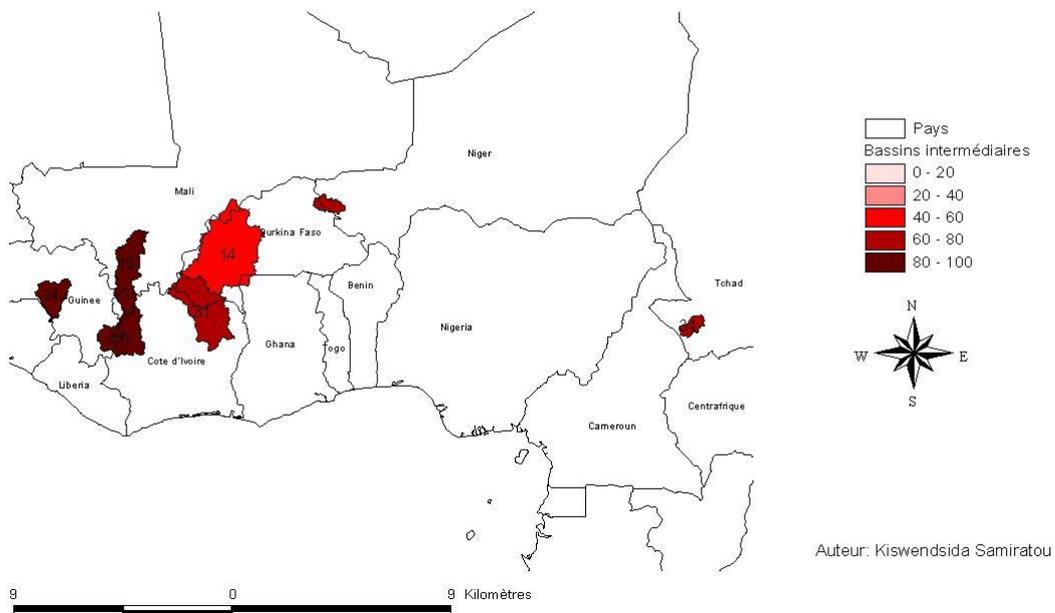


Figure 7n : Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 1 pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi)

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l’Afrique de l’Ouest et Centrale

Performance de calage des bassins intermédiaires niveau 2: Période avant 1970 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

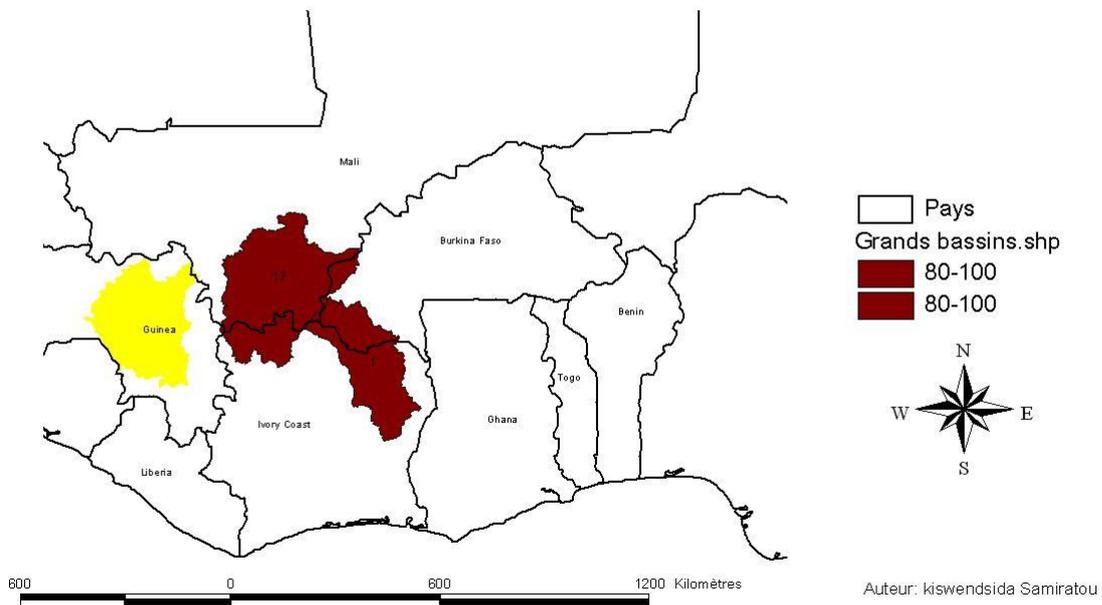


Figure 7o : Performance de calage des bassins versants intermédiaires de niveau 2 pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi)

Performance de calage des grands bassins: Période avant 1970 (Version de mouelhi)

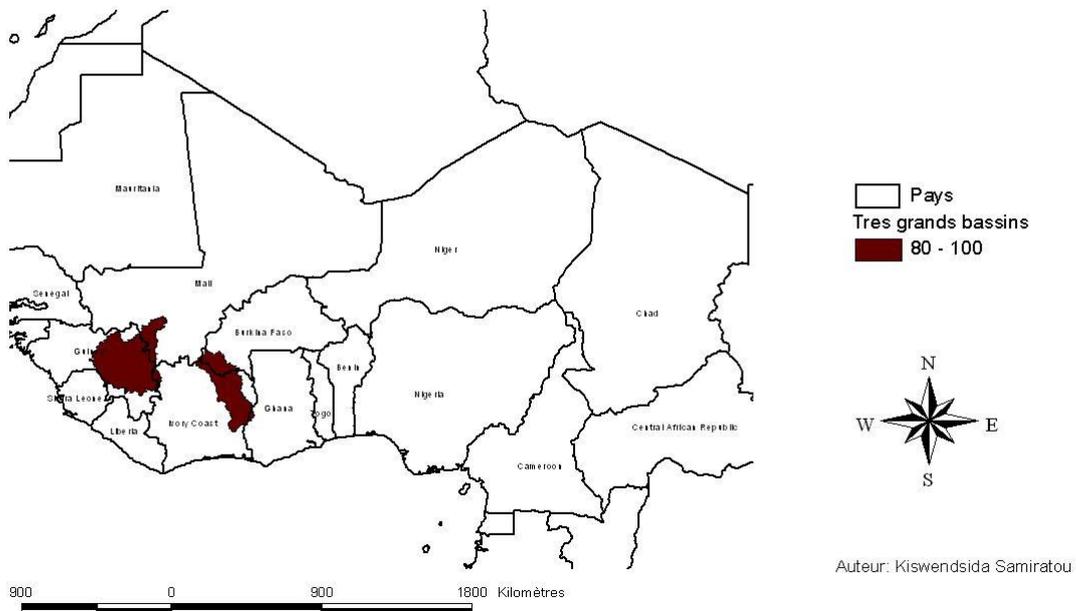


Figure 7p : Performance de calage des bassins versants principaux pour la période avant 1970 (Version de Mouelhi)

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Nous trouvons les mêmes résultats que ceux des pluies moyennes lorsque nous analysons les écoulements moyens. Les écart-types et les coefficients de variation des pluies et des écoulements analysés, les trois versions du GR étudiées semblent mieux se caler sur des bassins ayant des variables hydro climatiques (pluies et écoulements) moins dispersées dans le temps.

Les figures 8a, 8b et 8c présentent les performances en calage des 3 versions de GR2M en fonction de la superficie du bassin versant. Le faisceau de points semble se restreindre avec l'augmentation des valeurs de la superficie des bassins : il y a moins de dispersion des valeurs de Nash-Sutcliffe au fur et à mesure que la superficie des bassins augmente. Les modèles étudiés se caleraient mieux sur les grands bassins versants.

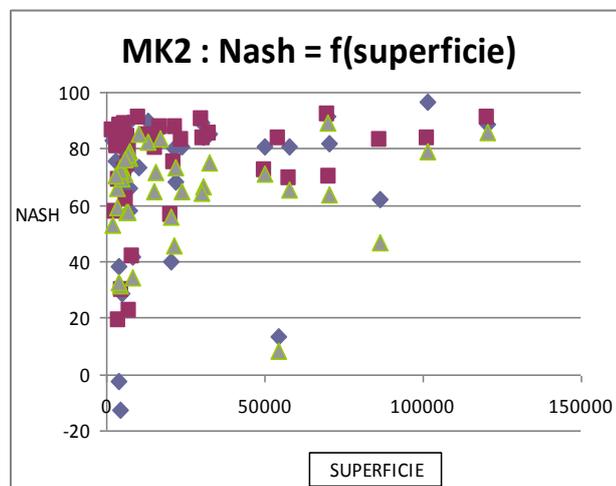


Figure 8a : Représentation de la performance de calage en fonction de la superficie (Version de Makhoulouf 2 Paramètres)

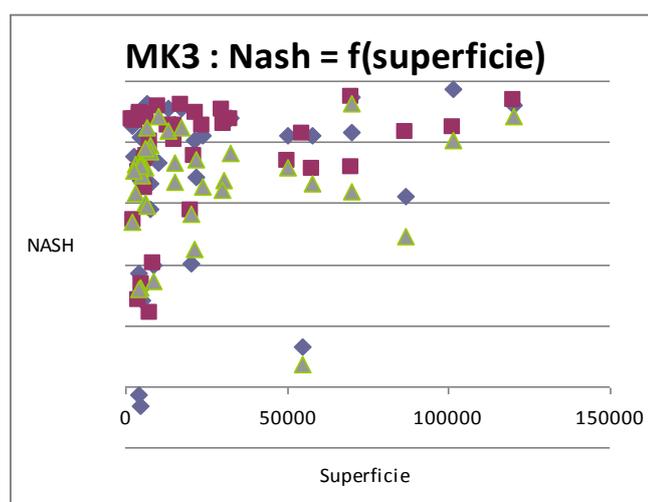


Figure 8b : Représentation de la performance de calage en fonction de la superficie (Version de Makhoulouf 3 Paramètres)

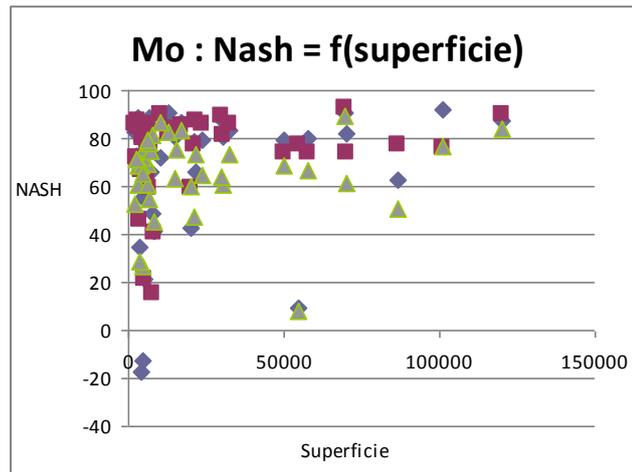


Figure 8c : Représentation de la performance de calage en fonction de la superficie (Version de Mouelhi)

Les performances de calage semblent être en fonction des variables hydro climatiques (Pluviométrie, Coefficients de ruissellement et écoulements) et de leur répartition dans le temps.

V.3 ANALYSE DES PERFORMANCES EN VALIDATION

Dans cette partie, nous avons raisonné en termes de différences relatives.

V.3.1 ENTRE PERIODES

Les performances en validation des 3 versions de GR2M sont analysées selon le principe du DSST :

- Paramètres calés avant 1970 appliqués sur 1970-1980 et sur après 1980 : respectivement *calavt70-val70-80* et *calavt70-valap80*
- Paramètres calés sur 1970-1980 appliqués sur avant 1970 et sur après 1980 : respectivement *cal7080-valavt70* et *calt70-80-valap80*
- Paramètres calés après 1980 appliqués sur avant 1970 et sur 1970-1980: respectivement *calap80-valavt70* et *calap80-val70-80*

Le tableau 4a est un récapitulatif des statistiques des baisses de performances entre calage et validation de *calavt70-val70-80* et *cal7080-valavt70*. Les baisses de performances comparées, celles de *cal70-80-valavt70* semblent moindres par rapport à celles de *calavt70-val70-80*. La validation *cal70-80-valavt70* aurait de meilleures performances que la validation *calavt70-val70-80*.

Tableau 4a : Comparaison de calavt70-val70-80 et cal7080-valavt70

Quantile	GR2M-MK2		GR2M-MK3		GR2M-Mo	
	calavt70-val70-80	cal7080-valavt70	calavt70-val70-80	cal7080-valavt70	calavt70-val70-80	cal7080-valavt70
25 ^e centile	-32.4	-26.0	-29.6	-29.4	-46.5	-36.8
Médiane	-12.6	-10.4	-11.9	-9.9	-9.0	-11.8
75 ^e centile	-4.2	0.3	-2.5	1.3	-1.3	0.2
Moyenne	-33.5	-46.7	-35.9	-50.7	-86.0	-65.2

Le tableau 4b présente les statistiques des baisses de performances de validation *calt70-80-valap80* et *calap80-val70-80*. Une comparaison de ces baisses de performance montre que la validation *calap80-val70-80* enregistre une moins importante baisse de performance que celle *calt70-80-valap80*.

Tableau 4b : Comparaison de calt7080-valap80 et calap80-val7080

Quantile	GR2M-MK2		GR2M-MK3		GR2M-Mo	
	calt7080-valap80	calap80-val7080	calt7080-valap80	calap80-val7080	calt7080-valap80	calap80-val7080
25 ^e centile	-31.7	-1.1	-29.1	-1.3	-31.3	-5.5
Médiane	-18.3	5.0	-15.4	4.6	-18.4	3.6
75 ^e centile	-7.1	19.4	-5.7	18.3	-6.5	21.8
Moyenne	-22.0	15.1	-20.7	16.1	-19.4	15.0

Le tableau 4c présente les statistiques des pertes de performances des validations *calavt70-valap80* et de *calap80-valavt70*. Nous constatons une meilleure performance lorsque les paramètres sont calés sur après 1980 et validés sur avant 1970 que vice-versa.

Tableau 4c : Comparaison de calavt70-valap80 et de calap80-valavt70

Quantile	GR2M-MK2		GR2M-MK3		GR2M-Mo	
	calavt70-valap80	calap80-valavt70	calavt70-valap80	calap80-valavt70	calavt70-valap80	calap80-valavt70
25 ^e centile	-85.6	-36.9	-79.4	-32.6	-63.8	-100.5
Médiane	-36.5	-8.3	-37.2	-4.6	-31.7	-1.1
75 ^e centile	-16.4	7.4	-15.0	8.0	-12.0	8.9
Moyenne	-56.3	-70.4	-52.5	-70.7	-103.1	-104.2

De nos analyses, il ressort qu'il serait mieux de caler les paramètres sur une période sèche et de les valider sur une période humide pour avoir des résultats de simulations acceptables. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Coron et al. (2012) et Vaze et al. (2011) sur des bassins australiens. Mais ils contredisent ceux de Wilby. (2005) et de Li et al. (2011) sur des bassins anglais et autrichiens qui trouvent qu'il est préférable de transposer les paramètres d'une période humide à une période sèche. Les premiers auteurs relient ce constat au fait que

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale
sur les bassins australiens, l'ETP est limitée par la disponibilité en eau alors que les autres le sont par l'énergie. Pour nos bassins africains, l'ETP est limitée par l'eau disponible.

V.3.2 EN FONCTION DES VARIATIONS DE LA PLUVIOMETRIE

Les figures 9a, 9b et 9c représentent les variations relatives de performances en fonction des variations relatives des pluies moyennes entre les périodes de calage et de validation. Dans les 2 calculs, les valeurs de la période de calage sont au numérateur.

A gauche de l'axe des Y, les pluies de la période de validation sont inférieures aux pluies de la période de calage ; à droite de l'axe des Y, c'est l'inverse.

Sous l'axe des X, les performances de validation sont inférieures aux performances de calage tandis qu'au-dessus de l'axe des X, les performances de calage sont inférieures aux performances de validation.

Généralement, on s'attend à ce que la performance en validation soit toujours inférieure à la performance en calage, ce qui n'est pas le cas ici. Cela peut s'expliquer par le fait que le jeu de données n'étant pas le même sur la période de calage que sur la période de validation, il peut s'avérer que le jeu de données de la période de validation s'ajuste mieux que le jeu de données de la période de calage ou que les concepts du modèle sont en meilleure adéquation avec le bassin sur la période de validation.

Nous ne considérerons ici que la partie centrale de nos faisceaux de points : les points qui correspondent à des valeurs de changement d'efficacité en valeur absolue supérieure à 100% (< à -100% et > 100%) seront exclus car ils traduisent un problème du modèle à se caler correctement sur le bassin sur l'une des périodes ; cela peut être dû à l'algorithme d'optimisation, aux données disponibles ou à la mauvaise adéquation des concepts du modèle à cette période.

Nous constatons de façon générale, qu'une baisse de la pluie moyenne entre la période de calage et la période de validation entraîne une diminution plus importante de la performance alors qu'une augmentation de la pluie moyenne entre la période de calage et la période de validation entraîne une diminution moins importante. Cela corrobore nos conclusions ci-dessus à savoir qu'il est préférable de caler les paramètres sur une période sèche et les utiliser sur une période humide que le contraire.

