



HAL
open science

Apport de la Géostatistique à la Modélisation Hydrologique: Étude de Bassins Hydrologiques en Zone Soudano-Sahélienne

Salif Koné

► **To cite this version:**

Salif Koné. Apport de la Géostatistique à la Modélisation Hydrologique: Étude de Bassins Hydrologiques en Zone Soudano-Sahélienne. Hydrologie. Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée, ISFRA-USJPB, Bamako- Mali, 2015. Français. NNT: . tel-01166018

HAL Id: tel-01166018

<https://theses.hal.science/tel-01166018>

Submitted on 22 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

**INSTITUT SUPERIEUR DE FORMATION
ET DE RECHERCHE APPLIQUÉE - ISFRA**

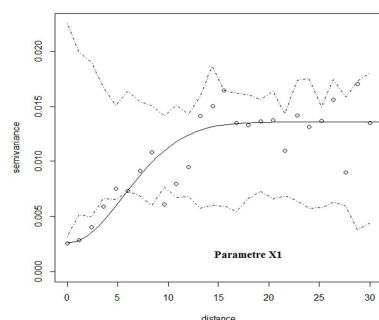
THESE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT SUPERIEUR DE FORMATION ET DE
RECHERCHE APPLIQUÉE**

Option : Hydrologie

**Thème : « Apport de la Géostatistique à la Modélisation Hydrologique :
Étude de Bassins Hydrologiques en Zone Soudano-Sahélienne »**

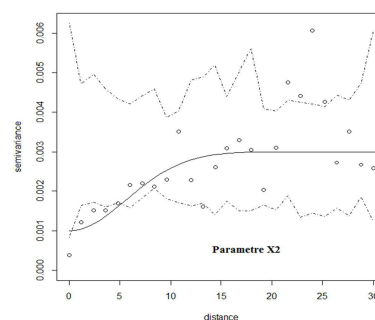


Présentée et Soutenue

Par

Salif KONÉ

Le 16 Juin 2015



Devant le Jury composé de :

- | | |
|--|------------------------|
| M. Adama Tiémoko DIARRA, Maître de Conférences, ENI-ABT, DG du SOMAPEP | Président |
| M. Fatogoma BAMBA, Maître de Conférences, ENI-ABT, Bamako, Mali | Directeur |
| M. Gil MAHÉ, Directeur de Recherche, IRD/HSM, Montpellier, France | Co-directeur/Examineur |
| M. Amadou Zanga TRAORÉ, Professeur ENI-ABT, Directeur de l'UFAE | Rapporteur |
| M. Oumar SOUMARÉ, Maître de Conférences, ENI-ABT, Bamako, Mali | Rapporteur |



Siaka et Haoua

Ana, Koumba, Habibatou

Remerciements

Toutes mes reconnaissances à M. Jean Emmanuel PATUREL, M. Alain DEZETTER et M. Gil MAHE pour l'initiation à la recherche qu'ils m'ont enseignée, et les aides qui ont conduits, en partie, à la définition des bases de nos travaux de recherche, depuis mon passage au laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM).

Mon plus sincère remerciement à M. Eric SERVAT, directeur de recherche de l'IRD, pour la confiance en m'acceptant dans le Master Recherche Eau et Environnement, et pour les conseils précieux qui ont conduits à l'amélioration de certaines démarches scientifiques qui sont reprises dans le présent document.

Que Nathalie ROUCHÉ, Sandra ARDOIN-BARDIN, Claudine DIEULIN et Agnès CRÈS, trouvent ici mes remerciements pour m'avoir aidée lors de mon initiation, aux données et méthodes de modélisation, et l'utilisation et la programmation informatique de la plateforme de simulation *Modmens de l'HSM*.

Mes remerciements vont à l'endroit de mon directeur de thèse M. Fatogoma BAMBA et au co-directeur/examineur M. Gil MAHÉ dont leur dévouements et encouragements ne m'ont pas fait défaut, et leurs critiques constructives accompagnées de celles de dévoués correcteurs ont fait de ce manuscrit de thèse un document de travail en modélisation hydrologique.

Mes sincères remerciements à M. Amadou Zanga TRAORE et à M. Oumar SOUMARE pour avoir accepté la charge de rapporter ces travaux.

Que M. Adama Tiémoko DIARRA trouve ici mes remerciements pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ce travail de mémoire.

Mes pensées vont à l'endroit de mes parents, les chefs de file de mes premiers instructeurs/institutrices et des personnes dont la générosité ont fait d'un jeune homme un scientifique au service de son pays. À mon grand frère, Boubacar Koné, et à sa famille, pour leurs attentions et accompagnements sociaux tout au long de cette thèse et durant mes absences du pays.

Ma reconnaissance va à l'endroit de mon établissement de travail, l'ENI-ABT, dont la contribution financière a été d'un soutien plus que symbolique dans l'accomplissement de ce travail scientifique ; et aussi à l'endroit de mon établissement d'inscription et de soutenance de cette thèse, l'ISFRA, pour leur aide administrative et leur encouragement. Ma reconnaissance à l'accompagnement accordé par mes collègues du Département de Géologie, et ainsi qu'à ceux accordés par tous les autres Départements et la direction de l'ENI-ABT, est sans faille.

Un grand merci à M. Djoba SACKO et à M. Daba COULIBALY pour leurs amitiés et leurs encouragements.

Cette thèse a été marquée par quelques communications et formations scientifiques à travers le monde ; et ceci, grâce à divers supports financiers dont je tiens à témoigner ma gratitude et ma reconnaissance à des bonnes volontés qui ont su rendre ces supports accessibles : l'aide Australienne à travers l'*AusAID* successivement sous l'impulsion de *SMI/UniQuest*, de *AfricaArray* et de *James Cook University* ; l'aide de l'UNESCO Paris ; l'aide Américaine à travers successivement *Harvard University* et *American Geophysical Union* ; et l'appui Allemand à travers successivement *l'Université d'Heidelberg* et l'institut *IASS* m'ont permis de faire différents voyages scientifiques en Afrique du Sud, en Australie, en Éthiopie, aux USA, au Mozambique, et en Allemagne.

Toute étude de modélisation hydrologique, comme celle entreprise pendant ces trois années de thèse, se base sur les données hydrologiques, hydroclimatiques, et même pédologiques. Ces données ont été tirées des centres/banques de données un peu partout dans le monde et je tiens ici à remercier pour mes accès répétés à ces données.

Abréviations et sigles

- AfricaArray** : une collaboration scientifique entre l’Afrique du Sud et l’Australie
- AGU** : *American Geophysical Union*
- AusAID** : *Australian Aid for International Development*
- BADC** : *British Atmospheric Data Center*
- CAG24** : 24^e Colloque sur la Géologie Africaine
- CAL.** : Calibration
- CRU** : *Climatic Research Unit*
- ENI-ABT** : École Nationale d’Ingénieurs – Abderhamane Baba Touré (Mali)
- EQM** : Erreur Quadratique Moyenne
- FAO** : Food and Agricultural Organization
- GIEC** : Groupe d’Experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat
- GR2M** : modèle du CEMAGREF: Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel
- HSM** : HydroSciences Montpellier (Laboratoire)
- IASS** : *Institute of Advanced Sustainability Studies* (Potsdam, en Allemagne)
- ICSU** : *International Council for Science*
- IPCC** : *Intergovernmental Panel on Climate Change*
- IRD** : Institut de Recherche pour le Développement
- ISFRA** : Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (Mali)
- ND** : modélisation/modèle Non-Distribuée
- (m).Modèles** : une intercomparaison/compétition de m nombre de versions de modèles
- OMM** : Organisation Mondiale de la Météorologie
- SD** : modélisation/modèle Semi-Distribuée
- SIEREM** : Système d’Informations Environnementales sur les Ressources en Eaux et leur Modélisation.
- SIMULHYD** : *Simulation of hydrological systems* (**Simulation** des Systèmes Hydrologiques)
- SMI** : *Sustainable Mineral Institute* (Brisbane, en Australie)
- SWA T** : *Soil and Water Assessment Tool*
- TDE (Robustesse)** : Technique du Double Échantillons
- UM2** : Université Montpellier 2 (France)
- UNESCO** : *United Nations Educational Scientific and Cultural Organization*

UniQuest : une organisation australienne

UVIC-ESCM : Earth System Climate Model (*University of Victoria*)

VAL1 : Validation d'un modèle utilisant son propre jeu de paramètres calibrés

VAL n AVERAGE : résultat moyenné de **n** validations d'un seul modèle avec **n** jeux différents de paramètres.

WBM : Water Balance Model (modèle de bilan hydrologique)

WEAP : *Water Evaluation and Planning System*

WHC : *Water Holding Capacity* (capacité de rétention du Sol en Eau)

Abstract

The studies of analysis, critics, and comparison of model versions in hydrology, started during the research in the university Montpellier 2 (Koné, 2007), contributed to the improvement of a conceptual and space-temporal model, of GR2M type (Model of the CEMAGREF - Genie Rural at 2 parameters at Monthly time step), while proposing a modification among others on the basis of geo-statistical considerations : the proposition of a weighting factor on different grids of a watershed, related to their “elementary contributions” to runoff’s discharges at the outlet of this hydro-system. The semi-distribution’s concept is to make the model input (entry) distributed as a grid whereas its output is not distributed. During this dissertation’s work at Montpellier some others proposed methodologies were tested with different versions (semi-distributed and non-distributed) of the GR2M hydrologic model, on a set of 16 watersheds as samples. Conceptual models present the advantage to be simple and close to the functioning of the hydrological system to *simulate*, yet, without respecting the whole physics of exchanges processes between this system’s compartments. These models are preferentially used in situations where observations data are rare or little reliable. Using these permits the production of data intended to the hiatuses’ filling in observation’s chronicles of rivers discharges, and also (to the production) of estimations as entries’ data of complex models, (semi-physical or physical basis). The present study compares some internal subtleties of different models versions, through their simulation results, as information sources that leading to the "perfecting" of these models, and enriches the literature in reproducible and/or adaptable methodologies on other models and in other contexts. GR2M model and one of its variants named here SimulHyd (**Simulation of Hydrological Systems**), in their semi-distributed and non-distributed versions, are in the centre of the present scientific research. One of the target objectives is on the one hand, after having recreated an effective version of the work tool, which is the numerical simulation framework, with its reconstituted hydro-climatic database, to test the propositions from the previous works (Koné, 2007) through the SimulHyd model, and on the other hand, to explore the geostatistics application possibilities in order to improve the hydrological modelling.

Key Words: Niger River, Modelling, GR2M/SimulHyd, Geostatistics, discharge coefficient.

Résumé

L'étude d'analyse, de critique, et de comparaison de versions de modèle en hydrologie, débutée pendant les recherches à l'Université Montpellier 2 (Koné, 2007), a contribué à l'amélioration d'un modèle conceptuel, spatio-temporel, de type GR2M (Modèle du CEMAGREF - Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel), en proposant entre autres une modification sur la base de considérations géo-statistiques : la proposition d'un coefficient de pondération des contributions « élémentaires », des différentes mailles d'études d'un bassin versant, au débit d'écoulement à l'exutoire de ce dernier. Ce travail de mémoire a vu aussi la proposition de certaines méthodologies testées avec différentes versions (semi-distribuée et non-distribuée) du modèle GR2M sur un jeu de 16 échantillons de bassins versants hydrologiques. Les modèles conceptuels présentent l'avantage d'être simple et proche du fonctionnement du système hydrologique à modéliser sans pourtant respecter toute la physique des processus d'échanges entre les compartiments de ce système. Ces modèles sont préférentiellement utilisés dans des situations où les données d'observations sont rares ou peu fiables. Leur utilisation permettent la production de données destinées au comblement de lacunes des chroniques d'observations de débits et aussi (à la production) d'estimations comme données d'entrées des modèles complexes ; (à base semi-physique ou physique). La présente étude confronte les subtilités internes de différentes versions de modèles, à travers leurs résultats de simulation, comme source d'information pouvant conduire au « perfectionnement » de ces modèles, et enrichit la littérature en méthodologies reproductibles et/ou adaptables sur d'autres modèles et dans d'autres contextes. Le modèle GR2M et l'une de ces variantes nommée ici SimulHyd (**Simulation des Systèmes Hydrologiques**), dans leurs versions semi-distribuées et non-distribuées, sont au centre de la présente recherche scientifique. L'un des objectifs visé est d'une part, après avoir récréée une version performante de l'outil de travail qui est la plateforme de simulation numérique avec sa base de données hydro-climatiques reconstituées, de tester les propositions issues des travaux antérieurs (Koné, 2007) à travers le modèle SimulHyd et d'autre part, d'explorer la possibilité d'application de la géostatistique en vue d'améliorer la modélisation hydrologique.

Mot clés : Niger, Modélisation, GR2M/SimulHyd, Géostatistique, Tarissement.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	<i>iii</i>
<i>Abréviations et sigles</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>vii</i>
<i>Résumé</i>	<i>viii</i>
<i>Table des matières</i>	<i>ix</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xiii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xiv</i>
<i>Liste des encadrés</i>	<i>xviii</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>2</i>
<i>1. Chapitre 1 : Modèles et Modélisations Hydrologiques</i>	<i>5</i>
1.1 Introduction et définition des termes	5
1.1.1 Introduction	5
1.1.2 Définition des termes	6
1.1.2.1 Cycle hydrologique	6
1.1.2.2 Bassin versant	6
1.2 Modèles hydrologiques – classification et généralité.....	9
1.2.1 La modélisation à base physique (ou mécaniste)	9
1.2.2 La modélisation conceptuelle.....	10
1.2.3 La modélisation en boîte noire.....	11
1.3 Méthodologie de la Modélisation Hydrologique.....	11
1.3.1 Calibration (optimisation et notion d'équifinalité).....	12
1.3.2 Validation de modèles, et sensibilité aux données d'entrées	12
1.3.3 Simulation par le modèle, et données d'entrées pour projection.....	13
1.3.4 Erreurs et Incertitudes de Modélisation.....	13
1.3.5 Notion de non-distribution et de semi-distribution en modélisation	14
1.4 Critères de performance de modèle.....	16
1.4.1 Critères de Nash	16
1.4.2 Critères d'appréciation du bilan volumique	19
1.4.3 Critère de « Nash-Garrick »	20
1.4.4 Approche de la robustesse des modèles (TDE).....	21
1.5 Géostatistique et prédiction de paramètres de modèles hydrologiques.....	22
1.6 Conclusion et perspectives.....	22

2. <i>Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude et des données</i>	25
2.1 Localisation	25
2.2 Situation Hydrométéorologique de la zone d'étude	26
2.3 Régime hydrologique	27
2.4 Données d'entrées et de sortie des modèles	28
2.4.1 Données Pluies, et Processus d'Extraction	30
2.4.2 Données ETP, et processus d'extraction	31
2.4.3 Données Sol, et processus d'extraction	32
2.4.4 Données débits, et processus de comblement de lacunes	33
3. <i>Chapitre 3. Validation d'une Modélisation sur le fleuve Niger : le modèle SimulHyd</i> ...	36
3.1 Préparations des données de la Modélisation	36
3.2 Le modèle SimulHyd	37
3.2.1 Historique du modèle GR2M et mise en place de SimulHyd	37
3.2.2 Proposition de mise en place de GR2M.1/X1*WHC (ou SimulHyd)	38
3.2.3 Définitions Mathématiques et schéma des modèles GR2M et SimulHyd	40
3.2.3.1 Modulation des données entrée	40
3.2.3.2 Neutralisation d'une portion des données d'entrée	41
3.2.3.3 Impact de Pn sur le niveau initial H du réservoir sol	41
3.2.3.4 Impact de En sur le nouveau niveau H1 du réservoir sol	41
3.2.3.5 Partition de l'eau entre l'écoulement directe et gravitaire	41
3.3 Stratégie de modélisation adoptée	41
3.3.1 Résultats tests issus des modèles étudiés	42
3.3.2 Interchangeabilité de jeu de paramètres entre versions des Modèles	45
3.4 Choix d'un model pivot et son jeu de paramètres optimal	52
3.4.1 Choix d'un modèle pivot	52
3.4.2 Jeu de paramètres optimal pour le model pivot	54
3.5 Protocole et Résultats d'Intercomparaison de versions de modèle	59
3.5.1 Justification	59
3.5.2 Méthodologie et composantes	60
3.5.3 Le protocole de la double calibration	60
3.5.4 Structure d'un Tableau du protocole d'intercomparaison	61
3.5.5 Protocole de Simulation	63
3.5.6 Résultats de comparaison/intercomparaison des modèles	64
3.5.6.1 Présentation classique des résultats de comparaison	64
3.5.6.2 Tableau d'Intercomparaison des modèles	66
3.5.6.3 « Approche Totalisante » sur les seize bassins versants	68
3.5.6.4 « Approche par Bassin » des Résultats d'Intercomparaison	71
3.6 Quelques communications scientifiques relatives au travail de thèse	73
4. <i>Chapitre 4. Utilisation de la Géostatistique pour l'Amélioration de la Modélisation Hydrologique</i>	75

4.1	« Protocole inter-modèles » et l'établissement d'un coefficient de pondération en Modélisation Semi-distribuée	75
4.2	« Protocole inter- bassins ».....	80
4.3	Extension Géostatistique du protocole <i>Inter-bassins</i> : essai d'estimations de paramètres des modèles hydrologiques	82
4.3.1	Une méthodologie géostatistique d'estimation des paramètres des modèles hydrologiques	83
4.3.1.1	Type de variable et statistique globale	83
4.3.1.2	Variogramme et modélisation géostatistique.....	84
4.3.1.3	Estimation et Simulation géostatistique des paramètres de modèles hydrologiques.....	92
4.3.2	Résultats et validation de la méthodologie « hydro-géostatistique ».....	100
4.3.3	Synthèse sur la méthodologie « hydro-géostatistique ».....	105
4.3.4	Variante « hydro-géostatistique » utilisant les espaces <i>Nash/X1/X2-WHC</i>	106
4.3.4.1	<i>Variante 1</i> de la méthodologie « hydro-géostatistique » et résultats d'Application.....	106
4.3.4.2	<i>Variante 2</i> de la méthodologie « hydro-géostatistique » et résultats d'Application.....	110
4.3.4.3	<i>Variante 3</i> de la méthodologie « hydro-géostatistique » et résultats d'Application.....	114
4.4	Formule d'atténuation d'incertitudes, et application	115
4.4.1	Établissement de la formule d'atténuation d'incertitudes	115
4.4.2	Résultats d'application de la formule d'atténuation	117
4.5	Expressions analytiques du Modèle SimulHyd.....	119
4.6	Résumé relatif à la mise en place de la méthodologie « hydro-géostatistique ».....	122
5.	<i>Chapitre 5. Application de la Modélisation à des Situations Futures et Performances Comparées des Modèles</i>	125
5.1	Performance comparée des modèles à reproduire le débit maximal observé	125
5.1.1	Approche régionale (par station hydrométrique).....	126
5.1.2	Approche ponctuelle (par événement hydrométrique).....	131
5.2	Application de la Modélisation à des Situations Futures et Performances Comparées des Modèles 134	
5.2.1	Données et Protocole de simulation.....	134
5.2.2	Projection aux horizons et implication de l'interchangeabilité des paramètres entre versions de modèle	134
5.3	Processus de sub-surface et nécessaire adaptation du modèle SimulHyd	138
5.3.1	Fondement pratique	138
5.3.2	Processus de sub-surface et sensibilité du modèle SimulHyd	141
5.3.2.1	Calcul du coefficient de tarissement sur sorties des modèles	141
5.3.2.2	Implication des résultats pour la modélisation.....	150
5.4	Remarques conclusives sur le chapitre 5.....	151
	<i>Conclusion générale et Perspectives</i>	154
	<i>Références</i>	156
	<i>Annexes</i>	A

Annexe 1: Script.....	I
Annexes 2: Structure des Tableaux et Performance de simulation des modèles.....	IV
Annexes 3: performance de simulation par les modèles, « approche totalisante »	XXI
Annexes 4: méthode d'atténuation d'incertitudes, résultats	XXXVIII
Annexes 5: Résultats d'Intercomparaison des versions de modèles, présentation en Tableau.....	LIV
Annexes 6 : Interchangeabilité de jeux de paramètres entre versions de modèle	LXXXVIII
Annexes 7 : Pluies mensuelles observées sur les bassins (en haut), et débits observés et simulés (bas) ...	CVI
Annexes 8 : Simulation des débits maximum par les versions de modèles	CXIV
Annexes 9 : Projections hydrométriques aux Horizons 2050 et 2080.....	CXVIII
Annexes 10 : Abstracts et Posters de conférences	CXX

Liste des tableaux

TABLEAU 3-1 : RÉCAPITULATIF DES BASSINS VERSANTS ET DONNÉES CARACTÉRISTIQUES ..	36
TABLEAU 3-2 : MODÉLISATION NON-DISTRIBUÉE SUR LE SOUS-BASSIN À KOULIKORO (A)	44
TABLEAU 3-3 : MODÉLISATION NON-DISTRIBUÉE SUR LE SOUS-BASSIN À KOULIKORO (B)	45
TABLEAU 3-4 : MODÉLISATION SEMI-DISTRIBUÉE SUR LE SOUS-BASSIN À KOULIKORO (A)	47
TABLEAU 3-5 : MODÉLISATION SEMI-DISTRIBUÉE SUR LE SOUS-BASSIN À KOULIKORO (B)	48
TABLEAU 3-6 : MODÉLISATION NON-DISTRIBUÉE VS SEMI-DISTRIBUÉE (GR2M)	49
TABLEAU 3-7 : MODÉLISATION NON-DISTRIBUÉE VS SEMI-DISTRIBUÉE (SIMULHYD).....	50
TABLEAU 3-8 : SENSIBILITÉ MODÉLISATION NON-DISTRIBUÉE VS SEMI-DISTRIBUÉE, GR2M...	51
TABLEAU 3-9 : SENSIBILITÉ MODÈLES NON-DISTRIBUÉE VS SEMI-DISTRIBUÉE, SIMULHYD....	52
TABLEAU 3-10 : MODÉLISATION GR2M NON-DISTRIBUÉE VS SIMULHYD SEMI-DISTRIBUÉE	53
TABLEAU 3-11 : TABLEAU D'INTERCOMPARAISON DES MODÈLES «MÉTHODES DES SCORES»	62
TABLEAU 3-12 : RÉSULTATS D'INTERCOMPARAISON SUR LE BASSIN VERSANT KOULIKORO ..	67
TABLEAU 3-13 : RÉSULTATS D'INTERCOMPARAISON SUR SEIZE BASSINS VERSANTS	69
TABLEAU 4-1 : CORRÉLATION ENTRE DISPERSIONS RELATIVES DE WHC ET DIFFÉRENCES DE PERFORMANCES RELATIVES (A).....	77
TABLEAU 4-2 : CORRÉLATION ENTRE DISPERSION RELATIVE DE WHC ET DIFFÉRENCE DE PERFORMANCE RELATIVE (B)	78
TABLEAU 4-3 : CORRÉLATION ENTRE DISPERSION RELATIVE DE WHC ET DIFFÉRENCE DE PERFORMANCE RELATIVE (C)	78
TABLEAU 4-4 : CARACTÉRISTIQUES DES VARIOGRAMMES (AJUSTEMENT DES MODÈLES GAUSSIENS)	86
TABLEAU 4-5 : PERFORMANCE EN CALIBRATION VERSUS ESTIMATION « HYDRO- GÉOSTATISTIQUE » DES PARAMÈTRES.	101
TABLEAU 4-6 : PERFORMANCE EN CALIBRATION VERSUS ESTIMATION « HYDRO- GÉOSTATISTIQUE » VARIANTE 1.....	110
TABLEAU 4-7 : PERFORMANCE EN CALIBRATION VERSUS ESTIMATION « HYDRO- GÉOSTATISTIQUE » VARIANTE 2.....	113
TABLEAU 4-8 : PERFORMANCE EN CALIBRATION VERSUS ESTIMATION « HYDRO- GÉOSTATISTIQUE » VARIANTE 3.....	114

Liste des figures

FIGURE 1-1 : LE CYCLE HYDROLOGIQUE	7
FIGURE 1-2 : LES COMPARTIMENTS ET LES ÉCHANGES DE FLUX DU CYCLE HYDROLOGIQUE..	7
FIGURE 1-3 : BASSIN VERSANT TOPOGRAPHIQUE, DÉLIMITÉ PAR LA LIGNE DE CRÊTE DE LA TOPOGRAPHIE	8
FIGURE 1-4 : DISTINCTION ENTRE BASSIN VERSANT RÉEL (GÉOLOGIQUE) ET BASSIN VERSANT TOPOGRAPHIQUE	8
FIGURE 1-5 : SCHÉMATISATION DE CLASSIFICATION DES INCERTITUDES,.....	14
FIGURE 1-6 : MODÉLISATION SEMI-GLOBALE.....	16
FIGURE 2-1: SEIZE SOUS-BASSINS VERSANTS DU NIGER SUPÉRIEUR ET AFFLUENTS.....	25
FIGURE 2-2: PROFIL DU FLEUVE NIGER ET SES AFFLUENTS.....	26
FIGURE 2-3 : RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES DIFFÉRENTS TYPES DE CLIMAT.....	27
FIGURE 2-4 : PROJECTION SAISONNIÈRE DE DÉBITS MENSUELS SUR LE BASSIN DU FLEUVE NIGER [À MOPTI].....	29
FIGURE 2-5 : HYDROGRAPHES MOYEN (EN M3.S-1) AUX HORIZONS 2020, 2050, ET 2080 (HORIZONS SCENARIO) COMPARÉE À CELUI OBSERVÉ SUR LA PÉRIODE 1971 – 1995.....	30
FIGURE 2-6 : INDEX DE LA PLUVIOMÉTRIE SUR LE BASSIN DU FLEUVE NIGER.....	31
FIGURE 2-7: LA PLUVIOMÉTRIE ET LES DÉBITS OBSERVÉ ET SIMULÉ (AVEC GR2M) À LA STATION DE KOULIKORO.....	34
FIGURE 3-1 : SCHÉMA CONCEPTUEL DES MODÈLES GR2M ET SIMULHYD.....	40
FIGURE 3-2 : INJECTION DE MOY. DE PARAMÈTRE DANS LA MODÉLISATION (PÉRIODE 1 À 2).56	56
FIGURE 3-3 : INJECTION DE MOY. DE PARAMÈTRE DANS LA MODÉLISATION (PÉRIODE 2 À 1).56	56
FIGURE 3-4: INTERCHANGEABILITÉ DE JEU DE PARAMÈTRES DE VERSIONS DE MODÈLES HYDROLOGIQUES (PÉRIODE 1 À 2).	57
FIGURE 3-5: INTERCHANGEABILITÉ DE JEU DE PARAMÈTRES DE VERSIONS DE MODÈLES HYDROLOGIQUES (PÉRIODE 2 À 1).	58
FIGURE 3-6: PRÉSENTATION CLASSIQUE DES RÉSULTATS DE COMPARAISON DES VERSIONS DES MODÈLES	65
FIGURE 3-7 : RÉSULTATS D'INTERCOMPARAISON « APPROCHE TOTALISANTE » SUR SEIZE BASSINS VERSANTS.....	70
FIGURE 3-8 : RÉSULTATS D'INTERCOMPARAISON « APPROCHE PAR BASSIN ».....	72
FIGURE 3-9 : CARTE D'INTERCOMPARAISON DE LA ZONE D'ÉTUDE (SOUS-BASSINS DU HAUT NIGER).....	73
FIGURE 4-1 : « PROTOCOLE INTER-MODÈLES » ENTRE GR2M SEMI-DISTRIBUÉE ET SIMULHYD NON-DISTRIBUÉE.	79
FIGURE 4-2 : « PROTOCOLE INTERBASSINS UTILISANT SIMULHYD SEMI-DISTRIBUÉE AVEC COEFFICIENT DE PONDÉRATION SUR WHC».....	80

FIGURE 4-3 : « PROTOCOLE INTERBASSINS UTILISANT SIMULHYD SEMI-DISTRIBUÉE SANS COEFFICIENT DE PONDÉRATION SUR WHC ».....	81
FIGURE 4-4 : ESPACE « NASH-WHC » DE SEIZE BASSINS VERSANTS ET QUATRE VERSIONS DE MODÈLE HYDROLOGIQUE.	83
FIGURE 4-5 : POINT-BASSINS DANS L'ESPACE DES PARAMÈTRES (X1, X2).	84
FIGURE 4-6 : VARIOGRAMME EXPÉRIMENTAL ET THÉORIQUE.....	85
FIGURE 4-7 : STATISTIQUE EXPLORATOIRE DU PARAMÈTRE X1, ET NORMALITÉ DE SA DISTRIBUTION.....	87
FIGURE 4-8 : STATISTIQUE EXPLORATOIRE DU PARAMÈTRE X2, ET NORMALITÉ DE SA DISTRIBUTION.....	88
FIGURE 4-9 : STATISTIQUE EXPLORATOIRE SPATIALE ET AMÉLIORATION DU VARIOGRAMME EXPÉRIMENTAL POUR LE PARAMÈTRE X1.....	89
FIGURE 4-10 : STATISTIQUE EXPLORATOIRE SPATIALE ET AMÉLIORATION DU VARIOGRAMME EXPÉRIMENTAL POUR LE PARAMÈTRE X2.....	90
FIGURE 4-11 : VARIOGRAMMES OMNIDIRECTIONNELS ET DIRECTIONNELS DES PARAMÈTRES DE MODÈLES HYDROLOGIQUES.	91
FIGURE 4-12 : RÉSULTATS DE SIMULATION PAR KRIGEAGE DU PARAMÈTRE X1 DES MODÈLES GR2M ET SIMULHYD.....	92
FIGURE 4-13 : RÉSULTATS DE SIMULATION PAR KRIGEAGE DU PARAMÈTRE X2 DES MODÈLES GR2M ET SIMULHYD.....	93
FIGURE 4-14 : MÉTHODE D'ESTIMATION DE L'ÉCART RELATIF DES PERFORMANCES D'UN MODÈLE.....	94
FIGURE 4-15 : ESTIMATION ET SIMULATION DU PARAMÈTRE X1 PAR KRIGEAGE.....	95
FIGURE 4-16 : ESTIMATION ET SIMULATION DU PARAMÈTRE X2 PAR KRIGEAGE.....	96
FIGURE 4-17 : ESTIMATION D'ÉCART RELATIF DE PERFORMANCES DES QUATRE VERSIONS DE MODÈLE HYDROLOGIQUE UTILISÉES POUR LE KRIGEAGE DES PARAMÈTRES X1 ET X2... ..	97
FIGURE 4-18 : ESTIMATION DE L'ÉCART RELATIF DES PERFORMANCES DE DEUX VERSIONS DE MODÈLE HYDROLOGIQUE UTILISÉES LORS DE LA VALIDATION CROISÉE.....	98
FIGURE 4-19 : ESTIMATION DE L'ÉCART RELATIF DES PERFORMANCES DES VERSIONS COMBINÉES DE MODÈLE HYDROLOGIQUE.....	99
FIGURE 4-20 : SAISONNALITÉ DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS, À LA STATION DE KOUROUSSA (EN HAUT : SUR 1950-1995) ET À CELLE DE FARANAH (EN BAS : 1969-1995). ..	100
FIGURE 4-21 : VALIDATIONS CROISÉES DANS L'ESPACE « NASH-WHC ».....	103
FIGURE 4-22 : ERREUR D'ESTIMATION COMPARÉE, À L'ISSUE DES VALIDATIONS CROISÉES. ..	104
FIGURE 4-23 : VARIOGRAMME OMNIDIRECTIONNEL DU PARAMÈTRE X2 DANS « X1-WHC ».. ..	106
FIGURE 4-24 : KRIGEAGE (À GAUCHE) ET ERREUR DE KRIGEAGE (À DROITE) DU PARAMÈTRE X2, DANS L'ESPACE « X1-WHC ».....	107
FIGURE 4-25 : VALIDATIONS CROISÉES ET ERREURS D'ESTIMATION COMPARÉES, DU PARAMÈTRE X2 DANS L'ESPACE « X1-WHC ».....	108

FIGURE 4-26 : SAISONNALITÉ DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS (VARIANTE 1), À LA STATION DE KOUROUSSA (EN HAUT : SUR 1950-1995) ET À CELLE DE FARANAH (EN BAS : SUR 1969-1995).	109
FIGURE 4-27 : VARIOGRAMME OMNIDIRECTIONNEL DU PARAMÈTRE X2 DANS L'ESPACE « X1-WHC »	110
FIGURE 4-28 : KRIGEAGE (À GAUCHE) ET ERREUR DE KRIGEAGE (À DROITE) DU PARAMÈTRE X1, DANS L'ESPACE « X2-WHC »	111
FIGURE 4-29 : VALIDATIONS CROISÉES ET ERREURS D'ESTIMATION COMPARÉES, DU PARAMÈTRE X1 DANS L'ESPACE « X2-WHC »	112
FIGURE 4-30 : SAISONNALITÉ DES DÉBITS OBSERVÉS ET SIMULÉS (VARIANTE 2), À LA STATION DE KOUROUSSA (EN HAUT : SUR 1950-1995) ET À CELLE DE FARANAH (EN BAS : SUR 1969-1995).	113
FIGURE 4-31 : « MÉTHODE D'ATTÉNUATION D'INCERTITUDES, ET SIMULHYD SEMI-DISTRIBUÉE AVEC COEFFICIENT DE PONDÉRATION WHC »	117
FIGURE 4-32 : « MÉTHODE D'ATTÉNUATION D'INCERTITUDES, ET SIMULHYD SEMI-DISTRIBUÉE SANS COEFFICIENT DE PONDÉRATION WHC »	118
FIGURE 5-1 : HYDROGRAMME-TYPE D'UN COURS D'EAU DE RÉGIME SAHÉLIEN.	125
FIGURE 5-2 : DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ AVEC SIX VERSIONS DE MODÈLE (TROIS DE GR2M ET TROIS DE SIMULHYD).	126
FIGURE 5-3 : DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ. RÉSULTATS MOYENNÉS DE TROIS VERSIONS DE GR2M ET DE TROIS VERSIONS DE SIMULHYD.	127
FIGURE 5-4 : DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ EN NON-DISTRIBUÉE.	128
FIGURE 5-5 : DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ EN SEMI-DISTRIBUÉE.	128
FIGURE 5-6 : DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ EN SEMI-DISTRIBUÉE ANCIENNE	129
FIGURE 5-7 : DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ PAR MOYENNE DE VERSIONS DE MODÈLE	130
FIGURE 5-8 : STATION DE KOULIKORO, DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ AVEC SIX VERSIONS DE MODÈLE.	131
FIGURE 5-9 : STATION DE KOULIKORO, DIFFÉRENCE RELATIVE ENTRE LE DÉBIT MAX OBSERVÉ ET CELUI CALCULÉ. RÉSULTATS MOYENNÉS DE TROIS VERSIONS DE GR2M ET DE TROIS VERSIONS DE SIMULHYD.	132
FIGURE 5-10 : QUINZE ÉVÈNEMENTS MAJEURS SUR LA PÉRIODE 1907-1999 SUR LE FLEUVE NIGER (À KOULIKORO).	133
FIGURE 5-11 : MODÈLES HYDROLOGIQUES GR2M NON-DISTRIBUÉE ET SIMULHYD NON-DISTRIBUÉE POUR PROJECTION SAISONNIÈRES DE DÉBITS MENSUELS SUR LE BASSIN DU FLEUVE NIGER À LA STATION DE KOULIKORO (AU MALI) , À L'HORIZON 2020.	135

FIGURE 5-12 : MODÈLES HYDROLOGIQUES GR2M NON-DISTRIBUÉE ET SIMULHYD NON-DISTRIBUÉE POUR PROJECTIONS SAISONNIÈRES DE DÉBITS MENSUELS SUR LE BASSIN DU FLEUVE NIGER À LA STATION DE KOULIKORO (AU MALI), À L'HORIZON 2050.....	136
FIGURE 5-13 : MODÈLES HYDROLOGIQUES GR2M NON-DISTRIBUÉE ET SIMULHYD NON-DISTRIBUÉE POUR PROJECTIONS SAISONNIÈRES DE DÉBITS MENSUELS SUR LE BASSIN DU FLEUVE NIGER À LA STATION DE KOULIKORO (AU MALI) , À L'HORIZON 2080.....	137
FIGURE 5-14 : CHANGEMENT DE L'ÉCOULEMENT ANNUEL MOYEN (CALCULÉE EN %).....	137
FIGURE 5-15 : VARIATION DE DÉBITS (LIGNE) ET DE PLUIE (BARRE) SUR TROIS BASSINS EN AFRIQUE DE L'OUEST.	139
FIGURE 5-16 : ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE TARISSEMENT SUR CINQ COURS D'EAU EN AFRIQUE DE L'OUEST	140
FIGURE 5-17 : ÉVOLUTION DE 3 VARIABLES SUR LE BASSIN VERSANT DU BANI À DOUNA. ...	140
FIGURE 5-18 : CRUE DE 1994 ET COMPARAISON AVEC UNE CRUE ÉQUIVALENTE.	141
FIGURE 5-19 : ESTIMATION DE COEFFICIENTS DE TARISSEMENT SUR LE NIGER (À KOULIKORO) ET SUR LE BANI (À DOUNA).....	143
FIGURE 5-20 : ESTIMATION DE COEFFICIENTS DE TARISSEMENT SUR LE FLEUVE NIGER (À KOUROUSSA).....	145
FIGURE 5-21 : ESTIMATION DE COEFFICIENTS DE TARISSEMENT SUR LE FLEUVE NIGER (À KOUROUSSA), VARIANTES.	146
FIGURE 5-22 : ESTIMATION DU COEFFICIENT DE TARISSEMENT SUR LE NIANDAN (À BARO). 147	
FIGURE 5-23 : ESTIMATION DE COEFFICIENTS DE TARISSEMENT SUR LE MILO (À KANKAN). 148	
FIGURE 5-24 : ESTIMATION DE COEFFICIENTS DE TARISSEMENT SUR LE SANKARANI (À MANDIANA).....	149
FIGURE 5-25 : INDEX PLUVIOMÉTRIQUE SUR LE BASSIN DU HAUT NIGER (À KOULIKORO). ...	150

Liste des encadrés

ENCADRÉ 1-1 : CRITÈRE DE NASH	17
ENCADRÉ 1-2 : VARIANTE DE PERRIN DU CRITÈRE DE NASH	17
ENCADRÉ 1-3 : FORME LOGARITHMIQUE DU CRITÈRE DE NASH	18
ENCADRÉ 1-4 : FORME RACINE CARRÉE DU CRITÈRE DE NASH	18
ENCADRÉ 1-5 : CHANGEMENT D'ÉCHELLE DES PARAMÈTRES LORS DE L'OPTIMISATION	18
ENCADRÉ 1-6 : DIVERS COEFFICIENTS D'APPRÉCIATION DU BILAN VOLUMIQUE	19
ENCADRÉ 1-7: CRITÈRE NASH-GARRICK	21
ENCADRÉ 1-8: TECHNIQUE DU DOUBLE ÉCHANTILLONS (TDE)	22
ENCADRÉ 3-1 : ADAPTATION DES FICHIERS WHC POUR SIMULER « GR3M SEMI-DISTRIBUÉE »	39
ENCADRÉ 3-2 : PROTOCOLE DE LA « DOUBLE CALIBRATION »	61
ENCADRÉ 4-1 : RÈGLE DE PONDÉRATION DANS GR2M ET SIMULHYD SEMI-DISTRIBUÉES	77
ENCADRÉ 4-2 : SIMPLIFICATION DE LA FORMULE D'ATTÉNUATION D'INCERTITUDES	115
ENCADRÉ 4-3 : FORMULE D'ATTÉNUATION D'INCERTITUDES (KONÉ, 2007)	116
ENCADRÉ 4-4 : EXPRESSION ANALYTIQUE DE L'ÉVOLUTION DU « RÉSERVOIR SOL » DE SIMULHYD	120
ENCADRÉ 4-5 : EXPRESSION DE L'ÉVOLUTION DU « RÉSERVOIR GRAVITAIRE » ET DU DÉBIT DE SIMULHYD	121

INTRODUCTION GENERALE

Changes in many extreme weather and climate events have been observed since about 1950. some of these changes have been linked to human influences, including a decrease in cold temperature extremes, an increase in warm temperature extremes, an increase in extreme high sea levels and an increase in the number of heavy precipitation events in a number of regions. (IPCC, 2014)

Introduction générale

Cadre de l'étude et problématique. Une prise en main des outils de modélisation du cycle de l'eau et des bases de données hydrologiques/hydroclimatiques par les équipes de recherche des pays riverains des grands fleuves est un garant dans les problématiques de gestion des ressources en eau et de prévision de leur disponibilités dans le contexte du Changement Climatique (CC). La présente étude concerne le Bassin du fleuve Niger à son exutoire à Koulikoro (en république du Mali) et quinze autres sous-bassins commun à ce fleuve et à ses affluents. Ce bassin couvre une partie de la Côte d'Ivoire, de la Guinée, et du Mali, en Afrique de l'Ouest. Dans le contexte du changement climatique et sous le *forcing* de la panoplie des technologies de manipulation climatique sous le terme « l'ingénierie du climat ou la géo-ingénierie », la réponse des systèmes hydrologiques, et leur évolution tenant compte de différents scénarios climatiques, devient un déterminant des conditions de bien être, présent et future, des sociétés et de l'environnement. L'accélération récente du changement climatique a produit un effet de solidarité qui a conduit à un accès de plus en plus aisé et facile à l'information scientifique associée au climat, à ses impacts, et à la production de bases de données hydrologiques/hydroclimatiques de plus en plus interconnectées et diverses. Les derniers rapports du Panel Intergouvernemental sur le Changement Climatique (IPCC ou GIEC) pointent vers ces données d'observation en incessantes proliférations.

Problématique et objectifs. Ce travail se focalise d'une part sur l'étude de fonctionnements internes, et la possibilité d'extension, d'outils de modélisation ; et d'autre part, le focus est également sur la dimension prospective de la modélisation hydrologique, et ceci à travers la possibilité d'inter-changer les jeux de paramètres entre versions de modèle. Le modèle GR2M, et SimulHyd établi comme une variante de ce dernier, dans leurs version non-distribuées et semi-distribuées, sont pris comme outils d'étude dans la présente recherche « fondamentale » visant à proposer des méthodologies permettant d'améliorer la modélisation hydrologique, et d'évaluer l'impact d'un changement de pluviométrie sur le régime hydrologique du bassin versant du haut Niger aux horizons 2020, 2050 et 2080. De ce fait, la présente étude à un caractère inter-comparatif poussé. Spécifiquement, en se basant sur un jeu d'échantillon de seize sous-bassins du fleuve Niger, et ses affluents, en Afrique de l'Ouest, la présente recherche confronte les subtilités internes des résultats de simulation de différents versions des modèles comme source d'information pouvant conduire au « perfectionnement » de ces mêmes modèles, et ainsi enrichir la littérature scientifique en méthodologies

applicables, reproductibles et adaptables pour d'autres modèles et dans d'autres contextes. La problématique sur la prise en compte de l'évolution des états de surface dans la modélisation hydrologique, est discutée dans la bibliographie sans être un objectif de l'étude.

Organisation du mémoire. L'ossature du présent mémoire s'articule autour de cinq chapitres:

- Dans le premier chapitre est présentée une étude bibliographique détaillée sur la modélisation hydrologique ;
- Le second chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude et des données de la présente modélisation hydrologique ;
- Le troisième chapitre traite de la validation d'une modélisation hydrologique sur des sous-bassins du fleuve Niger ;
- Le quatrième chapitre concerne des propositions d'amélioration de la modélisation hydrologique, ainsi que le développement d'une méthodologie dite « hydro-géostatistique », et leurs résultats d'application;
- dans le cinquième chapitre sont exposées des méthodologies sur la performance comparée des modèles à simuler des débits maximum ; les résultats des projections aux horizons 2020, 2050 et 2080, suivant une simple hypothèse de baisse pluviométrique de 10% ; et des calculs de coefficient de tarissement relatifs à la sensibilité des modèles hydrologiques aux échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface.

CHAPITRE 1

Modèles et Modélisations Hydrologiques

(Une Revue de la Littérature Scientifique en Modélisation Hydrologique)

1. Chapitre 1 : Modèles et Modélisations Hydrologiques

1.1 Introduction et définition des termes

1.1.1 Introduction

Dans le besoin de ne plus se restreindre à des appréciations qualitatives des processus du cycle de l'eau mais celui de fournir des informations quantitatives et mesurables à la suite d'observations et d'études de terrain, l'hydrologie quantitative (ou numérique) qui s'est développée avec l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs s'est muée en modélisation hydrologique. Des nouveaux modèles, plus sophistiqués et gourmands en données d'entrées, ont vu le jour au fil des années en fonction et de l'incessante montée en puissance des ordinateurs, voire des supercalculateurs, et de l'évolution croissante de la capacité de stockages de ces machines. Ce chapitre sur l'étude bibliographique consiste à jeter les bases du présent travail de recherche en accentuant les méthodologies qui seront explorées tout le long de la thèse.

Dès le début de l'hydrologie numérique, des modèles simples permettaient déjà de simuler des processus, comme l'interception de la canopée, l'infiltration, et l'évapotranspiration (Wang et al., 2011) et d'autres allaient déjà dans le sens de faire des prévisions de débits dans le temps. Ce qui a évolué depuis lors est la précision et l'exactitude des informations simulées par les modèles hydrologiques, tant numériquement, spatialement, que temporellement. D'un point de vue numérique, les modèles hydrologiques gagnent en exactitude et en précision, ils sont autant capables de produire des résultats de simulation proches de l'observation (donc plus exact) que de fournir plus de paramètres significatifs sur la compréhension des processus étudiés et sur des caractéristiques des bassins versants étudiés. L'aspect spatial dans l'évolution des modèles s'illustre par le fait que des modèles dits distribués et semi-distribués, capable de produire des résultats sur des grilles spatiales, prolifèrent et deviennent de plus en plus performants ; des modèles arrivent aussi à simuler des processus sur des échelles temporelles variées : horaire, mensuelle et annuelle.

L'objet de la présente étude est la mise en place et la validation d'une modélisation semi-distribuée au pas de temps mensuel sur le bassin versant du fleuve Niger, et adaptable sur d'autres bassins de la zone Soudano-Sahélienne. Nous avons bénéficié d'un certain nombre de formation à l'extérieur et de participation à des colloques internationaux dont les acquis scientifiques seront d'un appui inestimable pour la présente étude.

1.1.2 Définition des termes

1.1.2.1 Cycle hydrologique

L'hydrologie est aussi l'étude du cycle hydrologique. L'eau évaporée à la surface des océans et de la terre est transportée à l'intérieur des terres continentales dans la circulation atmosphérique sous forme de vapeur d'eau (**Figures 1-1 et 1-2**); elle précipite sous forme de pluie ou de neige ; une partie de cette précipitation est interceptée par les arbres et la végétation ; elle fournit le ruissellement sur la surface continentale, s'infiltré dans le sol, recharge les nappes souterraines, se décharge dans les cours d'eau et son parcours ultime la conduit vers les océans au niveau desquels elle est évaporée une nouvelle fois (Maidment, 1993 ; Koné, 2007).

1.1.2.2 Bassin versant

Le bassin versant est l'ensemble d'une région ayant un exutoire commun pour ses écoulements de surface. Plus précisément, le bassin versant, qui peut être considéré comme un « système », est une surface élémentaire hydrologiquement close. La délimitation de ce système suit généralement la ligne de partage des eaux sur la topographie (Bassin versant topographique : **Figure 1-3**). Lorsqu'un sol perméable recouvre un substratum imperméable (**Figure 1-4**), la délimitation dessinée par la ligne de crête de la topographie ne correspond pas toujours à la ligne de partage effective des eaux souterraines, le bassin versant est alors différent et est appelé bassin versant réel ou géologique (Roche, 1963 ; Koné, 2007).

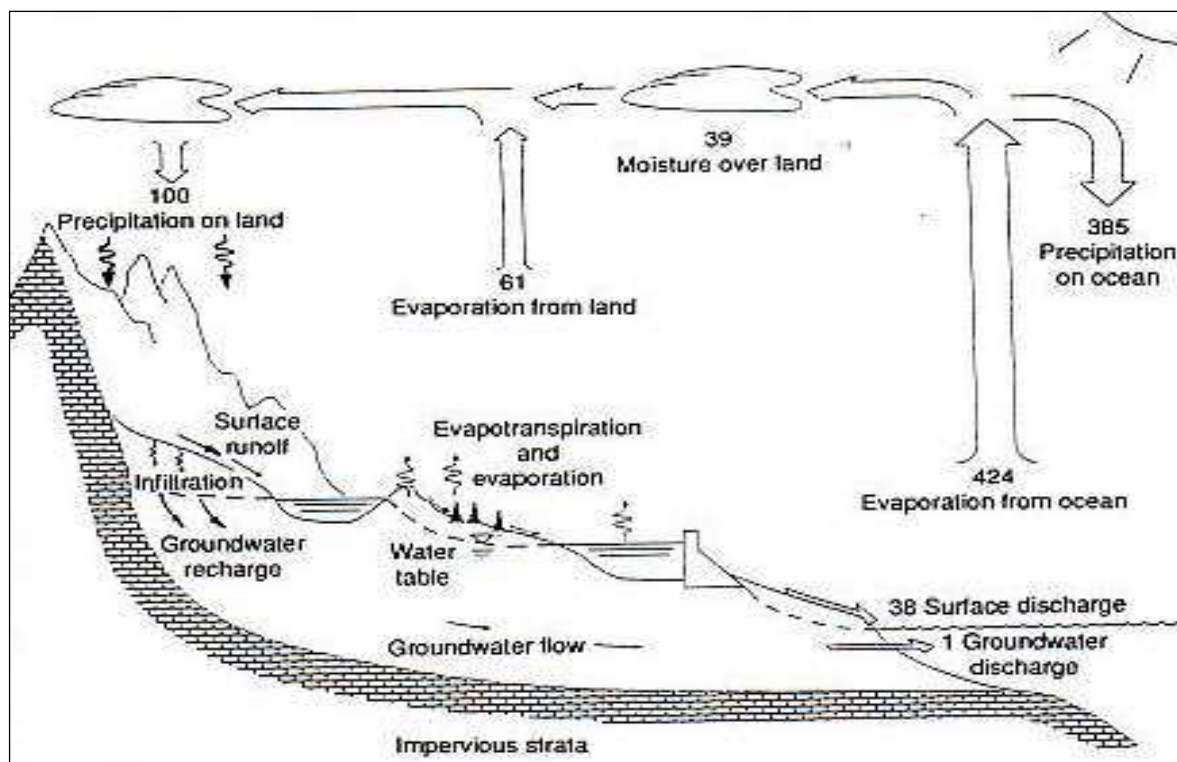


Figure 1-1 : le cycle hydrologique
(D'après Maidment, 1993)

Sur la **Figure 1-1** les volumes annuels d'eau mis en jeu sont exprimés en unité relative de précipitation sur la surface continentale de la terre (100 = 119 000 km³/ans précipités sur le continent).

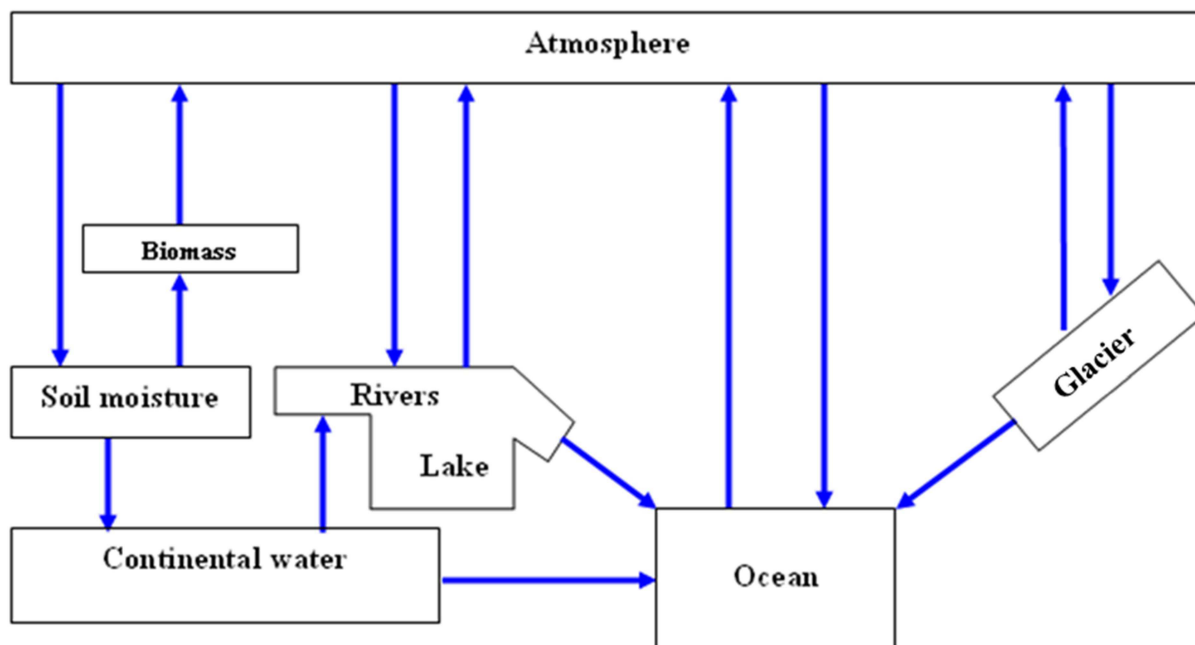


Figure 1-2 : les compartiments et les échanges de flux du cycle hydrologique
(Adapté des notes de cours du Master Eau et Environnement de l'UM2).

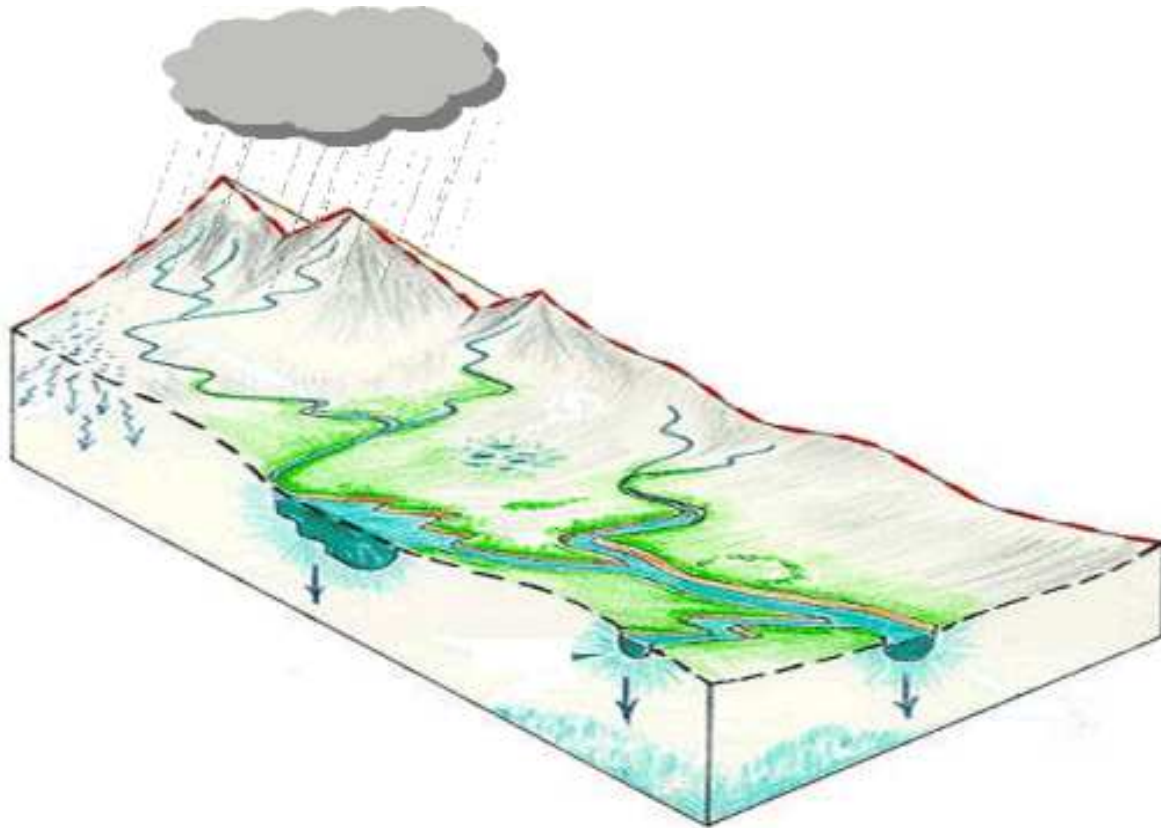


Figure 1-3 : Bassin versant topographique, délimité par la ligne de crête de la topographie.
(<http://www.lthe.hmg.inpg.fr/~belleudy/ens.htm>)

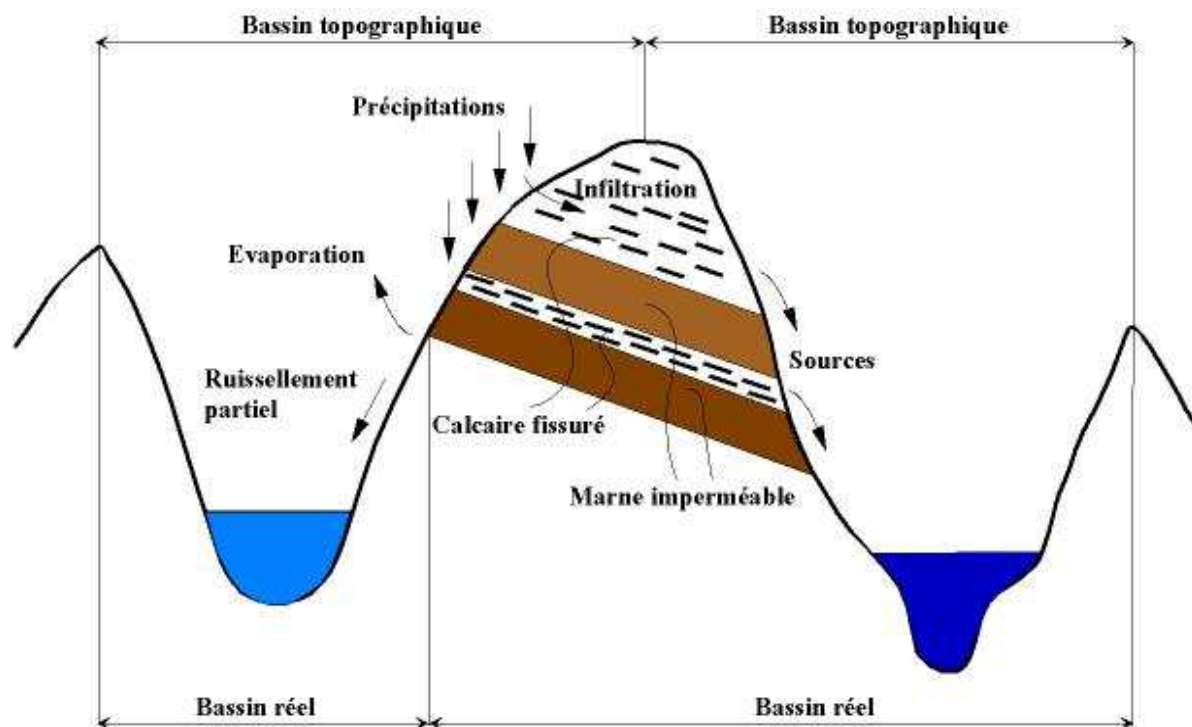


Figure 1-4 : Distinction entre bassin versant réel (géologique) et bassin versant topographique
(D'après Roche, 1963).

1.2 Modèles hydrologiques – classification et généralité

La modélisation hydrologique se décline en deux **approches** majeures : la modélisation à base physique et la modélisation conceptuelle. Entre ces deux approches se dessine une panoplie d'autres approches : la modélisation analogique, la modélisation mathématique, et la modélisation statistique/stochastique, ces dernières se retrouvent dans le cadre des modèles dits à « boîte noire ». Outre ces deux approches majeures, la modélisation hydrologique comporte deux pôles majeurs de **structure** de modèle : la modélisation distribuée et la modélisation non-distribuée (globale). Des structures hybrides qui se situent entre ces deux pôles sont la modélisation semi-distribuée (ou semi-globale) et vraisemblablement la modélisation semi- distribuée proprement dite où l'entrée serait globale et la sortie distribuée. Les différentes parties d'un modèle qui représentent les lieux des processus physique (l'interception, l'évapotranspiration, l'infiltration, le ruissellement, l'écoulement de surface et de sub-surface etc.), ou les réservoirs pour un modèle conceptuel, pourraient être considérées comme des sous-modèles et représentées suivant diverses formulations mathématiques (Hundecha et al., 2001 ; Kouamé et al., 2007). Ainsi, le modèle conceptuel SWAT (*Soil and Water Assessment Tool* : <http://swat.tamu.edu/>) est semi-physique et constitué de différents modules portant sur la modélisation des variables comme le débit, la constitution de l'eau en nutriments, et la biomasse. SWAT fonctionne à pas de temps journalier et une agrégation de ces résultats de sortie peut être effectuée pour les avoir au pas de temps mensuel et annuel. Des plateformes de modélisation tournées vers la gestion intégrée des ressources en eau et des bassins versants, et même sur la gestion de l'eau dans les plantations agricoles, prolifèrent. Le projet WEAP (*Water Evaluation and Planning System*) est une plateforme de modélisation et de gestion de l'eau, et le DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) est plutôt conçu pour la simulation de l'eau dans les plantations agricoles (Hoogenboom et al., 2011). Toutefois, la diversité des types de modèle hydrologique impose une étude comparative dépendant du type de problème à résoudre (Najafi et al., 2011).

1.2.1 La modélisation à base physique (ou mécaniste)

Dans la modélisation à base physique tous les processus sont pris en compte à travers les équations physiques qui les gouvernent chacun. La structure des modèles à base physique est distribuée. Le modèle distribué est un modèle où l'entrée et la sortie sont toutes les deux maillées par un système de grille de sorte qu'au lieu d'avoir une seule entrée et une seule

sortie du modèle, qu'il y est $N \times M$ entrées du modèle et également $N \times M$ sorties du modèle ; N étant le nombre de maille selon la latitude géographique et M celui suivant la longitude (géographique). En modélisation hydrologique on adopte, très généralement, une grille, 0.5° longitude \times 0.5° latitude pour couvrir la zone étudiée. Nous avons ainsi dans les modèles dits semi-distribués : $N \times M$ entrées de modèle et une sortie en une dimension (débit temporel). Il est évident qu'un modèle distribué se comportera comme un modèle semi-distribué, selon que l'objectif de la simulation est la modélisation, en une dimension (1D), du débit d'écoulement à l'exutoire du bassin versant ; en versa, un modèle semi-distribué pourrait être exploité comme un modèle distribué à travers les variables intermédiaires simulées sur les différentes mailles du bassin versant, à chaque pas de temps de la modélisation. Dans ce cas, d'autres informations « intermédiaires », autres que le débit, seront produites à chaque pas de temps de la simulation sur les différentes mailles d'entrées, et partant des équations qui régissent les sous-modèles ou compartiments du modèle. En plus, les modèles distribués sont connus pour leur flexibilité de couplage à des modules de transport de sédiments et de polluants : le modèle SHETRAN, <http://research.ncl.ac.uk/shetran/index.htm>, en est une illustration. Kolditz et al., (2013), à travers le modèle de collaboration en recherche interdisciplinaire WESS (*Water Earth System Science Competence Cluster*), présentent l'utilité des réseaux internationaux et des communautés de chercheurs travaillant sur la modélisation intégrée des bassins hydrologiques ; l'objectif généralement visé étant le couplage entre modèles hydrogéologiques (de sub-surface) et modèles hydrologiques de surface (Treidel et al., 2012 ; Sutanudjaja et al., 2014). Par ailleurs, l'amélioration de la compréhension du fonctionnement des bassins versants nécessiterait de relier les données hydrologiques à celles sur l'utilisation des terres et aux recharges des nappes d'eau souterraine (FAO, 2012b). Très souvent la modélisation hydrologique a une visée d'évaluation et de gestion des ressources en eau à des échelles spatiales variées (Gottschalk et al., 2001 ; Hubert, 2001 ; Oki et al., 2001 ; Alcamo et al., 2003 & 2007 ; Schulze, 2011), et concomitamment à différentes échelles temporelles (Mouelhi, 2003), ou fréquemment avoir un but opérationnel, où l'écoulement de l'eau est à simuler en temps réel comme lors des crues (Galéa et al., 1994).

1.2.2 La modélisation conceptuelle

Cette approche de modélisation s'appuie sur la conceptualisation du cycle de l'eau. Dans l'approche globale de la modélisation de ce cycle, on conceptualise le bassin versant par un entonnoir où, la partie supérieure accueille l'eau de pluie et qui constitue en même temps le

lieu de l'évapotranspiration et de l'interception (de l'eau), et la partie inférieure qui laisse l'eau de pluie s'écouler à sa base par analogie au débit à l'exutoire du bassin versant. Il y a un certain nombre de compartiments, ou réservoirs, qui définiront ces modèles conceptuels : réservoirs sol, réservoirs gravitaire... (Dezzeter, 1991; Xu & Singh, 1996 ; Perrin et al., 2007). Les équations qui régissent ce système conceptuel, en détail au niveau des différents compartiments et dans son ensemble, sont plus ou moins conceptuelles et ne s'apparentent pas forcément à des formulations mathématiques rigoureuses de la réalité physique (Hundecha et al., 2001). CREST, le modèle hydrologique distribué couplé routage et stockage des excédents (Wang et al., 2011), est un modèle hybride entre une modélisation à base physique et une modélisation conceptuelle. Ce modèle laisse apparaître trois couches de sols différentes (ou réservoirs) alors que la plupart de ses paramètres et équations sont déterministes. Le modèle de base de la présente recherche, *SimulHyd*, qui est une variante évoluée et validée du modèle GR2M (Koné, 2007, 2013a, 2013d & 2014b), se classe parmi les modèles conceptuels que ça soit dans sa version globale (non-distribuée) ou semi-globale (semi-distribuée). Ce modèle, *SimulHyd (Simulation des systèmes Hydrologiques)*, bien que conceptuel, dans sa version semi-globale (semi-distribuée) a, lors de son fonctionnement, le comportement d'un modèle à *zone d'appel variable*, similaire au modèle de sub-surface développé par Beven et al., (1979) ; ce dernier étant un modèle à base physique et dont les mailles individuelles ont un fonctionnement de modèle global.

1.2.3 La modélisation en boîte noire

Cette approche de modélisation n'envisage pas de structuration interne au modèle (Hu et al., 2001 ; Sivakumar et al., 2001a), ni compartimentation physique ou conceptuelle n'apparaît ; le modèle effectuée dans la plupart des cas une régression plus ou moins complexe entre ses données d'entrées et celles de sorties. Dans le cas des modèles analogiques, le système à modéliser est assimilé à un autre système « physique » où les équations de ce dernier régissent le processus modélisé. Les modèles mathématiques seront régis par des équations mathématiques qui ne décrivent pas très souvent la réalité physique du phénomène modélisé. Quant aux modèles statistiques, et stochastiques, l'implication de la notion de régression (linéaire ou non-linéaire), et de hasard, est la plus évidente.

1.3 Méthodologie de la Modélisation Hydrologique

La modélisation de la relation pluie-débit, qu'elle soit conceptuelle ou non, se décline en trois

phases consécutives : une phase de calibration du modèle (même les modèles dits à base physique ont des paramètres à caler), une phase de validation, et une phase de simulation de la variable cible (très généralement le débit à l'exutoire du bassin versant).

1.3.1 Calibration (optimisation et notion d'équifinalité)

Les modèles contiennent des paramètres qui ne répondent pas généralement aux tentatives de détermination mécaniste. Ces derniers sont alors à caler sur le bassin versant en utilisant des variables d'entrée et de sortie des modèles. Cette phase de calibration (appelée aussi calage ou paramétrisation) consiste en une procédure d'optimisation (Nelder & Mead, 1964 ; Ribstein, 1990) où, le plus souvent, on balaye l'espace des paramètres afin de trouver le jeu de paramètres qui maximise la performance du modèle, à simuler une série de débits observés. La calibration du modèle sur différents bassins versants conduit à une régionalisation de ces paramètres ; toutefois, sur les bassins (peu ou non-jaugés) où la procédure de calibration n'est possible, due entre autres à une manque de chronique de données, les prédictions sur ces bassins ont été rendues possible à travers diverses méthodologies d'estimation de paramètres des modèles (Sivapalan et al., 2003). La phase de calibration s'accompagne d'un processus d'optimisation consistant aux choix des valeurs des paramètres du modèle en vue d'optimiser une fonction « Objectif », ou critère de performance du modèle (Nash & Sutcliffe, 1970 ; Garrick et al., 1977 ; Koné, 2007). Ce processus d'optimisation peut être multi-objectif (Yang Y. S. et al., 2001) ou même ambiguë car susceptible de conduire à une situation d'équifinalité (Zannou, 2011). Cette dernière est caractérisée par le fait que différents scénarios de choix du jeu de paramètres du modèle conduisent à la même valeur de la *fonction Objectif*, ou fonction diagnostique.

1.3.2 Validation de modèles, et sensibilité aux données d'entrées

Cette phase consiste à tester le modèle calibré : le jeu de paramètres calé lors de la phase précédente (calibration) est utilisé. On calcule par le modèle les débits sur une période qui n'a pas servi lors de la phase de calibration et, ayant des débits observés sur cette période. Ensuite on mesure la performance du modèle en confrontant la série simulée de débits à celle issue de l'observation. La qualité de cette validation peut être estimée en adoptant une approche multi-échelle et multicritère. Ainsi, Hattermann et al., (2002) utilisent en plus de la chronique de débits mesurés à l'exutoire du bassin versant, le niveau de l'eau souterraine observé dans des piézomètres implantés dans leur zone d'étude. En cette phase de validation

la problématique de l'inter-comparabilité des modèles se pose car des modèles performants en phase de calibration peuvent se montrer médiocres en phase de validation. Clarke (2008) soulève une série de questions relatives entre autres, à la comparabilité des modèles, à la représentativité des données de calibration et de validation et leurs effets sur l'estimation des paramètres du modèle (Paturel et al., 2006b), et au choix des modèles qui pourraient s'avérer efficaces sur des bassins non-jaugés.

1.3.3 Simulation par le modèle, et données d'entrées pour projection

Cette phase est celle pour laquelle les modèles hydrologiques sont généralement construits : on simule les écoulements sur une période où on n'a pas d'observations de ces écoulements (c'est une prévision). Seul le futur pourra révéler la performance réelle du modèle. La simulation peut aussi servir à reconstituer des lacunes de données hydrologiques (par exemple : les lacunes dans les séries des débits observés). C'est également en cette phase de la modélisation qu'on procède à l'évaluation de l'impact future du changement climatique sur l'eau de surface, où les résultats issus des scénarios simulés au niveau des modèles climatiques sont injectés comme données d'entrées dans les modèles hydrologiques (Rescan, 2005 ; Jiang et al., 2007 ; Kundzewicz et al., 2008 ; Smith et al., 2009 ; Whitehead et al., 2009 ; Ghosh & Misra, 2010 ; Towler et al., 2010 ; Wilby, 2010). Par ailleurs, Cunderlik et al., (2007) utilisent des modèles hydrologiques pour la modélisation inverse de l'impact du changement climatique, où sur un bassin versant donné ils reproduisent les données météorologiques « synthétiques » pouvant conduire soit à une inondation ou une à sécheresse sur ce bassin. Ces données synthétiques de la pluie et d'autres variables climatiques sont produites partant d'algorithmes générateurs de perturbations météorologiques associées aux Modèles de Circulation Générale.

1.3.4 Erreurs et Incertitudes de Modélisation

Les erreurs induisent des incertitudes dans la modélisation. Dans la thèse de philosophie d'Isukapalli (1999) les incertitudes sont attribuées à trois origines : l'incertitude de données, l'incertitude du modèle, et l'incertitude naturelle (voir la schématisation sur la **Figure 1-5** ci-après). Comme l'erreur est inhérente à tout processus de mesure, les données d'entrées et de validations sont affectées d'incertitudes – *Incertitudes des données*; les modèles conceptuels sont des représentations simplifiées de la réalité, ici du cycle hydrologique – *Incertitudes du modèle* –, et ces incertitudes sont dues soit à la simplification lors de la formulation

conceptuelle du problème et aussi à l'idéalisation dans la constitution des relations entre compartiments du modèle – *Incertitude due à la formulation du modèle* – ou soit ces incertitudes apparaissent lors de la sélection du n-uplet de paramètre optimal et aussi lors du choix des conditions aux limites, etc. – *Incertitudes dans l'application du modèle* ; l'incertitude naturelle est inhérente à la nature même du problème scientifique à résoudre – *Incertitudes naturelles*. L'incertitude naturelle est inhérente ou « irréductible » alors que l'incertitude de données et celle de modèle contiennent toutes les deux des composantes « réductible » et « irréductible » (Isukapalli 1999).

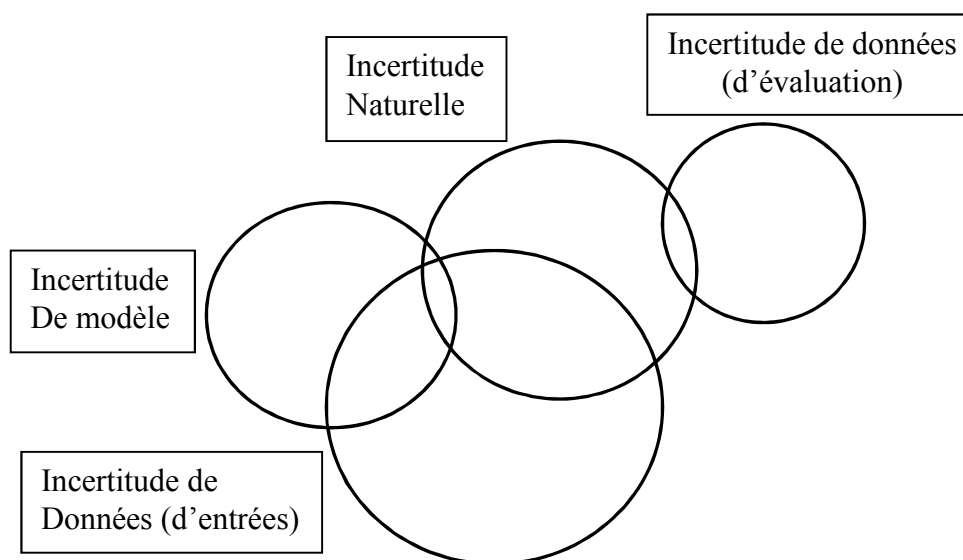


Figure 1-5 : Schématisation de classification des incertitudes, (d'après Isukapalli, 1999)

L'incertitude « irréductible » des données et des modèles est généralement un résultat de la présence de l'incertitude naturelle. La composante réductible peut être atténuée en diminuant les erreurs de mesure des données. Comme les incertitudes naturelles ne sont pas imputables à nos erreurs, elles sont inhérentes à la nature même du problème. Ceux que Garrick et al., (1977) traitent en termes d'incertitudes « éliminables » et d'incertitudes « non éliminables », dans la thèse d'Isukapalli (1999) sont présentés en termes d'incertitudes « réductibles » et d'incertitudes « irréductibles ».

1.3.5 Notion de non-distribution et de semi-distribution en modélisation

Dans sa structure semi-distribuée, GR2M – ou SimulHyd – est un modèle à $m*2$ réservoirs, m étant le nombre de maille de la modélisation. La même analogie (que pour la version non-distribuée) pourra être adoptée en considérant cette fois-ci un entonnoir « fantôme » ayant plusieurs ouvertures supérieures partageant une seule ouverture inférieure ! Les différentes

ouvertures supérieures désignant les mailles individuelles de la grille d'entrée, recevant chacune les données d'entrée de la modélisation (Pluie, ETP, WHC). Le concept philosophique derrière le fonctionnement de ces modèles semi-distribués est que les données d'entrée de chaque maille individuelle sont utilisées pour estimer individuellement la série temporelle de débits à l'exutoire du bassin versant dans sa globalité ; ainsi le fonctionnement du modèle semi-distribué s'apparente à celui d'un modèle global fonctionnant sur le bassin versant global avec les données d'entrée d'une seule maille à fois, et cela se répétant m fois selon le nombre de mailles couvrant le bassin versant. Nous aurons le modèle global qui sera lancer m fois sur le bassin versant, produisant m séries temporelles de débits ; il faudra ainsi définir une règle de pondération sur les m résultats de sortie obtenus, avec les données d'entrée des m différentes mailles, pour avoir une seule série temporelle de débits (représentant le résultat pondéré de sortie finale de la modélisation semi-distribuée). Toutefois, un problème fondamental est sous-jacent au choix de la règle de pondération et aux critères qui devront être respectés pour une pondération optimale. Chaque maille apporte une contribution à la réponse finale du modèle semi-distribué ; mais dire ainsi peut soulever une confusion, si notre vision mentale du processus est de considérer qu'une portion « élémentaire » du débit final est apportée par chaque maille pour constituer le débit final (**Figure 1-6** ci-après). Une contribution élémentaire de chaque maille serait un abus de langage car c'est le terme adéquat en contexte de modélisation distribuée (et non pas en modélisation semi-distribuée). Nous nous attelons à l'assumption qu'en modélisation semi-distribuée, le poids ou la règle de pondération optimale et idéale est celle qui permet au modèle semi-distribué de produire le même jeu de paramètres optimal ($X1$, $X2$) que le modèle non-distribué (global). Une composante du problème fondamental soulevé, est de savoir si le modèle semi-distribué, qui tourne systématiquement m fois et simule $m \cdot i$ fois¹ la même variable temporelle pour en produire m série temporelle de débits, pourrait-il être doté d'une règle de pondération optimale pour produire la même performance que le modèle non-distribué (global)²? Nos résultats précédents affichaient une amélioration de la modélisation semi-distribuée (semi-globale) chaque fois que nous améliorons la règle de pondération de l'influence des différentes mailles (Koné, 2007), mais la performance (en terme du critère de Nash) affichée par la modélisation non-distribuée (globale) n'était pas égalée en travaillant avec le même modèle dans sa version semi-distribuée et sans d'autres artifices

¹ L'entier naturel i étant le nombre d'itération lors du processus d'optimisation en phase de calibration sinon en validation et simulation $i = 1$

²Ce dernier (le modèle non-distribué ou global) tourne une seule fois sur le grand bassin et simule i fois la variable débit pour en produire en sortie une seule série de débit à l'exutoire du bassin versant.

mathématiques. En phase de calibration, la performance à simuler le débit en modélisation non-distribuée (globale) serait-elle une limite asymptotique que la modélisation semi-distribuée (0.5° longitude \times 0.5° latitude) pourrait tendre vers (elle) sans l'atteindre en moyenne? La modélisation semi-distribuée produit des jeux de paramètres dépendant de la résolution spatiale des mailles/grilles de modélisation ; existerait-elle une spatialisation optimale pour que la modélisation semi-distribuée dépasse en performance la modélisation non-distribuée ? La spatialisation, en soit, apporte des contraintes supplémentaires en modélisation qui doivent être prises en compte soit à travers une sophistication de la formulation du modèle – *passage de GR2M à SimulHyd* – ou soit à travers des artifices mathématique – *Formule d'Atténuation d'Incertitudes*.

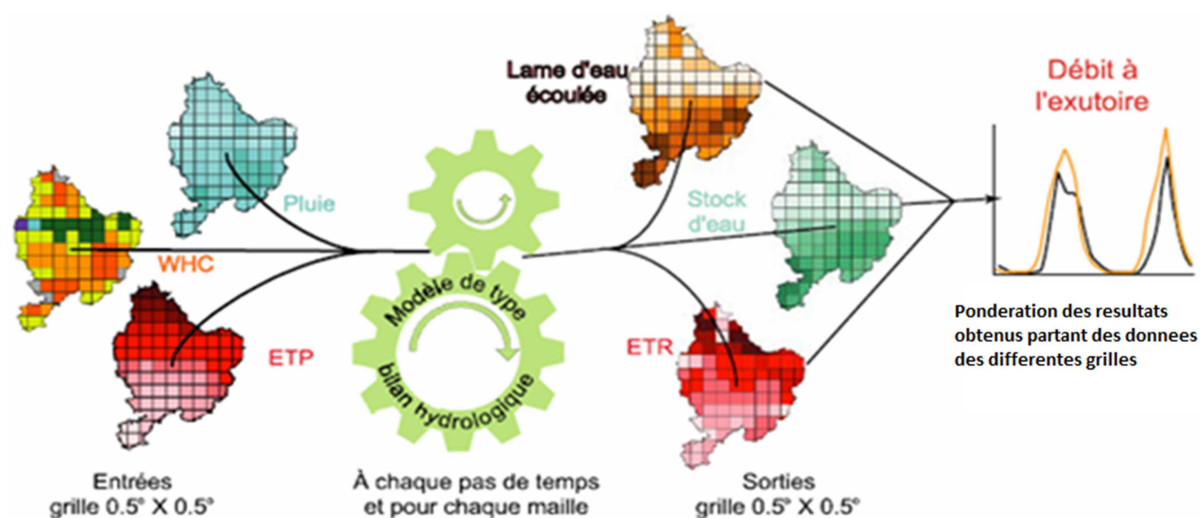


Figure 1-6 : modélisation semi-globale
(Adaptée d'Ardoin-bardin, 2004)

1.4 Critères de performance de modèle

1.4.1 Critères de Nash

Parmi les fonctions critères utilisées en hydrologie (critère de CREC, critère de Fortin, etc), la formulation de Nash est celle qui est la plus reprise car souvent jugée comme étant la plus performante (Servat et Dezetter, 1990 & 1991 ; ERREAU, 1993). Nos intérêts portent sur cette fonction critère de Nash ainsi que sur quelques-unes de ces améliorations proposées par certains auteurs (Garrick et al., 1977 ; Perrin, 2000). La fonction critère de Nash, proposé par NASH en 1969, et dont le développement est discuté par Nash et Sutcliffe (1970), est basée sur le principe des moindres carrés avec référence à un modèle de base. Tenir compte d'un modèle de référence permet de définir une efficacité qui soit relative et sans dimension permettant ainsi des intercomparaisons de performance entre modèles et/ou entre bassins.

Nash (1969) propose comme modèle de référence le débit moyen observé sur toute la période de calibration ou de validation de la modélisation ; ainsi, à chaque pas de temps, le débit estimé par le modèle de référence est le débit moyen (ce modèle est simple et demande peu de calcul). La formulation de la fonction Objectif de Nash (noté R2) est dans l'**Encadré 1-1** ci-après. Le critère de Nash comme bien d'autres critères peut être :

- Négatif si le modèle testé est incapable de produire une prévision meilleure que celle produite par le modèle de référence ;
- Positif si le modèle donne une meilleure estimation que le modèle de référence ; plus les sorties de simulation du modèle se rapproche de l'observation, plus la valeur du critère de Nash se rapproche de 1 (ou 100 en pourcentage).

Encadré 1-1 : critère de Nash

si q représente la série actuelle des débits sur l'intervalle de temps choisi et \widehat{q} la série des débits correspondante simulée par le modèle, la somme résiduelle des carrés est définie par: $F_1^2 = \sum (q^k - q_{simulé}^k)^2$ laquelle peut être comparée avec la somme initiale des carrés (le modèle de référence):

$$F_0^2 = \sum (q^k - \overline{q^k})^2 \text{ où } \overline{q^k} \text{ est la moyenne des débits observés.}$$

L'efficacité est définie par: $R^2 = 1 - \frac{F_1^2}{F_0^2} = \frac{(F_0^2 - F_1^2)}{F_0^2}$

k est l'indice portant sur le pas de temps.

PERRIN (2000) dans sa thèse propose une adaptation de la formulation du critère de Nash en remplaçant dans l'expression de ce dernier le modèle de référence (le débit moyen) par un nouveau modèle de référence. Cette nouvelle formulation (notée ici R²) constituant un critère complémentaire à celui de Nash est dans l'**Encadré 1-2** ci-dessous.

Encadré 1-2 : variante de Perrin du critère de Nash

$$F_0'^2 = \sum \left(q^k - \left(\sqrt{\overline{P^2} + \overline{E^2}} - \overline{E} \right) \right)^2 \text{ où } \left(\sqrt{\overline{P^2} + \overline{E^2}} - \overline{E} \right) \text{ est le nouveau modèle de référence au lieu et place du débit moyen } \overline{q}.$$

$$F_1'^2 = \sum (q^k - q_{simulé}^k)^2$$

L'efficacité est définie par: $R'^2 = 1 - \frac{F_1'^2}{F_0'^2} = \frac{(F_0'^2 - F_1'^2)}{F_0'^2}$

k est l'indice sur le pas de temps.

La forme logarithmique des débits (**Encadré 1-3** ci-après) donne du poids aux périodes de basses eaux alors que la forme usuelle (l'**Encadré 1-1**) favorise les périodes de hautes eaux. Entre ces deux formes, PERRIN (2000) donne sa préférence à une formulation utilisant la racine carrée des débits qui permettrait de donner un poids aussi équivalent aux périodes de hautes eaux qu'aux périodes de basses eaux (**Encadré 1-4**). Toutefois, la formulation du critère change l'appréciation de la performance du modèle. Les fonctions critères correspondantes à ces formes transformées du critère de Nash (la forme logarithmique et la forme racine carrée) sont respectivement notées ici R_{\log}^2 et R_{racine}^2 .

Pour la forme logarithmique :

Encadré 1-3 : Forme logarithmique du critère de Nash

$$F_{1\log}^2 = \sum (\log(q^k) - \log(q_{\text{simulé}}^k))^2$$

$$F_{0\log}^2 = \sum (\log(q^k) - \overline{\log(q^k)})^2 \text{ où } \overline{\log(q^k)} \text{ est la moyenne des logarithmes des débits observés.}$$

L'efficacité est définie par: $R_{\log}^2 = 1 - \frac{F_{1\log}^2}{F_{0\log}^2} = \frac{(F_{0\log}^2 - F_{1\log}^2)}{F_{0\log}^2}$

k est l'indice portant sur le pas de temps.

Pour la forme racine carrée :

Encadré 1-4 : Forme racine carrée du critère de Nash

$$F_{1\text{racine}}^2 = \sum (\sqrt{q^k} - \sqrt{q_{\text{simulé}}^k})^2$$

$$F_{0\text{racine}}^2 = \sum (\sqrt{q^k} - \overline{\sqrt{q^k}})^2 \text{ où } \overline{\sqrt{q^k}} \text{ est la moyenne des racines carrées des débits observés.}$$

L'efficacité est définie par: $R_{\text{racine}}^2 = 1 - \frac{F_{1\text{racine}}^2}{F_{0\text{racine}}^2} = \frac{(F_{0\text{racine}}^2 - F_{1\text{racine}}^2)}{F_{0\text{racine}}^2}$

k est l'indice portant sur le pas de temps.

Encadré 1-5 : Changement d'échelle des paramètres lors de l'optimisation

Exemple de changement d'échelle des paramètres à ajuster:

pour le modèle GR2M, $A1 = \ln(X1)$ et $A2 = \frac{\exp(X2)}{1 + \exp(X2)}$;

pour d'autres modèles on multiplie le paramètre initial par un facteur simple, 10^{-5} à 10^{-2} par exemple.

1.4.2 Critères d'appréciation du bilan volumique

Bien que le critère de Nash soit généralement le plus apprécié comme la fonction à optimiser lors du calage des paramètres des modèles, une panoplie de critères sur le bilan volumique est généralement calculée à côté de ce critère (**Encadré 1-6** ci-après). Les variables, lors de l'optimisation de la fonction diagnostique, sont les paramètres du modèle ou leurs transformées mathématiques (pour un besoin de changement d'échelle). Le choix de ces transformations dépend du modèle et de la façon dont les paramètres interviennent dans ce dernier – afin de garantir des directions de balayage dans l'espace (des paramètres) de même ampleur (**Encadré 1-5** ci-dessus).

Encadré 1-6 : Divers coefficients d'appréciation du bilan volumique

$$Coef_bilan1 = \sum_k (L_{obs}^k - L_{calc}^k)$$

$$Coef_bilan2 = \sum_k |L_{obs}^k - L_{calc}^k|$$

$$Coef_bilan3 = \sum_k (L_{obs}^k - L_{calc}^k) \text{ si } L_{obs}^k < L_{obs_moyenne}^k$$

$$Coef_bilan4 = \sum_k |L_{obs}^k - L_{calc}^k| \text{ si } L_{obs}^k < L_{obs_moyenne}^k$$

$$Coef_bilan5 = \sum_k (L_{obs}^k - L_{calc}^k) \text{ si } L_{obs}^k > L_{obs_moyenne}^k$$

$$Coef_bilan6 = \sum_k |L_{obs}^k - L_{calc}^k| \text{ si } L_{obs}^k > L_{obs_moyenne}^k$$

$$Coef_bilan7 = 1 - \left| 1 - \sum_k \frac{L_{calc}^k}{L_{obs}^k} \right|$$

Où, L_{obs}^k est la lame d'eau observée du $k^{ème}$ pas de temps,
 L_{calc}^k est la lame d'eau calculée du $k^{ème}$ pas de temps de simulation.
 Les coefficients 1, 3, 5 indiquent si les modèles reproduisent correctement les volumes d'eau écoulés:
 $\Rightarrow coef_bilan1 < 0 \Leftrightarrow$ le modèle surestime le volume d'eau écoulé sur la période correspondante: ($L_{obs_totale} < L_{calc_totale}$)
 $\Rightarrow coef_bilan1 > 0 \Leftrightarrow$ le modèle sous-estime le volume d'eau écoulé sur la période correspondante: ($L_{obs_totale} > L_{calc_totale}$)
 Les coefficients 2, 4, 6 mesurent les variations absolues entre les lames calculées et observées.

Les critères numériques (précédemment mentionnés) mesurent le degré d'adéquation entre la série de débits calculée par le modèle et celle issue de l'observation (**Encadré 1-1 à 1-6**). Les critères graphiques ont quand même leur importance car ils permettent de mettre en évidence certaines anomalies qui sont difficilement décelables par les critères numériques : par exemple le décalage dans le temps du pic d'écoulement (Mandeville et al., 1970). De plus les

critères numériques peuvent être jugés comme « bons » alors que l'adéquation visuelle ne semble pas aussi bonne.

Les critères numériques d'appréciation de la performance de modèles peuvent différer sur trois points essentiels :

- a) la forme analytique de l'erreur (quadratique, absolue, cumulée...) ; cela concerne notamment les coefficients d'appréciation du bilan volumique (exemple : le coefficient de bilan qui peut être négatif ou positif diffère du coefficient du bilan absolu qui est toujours positif) ;
- b) la forme de la variable cible (transformée ou non) ;
- c) et le choix d'un modèle de référence (pour permettre une mesure relative).

1.4.3 Critère de « Nash-Garrick »

Garrick et al., (1977) proposent deux critères d'estimation de l'efficacité des modèles conceptuels pluie-débit, ces propositions étant motivées par un rapport publié en 1975 par l'Organisation Mondiale de Météorologie (O.M.M) sur l'intercomparaison des modèles pluie-débit. Ce rapport de l'OMM indique le besoin de développer des critères objectifs de mesure de performances qui puissent être utilisés pour comparer non seulement la performance de plusieurs modèles sur le même support d'étude (bassin versant) ou d'un même modèle sur différents supports, mais aussi de différents modèles sur différents supports. Leur étude visant à améliorer le critère de Nash en proposant en première modification de remplacer le modèle de référence (le débit moyen) par un modèle de référence (noté q^d) qui porte en son sein l'information de la variabilité du débit entre les douze mois de l'année (cf. **Encadré 1-7** ci-dessous). Dans un contexte de modélisation utilisant GR2M (ou SimulHyd) au pas de temps mensuel, on aura douze valeurs du modèle de référence F_d^2 associées respectivement à chacun des douze mois de l'année. Dans la présente étude et précédente (Koné, 2007), où le critère *Nash-Garrick* intervient dans le protocole d'intercomparaison, le terme q^d (de l'expression du modèle de référence) est remplacé par une quantité qui est la somme des débits mensuels observés (du mois considéré : e.g. Janvier) divisée par le nombre de mois total de la simulation. Ces critères donnent une valeur de l'efficacité (R_d) qui est « saine » des biais dus aux grandes valeurs du débit en période de hautes eaux et réduit « proprement » la somme des carrés des erreurs attribuables aux modèles conceptuels face aux facteurs en entrée des modèles. La démarche de mise en place de ce critère noté R_d^2 se trouve dans l'**Encadré 1-7** ci-dessous. Garrick et al., (1977) proposent une seconde modification du critère de Nash justifiée par le fait que ce dernier ne fait pas de distinction entre la nature des

différentes sortes d'erreurs. Cette modification est particulièrement appropriée quand le modèle est utilisé avec une procédure de mise à jour pour une prévision en temps réel avec correction d'incertitude : ce dernier critère n'est pas exploité dans la présente étude.

Encadré 1-7: critère Nash-Garrick

Premier critère proposé par GARRICK et al. (1977) : critère Nash-Garrick

Soit : $q^d = \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K q^{d,k}$, q^d correspond au débit moyen interannuel de la date d (d= Janvier par exemple).

Si on est en modélisation à pas de temps mensuel (GR2M par exemple) : $q^{d,k}$ serait le débit observé à la date d (janvier, Février,..., Décembre) au $k^{i\text{ème}}$ année de la période de modélisation; K serait le nombre total d'année de la période de modélisation.

La somme quadratique des residus associé à la prévision q^d dans la période de verification est : $F_d^2 = \sum_k (q^{d,k} - q^d)^2$

on aura : $F_{1d}^2 = \sum_k (q^{d,k} - q_{simulé}^{d,k})^2$

L'efficience devient: $R_d^2 = 1 - \frac{F_{1d}^2}{F_d^2} = \frac{(F_d^2 - F_{1d}^2)}{F_d^2}$

k est l'indice portant sur le pas de temps
 d est l'indice portant sur le nom du mois (Janvier,....., Décembre).

1.4.4 Approche de la robustesse des modèles (TDE)

La Technique du Double Échantillons (TDE) est une méthode d'évaluation de la performance des modèles : elle prend en compte dans son calcul de l'efficience non seulement les débits simulés sur une période de calibration du modèle mais aussi ceux simulés sur une période de validation ; elle donne une estimation de la robustesse du modèle. Cette méthode se réduit à une expression mathématique dans laquelle sont confrontées les racines carrées des débits simulés à celles des débits observés sur la même période (K1+1 à K). Cependant cette période est subdivisée en deux, une première (qui va de K1+1 à K2) sur laquelle on procède généralement à la calibration des modèles, et une deuxième (qui va de K2+1 à K) sur laquelle on procède donc à la validation des modèles. L'expression mathématique, qui s'apparente à celle du critère de Nash, est détaillée dans l'**Encadré 1-8** ci-après.

Perrin (2000) propose de mesurer autrement la robustesse en calculant l'écart entre les efficacités du modèle entre la phase de calage et celle de validation d'un modèle. Généralement, on observe une diminution de performance lors du passage de la phase de

calibration à celle de validation : une diminution faible implique une robustesse élevée pour le modèle concerné.

Encadré 1-8: Technique du Double Échantillons (TDE)

$$F = 1 - \frac{\sum_{k=K_1+1}^{K_2} \left(\sqrt{q^k} - \sqrt{q_{simulé}^k} \right)^2 + \sum_{k=K_2+1}^K \left(\sqrt{q^k} - \sqrt{q_{simulé}^k} \right)^2}{\sum_{k=K_1+1}^K \left(\sqrt{q^k} - \sqrt{M} \right)^2}$$

k : est l'indice portant sur le pas de temps de la modélisation.
 q^k : est le débit observé correspondant au $k^{ème}$ pas de temps.
 $q_{simulé}^k$: est le débit simulé au $k^{ème}$ pas de temps de la modélisation.
 K_1 : nombre de pas de temps de la "période de mise en route"*.
 K_2 : la fin de la première période, où le modèle a été calibré.
 K : le nombre de pas de temps total de la modélisation.
 \sqrt{M} : la moyenne des $\sqrt{q^k}$ sur la totalité des deux périodes,

$$\sqrt{M} = \frac{1}{K - (K_1 + 1)} \sum_{k=K_1+1}^K \left(\sqrt{q^k} - \sqrt{q_{simulé}^k} \right)$$

*le concept de "période de mise en route" des modèles, permet d'atténuer l'influence des conditions initiales, car les résultats de simulation sur cette période ne sont pas pris en compte lors des calculs de performance.

1.5 Géostatistique et prédiction de paramètres de modèles hydrologiques

À l'heure actuelle la littérature hydrologique est pauvre dans l'utilisation de la géostatistique pour la prédiction des paramètres intrinsèques des modèles hydrologiques. Ainsi, une méthodologie « hydro-géostatistique » en est exposée dans le **chapitre 4** du présent mémoire partant d'un procédé appelé « protocole inter-bassins ».

1.6 Conclusion et perspectives

Le bassin du fleuve Niger à la station de Koulikoro, au Mali, se trouve dans la zone tropicale, en Afrique de l'ouest, une région humide à semi-aride, où la modélisation hydrologique diffère selon les caractéristiques hydro-climatiques, de celle des zones arides (Pilgrim et al., 1988). La modélisation hydrologique, au-delà d'être un outil de prévision et de gestion de l'eau sur les bassins versants, investigate les processus subtiles qui peuvent exister lors de la transformation de la pluie en débit. Elshorbagy et al., (2001) détectent l'existence du chaos déterministe dans l'écoulement d'eau dans les rivières en procédant à une corrélation croisée entre deux séries temporelles de débits de leur zone d'étude (celle de Little River et celle de Reed Creek, Virginia, USA). Sivakumar et al., (2001b) utilisent un modèle, de type boîte

noire, basé sur la théorie du chaos déterministe, non seulement pour la prédiction mais aussi pour déceler la présence de chaos dans l'écoulement à l'exutoire des bassins versants ; aussi dans les études de comblement de lacune (des séries temporelles de débits) l'analyse du comportement chaotique serait un complément précieux aux analyses statistiques et stochastiques. La géostatistique (Chilès & Delfiner, 2012) pourrait être une perspective adéquate dans la prise en compte de la composante chaotique dans ces analyses de séries temporelles de débits.

CHAPITRE 2

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE ET DES DONNEES DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE

2. Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude et des données

2.1 Localisation

La zone d'étude est située en Afrique de l'ouest et s'étend géographiquement entre les 12^{ème} et 7^{ème} degrés Ouest selon la longitude, et entre les 7^{ème} et 13^{ème} degrés Nord selon la latitude, couvrant partiellement la Côte d'Ivoire, la Guinée, et le Mali. Un ensemble de 16 sous-bassins du fleuve Niger et de ses affluents sera étudié (cf. **Figure 2-1** et **Tableau 3-1**). Par sa longueur totale de 4 200 Km, le Niger est le 3^{ème} plus long fleuve d'Afrique et le 7^{ème} dans le monde. À la station de mesure de débits à Koulikoro (au Mali), la surface de drainage du fleuve est de 120609 Km² avec un débit moyen mensuel de 1300 m³ . s⁻¹ (1950-1995).

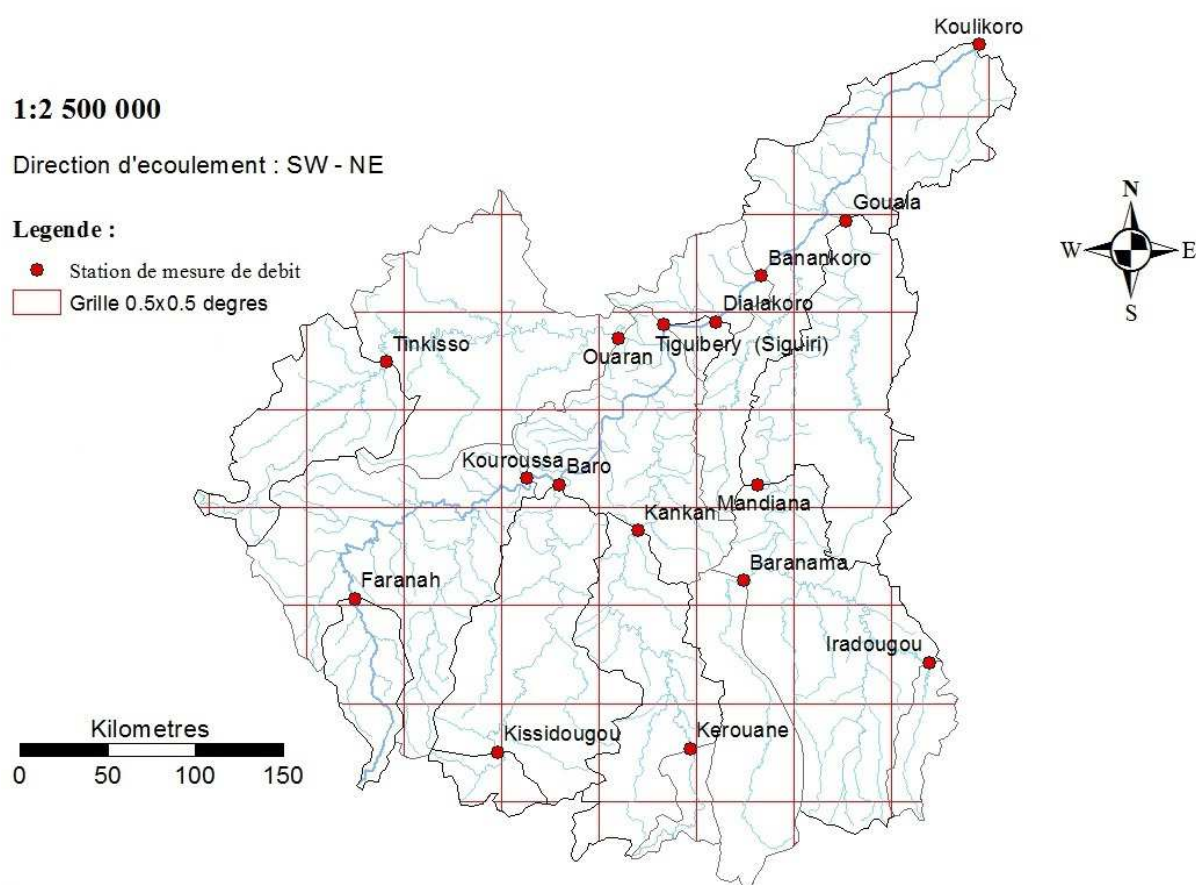


Figure 2-1: Seize sous-bassins versants du Niger supérieur et affluents.

(L'exutoire est situé à Koulikoro, au Mali. Source : adaptée de <http://www.hydrosociences.fr/sierem/>)

Dans la présente étude, la classification de Strahler est utilisée pour déterminer l'ordre des rivières (Yang & Lee, 2001). Seuls les rivières d'ordre 1, 2, et 3 sont concernées ; et c'est sur lesquelles se trouvent nos stations hydrométriques (cf. **Figure 2-1** et **2-2**). Nous étudierons un jeu d'échantillons de seize sous-bassins désignés par le nom de la station de mesure qui se trouve à leur exutoire respectif.

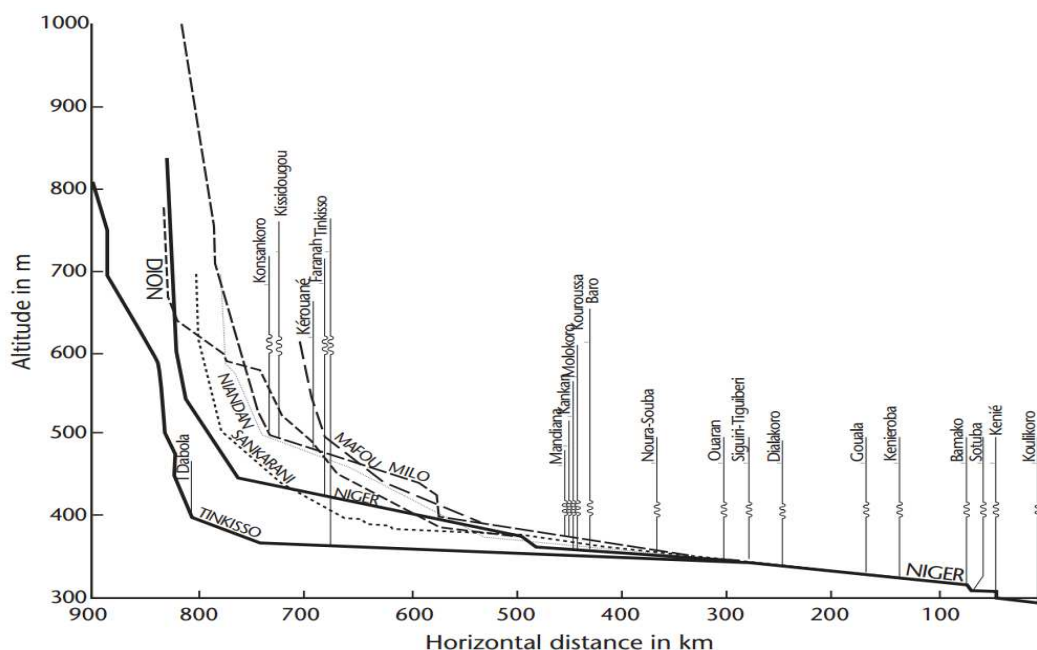


Figure 2-2: Profil du fleuve Niger et ses affluents.
(Adaptée de Brunet-Moret et al., 1986 ; cf. références)

2.2 Situation Hydrométéorologique de la zone d'étude

Le régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest est régi par la rencontre entre deux courants de vent, le harmattan (alizé continental) qui est un vent chaud et sec de secteur Nord-est à Nord et la mousson (issu d'un alizé maritime) qui est un vent chargé d'humidité de secteur Sud-ouest à Ouest. Les alizés proviennent de la bordure orientale des anticyclones. Nous distinguons entre l'alizé continental et l'alizé maritime :

(i) L'alizé continental (harmattan) est issu de l'anticyclone Saharo-méditerranéen, son air polaire initial se tropicalise et il devient instable en survolant le Sahara.

(ii) Le flux de mousson résulte de la déviation des alizés maritimes par la force de Coriolis après avoir franchi l'équateur. Ces alizés proviennent de l'anticyclone de Sainte-Hélène.

Le domaine de rencontre de ces deux vents se nomme le Front Intertropical de Transition (FIT), dont la trace au sol coïncide avec la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) qui se caractérise en Afrique de l'Ouest par un alignement zonal de nuages convectifs à fort développement vertical, les cumulo-nimbus. La FIT se situe au centre de la zone de basses pressions intertropicales au contact dynamique des circulations atmosphériques des deux hémisphères. Le mouvement zénithal du soleil commande la migration du ZCIT, ce qui explique la mise en place des différents régimes saisonniers. En juin-juillet-août, la ZCIT se déplace vers le nord, pour atteindre sa position septentrionale vers 20°N. C'est la saison des

pluies dans les zones sahéliennes. Il y a des années où la rencontre entre les deux courants d'air, se passe près des côtes océaniques en défaveur de l'intérieur des continents : ce sont des années néfastes pour le Nord, en termes de pluviométrie.

La zone d'étude pour ce travail se situe en Afrique de l'Ouest dans la Zone de Convergence Intertropicale, où les variations des précipitations, dans l'espace et dans le temps, apparaissent très liées aux composantes aérologiques (Picouet, 1999 ; Ardoin-Bardin, 2004; Koné, 2007).

2.3 Régime hydrologique

Les deux types de régime hydroclimatique s'étendant sur la zone d'étude sont le régime tropical pur et le régime tropical de transition. Le premier concerne une partie des bassins versants de la **Figure 2-1** dont les exutoires sont situées au Mali (cf. **Tableau 3-1** : code IRD commençant par le chiffre 12, Banankoro et Koulikoro); le second concerne les stations situées en Guinée et en Côte d'Ivoire (**Figure 2-3**). Patrel et al., (2006a), citant Rodier (1964), caractérise *le régime tropical pur* par une saison de hautes eaux en juillet à début octobre suivit d'une saison de basses eaux. *Le régime tropical de transition* avec une saison de hautes eaux plus longue que la précédente, s'étend au moins sur une durée de 6 mois ; et sans regard au phénomène de déplacement climatique la ligne Siguiri-Bougouni-Sikasso est celle de démarcation avec *le régime tropical pur*, qui a une seule saison des pluies (Picouet, 1999).

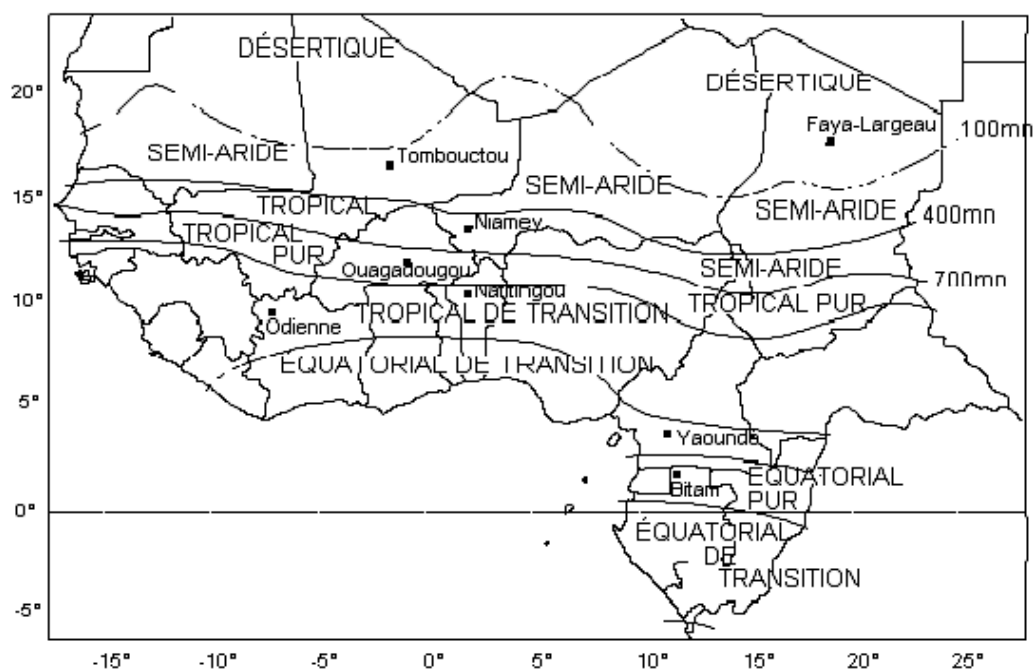


Figure 2-3 : Répartition géographique des différents types de climat.
(D'après Picouet, 1999 citant Hôte et al., 1996)

2.4 Données d'entrées et de sortie des modèles

La base de données du *Climatic Research Units* (www.cru.uea.ac.uk/cru/data/index.html) et celle du SIEREM (Boyer et al., 2006), consistant en grande partie en une recompilation et ré-analyse des données hydroclimatiques disponibles, serviront majoritairement comme source de données lors de cette étude de modélisation hydrologique. Les fichiers de pluie au sein du Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eaux et leur Modélisation (SIEREM) proviennent en grande partie du *Climatic Research Units* (CRU) de l'*University of East Anglia* (UEA) en Angleterre, des archives des services hydrologiques nationaux en Afrique, et des laboratoires de recherche français (Mahé et al., 2005, 2006 & 2008b ; Rouché et al., 2010). Les données sur la température, la pression de vapeur saturante et d'autres variables (l'insolation totale mensuelle et le vent moyen quotidien...), intervenant dans les calculs de l'évapotranspiration-potentiel ou ETP (Ardoin, 2000 ; Lavado, 2010), pourraient être téléchargées sur le site web du CRU (www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/). La CRU fournit également les données ETP dont le lien d'accès pointe vers le site web (http://badc.nerc.ac.uk/data/dataset_index/) du *British Atmospheric Data Centre* (BADC). Les fichiers de WHC (Water Holding Capacity) au sein du SIEREM (<http://www.hydrosciences.fr/sierem>), portant sur la capacité de rétention de l'eau par le sol, sont calculés partant des données fournies par la FAO, et pourrait également être calculé partant de la base de données *Harmonized World Soil Database* - HWSD (FAO et al., 2012). D'autres informations sur les sols pourraient être extraites d'images satellitaires, et cela similairement à une méthodologie d'extraction de l'humidité (du sol) proposée par Loumagne et al., (2001). L'introduction de l'information de sols a été concomitante avec celle de la spatialisation dans la modélisation hydrologique au laboratoire HydroSciences Montpellier (HSM) et a conduit à la transformation d'un modèle non-distribué (global) en un modèle semi-distribué (semi-global) au sein du HSM (Haziza, 2003 ; Paturel et al., 2003 ; Ardoin, 2004; Diello, 2007 ; Koné, 2007). Les fichiers de débits, qui sont dans la plupart des cas issus des 10 volumes du livre « Monographie hydrologique du fleuve Niger » (Brunet et al., 1986) et des archives des services hydrologiques nationaux en Afrique, ont généralement été ré-analysés et recompilés parfois pour des besoins de comblement de lacunes (dans les séries chronologiques de débits) avant leur stockage au sein du SIEREM. Toutefois, des données maillées en grand nombre sont disponibles sur des sites web comme <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Index.jsp> du *World Data Center for Climate* à Hambourg, en Allemagne, et <http://www.icsu-wds.org/services/data-portal> de l'*International Council for*

Science (ICSU). La multitude des données qu'on peut trouver sur ces sites web sont pour la plupart formatée comme informations d'entrées des Modèles de Circulation Générale (MCG) ou celles des Modèles Climatiques Globaux/Régionaux e.g. le UVIC-ESCM <http://climate.uvic.ca/model/2.9/> de l'Université Victoria, au Canada, le projet GEOMIP, <http://climate.envsci.rutgers.edu/GeoMIP/> de l'Université de Rutgers, aux USA, et les modèles HadCM3, <http://www.metoffice.gov.uk/> de Met office, en Angleterre : l'exploitation de ces modèles sont au-delà de l'objectif de la présente étude.

Mahé et al., (2008a), partant des écoulements simulés par le modèle GR2M et utilisant les projections climatiques, détectent une légère augmentation de l'écoulement de surface en Afrique de l'ouest aux horizons 2020 (par rapport à la période 1966-1995) et 2050, suivit d'une diminution à l'horizon 2080 (**Figure 2-4**). Changeant de période de référence à 1971-1995, Ardoin-bardin et al., (2009) arrivent quasiment aux mêmes constats à la station hydrométrique de Bakel sur le fleuve Sénégal, en Afrique de l'Ouest (**Figure 2-5**), et ceci suivant deux méthodes de contraindre les sorties des MCG (suivant la tendance détectée sur la période de référence) pour en faire des données d'entrée des modèles hydrologiques : anomalie standardisée sur la moyenne des simulation du MCG par rapport à des données d'observation sur une période de référence (les scénarios d'anomalie) et les scénarios d'horizon basés sur le changement de ratio par rapport à la période de référence.

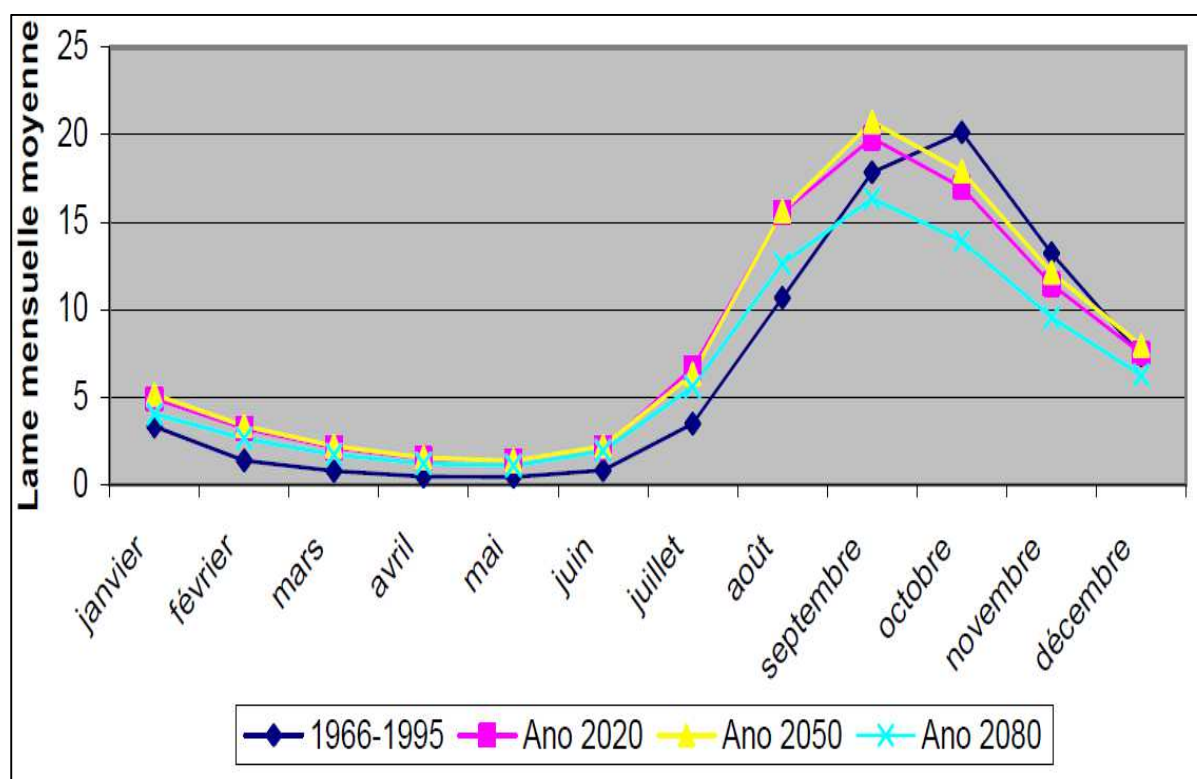


Figure 2-4 : Projection saisonnière de débits mensuels sur le bassin du fleuve Niger [à Mopti]. (Partant de sorties du modèle HadCM3 suivant le scénario SRES-A2 (Rescan, 2005 ; Mahé et al., 2008a)).

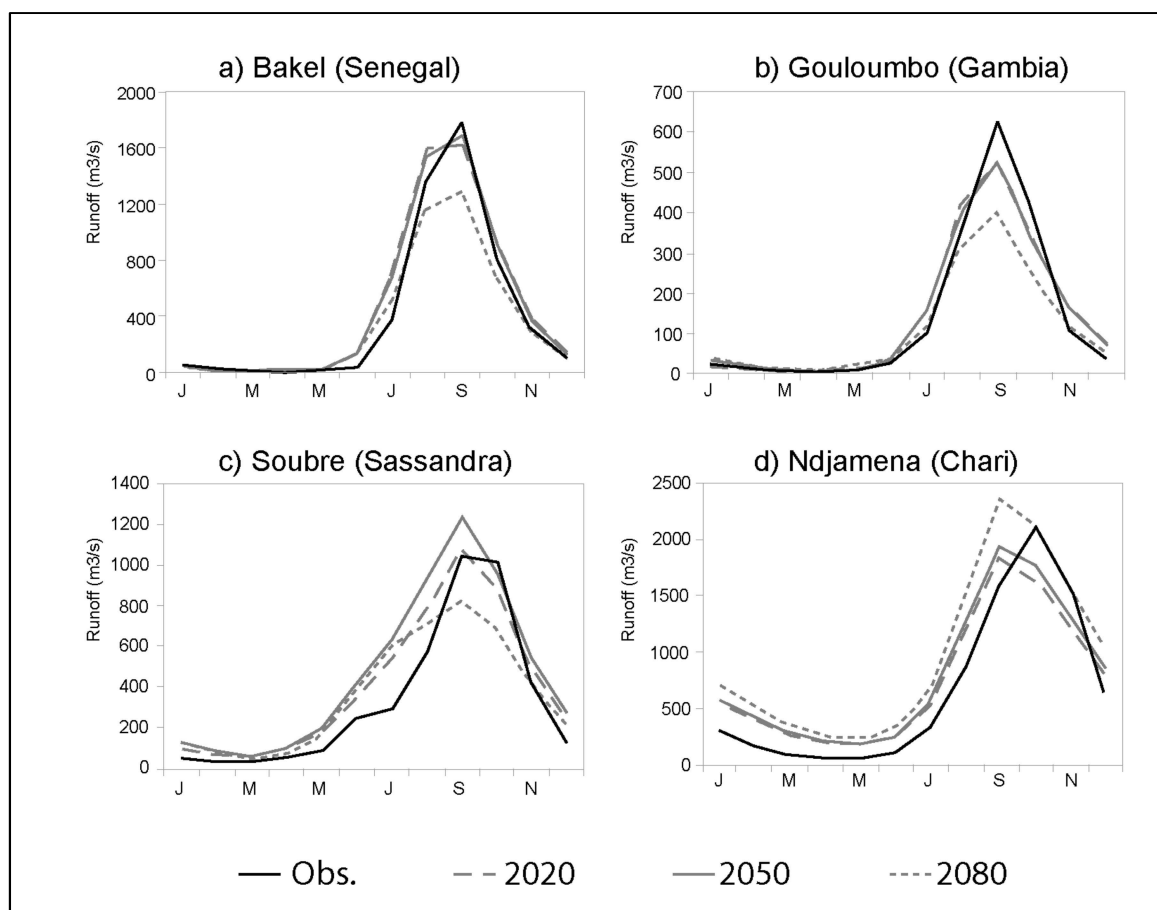


Figure 2-5 : Hydrographes moyen (en $m^3.s^{-1}$) aux horizons 2020, 2050, et 2080 (Horizons scenario) comparée à celui observé sur la période 1971 – 1995. (D'après Ardoin-bardin et al., (2009))

2.4.1 Données Pluies, et Processus d'Extraction

Sous la désignation **cru_ts3.20**, des répertoires contenant plusieurs variables avec leurs stations de mesures et, les stations intervenant dans l'estimation spatiale en des nœuds de la matrice 360-latx720-long (couvrant ainsi la terre entière), sont publiées sur le site web de la BADC par la CRU. Les données de la pluie partant de 1901 à 2013 s'y trouvent actuellement avec une mise à jour prévue semestriellement. Nous avons développé en **annexe 1** un algorithme sous le langage de programmation R (www.r-project.org), ce qui permet d'extraire sur toute fenêtre géographique la série temporelle de la pluie des différentes mailles (0.5x0.5 degrés) qui la concerne (Reimann et al., 2009). Nous avons ainsi bâti une base de données pluie sous la désignation **Pluie_CRU** pour l'entrée des modèles hydrologiques de la présente étude. Parallèlement la base de données SIEREM fournit des données pluie sous la désignation **GrilleIRD**. Plus récemment, en 2014, avec la version **cru_ts3.21** des données climatiques, le site web de la BADC pointe vers un outil d'extraction de données plus performant, **CEDA WPS**. Cet outil est une interface machine-utilisateur qui

facilite l'extraction des données pour toute fenêtre géographique indiquée. Les chroniques des données pluviométriques dans la sous-région Ouest Africaine (spécifiquement sur le bassin du fleuve Niger) sont principalement marquées par une baisse de précipitation autour des années 1969 et 1970 et qui persiste au moins sur une décennie (**Figure 2-6** ci-dessous). À noter que dans la partie sahélienne du Bassin versant, cette baisse de pluviométrie est accompagnée d'une hausse paradoxale d'écoulement de surface qui est due principalement à l'augmentation des aires cultivées et à la diminution de la végétation naturelle (Clanet et Ogilvie, 2009).

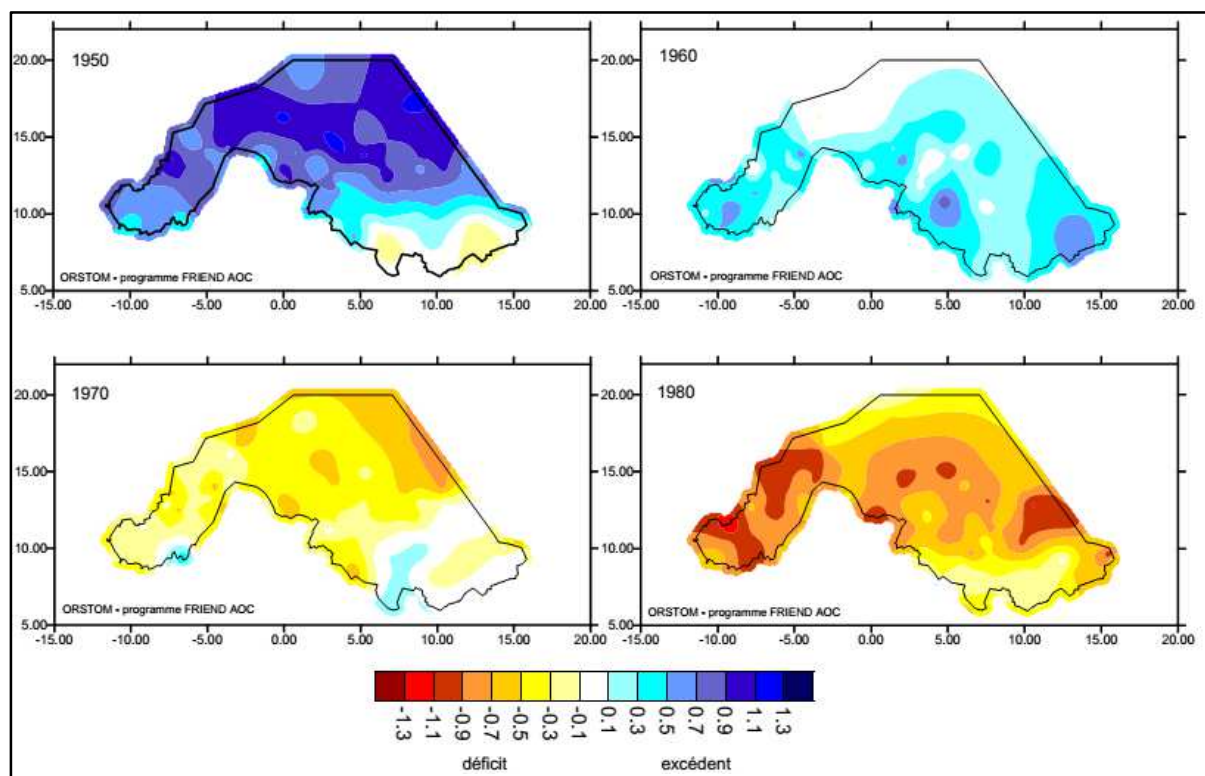


Figure 2-6 : Index de la pluviométrie sur le Bassin du fleuve Niger
(D'après Paturel et al., 2007 ; Clanet et Ogilvie, 2009)

2.4.2 Données ETP, et processus d'extraction

Les fichiers Pluie et ETP de la CRU étant dans un même format, un même algorithme pourrait être utilisé pour extraire des fenêtres de données. Pour la mise en format correct pour l'entrée de nos modèles hydrologiques, il faudrait mettre les fichiers pluie et ETP au pas de temps mensuel si nécessaire et, d'enlever le facteur multiplicateur que la CRU applique à ces fichiers. Les fichiers Pluie sont déjà mensualisés et le facteur multiplicateur est 10 ; les fichiers ETP sont par jour, et il faudra les multiplier par le nombre de jours du mois considéré et diviser le tout par 10, (pour annuler le facteur multiplicateur). Nous avons ainsi bâti une base de données Évapotranspiration sous la désignation **ETP_CRU**, pour l'entrée des

modèles hydrologiques de la présente étude.

2.4.3 Données Sol, et processus d'extraction

L'organisation cartographique des données adoptée par le site web de SIEREM (Boyer et al., 2006) permet d'importer les données WHC dans des logiciels SIG comme celui de l'ESRI, ArcMap. Dans ce logiciel les données WHC par maille pourront être récupérées à partir de la table d'attribut de chaque bassin versant. Au-delà des objectifs de la présente étude, une méthodologie d'extraction des données WHC pourrait être adaptée pour avoir ces données directement à partir de la base de données sol, *Harmonized World Soil Database*, HWSD-2012 (FAO et al., 2012a). Par ailleurs, Diello et al., (2006) présente une méthodologie de prise en compte de l'évolution des états de surface dans la modélisation hydrologique, et ceci à travers le calcul évolutif des valeurs du WHC, de chaque maille, et par pas de temps de la simulation : WHC évolutive. Ces calculs sont rendus possibles grâce à l'extraction d'information des états de surface (culture, végétation naturelle, sol dégradé, et plan d'eau) à partir des images satellitaires (Diello, 2007). Les études de Dezetter et al., (2010) n'ont trouvées aucune amélioration dans la modélisation de GR2M avec WHC évolutive par rapport à celle avec WHC fixe. Par rapport à la pondération utilisée dans les présentes versions de GR2M et de SimulHyd, où le coefficient de pondération de l'influence des différentes mailles du bassin versant est établi à partir du coefficient de variance empirique de WHC, le concept de rendre WHC évolutive pourrait avoir un impact sur les résultats de la modélisation ; surtout que la formulation de SimulHyd est basée, lors du processus d'optimisation, sur l'évolution inversement concomitante du paramètre X1 et du coefficient multiplicateur de WHC. Toutefois, les arguments qui ont soutenus la mise en place de SimulHyd à partir de GR2M (cf. **sous-chapitre 3.2**) veulent que ce dernier simule mieux, sur le bassin du haut Niger, si la constante **A** (remplacée par WHC) tend vers une valeur optimale (celle obtenue avec le modèle GR3M). En dépit de l'idée que *WHC évolutive* pourrait avoir un impact au moins avec le modèle SimulHyd et probablement avec notre version GR2M semi-distribuée, – *utilisant la forme évolutive du coefficient de pondération proposée (Encadré 4-1 au chapitre 4) et en se servant probablement d'autres artifices mathématiques (comme la formule d'atténuation d'incertitude, Encadré 4-2/3 au chapitre 4) –*, la présente étude s'accommode avec les valeurs fixes du WHC par maille de bassins versants.

2.4.4 Données débits, et processus de comblement de lacunes

Les fichiers de débits sont ceux reçus à l'IRD et constituent les données de base du mémoire de Master Recherche au laboratoire HydroSciences Montpellier (Koné, 2007). Nous avons ainsi les fichiers débits de 45 bassins versants de la zone d'étude, qui sont aussi compilées dans la base de données SIEREM de l'HydroSciences Montpellier <http://www.hydrosciences.fr/sierem/>. Ces données débits de l'IRD sont la plupart tirés des livres des séries Monographie du fleuve Niger (Brunet et al., 1986), où ces débits ont été préalablement publiés en grande partie par des chercheurs de l'IRD, et en accès libre pour le public. Ces données de débits sont aussi compilées et reconstituées au sein des services nationaux de certains pays concernés (Sangaré et al., 2002 ; FAO, 2012b). Par ailleurs, une base de données de 1080 bassins versants, associés à l'ICSU sur le site web <http://doi.pangaea.de/>, présente plus ou moins ces mêmes données de débits. Ces séries de débits contiennent des lacunes due entre autres au manque de mesure de terrain et ou à la faible fiabilité de certaines mesures de hauteur d'eau ; pour combler ces lacunes dans des séries de débits, soit des méthodes de régression linéaire entre les débits des stations proches d'un même cours d'eau sont réalisées (Bamba et al., 1996), ou soit des laboratoires comme l'IRD et l'HydroSciences Montpellier utilise généralement des modèles conceptuels comme GR2M ou WBM pour substituer les résultats de simulation de ces modèles aux lacunes dans ces chronique d'observation de débits. Toutefois, l'analyse comparée de ces séries de débits permet d'apprécier deux paradoxes hydrologiques en Afrique de l'Ouest : la diminution persistante des écoulements en milieu soudano-guinéen, et l'augmentation des débits en milieu sahélien (Mahé, 2006). Les modèles utilisés dans la présente étude ne nécessitent pas un comblement préalable des lacunes des données de débits. La **Figure 2-7** (ci-après) présente les débits observé et simulé (avec GR2M) à la station de Koulikoro, ainsi que la pluviométrie entre 1950 et 1995, ces graphes pour les 15 autres stations sont présents dans les **annexes 5 & 7**. La relation entre les eaux de surface et les nappes est discutée au **sous-chapitre 5.3**. Cette relation entre ces eaux existe dans bien des zones en Afrique de l'Ouest, comme le cas du Mali entre les isohyète 200 et 1200 mm (UN-WATER/WWAP/2006/10, 2006).

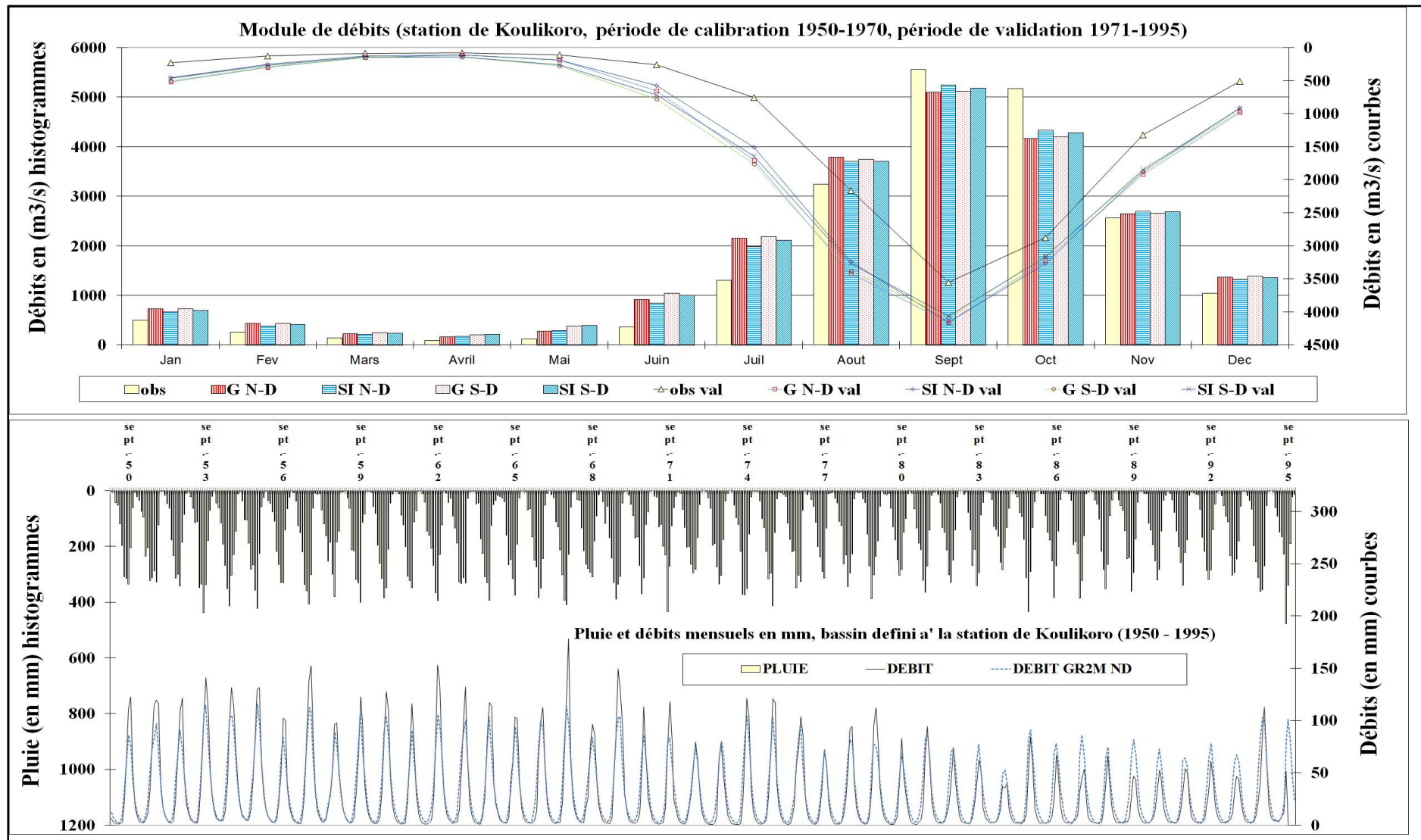


Figure 2-7: La Pluviométrie et les débits observé et simulé (avec GR2M) à la station de Koulikoro. ([En haut] module de débits, [en bas] chroniques et simulation mensuelle).

CHAPITRE 3

VALIDATION D'UNE MODELISATION SUR LE FLEUVE NIGER : LE MODELE SIMULHYD

3. Chapitre 3. Validation d'une Modélisation sur le fleuve Niger : le modèle SimulHyd

Un modèle hydrologique robuste comme outil de recherche scientifique reste un maillon manquant, non seulement au sein de l'École Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT) au Mali, mais aussi pour beaucoup d'autres structures de recherche et bureaux d'étude dans la sous-région Ouest Africaine. Le présent chapitre s'articule autour de la présentation des données d'études, de la structure du modèle SimulHyd et la stratégie de modélisation adoptée, l'établissement de ce modèle à partir du modèle GR2M, et les protocoles et résultats de validation du modèle SimulHyd.