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

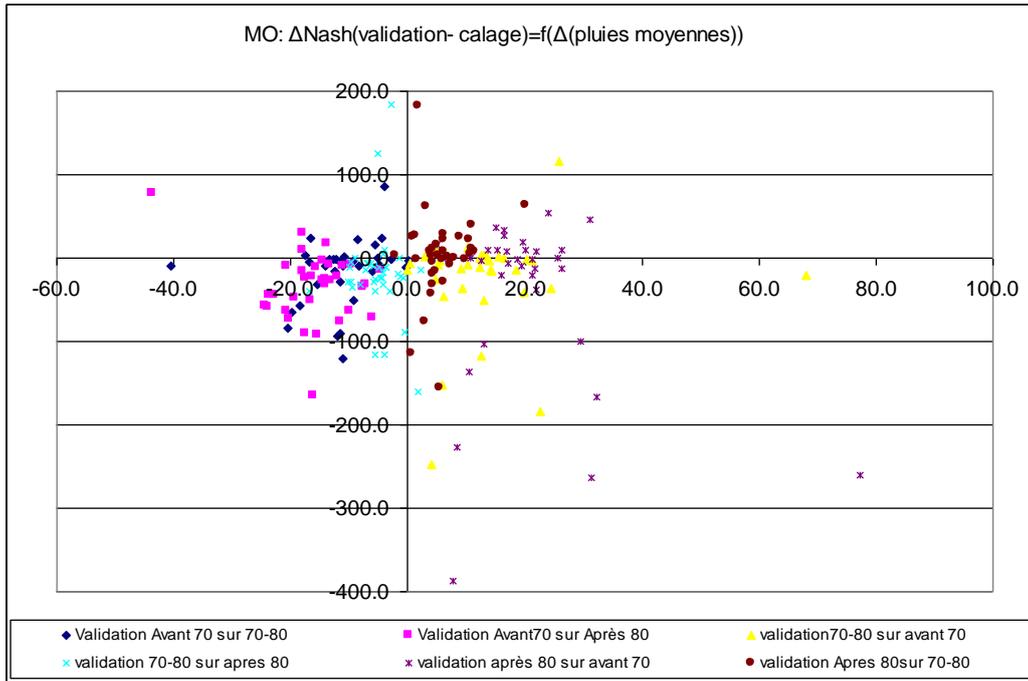


Figure 9a : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives de pluies moyennes annuelles entre périodes de calage et de validation (Version de Mouelhi)

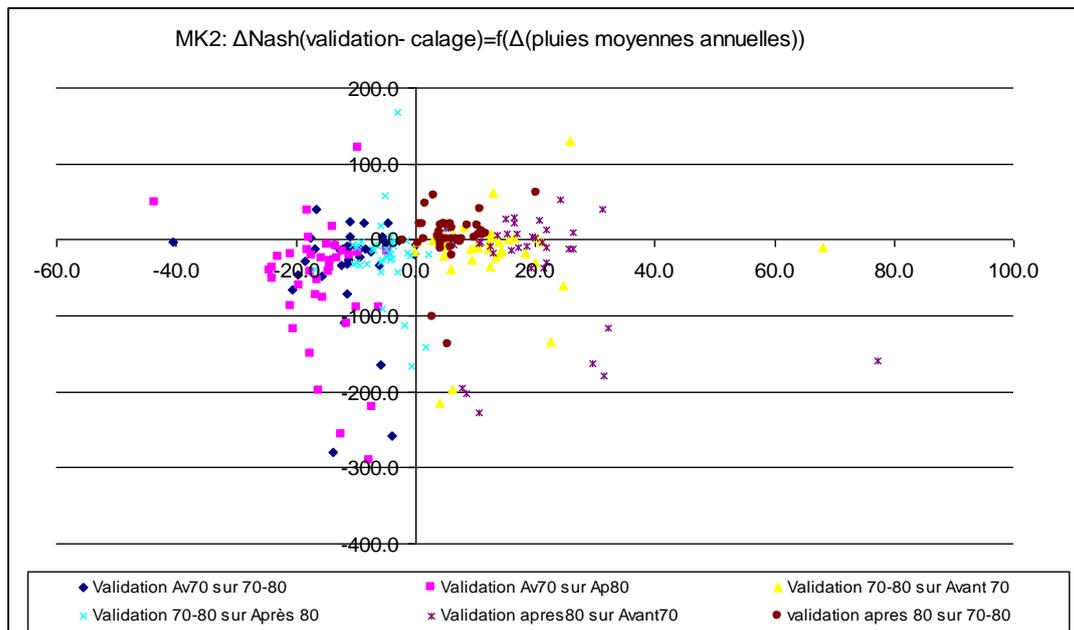


Figure 9b : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives de pluies moyennes annuelles entre périodes de calage et de validation (Version de Makhlouf 2Paramètres)

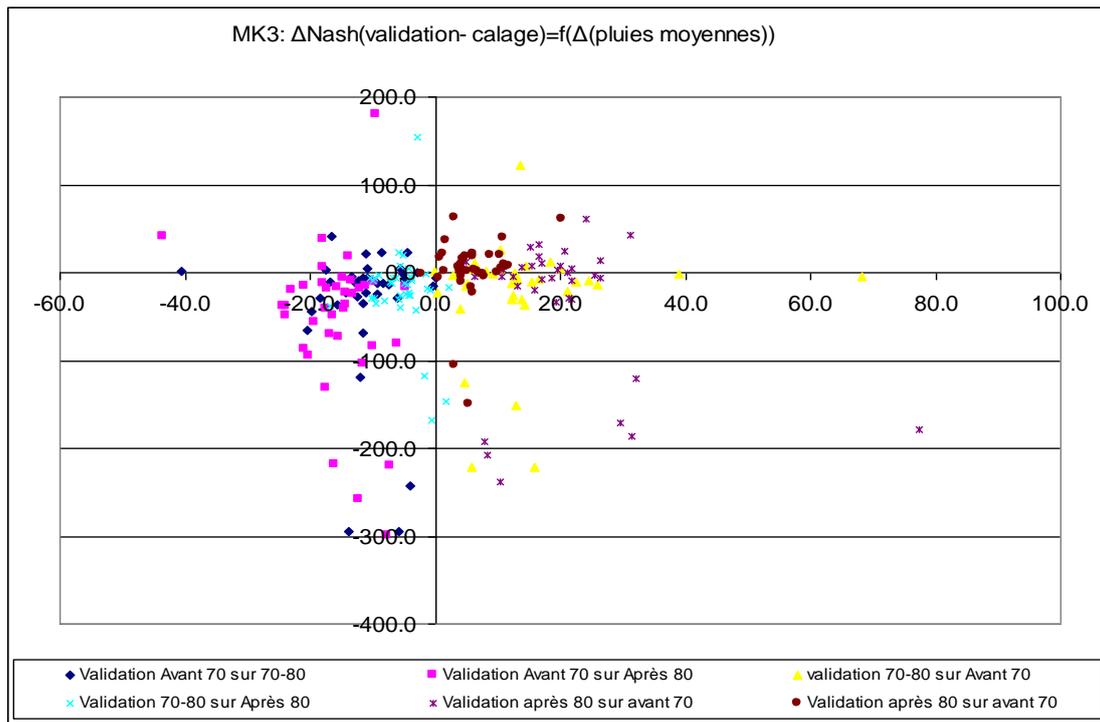


Figure 9c : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives de pluie moyenne annuelle entre périodes de calage et de validation (Version de Makhlof 3 Paramètres)

Les figures 9d, 9e et 9f montrent les baisses de performances en fonction de la variation de l'écart-type de la période de calage à la période de validation.

A gauche de l'axe des Y, l'écart-type de pluies de la période de validation est inférieur à l'écart-type des pluies de la période de calage ; à droite de l'axe des Y, c'est l'inverse.

Sous l'axe des X, les performances de validation sont inférieures aux performances de calage ; au-dessus de l'axe des X, les performances de calage sont inférieures aux performances de validation. Comme précédemment, nous nous intéresserons plus particulièrement aux résultats entre les bandes -100% et +100% de la variation de l'efficacité de Nash-Sutcliffe.

Nous remarquons pour les 3 versions de GR2M que lorsque l'écart-type est plus faible sur la période de validation que sur la période de calage, le jeu de paramètres calés donne de meilleures performances sur la période de validation. Lorsque l'écart-type de la période de calage est inférieur à celui de la période de validation, le jeu de paramètres calés donne de moins bonnes performances.

Une écart-type moindre signifie une plus faible dispersion des pluies. Nos résultats montrent donc qu'il est préférable de caler un modèle sur une période à dispersion importante et de

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

l'utiliser sur une période à dispersion moindre. Cela va dans le même sens que les conclusions de Wilby (2005) à savoir que les paramètres calés sur des périodes de conditions variées (ici pluviométrie) se transposent mieux.

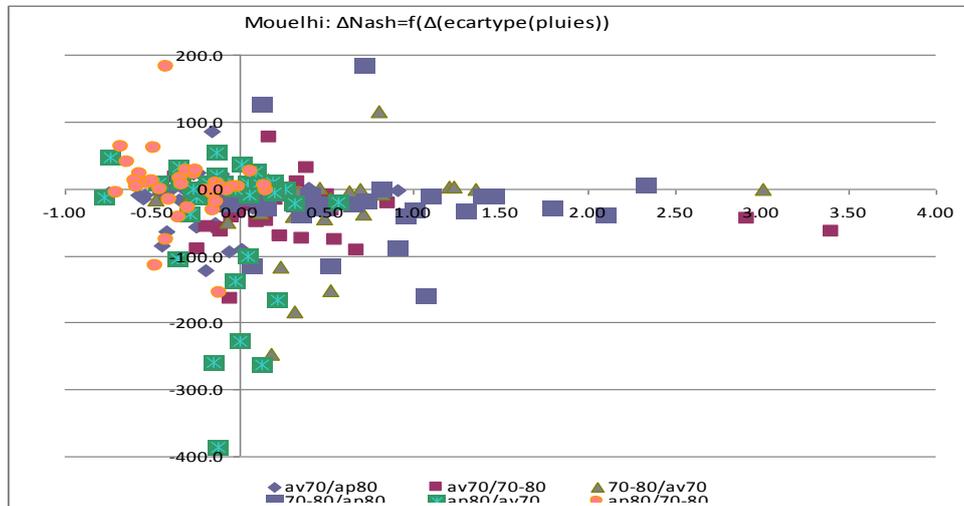


Figure 9d : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives d'écart- type de pluies entre périodes de calage et de validation (Version de Mouelhi)

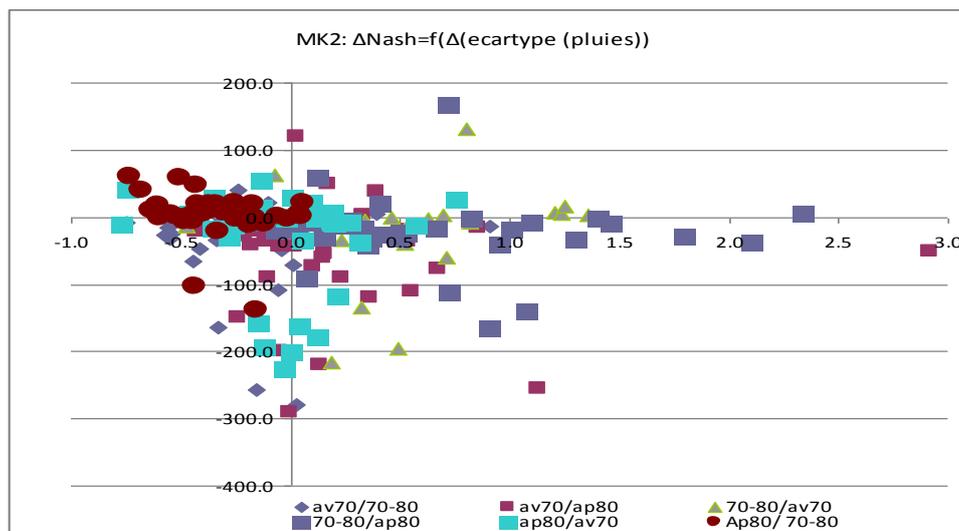


Figure 9e : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives d'écart- type de pluies entre périodes de calage et de validation (Version de Makhoulf 2 Paramètres)

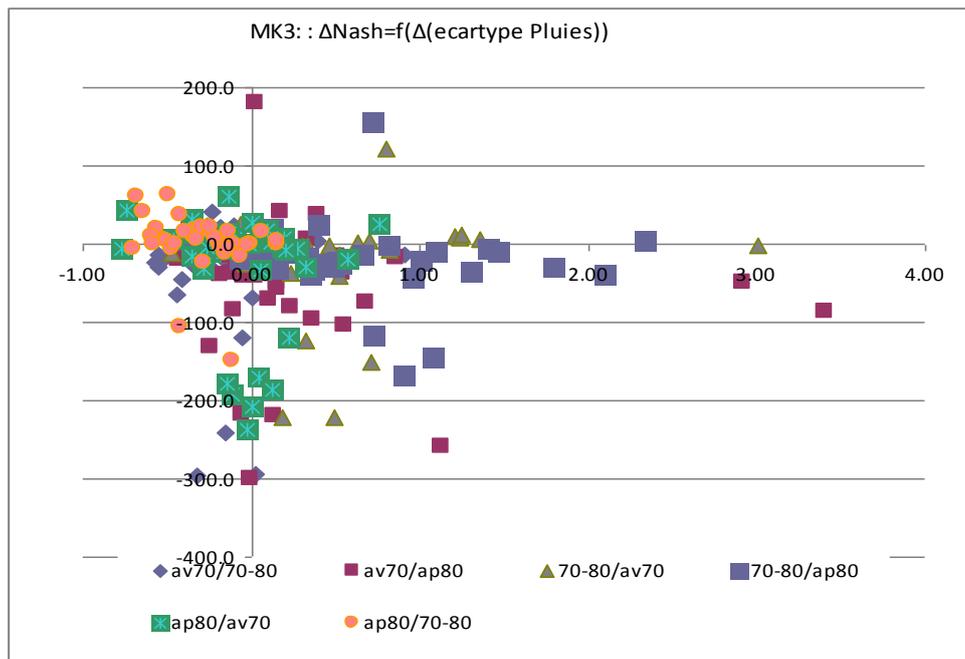


Figure 9f : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives d'écart- type de pluies entre périodes de calage et de validation (Version de Makhoulf 3 Paramètres)

Les mêmes analyses que celles ci-dessus sont faites avec les écoulements, nous trouvons les mêmes résultats que ceux des pluies mais avec des variations plus petites.

Les baisses de performance semblent être liées aux variations des moyennes et à la répartition de la pluviométrie et des écoulements dans le temps entre les périodes de calage et de validation. Mais elles semblent plus liées à la variation de la répartition de la pluviométrie dans le temps entre les périodes de calage et de validation car même si les conclusions des recherches ne semblent pas être les mêmes sur les périodes de calage appropriées, elles s'accordent sur le fait que les paramètres calés sur les périodes ayant des conditions plus variées que les autres périodes étaient les plus transposables.

V.4 ANALYSE DE LA SENSIBILITE DES PARAMETRES

Comme déjà dit ci-dessus, l'étude de la sensibilité des paramètres d'un modèle en termes de performance permet d'aborder la notion d'identifiabilité des paramètres. Plus le modèle est sensible à un paramètre, plus le paramètre est identifiable.

Les figures 10a à 10^e sont des exemples de courbes de représentation des performances en fonction des valeurs de paramètres. Le paramètre est d'autant plus sensible que la courbe de représentation lui correspondant, est allongée et tend vers un optimum ponctuel. Pour la version GR2M-Mo, le paramètre X2 est plus sensible que le paramètre X1, donc plus

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale identifiable. Le paramètre X1 semble même être très sensible. Concernant GR2M-MK2, le paramètre X1 semble plus sensible que le paramètre X2. Le paramètre X1 semble alors plus identifiable que le paramètre X2. Pour la version de GR2M-MK3, le paramètre X3 ne serait pas sensible. Les deux autres paramètres, eux, seraient sensibles, le paramètre X1 étant plus sensible que le paramètre X2.

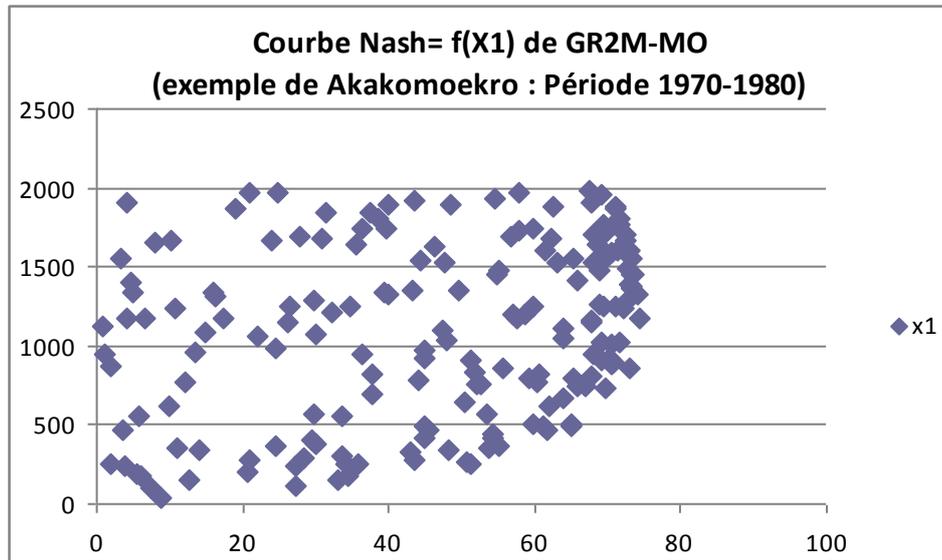


Figure 10a : Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X1 de GR2M-MO

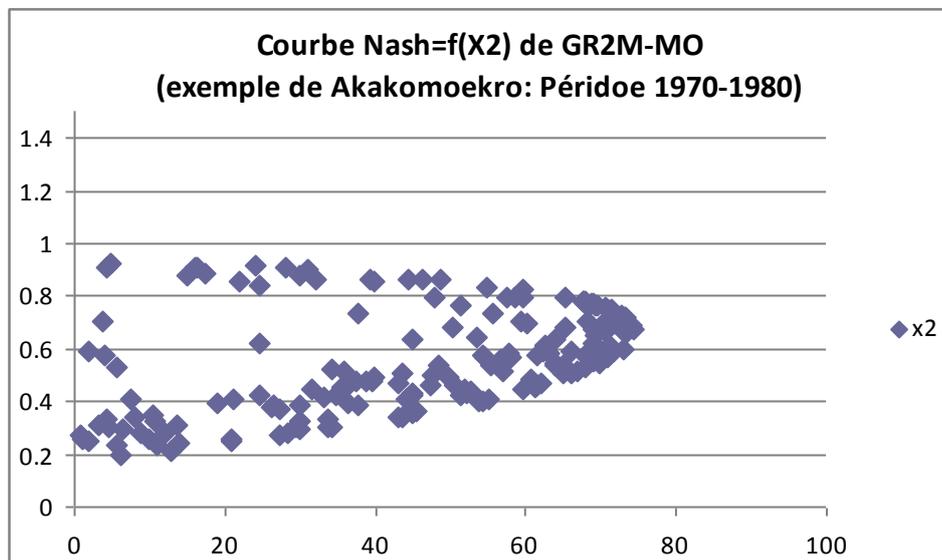


Figure 10b : Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X1 de GR2M-MO

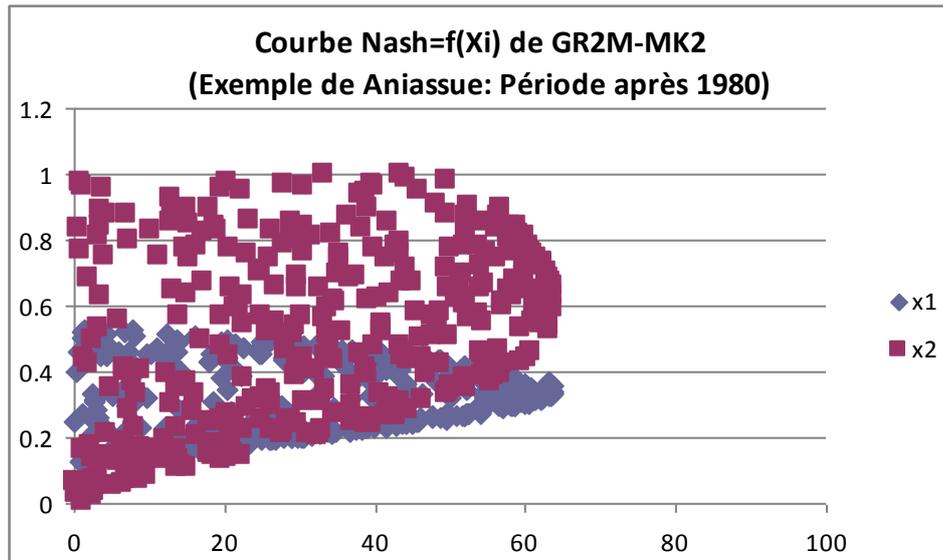


Figure 10c : Représentation des performances de simulations en fonction des paramètres X1 et X2 de GR2M-MK2

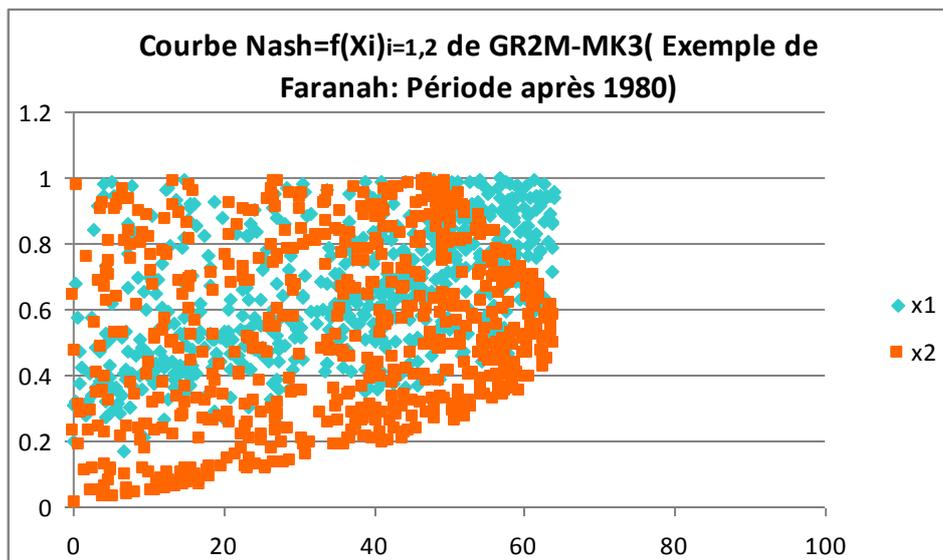


Figure 10d : Représentation des performances de simulations en fonction des paramètres X1 et X2 de GR2M-MK3

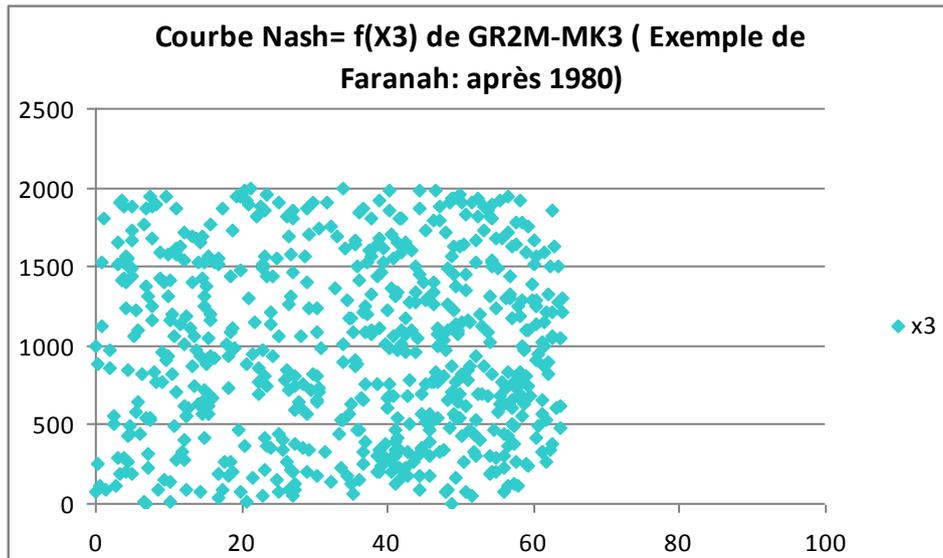


Figure 10°: Représentation des performances de simulations en fonction des paramètres X3 de GR2M-MK3

Les figures 11a et 11b sont des représentations de sensibilité par période des paramètres X1 et X2 du modèle de Makhoul 2 Paramètres (Pour les autres graphiques, confère annexes). Il en ressort que pour la plupart des bassins les paramètres sont plus sensibles sur la période après 1980 que sur les autres périodes ; ils sont plus sensibles sur la période 1970-1980 que sur la période avant 1970. Ce sont donc les paramètres calés sur les périodes où ils sont le plus sensibles qui s'avèrent être les plus transposables.

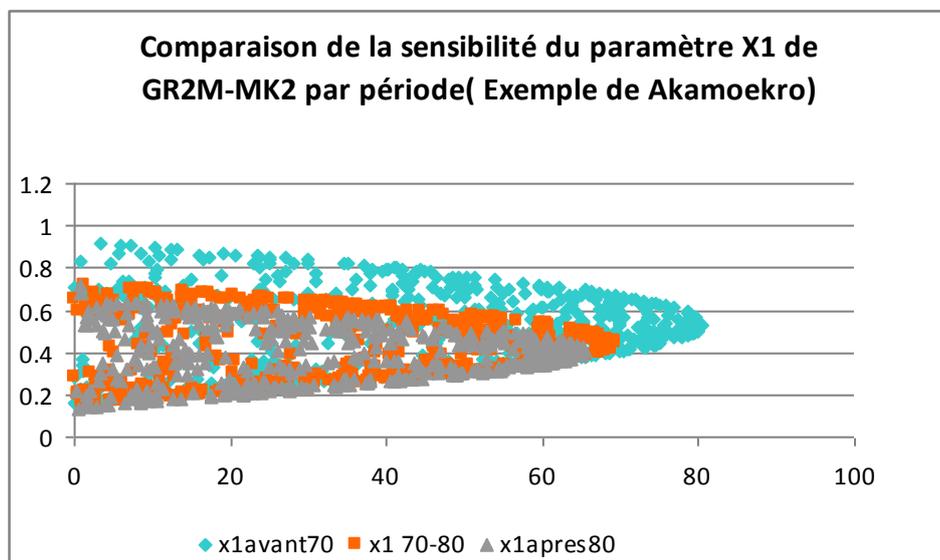


Figure 11a : Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X1 de GR2M-MK2 par période.

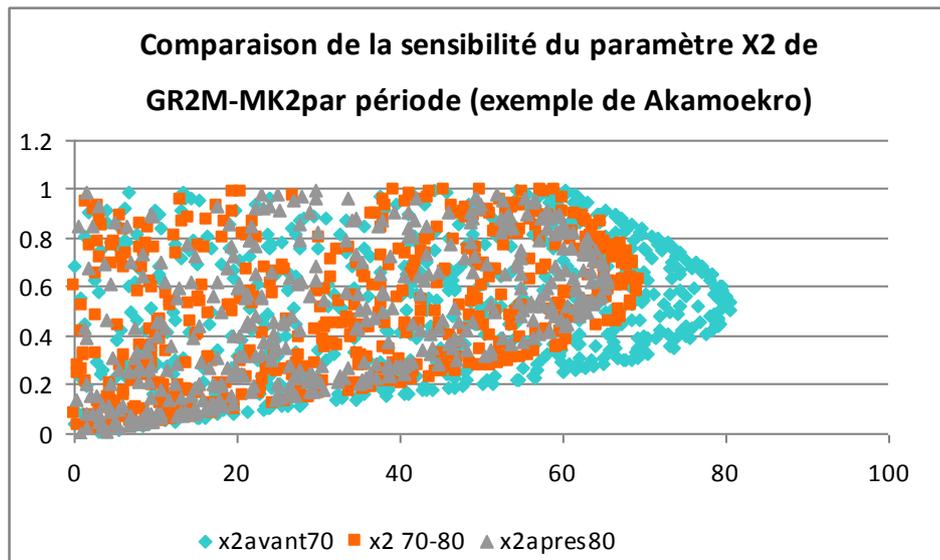


Figure 11b : Représentation des performances de simulations en fonction du paramètre X2 de GR2M-MK2 par période.

Alors que les figures précédentes présentaient l'évolution du NSE en fonction des paramètres des modèles pris séparément, la figure 12 est une représentation de la valeur de NSE en fonction des paramètres X1 et X2 de GR2M-MK2 pour le bassin de Dioila. Les courbes iso-valeurs en rouge représentent les $NSE=f(X1, X2)$ pour la période après 1980 et celles en noir, $NSE=f(X1, X2)$ pour la période avant 1970. Les courbes iso-valeurs ont une forme ovale beaucoup plus allongée dans les sens de l'axe du paramètre X2 ; cela montre que le paramètre X1 est plus sensible que le paramètre X2. Si les deux paramètres avaient la même sensibilité, les courbes auraient une forme circulaire. La figure confirme aussi que les paramètres de la période après 1980 sont plus sensibles que ceux de la période avant 1970 puisque les courbes iso valeurs de NSE sont plus resserrées.

A la lecture de la figure 12, nous voyons que la transposition du jeu de paramètres optimum de la période avant 1970 à la période après 1980, donne une valeur de NSE (cela correspond à une valeur du NSE en simulation) proche de « -50 » ; par contre la transposition de celui des paramètres de la période après 1980 sur la période avant 1970 donne une performance positive voisine de 50. Les résultats de nos tests confirment ce qui est observé sur la figure : le jeu calé sur avant 1970 (NSE de 85.4) donne un NSE de -42.5 sur la période après 80 et le jeu calé sur la période après 80 (NSE de 75.0) donne un NSE de 47.2 sur la période avant 70.

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Il semble donc qu'il y ait un lien entre la transposabilité d'un paramètre et la sensibilité du modèle à celui-ci. Les paramètres de la période après 1980 étant plus sensibles que ceux de la période avant 1970, leur transposition n'entraîne pas une baisse importante de performance.

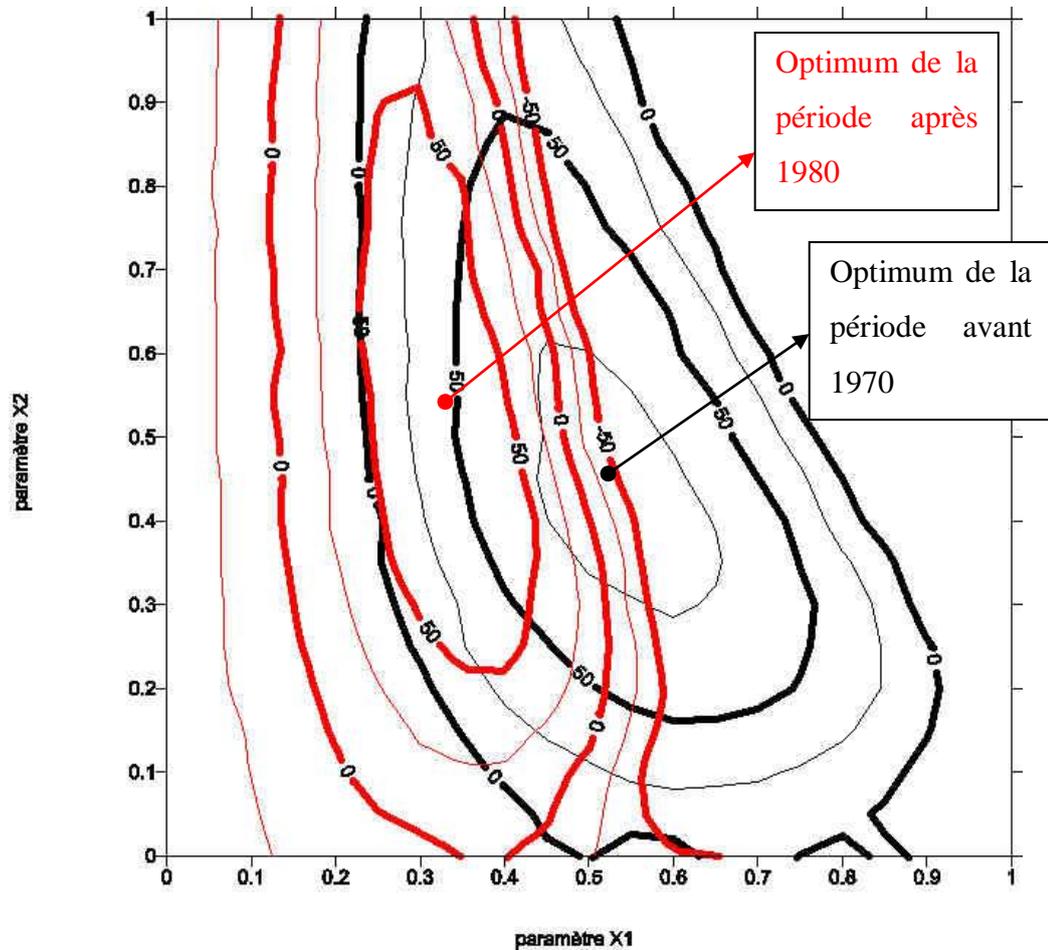


Figure12 : Représentation de courbes iso-valeurs de NSE en fonction des paramètres X1et X2 et pour le bassin de Dioila ; en noir pour la période avant 1970, en rouge pour la période après 1980. L'espacement entre les iso lignes de NSE est de 25

VI. CONCLUSION

Cette étude a permis de comparer des simulations de trois versions du modèle GR2M dans des conditions de changement global en utilisant le Differential-Split-Sample Test proposé par Klemes (1986) sur trente-huit (38) bassins versants de l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Une simulation probabiliste (Méthode de Monte Carlo) a été utilisée pour étudier la sensibilité des paramètres des modèles.

Il ressort de cette étude que la performance de calage semble dépendante des valeurs moyennes de pluie et d'écoulements ainsi que de la taille du bassin versant. Aussi, semble-t-elle meilleure sur les périodes dont les conditions hydro-climatiques ne sont pas trop dispersées.

La transposition des paramètres calés d'une période sur d'autres entraîne des baisses de performance plus ou moins importantes selon les bassins. L'importance de ces baisses est liée à la période de calage des paramètres. Elles sont moindres lorsque le transfert est fait d'une période sèche vers une période humide et lorsque les conditions de la période de calage sont variées, ce qui est le cas de la période après 80. L'analyse de la sensibilité des paramètres des 3 versions des modèles, montre pour GR2M-MO que le paramètre X2 est très sensible et X1 peu sensible. Pour GR2M-MK2, le paramètre X1 est plus sensible que le paramètre X2. Pour GR2M-MK3, les paramètres X1 et X2 sont sensibles ; ce qui n'est pas le cas du paramètre X3. La comparaison de la sensibilité des paramètres par période montre pour la plupart des bassins étudiés, une plus grande sensibilité des paramètres de la période après 1980 pour les trois modèles étudiés par rapport aux autres périodes. C'est aussi sur cette période, après 1980, que les paramètres calés donnent de meilleurs NSE de validation que les paramètres calés sur les autres périodes. La transposabilité des paramètres apparaît comme étant liée à leur sensibilité dans le modèle. Lors de la transposition d'un jeu de paramètres d'une période D à une période R, si les paramètres sont moins sensibles sur D que sur R, alors la transposition du jeu de paramètres optimisés de D sur la période R conduira à un NSE moins bon que si le transfert s'était fait de la période R vers la période D.

La suite de ce travail va consister à regarder de plus près cette sensibilité des modèles qui est variable d'une période à l'autre et de mieux la comprendre.

BIBLIOGRAPHIE

- Abebe N. A., Ogden F. L., Pradhan N. R. (2010). Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall-runoff model: Implication for parameter estimation, *Journal of Hydrology* 389, 301-310
- Bardossy A. and Singh S. K. (2008). Robust estimation of hydrological model parameters, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 25 June, 5, 1641–1675
- Brigode P., Oudin L. et Perrin C. (2013). Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change?, *Journal of Hydrology* 476, 410–425
- Coron L. et Andreassian V. ; Perrin C., Lerat J, Vaze J, Bourqui M., and Hendrickx F., (2012). Crash testing hydrological model in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments, *Water Resources Research*, 26 May, VOL. 48, W05552, doi:10.1029/2011WR011721
- Dezetter A, Paturel J-E, Ruelland D, Ardoin-Bardin S, Ferry L, Mahé G., Dieulin C, Servat E. Prise en compte des variabilités spatio-temporelles de la pluie et de l'occupation du sol dans la modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du haut fleuve Niger. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). IAHS Publ. 340, 544-552, 2010
- Heuvelmans G., Muys B. and Feyen J. (2004). Evaluation of hydrological model parameter transferability for simulating the impact of land use on catchment hydrology, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 739–747
- Klemes V. (1986). Operational testing hydrological of hydrological simulations models, *Hydrological sciences-Journal des sciences hydrologiques*, 31,1,3/1986
- Li C. Z., Zhang L., Wang H., Zhang Y. Q., Yu F. L. and Yang D. H. (2011). The transferability of hydrological models under nonstationary climatic conditions, *Hydrology and Earth System Sciences Discussion*, 23 September 8, 8701–8736
- Merz R, Parajka J and Blöschl G, (2011). Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses, *Water Resources Research*, 19 February, VOL. 47, W02531, doi:10.1029/2010WR009505

Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Paturel J.-E., Servat E., Lubès-Niel H. et Delattre M. O. (1997b). Variabilité climatique et analyse de séries pluviométriques de longues durées en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne, *C.R.Acad. Sci., Paris* 325, Série Iia, 779-782

Seiller G. et Anctil F and Perrin C., (2012). Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11April, 16, 1171–1189

Shen Z. Y. et Chen L. and Chen T. (2012). Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12 January, 16, 121–132

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

Voudouris K. (2011). Assessing runoff in future climate conditions in Messara valley in Crete with a rainfall-runoff model. *Meteorological Applications* ,8 August, 19, 473–483

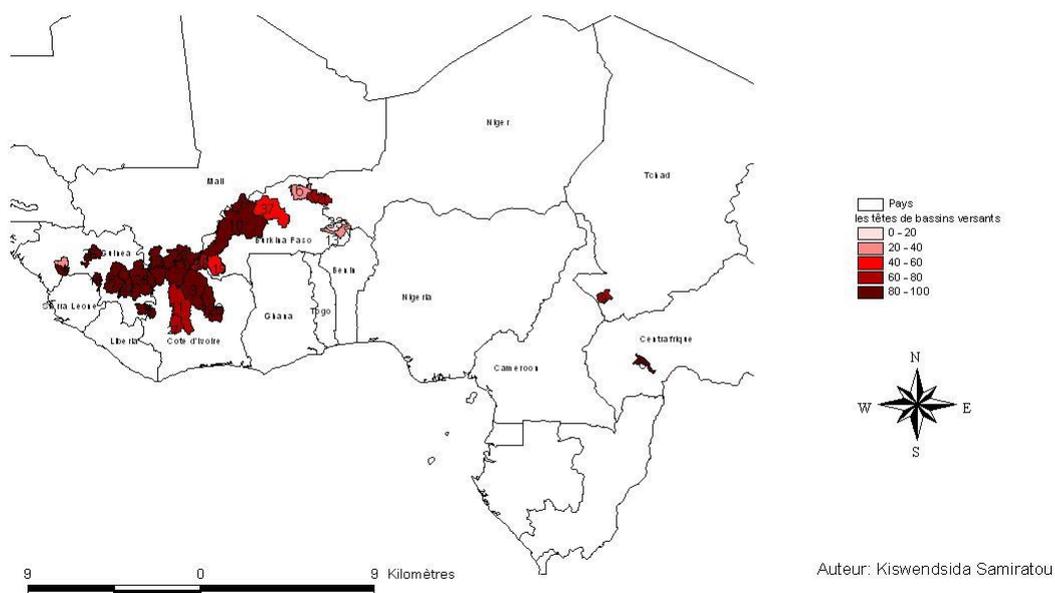
Wagener T., Boyle D P., Lees M J., Wheater H S, Gupta H V. and Sorooshian S (2001). A framework for development and application of hydrological models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13–26

Wagener. T, McIntyre N., Lees M. J., Wheater H. S. and Gupta H. V. (2003). Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: Dynamic identifiability analysis, *Hydrological Processes*, **17**, 455–476