3.1 Préparations des données de la Modélisation

Tableau 3-1 : Récapitulatif des Bassins versants et données caractéristiques

Bassins	Caractéristiques			Choix des débits					
	Aire en Km2	Grille (0.5x0.5)	Code station IRD	Première période : PC1			Seconde période : PC2		
				Année de début	Année de Fin	Lacune en %	Année de début	Année de Fin	Lacune en %
Banankoro	73458	49	1271500110	1971	1980	46.00	1981	1999	23.00
Baranama	6608	8	1171503506	1973	1980	55.00	1981	1995	9.00
Baro	13108	15	1171501805	1950	1970	8.00	1971	1995	51.00
Dialakoro	70591	49	1171500110	1957	1970	39.00	1971	1980	57.00
Faranah	3178	4	1171500115	1969	1980	27.00	1981	1995	8.00
Gouala	33075	26	1271502005	1961	1970	53.00	1971	1978	74.00
Iradougou	1824	5	1091504003	1965	1970	0.00	1971	1995	4.00
Kankan	10080	14	1171501705	1950	1970	3.00	1971	1995	4.00
Kérouane	1423	4	1171501707	1973	1980	53.00	1981	1995	59.00
Kissidougou	1400	5	1171501810	1960	1970	17.00	1971	1995	29.00
Koulikoro	120603	73	1271500142	1950	1970	0.00	1971	1995	1.00
Kouroussa	17201	15	1171500120	1950	1970	22.00	1971	1995	42.00
Mandiana	21952	16	1171501201	1957	1970	23.00	1971	1995	33.00
Ouaran	19777	21	1171502505	1957	1970	25.00	1971	1985	18.00
Siguiry	71064	50	1171500130	1954	1970	16.00	1971	1995	36.00
Tinkisso	6569	10	1171502510	1958	1970	43.00	1971	1995	48.00

L'un des problèmes récurrents associé à la recherche scientifique en Afrique de l'Ouest est le manque de données hydroclimatiques ou leur difficulté d'accès. Les différentes données hydrométéorologiques utilisées dans le présent travail de thèse sont présentées avec leurs

méthodologiques d'extraction à travers diverses bases de données internationalement connues. Le langage de programmation informatique « R » est utilisé pour traduire l'algorithme d'extraction de certaines données telles que la pluviométrie et l'évapotranspiration. Les données hydrométéorologiques, ainsi que leurs origines, sont décrites dans le **sous-chapitre 2.4**. Le choix des périodes d'études pour les différents bassins versants a été opéré selon la disponibilité des données de débits et en respectant un constat climatique relatif à la pluviométrie: l'année 1970 marque une coupure dans cette série en Afrique de l'Ouest (Ardoin, 2004). Ainsi, sur la plupart des bassins versant l'année 1970 sépare la période de paramétrisation, ou calibration des modèles, de celle de leur validation (cf. **Tableau 3-1** sur la page précédente).

3.2 Le modèle SimulHyd

Les modèles conceptuels en hydrologie présentent l'avantage d'être simple et proche du fonctionnement du système hydrologique à modéliser sans pourtant respecter toute la physique sous-jacente aux processus d'échanges entre les différents compartiments, ou réservoirs, de ce système. Du fait de leur simplicité et flexibilité, ces modèles sont préférentiellement utilisés dans des zones ou dans des conditions où les données d'observation sont rares ou peu fiables dans le temps et/ou dans l'espace. Au-delà de servir d'outils de prévision et projection hydrologique, ces modèles permettent la production de données en leur sortie servant au comblement de lacunes dans les chroniques d'observations de débits des rivières et aussi (la production) d'estimations pouvant servir comme données d'entrées des modèles plus complexes, considérés d'être à base semi-physique ou physique. Le modèle SimulHyd est un modèle conceptuel particulièrement adapté au bassin du haut Niger, en Afrique de l'Ouest.

3.2.1 Historique du modèle GR2M et mise en place de SimulHyd

À leur développement les modèles GR (modèle du CEMAGREF dont l'anagramme signifie : Génie Rural) sont des modèles à réservoirs (Edijatno et Michel, 1989), dont le remplissage initial du premier (réservoir sol) est fixé à une valeur constante (A) exprimée en millimètre pour la variante GR2M (qui est de deux paramètres et concerne la modélisation Mensuel). Dans la version de Makhoulf (1994), GR2M est un modèle à deux paramètres (X1, X2) et à deux données d'entrée, la pluie et l'évapotranspiration. Des travaux entrepris à l'HydroSciences Montpellier ont conduit à la proposition d'une grandeur physique en

remplacement de la constante A (existant à l'intérieur du modèle). Cette grandeur physique, notée WHC (**W**ater **H**olding **C**apacity) par d'autres auteurs (Ardoin-bardin, 2004 ; Diello, 2007) et dans nos travaux précédents (Koné, 2007, 2013a & 2013d), caractérise la capacité du sol à retenir de l'eau. Cette proposition des données du WHC à la place de la constante A rend inopérante l'idée de prendre le niveau initial du réservoir sol comme un paramètre supplémentaire à optimiser lors de la calibration des modèles. WHC est ainsi considéré comme une troisième donnée d'entrée du modèle GR2M et, l'élargissement de l'influence du paramètre X1 à toutes les données d'entrée du modèle a conduit en 2007 à une amélioration significative de la modélisation hydrologique avec GR2M (Koné, 2007). Dans nos travaux précédents nous avons ainsi franchi une étape significative en appliquant l'inverse du paramètre X1 à la capacité maximale du réservoir sol (**Figure 3-1**), remplaçant ainsi la constante A par le terme $(1/X1) \cdot WHC$; associée à cette modification, une autre sur la règle de pondération de l'influence des différentes mailles en modélisation semi-distribuée, et diverse autres propositions d'améliorations de la modélisation hydrologique, a conduit à la proposition d'une nouvelle version de GR2M sous l'anagramme SimulHyd, ou **Simulation des Systèmes Hydrologiques** (Koné, 2007, 2013a, 2013d & 2014b).

3.2.2 Proposition de mise en place de GR2M.1/X1*WHC (ou SimulHyd)

Il y a deux justifications à cette proposition (Koné, 2007) :

- a) En modélisation non-distribuée, après avoir calibré les paramètres du modèle, on peut être tenté de calibrer la donnée sol suivant une seconde optimisation unique sur cette dernière – rappelons que dans les versions initiales, cela pouvait se faire ; HSM a choisi d'associer à cette donnée une valeur de capacité de rétention en eau du sol (en anglais, **W**ater **H**olding **C**apacity) ou **WHC** : on constate que la valeur de WHC obtenue est généralement supérieure à la valeur du WHC moyen (FAO max) du bassin versant et que la performance du modèle s'améliore davantage.
- b) On a constaté que le modèle GR3M, qui optimise lors de la phase de calibration la valeur du paramètre A (= WHC) en même temps que les deux paramètres libres du modèle (X1, X2), est plus performant que le modèle GR2M qui n'optimise que les paramètres X1 et X2 ; la nouvelle valeur de A est généralement supérieure à la valeur du WHC moyen du bassin versant considéré. Ceci est attesté sur 15 de nos 16 bassins versant en modélisation globale ; cela conforte ce qui a été observé au point (a) ci-dessus.

On a défini un protocole qui a permis de confirmer le point **(b)** sur les mêmes bassins versants en modélisation semi-distribuée, et ceci à travers la modification du fichier WHC en entrée du modèle : développement de la modélisation GR2M%WHC (**Encadré 3-1** ci-dessous). Il existe ainsi un WHC optimal, supérieur au WHC FAO max, qui maximise davantage la performance du modèle. Ce WHC optimal est fourni par le modèle GR3M; on constate qu'en répétant le **(a)** les WHC successifs qu'on obtient tendent vers ce WHC optimal. Ces constats ont suscités une série de questions et de tests :

- ✓ En réfléchissant par rapport au point **(a)**, faut-il ne pas laisser le modèle d'appliquer au WHC un coefficient supérieur à 1?
- ✓ Au lieu de remplacer le paramètre interne A par WHC, qu'est ce qui se passera si on le remplace par $(1/X1)*WHC$? Les paramètres du modèle GR2M sont X1 et X2, qui sont sans dimension et varient entre 0.0001 et 1. Le choix de 1/X1 (qui est supérieur à 1) s'explique par le fait que X1 intervient déjà dans la partie « fonction de production » qui englobe le « réservoir sol » du modèle alors que X2 intervient dans la partie « fonction de transfert ou de vidange du réservoir gravitaire ».

Cette proposition de modification applique un coefficient multiplicatif à WHC ; le choix proposé est de fixer ce coefficient multiplicatif à 1/X1, conduisant au modèle SimulHyd (ou **GR2M.1/X1*WHC**).

Encadré 3-1 : Adaptation des fichiers WHC pour simuler « GR3M semi-distribuée »

Modification du fichier WHC pour la modelisation semi-distribuée GR2M%WHC (i) dans le modèle GR2M global non-distribuée est utilisé la moyenne des WHC_moyen du bassin versant, le modèle GR3M non-distribuée part de cette valeur pour proposer un WHC_optimal. On calcul le taux de variation observé lors du passage de WHC_moyen du bassin versant à WHC_optimal obtenue avec la version non-distribuée de GR3M :

$$taux_{whc} = \left| \frac{WHC_{moyen \text{ du bassin}} - WHC_{optimal(obtenu \text{ avec } GR3M)}}{WHC_{moyen \text{ du bassin}}} \right|$$

(ii) On augmente la valeur contenue dans chaque maille i du fichier WHC, en entrée de la version semi-distribuée de GR2M, comme suit :

$$\begin{aligned} WHC_{(adaptation \text{ de } GR2M \text{ à } GR3M)maille i} &= WHC_{maille i} + taux_{whc} \cdot WHC_{maille i} \\ &= WHC_{maille i} \cdot (1 + taux_{whc}) \\ &= WHC_{maille i} \cdot \left(1 + \left| \frac{WHC_{moyen \text{ du bassin}} - WHC_{optimal(obtenu \text{ avec } GR3M)}}{WHC_{moyen \text{ du bassin}}} \right| \right) \end{aligned}$$

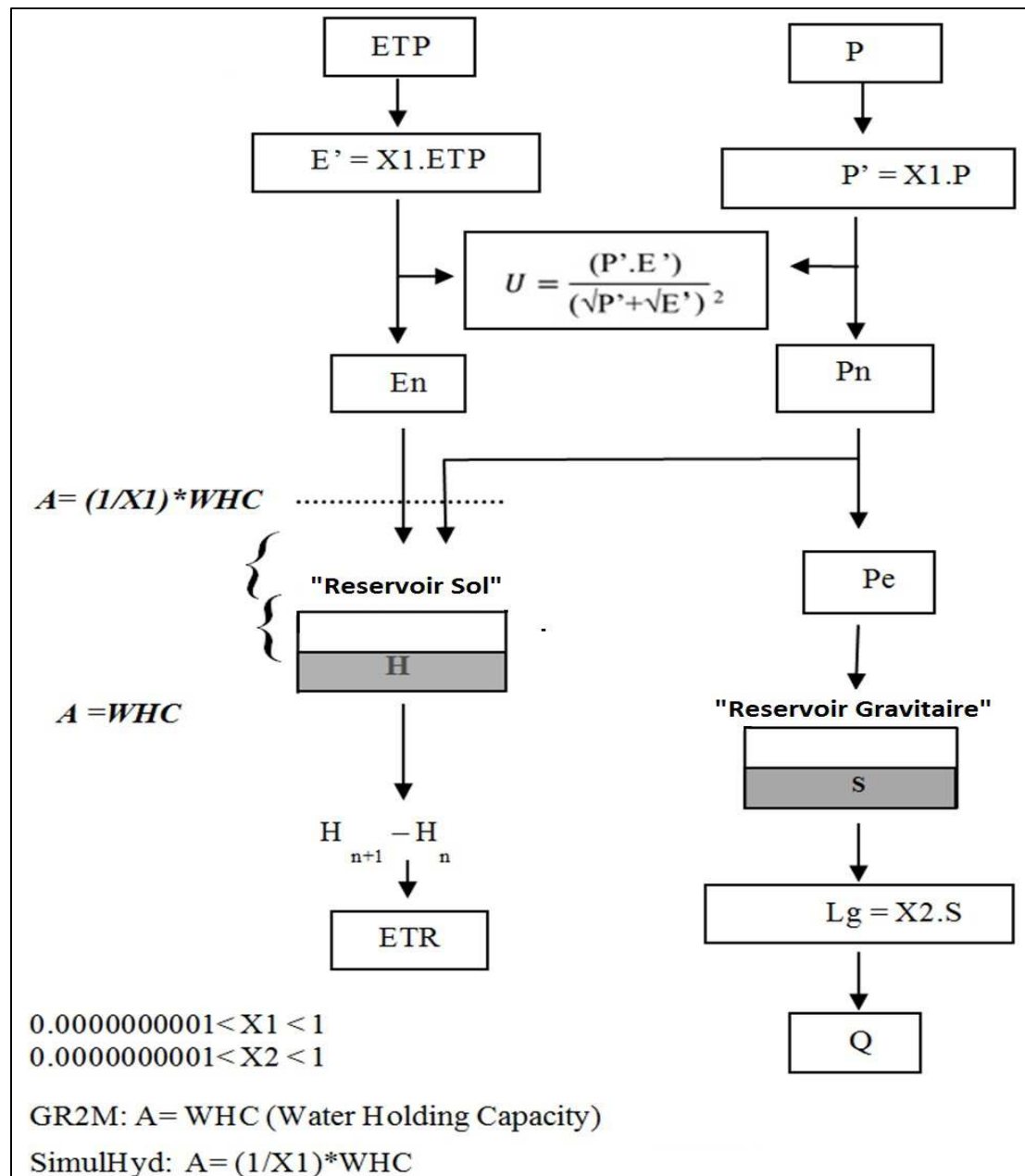


Figure 3-1 : Schéma conceptuel des modèles GR2M et SimulHyd. (Adaptée de Makhlouf & Michel, 1994)

3.2.3 Définitions Mathématiques et schéma des modèles GR2M et SimulHyd

3.2.3.1 Modulation des données entrée

Aux données d'entrée hydroclimatique, la pluie et l'évapotranspiration, on applique le paramètre X1 : $P' = X1.P$, et, $E' = X1.E$; avec P' et E', respectivement une pluie et une ETP « utiles ».

Pour le modèle SimulHyd uniquement, à la donnée concernant la capacité de rétention du sol en eau, on applique l'inverse du paramètre X1 : $A = (1/X1).WHC$

3.2.3.2 Neutralisation d'une portion des données d'entrée

On soustrait une même quantité U à la pluie et à l'évapotranspiration ; U représente l'interception de la canopée et autres obstacles: $U = \{ P'.E' \} / \{ [(P')^{(1/\gamma)} + (E')^{(1/\gamma)}]^\gamma \}$

Dans des précédentes études sur des bassins versants en Afrique de l'Ouest la valeur de $\gamma=2$ a été adoptée (Paturel, 2003; Ardoin, 2004; Koné, 2007, 2013a, 2013d & 2014b). La **neutralisation** prendra ainsi la forme : $P_n = X1.P - U$ et $E_n = X1.E - U$

3.2.3.3 Impact de P_n sur le niveau initial H du réservoir sol

L'apport de P_n fait que le niveau d'eau du réservoir sol augmente de H à $H1$:

$$H1 = \{ H + A.V \} / \{ 1 + H. (V/A) \} \text{ avec } V = \text{Tanh} (P_n/A)$$

Le complément de P_n est alors : $P_e = P_n - (H1 - H)$

3.2.3.4 Impact de E_n sur le nouveau niveau $H1$ du réservoir sol

Le niveau d'eau $H1$ du réservoir sol démunie sous l'effet de l'évapotranspiration et devient $H2$: $H2 = \{ H1. (1 - W) \} / \{ 1 + W. [1 - (H1/A)] \}$ avec $W = \text{Tanh} (E_n/A)$

$H2$ correspond au niveau du réservoir sol pour le pas de temps suivant. L'évapotranspiration réelle ETR peut être déduite par différence des niveaux du réservoir sol du début et à la fin de chaque pas de temps : $ETR = H_{n+1} - H_n$

3.2.3.5 Partition de l'eau entre l'écoulement directe et gravitaire

Le second réservoir du modèle GR2M, le réservoir sol, reçoit la part d'eau qui n'a pas contribué à l'écoulement direct. Le niveau S du réservoir gravitaire au début du mois considéré augmente et devient $S1$: $S1 = S + (1 - \alpha).P_e$

Le coefficient α étant celui de l'écoulement direct : $S_r = \alpha.P_e$

L'eau délivrée (pendant le mois) par le réservoir gravitaire est : $L_g = X2.S1$

Le niveau $S2$ du réservoir gravitaire à la fin du pas de temps de calcul est alors : $S2 = S1 - L_g$

$S2$ correspond au niveau du réservoir gravitaire pour le pas de temps suivant. L'écoulement total (pendant le mois) est: $L = L_g + S_r$

3.3 Stratégie de modélisation adoptée

Deux périodes sont choisies sur chaque bassin versant. Le début et la fin de ces périodes dépendent de la disponibilité des débits observés. La baisse de la pluviométrie moyenne en

Afrique de l'Ouest vers les années 1969-1970 et la rupture statistique dans ces séries chronologiques ont été établis à travers différentes techniques statistiques (Ardoin, 2004). La préférence est donnée à l'année charnière 1970 comme fin de la première période et 1971 comme le début de la seconde période (Ardoin, 2004 ; Koné, 2007). Dans le cas où ces deux dates sont respectées, le début de la première période serait préférentiellement fixé à 1950, et la fin de la deuxième période à 1995. Sur un bassin où la série chronologique des débits est courte ou contient des lacunes, les dates de début, de séparation (année 1970), et de fin, prédéfinies préférentiellement ne sont pas toujours respectées (**Tableau 3-1**).

3.3.1 Résultats tests issus des modèles étudiés

Les résultats tests du modèle hydrologique montrent sa performance à simuler une observation tout en restant conforme aux résultats obtenus dans des travaux antérieurs effectués dans les mêmes conditions; cela rassure de la bonne démarche dans l'écriture des programmes numériques et du bon format des données d'entrée et de sortie des modèles. Nous avons effectué les tests des modèles GR2M et SimulHyd, sur le sous-bassin du fleuve Niger à la station de mesure de débits à Koulikoro (**Tableaux 3-2 à 3-10**), utilisant les différentes données d'entrée et de sortie décrites précédemment (**sous-chapitres 2.4 et 3.1**). Dans toutes les simulations la « période de mise en route » des modèles est fixée à deux ans ; C'est une durée initiale, choisie aux premiers instants de la simulation, pendant laquelle on laisse le modèle tourner sans que les calculs du critère de performance tiennent compte des débits simulés sur cette période. Elle englobe les données (Pluies, ETP, WHC) des deux années qui précèdent la date de début de la simulation ; à défaut, on répète les données (pluies, ETP, WHC) des deux premières années de la période de simulation qui serviront de période de mise en route. Cela permet d'initialiser les niveaux des différents réservoirs du modèle à des valeurs différentes de zéro.

Le protocole de simulation utilisé, lors du test des modèles, sur le bassin de Koulikoro est le suivant :

- ✓ Pour chacun des deux modèles, nous ferons la validation croisée sur les deux périodes 1950-1970 et 1971-1995, consistant à faire le calage des paramètres sur une période et de faire la validation sur l'autre période, et vis-versa. Nous restons en modélisation non-distribuée durant tout le protocole.
- ✓ Nous ferons le calage des paramètres sur une période avec un modèle et de procéder à la validation avec l'autre modèle sur l'autre période (utilisant les paramètres calés avec le premier modèle sur la première période), et vis-versa.

- ✓ Lors de la calibration « la période de mise en route », qui est une période sur laquelle on fait tourner le modèle sans prendre en compte les débits simulés durant cette période dans le calcul de performance des modèles, est fixée à deux ans, sur lesquels les données hydrologiques et hydroclimatiques des années respectives juste avant la date du début de la simulation sont concernées, si elles existent, sinon les données des deux premières années de la calibration sont transposées sur cette période.
- ✓ Le critère de performance utilisé lors du calage des modèles est celui proposé par Nash et Sutcliffe (1970) et connue sous le nom de critère de Nash. La version racine carrée du critère de Nash sera calculée passivement.
- ✓ Le critère d'optimisation utilisée lors du calage des paramètres (X1, X2) est celui de Rosen suivi de celui de Simplex, conseillé par Servat et Dezetter (1988).

Le Tableau au début des **annexes 2** (page IV) explicite la structure des **Tableaux 3-2 à 3-10** de ce mémoire et des autres Tableaux de ces **annexes 2**. Les paramètres X1 et X2 étant adimensionnels sont sans unité ; les débits Q_{obs} et Q_{calc} sont en litre/seconde ; et les critères Nash et *Nash- racine carrée* (Rac2Nash) sont en pourcent (%).

De l'analyse du **Tableau 3-2** (ci-après) il ressort les observations suivantes :

- ✓ En toute situation de validation croisée (entre les deux périodes : 1950-1970 et 1971-1995) le modèle SimulHyd se montre plus performant par rapport au modèle GR2M. **(A et B)**
- ✓ La baisse de performance du passage de la phase de calibration à la phase de validation est plus marquée pour le modèle GR2M que pour le modèle SimulHyd ; elle est également plus accentuée si la validation est effectuée sur la période 1971-1995 (après une calibration sur la période 1950-1970). Pour le modèle GR2M, cette baisse est environ 10 et 3 respectivement sur les périodes 1971-1995 et 1950-1970, et pour le modèle SimulHyd elle est environ 7 et 1 respectivement sur les périodes 1971-1995 et 1950-1970. **(A et B)**
- ✓ Les paramètres (X1, X2) de GR2M se montrent plus affectés par les échantillons de calage sur 1950-1970 quand il s'agit de les valider (avec le même modèle qu'avec le modèle SimulHyd) sur la période 1971-1995; alors que ce n'est pas le cas pour les paramètres (X1, X2) de SimulHyd en calage sur cette même période 1950-1970 (**C1** : les deux dernières colonnes à gauche).
- ✓ Les paramètres (X1, X2) de SimulHyd se montrent plus affectés par les échantillons de calage sur 1971-1995 quand il s'agit de les valider (avec le même modèle qu'avec le modèle GR2M) sur la période 1950-1970; alors que ce n'est pas le cas pour les

paramètres (X1, X2) de GR2M en calage sur la même période 1971-1995 (**C1** : les deux dernières colonnes à droite).

Tableau 3-2: modélisation non-distribuée sur le sous-bassin à Koulikoro (a)

A. KOULIKORO		Calage 1950-1970		Calage 1971-1995	
		Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
parametre1		0.541	0.595	0.432	0.516
parametre2		0.473	0.506	0.490	0.520
Nash		90.852	92.882	85.619	87.525
Rac2 Nash		91.697	93.402	90.322	90.894
B. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1447666	1392328	1391028	1474714
Nash		70.499	75.908	81.974	86.204
Rac2 Nash		76.906	81.738	91.566	92.487
C1. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1184072	1634366	1147458	1731772
Nash		86.599	45.768	64.838	90.268
Rac2 Nash		87.964	65.987	82.525	92.748

De l'analyse du **Tableau 3-3** (ci-après) il ressort les observations suivantes :

- ✓ SimulHyd est moins sensible à la dégradation du couple de ses paramètres optimal (X1, X2) que GR2M, ce Tableau présente les résultats de validation d'un modèle utilisant les paramètres obtenus avec l'autre modèle sur la même période. (**D1**)
- ✓ Les deux modèles sont plus sensibles aux perturbations sur leur paramètre X1 qu'à celles sur leur paramètre X2 ; seul l'un des paramètres est remplacé à la fois (**D2 et D3**). Patrel et al., (2006b) ont antérieurement fait ce constat, non pas en perturbant le couple de paramètres (X1, X2), mais en dégradant la chronique des débits observés ;

et découvrant, en plus, la grande sensibilité du paramètre X1 aux débits de plus hautes-eaux et celle du paramètre X2 à ceux des plus basses-eaux.

- ✓ Le modèle SimulHyd conserve mieux sa performance en cas de perturbation du couple de ses paramètres optimal (X1, X2) que le modèle GR2M en est capable ; SimulHyd est ainsi plus « robuste » que GR2M.

Tableau 3-3: Modélisation non-distribuée sur le sous-bassin à Koulikoro (b)

D1. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
parametre1		0.595	0.541	0.516	0.432
parametre2		0.506	0.473	0.520	0.490
Nash		87.183	88.321	73.420	75.546
Rac2 Nash		88.392	92.505	81.275	87.913
D2. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
parametre1		0.541	0.595	0.432	0.516
parametre2		0.506	0.473	0.520	0.490
Nash		90.534	92.574	85.373	87.299
Rac2 Nash		91.951	92.572	90.532	90.209
D3. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
parametre1		0.595	0.541	0.516	0.432
parametre2		0.473	0.506	0.490	0.520
Nash		88.489	89.444	75.710	76.663
Rac2 Nash		88.264	93.436	81.305	88.519

3.3.2 Interchangeabilité de jeu de paramètres entre versions des Modèles

Le point sur les résultats tests a permis, en modélisation non-distribuée (globale), de dégager le modèle SimulHyd comme le meilleur d'entre les deux (GR2M et SimulHyd). En un premier temps, les deux modèles seront comparés dans le contexte de modélisation semi-

distribuée, pour confirmer ou infirmer la prédominance de SimulHyd sur GR2M. Le second point sera de s'intéresser aux deux concepts, modélisation non-distribuée et modélisation semi-distribuée, afin de voir quel modèle et avec quel concept ce dernier reste le plus performant et sous quelles considérations. À la question de savoir s'il existe **une combinaison de données et d'un modèle unique** pour produire une modélisation optimale sur un jeu de bassins versants, Dezetter et al., (2008) concluent en deux points : qu'il ne semble pas être possible de dégager ce type de combinaison **données-modèle (unique)** pour simuler le ruissellement, (1) en Afrique de l'Ouest, (2) ou partout. À noter que, l'un des objectifs de **l'Interchangeabilité de jeu de paramètres entre versions d'un Modèle** est la mise en place de ces types de combinaison, **données-modèle (unique)**.

De l'analyse du **Tableau 3-4** (ci-après) il ressort les observations suivantes :

- ✓ En toute situation de validation croisée (entre les deux périodes : 1950-1970 et 1971-1995) le modèle SimulHyd semi-distribuée se montre plus performant par rapport au modèle GR2M semi-distribuée : ***ce qui confirme l'observation faite en modélisation non-distribuée (cf. 3.3.1).***
- ✓ La baisse de performance de passage de la phase de calibration à la phase de validation est plus marquée pour le modèle GR2M semi-distribuée que pour le modèle SimulHyd semi-distribuée ; elle est également plus accentuée si la validation est effectuée sur la période 1971-1995 (après une calibration sur la période 1950-1970). Pour le modèle GR2M semi-distribuée, cette baisse est environ 19 et 3 respectivement sur les périodes 1971-1995 et 1950-1970, et pour le modèle SimulHyd semi-distribuée elle est environ 15 et 1 respectivement sur les périodes 1971-1995 et 1950-1970 : ***ce qui confirme l'observation faite en modélisation non-distribuée (cf. 3.3.1).***
- ✓ Les paramètres (X1, X2) de GR2M semi-distribuée se montrent plus affectés par les échantillons de calage sur 1950-1970 quand il s'agit de les valider (avec le même modèle qu'avec le modèle SimulHyd semi-distribuée) sur la période 1971-1995; alors que ce n'est pas le cas pour les paramètres (X1, X2) de SimulHyd en calage sur cette même période 1950-1970 (les deux dernières colonnes à gauche) : ***ce qui confirme l'observation faite en modélisation non-distribuée (cf. 3.3.1).***
- ✓ Les paramètres (X1, X2) de SimulHyd semi-distribuée se montrent plus affectés par les échantillons de calage sur 1971-1995 quand il s'agit de les valider (avec le même modèle qu'avec le modèle GR2M semi-distribuée) sur la période 1950-1970; alors que ce n'est pas le cas pour les paramètres (X1, X2) de GR2M semi-distribuée en calage sur la même période 1971-1995 (les deux dernières colonnes à droite) : ***ce qui***

confirme l'observation faite en modélisation non-distribuée (cf. 3.3.1).

Tableau 3-4: Modélisation semi-distribuée sur le sous-bassin à Koulikoro (a)

A. KOULIKORO		Calage 1950-1970		Calage 1971-1995	
		Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.599	0.648	0.486	0.559
parametre2		0.476	0.496	0.481	0.503
Nash		90.631	91.742	85.351	86.634
Rac2 Nash		90.038	91.037	88.644	89.090
B. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1448491	1411513	1440954	1496302
Nash		71.771	75.323	82.304	84.982
Rac2 Nash		75.913	79.123	90.512	90.963
C1. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1243366	1601439	1225873	1712999
Nash		84.835	54.425	69.357	89.767
Rac2 Nash		85.314	67.235	84.508	91.549

L'analyse conjointe des **Tableaux 3-2 et 3-4** permet une comparaison entre la modélisation non-distribuée et la modélisation semi-distribuée en termes de performance des modèles à simuler les débits, et deux autres Tableaux peuvent partiellement être dérivés de leur combinaison (**Tableaux 3-6 et 3-7**). De même l'analyse conjointe des **Tableaux 3-3 et 3-5** permet une comparaison entre la modélisation non-distribuée et la modélisation semi-distribuée en termes de sensibilité des paramètres aux échantillons de calage, également deux autres Tableaux peuvent partiellement être dérivés de la combinaison de ces deux Tableaux aussi (**Tableaux 3-8 et 3-9**).

Tableau 3-5 : Modélisation semi-distribuée sur le sous-bassin à Koulikoro (b)

D1. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.648	0.599	0.559	0.486
parametre2		0.496	0.476	0.503	0.481
Nash		88.413	89.052	78.406	79.232
Rac2 Nash		87.369	91.386	81.977	88.601
D2. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.599	0.648	0.486	0.559
parametre2		0.496	0.476	0.503	0.481
Nash		90.518	91.625	85.213	86.504
Rac2 Nash		90.281	90.594	88.909	88.572
D3. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.648	0.599	0.559	0.486
parametre2		0.476	0.496	0.481	0.503
Nash		88.976	89.562	79.574	79.975
Rac2 Nash		87.163	91.868	81.793	89.120

De l'analyse du **Tableau 3-5** (ci-dessus) il ressort les observations suivantes :

- ✓ SimulHyd semi-distribuée est moins sensible à la dégradation du couple de ses paramètres optimal (X1, X2) que GR2M semi-distribuée, cela est perceptible sur le **Tableau 3-5** qui présente les résultats de validation utilisant les paramètres obtenus avec l'autre modèle sur la même période : *ce qui confirme l'observation faite en modélisation non-distribuée (cf. 3.3.1).*
- ✓ Les deux modèles sont plus sensibles aux perturbations sur leur paramètre X1 qu'à celles sur leur paramètre X2 : *ce qui confirme l'observation faite en modélisation non-distribuée (cf. 3.3.1).*
- ✓ Le modèle SimulHyd conserve mieux sa performance en cas de perturbation du

couple de ses paramètres optimal (X1, X2) que le modèle GR2M en est capable. SimulHyd est ainsi plus « robuste » que GR2M : *ce qui confirme l'observation faite en modélisation non-distribuée (cf. 3.3.1).*

Tableau 3-6 : Modélisation non-distribuée vs semi-distribuée (GR2M)

A. KOULIKORO		Calage 1950-1970		Calage 1971-1995	
		Gr2m N-D	Gr2m S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D
parametre1		0.541	0.599	0.432	0.486
parametre2		0.473	0.476	0.490	0.481
Nash		90.852	90.631	85.619	85.351
Rac2 Nash		91.697	90.038	90.322	88.644
B. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		Gr2m N-D	Gr2m S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1447666	1448491	1391028	1440954
Nash		70.499	71.771	81.974	82.304
Rac2 Nash		76.906	75.913	91.566	90.512
C2. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		Gr2m S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	Gr2m N-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1269692	1648201	1245844	1608731
Nash		82.380	48.443	73.004	88.682
Rac2 Nash		83.830	64.965	87.183	93.061

De l'analyse conjointe des **Tableaux 3-6 et 3-7** il ressort les observations suivantes :

- ✓ Les résultats obtenus avec les deux versions (non-distribuée et semi-distribuée) sont très proches quel qu'en soit le modèle utilisé, ce qui a conduit en 2007 à la proposition d'une méthodologie d'Intercomparaison de versions des modèles (Koné, 2007). Cette méthodologie est perfectionnée dans la présente étude.
- ✓ L'utilisation des paramètres calés (sur la période 1950-1970) avec la version non-distribuée pour faire la validation (sur la période 1971-1995) à travers la version semi-

distribuée produit (sur le bassin de Koulikoro) une augmentation de performance en validation. C'est cela qui est similairement constaté sur les **Tableaux 3-2 et 3-4** mais avec les modèles et non avec les concepts de modélisation (cf. **3.3.1 et 3.3.2**).

- ✓ L'utilisation des paramètres calés (sur la période 1971-1995) avec la version semi-distribuée pour faire la validation (sur la période 1950-1970) à travers la version non-distribuée produit encore sur le bassin de Koulikoro une augmentation de performance en validation. C'est cela qui est similairement constaté sur les **Tableaux 3-2 et 3-4**, mais avec les modèles et non avec les concepts de modélisation (cf. **3.3.1 et 3.3.2**).

Tableau 3-7 : Modélisation non-distribuée vs semi-distribuée (SimulHyd)

A. KOULIKORO		Calage 1950-1970		Calage 1971-1995	
		SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.595	0.648	0.516	0.559
parametre2		0.506	0.496	0.520	0.503
Nash		92.882	91.742	87.525	86.634
Rac2 Nash		93.402	91.037	90.894	89.090
B. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1392328	1411513	1474714	1496302
Nash		75.908	75.323	86.204	84.982
Rac2 Nash		81.738	79.123	92.487	90.963
C2. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		SimulHyd S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	SimulHyd N-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1229959	1606904	1333928	1661253
Nash		84.733	54.143	77.807	91.306
Rac2 Nash		86.411	69.874	88.296	93.772

De l'analyse des **Tableaux 3-8 et 3-9** (suivantes) il ressort les observations suivantes :

- ✓ Pour la sensibilité à la dégradation du couple de paramètres optimal (X1, X2), les deux modèles sont difficiles à départager due à la similarité de leurs résultats (**E1**). Dans ce contexte de comparaison d'un même modèle dans ses deux versions (non-distribuée et semi-distribuée) la méthode d'intercomparaison développée antérieurement (Koné, 2007) intègre l'évaluation de la sensibilité (du modèle) aux échantillons de calage.
- ✓ Les deux versions des modèles (non-distribuée et semi-distribuée) sont plus sensibles aux perturbations sur leur paramètre X1 qu'à celles sur leur paramètre X2 (**E2 et E3**). C'est cela qui est similairement constaté sur les **Tableaux 3-3 et 3-5** mais avec les modèles et non avec les concepts de modélisation (cf. **3.3.1 et 3.3.2**).

Tableau 3-8 : Sensibilité modélisation non-distribuée vs semi-distribuée, GR2M

E1. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m N-D	Gr2m S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D
parametre1		0.599	0.541	0.486	0.432
parametre2		0.476	0.473	0.481	0.490
Nash		88.006	88.267	81.898	82.597
Rac2 Nash		87.968	91.347	85.368	90.262
E2. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m N-D	Gr2m S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D
parametre1		0.541	0.599	0.432	0.486
parametre2		0.476	0.473	0.481	0.490
Nash		90.849	90.627	85.596	85.325
Rac2 Nash		91.757	89.97	90.143	88.793
E3. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		Gr2m N-D	Gr2m S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D
parametre1		0.599	0.541	0.486	0.432
parametre2		0.473	0.476	0.490	0.481
Nash		88.116	88.343	81.561	82.4
Rac2 Nash		87.919	91.419	85.512	90.094

Tableau 3-9 : Sensibilité modèles non-distribuée vs semi-distribuée, SimulHyd

E1. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.648	0.595	0.559	0.516
parametre2		0.496	0.506	0.503	0.520
Nash		89.767	89.38	84.428	84.513
Rac2 Nash		89.938	91.989	87.057	90.24
E2. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.595	0.648	0.516	0.559
parametre2		0.496	0.506	0.503	0.520
Nash		92.856	91.718	87.451	86.56
Rac2 Nash		93.228	91.165	90.564	89.294
E3. KOULIKORO		Validation 1950-1970		Validation 1971-1995	
		SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.648	0.595	0.559	0.516
parametre2		0.506	0.496	0.520	0.503
Nash		89.446	89.187	83.927	84.233
Rac2 Nash		90.056	91.834	87.342	90.01

3.4 Choix d'un model pivot et son jeu de paramètres optimal

3.4.1 Choix d'un modèle pivot

Une série de simulation (**Tableaux 3-2 à 3-10**) sur le bassin versant du haut fleuve Niger à Koulikoro (au Mali), et sur quinze autres sous-bassins (**cf. annexes 2**), permet de confirmer le modèle SimulHyd comme plus performant par rapport au modèle GR2M ; ce qui rejoint les conclusions de nos travaux précédents sur ces deux modèles et sur les supports d'études (les bassins versants). Un outil robuste pourra résulter de la combinaison de ces quatre modèles (GR2M non-distribué, GR2M semi-distribué, SimulHyd non-distribué, SimulHyd semi-distribué). Le modèle SimulHyd marche mieux en validation sur 1971-1995 (période relative de faible pluviométrie) utilisant les paramètres calés avec GR2M sur 1950-1970 (période relative de haute pluviométrie) et, le modèle GR2M marche mieux en validation sur 1950-1970 (période relative de haute pluviométrie) utilisant les paramètres calés avec SimulHyd sur 1971-1995 (période relative de faible pluviométrie) ; et il arrive même, utilisant une telle combinaison, que le modèle égalise, en phase de validation sur une deuxième période, la performance de calibration sur une première période (les cas des GR2M ND et GR2M SD sur

1950-1970, utilisant les paramètres calés sur 1971-1995 appartenant aux modèles SimulHyd ND et SimulHyd SD; SimulHyd ND est également dans ce cas avec les paramètres de SimulHyd SD). Cette particularité de ces modèles concerne-t-elle uniquement les périodes contrastées, en termes de pluviométrie, ou reste valable sur des périodes consécutives dans le temps voire avec n'importe quelle combinaison de deux périodes ? Toutefois, cette particularité (de ces modèles) peut être exploitée dans le contexte de l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau. L'analyse conjointe des **Tableaux 3-7** et **3-10** (ci-dessous) permet de faire la remarque suivante : la version semi-distribuée de SimulHyd, bien qu'elle soit moins efficace que sa version non-distribuée en calage (A) et validation (B) sur le bassin de Koulikoro (**cf. Tableau 3-7**) et en moyenne sur l'ensemble des seize bassins d'étude (**Figure 2-1**), a l'avantage de simuler des variables intermédiaires sur chacune des mailles du bassin versant ; et de surcroît (**Tableau 3-10**, ci-dessous) elle pourrait être considérée comme une modélisation semi-distribuée dépassant en performance la modélisation non-distribuée du modèle GR2M.

Tableau 3-10 : Modélisation GR2M non-distribuée vs SimulHyd semi-distribuée

A. KOULIKORO		Calage 1950-1970		Calage 1971-1995	
		Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D
parametre1		0.541	0.648	0.432	0.559
parametre2		0.473	0.496	0.490	0.503
Nash		90.852	91.742	85.619	86.634
Rac2 Nash		91.697	91.037	90.322	89.090
B. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1447666	1411513	1391028	1496302
Nash		70.499	75.323	81.974	84.982
Rac2 Nash		76.906	79.123	91.566	90.963
C3. KOULIKORO		Validation 1971-1995		Validation 1950-1970	
		SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D
Qobs		1007110	1007110	1700194	1700194
Qcalc		1055170	1817689	1045535	1908608
Nash		85.660	18.551	51.960	90.031
Rac2 Nash		88.997	52.800	75.062	90.994

3.4.2 Jeu de paramètres optimal pour le model pivot

Les résultats sur l'interchangeabilité des jeux de paramètres entre versions de modèles ont été présentés à San Francisco (Koné, 2013d). Ces résultats corrigés concernant les seize échantillons de bassins versants sont aux **annexes 6**. Sur les pages suivantes, les procédures d'obtention des **Figures 3-4 et 3-5** diffèrent suivant les choix des périodes de calibration des modèles et celles de leurs validations. Sur les **Figures 3-4 (a, b et c)**, la période de calibration est préférentiellement choisie avant la date 1970 (si possible) et la période de validation après cette date ; inversement sur les **Figures 3-5 (a, b et c)** la période de calibration est préférentiellement choisie après la date 1970 (si possible) et la période de validation avant cette date. Sur les **Figures 3-4a et 3-5a**, Il y a deux séries d'histogrammes, la première (CAL) est la moyenne des valeurs du critère de Nash en calibration sur les seize bassins versants, et la deuxième (*val 4 Average*) est la moyenne *des moyennes* de quatre valeurs du critère de Nash en validation sur les seize bassins versants. Les quatre valeurs du critère de Nash en validation (qui seront moyennées) sont obtenues, pour chaque version de modèle, en utilisant les jeux de paramètres successifs en commençant toujours par celui du modèle considéré et poursuivant en utilisant le jeu de paramètre du modèle suivant (ou en rotation), jusqu'à la validation successive de chaque modèle à travers quatre jeux (de paramètres) différents ; l'ordre circulaire sera respecté en partant toujours du modèle adéquat : GR2M ND, SimulHyd ND, GR2M SD, SimulHyd SD. Nous retiendrons de la **Figure 3-4a** qu'en calibration avant 1970 et validation après 1970, que les modèles SimulHyd SD et SimulHyd ND sont plus robustes relativement au modèle GR2M SD (qui à son tour est plus robuste que GR2M ND), suivant la définition de Perrin (2000) : en ce sens que la perte de performance du passage de la phase de calibration à celle de la validation est plus faible ; et la version semi-distribuée, respective des modèles en jeu, se comporte mieux que leur version non-distribuée. En calibration après 1970 et validation avant 1970, la **Figure 3-5a** montre que le modèle GR2M ND est plus robuste relativement aux modèles GR2M SD et SimulHyd ND (qui sont à leur tour plus robuste que SimulHyd SD), toujours suivant la définition susmentionnée de Perrin (2000) ; et dans ce second contexte c'est la version non-distribuée, respective des modèles en jeu, qui se comporte mieux que leur version semi-distribuée. Sur les **Figures 3-4b et 3-5b**, Il y a deux séries d'histogrammes, la première (VAL1) est la moyenne des valeurs du critère de Nash en validation (utilisant le jeu de paramètres de la version de modèle considérée) sur les seize bassins versants, et la deuxième (*val 3 Average*) est la moyenne *des moyennes* de trois valeurs du critère de Nash en validation sur les seize bassins versants. Les

trois valeurs du critère de Nash en validation (qui seront moyennées) sont obtenues, pour chaque version de modèle, en utilisant les jeux de paramètres successifs en commençant toujours par celui du modèle qui suit directement le modèle considéré, jusqu'à la validation successive de chaque modèle en utilisation trois jeux (de paramètres) différents ; l'ordre circulaire sera également respecté en partant toujours du modèle adéquat : GR2M ND, SimulHyd ND, GR2M SD, SimulHyd SD. Sur les **Figures 3-4c et 3-5c**, Il y a quatre séries d'histogrammes, la première (VAL1) est la moyenne des valeurs du critère de Nash en validation (utilisant le jeu de paramètres de la version de modèle considérée) ; la deuxième (VAL2), la troisième (VAL3), et la quatrième (VAL4), sont successivement les moyennes des valeurs du critère de Nash en validation sur les seize bassins versants (utilisant le jeu de paramètres de la version de modèle qui suit successivement la version de modèle considérée dans une rotation circulaire : GR2M ND, SimulHyd ND, GR2M SD, SimulHyd SD). Nous retiendrons des **Figures 3-4b et 3-4c** qu'en calibration avant 1970 et validation après 1970, que le modèle SimulHyd SD répond positivement (en moyenne sur seize bassins versants) à l'importation en son sein, de chacun des jeux de paramètres issue des trois autres modèles (GR2M ND, SimulHyd ND, GR2M SD); le modèle SimulHyd ND répond positivement à l'importation du jeu de paramètres issu des modèles GR2M ND et GR2M SD ; il est de même pour le modèle GR2M SD avec le jeu de paramètres issu du modèle GR2M ND.

En calibration après 1970 et validation avant 1970, les **Figures 3-5b et 3-5c** montrent que c'est le modèle GR2M ND qui répond positivement (en moyenne sur seize bassins versants) à l'importation en son sein, de chacun des jeux de paramètres issue des trois autres modèles (SimulHyd ND, GR2M SD, SimulHyd SD); les modèles GR2M SD, SimulHyd ND et SimulHyd SD, répondent positivement à l'importation du jeu de paramètres issu respectivement des modèles SimulHyd SD et SimulHyd ND, du modèle SimulHyd SD, et du modèle SimulHyd ND. L'importation de jeu de paramètres d'une version de modèle dans une autre (version de modèle) peut constituer une « boîte d'outils » permettant de casser la dépendance des modèles aux échantillons. SimulHyd SD, (utilisant ou pas des jeux de paramètres importés), est recommandable dans le cadre de simulation sur l'état présent et future des hydrosystèmes, ainsi que dans les études d'évaluation d'impacts du changement climatique. Le jeu de paramètres issu du modèle SimulHyd ND représentera mieux le bassin versant et sera importé dans les autres modèles lors des études de validation et de simulation. Pour le comblement de lacunes dans les séries de débits le modèle GR2M ND sera recommandé. Dans les études de restauration d'écosystèmes et d'hydrosystèmes, SimulHyd SD (utilisant son propre jeu de paramètres) et GR2M SD (utilisant son propre jeu de

paramètres ou le jeu de paramètres de SimulHyd ND) sont recommandés. Ultimement, le jeu de paramètres de SimulHyd ND représentant le bassin versant, nous recommandons pour les études de restauration des écosystèmes passés d'utiliser le modèle GR2M SD (utilisant ce jeu de paramètres de SimulHyd ND). Les Figures 3-2 et 3-3, ainsi que les annexes 6 présentent également les résultats obtenus avec la moyenne des X1 et celle des X2 des quatre versions de modèles. Une recommandation pour l'application de l'interchangeabilité des paramètres dans une démarche prospective serait d'user de cette méthode à travers la moyenne des paramètres type par type des quatre versions de modèle (la moyenne des X1 et celle des X2).

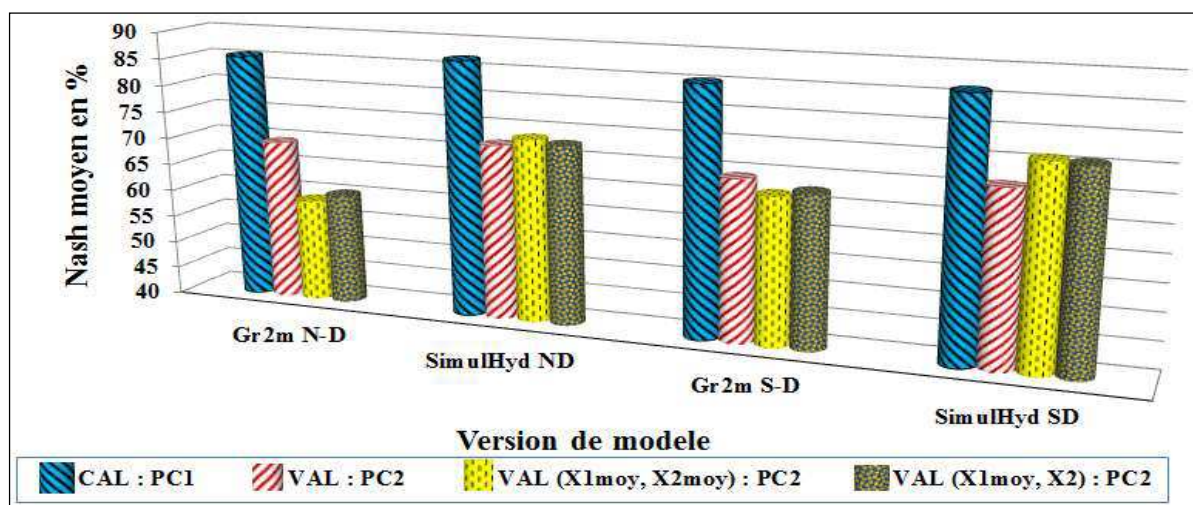


Figure 3-2 : Injection de moyennes de paramètres dans la modélisation (période 1 à 2).

(Résultats moyennés sur seize bassins versants, calibration sur une période 1 (avant 1970) et de validation sur une période 2 (après 1970)).

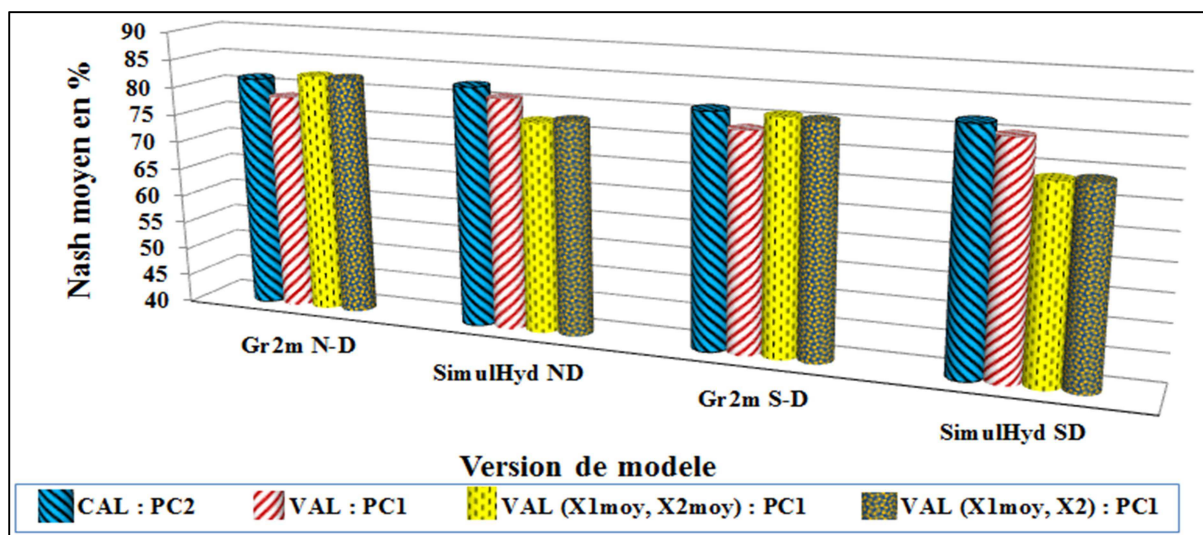


Figure 3-3 : Injection de moyennes de paramètres dans la modélisation (période 2 à 1).

(Résultats moyennés sur seize bassins versants, calibration sur une période 2 (après 1970) et de validation sur une période 1 (avant 1970)).

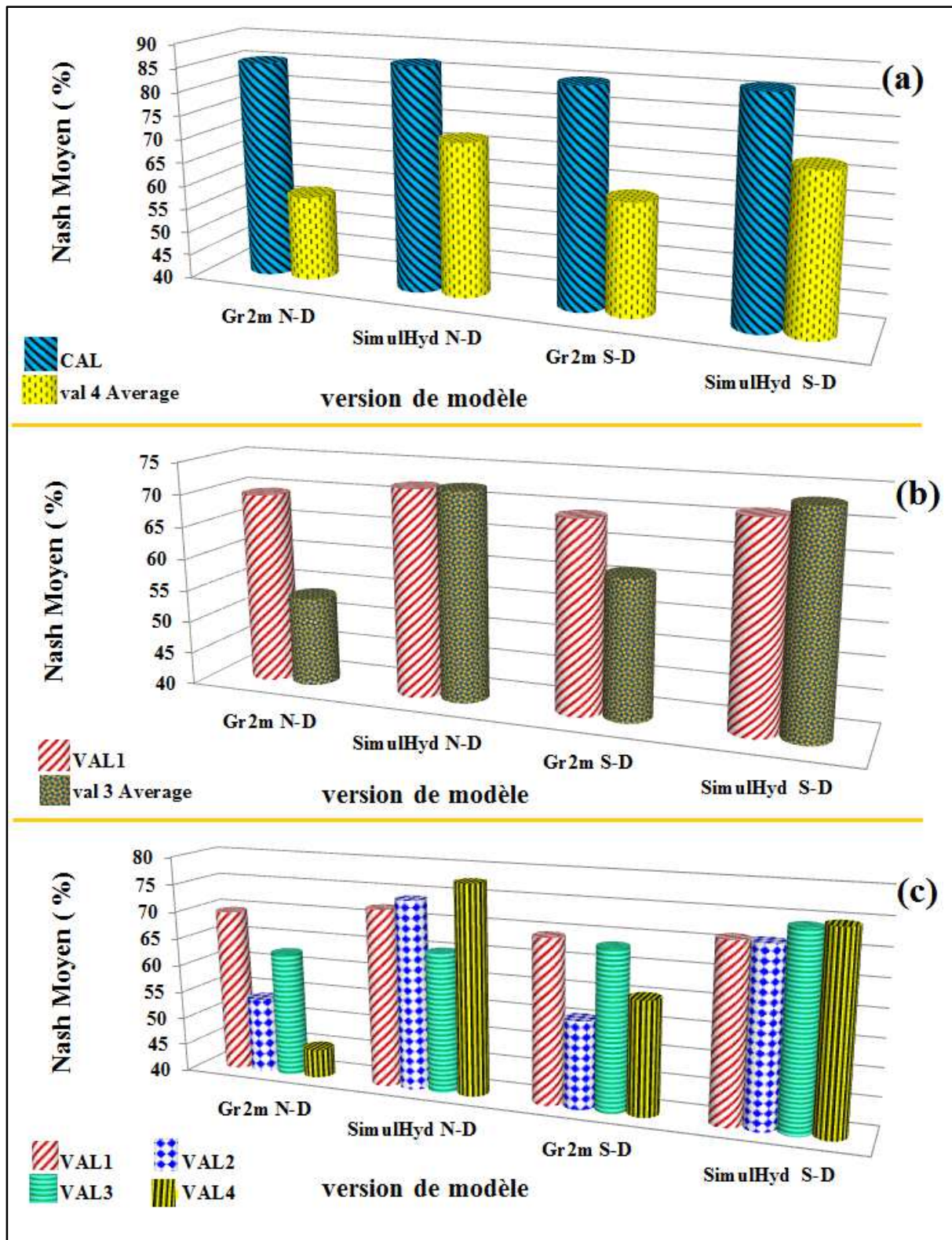


Figure 3-4: Interchangeabilité de jeu de paramètres de versions de modèles hydrologiques (période 1 à 2). (Sur seize bassins versants du fleuve Niger et affluents : calibration avant 1970 et validation après 1970).

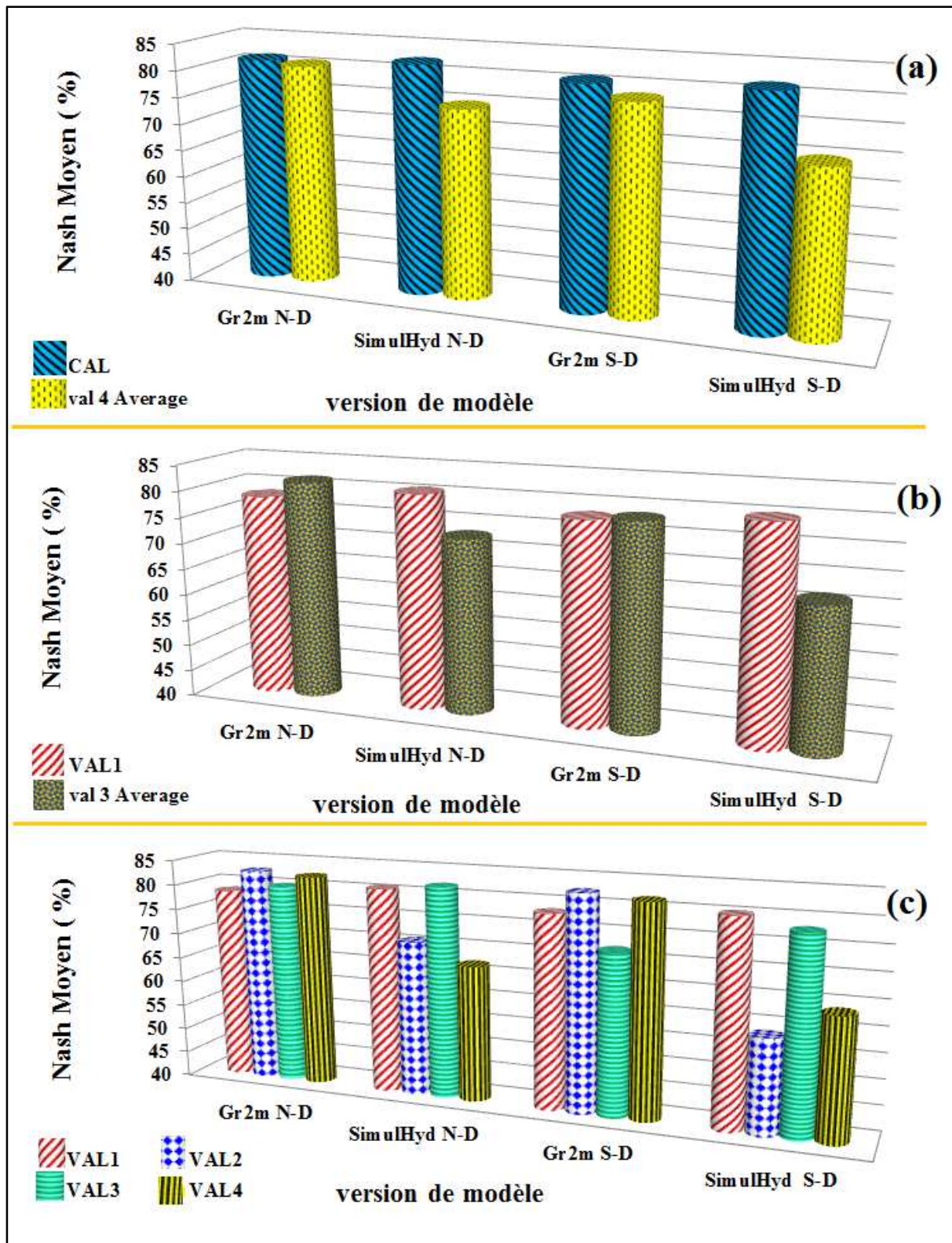


Figure 3-5: Interchangeabilité de jeu de paramètres de versions de modèles hydrologiques (période 2 à 1). (Sur seize bassins versants du fleuve Niger et affluents : calibration après 1970 et validation avant 1970)

3.5 Protocole et Résultats d'Intercomparaison de versions de modèle

3.5.1 Justification

Plusieurs études de comparaison de modèles sont basées sur l'utilisation des critères de performance en phase de calibration et/ou en phase de validation (Perrin, 2000) et généralement conduit à conclure : sur combien de bassin versant un modèle *A* est plus performant qu'un modèle *B* (en terme d'efficacité du critères de Nash), et non combien pourcent un modèle *A* est tout simplement meilleur qu'un modèle *B* sur un unique bassin versant. En plus, la plupart de ces méthodes de comparaison concluent en se basant exclusivement sur la mesure de la souplesse (performance en calibration) et celle de la performance (proprement dite) en validation ; ce qui n'est aisée que si les modèles à comparer montrent des franches différences en termes de performance. En outre, les plus compréhensibles de ces méthodes peuvent seulement comparer des modèles à la fois sur l'une des caractéristiques singulières connues comme le critère de Nash (mesurant la performance du modèle à reproduire un débit observé), la sensibilité aux échantillons, ou la robustesse (comme la décroissance de performance du modèle lors du passage de la phase de calibration à celle de la validation). Pour discriminer lequel des modèles a la valeur la plus élevée du critère de Nash (ou alternativement de la robustesse) étant donné que ces valeurs pour différents modèles ne diffèrent que de leur premier ou second décimal pousse l'auteur à proposer une méthode d'intercomparaison (Koné, 2007). Cette méthode (généralisée à l'intercomparaison de plus de deux modèles dans la présente étude) fait intervenir les résultats de comparaison de certains critères de performance communément utilisés (critère de Nash), d'autres rarement utilisés dans la littérature (Garrick et al, 1977), et d'autres qui sont des propositions relatives à des concepts déjà existants (sensibilité aux échantillons). Cela s'est révélée être un effort de relever un défi lancé par l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) sur l'intercomparaison des modèles hydrologiques : « le développement des critères objectifs de mesure de performances qui puissent être utilisés pour comparer non seulement la performance de plusieurs modèles sur le même support d'étude (bassin versant) ou d'un même modèle sur différents supports, mais aussi de différents modèles sur différents supports ». À noter que la tentative de Garrick et al., (1977) était de relever ce défi à travers deux propositions de modification du critère de Nash dont l'une est exploitée dans nos travaux de recherche (cf. 1.4.1). L'autre qui n'est pas détaillée dans ce mémoire est utilisable dans le cadre d'une modélisation en temps réel.

3.5.2 Méthodologie et composantes

C'est possible de résumer la modélisation au « compromis biais-variance ». Les modèles à faible biais (nombre élevé de paramètres) ont généralement une grande souplesse à bien simuler les débits lors de leur phase de calibration, par contre ils ont une grande dépendance aux échantillons ; leurs paramètres varient beaucoup lorsque l'on change de période de calibration. Cette notion de compromis biais-variance ouvre la voie sur les points essentiels qui doivent être explorés pour mener à bien une étude de comparaison : (1) mesure de la souplesse des modèles (ou performance en calibration) à l'aides des critères de performance et, mesure de sa performance proprement dite (en validation) sur des échantillons qui n'ont pas servis lors de la calibration ; (2) estimation de la dépendance des modèles aux échantillons : si les paramètres du modèle changent fortement lorsque l'on change de période de calibration, on dit que le modèle à une variance élevée, et les deux formes calibrées du modèle pourront donner des résultats totalement distincts.

Devant la difficulté à trancher entre des valeurs assez proches du critère de Nash issues des deux versions de GR2M ou de SimulHyd, semi-globale et globale, nous avons défini un « protocole d'intercomparaison » qui va intégrer en plus des informations issues du critère de Nash, les informations fournies par le critère de Nash-Garrick, les informations issues des calculs de robustesse par la « Technique du Double Échantillon » et, enfin les informations issues de l'estimation comparée de la sensibilité des modèles aux échantillons à l'aide d'un protocole à « double calibration ». Ce protocole aboutira au calcul d'un « score » ; ainsi deux protocoles sont présentés: le protocole de la « double calibration», qui servira comme une composante du « protocole d'intercomparaison » qui constitue le deuxième (Koné, 2007). Finalement, la méthode d'intercomparaison permettra le calcul d'un score de compétition distribué entre les modèles en jeu ; la somme totale des scores d'intercomparaison est idéalement douze sur un bassin versant donné, et sera un multiple (**n**) de douze quand le nombre de bassin en jeu devient **n**.

3.5.3 Le protocole de la double calibration

Ce protocole consistera (Koné, 2007) : i.) à définir deux périodes de calibration totalement distinctes ; on maintiendra la période de calibration habituelle comme la première période (PC1) et, la deuxième période de calibration (PC2) sera celle usuellement consacrée à la validation des modèles. ii.) pour chaque modèle : - En calibration : on fait la différence entre la valeur du paramètre X1 obtenue sur la première période (PC1) et sa valeur obtenue sur la

deuxième période (PC2) ; idem pour le paramètre X2. - En validation : on répète la même démarche avec les valeurs du critère de Nash obtenues lors de la «validation croisée (entre les deux périodes : PC1 et PC2)». iii.) Les modèles peuvent différer par leur « variance », qui est la sensibilité d'un modèle aux échantillons : un modèle moins sensible aux échantillons à une variance faible, (cf. Glossaire de la modélisation : <http://www.aiaccess.net/>). Finalement, le protocole à « double calibration », présenté dans l'**Encadré 3-2** ci-dessous, se veut de comparer les modèles à travers, leur « variance » ou sensibilité aux échantillons.

Encadré 3-2 : Protocole de la « Double Calibration »

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si : } \left| X1_{PC1}^{semi-globale} - X1_{PC2}^{semi-globale} \right| - \left| X1_{PC1}^{globale} - X1_{PC2}^{globale} \right| > 0 , \\ \text{alors (le score du globale =1, contre 0 pour semi-globale),} \\ \text{sinon (le score du semi-globale =1, contre 0 pour globale).} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si : } \left| X2_{PC1}^{semi-globale} - X2_{PC2}^{semi-globale} \right| - \left| X2_{PC1}^{globale} - X2_{PC2}^{globale} \right| < 0 , \\ \text{alors (le score du semi-globale =1, contre 0 pour globale),} \\ \text{sinon (le score du globale =1, contre 0 pour semi-globale).} \end{array} \right.$$

Les Nash utilisés ici sont ceux obtenue (en validation) lors de la "validation croisée" (entre les deux périodes : PC1 et PC2).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si : } \left| Nash_{(X1,X2)_{PC1 \rightarrow PC2}}^{semi-globale} - Nash_{(X1,X2)_{PC2 \rightarrow PC1}}^{semi-globale} \right| - \left| Nash_{(X1,X2)_{PC1 \rightarrow PC2}}^{globale} - Nash_{(X1,X2)_{PC2 \rightarrow PC1}}^{globale} \right| > 0 , \\ \text{alors (le score du globale =1, contre 0 pour semi-globale),} \\ \text{sinon (le score du semi-globale =1, contre 0 pour globale).} \end{array} \right.$$

On fait la somme des scores. Le modèle qui aura le plus grand score est celui qui a la plus faible "variance", donc le moins sensible aux échantillons.

3.5.4 Structure d'un Tableau du protocole d'intercomparaison

Les « scores » d'intercomparaison varieront entre 0 et 12 pour chacun des modèles en compétition ; et la somme totale, des scores des modèles, restera toujours égale à 12.

La structure des Tableaux d'intercomparaison est la suivante (**Tableau 3-11** ci-après) :

- La première ligne présente, sur les douze mois de l'année combien de fois le critère Nash-Garrick d'un modèle **A** est supérieur à ceux des autres modèles **B**, en contexte de calibration. Sur cette ligne, le score de chaque modèle sera divisé par 4 dans le cadre des travaux de la présente étude.
- La deuxième ligne présente, sur les douze mois de l'année combien de fois le critère Nash-Garrick d'un modèle **A** est supérieur à ceux des autres modèles **B**, en contexte de validation. Sur cette ligne, le score de chaque modèle sera encore divisé par 4 dans

le cadre des travaux de la présente étude.

- Sur la troisième ligne on assigne 1 point au modèle qui présente la meilleure valeur du critère de Nash lors de la calibration contre zéro point pour les autres modèles.
- Sur la quatrième ligne on assigne 1 point au modèle qui présente la meilleure valeur du critère de Nash lors de la phase de validation contre zéro point pour les autres modèles.
- Sur la cinquième ligne on assigne 1 point au modèle qui présente la meilleure valeur de la robustesse calculée selon la Technique du Double Échantillon (TDE) contre zéro point pour les autres modèles.
- Sur la sixième ligne on assigne 1 point au modèle qui présente la plus faible variation de la valeur de son paramètre X1 contre 0 point pour le second modèle, suivant le protocole de la «double calibration».
- Sur la septième ligne on assigne 1 point au modèle qui présente la plus faible variation de la valeur de son paramètre X2 contre zéro point pour les autres modèles, toujours suivant le protocole de la «double calibration».
- Sur la huitième ligne on assigne 1 point au modèle qui présente la plus faible variation de la valeur du critère de Nash obtenue lors des deux phases de validation, encore suivant le protocole de la «double calibration».
- Sur la neuvième ligne on présente la somme des huit lignes sus-jacentes, lignes 1 à 8 incluses ; à défaut de pouvoir remplir une ligne sus-jacente, le score correspondant à cette ligne est uniformément distribué entre les modèles en compétition.

Tableau 3-11 : Tableau d'intercomparaison des modèles «méthodes des scores»

Bassin	Période: 1950 à 1970 & 1971 à 1995	Actions \ Modèles	(n)-modèles-intercomparaisons							
			GR2M ND	SimulHyd ND	SimulHyd SD	GR2M SD	Modèle 5	Modèle 6
Biais		Évaluation Nash-Garrick (Calibration)	Ligne 1							
		Évaluation Nash-Garrick (Validation)	Ligne 2							
		Calibration Nash	Ligne 3							
		Validation Nash	Ligne 4							
		Robustesse TDE	Ligne 5							
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	Ligne 6						
			X2	Ligne 7						
			Nash (val.)	Ligne 8						
		Score	Ligne 9							

Les sommes calculées constituent les scores de la compétition entre les modèles en jeu : la somme totale des scores est égale à douze. Cette présentation des résultats de l'intercomparaison des modèles sous forme de Tableau permet de résumer succinctement les remarques faites sur les sorties de ces modèles. Dans les modèles de régression, il est constaté que, dans un cas où la somme des Écarts Quadratique Moyen (EQM) est faible on a : $EQM = \text{Biais}^2 + \text{Variance}$, (cf. Glossaire de la modélisation : <http://www.aiaccess.net>); donc dans le calcul des scores le fait de donner une grande importance aux « biais » par rapport aux « variances » est justifié.