ANNEXES

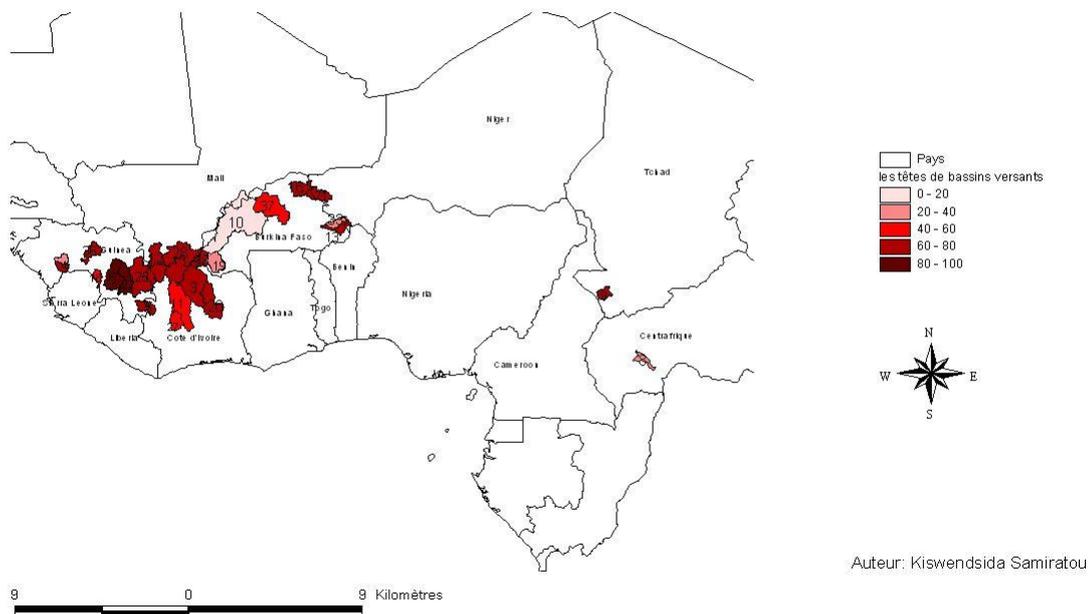
Annexe 1: Représentation géographique des performances de calage des bassins versants

Performance de calage des têtes de bassins: Période 70- 80 (Version de Makhlouf 2 paramètres)

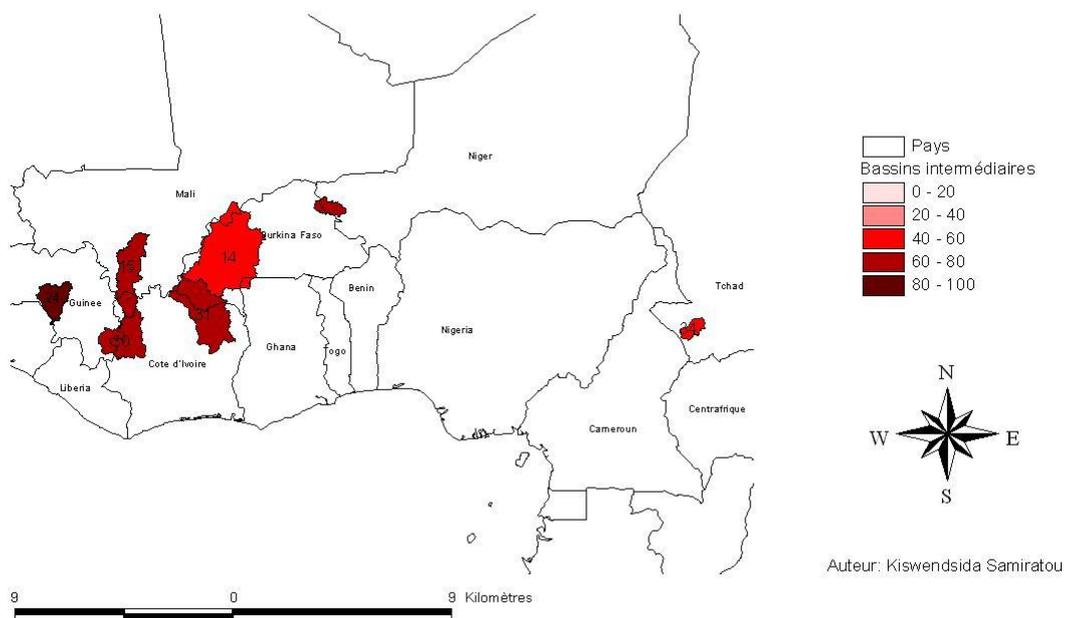


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Performance de calage des têtes de bassins: Période Après 80 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

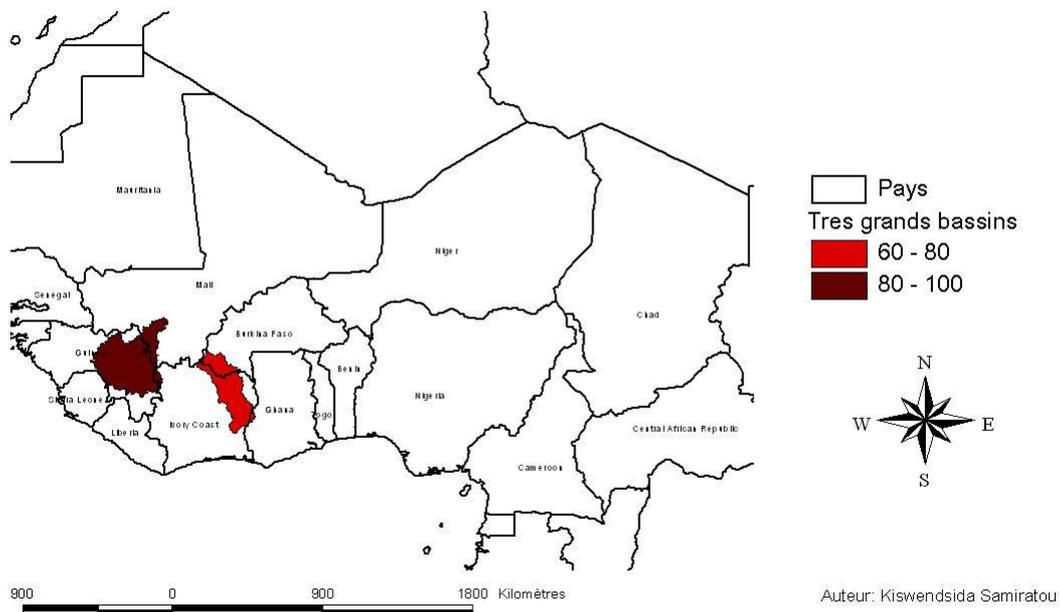


Performance de calage des bassins intermédiaires de niveau 1: Période Après 80 (Version de Makhlouf 2 paramètres)

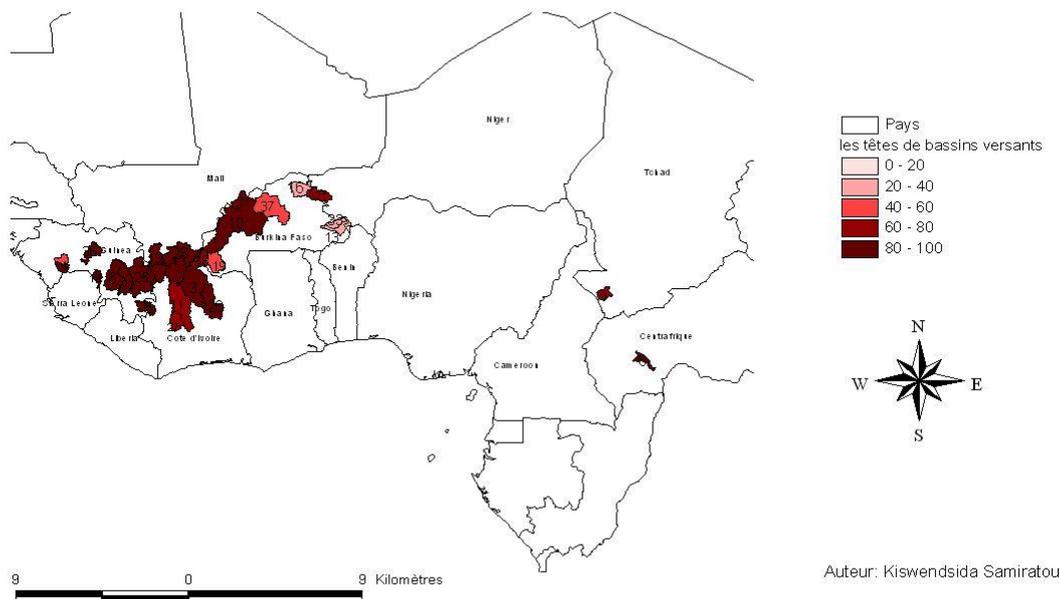


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Performance de calage des grands bassins : Période après 80 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

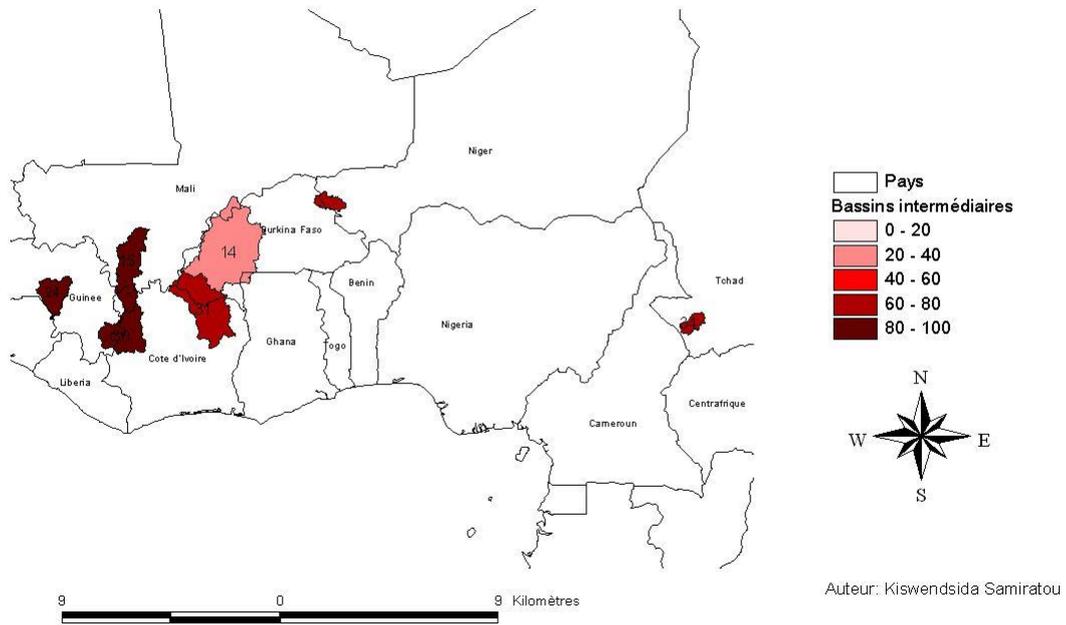


Performance de calage des têtes de bassins: Période 70-80 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

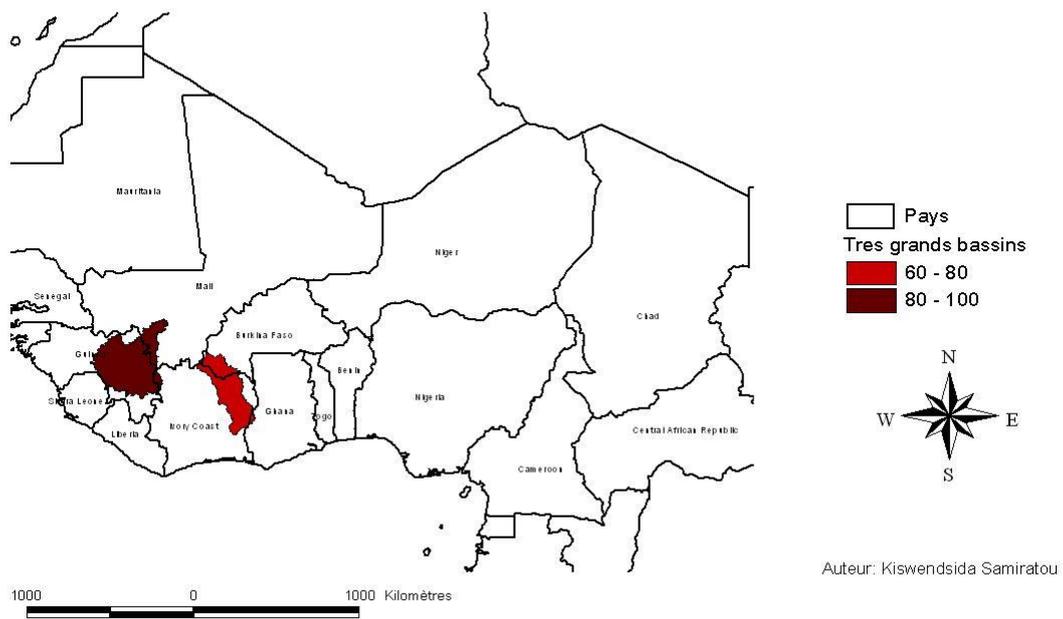


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Performance de calage des bassins intermédiaires de niveau 1: Période 70-80 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

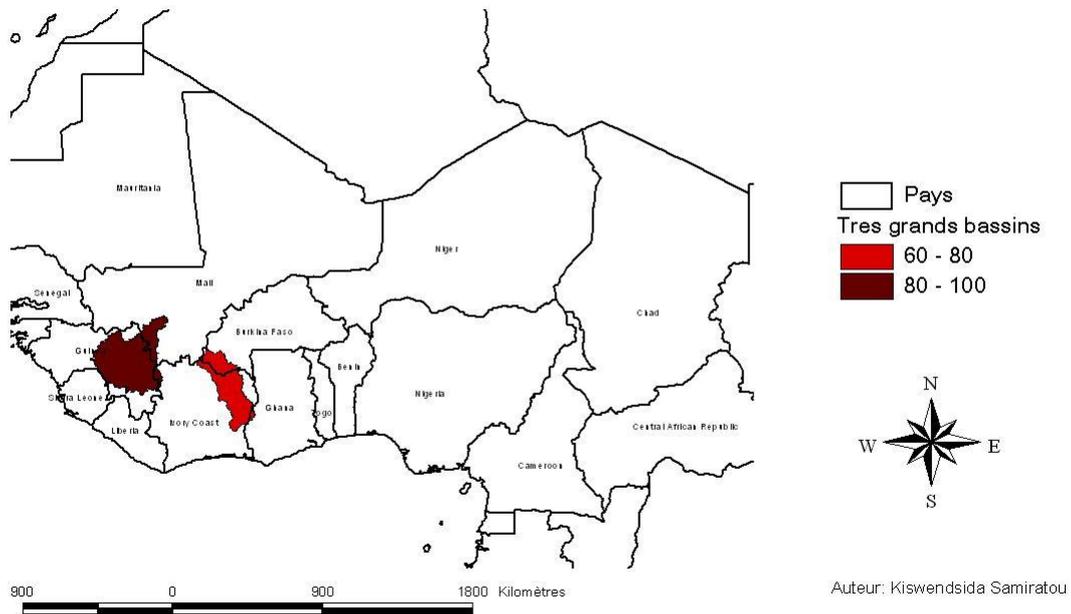


Performance de calage de grands bassins : Période 70-80 (Version de Makhlouf 2 Paramètres)

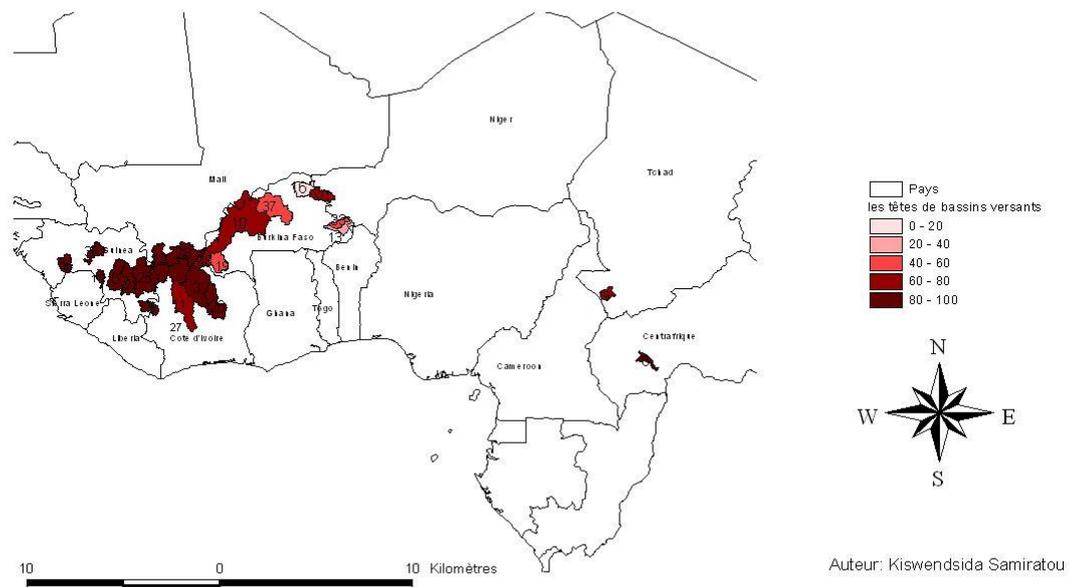


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Performance de calage des grands bassins : Période après 1980 (Version de Makhlouf 3 Paramètres)

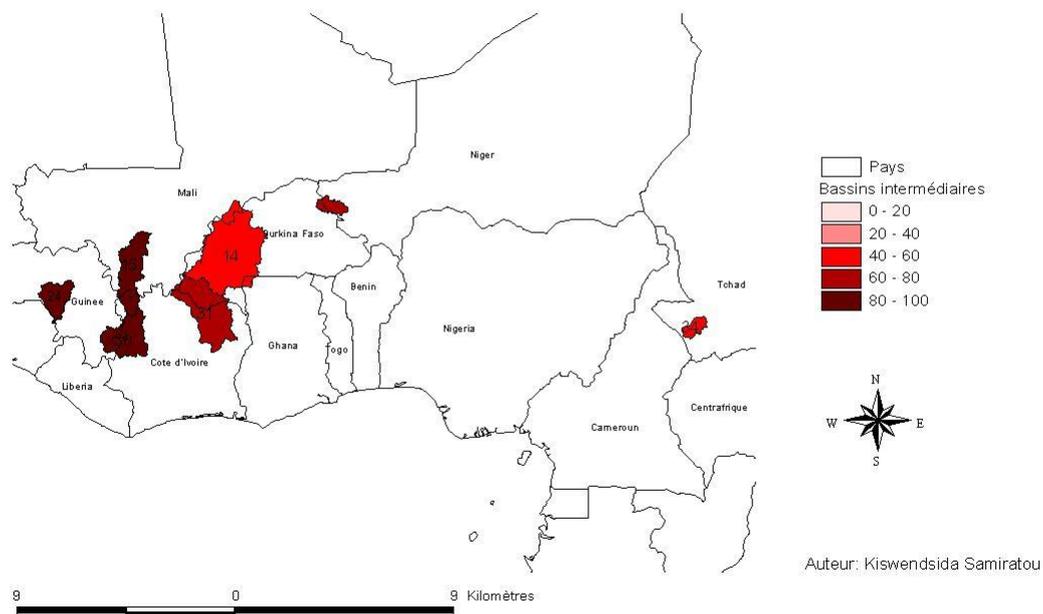


Performance de calage des têtes de bassins: Période 70-80 (Version de Mouelhi)