3.5.5 Protocole de Simulation

Le **Tableau 3-1** détail le découpage des périodes de simulation et le protocole de simulation dans le présent sous-chapitre sur l'intercomparaison des modèles est la suivante :

- Pour chacun des quatre versions de modèles, GR2M ND, GR2M SD, SimulHyd ND, SimulHyd SD, une validation croisée est faite entre deux périodes, idéalement avant et après 1970. le jeu de paramètres obtenu sur la première période est utilisé dans la validation du modèle sur la deuxième période, et vice versa.
- Lors de la calibration « la période de mise en route », qui est une période sur laquelle on fait tourner le modèle sans prendre en compte les débits simulés durant cette période dans le calcul de performance des modèles, est fixée à deux ans, sur lesquels les données hydrologiques et hydroclimatiques des années respectives juste avant la date du début de la calibration sont concernées : si elles n'existent pas, les données des deux premières années de la simulation sont transposées sur cette période.
- La méthode d'optimisation adoptée lors de la calibration des paramètres du modèle est une combinaison de critères recommandés par Servat et Dezetter (1988) : le critère de Rosen immédiatement suivi du Simplex.
- Le critère d'efficience (de performance) appliqué lors de la phase de calibration et de validation est le critère proposé par Nash et Sutcliffe (1970) et connue sous le nom de critère de Nash.
- La robustesse à travers la technique du double échantillon et un pseudo critère de Nash-Garrick sont calculés passivement en utilisant les résultats de simulation obtenus, idéalement en calibration avant 1970, et validation après cette date.

3.5.6 Résultats de comparaison/intercomparaison des modèles

3.5.6.1 Présentation classique des résultats de comparaison

En plus des performances comparées des versions de modèle sur le bassin de Koulikoro, la moyenne du critère de Nash sur les seize bassins versants et la moyenne du critère de robustesse sur ces bassins sont présentées sur la **Figure 3-6** ci-dessous. Elle montre les résultats respectifs de calibration et de validation croisée, de chacun des quatre modèles, (GR2M ND, SimulHyd ND, GR2M SD, SimulHyd SD), entre deux périodes, idéalement avant 1970 (PC1) et après 1970 (PC2). Cette Figure présente également ces résultats moyennés des critères de robustesse (selon la Technique du Double Échantillons) et du critère de Nash sur la longueur totale des chroniques de débits (**Tableau 3-1**). Quelques remarques sur la **Figure 3-6** (ci-dessous) sont la similitude des résultats de simulation des modèles GR2M soit en validation croisée sur les deux périodes ou en simple calibration sur la période totale (PC1+PC2), et parfois des quatre versions de modèle en termes de robustesse suivant la Technique du Double Calibration (TDE); ainsi se pose la difficulté de discriminer sans ambiguïté lequel des modèles est le plus efficace, qu'en utilisant le critère communément utilisé (le critère de Nash) ou le critère de robustesse (à travers la Technique du Double Échantillons). Dans le but de comparer des versions des modèles dérivées des unes des autres (GR2M ND, GR2M SD, SimulHyd ND, SimulHyd SD), une méthode d'intercomparaison a été développée durant nos travaux précédents (Koné, 2007) et améliorée à travers la présente étude. Le processus de dérivation de ces modèles est accompli soit en étendant, à toutes les données d'entrée du modèle, l'influence des paramètres du modèle (conduisant à l'obtention de SimulHyd à partir de GR2M) ou soit en choisissant un concept de modélisation semi-distribuée partant d'une modélisation non-distribuée (Haziza, 2003 ; Paturol et al., 2003 ; Ardoin, 2004; Koné, 2007).

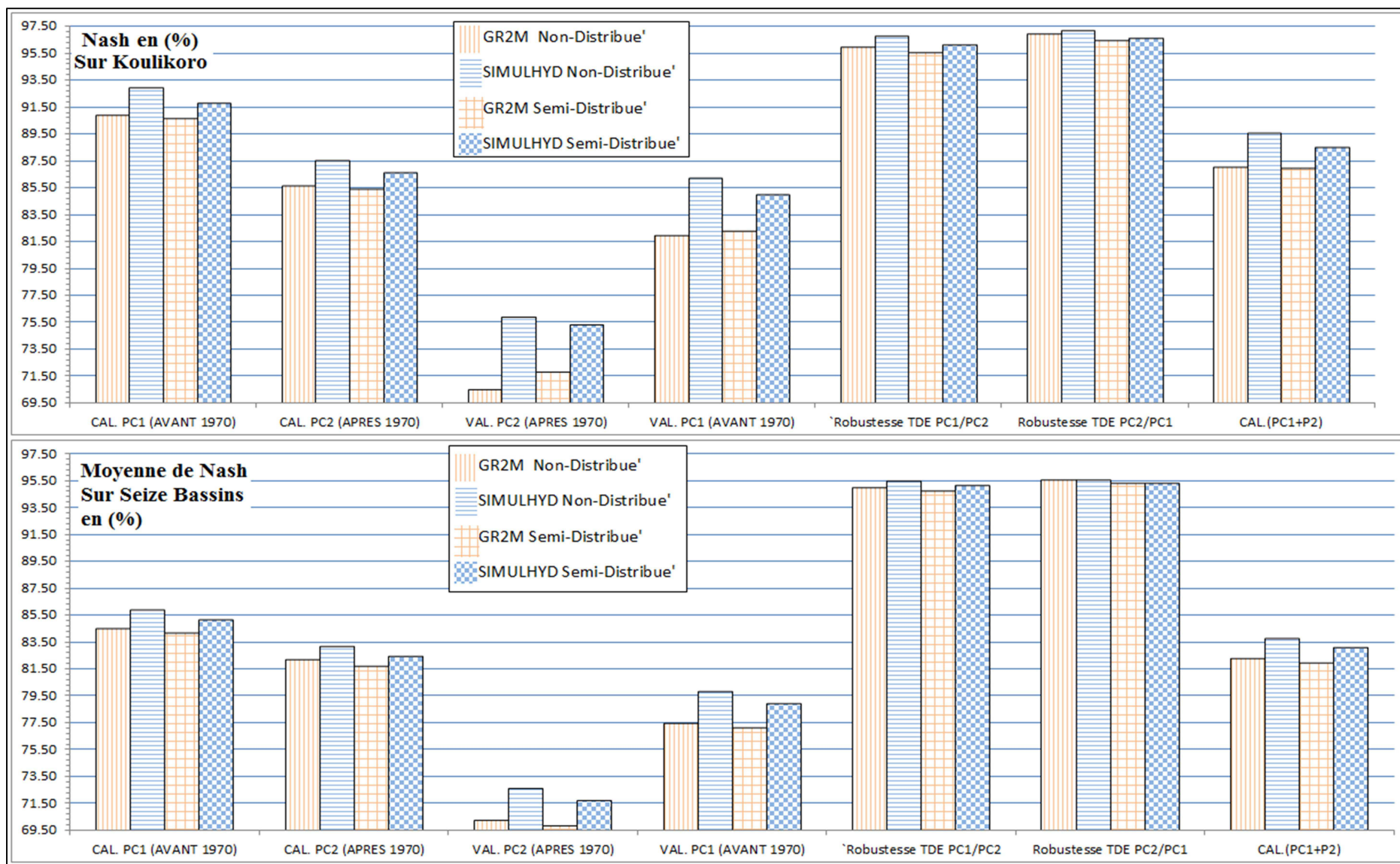


Figure 3-6: Présentation classique des résultats de comparaison des versions des modèles

3.5.6.2 Tableau d'Intercomparaison des modèles

La voie la plus informative de présenter les résultats d'intercomparaison est le Tableau original généré lors des calculs d'intercomparaison. Le concept et la description des lignes de ce Tableau sont présentés respectivement dans les **sous-chapitres 3.5** et **3.5.4**. Le **Tableau 3-12(a)** ci-après montre, sur le bassin versant à Koulikoro, les résultats respectifs (de gauche à droite) d'un (4)-modèles-intercomparaisons, d'un (3)-modèles-intercomparaisons et d'un (2)-modèles-intercomparaisons. Outre la prévalence de SimulHyd ND (la version Non-Distribuée de SimulHyd) sur les autres versions de modèle (il gagne huit points qui sont plus que 50% des douze points en compétition sur le bassin versant à Koulikoro), une première remarque apparaît sur l'égalité de trois modèles (sur les quatre en compétition) en termes de sensibilité aux échantillons (**Tableau 3-12(a)**). Dans le (4)-modèles-intercomparaisons, trois modèles gagnent chacun un point (en termes de sensibilité aux échantillons) conduisant à une égalité apparente entre ces modèles, le quatrième modèle ayant un score nul. De plus, en se basant sur le (4)-modèles-intercomparaisons il n'est pas évident de systématiquement considérer SimulHyd SD (la version Semi-Distribuée de SimulHyd) et GR2M SD (la version Non-Distribuée de GR2M) comme respectivement le second et le troisième du classement en termes d'efficience après SimulHyd ND. Un jeu de (3)-modèles-intercomparaisons permet d'identifier lequel des trois modèles restant secondera SimulHyd ND en termes d'efficience, et éventuellement un jeu de (2)-modèles-intercomparaisons sera nécessaire pour savoir le troisième et le dernier modèle de ce classement. Dans le **Tableau 3-12(a)** à travers un (3)-modèles-intercomparaisons (au milieu) et un (2)-modèles-intercomparaisons (à droite), la prépondérance de SimulHyd SD sur les deux autres modèles restants, ensuite celle de GR2M ND sur GR2M SD, sont respectivement affichées. Dans le **Tableau 3-12(b)**, ci-dessous, l'analyse combinée du premier (3)-modèles-intercomparaisons (à gauche) et du troisième (3)-modèles-intercomparaisons (à droite) permet de classer SimulHyd SD comme le moins sensible aux échantillons par rapport aux trois autres modèles en compétition ; ensuite le second (3)-modèles-intercomparaisons (au milieu) classe SimulHyd ND en seconde position après SimulHyd SD, enfin le (2)-modèles-intercomparaisons (le plus à droite) permet de distinguer GR2M SD comme moins sensible aux échantillons par rapport à GR2M ND. Ainsi sur le bassin versant à Koulikoro, le classement des modèles du plus performant au moins performant est : SimulHyd ND, SimulHyd SD, GR2M ND, et GR2M SD ; de même leur classement du moins sensible aux échantillons au plus sensible aux échantillons est le suivant : SimulHyd SD, SimulHyd ND, GR2M SD, et GR2M ND.

Tableau 3-12 : Résultats d'Intercomparaison sur le bassin versant Koulikoro

(a)

Koulikoro	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions \ Modèles	(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		
			GR2M ND	SimulHyd ND	GR2M SD	SimulHyd SD	GR2M ND	GR2M SD	SimulHyd SD	GR2M ND	GR2M SD	
Biais	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	0,25	2	0	0,75	0,5	0	2,5	1,75	1,25	
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)	0	2	0,25	0,75	0,5	0,25	2,25	1,75	1,25	
		Calibration Nash	0	1	0	0	0	0	1	1	0	
		Validation Nash	0	1	0	0	0	0	1	0	1	
		Robustesse TDE	0	1	0	0	0	0	1	1	0	
Variance	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Sensibilité aux échantillons	X1	0	1	0	0	0	0	1	1	0
			X2	0	0	1	0	0	1	0	0	1
			Nash (val.,)	0	0	0	1	0	0	1	0	1
Score			0,25	8	1,25	2,5	1	1,25	9,75	6,5	5,5	

(b)

Koulikoro	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions \ Modèles	(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		
			GR2M ND	SimulHyd ND	SimulHyd SD	GR2M ND	SimulHyd ND	GR2M SD	GR2M ND	GR2M SD	SimulHyd SD	GR2M ND	GR2M SD	
Biais	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	0,25	2	0,75	0,25	2,5	0,25	0,5	0	2,5	1,75	1,25	
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)	0	2	1	0	2,5	0,5	0,5	0,25	2,25	1,75	1,25	
		Calibration Nash	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	
		Validation Nash	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	
		Robustesse TDE	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	
Variance	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Sensibilité aux échantillons	X1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0
			X2	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1
			Nash (val.,)	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
Score			0,25	8	3,75	0,25	10	1,75	1	1,25	9,75	6,5	5,5	

Le bassin versant à Koulikoro, sur le fleuve Niger, pourrait être mieux étudié en utilisant le modèle SimulHyd ND pour les opérations de comblement des lacunes des débits et le modèle SimulHyd SD pour les études environnementales et d'impacts de variabilités hydroclimatiques. Une analyse similaire à celle effectuée sur le Bassin versant précédent peut être menée sur chacun des quinze autres bassins versants partant des Tableaux aux **Annexes 5**. Ces annexes présente également : (i) un *Tableau récapitulatif* des résultats par bassin dont l'analyse conjointe avec les tableaux des **annexes 2** permette l'établissement des **annexes 5** ; (ii) les résultats de la méthode d'intercomparaison (des modèles) sur l'ensemble des seize

bassins versants combinés (page LXXXVI) et le classement des versions de modèle sur ces bassins versants individuels (page LXXXVII), en termes de scores d'intercomparaisons (**A**) et en termes de moindre sensibilité aux échantillons (**B**). Cette méthode permet de détecter, lors de la première compétition, (n)-modèles-intercomparaisons, lequel ou lesquels des modèles est/sont meilleur(s) relativement aux autres au lieu de les classer par ordre de performance en une seule séance ; d'autres séries de compétitions du type (n-1)-modèles-intercomparaisons et éventuels subséquents (n-2)-modèles-intercomparaisons seront nécessaires, et ainsi de suite. Dans le cas d'une égalité apparente en (n)-modèles-intercomparaisons, ce qui apparaît fréquemment dans l'intercomparaison de la sensibilité aux échantillons, la méthode d'intercomparaison ne pourra conduire à une conclusion satisfaisante sans faire un jeu de (n-1)-modèles-intercomparaisons, (n) étant le nombre de modèles en intercomparaison qui a conduit à l'égalité. Dans cette méthode d'intercomparaison un modèle sort de la compétition seulement s'il est qualifié comme meilleur modèle avec plus de 50% des scores de l'étape de la compétition, ainsi le/les (n-1)-modèles-intercomparaisons subséquent(s) devra/devront inclure tout modèle qui n'a pas obtenu un score satisfaisant durant la (n)-modèles-intercomparaisons qui a conduit à l'égalité apparente. S'il y a égalité apparente dans une (n)-modèles-intercomparaisons, la (n-m)-modèles-intercomparaisons faisant intervenir uniquement les modèles en égalité apparente entre eux, ne conduira pas à une conclusion significative.

3.5.6.3 « Approche Totalisante » sur les seize bassins versants

« L'approche par Tableau » de présenter les résultats d'intercomparaison des modèles sur les seize bassins versants a l'avantage (par rapport aux autres approches de cette thèse) de laisser apparaître les détails de l'intercomparaison permettant d'évaluer la relative sensibilité (aux échantillons de calage) des modèles comparés. « L'approche totalisante » permet une représentation graphique des résultats issus du Tableau d'intercomparaison (**Figure 3-7**). Le problème d'égalité en termes de sensibilité aux échantillons, dans l'intercomparaison des modèles sur le bassin versant à la station de Koulikoro, ne s'est pas soulevé en analysant les résultats du (4)-modèles-intercomparaisons sur les seize bassins versants étudiés (**Tableau 3-13(a)**). Sur les seize bassins versants, considérés comme un ensemble, la classification des quatre modèles, du moins sensible (aux échantillons) au plus sensible est la suivante : SimulHyd ND (la version Non-Distribuée de SimulHyd) est le premier modèle qualifié à travers un jeu de trois (3)-modèles-intercomparaisons (**Tableau 3-13(b)**), il occupe la première position ; SimulHyd SD (la version Semi-Distribuée de SimulHyd) occupe 50% des

scores d'une (3)-modèles-intercomparaisons (**Tableau 3-13(a)**); GR2M ND (la version Non-Distribuée de GR2M) devient le troisième qualifié à travers une (2)-modèles-intercomparaisons avec GR2M SD (la version Semi-Distribuée de GR2M), qui occupe la quatrième position.

Tableau 3-13 : Résultats d'Intercomparaison sur Seize Bassins Versants

(a)

16 Bassins	Périodes: avant 1970 et après 1970	Actions modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M ND	SimulHyd ND	GR2M SD	SimulHyd SD	GR2M ND	GR2M SD	SimulHyd SD	GR2M ND	GR2M SD
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		10,13	25,13	3,88	8,88	15,42	3,92	28,67	29,75	18,25
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		10,13	25,38	2,63	9,88	15,92	2,92	29,17	31	17
		Calibration Nash		1	12	0	3	5	0	11	10	6
		Validation Nash		0	11	0	5	4	0	12	9	7
		Robustesse TDE		2	13	0	1	3	0	13	15	1
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	1	9	0	6	1	0	15	11	5
			X2	5	3	5	3	8	5	3	9	7
			Nash (val.,)	5	6	1	4	9	1	6	11	5
Score				34,25	104,5	12,5	40,75	61,33	12,83	117,8	125,75	66,25

(b)

16 Bassins	Périodes: avant 1970 et après 1970	Actions modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M ND	SimulHyd ND	SimulHyd SD	GR2M ND	SimulHyd ND	GR2M SD	SimulHyd ND	GR2M SD	SimulHyd SD	GR2M ND	GR2M SD
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		12,4	25,7	9,92	10,2	32,4	5,42	29,2	9,92	8,92	29,8	18,3
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		10,7	25,4	11,9	10,7	32,9	4,42	29,7	7,92	10,4	31	17
		Calibration Nash		1	12	3	1	15	0	12	1	3	10	6
		Validation Nash		0	11	5	0	16	0	11	0	5	9	7
		Robustesse TDE		2	13	1	2	14	0	15	0	1	15	1
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	1	9	6	1	15	0	10	0	6	11	5
			X2	8	3	5	5	6	5	6	7	3	9	7
			Nash (val.,)	5	6	5	5	10	1	10	2	4	11	5
Score				40,1	105,1	46,8	34,8	141	15,8	123	27,8	41,3	125,75	66,25

Les résultats globaux sur les seize bassins versants (**cf. Tableau 3-13, Figure 3-7, et annexes 3**) permettent de remarquer, autant en termes d'efficacité qu'en termes de sensibilité aux échantillons, que la classification partant du meilleur modèle au moins bon est la suivante :

SimulHyd ND, SimulHyd SD, GR2M ND et GR2M SD. Cet ordre est respecté seulement en termes d'efficacité quand l'intercomparaison est effectuée uniquement sur le seul bassin versant à Koulikoro ; en termes de sensibilité aux échantillons sur ce bassin versant les versions semi-distribuée des modèles SimulHyd et GR2M prennent les positions prééminentes (respectivement) de leurs versions non-distribuées : SimulHyd SD, SimulHyd ND, GR2M SD et GR2M ND (**Tableaux 3-12(a), et 3-12(b)**).

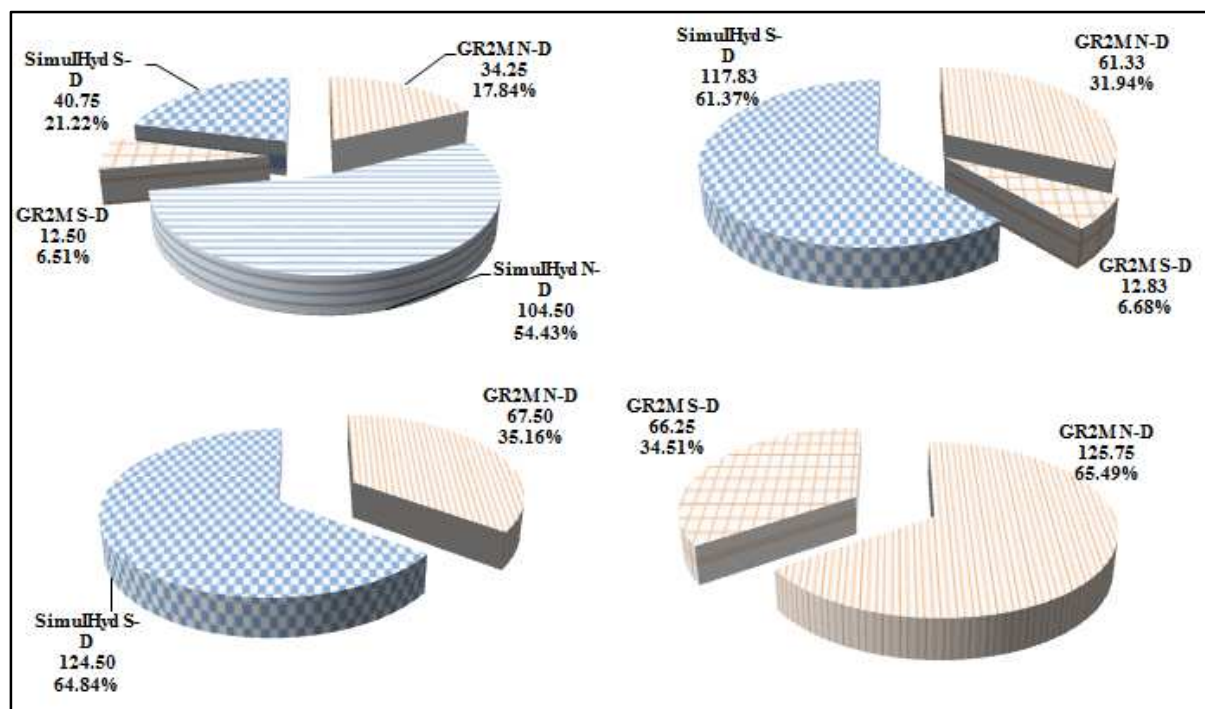


Figure 3-7 : résultats d'intercomparaison « Approche Totalisante » sur Seize Bassins Versants.

Nous avons ainsi amélioré le modèle conceptuel GR2M (Non-Distribuée et Semi-Distribuée) en proposant un jeu de deux versions de modèles, SimulHyd Semi-Distribuée et SimulHyd Non-Distribuée. Un jeu de quelques (2)-modèles-intercomparaisons suffirait de classer totalement (en termes de performance) les quatre modèles en compétition sans passer par un (4)-modèles-intercomparaisons ou un (3)-modèles-intercomparaisons. En investiguant l'importance de ces deux derniers, ((4)-modèles-intercomparaisons et (3)-modèles-intercomparaisons), nous considérons une analogie avec un contexte de vote où le candidat en tête ne serait déclarer comme le gagnant final sans qu'il gagne plus de 50% des bulletins de vote, sinon il restera en compétition. Cela est ce qui advient lors d'une (n)-modèles-intercomparaisons avec ($n > 2$), le modèle pivot qui ne gagnerait pas 50% des scores continuera la compétition dans des (n-1)-modèles-intercomparaisons, et ainsi de suite. L'un des avantages des (n)-modèles-intercomparaisons (avec $n > 2$) est de savoir s'il est nécessaire de systématiquement faire toutes les (2)-modèles-intercomparaisons ou non, ce qui permet de gagner en temps s'il y a plusieurs modèles en compétition.

3.5.6.4 « Approche par Bassin » des Résultats d'Intercomparaison

Cette approche vise à résumer graphiquement et sous forme de carte les résultats d'intercomparaison de différentes versions de modèle sur divers bassins versants. Les différents secteurs sur la **Figure 3-8** montrent le rapport de performance entre les deux versions de modèle les plus efficaces sur un bassin versant et conduisent à l'établissement d'une carte d'intercomparaison (**Figure 3-9**). Les secteurs délimités en terme d'angle trigonométrique à partir de l'axe X des abscisses ($\pi/16$, $3 \cdot \pi/16$, $5 \cdot \pi/16$ et $7 \cdot \pi/16$) sont : les secteurs 1A et 2A, qui sont progressivement favorable à la composante Y (ordonnée) d'un (2)-modèles-intercomparaisons ; inversement les secteurs 1b et 2b les sont à la composante X (abscisse) d'un (2)-modèles-intercomparaisons ; et le secteur zéro sera, et dans certain cas abusivement, considéré comme n'étant pas en faveur d'aucun des deux versions de modèle les plus efficaces en intercomparaison : quand le point-bassin est distinctement éloigné de la ligne d'égalité des modèles (ou la diagonale), l'assomption d'égalité est abusive. Ces secteurs, établis sur la **Figure 3-8** et cartographiés sur la **Figure 3-9**, permettent une compréhension spatiale du degré d'excellence d'une version de modèle par rapports à une autre sur un bassin versant donné.

Ces méthodes d'exhibition de résultats d'intercomparaisons, graphiquement à travers « l'approche par Bassin », en **Figure 3-8**, et sous forme de carte, en **Figure 3-9**, sont complémentaires et plus informatives si elles sont analysées ensemble. Patrel et al (2006a), visant l'utilisation d'une information régionale (le régime hydrologique) couplée à une information ponctuelle (les débits des stations hydrométriques) pour réussir une modélisation sur des bassins peu ou non-jaugés, pointent l'importance d'avoir une cartographie des meilleurs modèles en fonction d'un critère primordial qui pourrait être la quantification des incertitudes qui accompagnent les résultats de la modélisation. La différence entre leur objectif de cartographie et celui accompli (dans le présent mémoire) est le manque de quantification des incertitudes de la modélisation, qui, sans être quantifier ont subi des réductions à travers une Méthode d'Atténuation d'Incertitudes (**cf. sous-chapitre 4.4**). L'analyse conjointe des deux **Figures (3-8 et 3-9)** amène à faire certaines remarques. Aux stations qui sont sur le lit principal du fleuve Niger (Banankoro, Dialakoro, Faranah, Koulikoro, Kouroussa et Siguiry), SimulHyd ND (la version Non-Distribuée de SimulHyd) est la plus efficace des quatre, suivie de SimulHyd SD (la version Semi-Distribuée de SimulHyd). Toutes ces stations de mesure de débit appartiennent au secteur 1b (**Figure 3-8**, *par rapport à la diagonale inverse et suivant l'abscisse X* : entre 59,95% et 83,41% des

scores en compétition), et cela permet d'attribuer le qualificatif « Hautement Efficente » au modèle SimulHyd ND par rapport au modèle SimulHyd SD sur ces sous-bassins versants sur le fleuve Niger et sur le bassin Tinkisso (situé sur la rivière Tinkisso). Le secteur 2b (**Figure 3-8**, suivant l'abscisse X entre 83,41% et 100% des scores en compétition) sera le secteur où le qualificatif « Très Efficente » pourra être attribué au model SimulHyd ND relativement au modèle SimulHyd SD sur les bassins versants, Kankan (situé sur la rivière Milo), Baranama (situé sur la rivière Dion) et Baro (situé sur la rivière Niandan). Dans la zone sous la diagonale principale du secteur zéro (**Figure 3-8**, suivant l'abscisse X entre 50% et 59,95% des scores en compétition), le modèle SimulHyd ND pourra être qualifié d' « égale ou plus efficace » par rapport au modèle SimulHyd SD sur le bassin versant Ouaran (situé sur la rivière Tinkisso).

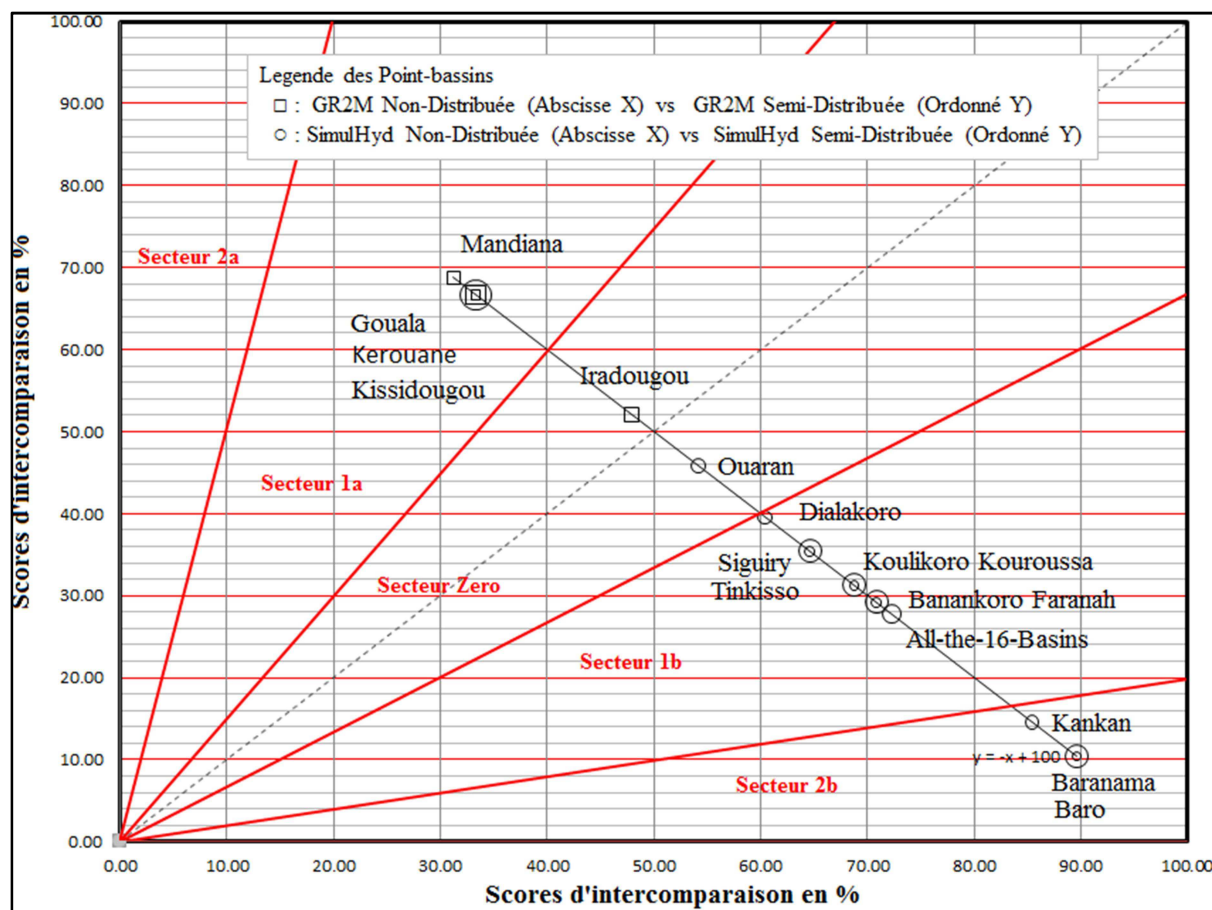


Figure 3-8 : Résultats d'Intercomparaison « Approche par Bassin »

Ces remarques restent valides quand on les adapte aux secteurs 1a, 2a, et la zone en dessus de la diagonale principale du secteur zéro. Dans le secteur 1a (**Figure 3-8**, suivant l'ordonné Y entre 59,95% et 83,41% des scores en compétition), SimulHyd SD est « Hautement Efficente » que SimulHyd ND sur le bassin versant de Kissidougou (situé sur la rivière Niandan) ; et le modèle GR2M SD (la version Semi-Distribuée de GR2M) est « Hautement

Efficiente » par rapport au modèle GR2M ND (la version Non-Distribuée de GR2M) sur les bassins versants, Gouala (situé sur la rivière Sankarani), Kérouane (situé sur la rivière Niandan) et Mandiana (situé sur la rivière Sankarani). Dans la zone en dessus de la diagonale principale du secteur zéro (**Figure 3-8**, suivant l'ordonnée Y entre 50% et 59,95% des scores en compétition), et le modèle GR2M SD est « Plus Efficente » par rapport au modèle GR2M ND sur le bassin versant d'Iradougou (situé sur la rivière Kouroukélé). La **Figure 3-9** est une voie cartographique d'exposer les remarques susmentionnées sous forme de carte qui laisse apparaître une classification des bassins en terme de secteurs d'intercomparaison.

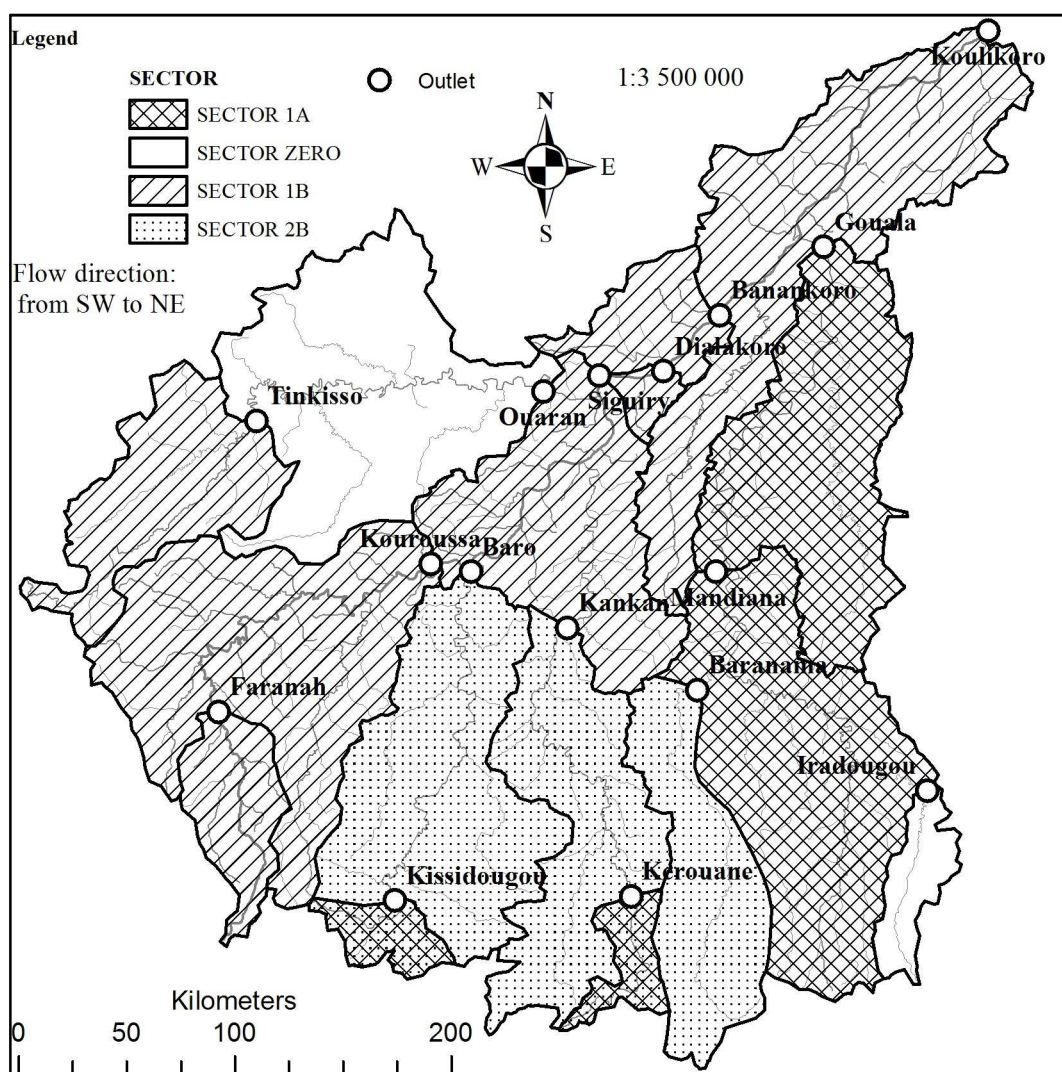


Figure 3-9 : Carte d'intercomparaison de la zone d'étude (sous-bassins du haut Niger)

3.6 Quelques communications scientifiques relatives au travail de thèse

Certains résultats de la présente étude, et d'autres sur des thèmes connexes au sujet, ont fait l'objet de présentations Posters et/ou orales pendant des conférences, colloques et formations scientifiques durant les trois premières années de la présente recherche. Les résumés (abstracts) et/ou Posters de ces communication sont affichés aux **annexes 10**.

CHAPITRE 4

UTILISATION DE LA GÉOSTATISTIQUE POUR L'AMÉLIORATION DE LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

4. Chapitre 4. Utilisation de la Géostatistique pour l'Amélioration de la Modélisation Hydrologique

La géostatistique, qui permet de comprendre davantage l'inférence spatiale existante au sein de la distribution d'une variable, conduit au développement de *la méthodologie hydro-géostatistique*. Nous avons « dé-corrélé » la différence de performance des modèles par rapport à la variabilité spatiale des données WHC à travers l'application d'un coefficient de pondération des lames d'eau en modélisation semi-distribuée ; et procédé à l'évaluation de l'amélioration obtenue via *le protocole inter-modèles* : un coefficient de corrélation qui passe de 0.80 à 0.21 en valeur absolue pour le modèle SimulHyd. Le protocole *inter-bassins* propose un espace, *NASH-WHC*, où un modèle semi-distribué avec coefficient de pondération s'illustre mieux, ce qui se traduit par une meilleure corrélation (de 0.48) pour la structure spatiale des point-bassins dans cet espace (au lieu de 0.36 lorsque le coefficient de pondération n'est pas utilisé). Par conséquent, *la méthodologie hydro-géostatistique* constitue un prolongement géostatistique du protocole inter-bassins, où les outils et démarches de la géostatistique classique est appliqués pour la modélisation et la simulation des valeurs des paramètres du modèle hydrologique dans l'espace *NASH-WHC* ; et ceci, partant des bassins jaugés pour une possible application sur des bassins non-jaugés. En plus de ces développements, une méthode d'atténuation des incertitudes en modélisation est proposée avec des résultats d'application satisfaisant qui pourrait permettre de combiner dynamiquement les concepts de modélisation semi-distribué et non-distribué pour en produire qu'un seul modèle plus performant. Enfin, les expressions analytiques de l'évolution des réservoirs du modèle SimulHyd, établi partant de nos travaux de mémoire sur le modèle GR2M (Koné, 2007), est exposée dans le présent chapitre.

4.1 « Protocole inter-modèles » et l'établissement d'un coefficient de pondération en Modélisation Semi-distribuée

La visée du développement du présent protocole est d'établir l'utilité d'introduire, dans la modélisation semi-distribuée, un coefficient de pondération des lames d'eau simulées à partir des données d'entrée de chaque maille. Lorsqu'on remplace les données d'entrée du modèle SimulHyd (ou GR2M) semi-distribuée par celles de l'entrée de SimulHyd (ou GR2M) non-distribuée, en mettant bien sûr les mêmes valeurs moyennes des différentes grandeurs (pluie, ETP, WHC) dans toutes les mailles : on constate que pour un modèle (GR2M ou SimulHyd) ses deux versions (non-distribuée et semi-distribuée) donnent les mêmes résultats, à savoir les

mêmes valeurs des paramètres X1 et X2, aussi la même valeur du critère de performance. De ce constat on peut déduire que la différence généralement constatée entre les résultats de SimulHyd (ou respectivement GR2M) semi-distribuée et ceux de SimulHyd (ou respectivement GR2M) non-distribuée est due entre autres, à la dispersion des valeurs des grandeurs entre les mailles en entrée de SimulHyd (ou respectivement GR2M) semi-distribuée. Pour éprouver cette déduction, on va s'intéresser à une probable corrélation qui peut exister entre cette dispersion et la différence relative de performance remarquée entre SimulHyd (ou GR2M) non-distribuée et SimulHyd (ou respectivement GR2M) semi-distribuée. On se propose pour chaque bassin donné de prendre la différence relative de la valeur du critère de Nash des deux versions de modèles lors de leur calibration sur une même période et de calculer le coefficient de corrélation entre la série formée par ces différences relatives de performance et la série formée par les coefficients de dispersion relative des WHC des bassins versants. Cette opération peut être envisagée sur la pluie et l'ETP qui sont les autres variables dans GR2M et SimulHyd, donc susceptibles d'intervenir dans l'expression du coefficient de pondération des lames élémentaires ; seulement que l'ETP à peu d'influence dans la modélisation avec GR2M (Paturel et al., 2004 ; Dezetter et al., 2010), et que la Pluie est une donnée peu précise en des nœuds de l'espace où elle est interpolée. Dans la modélisation avec SimulHyd, la taille WHC du « réservoir sol », la Pluie et l'ETP, sont contrôlés par le paramètre X1 du modèle suivant successivement les expressions $A = (1/X1) * WHC$, $P_n = X1 * P$, et $ETP_n = X1 * ETP$; ainsi le coefficient de pondération établi, (**Encadré 4-1**), à partir d'une caractéristique physique des mailles du Bassin versant (le WHC), est celle qui optimise le plus la performance du modèle et évitera une utilisation redondante (de l'information) de la variabilité spatiale dans l'établissement de ce coefficient. On trouve des coefficients de corrélation élevés entre les anciennes versions semi-distribuées des modèles (SimulHyd SD_old et GR2M SD_old sont sans coefficient de pondération sur WHC) et leur version non-distribuée respective ; ainsi dans le **Tableau 4-1**, la corrélation est 0.77 pour les GR2M et 0.76 pour les SimulHyd. On a des coefficients de corrélation acceptable (0.77 et 0.76) en faveur de ce protocole pour supposer que l'information de la dispersion des valeurs de WHC doit intervenir dans l'expression du coefficient de pondération. Après l'application du coefficient de pondération basé sur le WHC, la corrélation chute drastiquement de 0.77 à -0.19 pour les GR2M et de 0.76 à -0.21 pour les SimulHyd ; en outre, les performances des versions semi-distribuées (de GR2M et de SimulHyd) sont rehaussées et s'approchent de la valeur de Nash de leur version non-distribuée respective. La **Figure 4-1** présente les résultats de la dé-corrélation (de 0.74 à 0.01)

obtenue après application du coefficient de pondération entre les versions de GR2M semi-distribuée et SimulHyd non-distribuée. Les résultats contenus dans le **Tableau 4-1** sont calculés à partir de la calibration des modèles sur la longueur totale des chroniques de débits (PC1+PC2 : avant et après 1970), alors que les **Tableaux 4-2 et 4-3** concernent respectivement la première période PC1 (avant 1970) et la seconde période PC2 (après 1970).

Tableau 4-1 : Corrélation entre dispersions relatives de WHC et différences de performances relatives (a)

Sur les deux Périodes combinées, avant et après 1970	GR2M_ND	SimulHyd_ND	GR2M_SD	SimulHyd_SD	GR2M_SD_old	SimulHyd_SD_old
GR2M_ND						
SimulHyd_ND	0.51					
GR2M_SD	-0.19	0.01				
SimulHyd_SD	-0.16	-0.21	-0.18			
GR2M_SD_old	0.77	0.74	0.80	-0.12		
SimulHyd_SD_old	-0.20	0.76	-0.50	-0.16	0.53	

Encadré 4-1 : Règle de pondération dans GR2M et SimulHyd semi-distribués

La dispersion des valeurs du WHC se calcul à l'aide de l'expression de sa variance empirique qui s'écrit : $\sigma_{WHC}^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (WHC_i - \overline{WHC})^2$

Le coefficient de variation de WHC (ou son coefficient de dispersion relative) est :

$$(\sigma_{WHC}^2)_{relative} = \frac{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (WHC_i - \overline{WHC})^2}{\overline{WHC}} \cdot 100\%$$

L'objectif :

- est de vérifier s'il existe une corrélation entre : $\frac{Nash(GR2M_{globale}) - Nash(GR2M_{semi-globale})}{Nash(GR2M_{globale})}$ et $(\sigma_{WHC}^2)_{relative}$.

(Le calcul de la corrélation entre ces deux termes à donner 0.7 suivant le " Protocole Inter-modeles ")

- afin de proposer un probable coefficient de pondération basé sur la variance :

$$\beta_i = \frac{(WHC_i - \overline{WHC})^2}{\sum_{i=1}^m (WHC_i - \overline{WHC})^2}$$

Contexte de prise en compte de l'évolution des états de surface (WHC évolutive) :

$$\beta_i^k = \frac{(WHC_i^k - \overline{WHC^k})^2}{\sum_{i=1}^m (WHC_i^k - \overline{WHC^k})^2}$$

k est l'indice sur le pas de temps de la simulation.

Sur les **Tableaux 4-2 et 4-3** ci-après, « les dé-corrélations », ou les baisses de corrélations constatées sont faibles (par rapport à celles constatées sur le **Tableau 4-1** ci-dessus), et cela pourrait être élucidé après avoir effectué la modélisation avec des valeurs de WHC évolutive dans le temps (ce qui n'est pas le cas dans la présente étude), ou être le fait que la série chronologique utilisée lors de l'établissement du **Tableau 4-1** est relativement plus longue et constituée de celles utilisées pour les calculs des **Tableaux 4-2 et 4-3**.

Tableau 4-2 : Corrélation entre dispersion relative de WHC et différence de performance relative (b)

(Période avant 1970)	GR2M_ND	SimulHyd_ND	GR2M_SD	SimulHyd_SD	GR2M_SD_old	SimulHyd_SD_old
GR2M_ND						
SimulHyd_ND	0.60					
GR2M_SD	-0.16	0.02				
SimulHyd_SD	0.21	-0.14	0.09			
GR2M_SD_old	0.79	0.79	0.83	0.75		
SimulHyd_SD_old	-0.21	0.80	-0.64	0.46	0.62	

Tableau 4-3 : Corrélation entre dispersion relative de WHC et différence de performance relative (c)

(Période après 1970)	GR2M_ND	SimulHyd_ND	GR2M_SD	SimulHyd_SD	GR2M_SD_old	SimulHyd_SD_old
GR2M_ND						
SimulHyd_ND	0.05					
GR2M_SD	-0.47	-0.09				
SimulHyd_SD	-0.15	-0.41	-0.13			
GR2M_SD_old	0.71	0.49	0.68	0.37		
SimulHyd_SD_old	-0.50	0.65	-0.45	0.33	0.13	

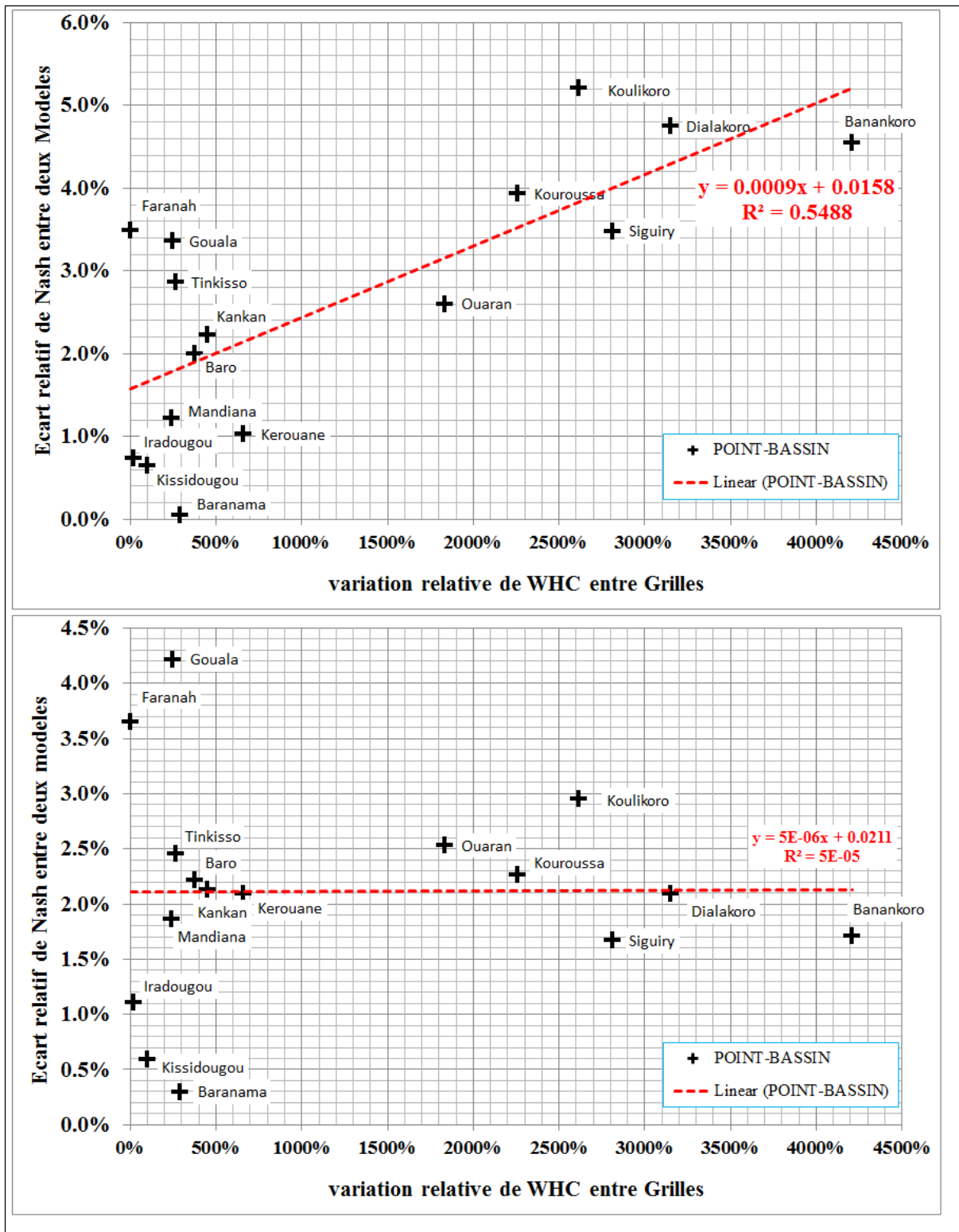


Figure 4-1 : « Protocole inter-modèles » entre GR2M semi-distribuée et SimulHyd non-distribuée. (Sans coefficient de pondération des lames d'eau en modélisation semi-distribuée (en haut), et (en bas) avec coefficient de pondération des lames d'eau en modélisation semi-distribuée).

4.2 « Protocole inter- bassins »

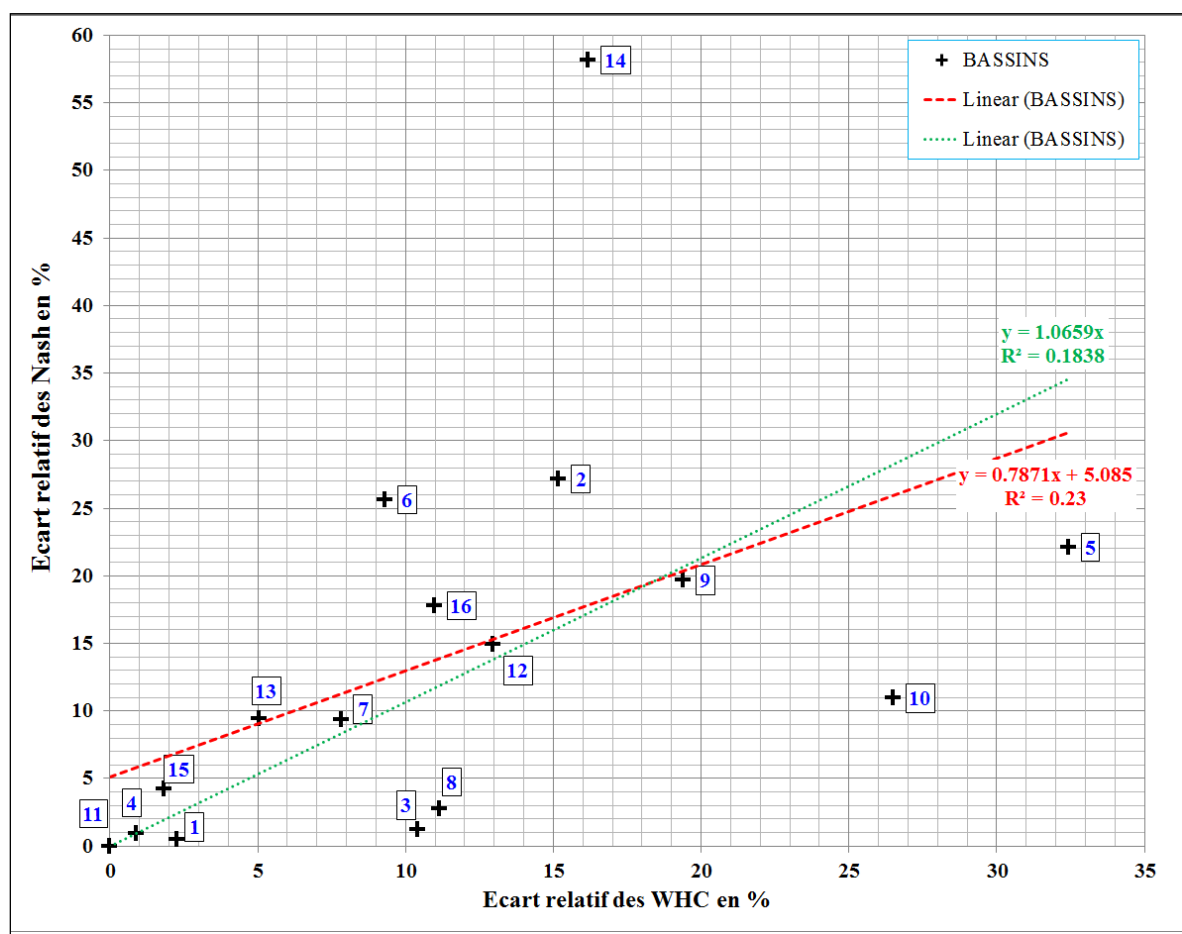


Figure 4-2 : « Protocole Interbassins utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération sur WHC ».

(Les résultats montrent une corrélation de 0.48, entre, la série des écarts relatifs des valeurs du critère de Nash du modèle SimulHyd en phase de calibration et celles obtenue en validation (utilisant le jeu de paramètres (X1, X2) calés sur le bassin de Koulikoro), et la série des écarts relatifs absolus des WHC moyennes de chaque bassin et celui du Bassin de Koulikoro (en abscisse). Cette corrélation devient 0.43 quand la droite de régression est forcée de passer par le point d'origine, le Bassin de Koulikoro. Le même résultat est obtenu avec GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération sur WHC : ceci n'est pas présenté. La numérotation concerne les bassins versants : 1. Banankoro, 2. Baranama, 3. Baro, 4. Dialakoro, 5. Faranah, 6. Gouala, 7. Iradougou, 8. Kankan, 9. Kérouane, 10. Kissidougou, 11. Koulikoro, 12. Kouroussa, 13. Mandiana, 14. Ouaran, 15. Siguiry, 16. Tinkisso).

La validation de la version semi-distribuée (ou non-distribuée) du modèle SimulHyd (ou GR2M) sur les différents sous-bassins, avec les valeurs des paramètres (X1, X2) calées sur le grand Bassin défini à la station de Koulikoro, peut constituer une source d'informations à exploiter. À cette cause on peut prendre sur une même période, la différence relative entre la valeur du critère de performance obtenue en calage sur un sous-bassin donné et la valeur de ce critère obtenue en validation sur le même sous-bassin (avec X1 et X2 calé sur le grand bassin défini à la station de Koulikoro). On peut considérer cette différence relative comme une manière de quantifier l' « influence » d'un sous-bassin lors du calage du jeu de paramètres (X1, X2) du grand bassin défini à la station de Koulikoro: moins la différence est

faible, plus le sous-bassin a eu une influence notable lors de ce calage. On calculera le coefficient de corrélation entre la série formée par ces « influences » et celle formée par les écarts relatifs absolus entre le WHC moyen du grand Bassin défini à la station de Koulikoro et celui des sous-bassins respectifs. La **Figure 4-2** ci-dessus permet une appréciation visuelle de la possibilité d'une corrélation entre les deux séries en jeu. Bien que la valeur du coefficient de corrélation est moyennement faible (0,43 à 0.48), avec une approche régionale, le protocole « **inter-bassins** » vient appuyer le protocole « **inter-modèles** » concernant l'intervention de l'information de la dispersion des valeurs du fichier WHC, dans l'expression de la pondération des lames d'eau de SimulHyd (ou GR2M) semi-distribuée.

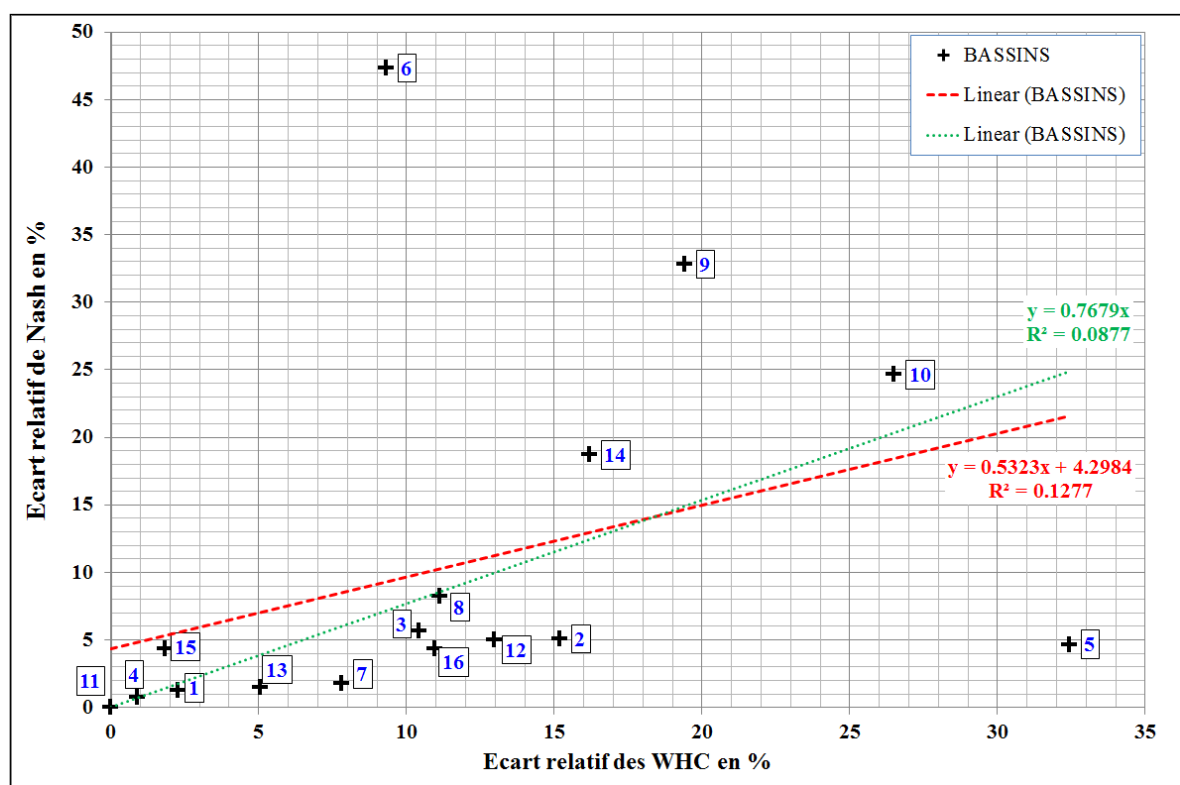


Figure 4-3 : « Protocole Interbassins utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC ».

(Les résultats nous donnent une corrélation de 0.36, entre, la série des écarts relatifs absolus des valeurs du critère de Nash du modèle SimulHyd en phase de calibration et celles obtenue en validation (utilisant le jeu de paramètres (X1, X2) calés sur le bassin de Koulikoro), et la série des écarts relatifs absolus des WHC moyennes de chaque bassin et celui du Bassin de Koulikoro (en abscisse). Cette corrélation devient 0.30 quand la droite de régression est forcée de passer par le point d'origine, le Bassin de Koulikoro. Le même résultat est obtenu avec GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC: ceci n'est pas présenté. La numérotation concerne les bassins versants : 1. Banankoro, 2. Baranama, 3. Baro, 4. Dialakoro, 5. Faranah, 6. Gouala, 7. Iradougou, 8. Kankan, 9. Kérouane, 10. Kissidougou, 11. Koulikoro, 12. Kouroussa, 13. Mandiana, 14. Ouaran, 15. Siguiry, 16. Tinkisso).

Les dispositions spatiales de ces bassins versants sur les **Figures 4-2 et 4-3**, ne sont pas les mêmes et pourtant la statistique globale conduite à des coefficients de corrélation proche 0.36 et 0.48 (ou 0.30 et 0.43). L'application du coefficient de pondération au model SimulHyd semi-distribuée permet une amélioration du coefficient de corrélation du protocole

Interbassins qui passe de 0.36 à 0.48 (ou de 0.30 à 0.43) ; dans le cas où les deux point-bassins extrêmes (Ouaran sur la **Figure 4-2** et Gouala sur la **Figure 4-3**) sont omis individuellement, l'évolution du coefficient de corrélation est de 0.58 (pour SimulHyd sans pondération) à 0.60 (pour SimulHyd avec pondération) ; s'ils sont collectivement omis sur les deux Figures, le coefficient de corrélation passe de 0.57 (pour SimulHyd sans pondération) à 0.69 (pour SimulHyd avec pondération). Pour la droite de régression, leurs pentes et l'intersection avec l'axe des ordonnées sont toutes plus élevées sur la **Figure 4-2** que sur la **Figure 4-3**.

Les débits et les calculs effectués au niveau des exutoires de bassins versants constituent des variables régionalisées ayant des coordonnées géographiques, une statistique à variable régionalisée ou géostatistique pourrait être envisagée pour élucider la différence entre ces deux Figures et les en extraire des informations utiles pour la modélisation (Diggle & Ribeiro, 2007 ; Reimann et al., 2009 ; Chilès & Delfiner, 2012).

4.3 Extension Géostatistique du protocole *Inter-bassins* : essai d'estimations de paramètres des modèles hydrologiques

Le but visé est l'estimation des paramètres de modèles hydrologiques à travers la géostatistique et l'impact de ces estimations sur la modélisation (hydrologique) et sur les résultats de sorties de ces modèles. La méthodologie « hydro-géostatistique » d'estimation des paramètres suivant une approche qui serait de procéder au krigeage des paramètres X1 et X2 dans un espace « *Nash-WHC* » du protocole interbassins comme celui de la **Figure 4-3** (qui concerne les résultats du modèle SimulHyd semi-distribuée). Les données de la modélisation géostatistique seront constituées des paramètres X1 et X2 issus des calages des quatre versions de modèles hydrologiques suivantes : SimulHyd semi-distribuée, SimulHyd non-distribuée, GR2M semi-distribuée, et GR2M non-distribuée. Cette combinaison de paramètres des versions de modèles permet d'avoir une taille critique de plus de 50 échantillons pour mener une modélisation géostatistique (voir le **sous-chapitre 4.3.1.2**). Ainsi, une structure spatiale est exagérément présente verticalement (**Figure 4-4** ci-dessous) due au fait qu'un même bassin versant est représenté quatre fois dans l'espace « *Nash-WHC* » à travers les versions de modèle.

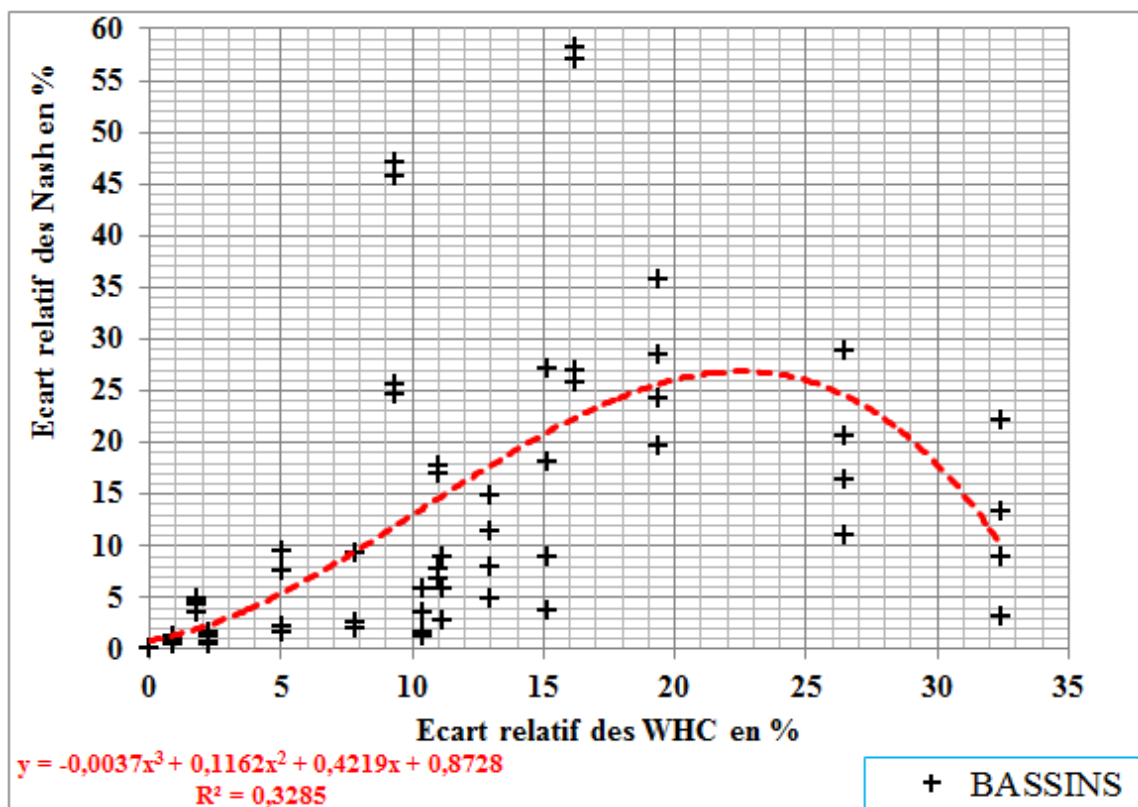


Figure 4-4 : Espace « Nash-WHC » de seize bassins versants et quatre versions de modèle hydrologique.

4.3.1 Une méthodologie géostatistique d'estimation des paramètres des modèles hydrologiques

La géostatistique vise la modélisation de la structure des variables dans un espace et leur estimation et simulation en des points de cet espace et/ou en des moments dans le temps suivant des procédés d'interpolation et d'extrapolation.

4.3.1.1 Type de variable et statistique globale

Les variables aléatoires de l'étude sont les paramètres X1 et X2 des versions des modèles GR2M et SimulHyd. Ces deux paramètres sont des **variables continues** avec des valeurs comprises entre **0 et 1**. Certains auteurs procèdent généralement à l'analyse des comportements des modèles hydrologiques dans l'espace des paramètres de ces mêmes modèles. Cet espace (X1, X2) pour les modèles GR2M et SimulHyd, et illustré sur la **Figure 4-5** ci-après, permet de voir que la variance (ou la dispersion) du paramètre X1 (var = 0.0127) est plus grande que celle du paramètre X2 (var = 0.0029) : c'est ce qui est confirmé sur la **Figure 4-9** et dans le **Tableau 4-4** (où le palier du variogramme est théoriquement la variance de la variable). Sur la **Figure 4-5** l'exagération de la structure spatiale est présente autant verticalement que horizontalement car un même bassin versant est encore présent

quatre fois à travers les quatre versions de modèle précédemment mentionnées. La force du lien **linéaire** entre les paramètres X1 et X2 est faible (**Figure 4-5**); ainsi, ils seront considérés comme dé-corrélés, aussi (ils seront) supposés, à priori, comme indépendant et leur modélisation se fera séparément; enfin les valeurs de chacun de ces paramètres seront supposées être produite par un « phénomène » spatialement stationnaire. L'analyse des résidus (**Figure 4-8**) montre que la distribution de chacun des paramètres X1 et X2 s'approche de plus en plus d'une distribution gaussienne lorsqu'on prend en compte concomitamment leur dépendance aux coordonnées de l'espace « **Nash-WHC** » et celle à leur covariance, et ensuite leur dépendance à la structure de cet espace combinée à leur covariance.

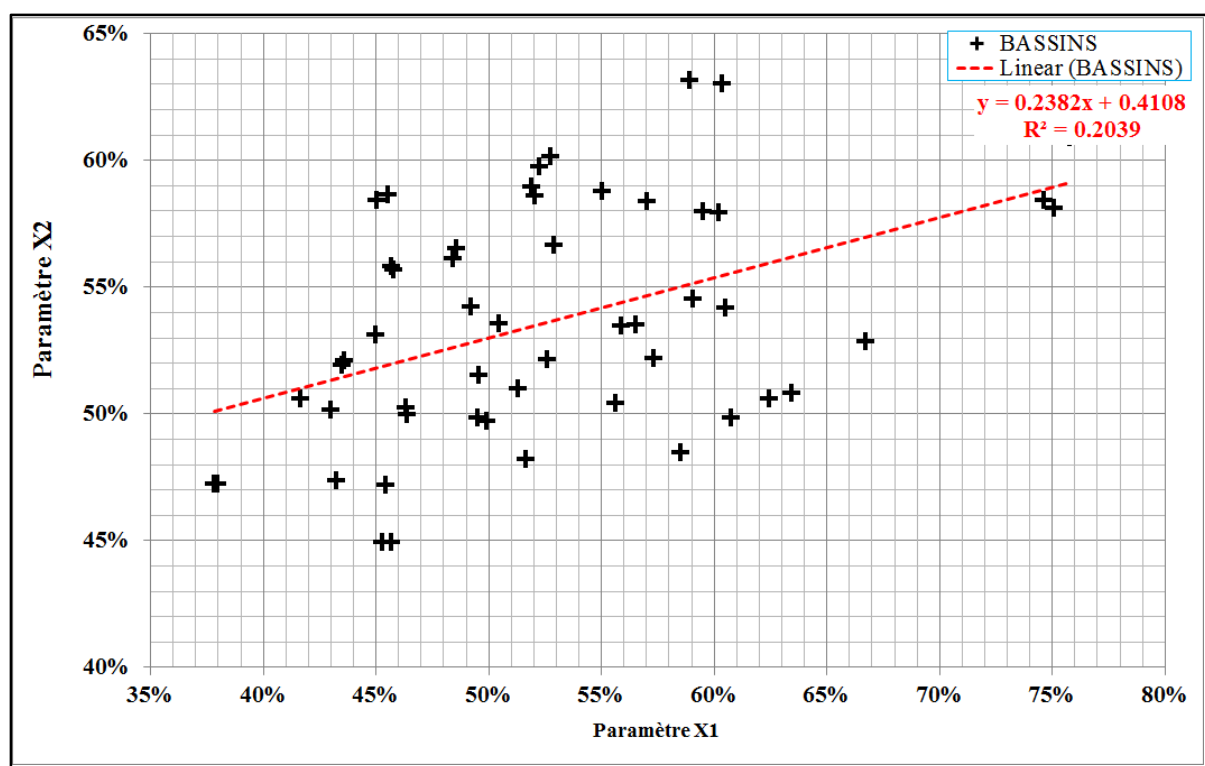


Figure 4-5 : Point-bassins dans l'espace des paramètres (X1, X2).
(GR2M et SimulHyd en modélisation non-distribuée, et semi-distribuée avec pondération sur WHC).

4.3.1.2 Variogramme et modélisation géostatistique

Le Variogramme est un outil descriptif puissant en géostatistique; il est décrit par trois paramètres essentiels (**Figure 4-6** ci-dessous): l'effet pépité, le palier, et la portée. Cette dernière (la portée) est la « distance » à partir de laquelle deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne; le palier, s'il existe, correspond généralement à la droite asymptotique de la courbe (ou du Variogramme); l'effet pépité peut simplement être une discontinuité à l'origine de la courbe (ou du Variogramme) et caractérise l'ensemble des

types d'erreurs inhérentes aux données et à la modélisation géostatistique.

Nous distinguons les variogrammes expérimentaux et les modèles de variogramme théorique: les premiers sont des variantes d'une formulation mathématique basée sur la demi-variance (classique, robuste, et médian) et les seconds sont généralement des expressions analytique des fonctions mathématiques bien connues (Gaussien, exponentiel, sphérique, linéaire généralisée, etc.).

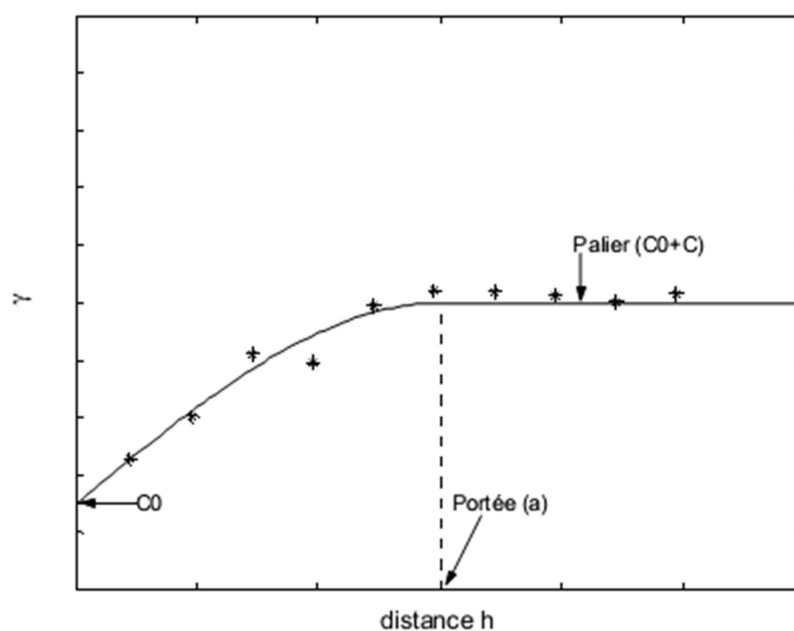


Figure 4-6 : Variogramme expérimental et théorique

La géostatistique suppose une distribution normale (autour de la moyenne) pour la variable dont la structure « spatiale » est à modéliser. Ainsi, les **Figures 4-7 et 4-8** (ci-dessus) synthétisent quelques statistiques globales sur la distribution des points-bassins et des paramètres X1 et X2. Bien que la distribution du paramètre X1, soit bimodale (**Figure 4-7** : histogrammes et courbes de densité), et que l'appréciation visuelle de la normalité de ces distributions (**Figure 4-7** : troisième ligne) permet de détecter des échantillons en dehors de l'intervalle de confiance de 95%, les simulations qui suivent considèrent l'ensemble des valeurs du paramètre X1 comme une seule population, idem pour le paramètre X2.

La construction d'un variogramme expérimental et l'ajustement d'un modèle de variogramme théorique à ce dernier doit suivre certaines conventions en modélisation géostatistique (d'après les cours de géostatistique de Denis Marcotte, du Polytechnique de Montréal):

- Le nombre de point d'échantillonnage doit être supérieur ou égale à **50** ;
- Dans chaque classe de « distance », il faut au moins **30** paires de point ;
- Le nombre de point du variogramme expérimental avant d'atteindre le palier (du modèle théorique) doit être **3** ou **4** au minimum ;

Pour répondre à ces exigences lors de la modélisation géostatistique des paramètres X1 et X2 de modèles hydrologiques sur les 16 bassins versants considérés de la zone d'étude : a) en vue d'avoir plus de 50 échantillons : sur chacun des bassins versants, nous avons, dans un premier scénario, considéré les sorties de simulation de quatre versions de modèle hydrologique (GR2M non-distribuée, GR2M semi-distribuée, SimulHyd non-distribuée, SimulHyd semi-distribuée), et dans un second scénario (non exploité dans ce mémoire), considéré quatre simulations du modèle SimulHyd semi-distribuée (sur quatre périodes différentes); b) la considération de 26 classes de « distance » dans l'espace *Nash-WHC*, permet d'avoir 34 comme le nombre minimum de pair de point pour la classe la moins pourvue (NB : le logiciel **R** propose 13 classes de distance par défaut); c) les paramètres X1 et X2 étant des variables continues, un modèle gaussien de variogramme est adopté pour modéliser des points du variogramme expérimental classique . Sur les **Figures 4-9 et 4-10** ci-dessous est utilisé le package *geoR* tenant compte de la correction de la structure spatiale et avec le second paramètre des modèles hydrologiques comme covariant du premier (vis-versa) ; par contre sur la **Figure 4-11** c'est le package *sgeostat* qui est utilisé pour les modèles de variogramme omnidirectionnel retenus, dont les caractéristiques de ces derniers sont résumés dans le **Tableau 4-4** ci-dessous. Les échantillons ne suivent pas une grille régulière, ce qui est illustrée par la rupture des variogrammes directionnels de 90° (suivant l'abscisse ou l'horizontal) et 135°, et ceci lorsque le nombre de paires minimum exigé par classe de « distance » passe de 4 à 16. Dans ces deux directions il y a peu d'échantillon relativement à la direction 0° (vertical où quatre valeur de l'ordonné correspond systématiquement à une valeur de l'abscisse) et à la direction 45° (plus proche de la structure spatiale décrite par les point-bassins) ; ainsi, les détections d'anisotropie (géométrique et zonale) n'ont pas été entreprises et le modèle est supposé être isotrope.

Tableau 4-4 : Caractéristiques des variogrammes (ajustement des modèles gaussiens).

	variogramme de X1	variogrammes de X2
La portée ³ (<i>range</i>)	11.271%	11.303%
Le palier (<i>sill</i>)	1.281%	0.216%
L'effet pépite (<i>nugget</i>)	0.336%	0.110%

³ Pour le modèle gaussien adopté ici, on parle plutôt de Portée effective, qui correspond à 95% de la valeur du palier.

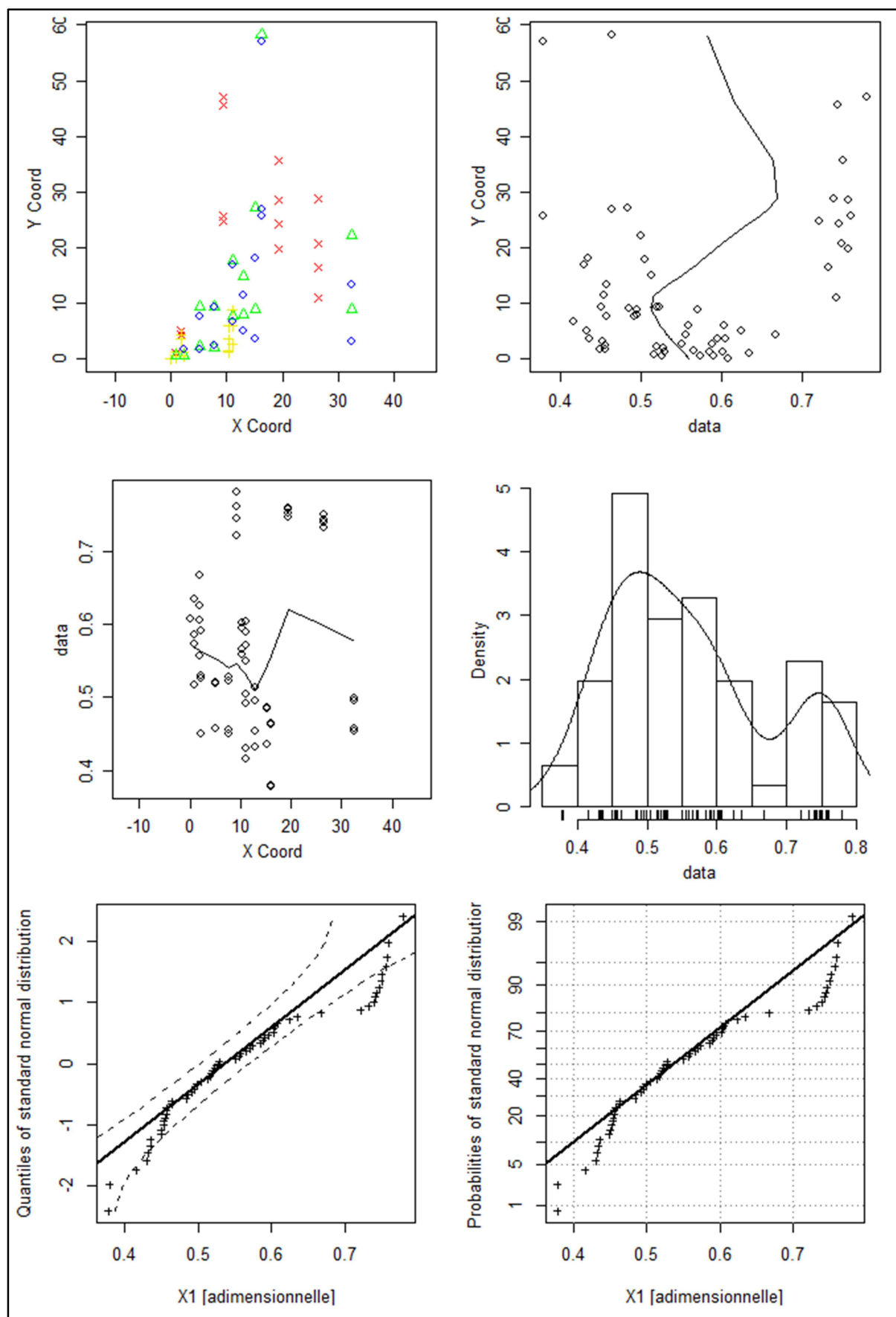


Figure 4-7 : Statistique exploratoire du paramètre X1, et normalité de sa distribution.
 (Courbe de Quantile hypothétique -Quantile empirique [QQ-plot] et celle de Probabilité Cumulative [CP-plot])

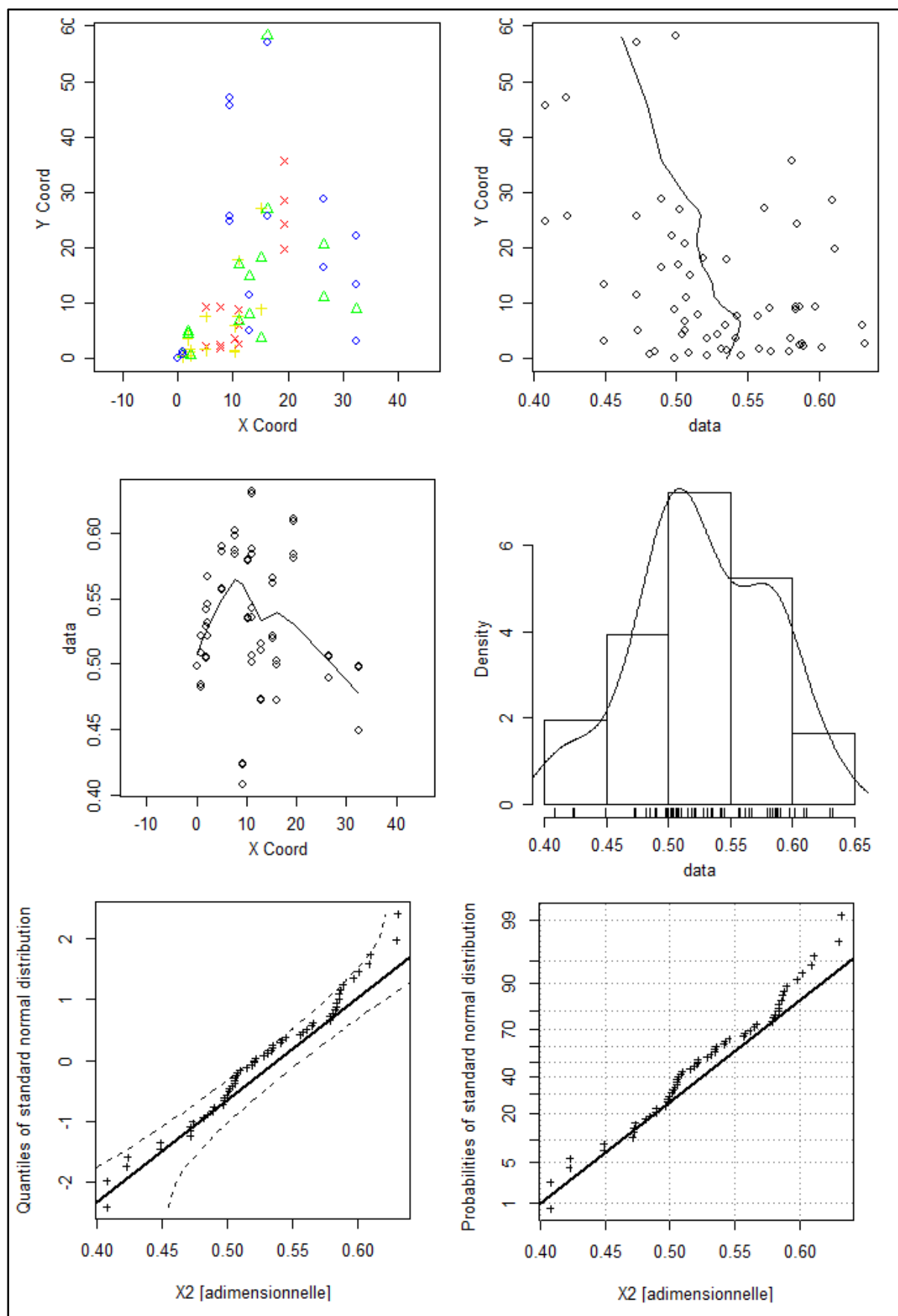


Figure 4-8 : Statistique exploratoire du paramètre X2, et normalité de sa distribution. (Courbe de Quantile hypothétique -Quantile empirique [QQ-plot] et celle de Probabilité Cumullee [CP-plot])

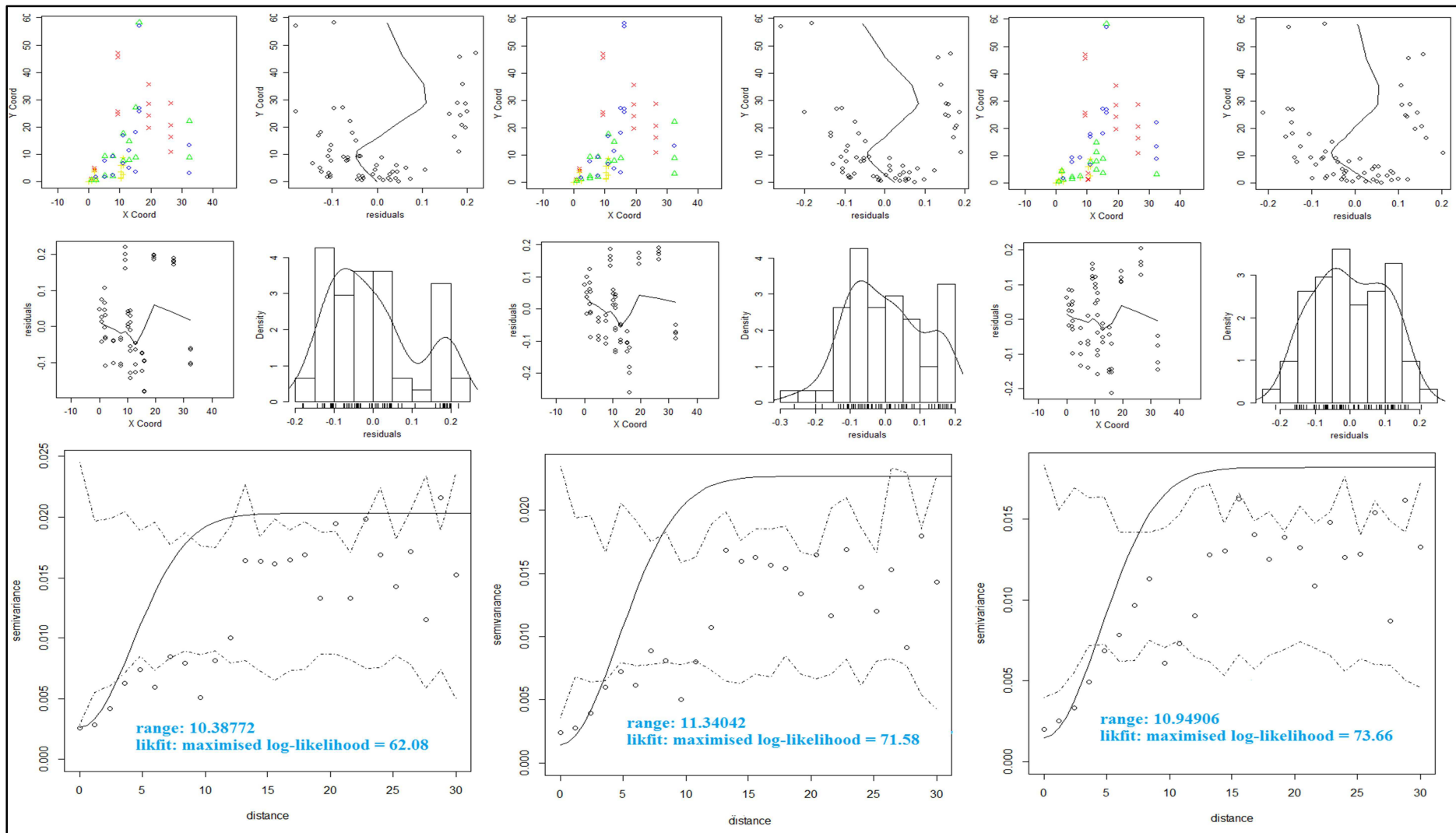


Figure 4-9 : Statistique exploratoire spatiale et amélioration du variogramme expérimental pour le paramètre X1.

(De gauche à droite : hypothèse d'une moyenne constante ; variation de la moyenne linéairement suivant les coordonnées, et le paramètre X2 comme un covariant ; variation de la moyenne comme une fonction du second degré suivant la structure spatiale, et le paramètre X2 comme un covariant. Les enveloppes de simulation, obtenues à travers 99 permutations spatiales des positions des variables, se rétrécissent. Les modèles théoriques ajustés sont des Gaussiens).

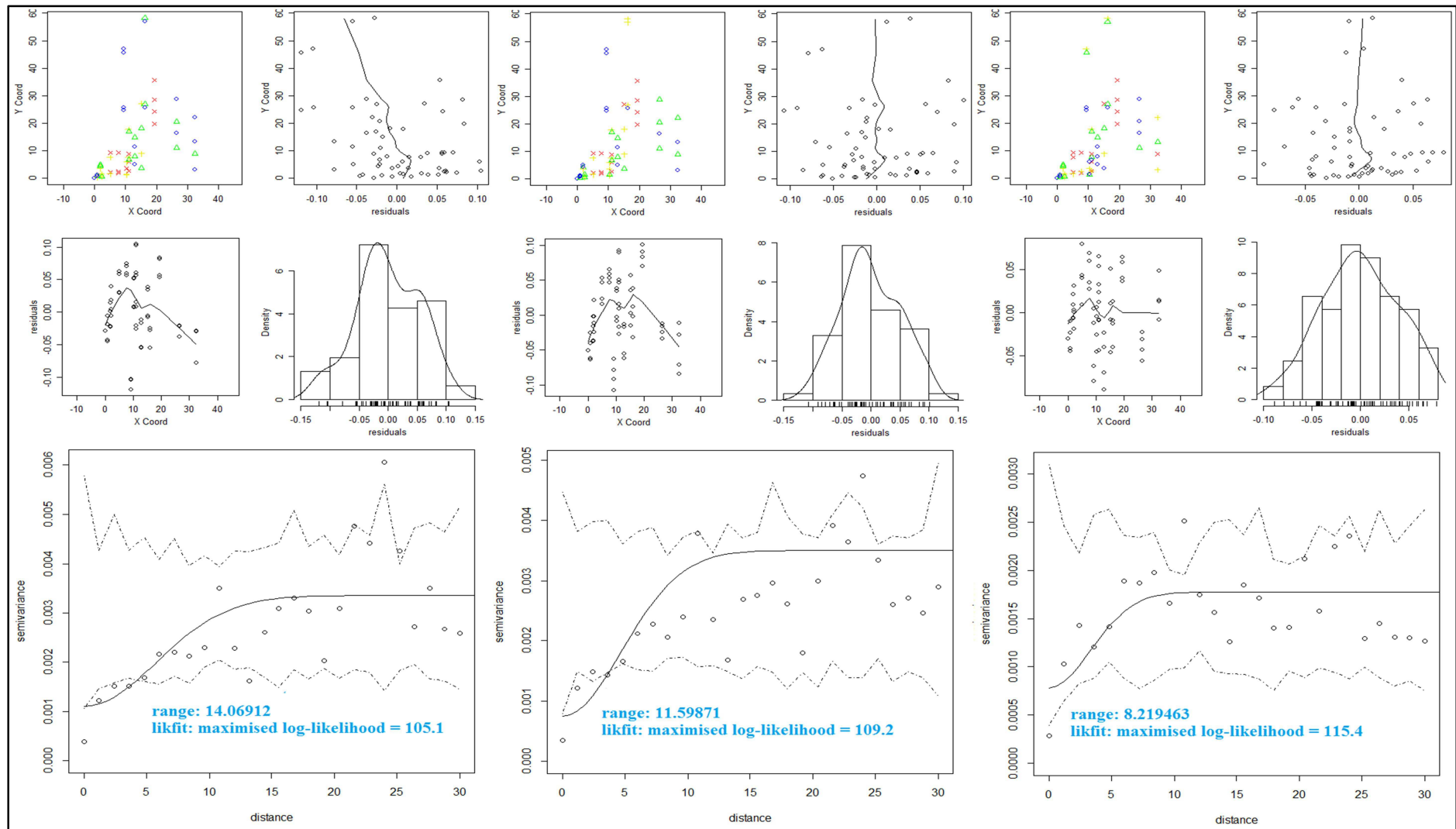


Figure 4-10 : Statistique exploratoire spatiale et amélioration du variogramme expérimental pour le paramètre X2.

(De gauche à droite : hypothèse d'une moyenne constante ; variation de la moyenne linéairement suivant les coordonnées, et le paramètre X1 comme un covariant ; variation de la moyenne comme une fonction du second degré suivant la structure spatiale, et le paramètre X1 comme un covariant. Les enveloppes de simulation, obtenues à travers 99 permutations spatiales des positions des variables, se rétrécissent. Les modèles théoriques ajustés sont des Gaussiens).

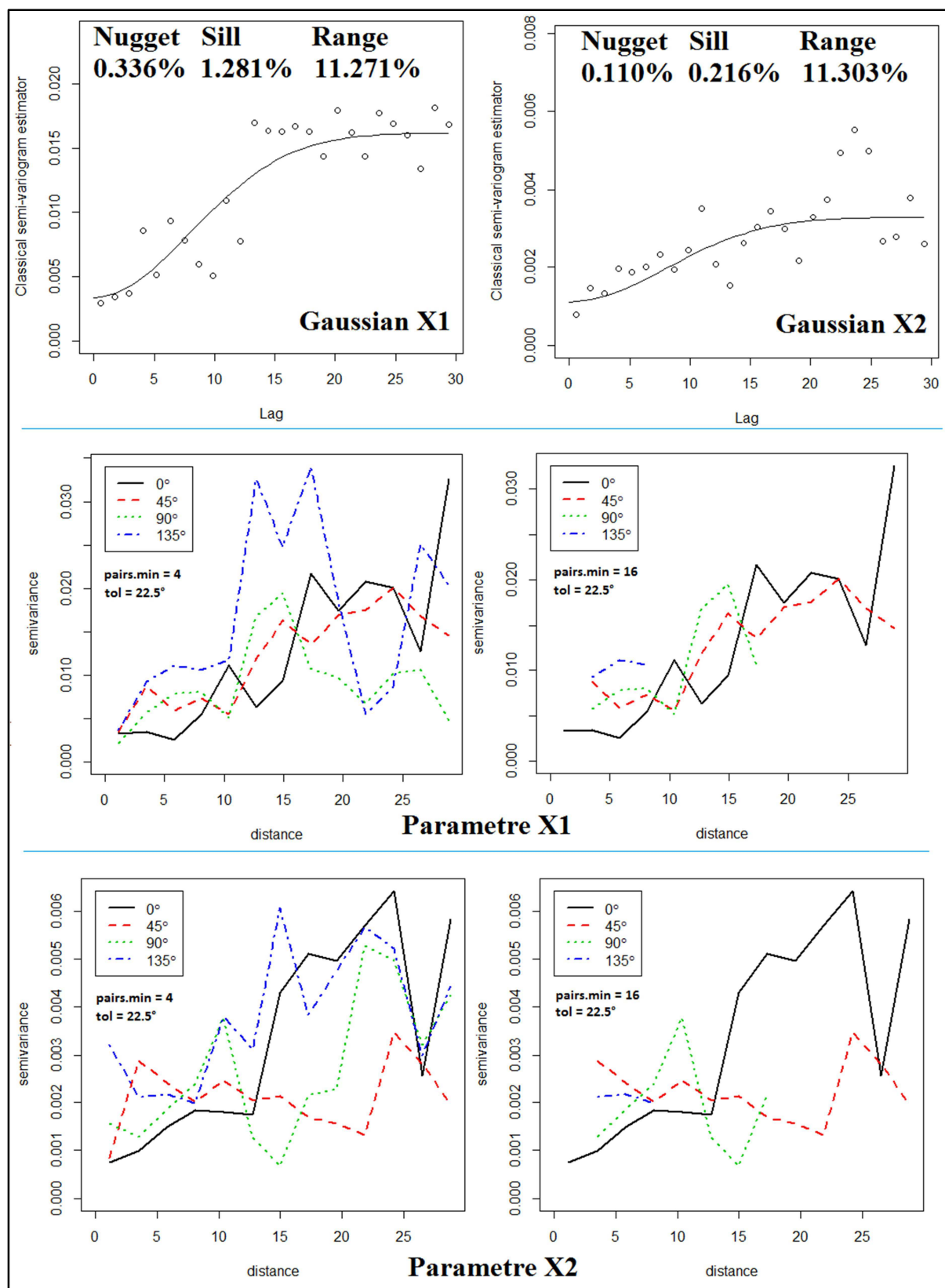


Figure 4-11 : Variogrammes omnidirectionnels et directionnels des paramètres de modèles hydrologiques.

4.3.1.3 Estimation et Simulation géostatistique des paramètres de modèles hydrologiques

Estimation en des nœuds de la grille de krigeage et Simulation

Les simulations des paramètres X1 et X2 de modèles hydrologiques, dans l'espace « **Nash-Whc** » des **Figures 4-2 et 4-4**, sont faites sur la base des modèles de variogramme omnidirectionnel de la **Figure 4-11** (ci-dessus). Les caractéristiques de ces variogrammes sont résumées dans le **Tableau 4-4**, et les résultats de ces simulations sont sur les **Figures 4-12 et 4-13** ci-dessous (et également sur les **Figures 4-15 et 4-16**).

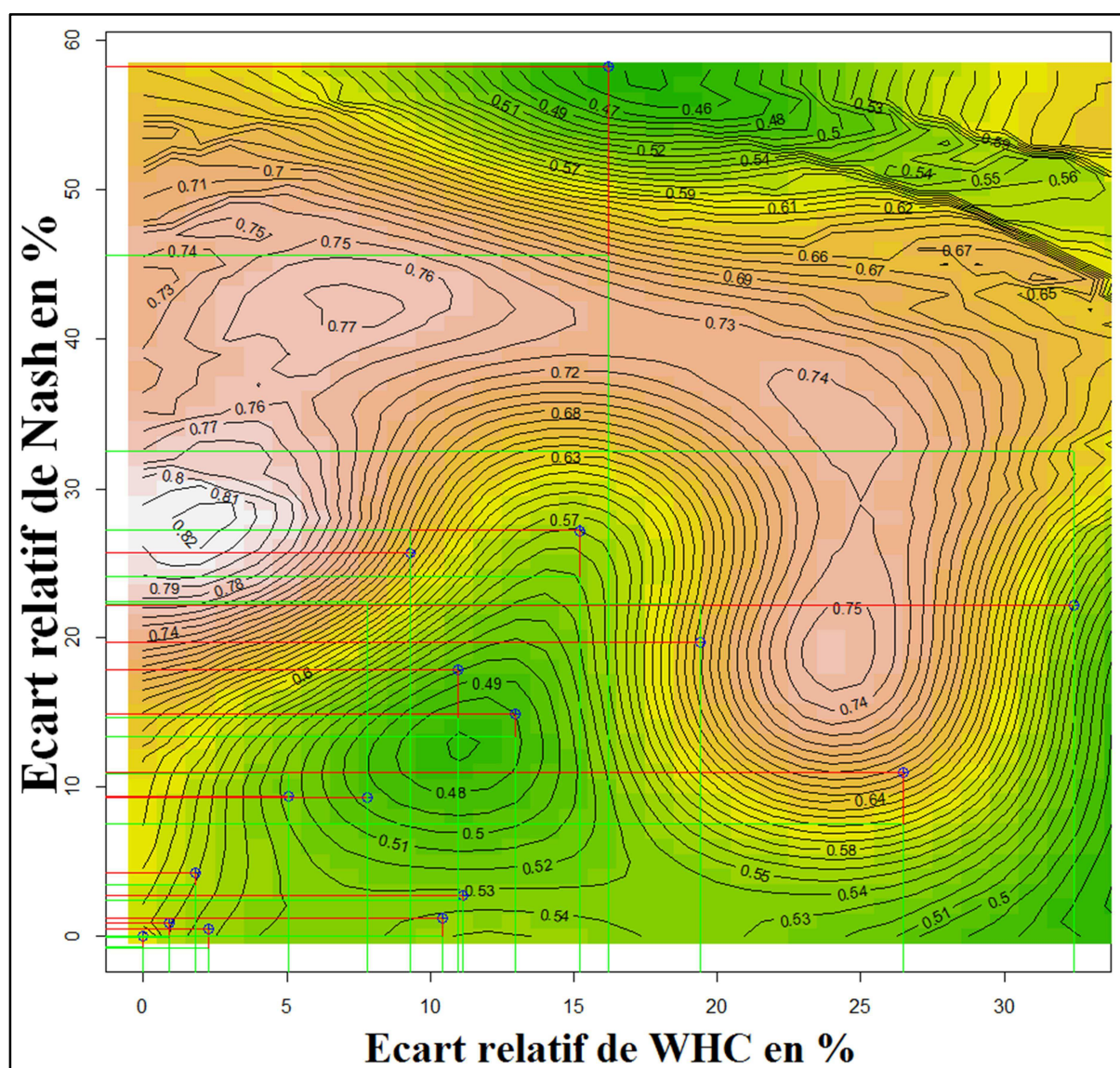


Figure 4-12 : Résultats de simulation par krigeage du paramètre X1 des modèles GR2M et SimulHyd.

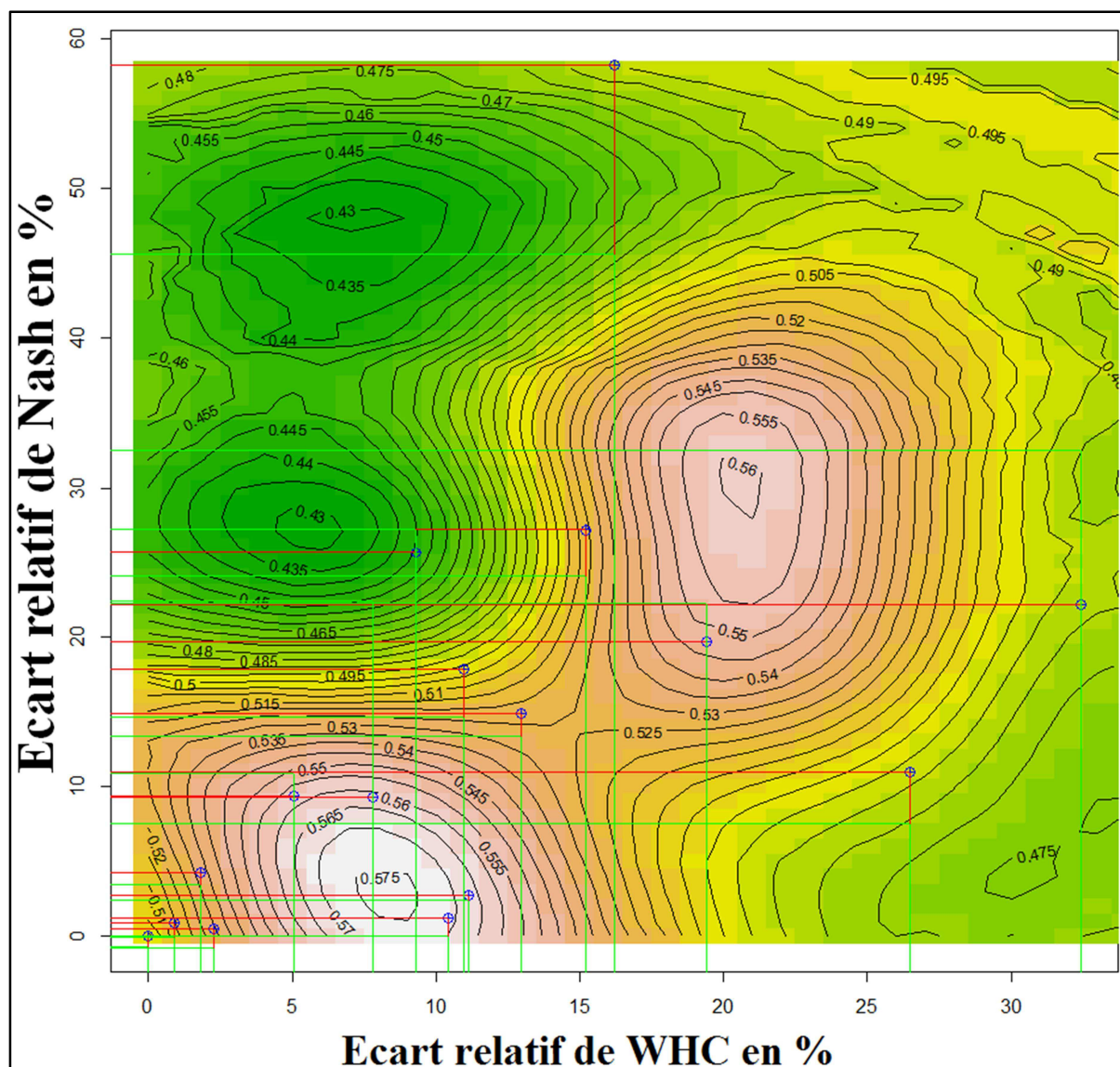


Figure 4-13 : Résultats de simulation par krigeage du paramètre X2 des modèles GR2M et SimulHyd.

Estimation en des points de krigeage

L'estimation des paramètres des versions des modèles à deux paramètres est illustrée sur les **Figures 4-14, 4-15 et 4-16** (ci-après) ; et ceci, à travers le modèle SimulHyd semi-distribuée. Partant de deux informations, (**1/** la performance d'un modèle sur un bassin versant utilisant le jeu de paramètres de la station de Koulikoro et, **2/** la différence relative de WHC moyen entre ce bassin versant et celui du bassin défini à la station de Koulikoro), la valeur des paramètres X1, et X2, pourra être déterminée pour n'importe quel point de l'espace « Nash-WHC ». La **Figures 4-14** illustre l'obtention de la composante Y (l'ordonnée) de l'espace « Nash-WHC », partant de la première information susmentionnées. La composante X (l'ordonnée) de l'espace « Nash-WHC » constitue la seconde information susmentionnée, à savoir la différence relative de WHC moyen entre le sous-bassin (dont le jeu de paramètres

est à estimer) et celui du bassin défini à la station de Koulikoro.

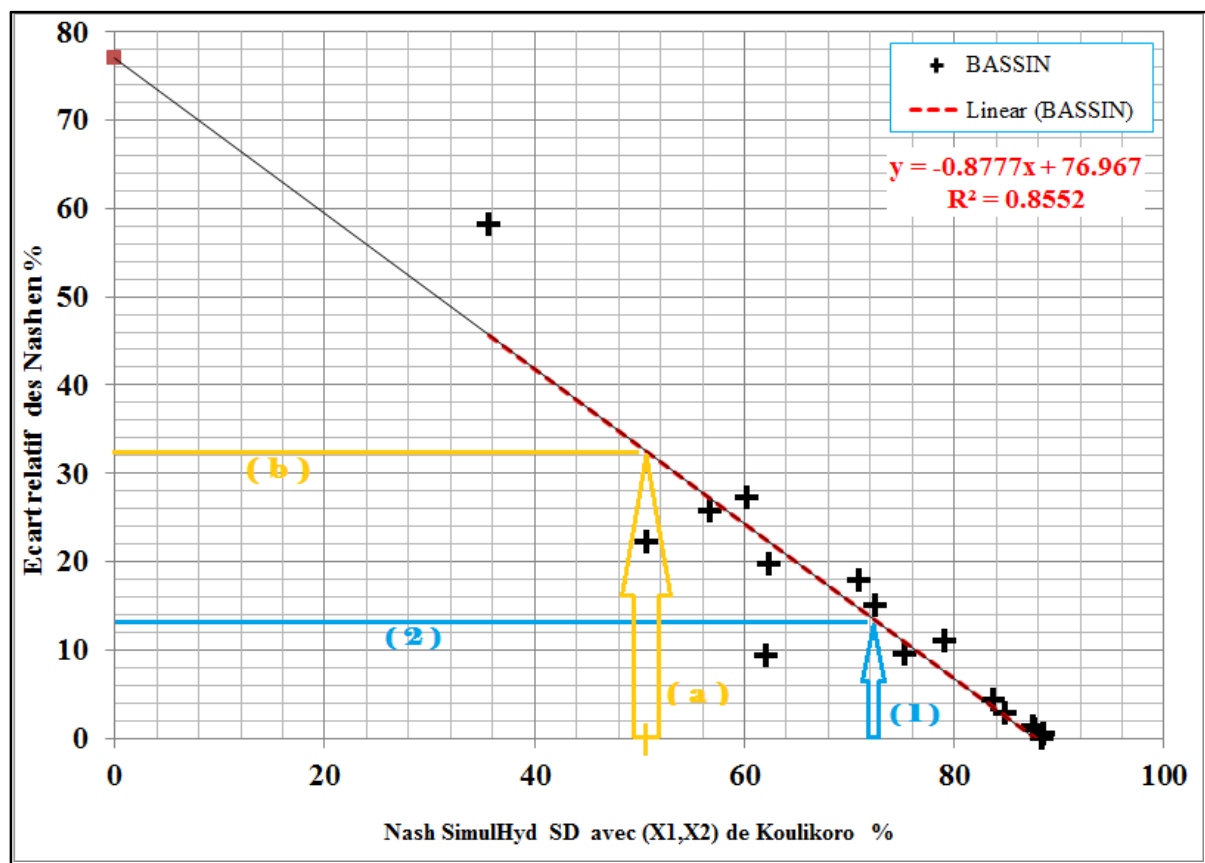


Figure 4-14 : Méthode d'estimation de l'écart relatif des performances d'un modèle.

Les Figures 4-15 et 4-16 (ci-après) finalisent les étapes d'estimation de jeux de paramètres des modèles hydrologiques. Sur cette figure, la tendance spatiale des points-bassins (une fonction polynomiale du troisième degré : $y = -0.0035x^3 + 0.1021x^2 + 0.6362x$) est seulement superposée aux résultats d'erreurs d'estimation par krigeage (cartes de droite) et non à ceux du krigeage (cartes de gauche) ; l'identification des points-bassins est possible en s'aidant de la description de la Figure 4-2. Tandis que, les Figures 4-17, 4-18 et 4-19, similairement à la Figure 4-14 ci-dessus, présentent les équations d'estimations de l'écart relatif des performances de six versions de modèle et celles de leurs combinaisons.

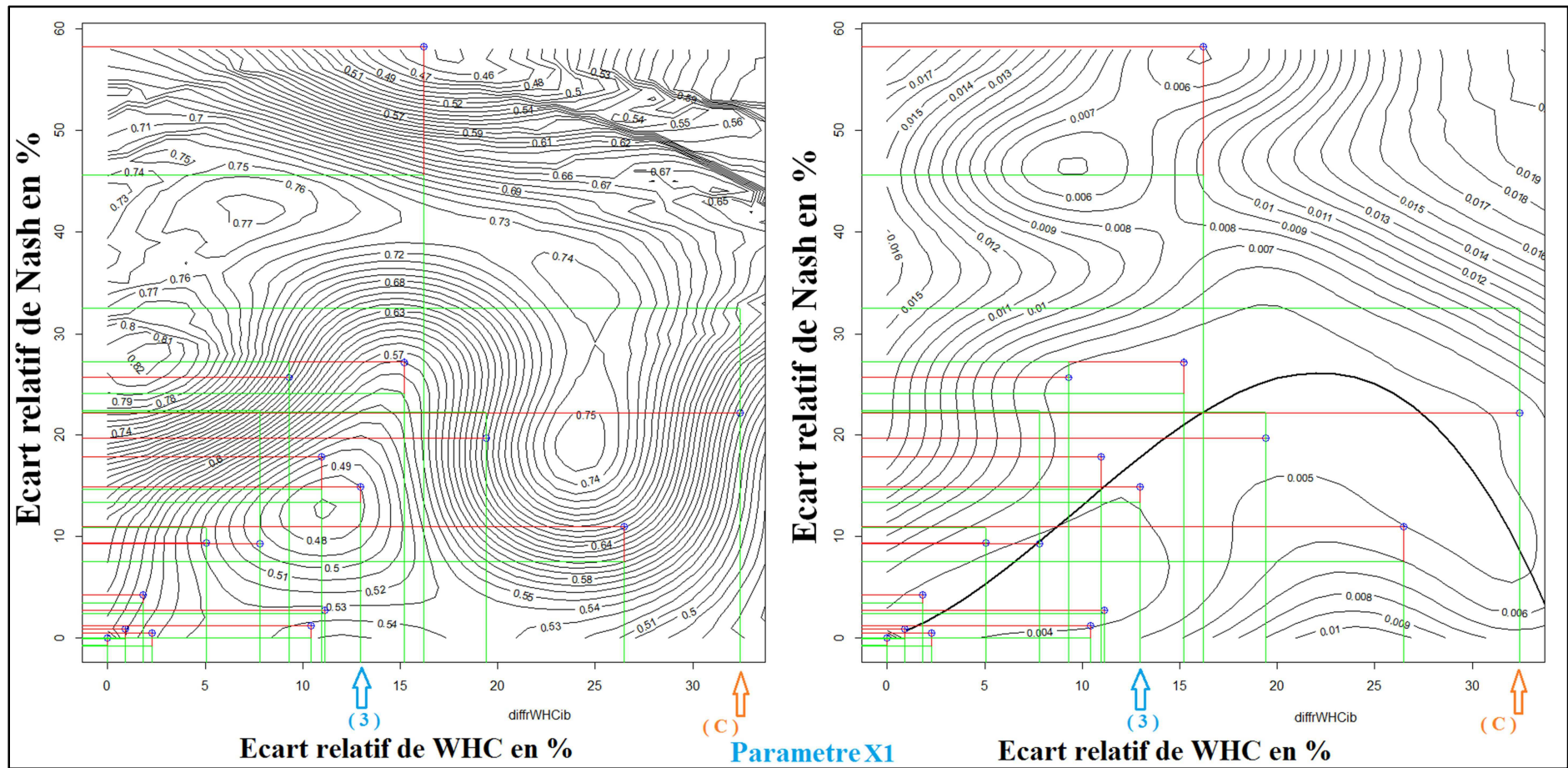


Figure 4-15 : Estimation et Simulation du paramètre X1 par krigeage.

(À gauche : la carte de krigeage du paramètre X1 ; à droite : la carte d'erreur de krigeage de ce paramètre)

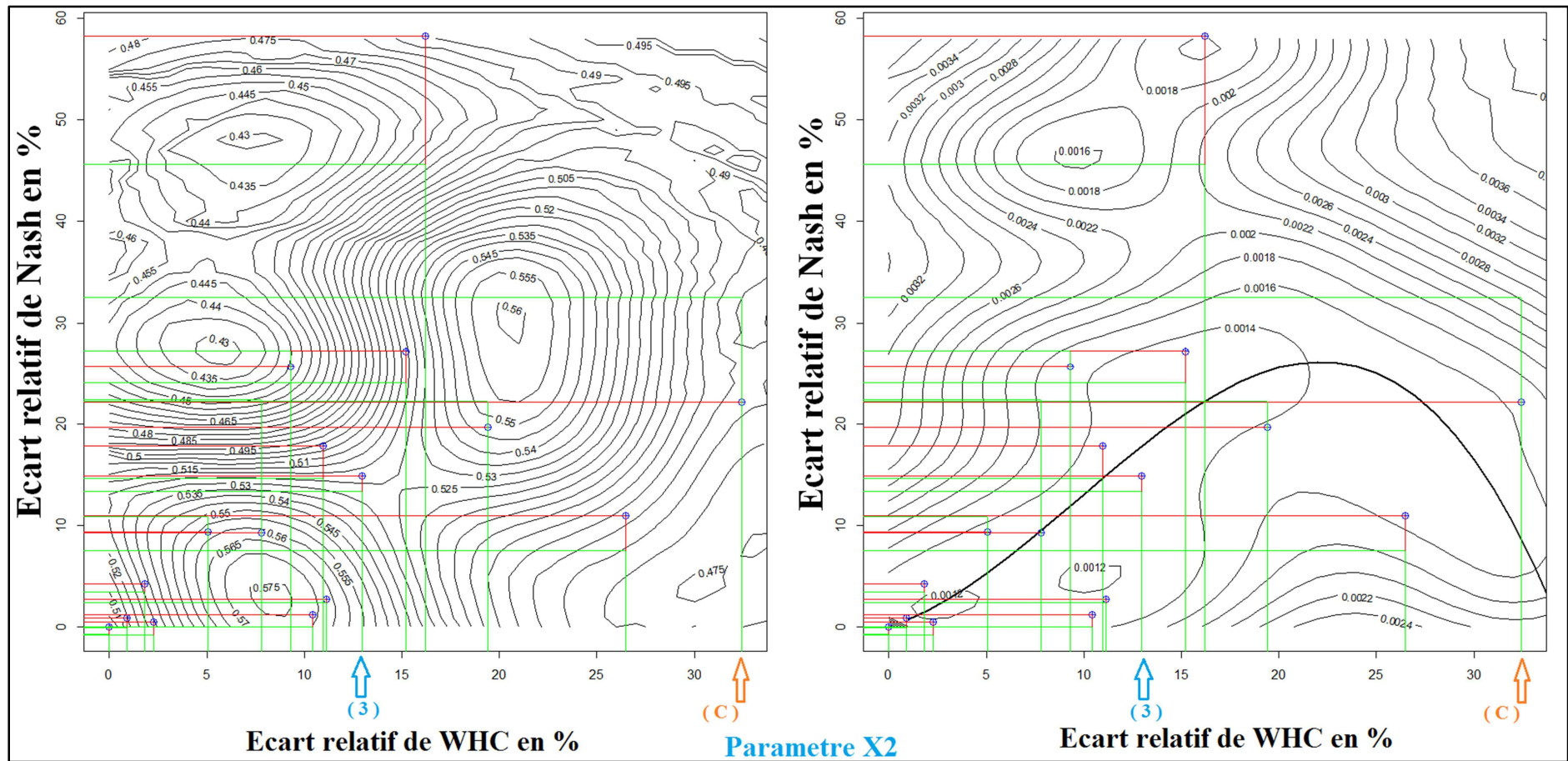


Figure 4-16 : Estimation et Simulation du paramètre X2 par krigeage.

(À gauche : la carte de krigeage du paramètre X2 ; à droite : la carte d'erreur de krigeage de ce paramètre)

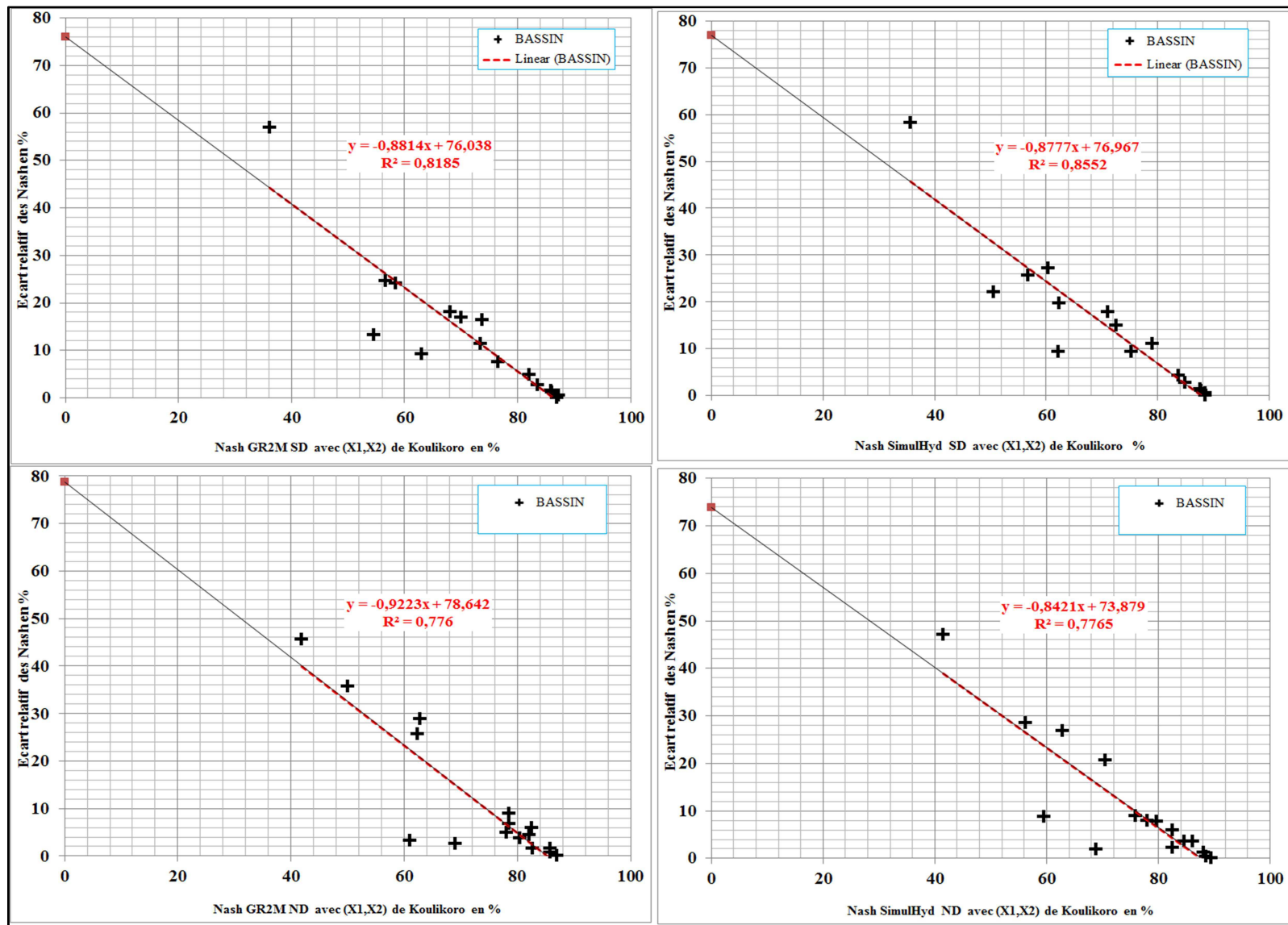


Figure 4-17 : Estimation de l'écart relatif des performances des quatre versions de modèle hydrologique utilisées pour le krigeage des paramètres X1 et X2.

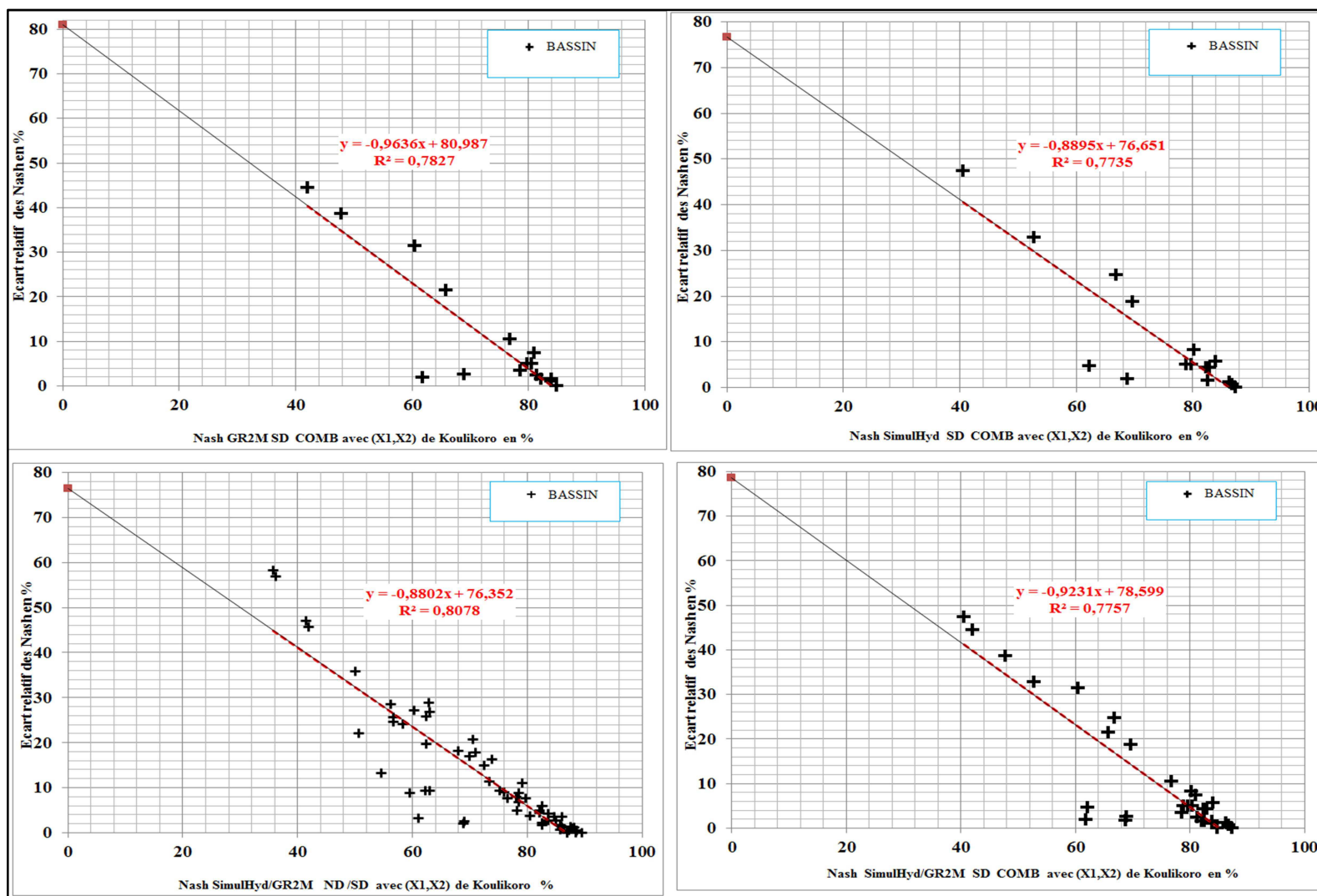


Figure 4-18 : Estimation de l'écart relatif des performances de deux versions de modèle hydrologique utilisées lors de la validation croisée.
 (Les deux graphes d'en haut concernent les versions semi-distribuées des modèles sans pondération sur WHC ; le graphe d'en bas à droite présente la combinaison de ces deux versions de modèles précitées et utilisées lors de la validation croisée; enfin le graphe d'en bas à gauche présente la combinaison des quatre versions de modèles utilisées pour le krigeage des paramètres X1 et X2.

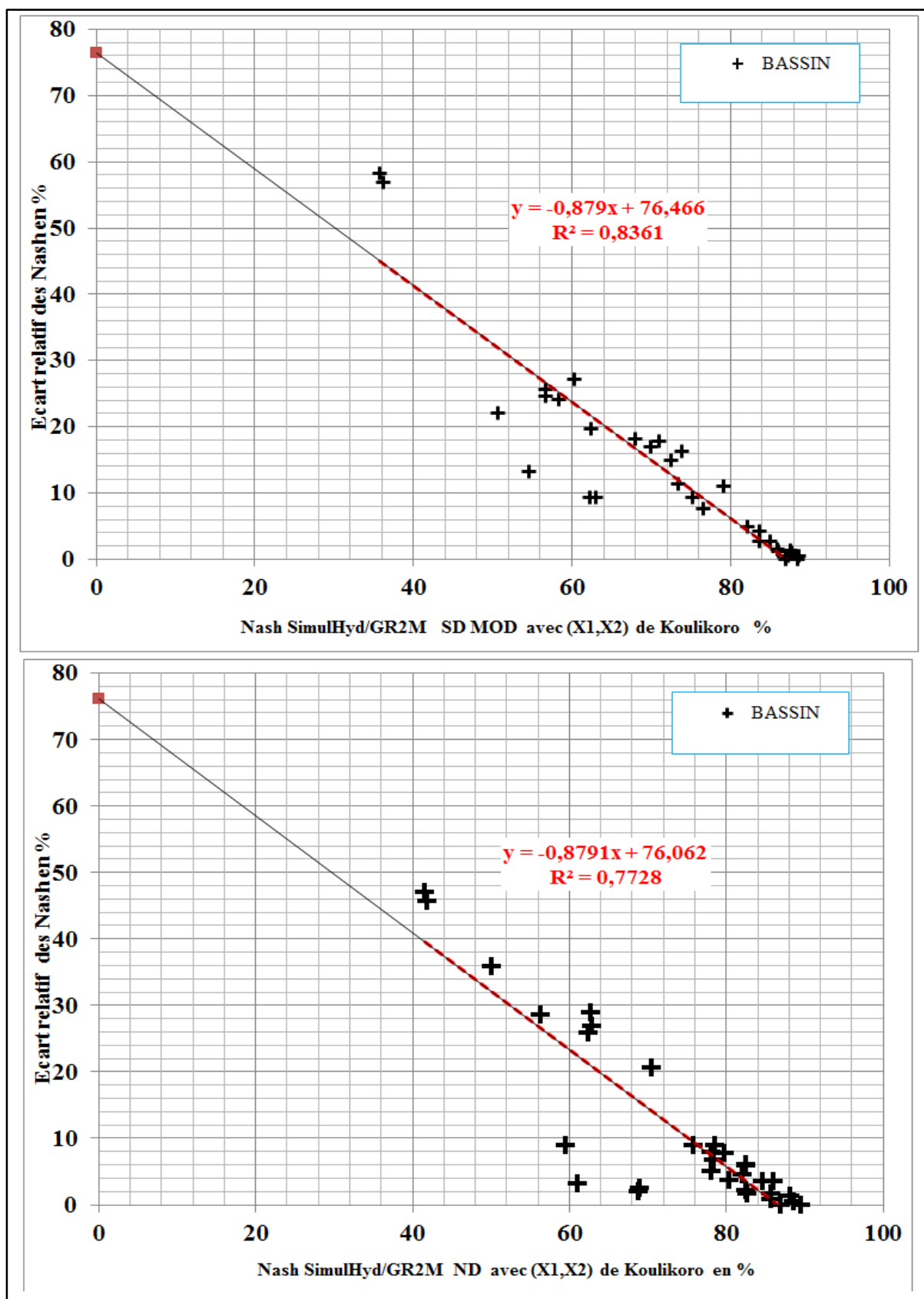


Figure 4-19 : Estimation de l'écart relatif des performances des versions combinées de modèle hydrologique.

(Le graphe d'en haut concerne la combinaison des versions semi-distribuées avec pondération sur WHC des modèles GR2M et SimulHyd; et la combinaison des versions non-distribuées de ces deux modèles est sur le graphe d'en bas).

4.3.2 Résultats et validation de la méthodologie « hydro-géostatistique »

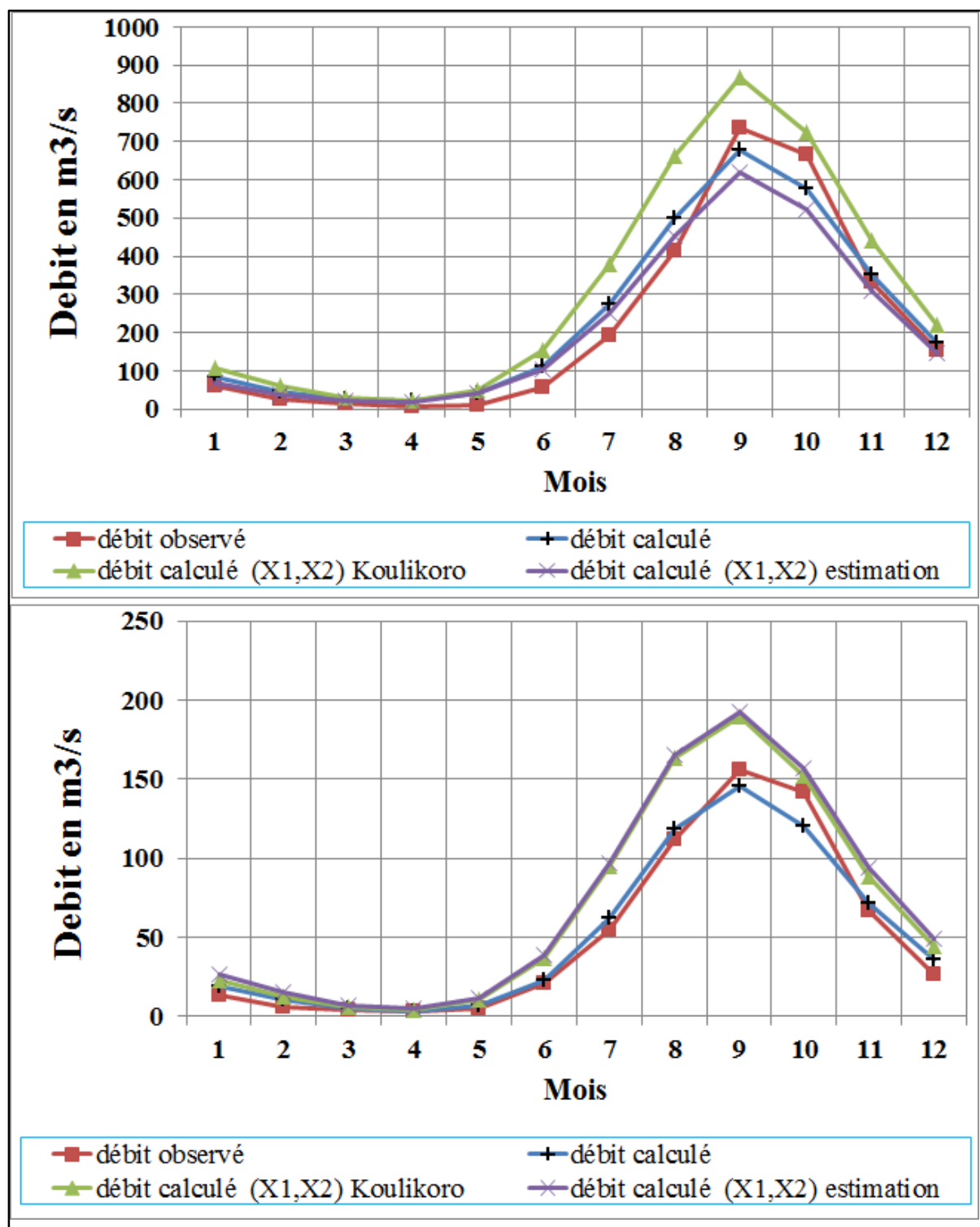


Figure 4-20 : Saisonnalité des débits observés et simulés, à la station de Kouroussa (en haut : sur 1950-1995) et à celle de Faranah (en bas : sur 1969-1995).

Sur la **Figure 4-20** ci-dessus sont comparées les débits observés, ceux simulés lors de la calibration du modèle SimulHyd semi-distribuée, ceux simulés lors de l'injection des paramètres (X1, X2) de la station de Koulikoro, et enfin ceux simulés avec les paramètres

(X1, X2) estimés à travers la méthodologie « hydro-géostatistique ». Nous constatons que pour la station de Kouroussa (en haut) le résultat de simulation avec le jeu de paramètres estimé est plus proche de celui obtenu lors du calage du modèle (débit calculé), alors que ceci n'est pas le cas pour la station de Faranah (en bas).

Le **Tableau 4-5** ci-dessous résume les couples de paramètres utilisés pour l'obtention des simulations dont les légendes sont à droite sur la **Figure 4-20** : débits simulé lors de la calibration du modèle SimulHyd semi-distribué, et débits simulés avec injection du couple de paramètres estimés à travers la méthodologie « hydro-géostatistique ». En plus de ces paramètres du modèle SimulHyd semi-distribué, les valeurs du critère de Nash obtenues lors de ces simulations (en phase de validation) sont également exposées. À la station de Kouroussa, l'écart relatif absolu, du passage de la simulation (lors de la phase de calibration) à celle de la méthodologie « hydro-géostatistique », est respectivement 6.63% pour X1, 4.52% pour X2, et 1.64% pour le critère de Nash. Quant à la station de Faranah ces valeurs sont 24.25% pour X1, 4.02% pour X2, et 25.98% pour le critère de Nash. Ces valeur de Nash suggèrent une légère baisse de performance du modèles SimulHyd semi-distribué à la station de Kouroussa (1.64%), alors que cette baisse est relativement drastique à la station de Faranah (25.98%).

Tableau 4-5 : Performance en calibration versus Estimation « hydro-géostatistique » des paramètres.

Stations	Calibration			Estimation « hydro-géostatistique »		
	X1	X2	Nash	X1	X2	Nash
Kouroussa	0.513	0.509	85.21	0.479	0.532	83.81
Faranah	0.499	0.497	65.05	0.62	0.477	48.15

Sur la **Figure 4-21** ci-après est présenté le résultat de la validation croisée de la simulation géostatistique. Les paramètres (X1, X2) des versions semi-distribuées, sans coefficient de pondération sur WHC des modèles GR2M et SimulHyd, sont utilisés pour comparer les valeurs estimées et celles produites lors de la calibration de ces versions de modèle (qui n'ont pas servi lors de la production de la carte de simulation par krigeage). Par rapport aux valeurs « observées », le nombre de classe des valeurs du paramètre X1 (idem pour le paramètre X2) diminue induisant l'augmentation de la taille des classes médianes, lors de l'estimation des paramètres ; et cette désorganisation de la distribution est plus marquée pour le paramètre X2 que pour X1.