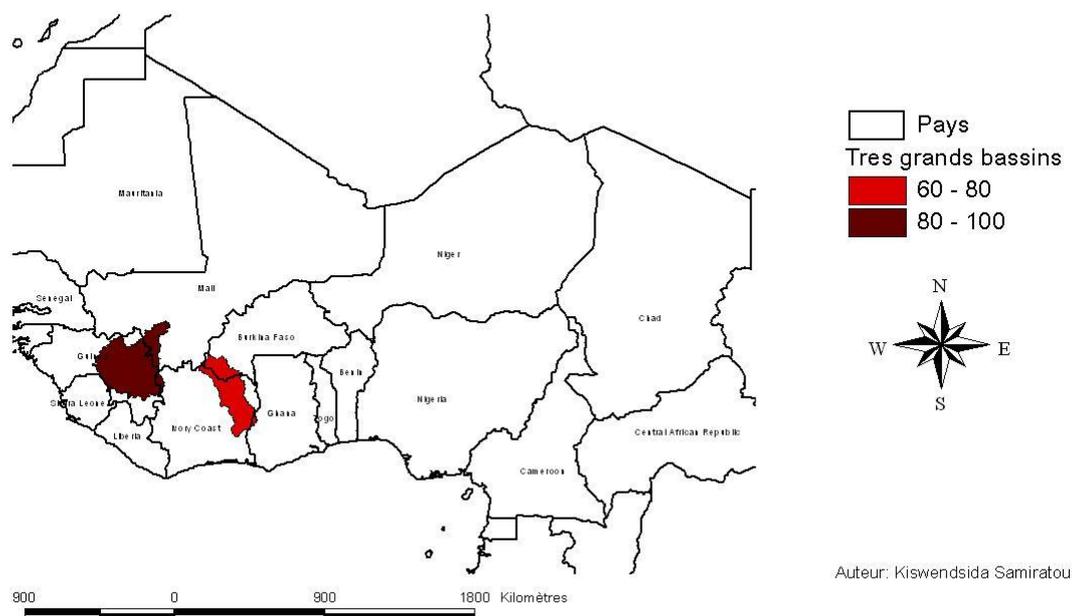


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

Performance de calage des bassins intermédiaires niveau 1: Période 70-80 (version de Mouelhi)

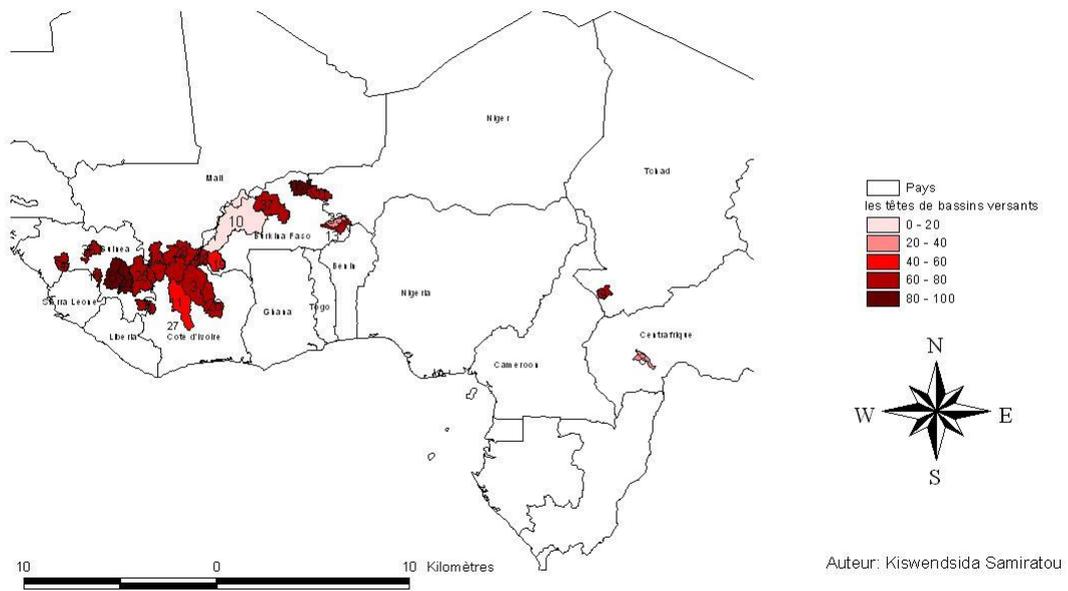


Performance de calage des grands bassins: Période 70-80 (Version de Mouelhi)

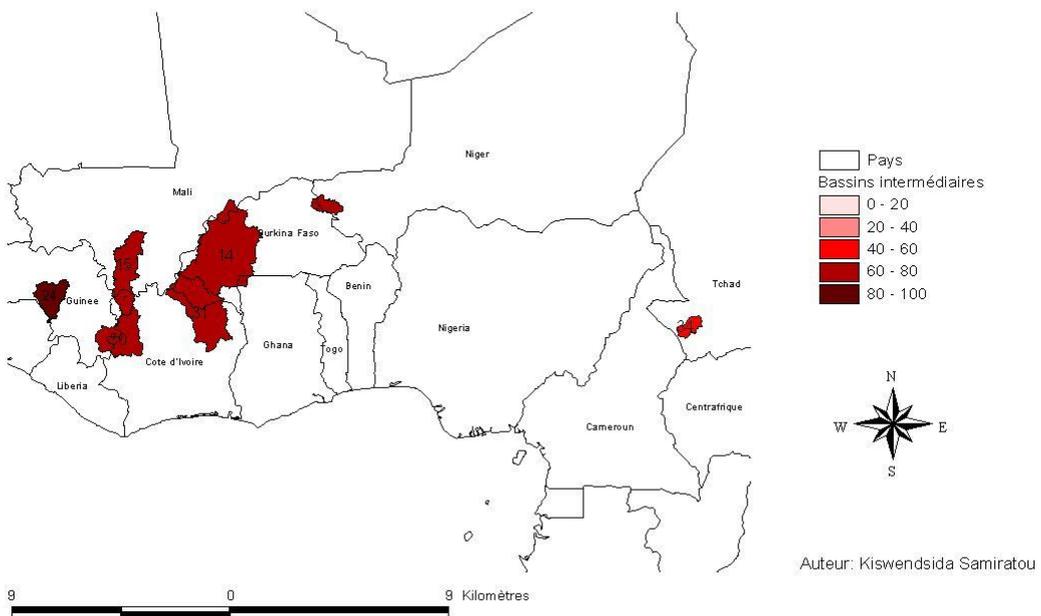


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l’Afrique de l’Ouest et Centrale

Performance de calage des têtes de bassins: Période après 1980 (Version de Mouelhi)

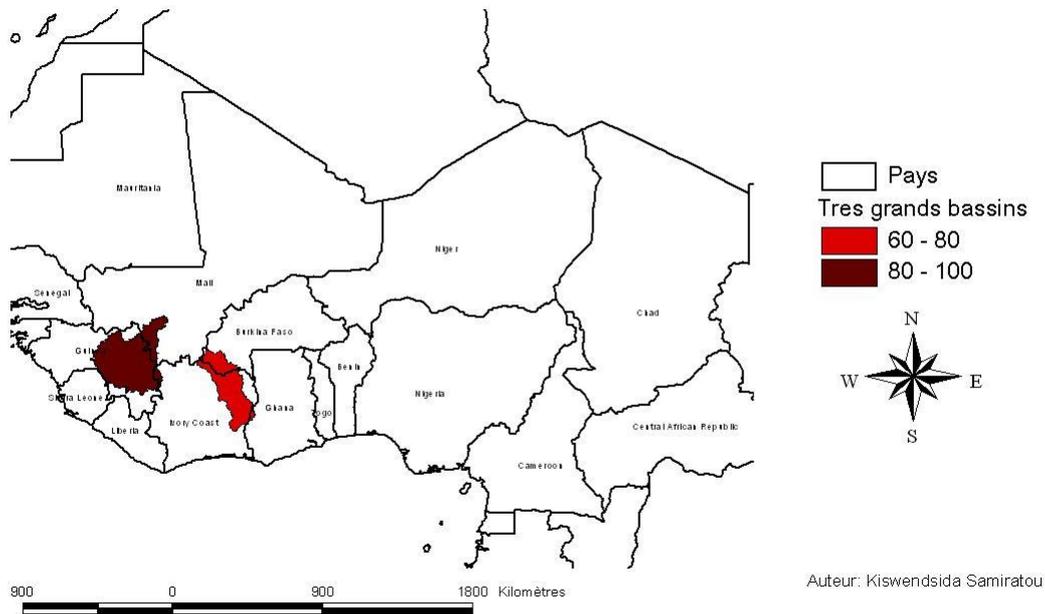


Performance de calage des bassins intermédiaires de niveau 1 : Période Après 80 (Version de Mouelhi)

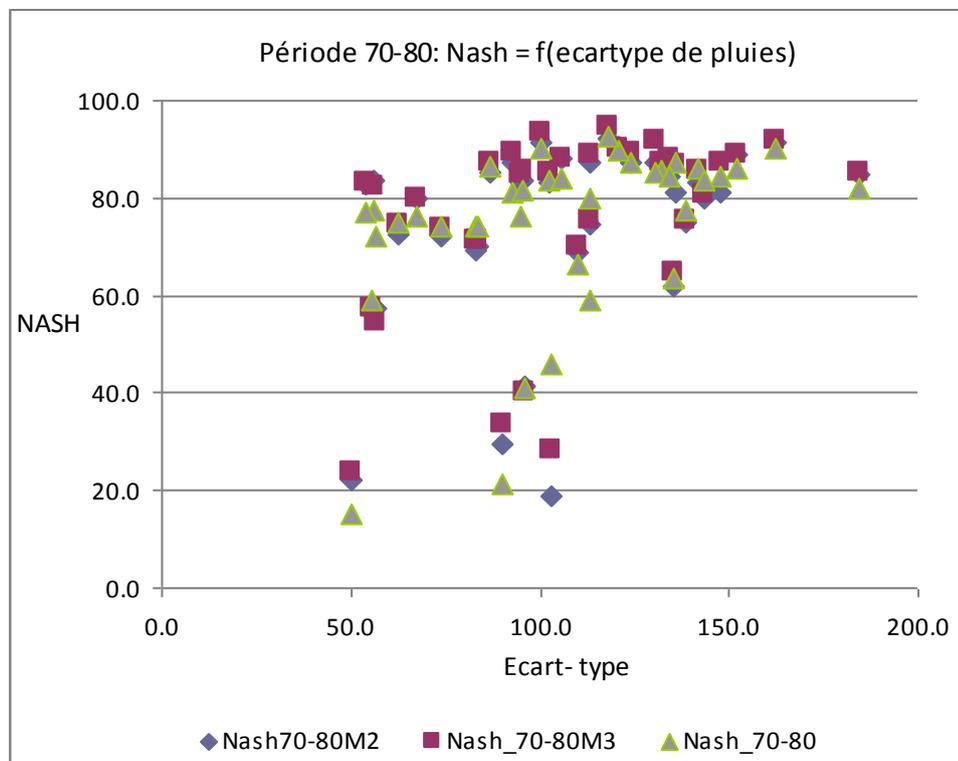
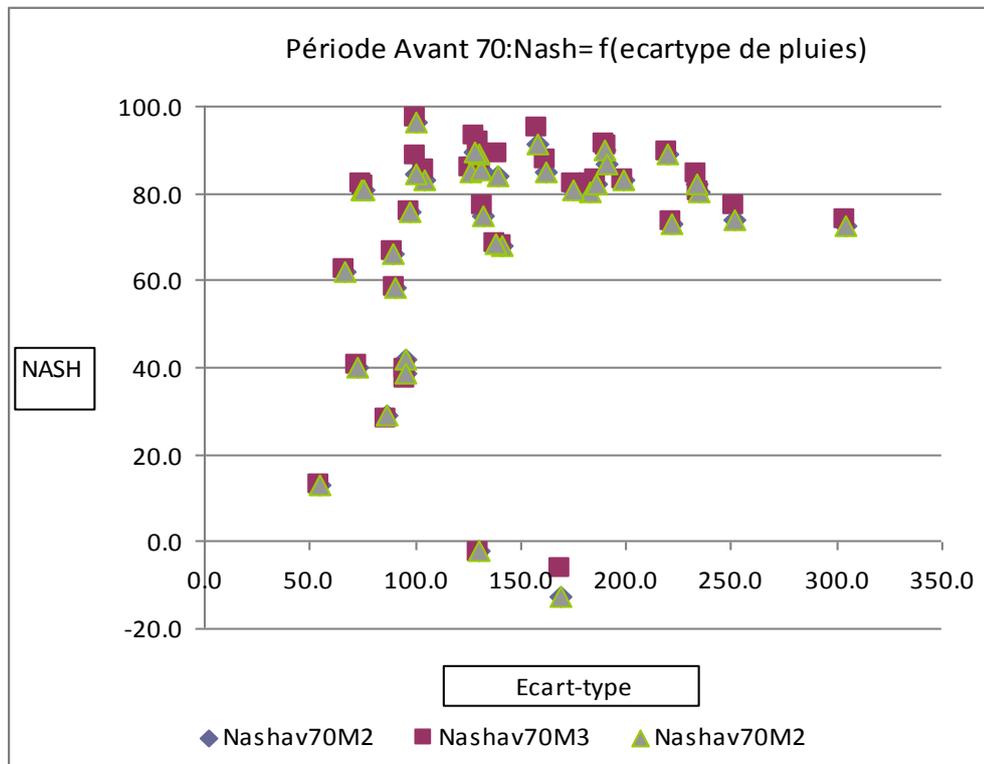


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

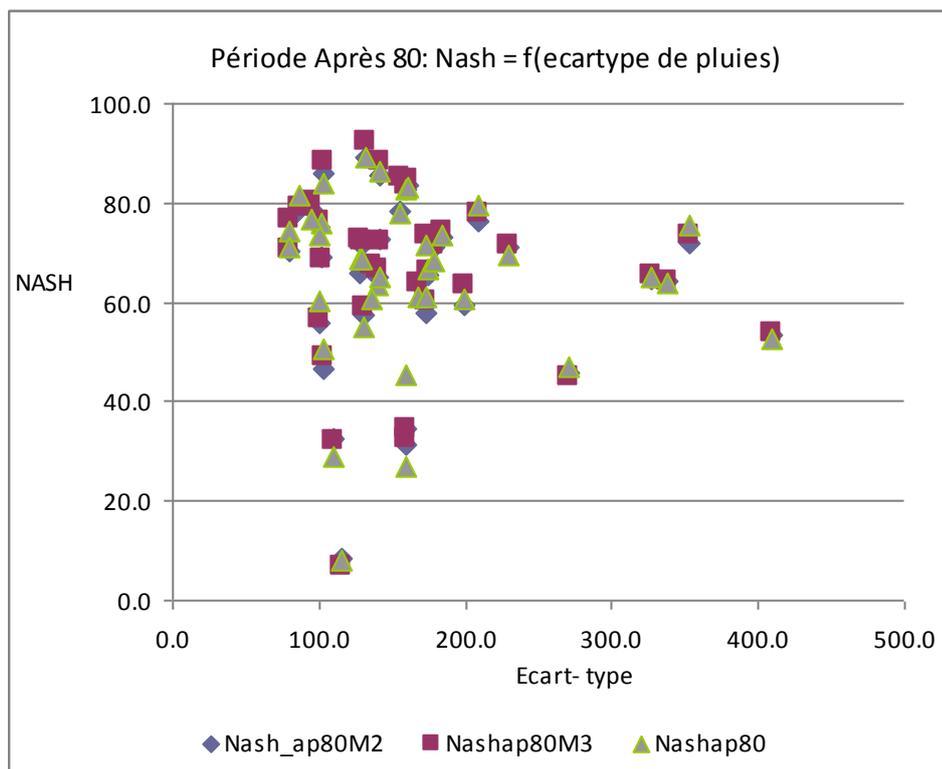
Performance de calage des grands bassins: Période de après 1980 (Version de Mouelhi)



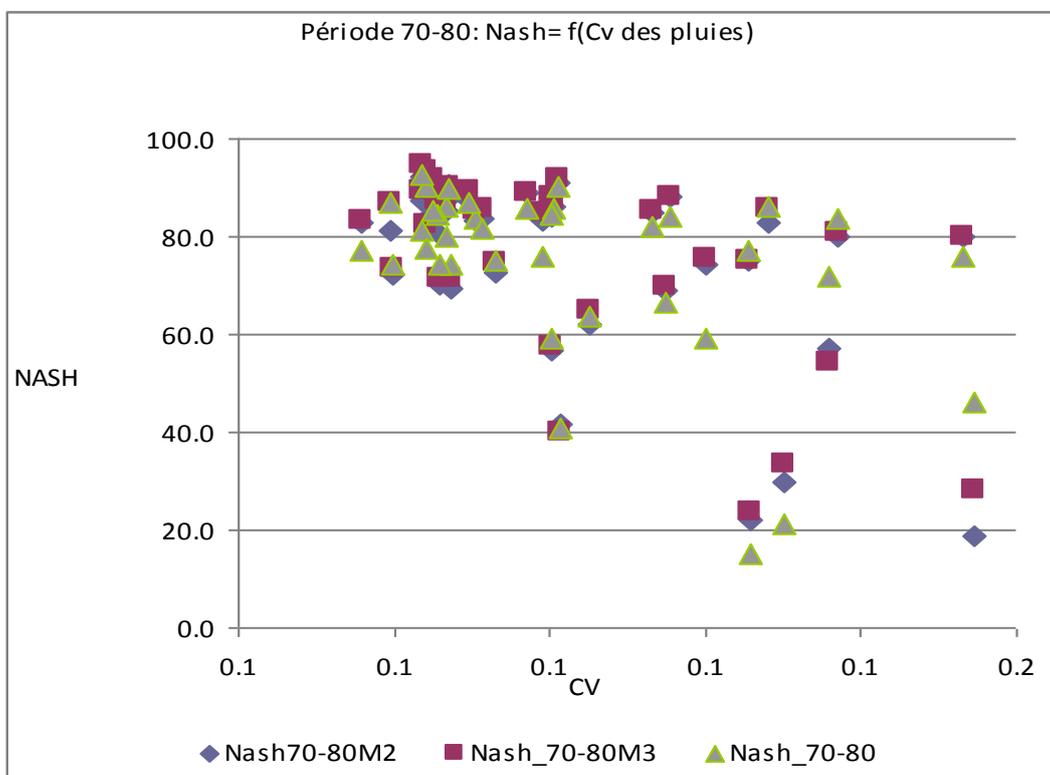
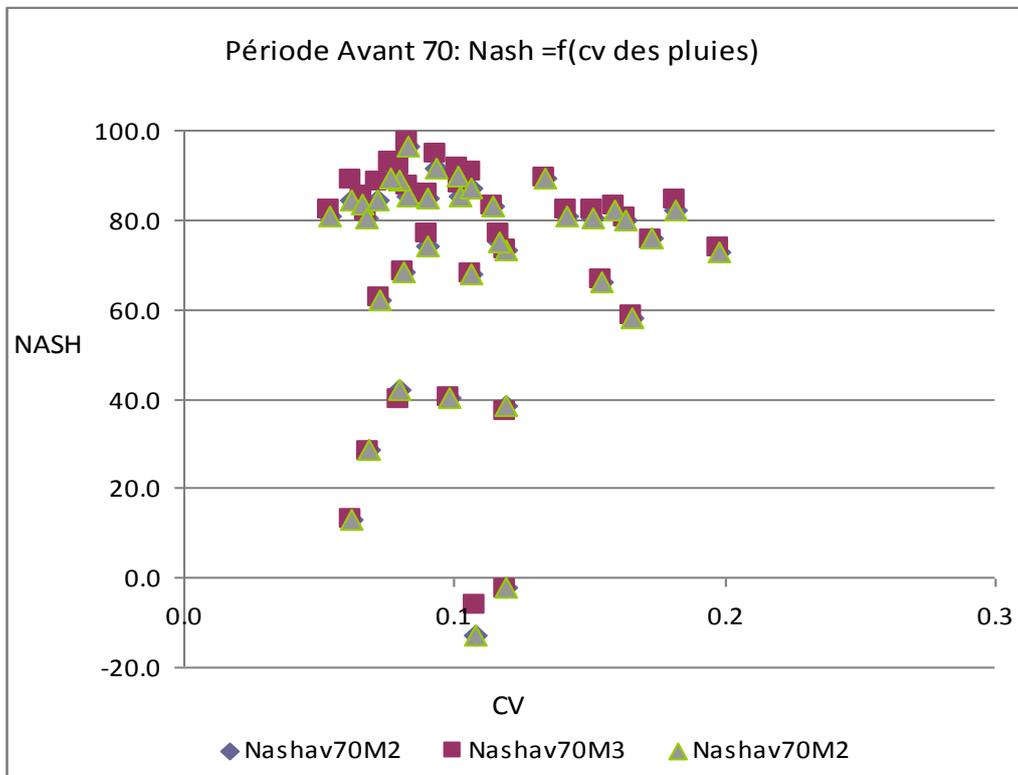
Annexe 2 : Représentation de la performance de calage en fonction de l'écart-type des pluies en mm