L'une des spécificités de la méthodologie « hydro-géostatistique » est de procéder à l'interpolation des paramètres de modèles hydrologiques dans l'espace *Nash-WHC*, et ceci, à

travers le krigeage géostatistique. La **Figure 4-22** (page 101), confronte une interpolation « déterministe » de ces paramètres (les histogrammes à droite) à celle par krigeage qui est plutôt « probabiliste » (les histogrammes à gauche). Ces estimations « déterministes » des paramètres dans l'espace *Nash-WHC*, sont faites suivant une méthode des triangles ou un point est estimée linéairement à partir de trois échantillons qui forment un triangle autour de ce point (le package R utilisé est *akima* avec la fonction *interpp*).

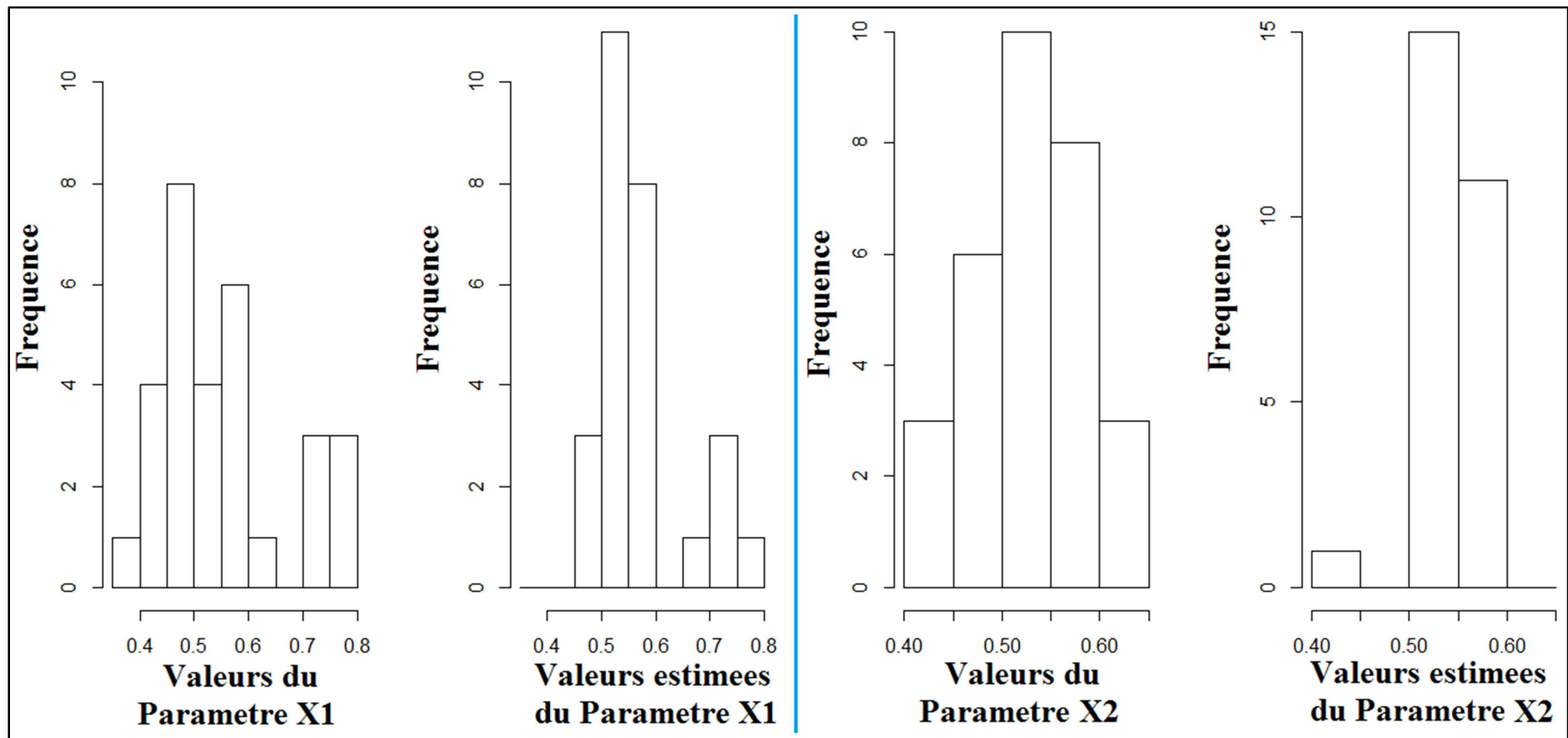


Figure 4-21 : Validations croisées dans l'espace « NASH-WHC ».

(Les histogrammes à gauche représentent la distribution des paramètres calibrés ; et ceux de droite, celle des paramètres issus de l'estimation «hydro-géostatistique»).

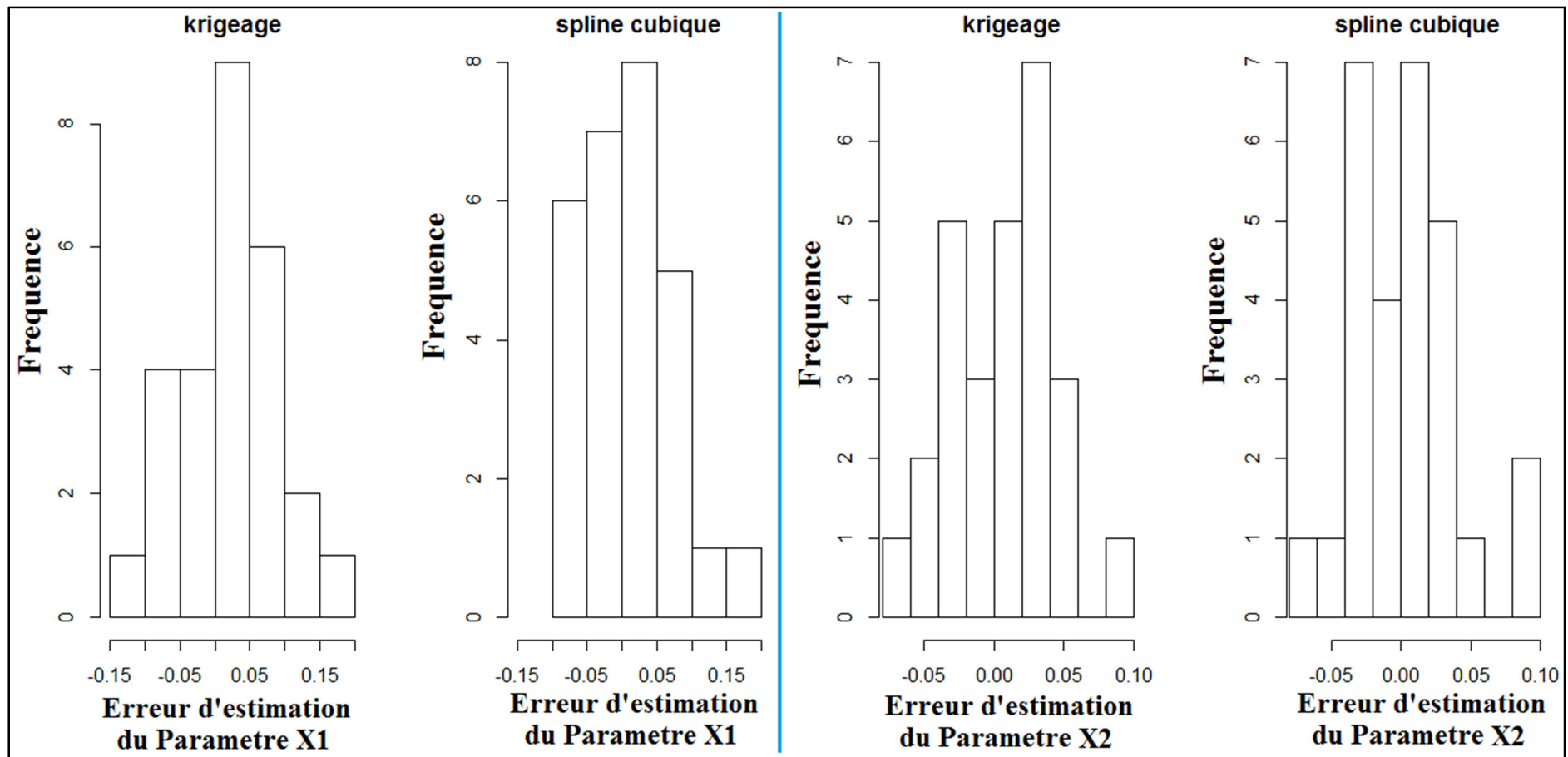


Figure 4-22 : Erreurs d'estimation comparées, à l'issue des validations croisées.

(Les histogrammes à gauche représentent la distribution des erreurs d'estimation des paramètres suivant le krigeage ; et ceux de droite, celle suivant la méthode « déterministe » des triangles dans l'espace Nash-WHC).

4.3.3 Synthèse sur la méthodologie « hydro-géostatistique »

L'Erreur Quadratique Moyenne (EQM) issue des validations croisées est :

- ✓ Pour l'interpolation du paramètre X1 suivant le krigeage : $EQM = 0.0732$;
- ✓ Le paramètre X1 suivant la méthode des triangles : $EQM = 0.0658$;
- ✓ Pour l'interpolation du paramètre X2 suivant le krigeage : $EQM = 0.0379$;
- ✓ Le paramètre X2 suivant la méthode des triangles : $EQM = 0.0387$.

On remarque, partant des **Figures 4-21 et 4-22**, et des valeurs d'EQM susmentionnées, que :

- lors du krigeage, le mode (ou la valeur la plus répétée) est mieux conservé pour le paramètre X2 que pour le paramètre X1 ; aussi une réorganisation de la distribution des valeurs de chacun des deux paramètres est constatée (**Figures 4-21**) ;
- la distribution des erreurs d'estimation est plus large pour le paramètre X1 [-0.15 ; 0.15] que pour le paramètre X2 [-0.075 ; 0.10] ; ceci est illustrée sur la **Figures 4-22** ;
- l'Erreur Quadratique Moyenne, issue des validations croisées, pour chacune des deux méthodes d'interpolation (krigeage et méthode des triangles), est relativement faible pour le paramètre X2 (~ 0.03) que pour le paramètre X1 (~ 0.07).

L'interpolation par la méthode des triangles, ayant abouti environ aux mêmes résultats que le krigeage, confirme la bonne écriture du code numérique de cette méthode géostatistique et appuie l'affirmation que la simulation du paramètre X2 est meilleur que celle du paramètre X1. Ces observations corroborent les remarques faites, d'une part sur les données de modélisation des **Figures 4-7 et 4-8**, quant à l'hypothèse de normalité, et d'autre part sur celles des **Figures 4-9 et 4-10**, concernant l'hypothèse de stationnarité de la moyenne (des valeurs de chacun des paramètres X1 et X2). Au départ de la modélisation (**Figures 4-7 et 4-8**) les valeurs du paramètre X2 répondaient mieux à ces hypothèses que celles du paramètre X1. Toutefois, les **Figures 4-9 et 4-10** permettent d'apprécier l'impact de la correction due à la prise en compte de l'information de la structure spatiale sur les hypothèses de normalité (à travers les courbes de densité et les histogrammes) et sur ceux de stationnarité (du second ordre) du « phénomène » à travers, au moins, le redressement de la structure spatiale (pour le paramètre X2) et l'amélioration de l'ajustement des variogrammes ; ainsi, une simulation conditionnelle des paramètres, comme perspective d'étude pour la production des cartes de krigeage des paramètres X1 et X2, sera nécessaire pour tenir compte à la fois de la structure spatiale et d'une composante du jeu de paramètres comme un covariant dans l'estimation de l'autre composante paramétrique. Le krigeage *hydro-géostatistique* pourra, dans le contexte d'une modélisation avec WHC évolutive (prise en compte des états de surface), basculer

d'une simulation en deux dimensions (2D) à une simulation en trois dimensions (3D).

4.3.4 Variantes « hydro-géostatistique » utilisant les espaces *Nash/X1/X2-WHC*

La première étape de la méthodologie hydro-géostatistique part de la **Figure 4-14** pour estimer l'écart relatif des Nash à l'aide d'une droite théorique et de la performance d'un modèle en validation sur un sous-bassin versant (utilisant le jeu de paramètre scalé à la station de Koulikoro). La seconde étape de la méthodologie consiste à faire le krigeage de chacun des paramètres du modèle dans l'espace *NASH-WHC* (**Figures 4-15 et 4-16**). Dans une première variante, nous proposons de procéder au krigeage du paramètre **X1** dans l'espace *NASH-WHC*, et lors de la seconde étape, de faire celui du paramètre **X2** dans un espace « *X1-WHC* » ; vis-versa pour la seconde variante (le paramètre **X2** est *krigé* dans l'espace « *NASH-WHC* », alors que le paramètre **X1** l'est dans l'espace « *X2-WHC* »).

4.3.4.1 Variante 1 de la méthodologie « hydro-géostatistique » et résultats d'Application

Dans cette variante nous maintiendrons la **Figure 4-12** comme le résultat de krigeage du paramètre **X1** dans l'espace « *NASH-WHC* », et les **Figures 4-23/24** ci-après présentent respectivement le variogramme et le résultat de krigeage du paramètre **X2** dans l'espace « *X1-WHC* ».

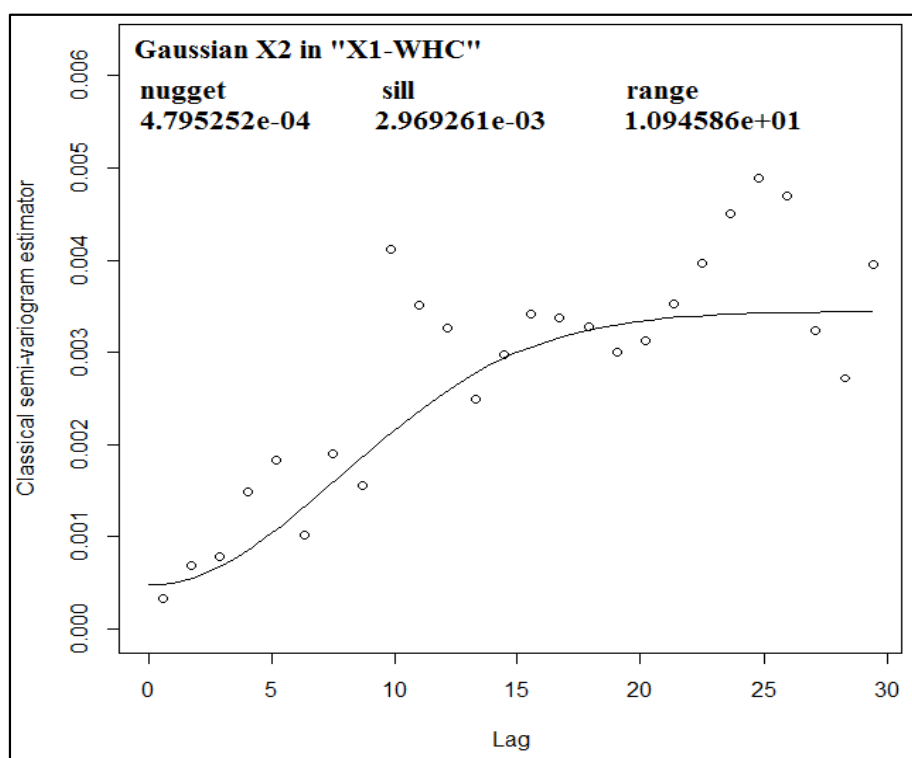


Figure 4-23 : Variogramme omnidirectionnel du paramètre X2 dans l'espace « X1-WHC »

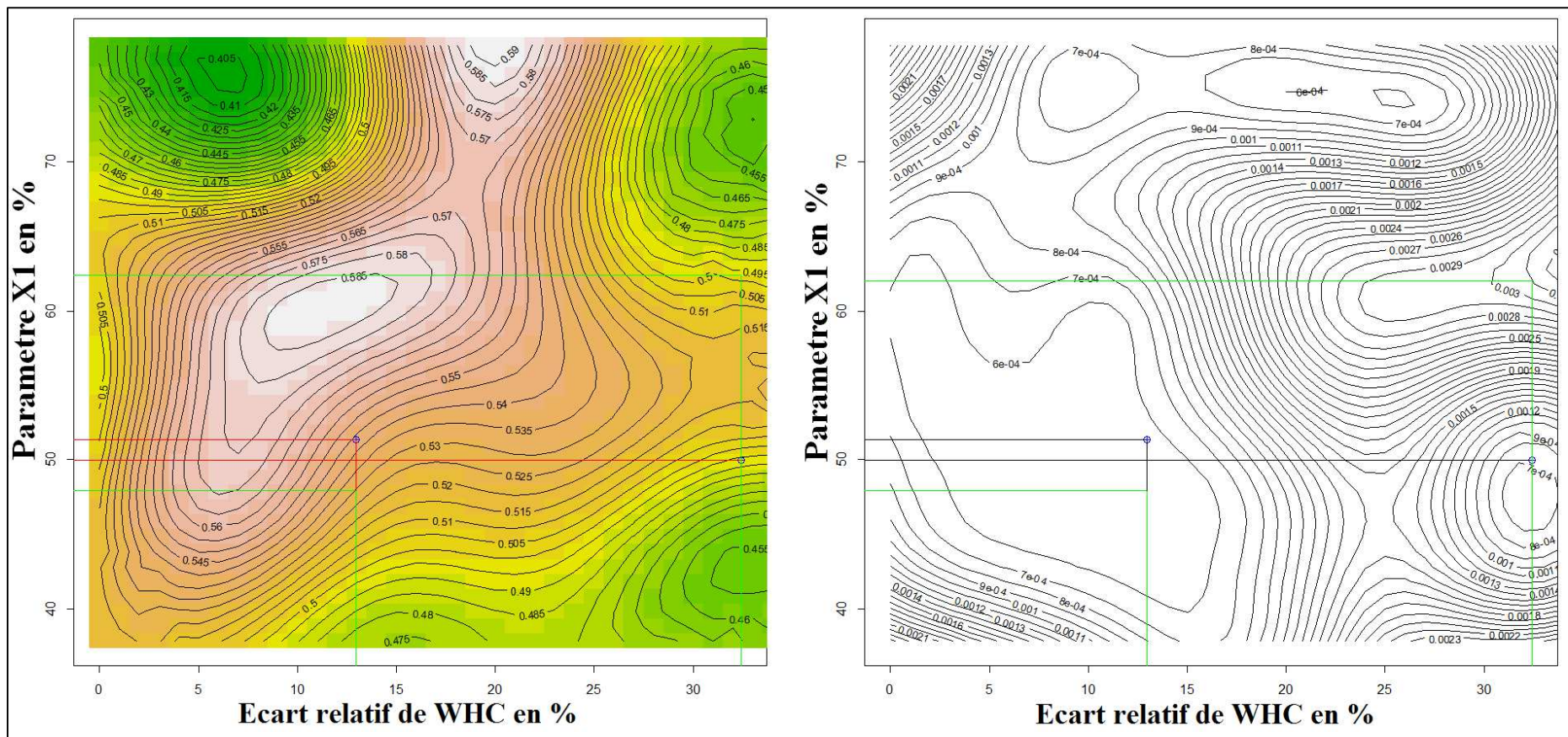


Figure 4-24 : Krigage (à gauche) et erreur de krigage (à droite) du paramètre X2, dans l'espace « X1-WHC »

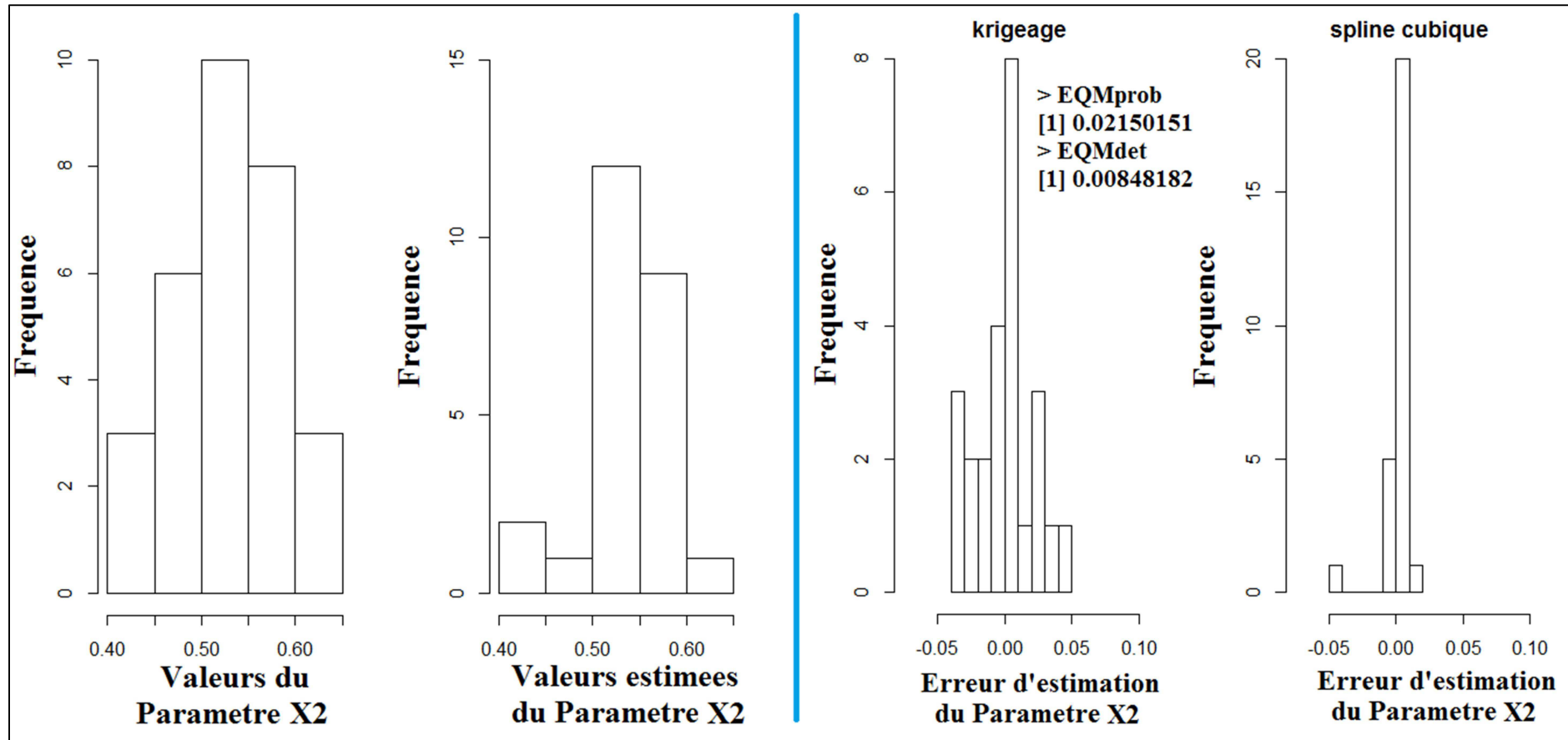


Figure 4-25 : Validations croisées et Erreurs d'estimation comparées, du paramètre X2 dans l'espace « X1-WHC ».

(Bloc de gauche : l'histogramme à gauche représente la distribution du paramètre calibré ; et celui de droite, celle du paramètre issus de la variante 1 de l'estimation «hydro-géostatistique». Bloc de droite: l'histogramme à gauche représente la distribution des erreurs d'estimation du paramètre suivant le krigage ; et celui de droite, celle suivant la méthode « déterministe » des triangles dans l'espace X1-WHC).

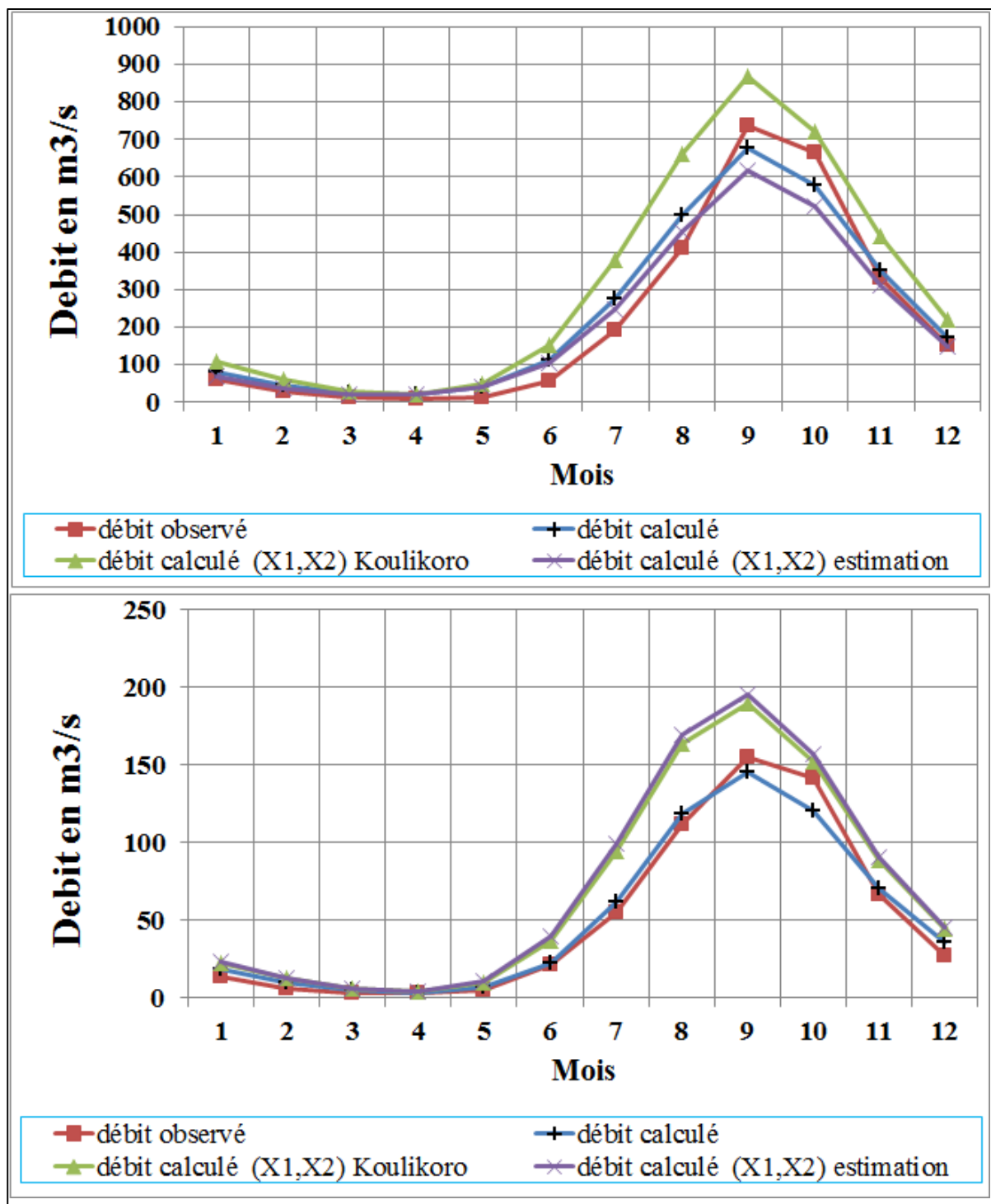


Figure 4-26 : Saisonnalité des débits observés et simulés (Variante 1), à la station de Kouroussa (en haut : sur 1950-1995) et à celle de Faranah (en bas : sur 1969-1995).

La Figure 4-26 ci-dessus et le Tableau 4-6 ci-après prouvent que cette variante 1 n'améliore pas les résultats de la méthodologie hydro-géostatistique. En plus, sur la Figure 4-27 nous constatons que pour cette variante 1, l'Erreur Quadratique Moyen associée au Krigeage (0.02) est plus élevée que celle associée à la Méthode des triangles (0.008).

Tableau 4-6 : Performance en calibration versus Estimation « hydro-géostatistique » variante 1

Stations	Calibration			Estimation « hydro-géostatistique »		
	X1	X2	Nash	X1	X2	Nash
Kouroussa	0.513	0.509	85.21	0.4791	0.5295	83.789
Faranah	0.499	0.497	65.05	0.624	0.4980	46.225

4.3.4.2 Variante 2 de la méthodologie « hydro-géostatistique » et résultats d'Application

Pour cette variante 2 la **Figure 4-13** est maintenue comme le résultat de krigeage du paramètre **X2** dans l'espace *NASH-WHC*, et les **Figures 4-27/28** ci-après présentent le variogramme et le résultat de krigeage du paramètre **X1** dans l'espace « *X2-WHC* ».

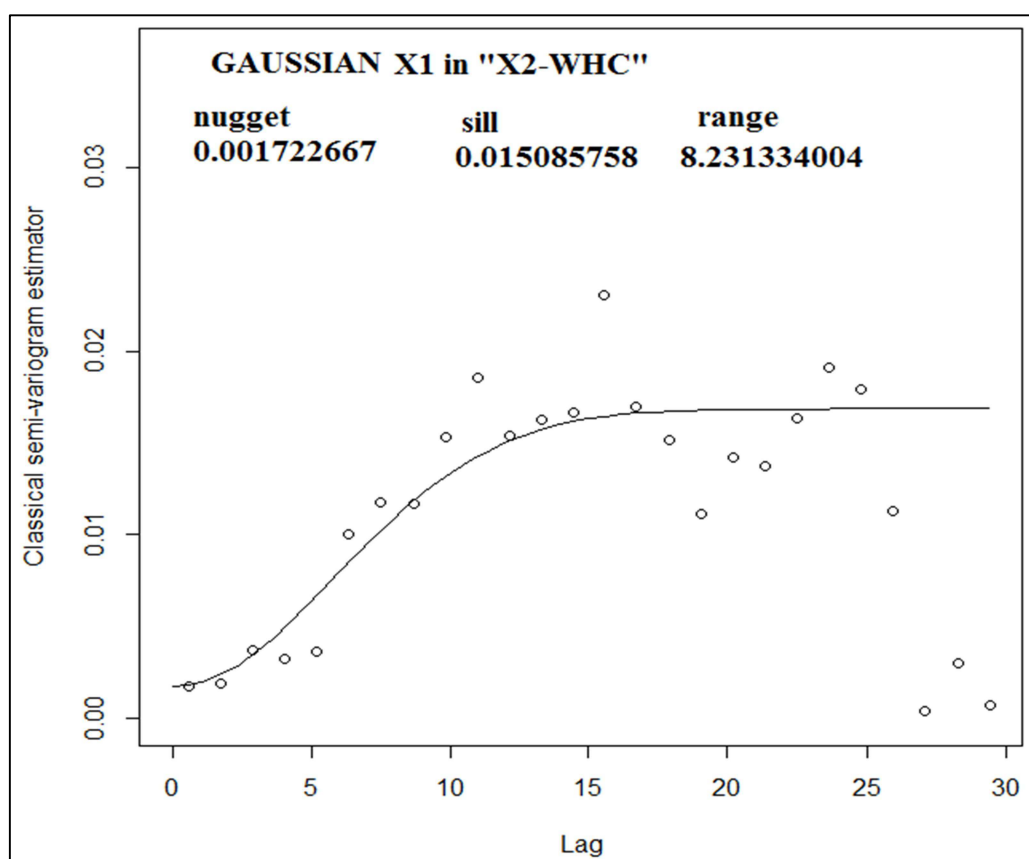


Figure 4-27 : Variogramme omnidirectionnel du paramètre X2 dans l'espace « X1-WHC »

La **Figure 4-30** et le **Tableau 4-7** exposent l'amélioration apportée par la variante 2 de la méthodologie hydro-géostatistique à la modélisation hydrologique. En plus, sur la **Figure 4-29** nous constatons que pour cette variante 2, l'Erreur Quadratique Moyen associée au Krigeage (0.041) est légèrement plus élevée que celle associée à la Méthode des triangles (0.026).

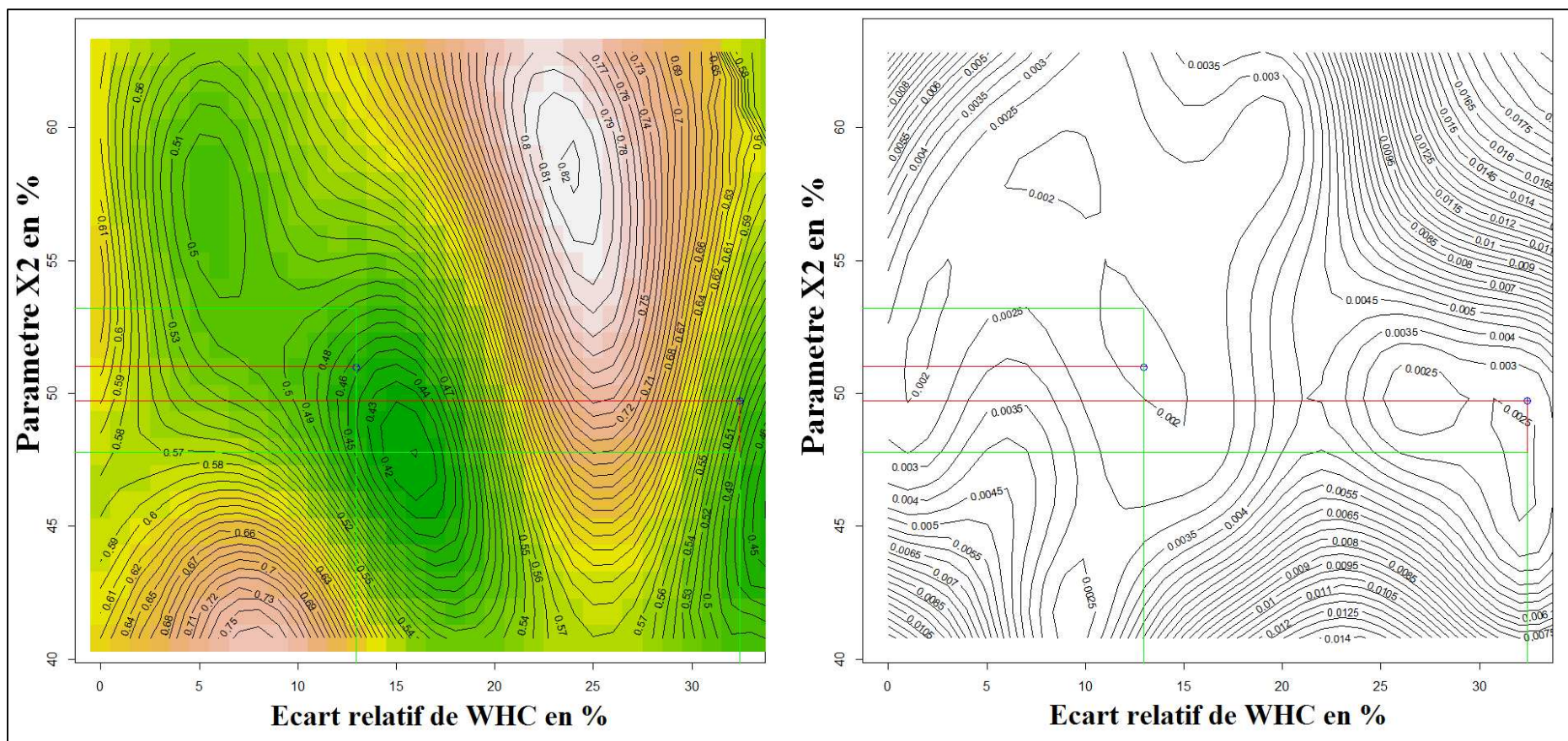


Figure 4-28 : Krigeage (à gauche) et erreur de krigeage (à droite) du paramètre X1, dans l'espace « X2-WHC »

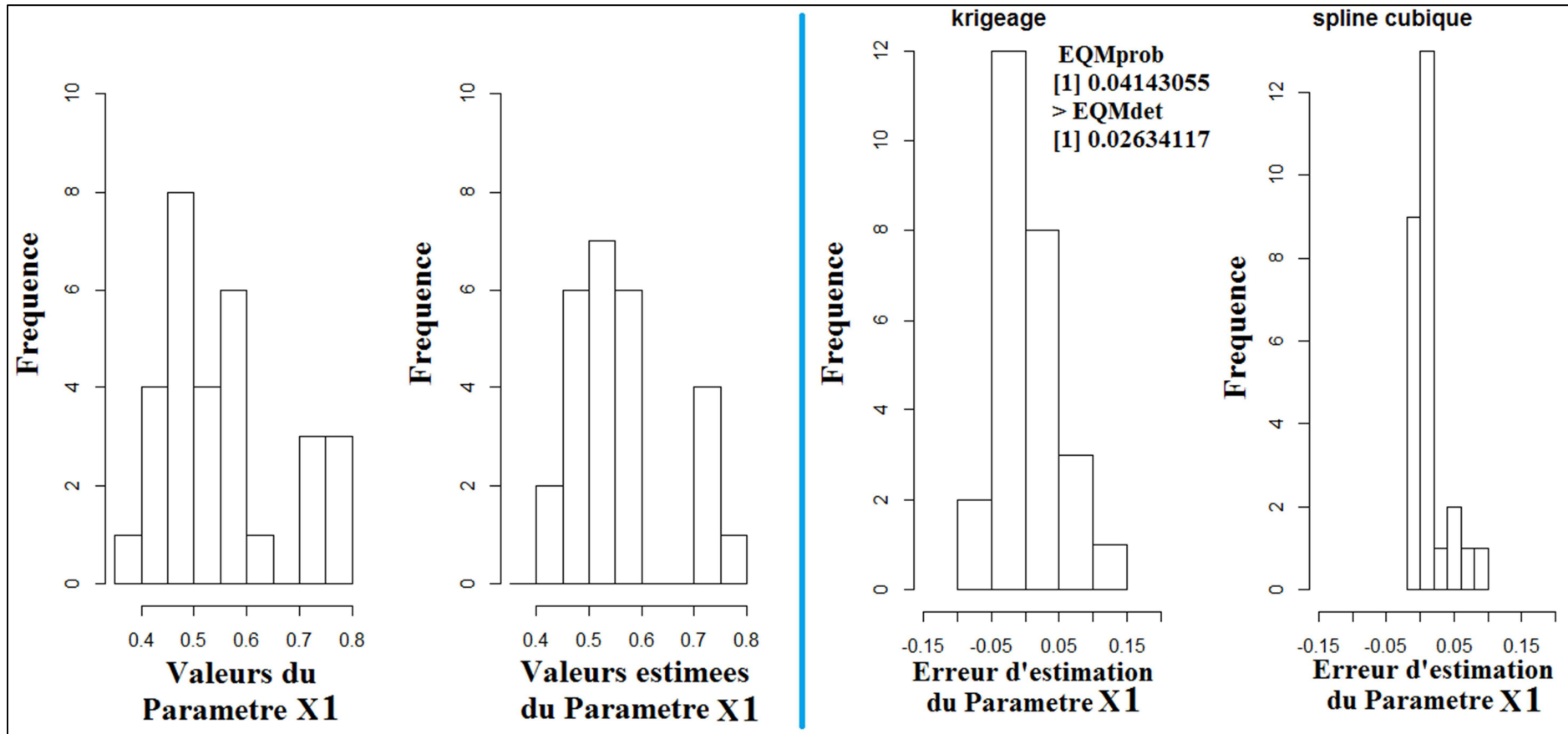


Figure 4-29 : Validations croisées et Erreurs d'estimation comparées, du paramètre X1 dans l'espace « X2-WHC ».

(Bloc de gauche : l'histogramme à gauche représente la distribution du paramètre calibré ; et celui de droite, celle du paramètre issu de la variante 2 de l'estimation «hydro-géostatistique». Bloc de droite: l'histogramme à gauche représente la distribution des erreurs d'estimation du paramètre suivant le krigeage ; et celui de droite, celle suivant la méthode « déterministe » des triangles dans l'espace X2-WHC).

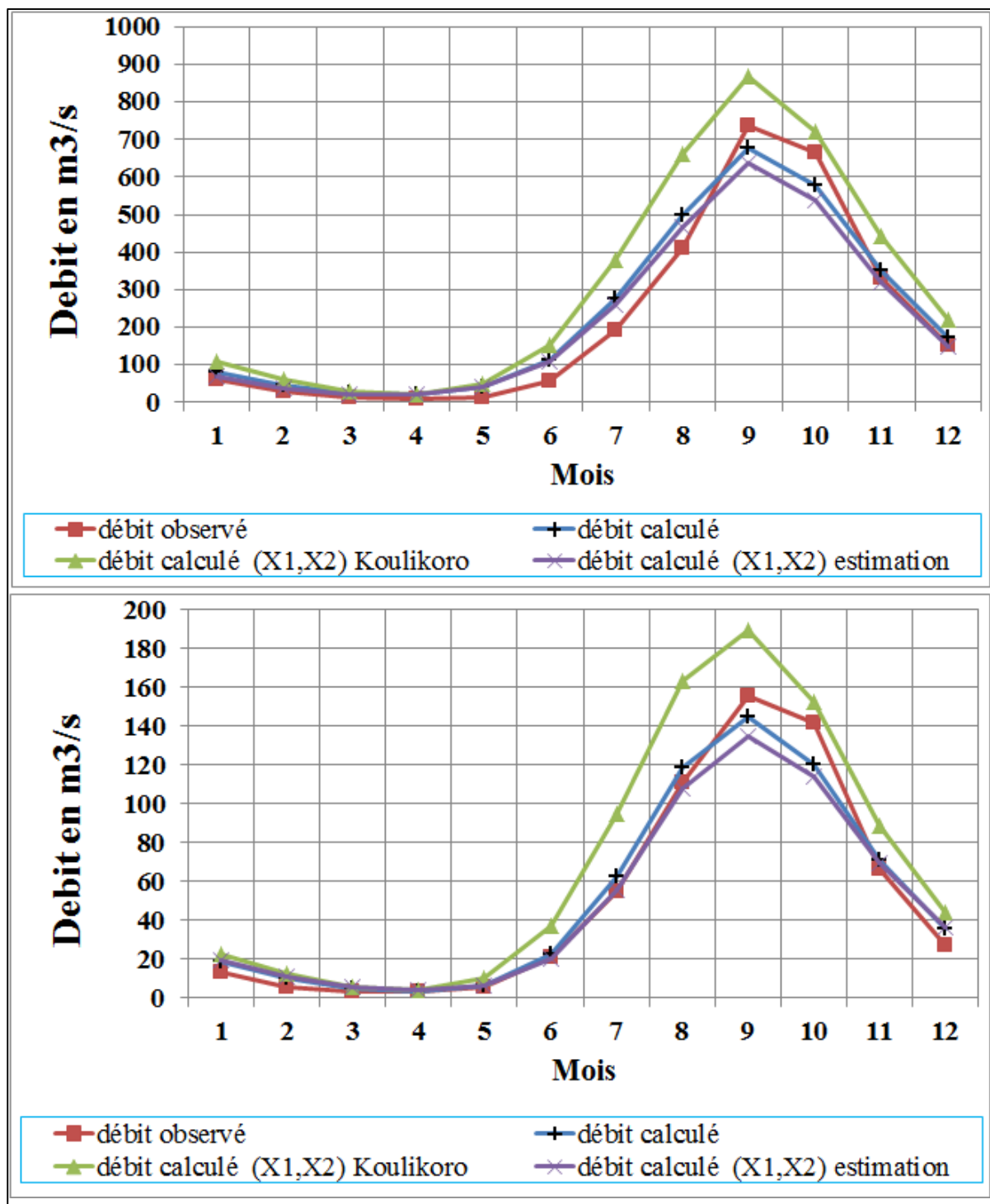


Figure 4-30 : Saisonnalité des débits observés et simulés (Variante 2), à la station de Kouroussa (en haut : sur 1950-1995) et à celle de Faranah (en bas : sur 1969-1995).

Tableau 4-7 : Performance en calibration versus Estimation « hydro-géostatistique » variante 2

Stations	Calibration			Estimation « hydro-géostatistique »		
	X1	X2	Nash	X1	X2	Nash
Kouroussa	0.513	0.509	85.21	0.4875	0.5321	84.441
Faranah	0.499	0.497	65.05	0.4820	0.47738	64.403

4.3.4.3 Variante 3 de la méthodologie « hydro-géostatistique » et résultats d'Application

Les paramètres X2 et X1 estimés successivement dans l'espace « X1-WHC » de la variante 1 et dans l'espace « X2-WHC » de la variante 2, forment le jeu de paramètres (X1, X2) de la variante 3 (**Tableau 4-8** ci-dessous). Les résultats de la simulation de cette variante 3 sont plus proches de ceux de la variante 2 : les modèles GR2M/SimulHyd sont plus sensible à la variation de leur paramètre X1 qu'à celle de leur paramètre X2.

Tableau 4-8 : Performance en calibration versus Estimation « hydro-géostatistique » variante 3

Stations	Calibration			Estimation « hydro-géostatistique »		
	X1	X2	Nash	X1	X2	Nash
Kouroussa	0.513	0.509	85.21	0.4875	0.5295	84.429
Faranah	0.499	0.497	65.05	0.4820	0.4980	64.692

4.4 Formule d'atténuation d'incertitudes, et application

4.4.1 Établissement de la formule d'atténuation d'incertitudes

Dans le mémoire (Koné, 2007) est proposée une formule d'atténuation d'incertitudes qui est applicable à tous les résultats de la modélisation (phase de calibration, validation et simulation des modèles). On part des informations de sorties des versions semi-distribuées et non-distribuée des modèles SimulHyd et GR2M pour affiner ces mêmes informations. En phase de calibration et validation, la fonction diagnostique (Objectif) permet d'apprécier l'amélioration apportée à la modélisation. Les **Encadrés 4-2 et 4-3** détaillent l'établissement de cette formule et sa crédibilité est prouvée au **sous-chapitre 4.4.2**.

Encadré 4-2 : Simplification de la formule d'atténuation d'incertitudes

$$\varepsilon^k = c \cdot \sqrt{\left| \frac{(e_{SD}^k)^2 - (e_{ND}^k)^2}{(m-1)} \right|}; \text{ avec } e_{SD}^k = L_{SD}^k - ref^k, e_{ND}^k = L_{ND}^k - ref^k,$$

$$ref^k = \left(\sqrt{\left(\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot P_i^k \right)^2 + \left(\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot E_i^k \right)^2} - \left(\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot E_i^k \right) \right).$$

En posant $a^k = \left| (L_{SD}^k)^2 - (L_{ND}^k)^2 \right|$ et $b^k = \left| 2 \cdot (L_{SD}^k - L_{ND}^k) \right|$.

on réécrit : $\varepsilon^k = \frac{c}{\sqrt{m-1}} \cdot \left| a^k - ref^k \cdot b^k \right|^{\frac{1}{2}}$, $m \geq 2$.

(1). $\forall k, L_{SD(corrigée)}^k = L_{SD}^k - \varepsilon^k$ et ; $\forall k, L_{ND(corrigée)}^k = L_{ND}^k - \varepsilon^k$.

Les mois où les débits sont sous-estimés par les modèles (périodes de hautes eaux) coïncident très souvent à la situation $L_{SG}^k < L_G^k$. On peut exploiter cette observation suivant deux hypothèses :

(2). Hypothèse faible :

Si $L_{SD}^k < L_{ND}^k$ alors : $L_{SD(corrigée)}^k = L_{SD}^k + \varepsilon^k$ et $L_{ND(corrigée)}^k = L_{ND}^k + \varepsilon^k$;

sinon : $L_{SD(corrigée)}^k = L_{SD}^k - \varepsilon^k$ et $L_{ND(corrigée)}^k = L_{ND}^k - \varepsilon^k$.

(3). Hypothèse forte :

Si $L_{SD}^k < L_{ND}^k$ alors : $L_{SD(corrigée)}^k = L_{SD}^k + \left(\varepsilon^k + \left| L_{SD}^k - L_{ND}^k \right| \right)$ et $L_{ND(corrigée)}^k = L_{ND}^k + \left(\varepsilon^k + \left| L_{SD}^k - L_{ND}^k \right| \right)$;

sinon : $L_{SD(corrigée)}^k = L_{SD}^k - \left(\varepsilon^k + \left| L_{SD}^k - L_{ND}^k \right| \right)$ et $L_{ND(corrigée)}^k = L_{ND}^k - \left(\varepsilon^k + \left| L_{SD}^k - L_{ND}^k \right| \right)$.

Encadré 4-3 : Formule d'atténuation d'incertitudes (Koné, 2007)

Hypothèse de base : à tout protocole de simulation est associé une incertitude θ .

Soit ϕ^k une composante de θ , au $k^{\text{ième}}$ pas de temps de simulation. Soit $(e_{SD}^k)^2$ l'écart quadratique entre la lame d'eau simulée L_{ND}^k en modélisation semi-globale et une grandeur réf^k pris comme "référence"; $(e_{ND}^k)^2$ en est de même en modélisation globale, avec L_{SD}^k et la même référence. $(e_{SD}^k)^2 = (L_{SD}^k - \text{réf}^k)^2$; $(e_{ND}^k)^2 = (L_{ND}^k - \text{réf}^k)^2$,

choisissons, ici, $\text{réf}^k = \left(\sqrt{\left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i \cdot P_i^k \right)^2 + \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i \cdot E_i^k \right)^2} - \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i \cdot E_i^k \right) \right)$, cette expression apparaît

dans la thèse de Charles PERRIN (2000), sous une forme différente (cf. Encadré 1-2 du présent mémoire).

Enfin soit α , β et c des paramètres positifs. On pose:

$m(\phi^k)^2 = \alpha(e_{SD}^k)^2$ (1) modélisation semi-globale, une incertitude est liée aux calculs sur chacune des m mailles ($m \geq 2$)

$(\phi^k)^2 = \beta(e_{ND}^k)^2$ (2) modélisation globale, une incertitude lui est liée.

$$(1)-(2) \Rightarrow \left| m(\phi^k)^2 - (\phi^k)^2 \right| = \left| \alpha(e_{SD}^k)^2 - \beta(e_{ND}^k)^2 \right|$$

$$\left| (\phi^k)^2 \cdot (m-1) \right| = \left| \alpha(e_{SD}^k)^2 - \beta(e_{ND}^k)^2 \right| \Rightarrow (\phi^k)^2 = \frac{\left| \alpha(e_{SD}^k)^2 - \beta(e_{ND}^k)^2 \right|}{(m-1)} \quad (3)$$

Cette équation contient 3 inconnues qui sont α , β et $(\phi^k)^2$; un procédé simple serait

de choisir $\alpha = \beta = c^2$ afin d'exprimer une incertitude notée ε^k :

$$\varepsilon^k = c \cdot \sqrt{\frac{\left| \alpha(e_{SD}^k)^2 - \beta(e_{ND}^k)^2 \right|}{(m-1)}} \quad (4) \text{ formule finale.}$$

Ainsi: $L_{SD}^k \text{ corrigée} = L_{SD}^k \pm \varepsilon^k$; $L_{ND}^k \text{ corrigée} = L_{ND}^k \pm \varepsilon^k$

Faut-il ajouter ou retirer ε^k ? quelle valeur pour le paramètre c ?

Avec $c = 1$: (i) les calculs montrent une amélioration de la performance des modèles, si on prend:

$$\forall k, L_{SD}^k(\text{corrigé}) = L_{SD}^k - \varepsilon^k \quad , \quad \forall k, L_{ND}^k(\text{corrigé}) = L_{ND}^k - \varepsilon^k;$$

(ii) les calculs montrent une dégradation de la performance des modèles, si on prend:

$$\forall k, L_{SD}^k(\text{corrigé}) = L_{SD}^k + \varepsilon^k \quad ; \quad \forall k, L_{ND}^k(\text{corrigé}) = L_{ND}^k + \varepsilon^k$$

NB: Partant de l'incertitude θ^k et des spéculations on a construit deux équations mathématiques, l'une (1) concernant la modélisation semi-globale (SG) et l'autre (2) la modélisation globale (G); partant desquelles on établit

l'équation (3) en ϕ^k , et enfin à travers une supposition ($\alpha = \beta = c^2$) on établit l'équation (4) en ε^k .

(cet ε^k serait une composante de θ^k dans une autre base). On peut lancer une procédure d'optimisation sur le coefficient c .

4.4.2 Résultats d'application de la formule d'atténuation

Dans l'Encadré 4-2, pour le choix de la valeur du paramètre « c » lors de la phase de calibration, la préférence est de lancer un processus d'optimisation ayant comme fonction « objectif » la valeur de la fonction de Nash bâtie sur la série des débits corrigés de la version semi-distribuée et la série des débits observés. Après l'application de la formule d'atténuation aux sorties du modèle SimulHyd sur le bassin versant à Koulikoro et sur la période 1950-1995 (Figure 4-31), la valeur du critère de Nash pour la version semi-distribuée varie initialement de 88.35 à 89.63 avec un coefficient $c = 2.06$, la valeur du coefficient du bilan baisse favorablement de 1962 mm à 269 mm, et celle du bilan absolu de 4674 mm à 3883 mm ; pour la version non-distribuée (toujours avec $c = 2.06$), l'amélioration du critère de Nash est de 89.44 à 90.16, la baisse favorable du coefficient du bilan est de 1921mm à -72 mm, et celle du coefficient du bilan absolu est de 4235 mm à 3586 mm.

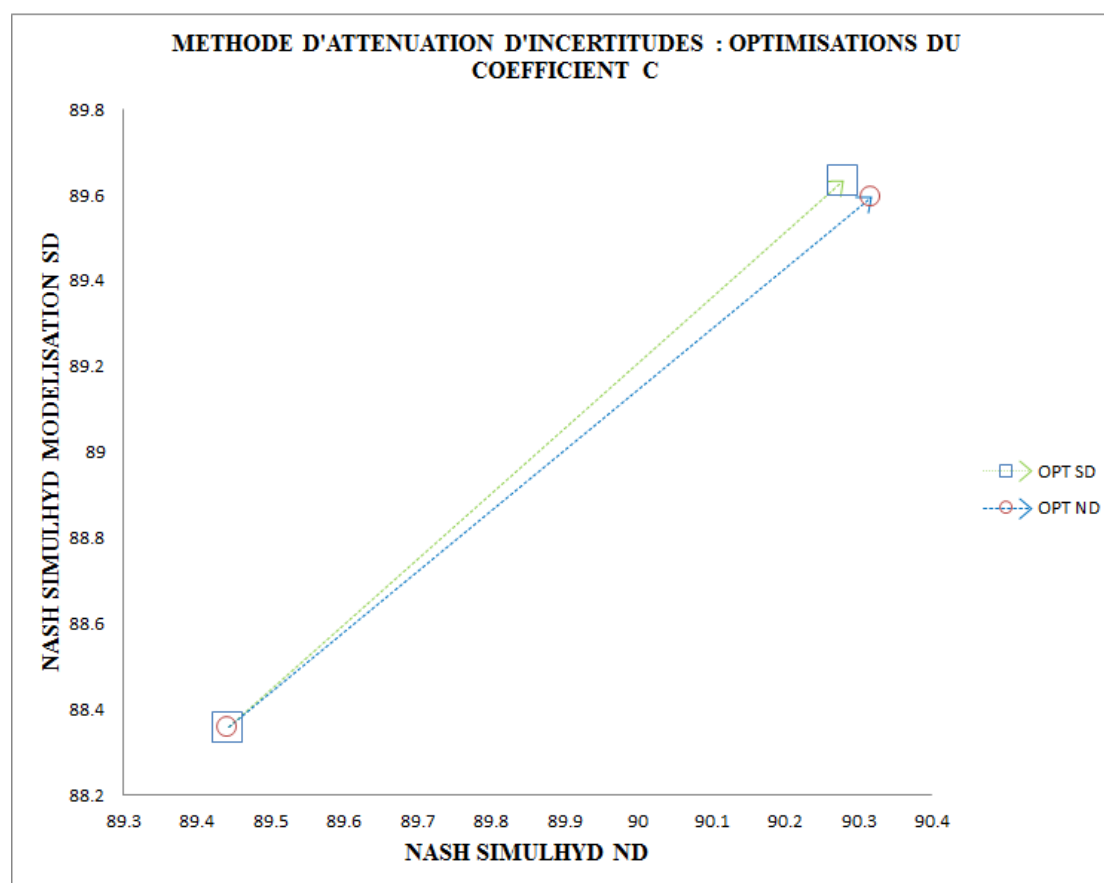


Figure 4-31 : « méthode d'atténuation d'incertitudes, et SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération WHC ».

(Avec optimisation du coefficient $c = 2.06$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 1.7$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND)).

Suite à l'application de la formule d'atténuation, et de ses deux hypothèses subséquentes, aux sorties du modèle SimulHyd, considérée sans coefficient de pondération pour sa version

semi-distribuée, sur le bassin de Koulikoro et sur la période 1950-1995 (**Figure 4-32**), la valeur du critère de Nash pour la version semi-distribuée varie initialement de 87.21 à successivement 87.96, 92.04, et 92.28 avec un coefficient c respectivement de 1.51, 3.85, et 2.95, la valeur du coefficient du bilan évolue initialement de 1967 mm à successivement 690 mm, 709 mm, et 655 mm ; et celle du bilan absolu de 4888 mm à successivement 4272 mm, 3325 mm, et 3295 mm. Pour la version non-distribuée (toujours avec le coefficient c respectivement de 1.51, 3.85, et 2.95), partant de la valeur initiale du critère de Nash qui est de 89.44, l'amélioration obtenue est successivement 89.84, 92.02, et 92.22 ; l'évolution du coefficient du bilan est de 1621 mm à successivement 344 mm, 363 mm, et 309 mm ; et celle du coefficient du bilan absolu est de 4235 mm à successivement 3737 mm, 3514 mm, et 3505 millimètres.

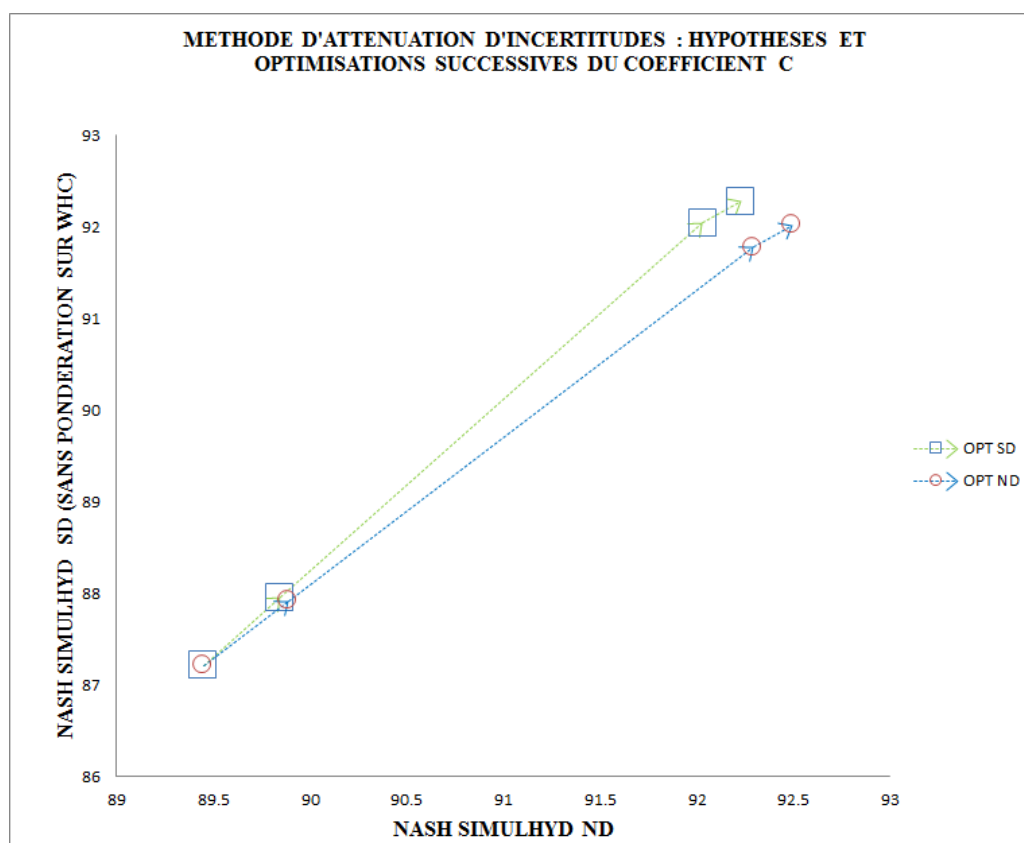


Figure 4-32 : « méthode d'atténuation d'incertitudes, et SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération WHC ».

(Avec optimisation successive du coefficient $c = 1.51, 3.85, 2.95$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.16, 2.95, 2.06$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND)).

Les résultats d'application de la méthode d'atténuation d'incertitudes sur l'ensemble des seize échantillons de bassins versants sont aux **annexes 4**. L'application exclusive de la **méthode d'atténuation des incertitudes** aux modèles semi-distribués permet à ces derniers de dépasser en performance leur versions non-distribuées correspondantes. Dezetter et al.,

(2008), se questionnant sur l'existence d'un modèle « général » qui puisse être utilisé partout, trouvent, pour la zone d'étude sélectionnée, qu'aucun des modèles GR2M et WBM ne permet d'atteindre entièrement l'objectif. Ainsi, l'une des perspectives d'amélioration de la modélisation est le couplage dynamique de deux versions (non-distribuée et semi-distribuée) de modèle, lors de la phase de calibration, validation ou simulation, à travers la Formule d'Atténuation d'Incertitude (**Encadrés 4-2 et 4-3**), en prenant le coefficient « **c** » de cette formule comme une fonction de l'un ou des paramètres X1 et X2 des modèles GR2M/SimulHyd.

4.5 Expressions analytiques du Modèle SimulHyd

Un modèle numérique se présente généralement comme une série de définitions mathématiques qu'on fournit à l'ordinateur, avec souvent un schéma conceptuel qui l'accompagne (la **Figure 3-1** illustre le schéma de fonctionnement des modèles GR2M et SimulHyd). Au-delà de ces définitions mathématiques, il existe pour les modèles GR2M et SimulHyd des expressions analytiques qui permettent d'avoir les évolutions des réservoirs « sol/s » et « gravitaire/s », et ainsi que la lame d'eau simulée par pas de temps de simulation. Les travaux précédant (Koné, 2007) ont conduit à l'écriture de l'expression analytique du modèle GR2M, et la présente étude détaille le couplet d'expressions analytiques représentant l'évolution des réservoirs (Sol et gravitaire) du modèle SimulHyd. Le modèle SimulHyd (ou le modèle GR2M) dans sa version non-distribuée est un modèle à deux réservoirs, le « réservoir sol » et le « réservoir gravitaire » ; dans sa version semi-distribuée c'est un modèle à plusieurs réservoirs dont le nombre est un multiple de 2, le coefficient multiplicateur étant le nombre de maille d'entrée. SimulHyd fonctionnant sur une maille i et en un instant k est composé :

- ✓ (**Encadré 4-4**) de l'expression analytique **H** de l'évolution de son « réservoir sol », elle est récursive dans le temps (c'est-à-dire qu'elle dépend d'elle-même au pas de temps précédant) ;
- ✓ (**Encadré 4-5**) et de l'expression analytique **S** de l'évolution de son « réservoir gravitaire », elle est également récursive dans le temps (c'est-à-dire qu'elle dépend d'elle-même au pas de temps précédant), elle dépend aussi de l'expression du « réservoir sol » à l'instant précédant ($k-1$).

En modélisation non-distribuée on a une seule « grande maille » qui est le bassin versant dans son ensemble or en modélisation semi-distribuée on fait une moyenne pondérée de la lame

produite à partir des données d'entrée des différentes mailles i du bassin versant.

Encadré 4-4 : Expression analytique de l'évolution du « réservoir sol » de SimulHyd

L'impact de la Pluie, au debut du pas de temps k , sur le reservoir soil (de niveau initial $H_{(0)i}^k = H_{(2)i}^{k-1}$) le fait augmenter et devient $H_{(1)i}^k$.

$$H_{(1)i}^k = \left(H_{(2)i}^{k-1} + \frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k \cdot \tanh \left(\frac{X1 \cdot P_i^k - \frac{(X1 \cdot P_i^k) \cdot (X1 \cdot E_i^k)}{\left[(X1 \cdot P_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} + (X1 \cdot E_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}}}{\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right) \right)$$

, avec $k \geq 1$ et $H_{(2)i}^0 = H_{(0)i}^1 = 0$

L'impact de l'Evaporation, à la fin du pas de temps k , sur le reservoir soil (de niveau $H_{(1)i}^k$) le fait diminuer et devient $H_{(2)i}^k$.

$$H_{(2)i}^k = \left(\frac{H_{(1)i}^k + \frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k \cdot \tanh \left(\frac{X1 \cdot P_i^k - \frac{(X1 \cdot P_i^k) \cdot (X1 \cdot E_i^k)}{\left[(X1 \cdot P_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} + (X1 \cdot E_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}}}{\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right)}{1 + H_{(2)i}^{k-1} \cdot \frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right) \cdot \left(1 - \tanh \left(\frac{X1 \cdot E_i^k - \frac{(X1 \cdot P_i^k) \cdot (X1 \cdot E_i^k)}{\left[(X1 \cdot P_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} + (X1 \cdot E_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}}}{\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right) \right)$$

$$H_{(2)i}^k = \left(1 + \tanh \left(\frac{X1 \cdot E_i^k - \frac{(X1 \cdot P_i^k) \cdot (X1 \cdot E_i^k)}{\left[(X1 \cdot P_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} + (X1 \cdot E_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}}}{\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right) \right) \cdot \left(1 - \frac{X1}{WHC_i^k} \cdot \frac{H_{(1)i}^k + \frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k \cdot \tanh \left(\frac{X1 \cdot P_i^k - \frac{(X1 \cdot P_i^k) \cdot (X1 \cdot E_i^k)}{\left[(X1 \cdot P_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} + (X1 \cdot E_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}}}{\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right)}{1 + H_{(2)i}^{k-1} \cdot \frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right)$$

Avec $k \geq 1$ et $H_{(2)i}^0 = H_{(0)i}^1 = 0$. Petit k est l'indice sur le pas de temps de la simulation, il varie de 1 à K . Petit i est l'indice sur les mailles du bassin versant. Le calcul de $H_{(2)i}^k$ nécessite la connaissance de $H_{(2)i}^{k-1}$ de l'instant précédent ($k-1$) : la relation est récursive.

NB : pour le modèle GR2M, il suffit de remplacer partout le terme $\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k$ par A , (avec $A = WHC_i^k$).

Encadré 4-5 : Expression de l'évolution du « réservoir gravitaire » et du débit de SimulHyd

Au debut du pas de temps k, le niveau $S_{(1)i}^k$ du reservoir gravitaire est :

$$S_{(1)i}^k = S_{(2)i}^{k-1} + (1-\alpha) \cdot \left(X_1 \cdot P_i^k - \frac{(X_1 \cdot P_i^k) \cdot (X_1 \cdot E_i^k)}{\left[(X_1 \cdot P_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} + (X_1 \cdot E_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}} \right) - \left(\frac{H_{(2)i}^{k-1} + \frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k \cdot \tanh \left(\frac{X_1 \cdot P_i^k - \frac{(X_1 \cdot P_i^k) \cdot (X_1 \cdot E_i^k)}{\left[(X_1 \cdot P_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} + (X_1 \cdot E_i^k)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\gamma}}}{\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right)}{1 + H_{(2)i}^{k-1} \cdot \frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k} \right) - H_{(2)i}^{k-1}$$

Avec $k \geq 1$; $H_{(2)i}^0 = H_{(1)i}^0 = H_{(0)i}^1 = 0$ et $S_{(2)i}^0 = S_{(1)i}^0 = S_{(0)i}^1 = 0$

A la fin du pas de temps k, le niveau $S_{(2)i}^k$ du reservoir gravitaire est :

$$S_{(2)i}^k = (1 - X_2) \cdot S_{(1)i}^k$$

La lame d'eau Simulee sur la maille i est :

$$L_i^k = X_2 \cdot S_{(1)i}^k$$

Petit k est l'indice sur le pas de temps de la simulation, il varie de 1 à K.
Petit i est l'indice des mailles du bassin versant.

à l'instant k le calcul de $S_{(2)i}^k$ necessite la connaissance de $S_{(2)i}^{k-1}$ et $H_{(2)i}^{k-1}$ de l'instant précédent (k-1) : la relation est récursive.

La lame totale d'eau écoulee serait la moyenne pondérée des lames simulées des mailles i. Le coefficient de pondération sera sur la valeur de WHC

$$Lame_{simulee}^k = \sum_{i=1}^{i=N} (coef_ponderation \cdot L_i^k)$$

Pour passer au débit simulé à l'instant k : $Q^k = \frac{A}{\Delta t} \cdot Lame_{simulee}^k$, Δt étant le pas de temps de la simulation, et A la surface du bassin.

NB : pour le modèle GR2M, il suffit de remplacer partout le terme $\frac{1}{X1} \cdot WHC_i^k$ par A, (avec A = WHC_i^k).