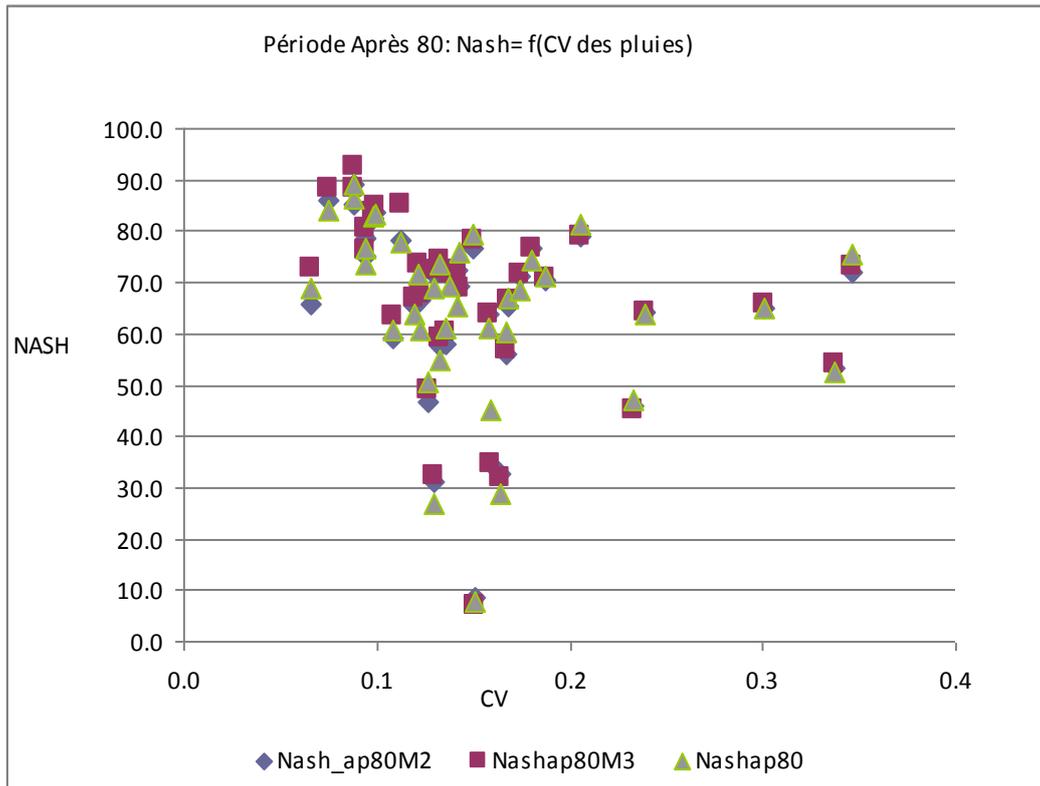
Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale



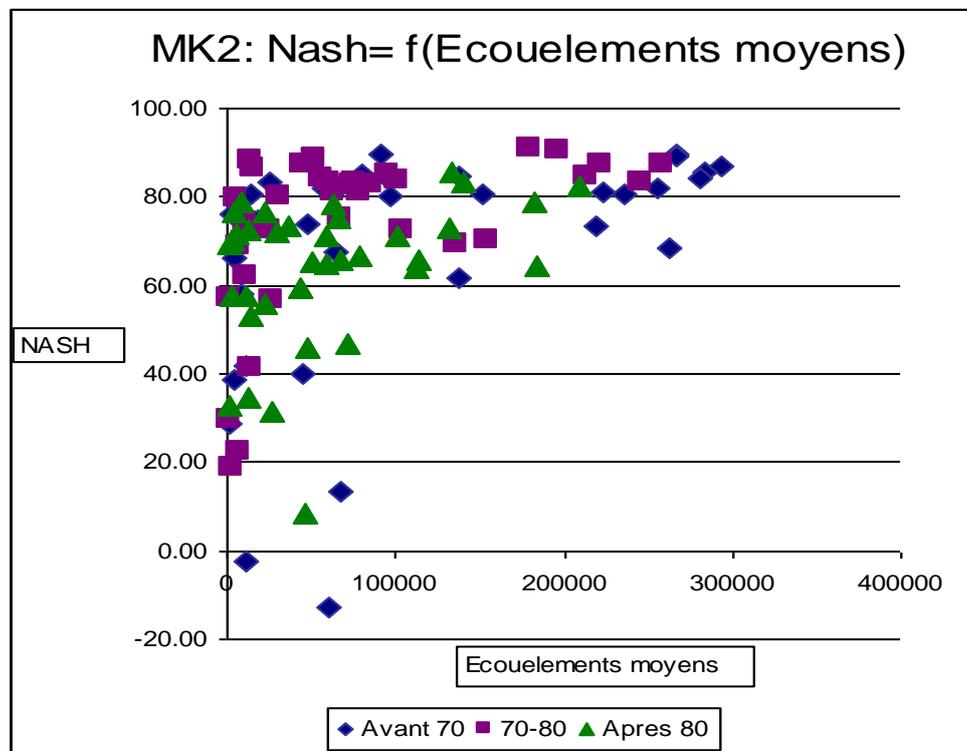
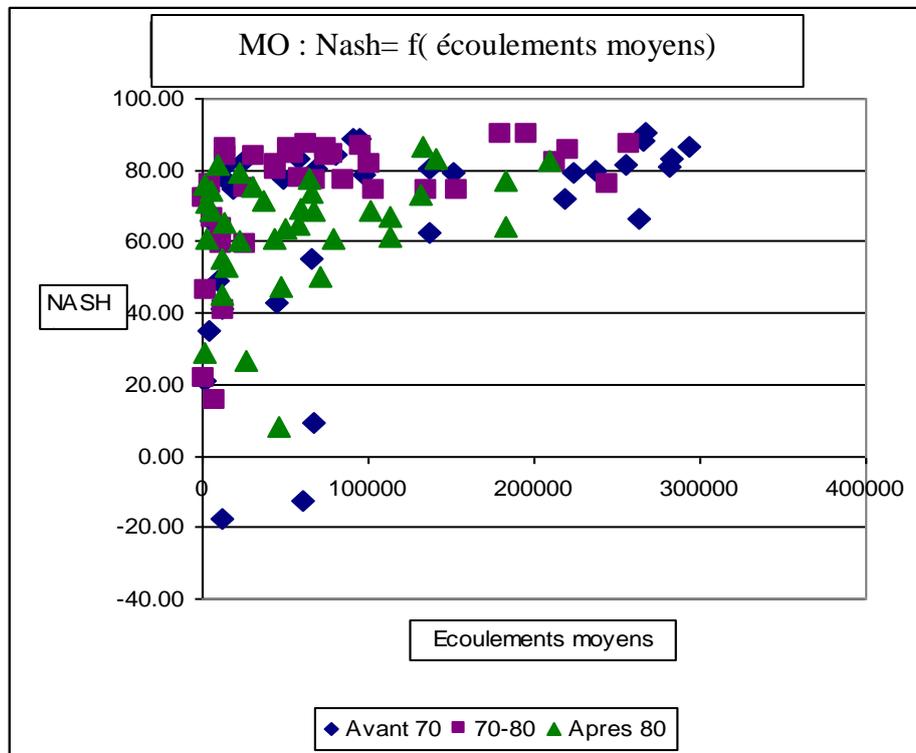
Annexe3: Représentation de la performance de calage en fonction des coefficients de variation des pluies



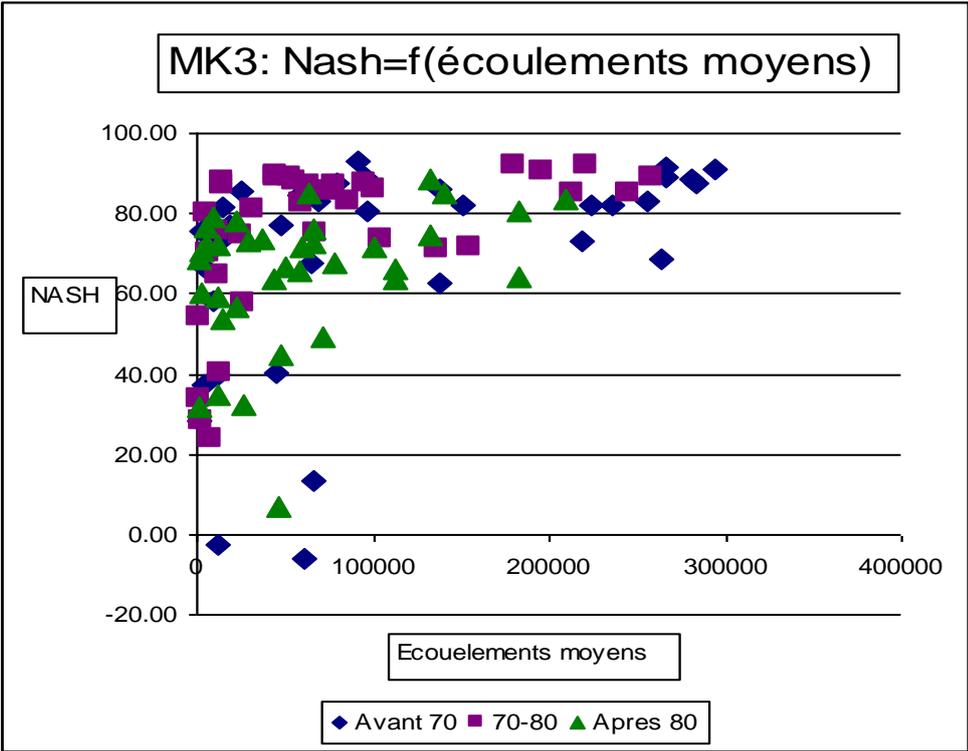
Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale



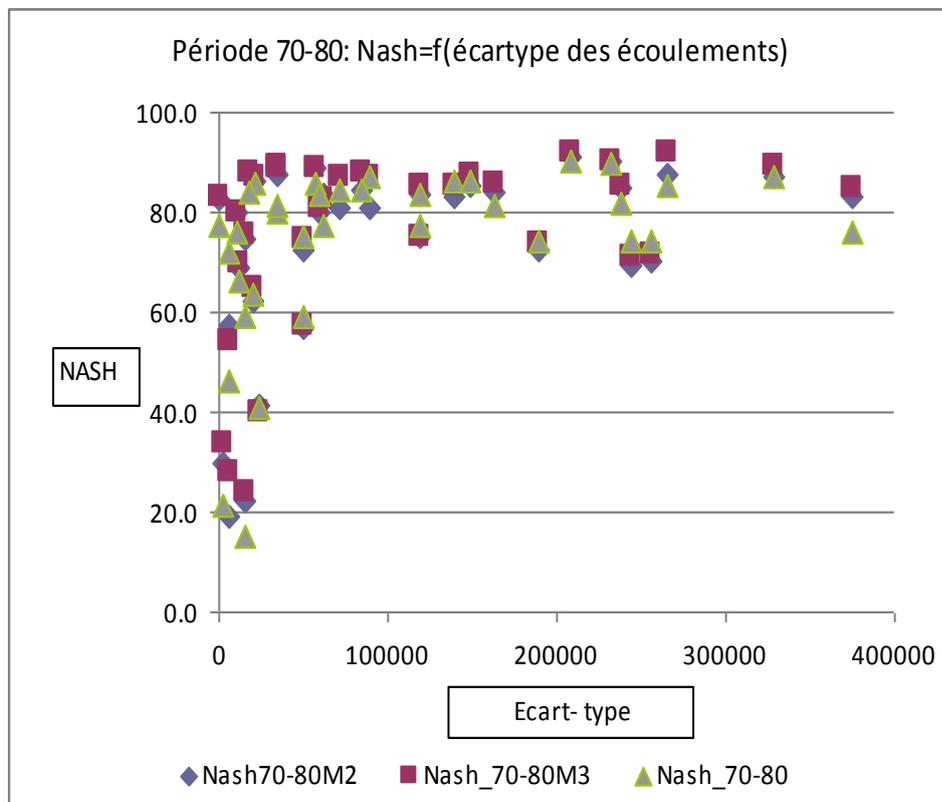
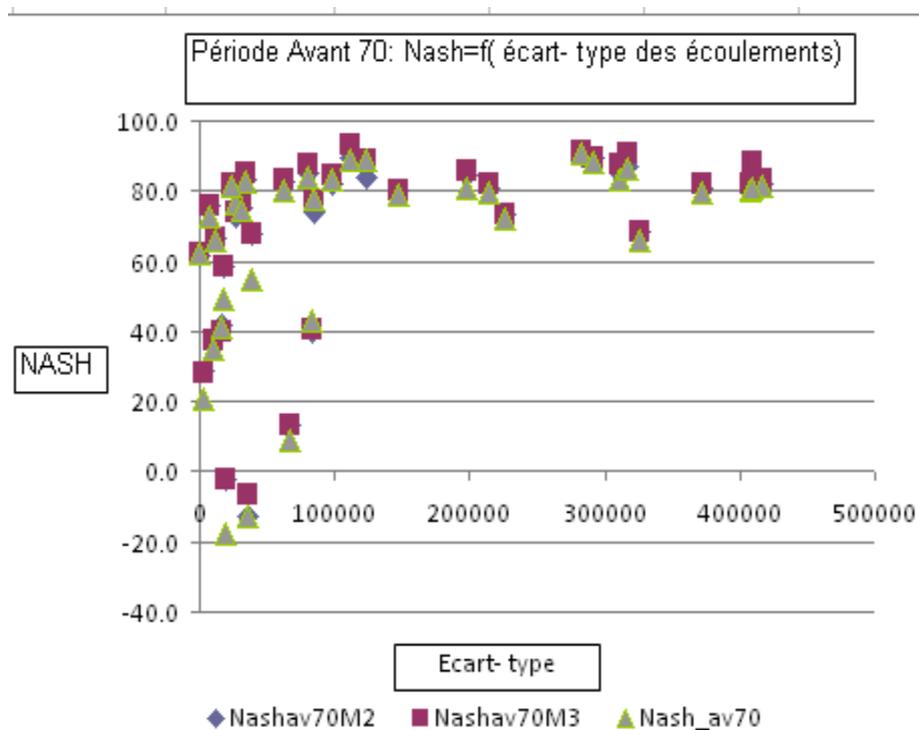
Annexe 4 : Représentation de la performance de calage en fonction des écoulements moyens en l/s

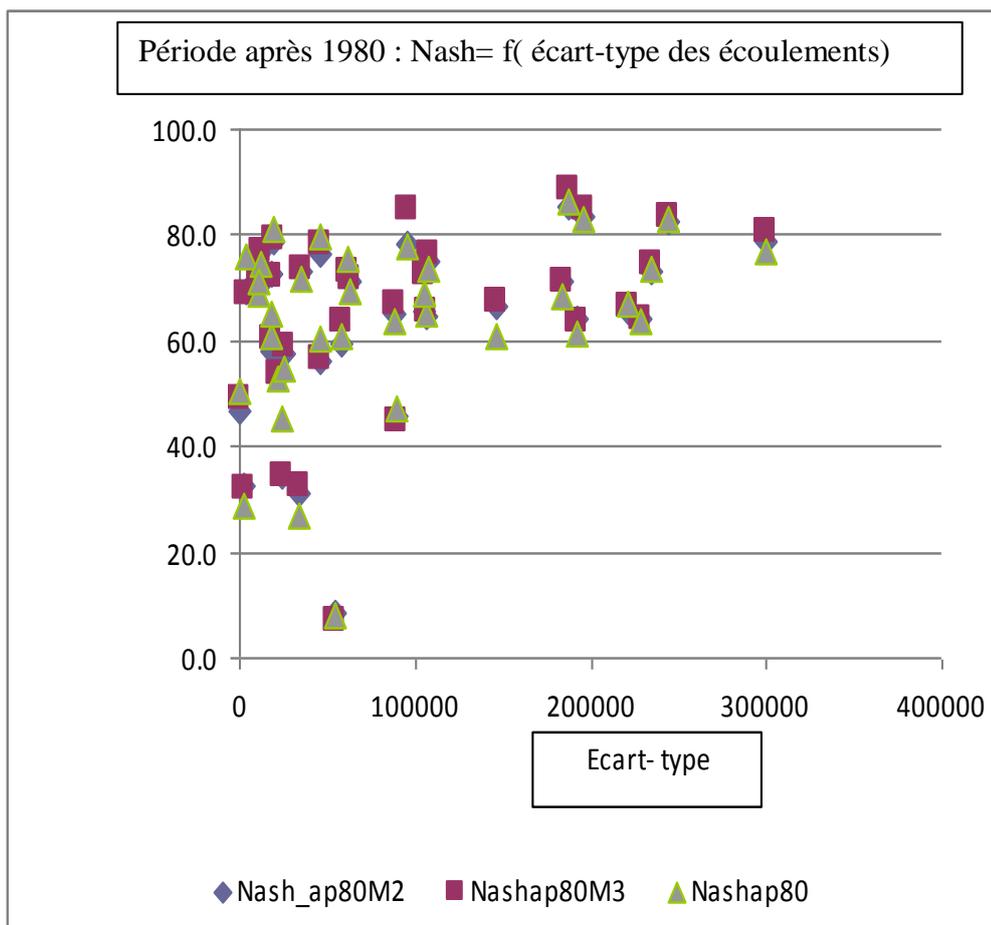


Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale

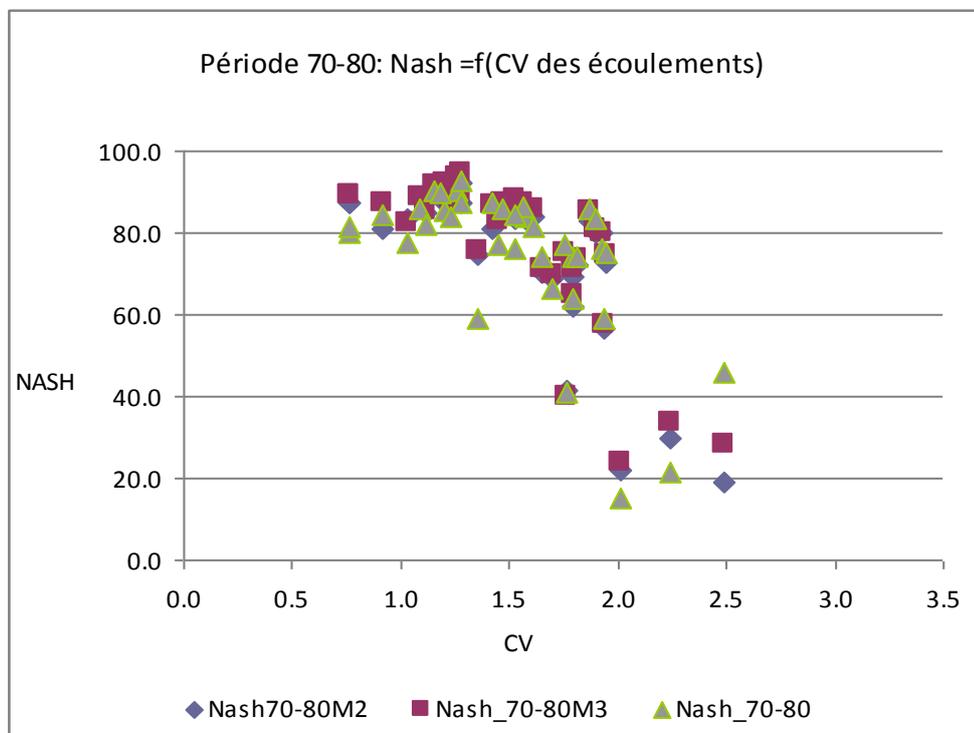
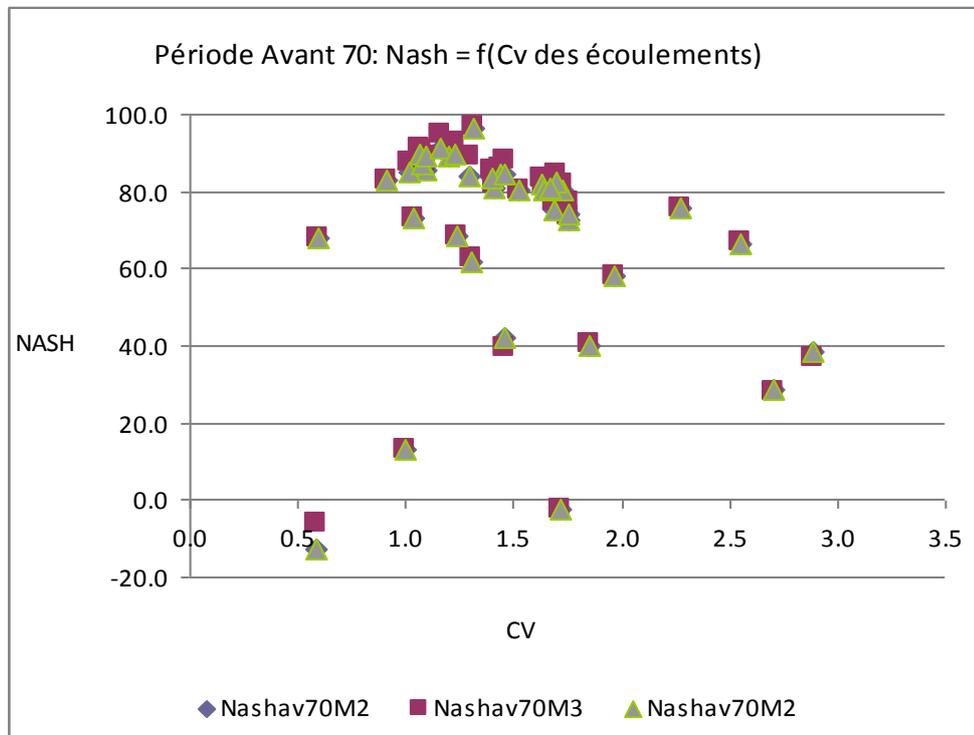