4.6 Résumé relatif à la mise en place de la méthodologie « hydro-géostatistique »

Ce chapitre s'est appuyé sur des considérations spatiales, d'une part en vue de produire une version de modèle apte à mieux prendre en compte la variabilité des processus à la surface des bassins versants, et d'autre part pour permettre l'application des outils de la géostatistique dans un espace nouvel, qui est autre que l'espace géographique habituel.

Un coefficient de corrélation, bâti sur les performances de sorties de deux versions de modèle (non-distribuée et semi-distribuée) et sur la dispersion entre grilles de l'information sol (ou la capacité de rétention du sol en eau, en anglais *Water Holding Capacity - WHC*), permet de mettre en évidence l'utilité d'introduire un coefficient de pondération « plus adéquat » dans la modélisation hydrologique semi-distribuée : d'où le protocole inter-modèles.

La valeur élevée de cette corrélation est interprétée comme une dépendance de la différence de performance entre versions d'un modèle, aux mesures de la dispersion de la grandeur WHC en entrée de la modélisation semi-distribuée.

Ce type de dépendance est moins apprécié en modélisation et se traduit par une grande sensibilité des modèles aux informations d'entrée. Ainsi, pour « casser » cette dépendance, (ce qui serait un plus pour la modélisation), un coefficient de pondération, établi partant de la variance empirique (dispersion) du WHC, est appliquée dans la modélisation semi-distribuée.

Le coefficient de corrélation susmentionné s'abaisse favorablement de 0.80 à 0.21 en valeur absolue avec l'application de la règle de pondération au sein du modèle SimulHyd semi-distribué.

Parallèlement, pour tester le modèle, doté de son coefficient de pondération « plus adéquat », et bâtir un espace pour l'application des outils de la géostatistique au modèle hydrologique ainsi établi, le protocole Inter-bassins en est proposé. L'espace, autre que géographique, établi a, en abscisse l'écart relatif entre le WHC d'un bassin versant considéré et celui d'un bassin versant de référence fixe (bassin de Koulikoro dans nos études). L'ordonnée de cet espace est constituée de l'écart relatif des performances d'une même version de modèle, en calage, et utilisant le jeu de paramètres du bassin versant de Koulikoro. L'analyse de cet espace révèle : 1) l'abscisse est la composante la plus réaliste en ce sens que l'information de l'objet physique qu'est l'eau du sol y est représentée ; 2) l'ordonné est la composante qui mixte le modèle hydrologique et l'hydrosystème étudié. Cette analyse permet de savoir

pourquoi les calculs dans de tel espace produisent des résultats satisfaisants : au moins une caractéristique physique de l'objet étudié est prise en compte.

Le modèle SimulHyd semi-distribué avec coefficient de pondération des lames d'eaux, produit à travers le protocole inter-bassins une corrélation de 0.48 ; ce qui est diversement apprécié, comme étant plus ou moins élevée car inférieur 0.70. Sans l'application du coefficient de pondération cette valeur, au lieu d'être 0.48, devient 0.36. Ce constat, permet de conclure qu'un modèle distribué avec pondération sur WHC permet de produire un ensemble de point-bassins présentant une structure plus cohérente dans l'espace **Nash-WHC**. Nous avons montré également deux variantes de la méthodologie hydro-géostatistique, l'une, variante 1, continuant le krigeage en faisant celui du paramètre X2 dans un espace « X1-WHC », et l'autre, variante 2, le faisant pour le paramètre X1 dans un espace « X2-WHC ».

CHAPITRE 5

**APPLICATION DE LA MODELISATION A DES
SITUATIONS FUTURES ET PERFORMANCES
COMPAREES DES MODELES
HYDROLOGIQUES**

5. Chapitre 5. Application de la Modélisation à des Situations Futures et Performances Comparées des Modèles

Ce chapitre présente la performance comparée des modèles GR2M et SimulHyd, successivement, à simuler des débits maximum, à faire des projections futures à trois horizons différents (2010-2039, 2040-2069, et 2070-2099), et à reproduire un coefficient de tarissement sur deux périodes contrastées (hautes et basses eaux).

5.1 Performance comparée des modèles à reproduire le débit maximal observé

L'une des caractéristiques appréciées d'un modèle serait sa performance à reproduire les événements hydrologiques exceptionnels comme les crues décennales et centennales. Paturel et al., (2006b) démontre qu'une classe **numéro 5** composée des débits élevés (supérieur à 3 fois le module de l'observation), et accompagnée d'une classe **numéro 1** de débits faibles (supérieur à 0.5 fois le module de l'observation et inférieur à 1.5 fois le même module) qui serait initialisée à zéro, serait l'information **nécessaire et suffisante** pour simuler toute la totalité d'une chronique d'observation (**Figure 5-1**); ainsi, le fait de savoir le comportement d'un modèle à simuler les pics, même seulement le plus proéminent, serait un atout dans la maîtrise de la modélisation.

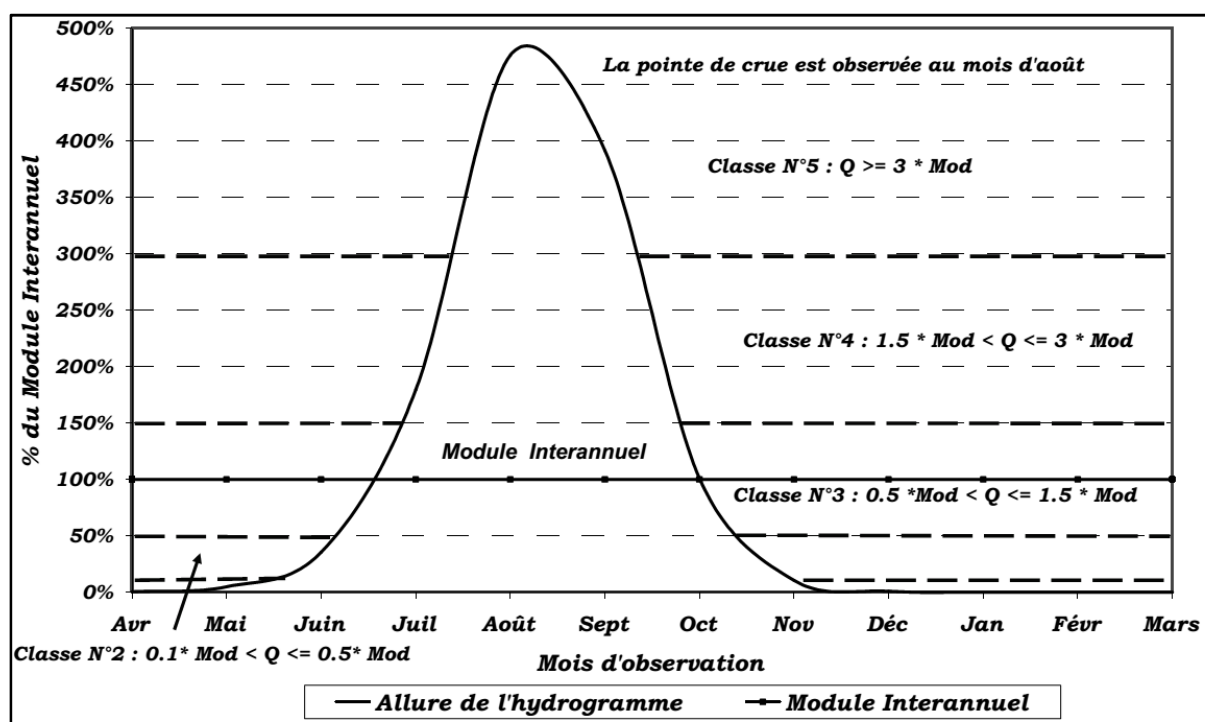


Figure 5-1 : Hydrogramme-type d'un cours d'eau de régime sahélien. (D'après Paturel et al., 2006b)

5.1.1 Approche régionale (par station hydrométrique)

Une première approche de caractérisation comparée de cette performance sera de considérer la longueur totale des chroniques de débits du **Tableau 3-1** et de comparer l'acuité de six versions de modèles à reproduire la mesure hydrométrique majeure sur quinze bassins versant de la zone d'étude. La situation et les mesures hydrométriques à la station de Gouala étant perturbées par le turbinage au barrage hydroélectrique de Selingué, le code numérique de nos modèles ne calcul pas toutes les données souhaitées pour mener la comparaison à cette station, d'où l'absence de la station de Gouala dans le présent sous-chapitre. Sur les **Figures 5-2 à 5-7**, pour chacun des quinze bassins versants, les différences relatives entre le maximum de débit observé et ceux calculés par six versions de modèles, ainsi que le coefficient de variation ou de dispersion relative (cf. **Encadré 11**), sont évaluées.

Sur la **Figure 5-2** ci-dessous les résultats de simulations apparaissent en deux groupes, ceux de GR2M et ceux de SimulHyd, et ceci sur la plupart des bassins versants à l'exception de Kérouane et Kissidougou; ce regroupement est illustré sur la **Figure 5-3** ci-dessous en faisant la moyenne des trois simulations obtenues avec les versions de GR2M et celle des trois simulations obtenues avec les versions de SimulHyd.

Les périodes considérées, sur les **Figures 5-2 à 5-7**, sont celles du **Tableau 3-1** où pour Koulikoro elle s'étend sur 1950-1995 avec le pic de débits mensuels en Octobre 1962.

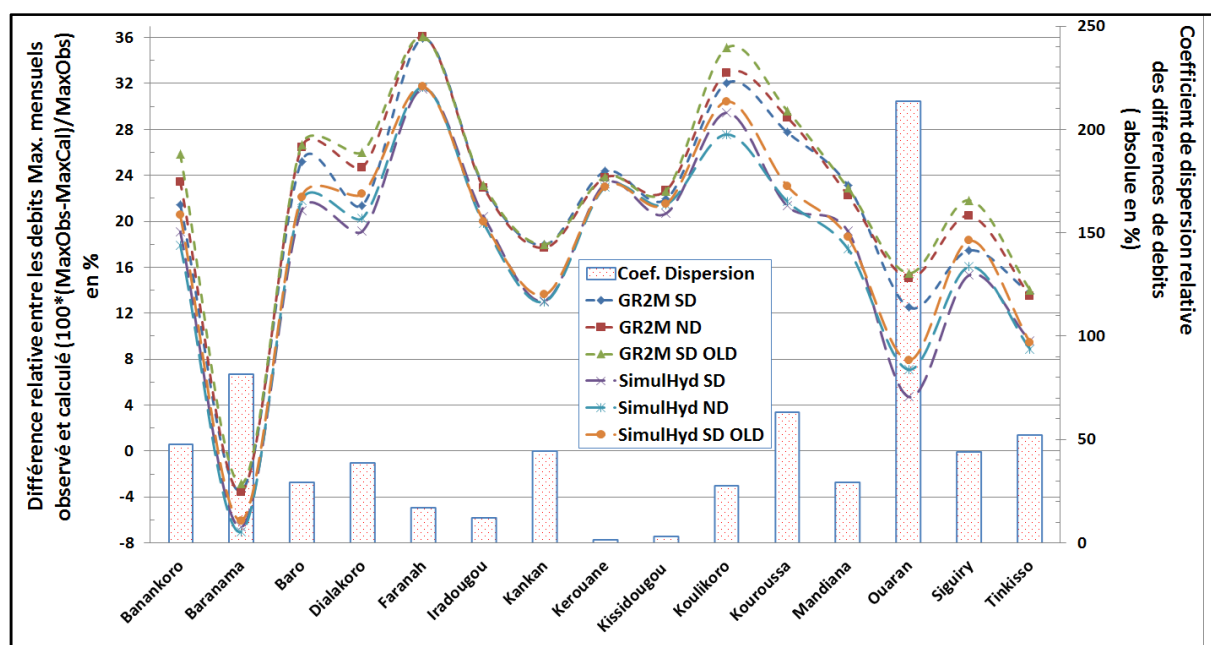


Figure 5-2 : Différence relative entre le débit max observé et celui calculé avec six versions de modèle (trois de GR2M et trois de SimulHyd).

(Les résultats concernent les versions de GR2M semi-distribuées avec et sans pondération sur WHC (old) ; les versions de SimulHyd semi-distribuées avec et sans pondération sur WHC (old) ; les versions non-distribuées de ces deux modèles ; et enfin les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé).

La **Figure 5-3** ci-dessous montre également, la prééminence (en moyenne) du modèle SimulHyd, sur le modèle GR2M à simuler le débit maximal observé : la différence relative de l'observation et de la simulation (avec le modèle SimulHyd) étant faible. On constate que, seul sur le bassin de Baranama les modèles surestiment le débit maximal et constitue : (i) l'unique bassin (sur quinze) sur lequel GR2M simule mieux le débit maximal que SimulHyd en est capable ; (ii) le bassin sur lequel la meilleure simulation de débit maximal produite par le modèle GR2M (suit successivement des bassins de Tinkisso, d'Ouaran et de Kankan). La meilleure simulation de débit maximal produite par le modèle SimulHyd étant, en contexte de sous-estimation du débit maximal, sur le bassin d'Ouaran (suit successivement de ceux de Baranama, de Tinkisso et de Kankan). La plus mauvaise simulation de débit maximal produite par les deux modèles GR2M et SimulHyd (en dehors de la station de Gouala) est à la station de Faranah, suivit successivement de celles de Koulikoro, de Kérouane et de Kouroussa.

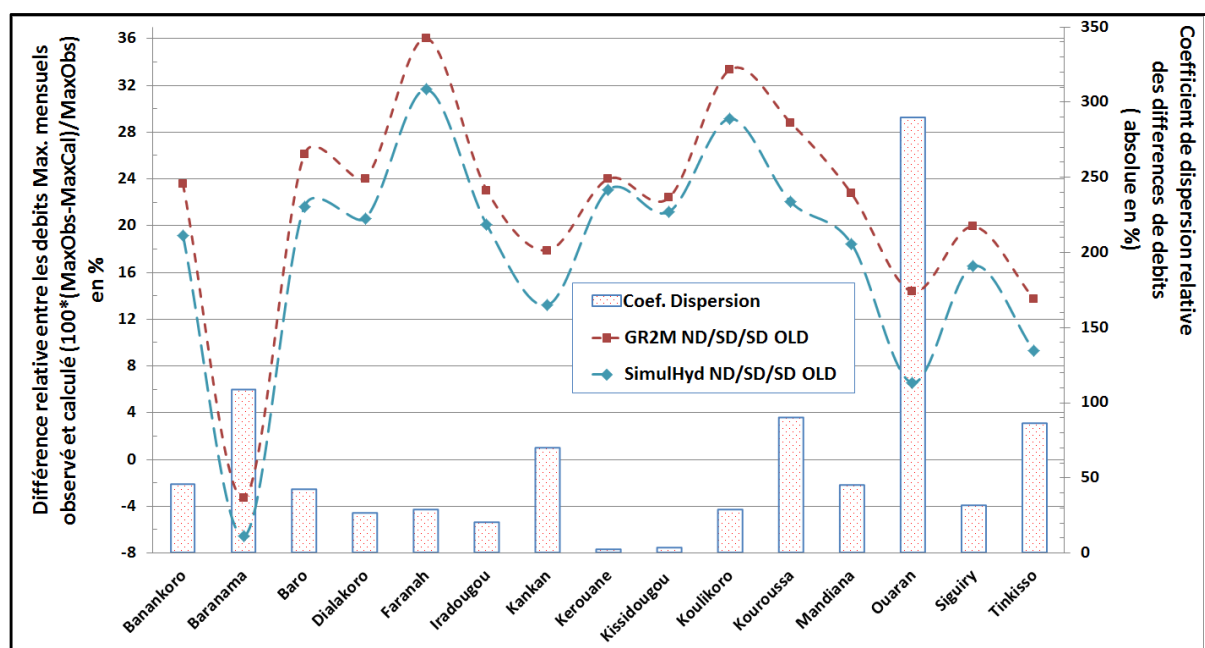


Figure 5-3 : Différence relative entre le débit max observé et celui calculé. Résultats moyennés de trois versions de GR2M et de trois versions de SimulHyd.

(Les résultats concernent, d'une part les versions de GR2M non-distribuées, de GR2M semi-distribuée avec et sans pondération sur WHC (old) ; et d'autre part, les versions de SimulHyd non-distribuées, de SimulHyd semi-distribuée avec et sans pondération sur WHC (old) ; et enfin les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé).

En plus, cette **Figure 5-3** montre qu'en moyenne, la meilleure amélioration de la modélisation du débit maximal, en passant du modèle GR2M au modèle SimulHyd (à l'exception de la station de Baranama où l'impact est fortement négatif), et attestée à travers le pourcentage du coefficient de dispersion relative des différences de débit maximal (les histogrammes), est obtenue à la station d'Ouaran et suivit successivement des stations de

Kouroussa, de Tinkisso, de Kankan, de Banankoro, de Mandiana, de Baro, de Siguiry, de Faranah, de Koulikoro, de Dialakoro, d'Iradougou, de Kissidougou et de Kérouane.

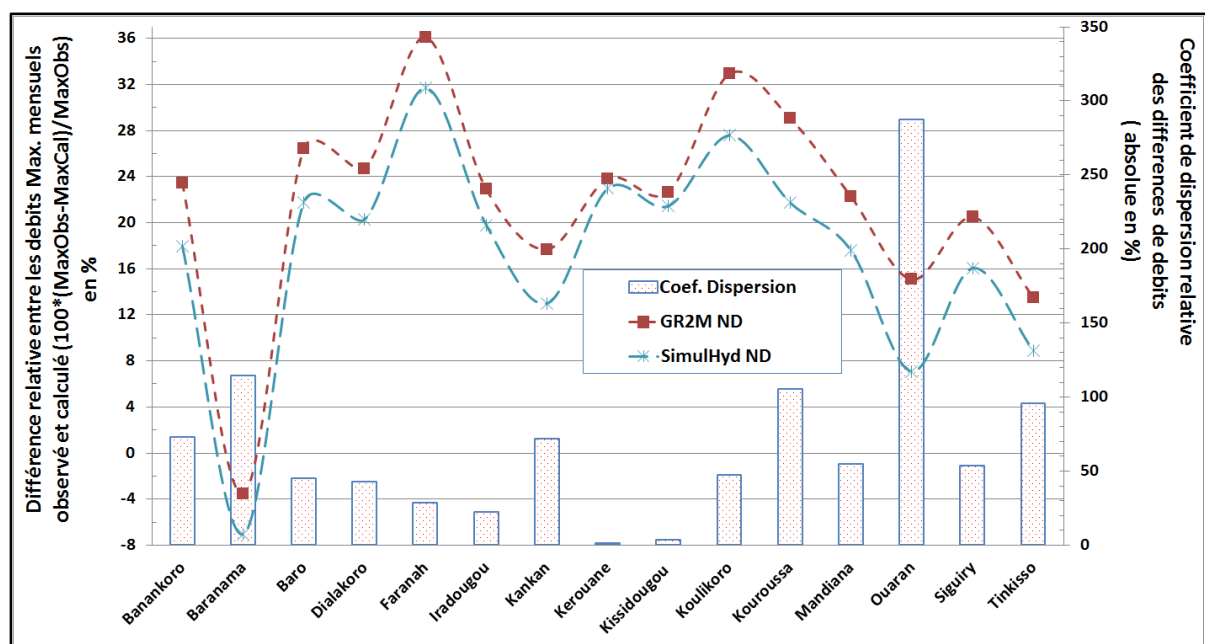


Figure 5-4 : Différence relative entre le débit max observé et celui calculé en non-distribuée. (Résultats de GR2M non-distribuée et de SimulHyd non-distribuée avec les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé).

Les Figures 5-4, 5-5 et 5-6 montrent que chacune des versions du modèle SimulHyd ont des différences relatives de débits maximum, observé et celui calculé, plus faible que pour les versions correspondantes du modèle GR2M, ainsi SimulHyd reste prééminent sur GR2M dans tous les contextes de simulation de débit maximal qu'à l'exception de Baranama.

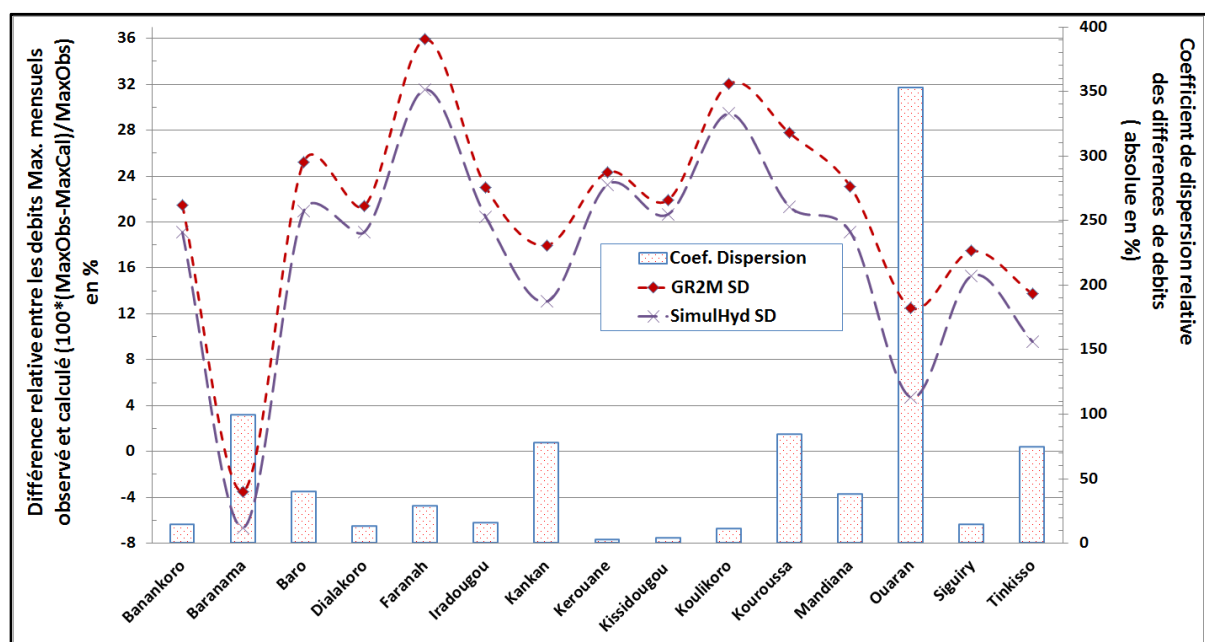


Figure 5-5 : Différence relative entre le débit max observé et celui calculé en semi-distribuée. (Résultats de GR2M semi-distribuée et de SimulHyd semi-distribuée, et les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé).

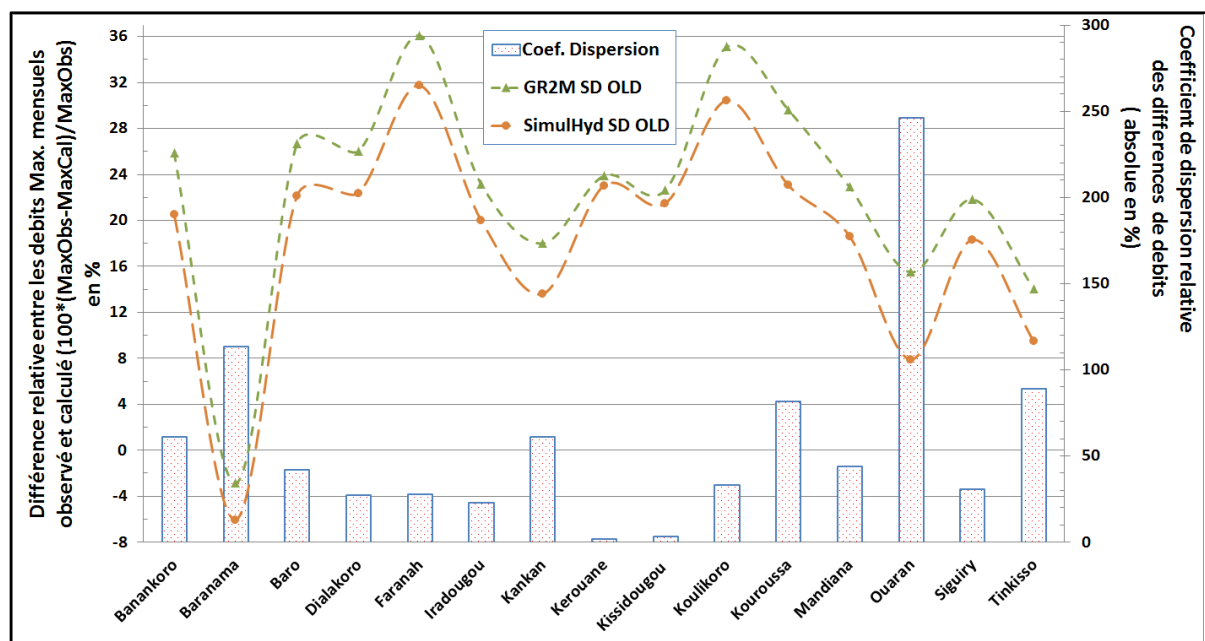


Figure 5-6 : Différence relative entre le débit max observé et celui calculé en semi-distribuée ancienne (Résultats de GR2M semi-distribuée sans pondération sur WHC (old) et de SimulHyd semi –distribuée sans pondération sur WHC (old), et les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé).

Sur les **Figures 5-7a, 5-7b, 5-7c** ci-après, respectivement, les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé pourront être appréciés successivement pour les trois versions de GR2M, les trois versions de SimulHyd et pour la moyenne des deux versions (non-distribuée et semi-distribuée) des deux modèles (GR2M et SimulHyd). Le coefficient de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé, qui est de 7.13% pour GR2M contre 6.80% pour SimulHyd, pointe une relative amélioration de la modélisation en diversifiant les versions de GR2M (par rapport à celles de SimulHyd). Globalement, les versions (non-distribuée et semi-distribuée) de SimulHyd modélisent mieux le débit maximal que ces mêmes versions du modèle GR2M : entre les deux modèles, en moyenne sur quinze bassins versants, les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé est : 62.49% (**Figure 5-7c**). Toutefois, la comparaison deux à deux des versions correspondantes et respectives des modèles GR2M et SimulHyd pourrait être menée sur les Figures de la première page des **annexes 8**.

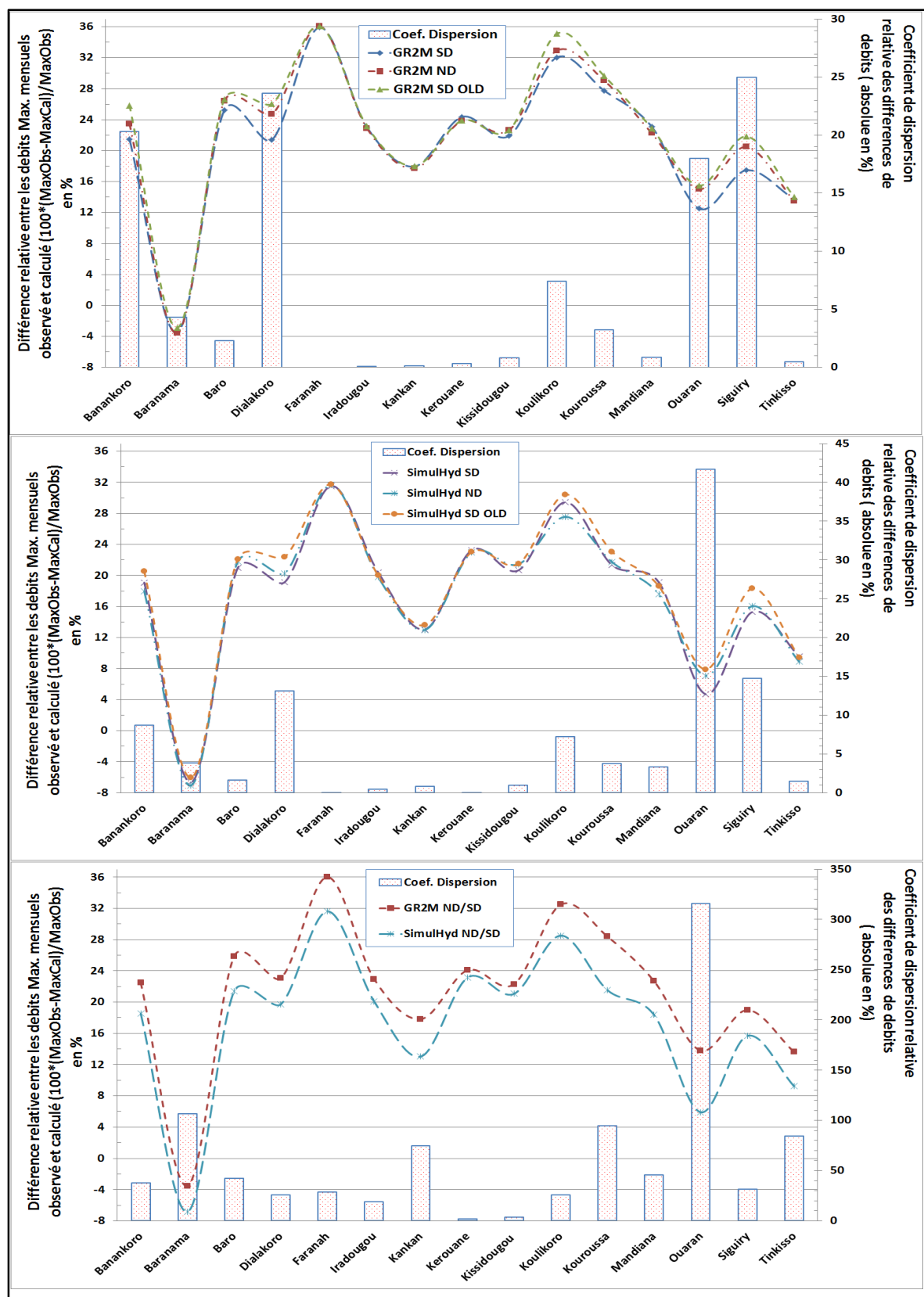


Figure 5-7 : Différence relative entre le débit max observé et celui calculé par moyenne de versions de modèle.

(a) Les versions du modèle GR2M (non-distribuée, semi-distribuée avec et sans pondération sur WHC (old), (b) les versions du modèle SimulHyd (non-distribuée, semi-distribuée avec et sans pondération sur WHC (old), (c) la moyenne des deux premières versions de GR2M et celle des deux premières versions de SimulHyd, et les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé.

5.1.2 Approche ponctuelle (par évènement hydrométrique)

Une seconde approche sera de porter l'attention sur la station de Koulikoro qui a une chronique de mesure qui débute en 1907 et couvre l'évènement majeur produit en 1925 et connu comme la crue centennale, et de s'intéresser à quinze évènements hydrométriques majeurs mesurés sur le bassin du fleuve Niger (à cette station) ente 1907 à 1999.

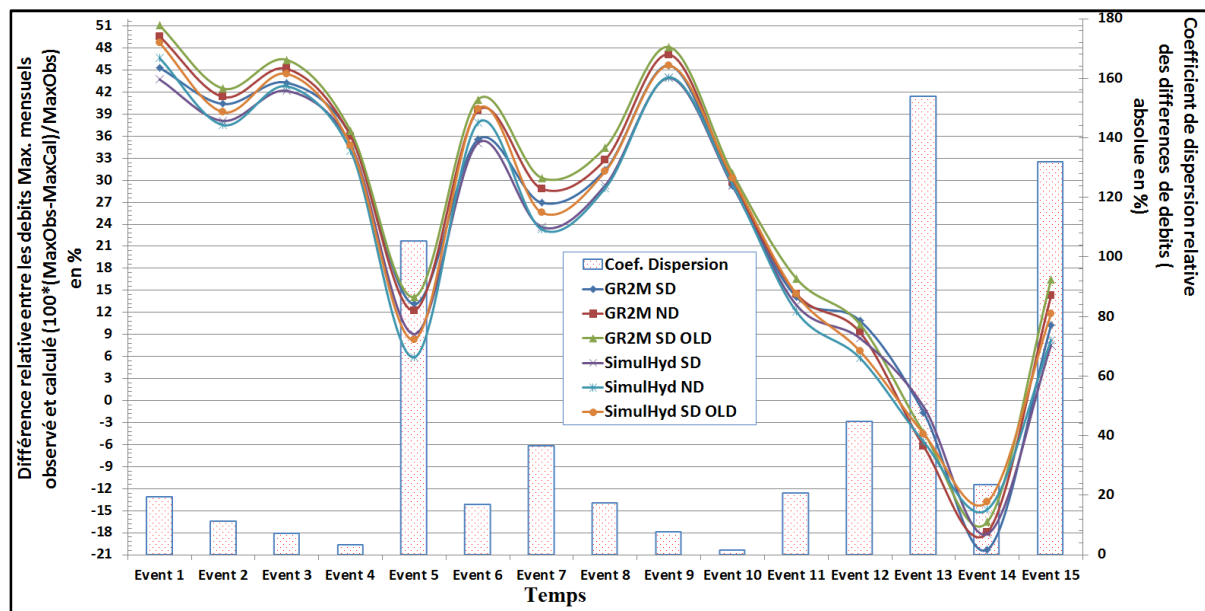


Figure 5-8 : Station de Koulikoro, différence relative entre le débit max observé et celui calculé avec six versions de modèle.

(Les versions de GR2M semi-distribuées avec et sans pondération sur WHC (old) ; les versions de SimulHyd semi-distribuées avec et sans pondération sur WHC (old) ; les versions non-distribuées de ces deux modèles ; et enfin les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé. Quinze situations mensuelles sont considérées à la station de Koulikoro comme suit : a. Octobre 1925, b. Octobre 1929, c. Octobre 1936, d. Octobre 1939, e. Octobre 1946, f. Octobre 1950, g. Octobre 1957, h. Octobre 1962, i. Octobre 1967, j. Septembre 1971, k. Septembre 1975, l. Septembre 1981, m. Septembre 1985, n. Septembre 1991, o. Septembre 1994. Ces situations mensuelles, toujours classées par ordre d'apparition, montrent apparemment deux pseudo-fréquences d'évènements décennaux [1925-1935/6 et 1929-1939]).

La **Figure 5-9** ci-après présente les résultats moyennés des sorties de simulation de débits maximum, de chacun des modèles GR2M et SimulHyd, se trouvant sur la **Figure 5-8** ci-dessus. Il se dégage de l'analyse de ces **Figures (5-8 et 5-9)** et celles sur les pages CXV à CXVII des **Annexes 8**, qu'en moyenne et qu'au niveau de chacune des quinze situations hydrométriques mensuelles considérées, que le modèle SimulHyd est plus efficace à reproduire un débit maximal que le modèle GR2M en est capable : le coefficient de dispersion moyen des simulations des deux modèles est 27.40% (partant de la **Figure 5-8**), attestant l'amélioration des simulations en passant de GR2M à SimulHyd ; et le coefficient de dispersion intrinsèque aux versions de GR2M est 21.28% et à celles de SimulHyd est 25.6% (cf. **annexes 8**), ce qui pointe une relative moindre amélioration de la modélisation en diversifiant les versions de GR2M (par rapport à celles de SimulHyd). Sur les quinze

situations mensuelles considérées, seuls les débits sont surestimés par les modèles en Septembre 1985 (*Event 13*) et en Septembre 1991 (*Event 14*). Ces situations mensuelles, classées par ordre d'apparition (**Figure 5-10**), montrent apparemment deux pseudo-fréquences d'évènements « décennaux » : 1925-1935(6) et 1929-1939, et une pseudo-cycle apparent de période de 40 ou 50 ans (il faudrait plus d'observation pour une confirmer cette dernière pseudo-cycle). Les pseudo-cycles apparents de 10 ans pourront servir d'information à exploiter lors de la modélisation hydrologique à pas de temps décadaire où les pics décennaux de débits, apparemment de deux types, seront des évènements prépondérants à simuler.

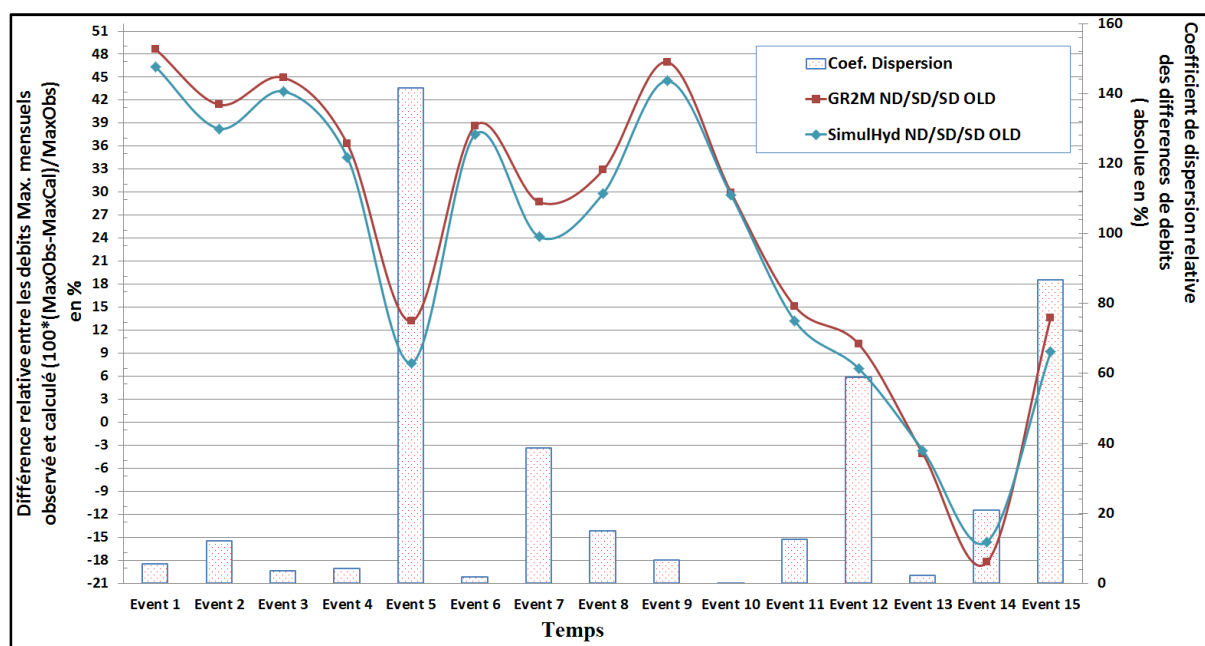


Figure 5-9 : Station de Koulikoro, différence relative entre le débit max observé et celui calculé. Résultats moyennés de trois versions de GR2M et de trois versions de SimulHyd.

(Les résultats sont obtenus avec les versions de GR2M non-distribuées, de GR2M semi-distribuée avec et sans pondération sur WHC (old) ; les versions de SimulHyd non-distribuées, de SimulHyd semi-distribuée avec et sans pondération sur WHC (old). Enfin les coefficients de dispersion relative des différences de débit maximal observé et calculé. . Quinze situations mensuelles sont considérées à la station de Koulikoro : a. Octobre 1925, b. Octobre 1929, c. Octobre 1936, d. Octobre 1939, e. Octobre 1946, f. Octobre 1950, g. Octobre 1957, h. Octobre 1962, i. Octobre 1967, j. Septembre 1971, k. Septembre 1975, l. Septembre 1981, m. Septembre 1985, n. Septembre 1991 et o. Septembre 1994).

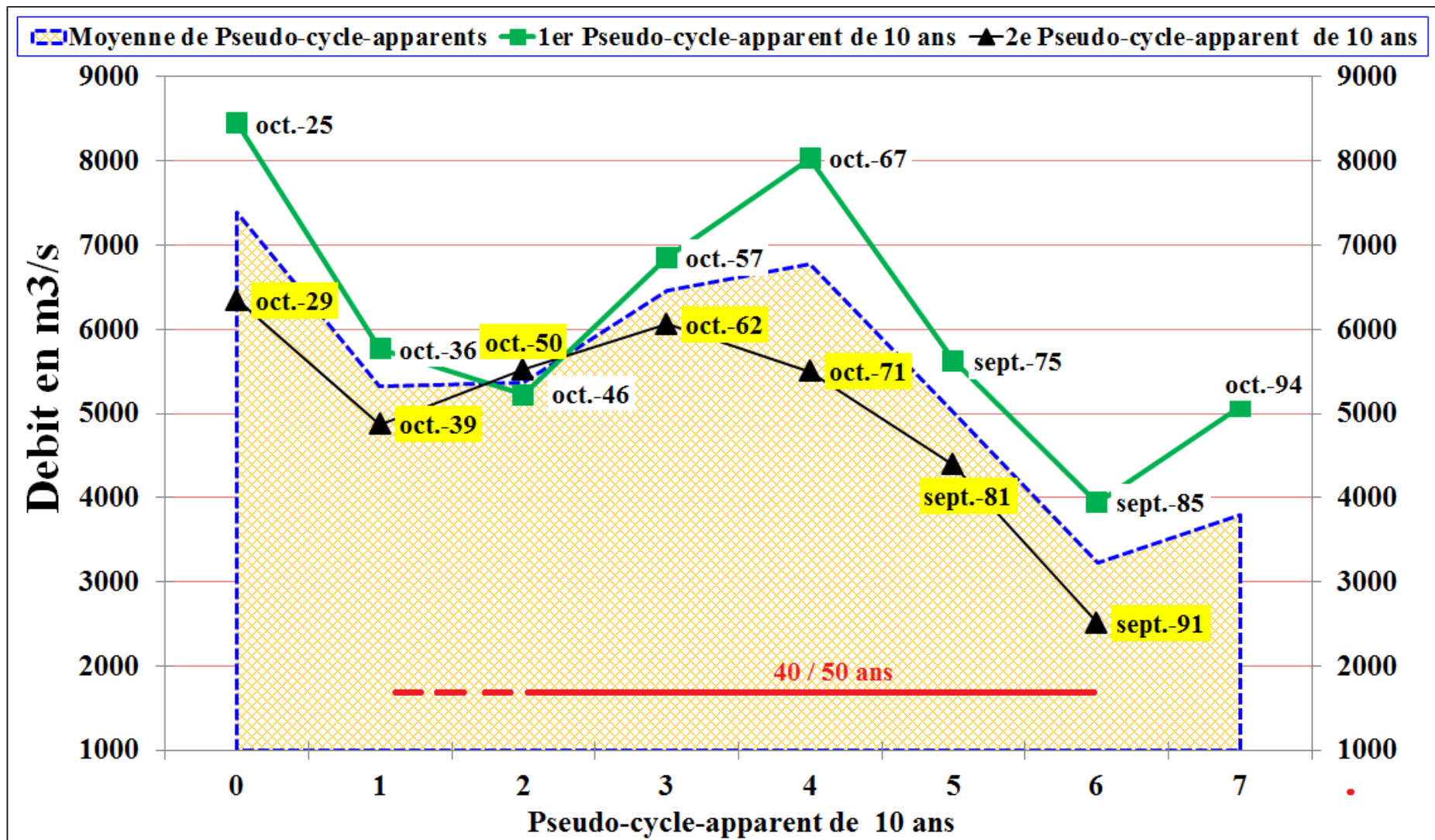


Figure 5-10 : Quinze évènements majeurs sur la période 1907-1999 sur le fleuve Niger (à Koulikoro).

5.2 Application de la Modélisation à des Situations Futures et Performances Comparées des Modèles

5.2.1 Données et Protocole de simulation

Considérant toujours les longueurs totales des chroniques de débits du **Tableau 3-1** pour les bassins versants qui y sont caractérisés, on se propose de tenir compte d'une diminution probable de la pluviométrie de 10% dans le futur. À noter que l'assomption d'une diminution de 10% de la pluviométrie (par extension de l'ETP aussi), en aval de la longueur totales des périodes du **Tableau 3-1**, reste une approximation qui permettra d'utiliser les mêmes sources des fichiers Pluies/ETP qui ont servis tout le long de cette étude (cf. **sous-chapitre 2.4**). Des études de simulation rigoureuse partant des sorties des Modèles de Circulation Générale ont montrées des tendances légère d'augmentation des écoulements de surface, en Afrique de l'Ouest, à l'horizon 2020 et à l'horizon 2050, suivit d'une diminution de ces écoulements à l'horizon 2080, (Rescan, 2005 ; Mahé et al., 2008a ; Ardoïn-bardin et al., 2009). Lors de nos simulations, trois versions de modèle, GR2M non-distribuée, SimulHyd non-distribuée et GR2M semi-distribuée (avec coefficient de pondération sur le WHC), seront utilisées chacun avec deux jeux de paramètres de modèle, celui de GR2M non-distribuée et celui de SimulHyd non-distribuée calés sur le bassin versant du fleuve à la station de Koulikoro (sur une période de référence : 1950-1995) ; les deux jeux de paramètres pourront être appréciés dans les commentaires des **annexes 4** (à la pages XLVIII).

5.2.2 Projection aux horizons et implication de l'interchangeabilité des paramètres entre versions de modèle

Les projections obtenues sur les **Figures 5-11, 5-12, et 5-13** signalent une légère augmentation de l'écoulement de surface sur l'horizon 2020, suivit d'une très légère diminution à l'horizon 2050, et qui (la diminution) s'amplifie à l'horizon 2080. Cette observation est illustrée sur la **Figure 5-14**. Aussi, sur la **Figure 2-4** du **sous-chapitre 2.4**: (i) les auteurs projettent une légère augmentation de cet écoulement sur les horizons 2020 et 2050, ce qui est confirmé par certains de nos résultats et ceci plus pour l'horizon 2020 que pour l'horizon 2050, (ii) et projettent également une diminution de l'écoulement à l'horizon 2080. À noter que sur la **Figure 5-14**, les deux valeurs qui signalent une forte (et une moyenne) augmentation de l'écoulement de surface à l'horizon 2020, sont obtenues en injectant, respectivement dans GR2M non-distribuée (et dans GR2M semi-distribuée), le jeu

de paramètres du modèle SimulHyd non-distribuée. Ces injections de paramètre restent les seules qui sont raisonnable en se basant sur les résultats du **sous-chapitres 3.3.2 et 3.4** (et des **annexes 6**) sur l'interchangeabilité des jeux de paramètres entre les modèles GR2M et SimulHyd dans leurs deux versions (non-distribuée et semi-distribuée). Ces résultats prouvent que le modèle GR2M (dans ses versions non-distribuée et semi-distribuée) augmente en efficacité s'il s'agit de le valider sur une **période 1 (du passé)** utilisant les paramètres calés du SimulHyd non-distribuée sur une **période 2 (du présent)**. La méthodologie d'établissement des fichiers Pluie et ETP du future (2014-2113) juste en faisant une diminution des valeurs de 10% des fichiers du passé (1914-2013), impose de considérer, au regard de l'interchangeabilité des jeux de paramètres (entre versions de modèle), l'Horizon 2020 (2010-2039), bâti en parti à partir des donnée Pluie et ETP de la période 1914-1939, comme le passé par rapport à la période de référence 1950-1995, et les horizons 2050 et 2080 comme le future (cf. **Annexes 9**, pour les résultats de l'interchangeabilité des jeux de paramètres à ces horizons).

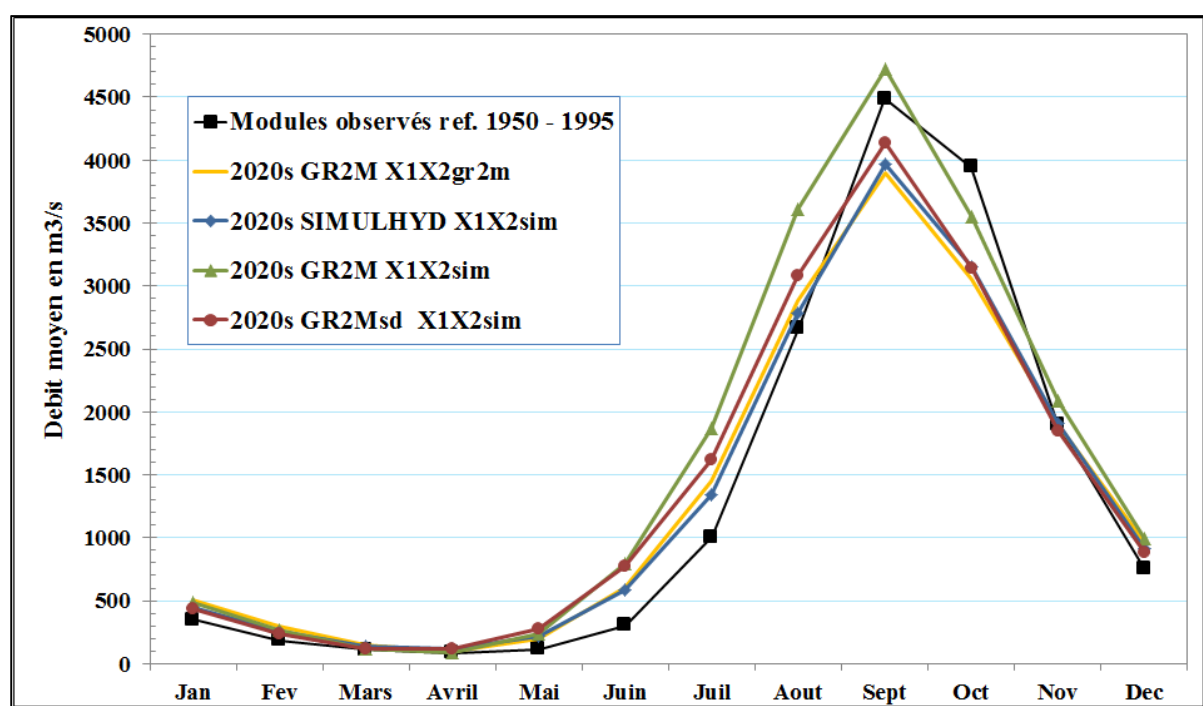


Figure 5-11 : Modèles hydrologiques GR2M non-distribuée et SimulHyd non-distribuée pour projection saisonnières de débits mensuels sur le bassin du fleuve Niger à la station de Koulikoro (au Mali) , à l'horizon 2020.

(Les résultats sont obtenus en utilisant les modèles hydrologiques GR2M non-distribuée et SimulHyd non-distribuée avec leur jeu de paramètres respectifs, calés sur la période de référence (1950-1995) ; GR2M non-distribuée et semi-distribuée sont aussi (ré) utilisées mais avec les paramètres de SimulHyd non-distribuée. Les données hydroclimatiques (pluie et ETP) sont des données d'observation du CRU et diminuées de 10% de leurs valeurs pour une projection à l'horizon 2020 [2010-2039]).

À noter que sur les **Figures 5-11, 5-12, et 5-13**, et par rapport à la **Figure 2-4** (de la bibliographie), tous les pics de débits observés et simulés se produisent au mois de

Septembre : le pic sur le **Figure 2-4** se situe au mois de Septembre pour les trois simulations d'anomalies SRES-A2), alors que ce pic pour la période d'observation de référence (1966-1995) se trouve au mois d'octobre, et ceci pour une station située à Mopti (en Aval de la station de Koulikoro). A la station hydrométrique de Koulikoro, les pics se produisent en moyenne au mois de Septembre (plus que au mois d'Octobre) sur la période 1950-1995 (**Figures 5-8 et 5-9**), et nos simulations ne pouvaient que les reproduire (en moyenne en Septembre) due au fait que nos données d'entrées sont des reproductions des données du passé avec une diminution d'amplitude de 10% et non des données issues des sorties des Modèles de Circulation Générale.

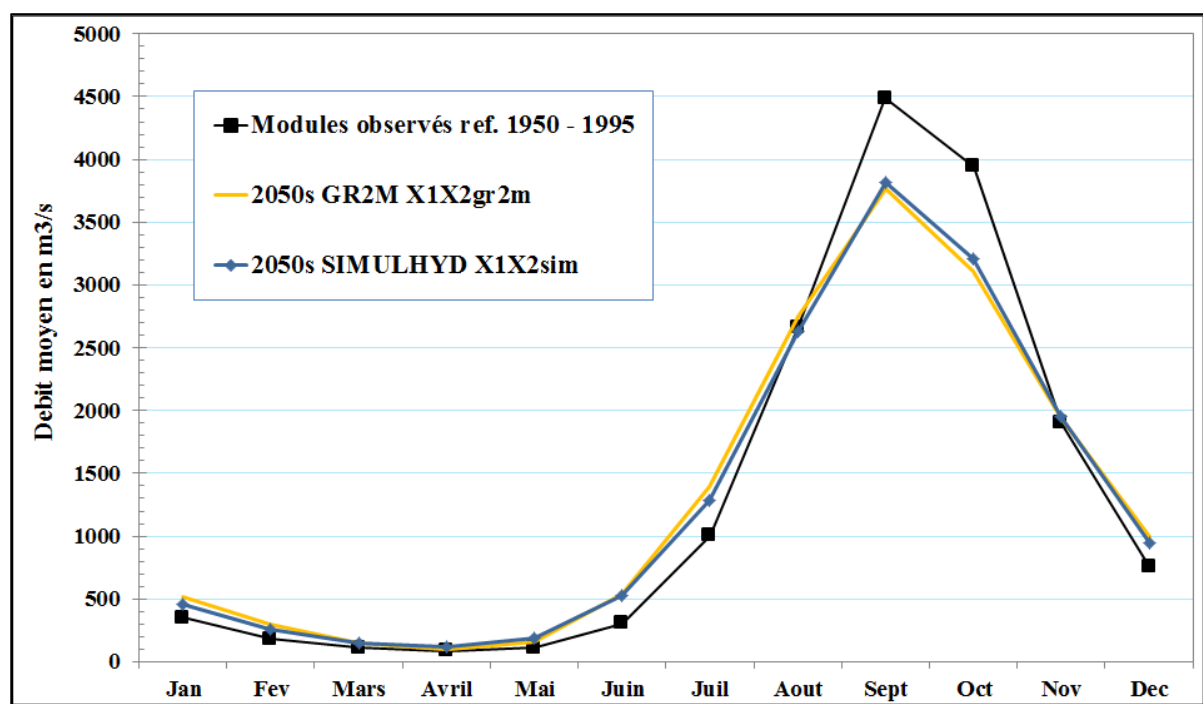


Figure 5-12 : Modèles hydrologiques GR2M non-distribuée et SimulHyd non-distribuée pour projections saisonnières de débits mensuels sur le bassin du fleuve Niger à la station de Koulikoro (au Mali), à l'horizon 2050.

(Les résultats sont obtenus en utilisant les modèles hydrologiques GR2M non-distribuée et SimulHyd non-distribuée avec leur jeu de paramètres respectifs, calés sur la période de référence (1950-1995) ; GR2M non-distribuée et semi-distribuée sont aussi (ré) utilisées mais avec les paramètres de SimulHyd non-distribuée. Les données hydroclimatiques (pluie et ETP) sont des données d'observation du CRU et diminuées de 10% de leurs valeurs pour une projection à l'horizon 2020 [2010-2039]).

La comparaison des **Figures 5-11 et 5-12** montre que les projections aux horizons 2020 et 2050 sont quasiment les mêmes en amplitude, avec les versions non-distribuées des modèles GR2M et SimulHyd utilisant leur propre jeu de paramètres respectifs ; sur chacune de ces figures et sur la **Figures 5-13** les modèles GR2M non-distribuée et SimulHyd non-distribuée produisent quasiment les mêmes résultats de saisonnalité (toujours avec leur propre jeu de paramètres respectif). L'analyse de la **Figure 5-13** ci-dessous (par rapport aux **Figures 5-11 et 5-12**) montre que les amplitudes des débits (en saison de hautes-eaux) sont loin plus faibles

à l'horizon 2080 qu'aux horizons 2020 et 2050 ; c'est ce qui apparaît clairement sur la **Figure 5-14**.

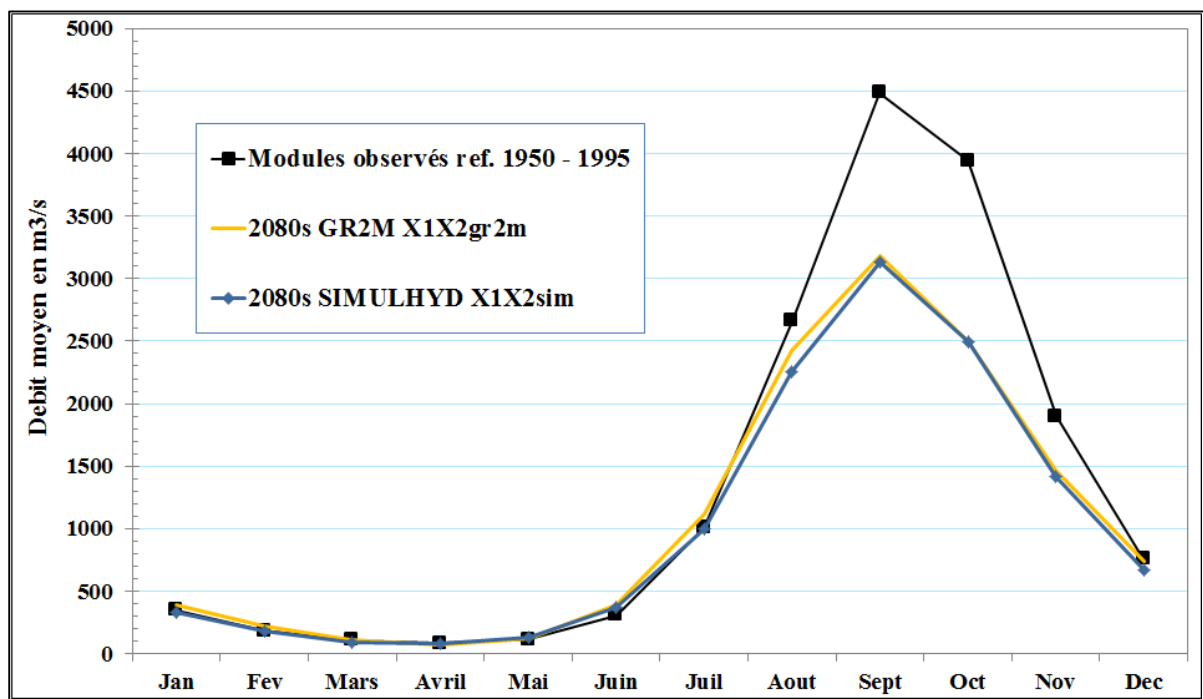


Figure 5-13 : Modèles hydrologiques GR2M non-distribuée et SimulHyd non-distribuée pour projections saisonnières de débits mensuels sur le bassin du fleuve Niger à la station de Koulikoro (au Mali) , à l'horizon 2080.

(Les résultats sont obtenus en utilisant les modèles hydrologiques GR2M non-distribuée et SimulHyd non-distribuée avec leur jeu de paramètres respectifs, calés sur la période de référence (1950-1995). Les données hydroclimatiques (pluie et ETP) sont des données d'observation du CRU et diminuées de 10% de leurs valeurs pour une projection à l'horizon 2080 [2070-2099]).

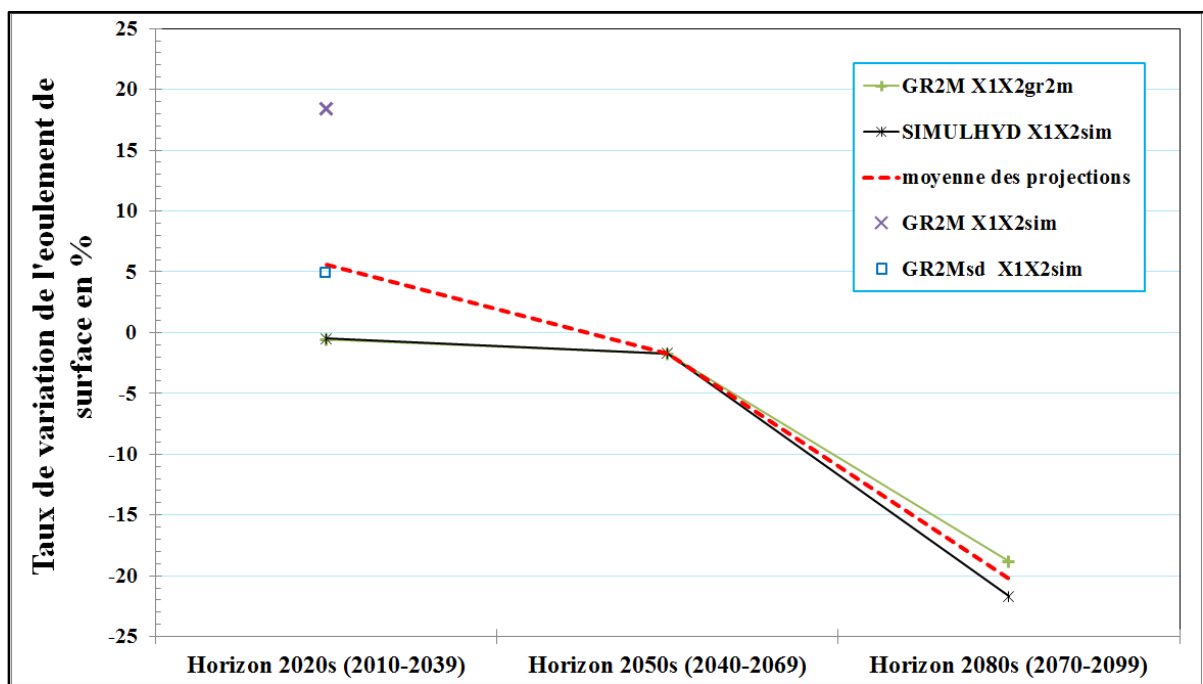


Figure 5-14 : Changement de l'écoulement annuel moyen (calculée en %).

(Les données d'entrées des modèles, Pluie et ETP, sont des données d'observation du CRU et diminuées de 10% de leurs valeurs. Le taux de variation à l'Horizon 2020 est calculé par rapport à la référence de 1950-1995).

5.3 Processus de sub-surface et nécessaire adaptation du modèle SimulHyd

5.3.1 Fondement pratique

La pluviométrie alimente en eau les processus comme l'interception, l'évapotranspiration, l'écoulement de surface, mais aussi l'infiltration et la recharge des nappes. Déjà, en pleine période de déficit pluviométrique, Traore (1985) mettait en évidence la relation entre la recharge des nappes et la fluctuation saisonnière du niveau piézométrique, à *Tioribougou*, au nord-Ouest de la station de Koulikoro, en 1983. Le volume d'eau annuel à l'exutoire des bassins versants est constitué généralement de l'écoulement de surface et d'eau provenant des nappes. Ainsi, dans le bassin du fleuve Niger à Koulikoro, entre les périodes 1951-1960 et 1981-1989, une baisse décennale moyenne de 20% de la pluviométrie occasionne une baisse décennale moyenne de 55% des écoulements fluviaux (Bricquet et al., 1996). L'intervalle entre ces deux périodes précitées inclut un premier cran de baisse pluviométrique sur 1971-1980, dont l'empreinte se fait sentir durant les décennies suivantes (dénommé *effet mémoire de la sécheresse* par certains auteurs). Cette variation disproportionnée entre la pluie et l'écoulement fluvial serait due à une diminution très marquée de l'écoulement souterrain signalée par une hausse du coefficient de tarissement des nappes (Olivry et al., 1993 ; Bricquet et al., 1996 ; Bamba et al., 1996 ; Mahé et al., 2000 & 2013; Dao et al., 2012). Par ailleurs, entre les décennies 1970 et 1980, le coefficient d'écoulement annuel sur le même fleuve (Niger) a diminué de 23 à 16% (Bricquet et al., 1997). Le tarissement de ces nappes correspond au prolongement de la phase descendante des hydrogrammes annuel, et leurs vidange peut être modélisée par une fonction exponentielle (Roche, 1963). L'évidence de la non-linéarité de la relation Pluie-débits (**Figure 5-15**) dans la sous-région Ouest Africaine, s'explique à travers la variation du coefficient de tarissement (**Figure 5-16**). Cette variation rend compte d'un phénomène de sub-surface. Et la baisse de la contribution des nappes au débit d'écoulement serait à *l'origine* de ce phénomène (de sub-surface) dans la sous-région Ouest Africaine. Ainsi Mahé et al., (2000) s'intéressent à la relation entre la pluie, le débit de Janvier et le niveau piézométrique observé sur un ensemble de 27 puits en observation, entre 1981 et 1997 (**Figure 5-17**), dans la partie malienne du bassin versant du Bani. En plus d'une bonne corrélation entre la pluie et le débit de Janvier ; l'impact de la haute pluviométrie de 1994 sur le niveau de la nappe, qui augmente rapidement d'une part, et suivit d'autre part d'une diminution précoce et progressivement lent sur environ deux ans, conduisent ces auteurs à fortifier une hypothèse préexistante et d'en proposer une autre.

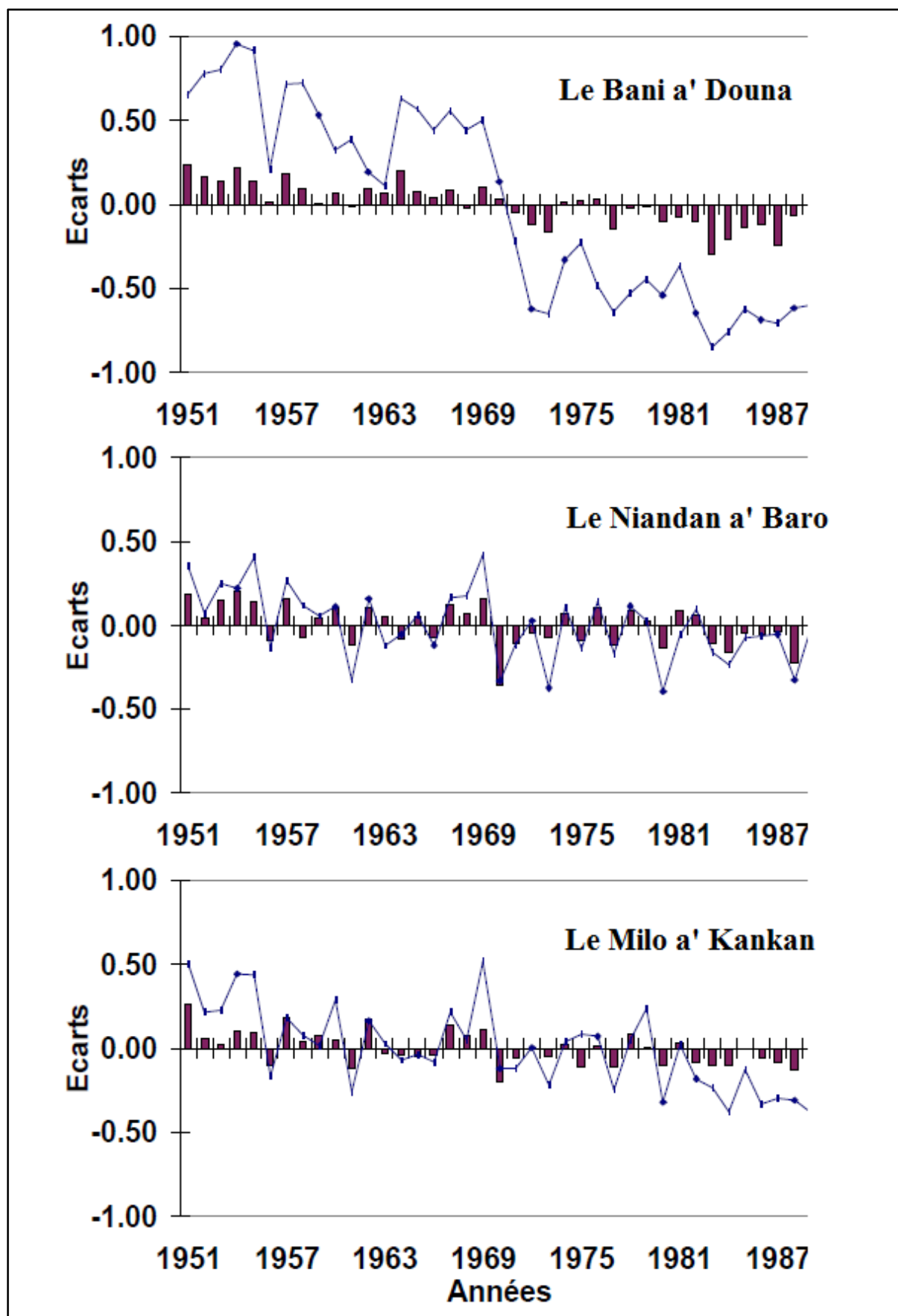


Figure 5-15 : Variation de débits (ligne) et de pluie (barre) sur trois bassins en Afrique de l'Ouest. (D'après Bamba et al., 1996).