Annexe 5 : Représentation de la performance de calage en fonction de l'écart-type des écoulements en l/s

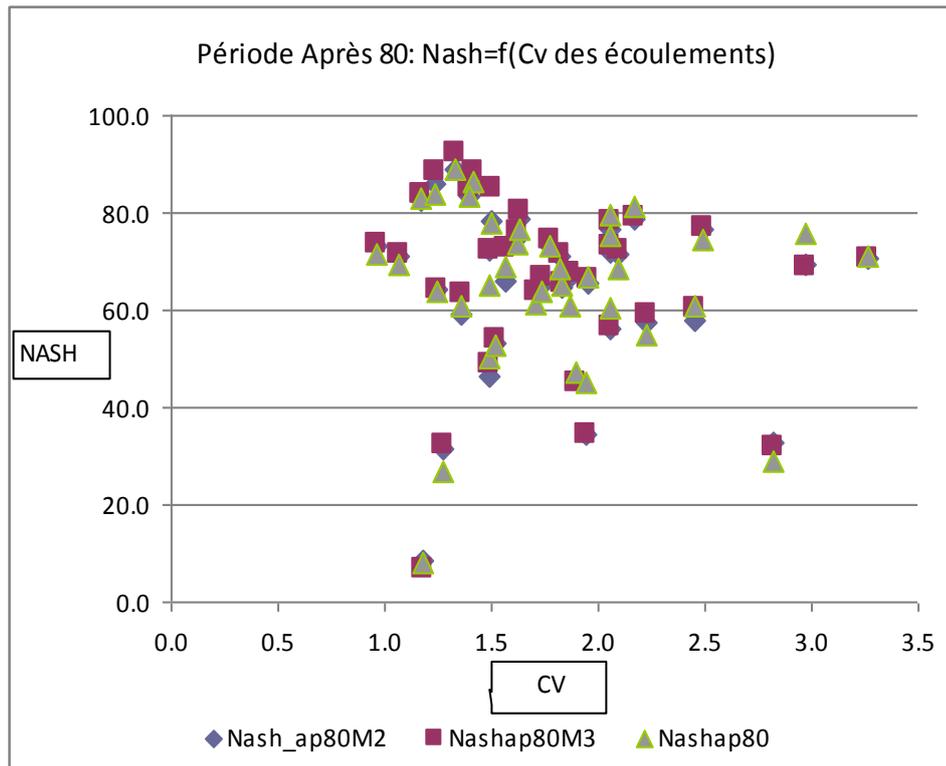




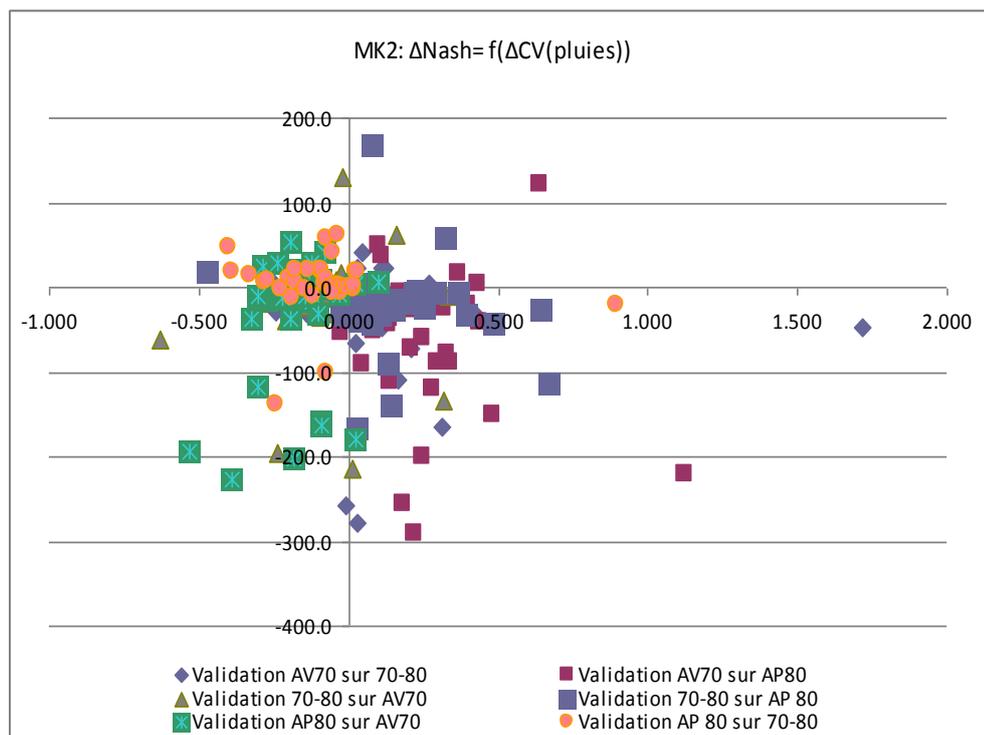
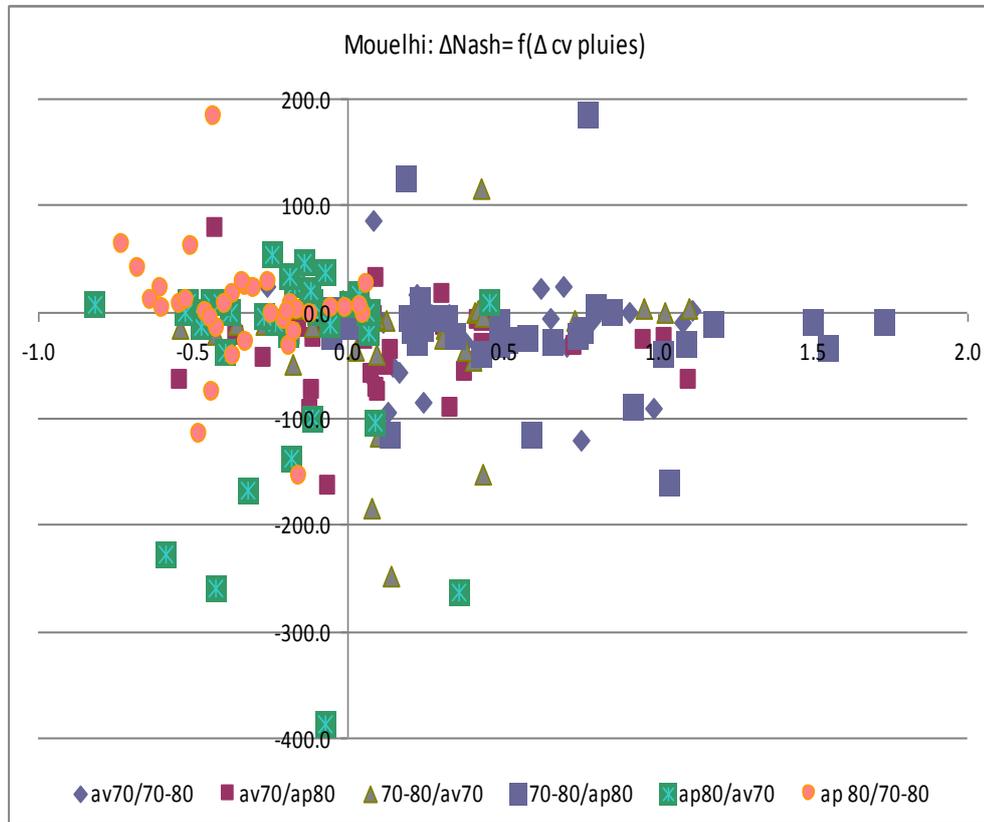
Annexe 6 : Représentation de la performance de calage en fonction des coefficients de variation des écoulements



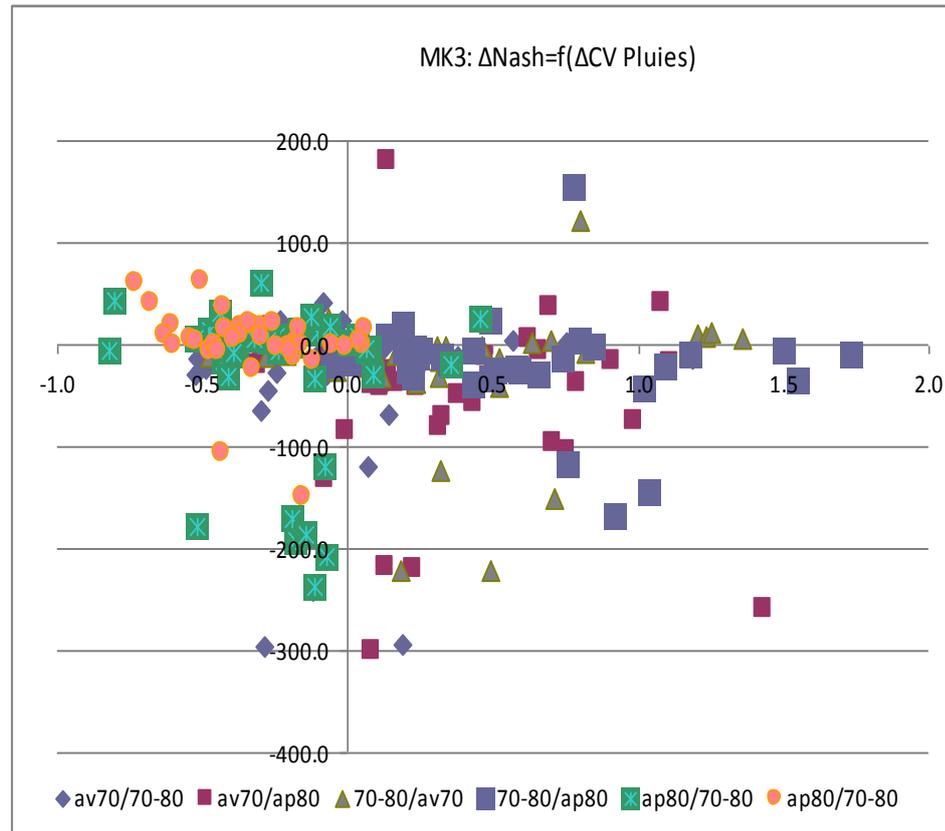
Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale



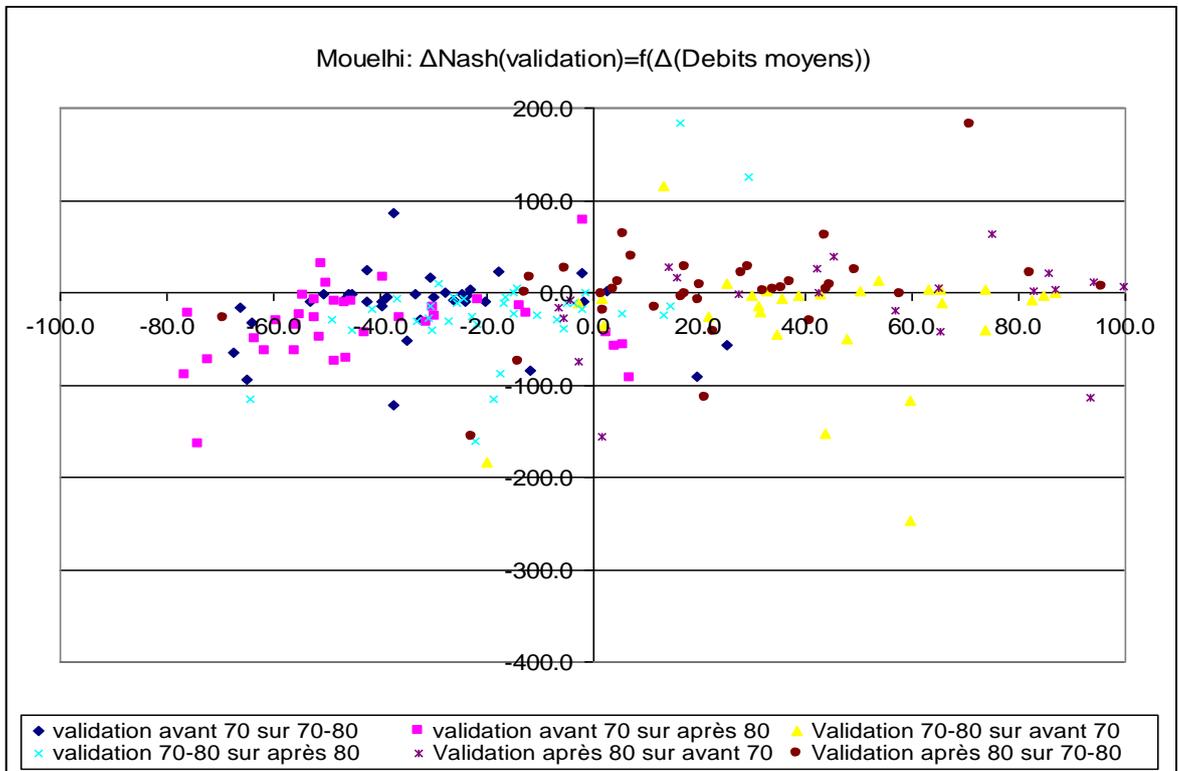
Annexe 7 : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des CV de pluies entre périodes de calage et de validation



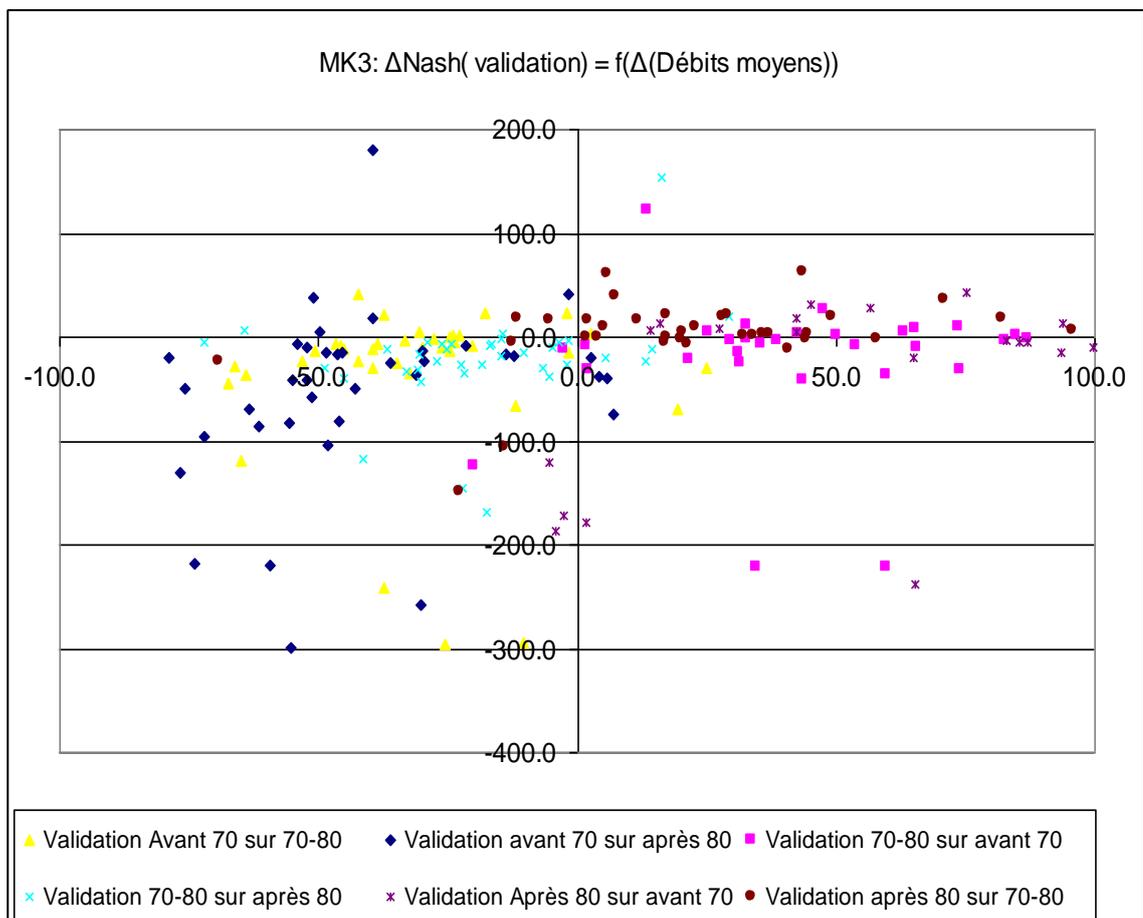
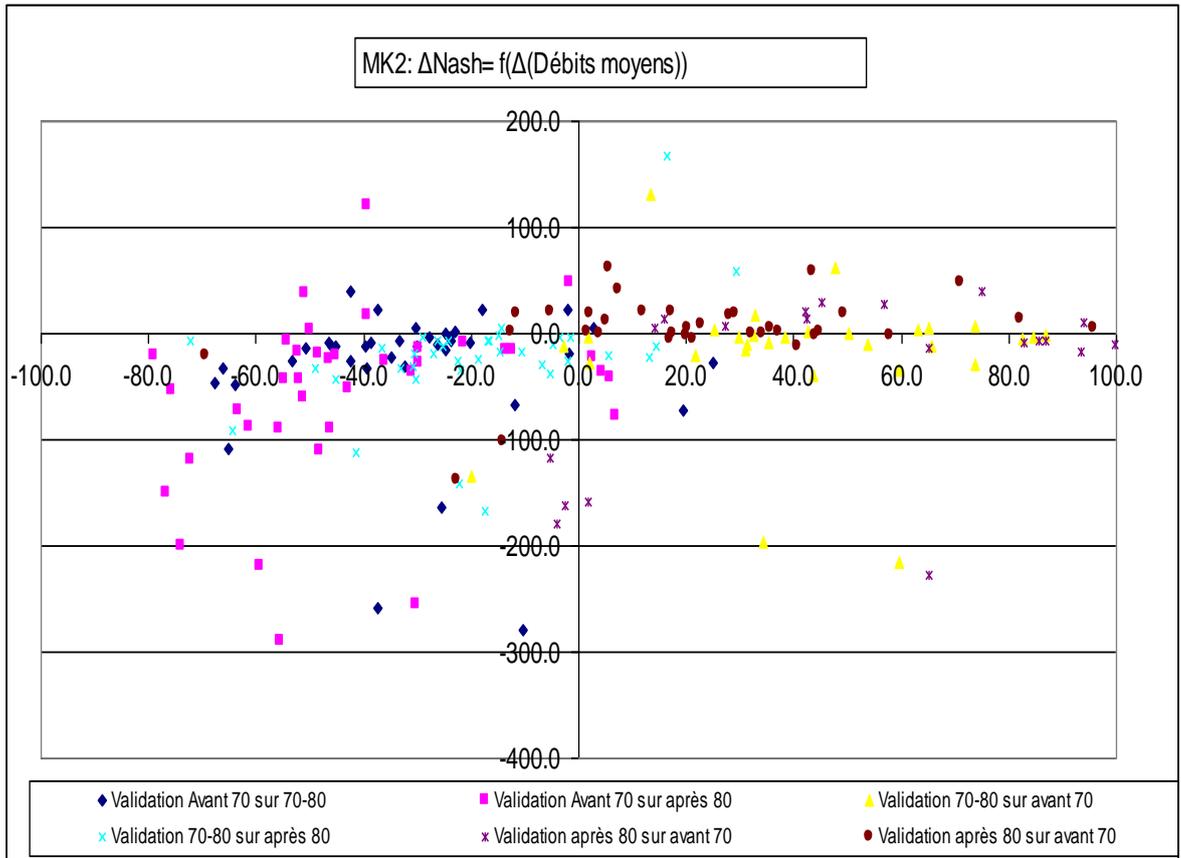
Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale



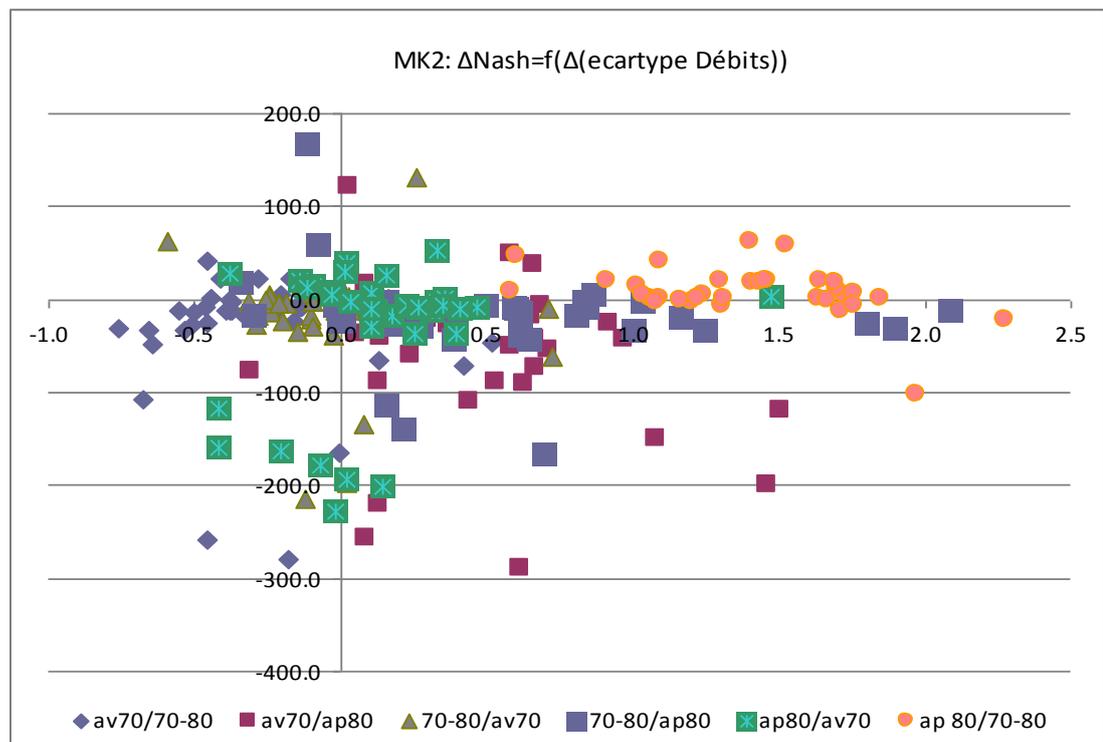
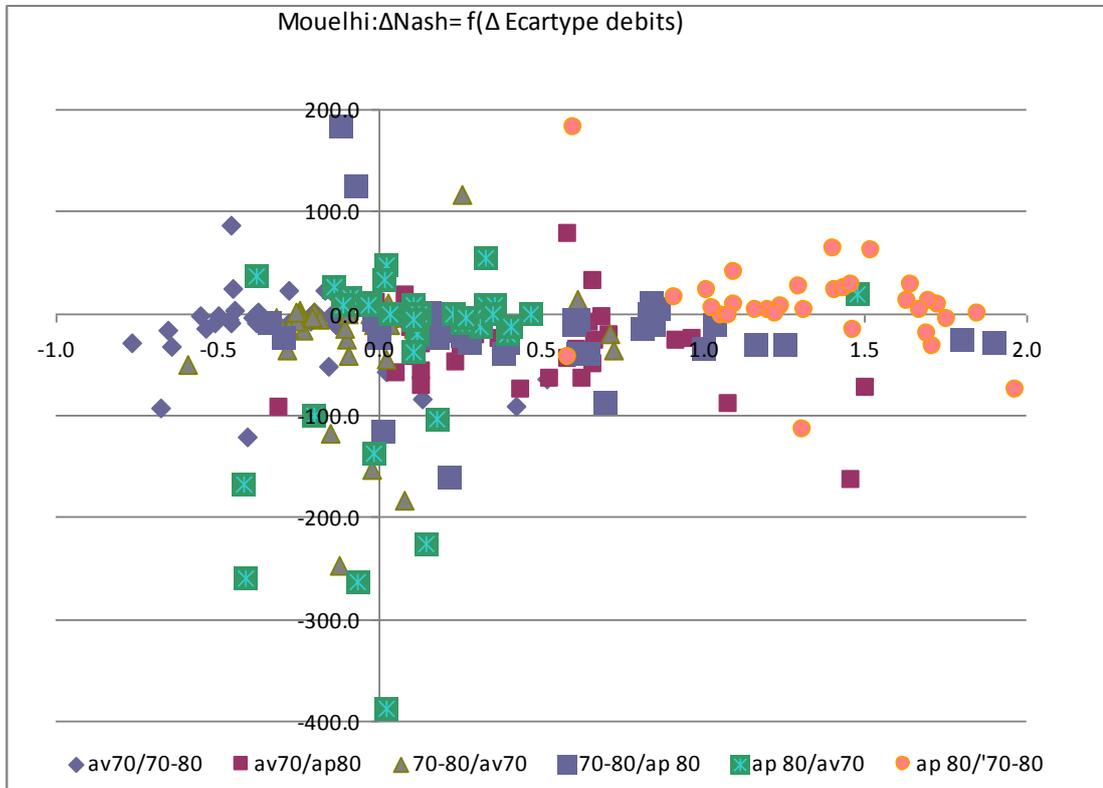
Annexe 8 : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des écoulements moyens entre périodes de calage et de validation



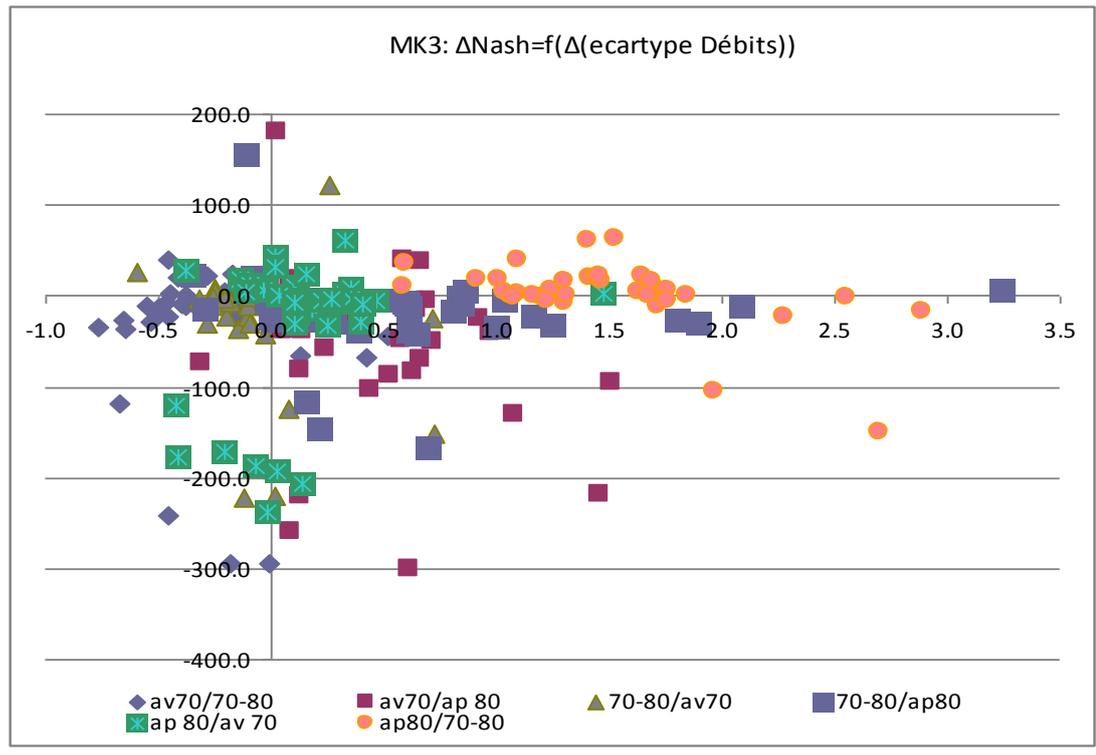
Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale



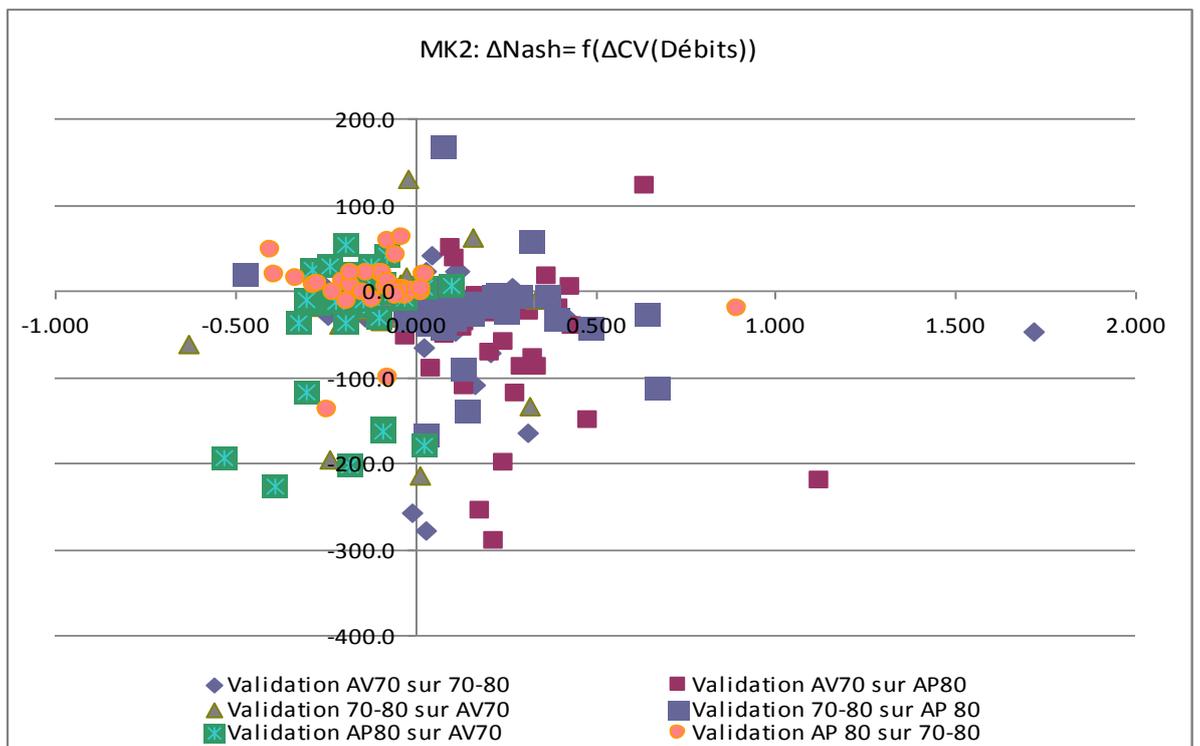
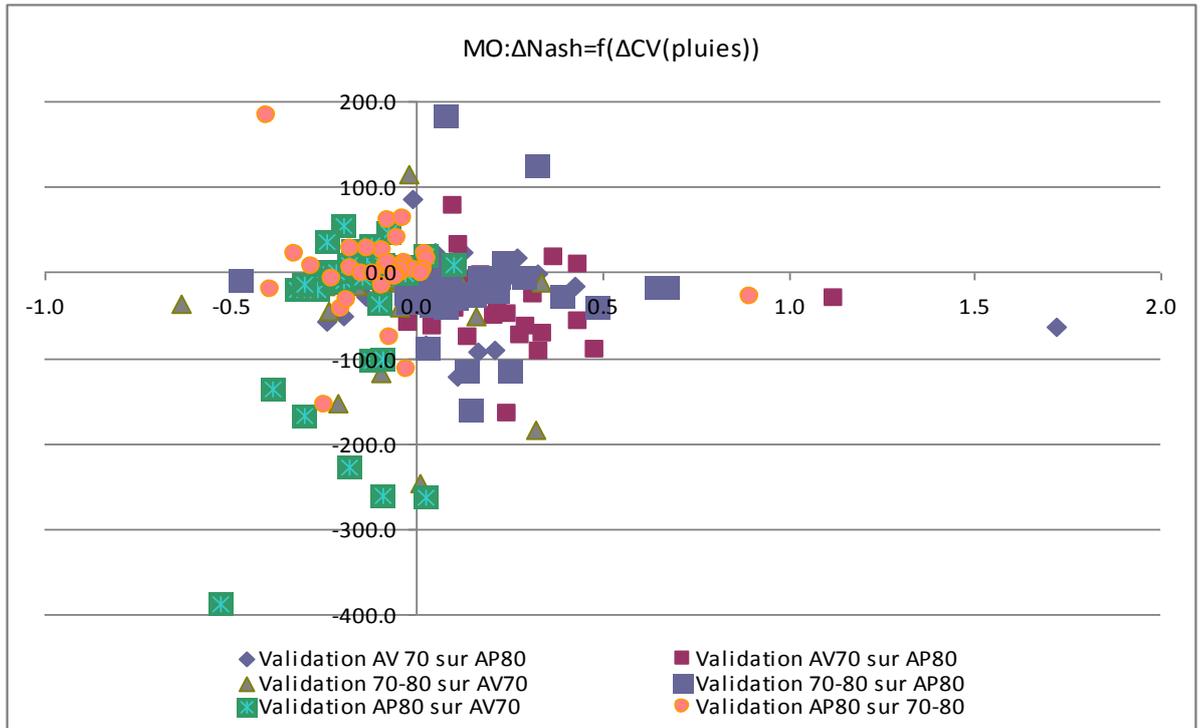
Annexe 9 : Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des écartypes des écoulements entre périodes de calage et de validation



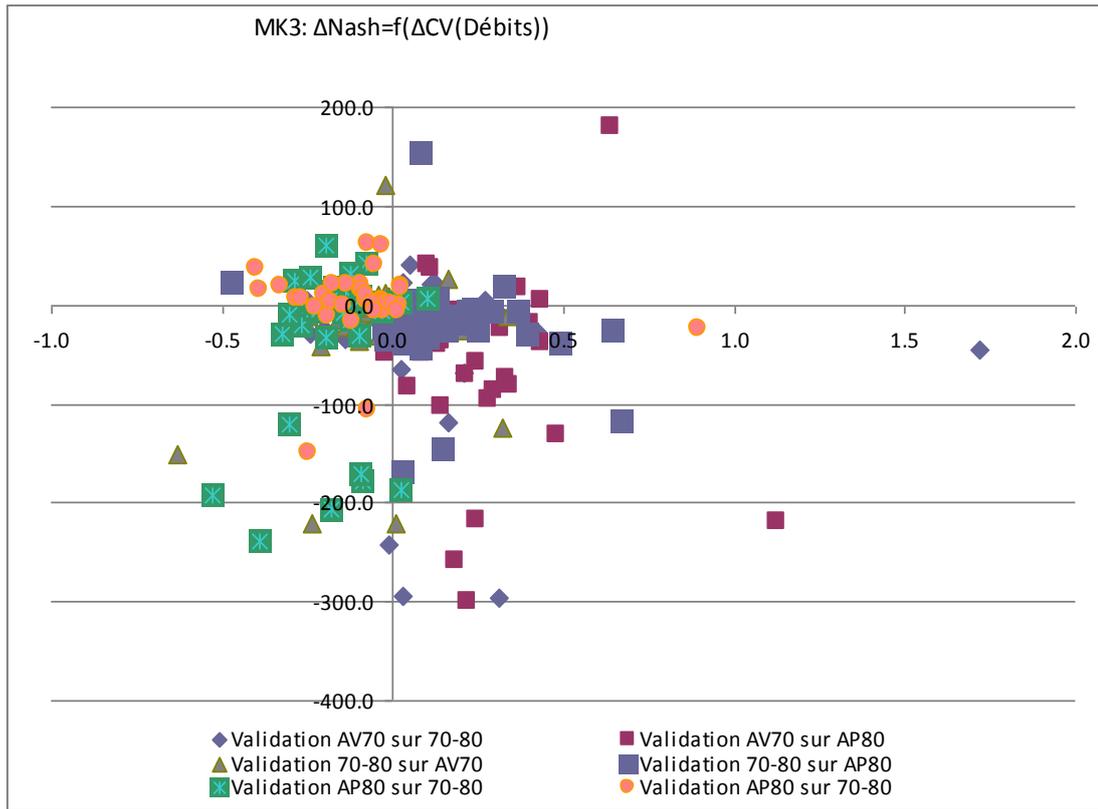
Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale



Annexe 10: Représentation des différences relatives entre les performances de calage et de validation en fonction des différences relatives des CV des écoulements entre périodes de calage et de validation



Etude de la transposabilité des paramètres de modèles hydrologiques dans un contexte de changement global- Cas de bassins de l'Afrique de l'Ouest et Centrale



Annexe 11 : Hydrogrammes des bassins étudiés

NB : Les pluies sont représenté en Histogramme en haut en noir et les débits en coube en bas en bleu.