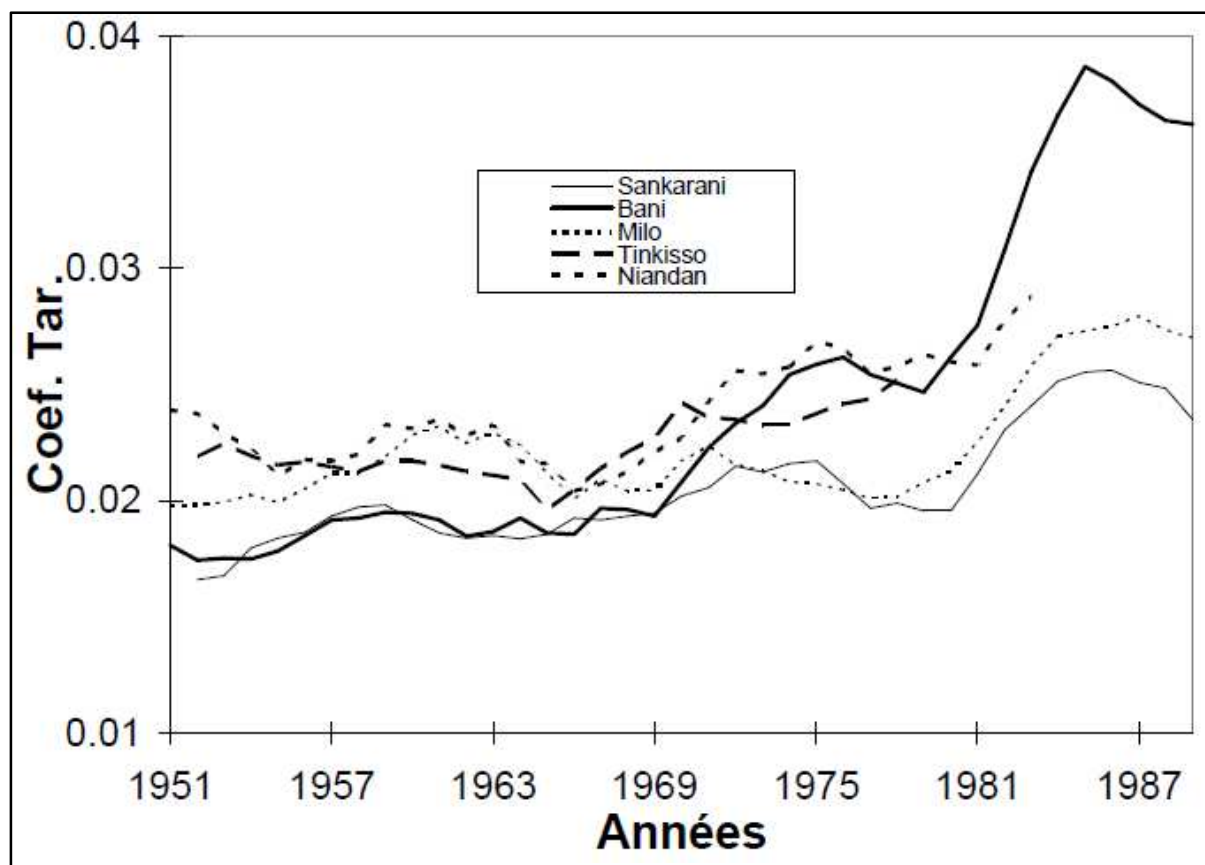


Figure 5-16 : Évolution du coefficient de tarissement sur cinq cours d'eau en Afrique de l'ouest (D'après Bamba et al., 1996).

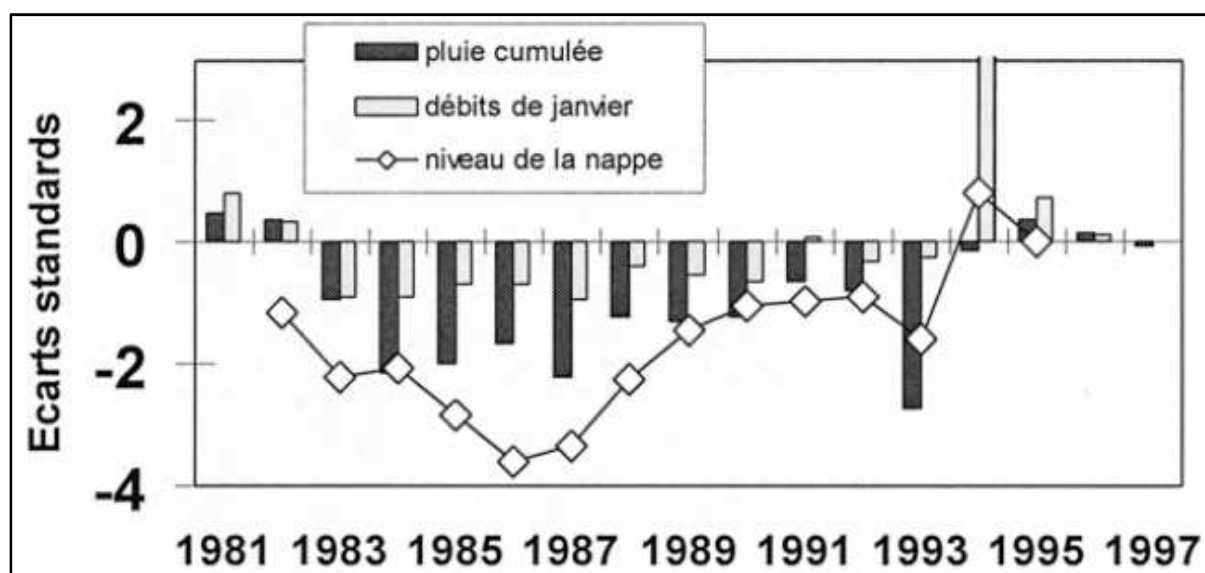


Figure 5-17 : Évolution de 3 variables sur le bassin versant du Bani à Douna. (D'après Mahé et al., 2013).

L'hypothèse d'Olivry et al., (1993), concernant l'impact d'une diminution des ressources souterraines affectant apparemment la relation pluie-débit, et ceci à travers l'étude de coefficient de tarissement, qui suit une bonne corrélation avec les débits de basses-eaux (Figure 5-18 ci-dessous). Ce travail sur le coefficient de tarissement est poursuivi dans

(Bamba et al., 1996) sur d'autres rivières de la même sous-région, mettant davantage en relief la non-linéarité de la relation pluie-débit (**Figure 5-16**). Mahé et al., (2000), proposent que le déstockage précoce et rapide de la crue de 1994 sur le Baní serait due à la plus faible capacité de stockage des aquifère du Baní et aux échanges rapides entre nappe et eaux de surface.

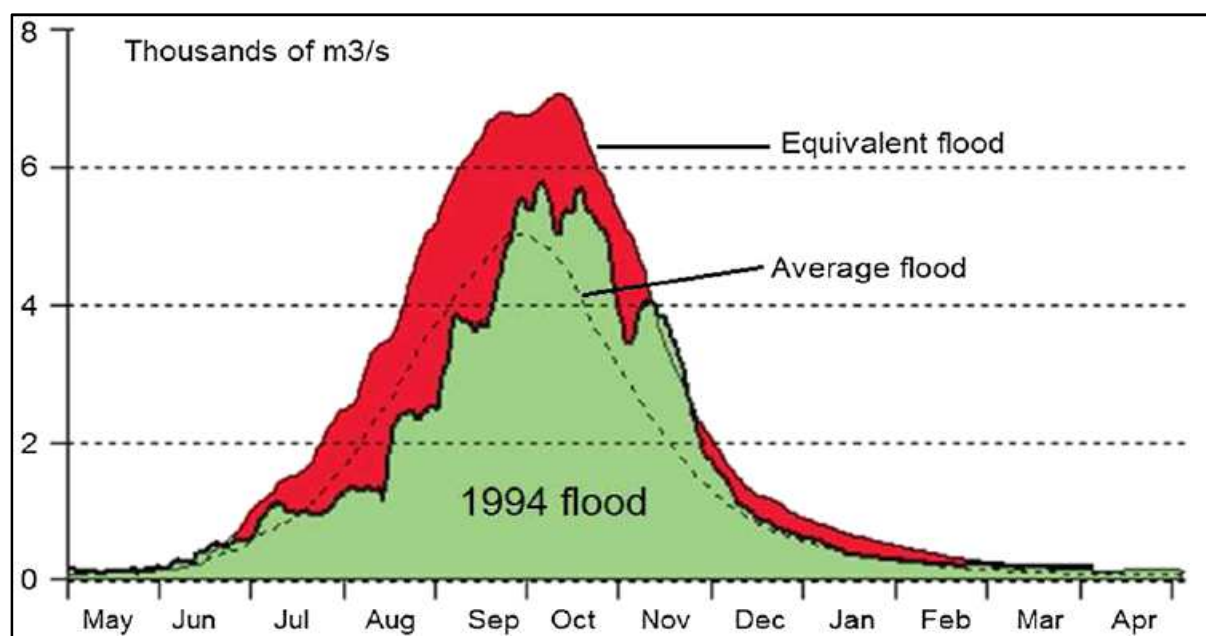


Figure 5-18 : Crue de 1994 et comparaison avec une crue équivalente.
(Crue de 1994, la crue moyenne 1951-1990 et crue moyenne (années 1953, 1955, 1957, 1967 et 1969) de pluviométrie équivalente. D'après Bricquet et al., 1996 ; Mahé et al., 2013)

Dans le **sous-chapitre 5.3.2** suivant, nous avons appliqué, sur quatre sous-bassins, la méthode de détermination du coefficient de tarissement durant une « année standard » constitué des modules de débits de la période 1950-1970 ; idem pour la période après 1971-1995.

5.3.2 Processus de sub-surface et sensibilité du modèle SimulHyd

5.3.2.1 Calcul du coefficient de tarissement sur sorties des modèles

La version de Makhlouf et al., (1994) du modèle GR2M, et reprise par le laboratoire HydroSciences Montpellier remplaçant la constante A par WHC, ou par le terme $1/X1*WHC$ (Koné, 2007 ; et dénommé *SimulHyd* dans Koné, 2013), ne tient pas compte des processus de sub-surface à proprement dite. Toutefois le jeu de paramètres de ces modèles peut porter la signature de la variabilité de ces processus entre une période dite de Hautes-eaux et une autre dite de Basses-eaux. L'analyse de la **Figure 5-19** suivante, permet d'apprécier un palier (ou plateau) sur la période 1950-1970, un autre palier plus élevé sur la période 1971-1981, et une

troisième plus prépondérant sur la période 1981-1990. Sur ces trois périodes, ces paliers correspondraient successivement, au *fonctionnement normal de l'hydrosystème* (le coefficient de tarissement α moyen = 0.023 Jour⁻¹), au *bassin versant sous régime de baisse pluviométrique* (α moyen = 0.028 Jour⁻¹), et enfin au *fonctionnement sous régime de sécheresse* (α moyen = 0.038 Jour⁻¹). Nous adoptons la dénomination période de hautes eaux pour 1950-1970 ; et période de basses eaux pour 1971-1995 (et ceci, au détriment de la haute pluviométrie de 1994 et à celui du changement de tendance constaté après cette date). Nous nous proposons d'adapter la méthode graphique de détermination du coefficient de tarissement, à partir des débits mensuels (Roche, 1963 ; Bamba et al., 1996), aux données d'une « année standard » constituée si possible des modules de débits de la période 1950-1970 (**Tableau 3-1**); et idem pour la période 1971-1995. C'est ainsi que sur les **Figures 5-20 à 5-24**, un coefficient de tarissement pour chaque période (de Hautes-eaux et Basses-eaux) est déterminé respectivement aux stations hydrométriques, de Kouroussa sur le Niger, de Baro sur le Niandan ; de Kankan sur le Milo, et de Mandiana sur le Sankarani.

Protocole de simulation

Nous avons discuté dans le **sous-chapitre 1.4.1** l'intérêt des différentes formes de la fonction critère de Nash. La forme logarithmique favorise la simulation des débits des Basses eaux (décrue et tarissement) alors que la forme habituelle privilège ceux des hautes eaux (remontée et crue). Contrairement à nos habitudes jusqu'ici, où la modélisation des débits de pointe était privilégiée à travers la fonction Nash, nos simulations pour le calcul des coefficients de tarissement partant de la sortie des modèles seront faites suivant l'optimisation de la forme logarithmique de cette fonction critère de Nash (**Encadré 1-3**). Ainsi, En modélisation non-distribuée après la phase de calibration de chaque modèle (GR2M et SimulHyd) sur chacune des périodes (hautes eaux [1950-1970], et basses eaux [1971-1995]), nous procédons à la validation croisée entre les deux périodes (et ceci, pour chacun des modèles séparément : *Résultats en calibration*, ensuite *Résultats en validation croisée*). Cette dernière démarche est reprise, toujours en faisant la validation croisée entre les deux périodes, et en inter-changeant les jeux de paramètres (X1, X2) entre les modèles : *Résultats en validation croisée (entre périodes) avec interchangeabilité (entre modèles) des jeux de paramètres (Variante 1)*. Enfin, nous choisissons d'injecter, en contexte de validation croisée, les paramètres de SimulHyd non-distribuée dans les versions semi-distribuées des modèles GR2M et SimulHyd, à l'exception que les paramètres de GR2M non-distribuée calé sur 1950-1970 est injecté dans GR2M semi-distribuée sur 1971-1995 : *Résultats en validation croisée (entre périodes) avec*

injection des paramètres des versions non-distribuées dans les versions semi-distribuées (Variante 2).

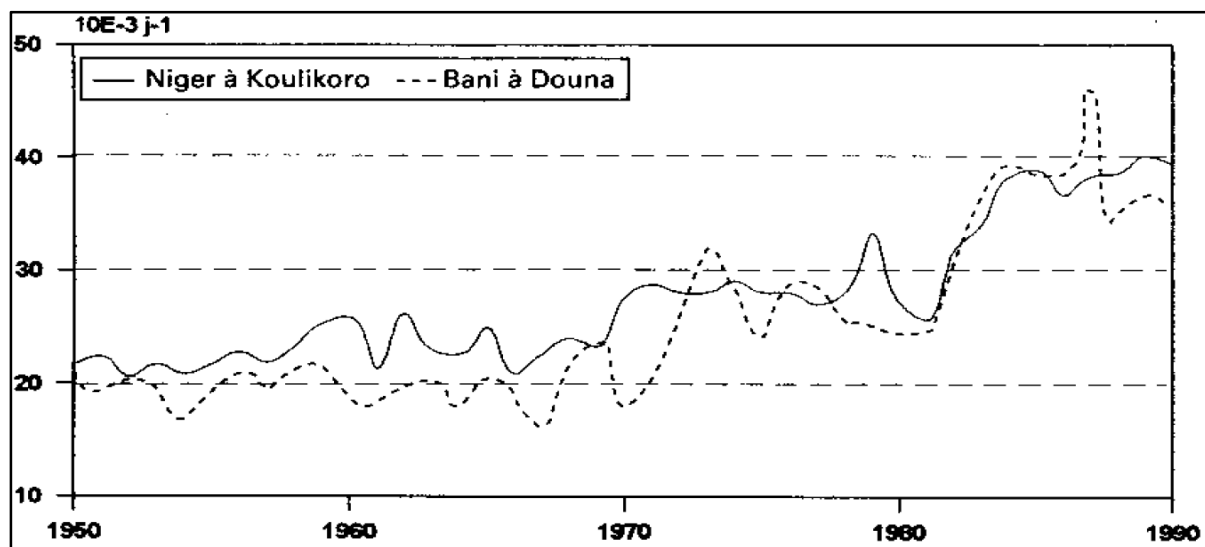


Figure 5-19 : Estimation de coefficients de tarissement sur le Niger (à Koulikoro) et sur le Bani (à Douna). (D'après Bricquet et al., 1997).

Modélisation non-distribuée : résultats en Calibration (Figures 5-20, 5-22 à 5-24)

En optant pour fonction diagnostique, la forme logarithmique du critère de performance de Nash, les modèles GR2M et SimulHyd reproduisent mieux, en phase de calage, le coefficient de tarissement sur la période de hautes eaux (1950-1970) ; ce qui est loin d'être le cas sur la période de basses eaux (1971-1995), et Il arrive même que SimulHyd reproduise l'effet inverse observé (une diminution du coefficient de tarissement au lieu d'une augmentation). Ces constats sont davantage valables en utilisant la forme logarithmique de Nash, qu'en utilisant sa forme habituelle.

Modélisation non-distribuée : résultats en validation croisée (Figures 5-20, 5-22 à 5-24)

Pour chaque modèle, l'utilisation du jeu de paramètre calé sur la période de basses eaux (1971-1995), en validation sur la période de hautes eaux (1950-1970), permet de reconstituer le coefficient de tarissement observé (Alpha) sur cette période de basses eaux! Comme si l'*Hydrosystèmes-en-période-hautes-eaux-de-référence* se comporte comme un « modèle en boîte noire » qui prend en son entrée (X1, X2)_[basses eaux] et produit à sa sortie Alpha_[basses eaux]. L'inverse est relativement moins bien vérifié.

Modélisation non-distribuée : résultats en validation croisée (entre périodes) avec interchangeabilité des jeux de paramètres ((entre modèles) (Figures 5-21 : variante 1)

Sur la période de hautes eaux (période 1 : 1950-1970) la simulation obtenue avec GR2M (utilisant le jeu de paramètres calé de SimulHyd sur la période 2 : 1971-1995) reproduit un coefficient de tarissement plus proche de celui de la période 2, et compris entre ceux des deux périodes. Similairement, sur la période de basses eaux (période 2 : 1971-1995); le même constat est fait sur la période de basses eaux avec le modèle GR2M (utilisant le jeu de paramètres calé de SimulHyd sur la période 1 : 1950-1970), seulement que cette fois-ci le coefficient de tarissement est plus proche de celui de la période 1. Dans ce protocole de simulation le modèle SimulHyd (utilisant le jeu de paramètres calé de GR2M) ne produit pas un résultat réaliste : le coefficient de tarissement produit est inférieur à celui obtenu avec les données d'observation sur les deux périodes, séparément.

Modélisation semi-distribuée : résultats en validation croisée avec injection des paramètres des versions non-distribuées dans les versions semi-distribuées. (Figures 5-21 : variante 2)

Les résultats pour cette variante 2, restent similaires à ceux décrits pour la variante 1, à la différence qu'ici SimulHyd semi-distribuée reproduit le même coefficient de tarissement que GR2M semi-distribuée sur la période de basses eaux (période 2 : 1971-1995), reproduisant le coefficient de tarissement de la période de haute eaux ; et que sur la période de hautes eaux son résultat s'approche plus de celui de cette période (de hautes eaux).

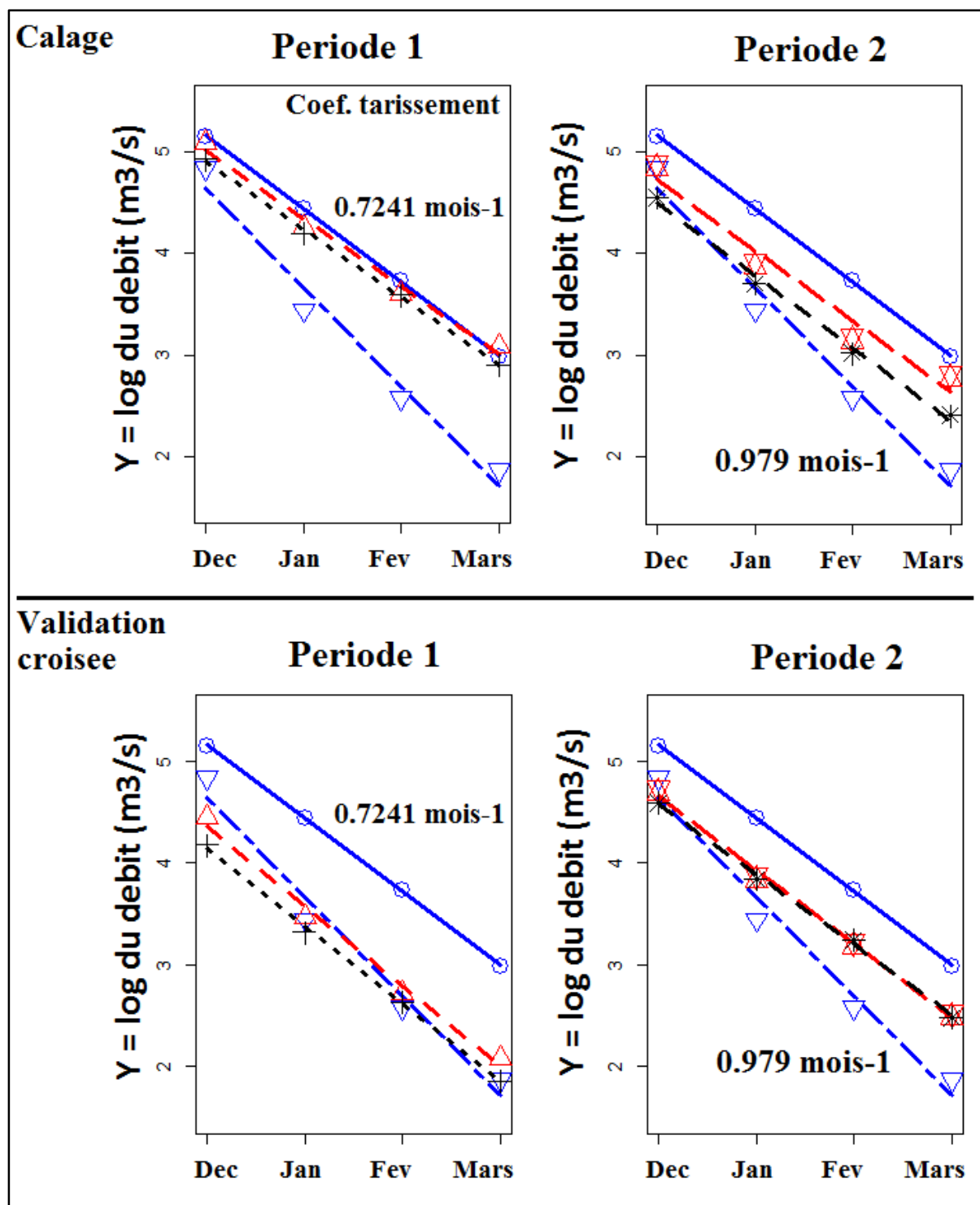


Figure 5-20 : Estimation de coefficients de tarissement sur le fleuve Niger (à Kouroussa).
 (Période 1 de hautes eaux [1950-1970] ; période 2 de basses eaux [1971-1995]. Simulation de GR2M en noire [trait pointillé et le signe plus] ; Simulation de SimulHyd en rouge [trait avec brisures et triangle pointé vers le haut] ; les observations sont en bleu [signe rond et trait plein avec une pente de 0.7241 sur 1950-1970 ; signe triangle pointé vers le bas et trait en brisures pointillées avec une pente de 0.979 sur 1971-1995].

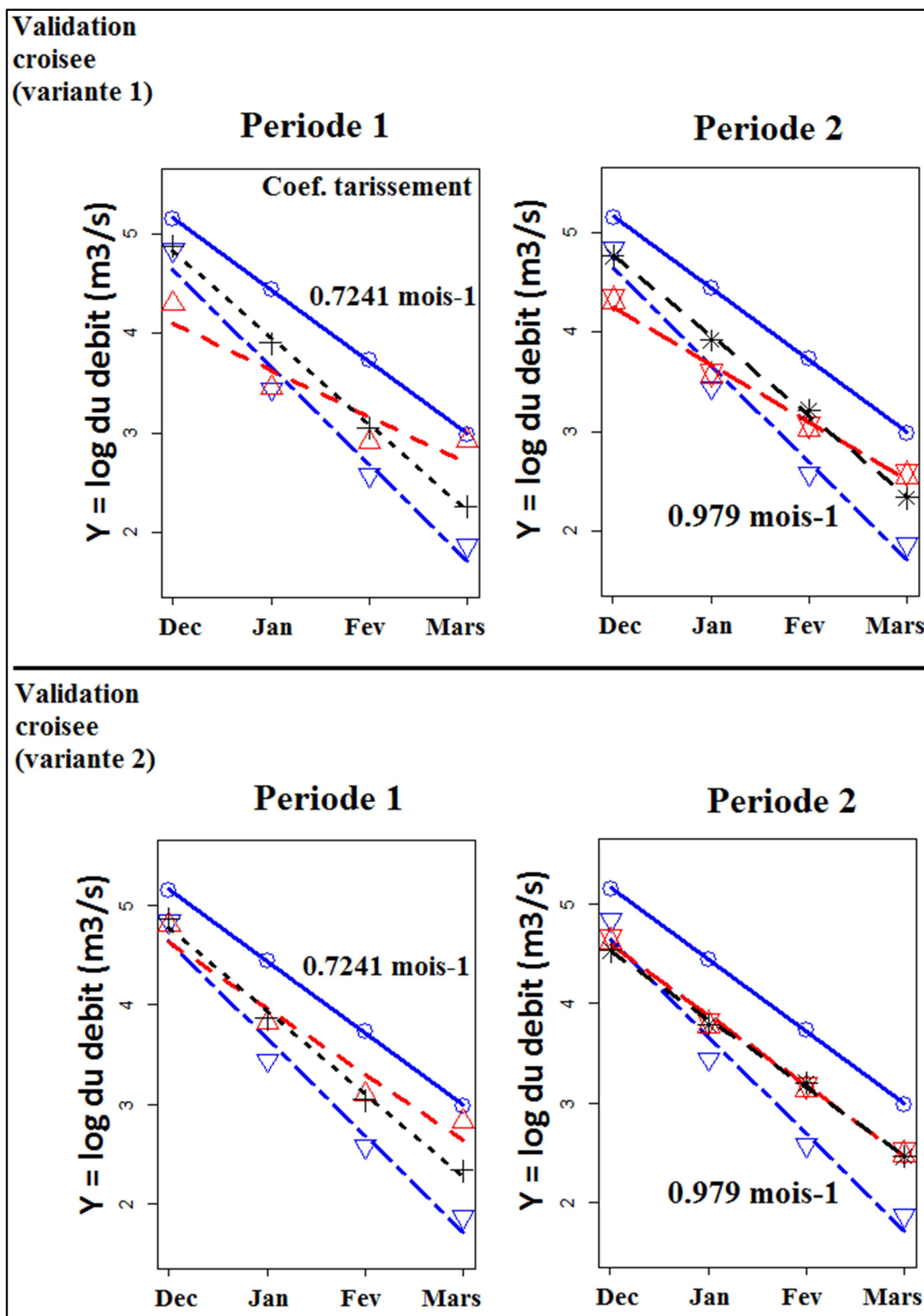


Figure 5-21 : Estimation de coefficients de tarissement sur le fleuve Niger (à Kouroussa), variantes. (Période 1 de hautes eaux [1950-1970] ; période 2 de basses eaux [1971-1995]. Simulation de GR2M en noire [trait pointillé et le signe plus] ; Simulation de SimulHyd en rouge [trait avec brisures et triangle pointé vers le haut] ; les observations sont en bleu [signe rond et trait plein avec une pente de 0.7241 sur 1950-1970 ; signe triangle pointé vers le bas et trait en brisures pointillées avec une pente de 0.979 sur 1971-1995]).

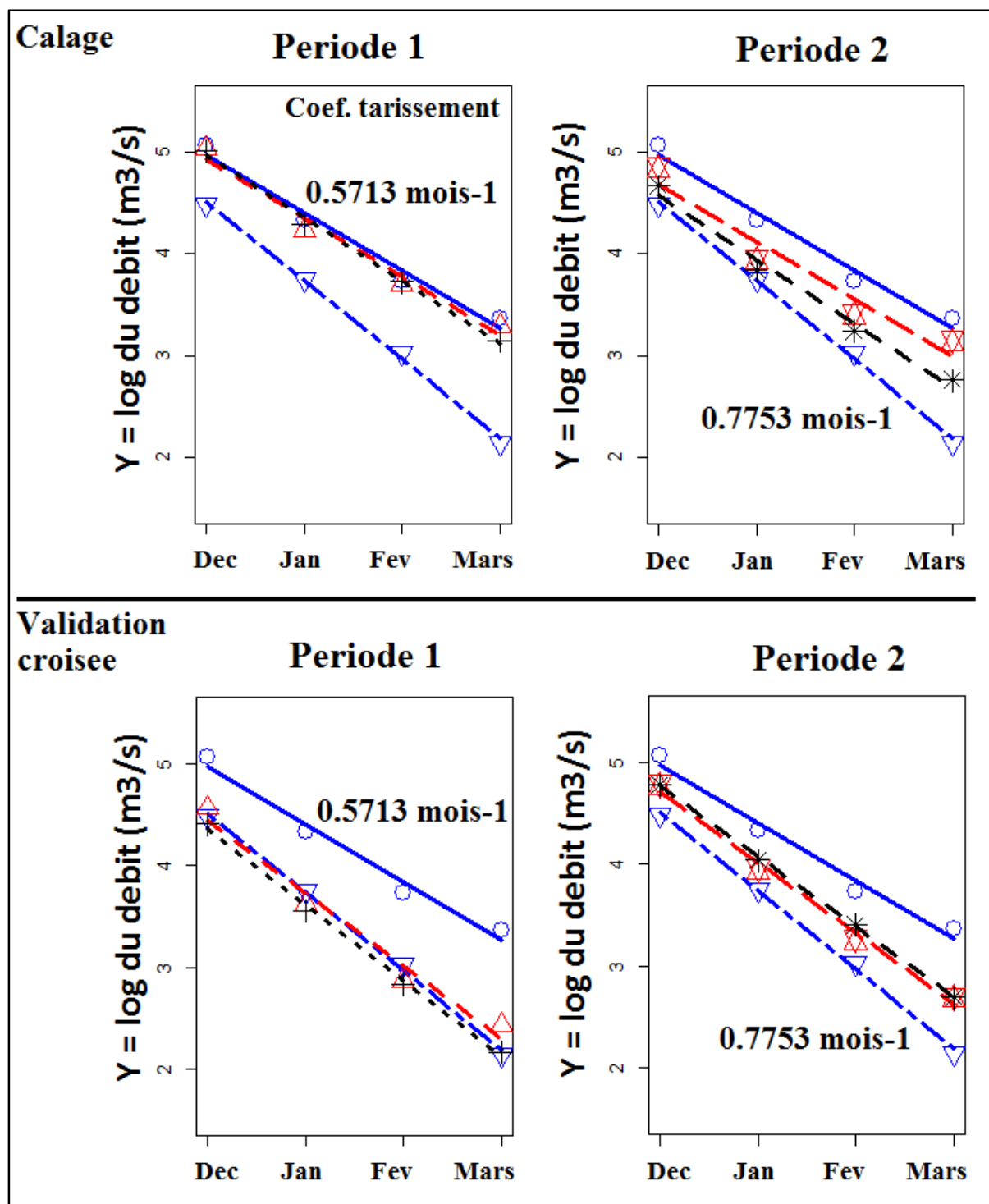


Figure 5-22 : Estimation de coefficients de tarissement sur le Niandan (à Baro).
 (Période 1 de hautes eaux [1950-1970] ; période 2 de basses eaux [1971-1995]. Simulation de GR2M en noire [trait pointillé et le signe plus] ; Simulation de SimulHyd en rouge [trait avec brisures et triangle pointé vers le haut] ; les observations sont en bleu [signe rond et trait plein avec une pente de 0.5713 sur 1950-1970 ; signe triangle pointé vers le bas et trait en brisures pointillées avec une pente de 0.7753 sur 1971-1995].

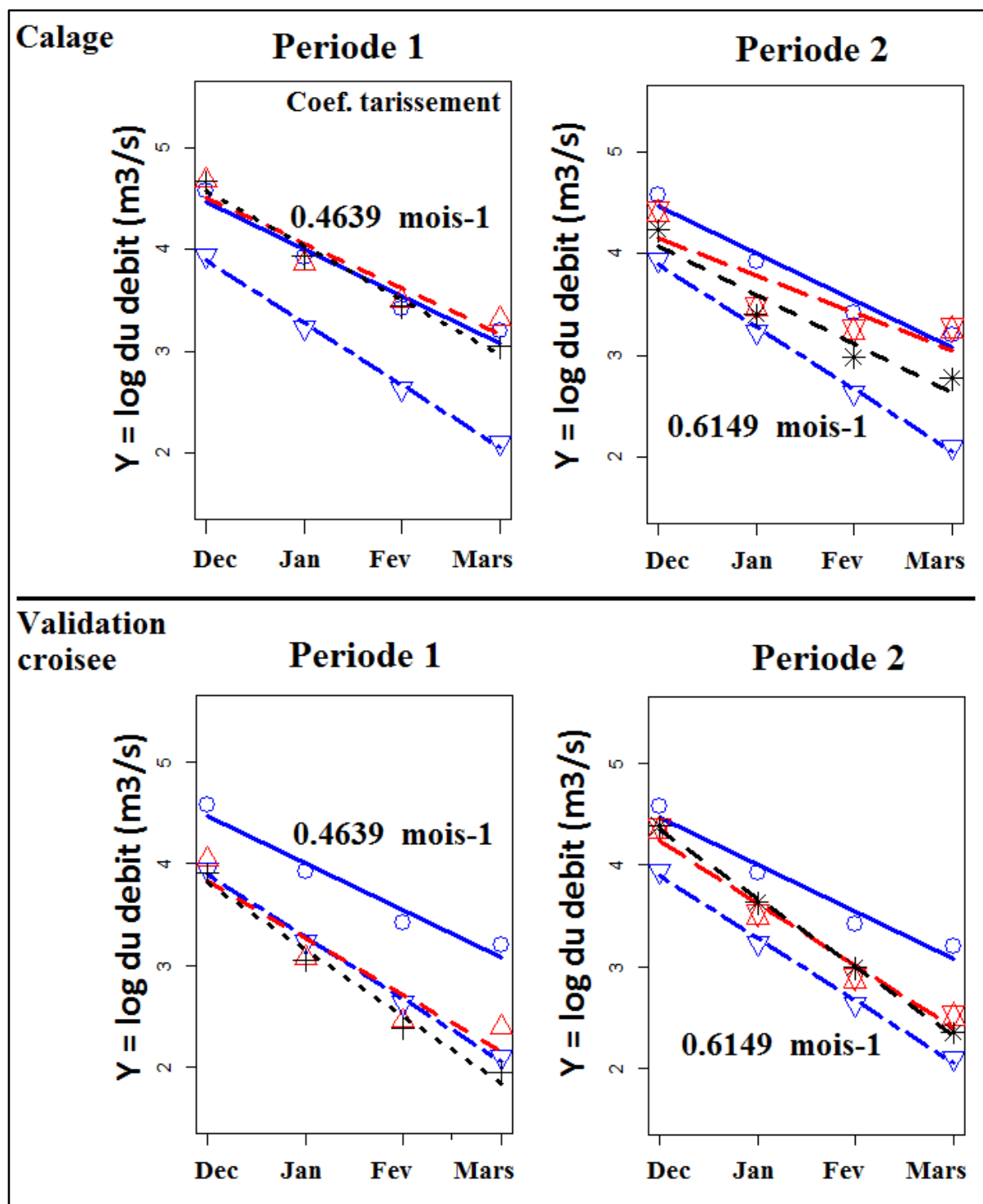


Figure 5-23 : Estimation de coefficients de tarissement sur le Milo (à Kankan).

(Période 1 de hautes eaux [1950-1970] ; période 2 de basses eaux [1971-1995]. Simulation de GR2M en noire [trait pointillé et le signe plus] ; Simulation de SimulHyd en rouge [trait avec brisures et triangle pointé vers le haut] ; les observations sont en bleu [signe rond et trait plein avec une pente de 0.4639 sur 1950-1970 ; signe triangle pointé vers le bas et trait en brisures pointillées avec une pente de 0.6149 sur 1971-1995].

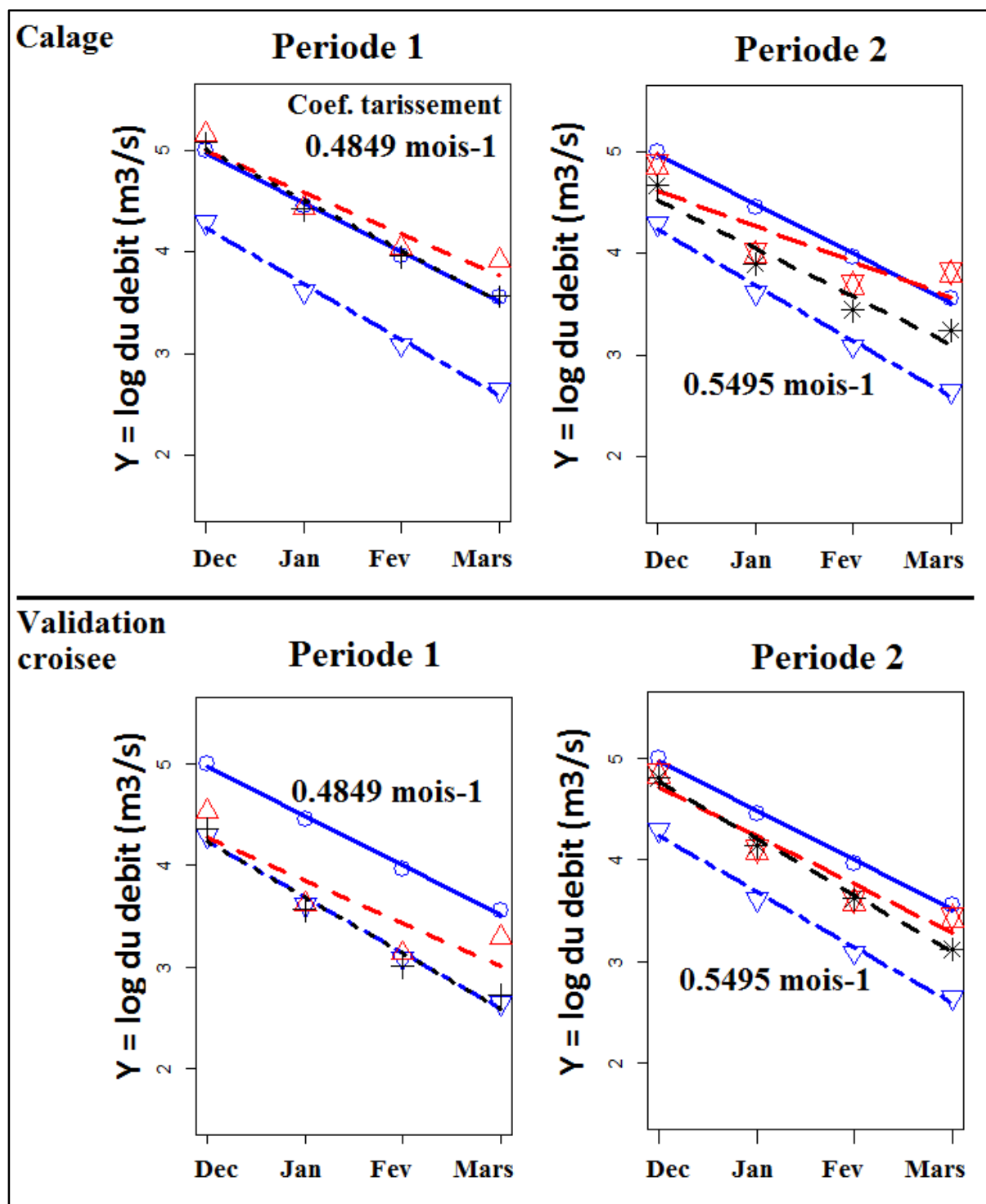


Figure 5-24 : Estimation de coefficients de tarissement sur le Sankarani (à Mandiana). (Période 1 de hautes eaux [1957-1970] ; période 2 de basses eaux [1971-1995]. Simulation de GR2M en noire [trait pointillé et le signe plus] ; Simulation de SimulHyd en rouge [trait avec brisures et triangle pointé vers le haut] ; les observations sont en bleu [signe rond et trait plein avec une pente de 0.4849 sur 1957-1970 ; signe triangle pointé vers le bas et trait en brisures pointillées avec une pente de 0.5495 sur 1971-1995).

5.3.2.2 Implication des résultats pour la modélisation

Généralement en calage, c'est seulement sur la période de hautes-eaux, 1950-1970, que les modèles arrivent à reproduire la pente des observations (**Figures 5-20, 5-22 à 5-24**). Ces pentes correspondent au coefficient de tarissement en Mois⁻¹. Sur ces Figures, les graphiques d'en bas sont les simulations en contexte de validation utilisant le même modèle avec le jeu de paramètres (X1, X2) calé sur l'autre période : la validation croisée. Ce qui est moins attendu, dans ce contexte de validation croisée, est que la simulation qui devrait correspondre à la pente de la période de hautes-eaux correspond à celle de basses-eaux, et l'inverse n'est pas toujours vérifié. Le jeu de paramètres garde l'empreinte de la période sur laquelle il a été calé ; et restitue cette signature lorsqu'il est injecté dans un *Hydrosystème-Période-de-Reference* (1950-1970, période de hautes-eaux). Ce constat partant des modèle de type GR de la présente étude, pourra être exploité pour proposer une méthodologie de détermination des coefficients de tarissement *alpha* de la période de basses-eaux sur un bassin non-jaugé, et celle-ci en prolongement de la méthodologie « *hydro-géostatistique* ». Une démarche serait d'appliquer la méthodologie *Hydro-géostatistique* partant des données et paramètres d'une période de basses-eaux dans la sous-région. Ensuite, le jeu de paramètres (X1, X2)_[basses-eaux] estimé du bassin non-jaugé est injecté dans ce même bassin en fonctionnement *d'Hydrosystème-Période-de-Reference* (période de hautes-eaux), et le coefficient de tarissement obtenu représente *alpha*_[basses-eaux]. Sur la **Figure 5-25** ci-dessous concernant le Haut Niger à Koulikoro, nous pourrions considérer la période 1950-1970 comme une fenêtre de référence de Hautes eaux, et la période 1980-1990, une fenêtre de basses eaux. La méthodologie *hydro-géostatistique* pourra être appliquée sur ces deux périodes séparément.

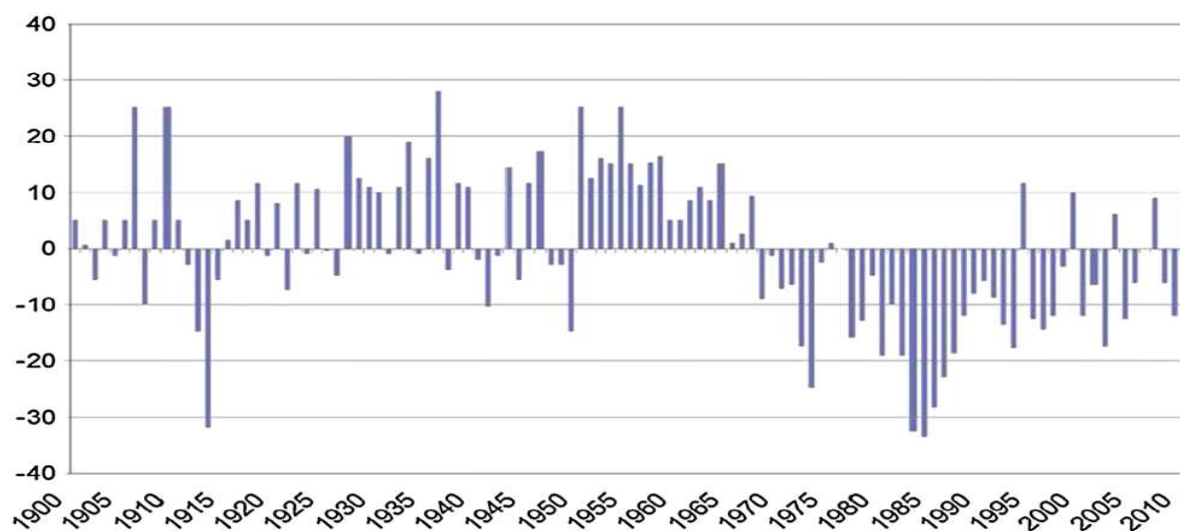


Figure 5-25 : Index pluviométrique sur le bassin du haut Niger (à Koulikoro).
(D'après Mahé et al., 2013)

5.4 Remarques conclusives sur le chapitre 5

Performance comparée des modèles. Deux approches complémentaires sont adoptées, l'une dite régionale où la valeur la plus élevée de la série de débits observés de chaque station de mesure est considérée, et l'autre dite ponctuelle, et qui concerne quinze valeurs de débits maximum à la station de Koulikoro sur la période 1907-1999. Le constat, partant de la première approche (régionale), est que la différence relative entre les débits maximum observé et calculé par les modèles est au plus 36 % ; et cette différence entre les résultats de simulation des modèles GR2M et SimulHyd par rapport à l'observation est au plus 8%. Ces pourcentages obtenus partant de la deuxième approche (ponctuelle) sont successivement de 50% et 6%. Le modèle SimulHyd simule mieux le débit max que le modèle GR2M ; l'exception est faite à la station de Baranama où les deux modèles surestiment le débit max. Cette situation de surestimation du débit max est constatée lors de l'approche ponctuelle en Septembre 1985 et 1991 à la station de Koulikoro.

Simple hypothèse de baisse pluviométrique de 10%. Les projections des modèles GR2M et SimulHyd produisent les mêmes saisonnalités sur un horizon considéré, seulement que le concept d'interchangeabilité de jeu de paramètres entre versions de modèles induit des différences de comportement entre ces deux modèles. Les projections aux horizons 2020 et 2050 sont quasiment les mêmes en amplitude, avec les versions non-distribuées des modèles GR2M et SimulHyd utilisant leur propre jeu de paramètres respectifs ; et les amplitudes des débits (en saison de hautes-eaux) sont loin plus faibles à l'horizon 2080 qu'aux horizons 2020 et 2050. Toutes ces projections sont faites partant d'une simple hypothèse de baisse pluviométrique de 10%, sans l'exploitation des sorties des Modèles de Circulation Générale (MCG).

Le coefficient de tarissement. Qui est généralement calculé partant des données d'observation journalier ou mensuel, peut rendre compte des processus de sub-surface lors de la participation de l'écoulement souterrain au débit à l'exutoire d'un bassin versant, en période de basses eaux. L'adaptation de la méthode mensuelle, du calcul de ce coefficient, aux données d'une « année standard » constituée si possible des modules de débits de la période 1950-1970 (Tableau 3-1), idem pour la période 1971-1995, a servi d'explorer certaines subtilités des modèles GR2M et SimulHyd.

En optant pour fonction diagnostique, la forme logarithmique du critère de performance de

Nash, les modèles GR2M et SimulHyd reproduisent mieux, en phase de calage, le coefficient de tarissement sur la période de hautes eaux (1950-1970) ; ce qui est loin d'être le cas sur la période de basses eaux (1971-1995), et Il arrive même que SimulHyd reproduise l'effet inverse observé (une diminution du coefficient de tarissement au lieu d'une augmentation). Ces constats sont davantage valables en utilisant la forme logarithmique de Nash, qu'en utilisant sa forme habituelle. Enfin, pour chaque modèle, l'utilisation du jeu de paramètre calé sur la période de basses eaux (1971-1995), en validation sur la période de hautes eaux (1950-1970), permet de reconstituer le coefficient de tarissement observé (alpha) sur cette période de basses eaux. L'Hydrosystèmes-en-période-hautes-eaux-de-référence se comporte comme un « modèle en boîte noire » qui prend en son entrée (X1, X2) [basses eaux] et produit à sa sortie Alpha [basses eaux]. L'inverse est relativement moins bien vérifié. Le jeu de paramètres garde l'empreinte de la période sur laquelle il a été calé ; et la restitue lorsqu'il est injecté dans un Hydrosystème-Période-de-Reference.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et Perspectives

Cette étude a permis l'exploration et la découverte de bases de données hydro-climatiques et leur modélisation dans des sous-bassins versants du fleuve Niger. L'un des aspects de réussite de cette étude est l'accentuation sur des combinaisons de deux modèles dérivant l'un de l'autre (GR2M et SimulHyd) et de deux concepts de modélisation (non-distribution et semi-distribution) pour démontrer une complémentarité réussie entre ces quatre versions de modèle dans l'amélioration de notre acuité à la simulation et à la prédiction de comportements des systèmes hydrologiques. Nous pouvons conclure que le code numérique de nos modèles, après avoir été intensivement confronté aux résultats des études précédentes, est stabilisé et qu'un nouveau type modélisation hydrologique vienne de s'implanter à l'École Nationale d'Ingénieurs Abderhamane Baba Touré, ENI-ABT, au Mali. À travers une nouvelle version du modèle GR2M appelée **SimulHyd (Simulation des Système Hydrologiques)**, des procédés statistiques ont permis d'investiguer des subtilités qui diffèrent les versions non-distribuées et celles semi-distribuées de ces deux modèles : il s'agit de la méthode d'intercomparaison des modèles, du protocole inter-modèles, du protocole inter-bassins, de la formule d'atténuation d'incertitudes, et de l'expression d'un coefficient de pondération des sorties des mailles en modélisation semi-distribuée. Les outils usuels pour effectuer des études comparatives des modèles (les critères de Nash, de robustesse...) sont parfois quasi-inaptes à mieux différencier les versions non-distribuée et semi-distribuée des modèles GR2M et SimulHyd, d'où l'une des raisons du développement de la méthode d'intercomparaison précitée. Outre la validation du modèle SimulHyd sur le bassin du fleuve Niger en son exutoire à Koulikoro, la possibilité d'inter-changer les jeux de paramètres entre les versions des modèles GR2M et SimulHyd a été démontrée. Il ressort que, sur un bassin versant donné, le modèle SimulHyd simule mieux les débits après 1970, en utilisant le jeu de paramètres calé avec le modèle GR2M (avant 1970) ; et cela reste vrai si les périodes et les modèles sont concomitamment inversés. **Plus spécifiquement, sur la période après 1970 :** (Figure 3-4c) le modèle SimulHyd semi-distribuée a en moyenne, sur un jeu de seize bassins versants et par rapport à la procédure habituelle de validation (avec ses propres jeux de paramètres calés), une valeur du critère de Nash plus élevée en validation utilisant chacun des jeux de paramètres obtenus avec les modèles GR2M non-distribuée, SimulHyd non-distribuée et GR2M semi-distribuée. **Sur la période avant 1970 :** (Figure 3-5c) c'est le modèle GR2M non-distribuée qui, dans le même contexte précédemment décrit, a une valeur du critère de Nash plus élevée en validation utilisant chacun des jeux de paramètres obtenus

avec les modèles SimulHyd non-distribuée, GR2M semi-distribuée et SimulHyd semi-distribuée. Ces travaux ont conduit à la réorganisation de l'expression analytique du modèle GR2M, précédemment établie par le mémoire (Koné, 2007), pour en proposer une formulation correcte de celle du modèle SimulHyd. L'une des avancées aussi que limitations de ce travail de thèse est d'arriver à montrer (à travers le *protocole inter-bassins*) l'utilité, voire la nécessité, de l'outil géostatistique pour explorer certaines subtilités des versions des modèles GR2M et SimulHyd pouvant conduire à comprendre et/ou à améliorer davantage ces modèles dans leurs versions non-distribuées et semi-distribuées. Ainsi, une méthodologie *hydro-géostatistique* permettant de prédéterminer les paramètres des modèles hydrologiques a été proposée, avec des résultats de validation hydrologique d'une part et géostatistique d'autre part, pour l'application sur des bassins versants non-jaugés. L'une des perspectives de cette thèse est d'user de la compréhension acquise à travers l'application de la formule d'atténuation des incertitudes pour combiner dynamiquement les versions non-distribuée et semi-distribuée d'un modèle pour en produire qu'un seul résultat de sortie, ainsi la notion de non-distribution, ou globalité, disparaîtra au sein de la nouvelle version de ce modèle conduisant à un nouveau jeu de paramètres optimal en calibration et une valeur de critère de performance plus élevée. L'application exclusive de la méthode d'atténuation des incertitudes aux modèles semi-distribués permet à ces derniers de dépasser en performance leur versions non-distribuées correspondantes. Le modèle SimulHyd pourra être l'objet d'extension de son domaine d'utilisation en explorant la possibilité de son couplage à un modèle de sub-surface comme le modèle de Beven (1979) : une mesure de l'amélioration apportée pourrait se baser sur la capacité du modèle à reproduire en calage le coefficient de tarissement en période de basses eaux. Une assomption pour cette étude de couplage pourra être la connaissance méticuleuse des linéaments morphostructuraux à la surface du bassin versant et l'accumulation de ces données (dans la modélisation) à travers la géostatistique. Cette prise en compte d'informations morphostructurales ouvrira la voie à de nouvelles possibilités de réduction de paramètres (en nombre) et à l'estimation des jeux de paramètres des modèles hydrologiques sur des bassins versants non jaugés, où il existe un manque de chronique de débits observés. Les résultats de sorties du modèle conceptuel SimulHyd pourraient, dans le contexte de rareté de données d'observation en densité adéquate pour la modélisation, servir de données de comblement ou d'estimation de variables en entrée des modèles à base semi-physique ou physique, comme SWAT et WEAP, pour une modélisation poussée sur le bassin du fleuve Niger, en Afrique de l'Ouest, et sur des fleuves similaires dans le monde.

Références

- ALCAMO J., DÖLL P., HENRICHS T., KASPAR F., LEHNER B., RÖSCH T. & SIEBERT S., 2003. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 48:3, 317-337
- ALCAMO J., FLÖRKE M. & MÄRKER M., 2007. Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52:2, 247-275
- ARDOIN-BARDIN S., 2000. Prise en compte des spécificités de l'évapotranspiration en zone semi-aride dans la modélisation globale de la relation pluie-débit. Mémoire de DEA. Université Montpellier II.
- ARDOIN-BARDIN S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographique en zone Soudano-Sahélienne. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II.
- Ardoïn-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J.E., Mahé, G., Niel†, H., Dieulin, C. (2009). Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. **Hydrological Sciences Journal**, 54, 1, 77-89.
- Bamba, F., Mahé, G., Bricquet, J.P., Olivry, J.C. (1996). Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du Haut Niger et de la Cuvette Lacustre. In : Fritsch J.M., Paturel J.E. & Servat E. (Eds) : Réseaux hydrométriques, réseaux télématiques, réseaux scientifiques : nouveaux visages de l'Hydrologie Régionale en Afrique, **XIIèmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM**, Montpellier, CD-Rom ORSTOM, 26 p.
- BEVEN K. J. & KIRKBY M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24:1, 43-69
- Boyer, J.F., Dieulin, C., Rouché, N., Crès, A., Servat, E., Paturel, J.E., Mahé, G. (2006). SIEREM: an environmental information system for water resources. In: *Water Resource Variability: Hydrological Impacts*. Proc. of the 5th FRIEND World Conference, La Havana, Cuba, **IAHS Publ. 308**, 19-25.
- Bricquet, J.P., Mahé, G., Bamba, F., Olivry, J.C. (1996). Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). Conférence à la Mémoire de Jean Rodier : L'Hydrologie Tropicale. Géoscience et outil pour le développement. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier (1914-1994). Paris 3-4 mai 1995. **AISH Publ. 238**, Chevallier P. & Pouyaud B. (ed). IAHS, Wallingford (UK), 157-166.
- Bricquet, J.P., Bamba, F., Mahé, G., Touré, M., Olivry, J.C. (1997). Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. **Revue des Sciences de l'eau**, 10, 3, 321-337.
- BRUNET-MORET Y., CHAPERON P., LAMAGAT J.P., MOLINIER M., 1986. Monographie hydrologique du fleuve Niger. Coll. Monnog. Hydrol. No. 8, ORSTOM, Paris. Tome I: Niger supérieur.
- CHILES J.-P. & DELFINER P., 2012. *Geostatistics: Modelling Spatial Uncertainty*. Second Edition. Wiley series in probability and statistics. ISBN: 978-0-470-18315-1
- CLANET J. C. & OGILVIE A., 2009. CPWF Project Report: Basin Focal Project Niger. Project Number 64. Institut de Recherche pour le Développement (IRD), for submission to CGIAR Challenges Program On WATER & FOOD, Decembre. UMR G-eau , Montpellier, France
- CLARKE, R. T., 2008. Issues of experimental design for comparing the performance of hydrologic models. *Water Resour. Res.*, 44, W01409, doi:10.1029/2007WR005927.
- CUNDERLIK J. M. & SIMONOVIC S. P., 2007. Hydrologic Models for Inverse Climate Change Impact Modeling.

- Challenges for Water Resources Engineering in a Changing World Winnipeg, Manitoba, August 22 – 24, 2007
- DAO A., KAMAGATE B., MARIKO A., GOULA B. T. A., SEGUIS L., MAIGA H. B. & SAVANE I., 2010. Variabilité Climatique et Réponse Hydrologique du Bassin Versant Transfrontalier de Kolondieba au Sud du Mali. *European Journal of Scientific Research*. ISSN 1450-216X Vol.43 No.4 (2010), pp.435-444. © EuroJournals Publishing, Inc. 2010. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
- DEZETTER A., 1991. Modélisation globale de la relation pluie débit. Application en zone de savanes soudanaises (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université Montpellier II.
- Dezetter, A., Girard, S., Paturel, J.E., Mahé, G., Ardoin-Bardin, S., Servat, E. (2008). Simulation of runoff in West Africa: Is there a single data-model combination that produces the best simulation results ? **Journal of Hydrology**, **354**, 203-212.
- Dezetter, A., Paturel, J.E., Ruelland, D., Ardoin-Bardin, S., Ferry, L., Mahé, G., Dieulin, C., Servat, E. (2010). 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. In: *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.
- Diello, P., Paturel, J.E., Mahé, G., Karambiri, H., Servat, E. (2006). Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'Ouest. In: *Water Resource Variability: Hydrological Impacts. Proc. of the 5th FRIEND World Conference, La Havana, Cuba*, **IAHS Publ. 308**, 691-697.
- DIELLO P., 2007. Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II.
- DIGGLE P. J. & RIBEIRO P. J., 2007. *Model-based Geostatistics*. Springer Series in Statistics: ISBN 987-0-387-32907-9
- EDIJATNO, MICHEL C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche* 2, 113-122.
- ELSHORBAGY A., PANU U. S. & SIMONOVIC S. P., 2001. Analysis of cross-correlated chaotic streamflows. *Hydrological Sciences Journal*, 46:5, 781-793
- ERREAU, 1993. *Évaluation Régionale Des Ressources En Eau, Application A La Cote D'ivoire : Rapport De Synthèse*
- FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, JRC, 2012a. *Harmonized World Soil Database (version 1.2)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- FAO, 2012b. *Projet de gestion intégrée des ressources naturelles du Massif du Fouta Djallon (EP/INT/503/GEF) : Tendances de l'hydrologie des petits bassins versants dans le Massif du Fouta Djallon. Serie De Documents Du Projet Du Massif Du Fouta Djallon 1.*
- GALÉA G. & PRUDHOMME C., 1994. Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le ÈVRE de Draix. *Hydrol. continent.*, vol. 9, no 2, 1994 : 139-151
- GARRICK M., CUNNANE C., Nash J.E., 1977. A criterion of efficiency for rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 36 (1978) 375-381.
- GHOSH S. & MISRA C., 2010. Assessing Hydrological Impacts of Climate Change: Modeling Techniques and Challenges. *The Open Hydrology Journal*, 2010, 4, 115-121
- GOTTSCHALK L., BELDRING ST., ENGELAND K., TALLAKSEN L., SÆLTHUN N. R., KOLBERG S. & MOTOVILOV Y., 2001. Regional/macroscale hydrological modelling: a Scandinavian experience,

Hydrological Sciences Journal, 46:6, 963-982

- HATTERMANN F., KRYSANOVA V., WECHSUNG F. & WATTENBACH M., 2002. Multiscale and Multicriterial Hydrological Validation of the Eco-hydrological Model SWIM. Potsdam Institute for Climate Impact Research (fred.hattermann@pik-potsdam.de)
http://www.iemss.org/iemss2002/proceedings/pdf/volume%20uno/429_hattermann.pdf
- HAZIZA E., 2003. Modélisation mensuelle pluie-débit/ apports de la spatialisation- cas des données de sols. Mémoire de DEA. Université Montpellier 2.
- HOOGENBOOM G., JONES J.W., WILKENS P.W., PORTER C.H., BOOTE K.J., HUNT L.A., SINGH U., LIZASO J.L., WHITE J.W., URYASEV O., ROYCE F.S., OGOSHI R., GIJSMAN A.J., & TSUJI G.Y., 2011. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.5 [CD-ROM]. University of Hawaii, Honolulu, HI
- HU T. S., LAM K. C. & NG S. T., 2001. River flow time series prediction with a range-dependent neural network. Hydrological Sciences Journal, 46:5, 729-745
- HUBERT P., 2001. Multifractals as a tool to overcome scale problems in hydrology. Hydrological Sciences Journal, 46:6, 897-905
- HUNDECHA Y., BARDOSSY A. & HANS-WERNER WERNER, 2001. Development of a fuzzy logic-based rainfall-runoff model. Hydrological Sciences Journal, 46:3, 363-376
- IPCC, 2014. The Synthesis Report of the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC Fifth Assessment Synthesis Report
- JIANG T., CHEN Y. D., XU C. Y., CHEN Xia., CHEN Xi., & SINGH V. P., 2007. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. Journal of Hydrology(2007)336, 316–333
- KABOUYA M, 1990. Modélisation pluie débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. Thèse de doctorat Université Paris XI.
- KOLDITZ O., RUGNER H., GRATHWOHL P., DIETRICH P. & STRECK T., 2013. WESS: an interdisciplinary approach to catchement research. Environ Earth Sci, 69:313-315. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2466-0>
- KONÉ S., 2007. Comparaison entre une modélisation semi-globale et une modélisation globale. Mémoire de DEA, Master Recherche .Université Montpellier 2.
- KONÉ S., 2013a, Niger River Basin – Hydrological Modelling: Enhancing Framework Accuracy. **Abstract# 239** presented at the Twenty Fourth Colloquium of African Geology (CAG24), Addis Ababa, Ethiopia. Jan. 8-14.
- KONÉ S., 2013b, Solar Radiation Management: African Participation Challenges. Fourth Interdisciplinary Summer School on Geoengineering, at Harvard University, Cambridge, MA, USA. 5-9 August.
- KONÉ S., 2013c, Connection Zones, Surface Water – Groundwater: Aquifers Associated To Niger Central Delta, In Mali. Abstract presented at the Second Groundwater and Global Palaeoclimate Signals (G@GPS) meeting, at Bobole, Maputo, Mozambique, October 14-19. http://www.gw-gps.com/wp-content/uploads/2013/10/Mozambique_Full_program-14-19_Oct_2013.pdf ; <http://www.gw-gps.com/wp-content/uploads/2014/01/Newsletter-1-2013.pdf> respectivement [Page 19, 04 September 2014] et [Page 11, 04 September 2014]
- KONÉ S., 2013d, Niger River Basin – Hydrological Modelling: Inter-changeability of parameters between models versions. Abstract H31B-1158 presented at 2013 Fall Meeting 2013, AGU, San Francisco, CA, 9-13 Dec. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFM.H31B1158K> ;

http://virtualoptions.agu.org/media/H31B-1158.+Niger+River+Basin+-+Hydrological+ModelingA+Inter-changeability+of+parameters+between+models+versions/1_2y7k40ob [04 September 2014]

- KONÉ S., 2014a, Solar Radiation Management and Olivine Dissolution Methods in Climate Engineering. Climate Engineering Conference 2014 (CEC14), at Scandic Hotel, Berlin, Germany. August 18-21. <http://www.ce-conference.org/poster-session-0> [04 September 2014]
- KONÉ S., 2014b, Hydrological Modelling Improvements Propositions and Applications Results on the Niger River, Abstract#14059, [GC53B-0522], to be presented at 2014 Fall Meeting, AGU, San Francisco, CA, [15-19 Dec.] <https://agu.confex.com/agu/fm14/webprogrampreliminary/Paper14059.html> [04 September 2014]
- KOUAMÉ K. F., BERNIER M., GONÉ D. L., Bachir SALEY M. B., LEFÈBVRE R., SORO N. & KOUDOU A., 2007. Intégration de données Géospatiales dans un modèle Hydrologique distribué pour la Simulation des écoulements des Eaux en milieu tropical humide de Côte d'Ivoire (Afrique de l'ouest). *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 217-235
- KUNDZEWICZ Z. W., MATA L. J., ARNELL N. W., DÖLL P., JIMENEZ B., MILLER K., OKI T., ŞEN Z. & SHIKLOMANOV I., 2008. The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 53:1, 3-1
- LAVADO C. W. S., 2010. Modélisation du bilan hydrique à pas de temps mensuel pour l'évaluation de l'impact du changement climatique dans le bassin Amazonien du Pérou. Thèse de doctorat. Université de Toulouse
- LOUMAGNE C., NORMAND M., RIFFARD M., WEISSE A., QUESNEY A., LE HÉGARAT-MASCLE S. & ALEM F., 2001. Integration of remote sensing data into hydrological models for reservoir management. *Hydrological Sciences Journal*, 46:1, 89-102
- MAIDMENT D. R., 1993. *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill International Edition. ISBN 0-07-039732-5
- Mahé, G., Olivry, J.C., Dessouassi, R., Orange, D., Bamba, F., Servat, E. (2000). Relations eaux de surface – eaux souterraines d'une rivière tropicale au Mali. **Comptes rendus de l'Académie des Sciences**, Série Iia, 330, 689-692.
- MAHE G., PATUREL J. E., SERVAT E., CONWAY D., & DEZETTER A., 2005. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modeling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *Journal of Hydrology* 300 (2005) 33–43
- MAHE G., 2006. Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20ème siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Habilitation à Diriger des Recherches. Université des Sciences et Techniques Montpellier 2, École Doctorale 148 Terre, Eau, Espace.
- Mahé, G., Paturel, J.E., Ardoin-Bardin, S., Boyer, J.F., Casenave, L., Crès, A., Dezetter, A., Dieulin, C., Girard, S., Rescan, M., Rouché, N., Servat, E. (2008). Climate and river runoff changes in West and Central Africa: past variability and prediction of water resources for the 21st century. Oral communication, **13th World Water Congress**, Montpellier, France.
- Mahé, G., Girard, S., New, M., Paturel, J.E., Cres, A., Dezetter, A., Dieulin, C., Boyer, J.F., Rouche, N., Servat, E. (2008). Comparing available rainfall gridded datasets for West Africa and the impact on rainfall-runoff modelling results, the case of Burkina-Faso. **Water SA**, 34, 9, 529-536.
- Mahé, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturel, J.E., Laraque, A., Meddi, M., Habaieb, H., Adeaga, O., Dieulin, C., Chahnez Kotti, F., Khomsi, K. (2013). The rivers of Africa: witness of climate change and human impact on the environment. **Hydrological Processes**, 27, 2105–2114.

- MAKHLOUF Z., & MICHEL C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *J. Hydrol.* 162, 299–318.
- MANDEVILLE A.N., O'CONNELL P.E., SUTCLIFFE J.V. & NASH J.E., 1970. River flow forecasting through conceptual models part III- The ray catchments at grendon underwood. *Journal of Hydrology* 11 (1970) 109-128.
- MOUELHI S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de doctorat de l'École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts/Université Paris VI
- NAJAFI M. R., MORADKHANI H., & JUNG I. W., 2011. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrol. Process.* 25, 2814–2826 (2011). DOI: 10.1002/hyp.8043
- NASH J. E., SUTCLIFFE J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290
- NELDER J. A., MEAD R., 1964. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal* 7(4), 308-313
<http://comjnl.oxfordjournals.org> [May 21, 2010]
- OKI T., AGATA Y., KANAE S., SARUHASHI T., YANG D. & MUSIAKE K., 2001. Global assessment of current water resources using total runoff integrating pathways. *Hydrological Sciences Journal*, 46:6, 983-995
- PATUREL, J. E., SERVAT, E. & VASSILIADIS, A., 1994. Sensitivity of conceptual rainfall–runoff algorithms to errors in input data – case of the GR2M model. *J. Hydrol.* 168, 111–125.
- PATUREL J. E., OUEDRAOGO M., MAHE G., SERVAT E., DEZETTER A., ARDOIN S., 2003. The influence of distributed input data on the hydrological modelling of monthly river flow regimes in West Africa. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 48(6), 881-890
- Paturel, J.E., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, J.F., Laroche, C., Mounirou, L., Lubès-Niel, H., Mahé, G. (2006). Modélisation hydrologique et régionalisation en Afrique de l'Ouest et centrale. Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parametrization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX, Paris (2004) and Foz de Iguacu (2005) workshops, **IAHS Publ.** 307, 278-287.
- Paturel, J.E., Laroche, C., Mounirou, L., Mar, L., Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Mahé, G., Servat, E. (2006). Essais de modélisation avec peu de données en Afrique de l'Ouest et Centrale. In: *Water Resource Variability: Hydrological Impacts*. Proc. of the 5th FRIEND World Conference, La Havana, Cuba, **IAHS Publ.** 308, 250-255.
- PATUREL J. E., SERVAT E., KOUAME B., LUBES H., OUEDRAOGO M. & MASSON J. M., 2007. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea - Part two: an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191: 16-36.
- PERRIN C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- PERRIN C., MICHEL C., ANDREASSIAN V., 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés. <http://www.cemagref.fr/webgr>
- PICOUET C., 1999. Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé : le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur. Thèse de Doctorat. Université Montpellier II.
- PILGRIM D. H., CHAPMAN T. G. & DORAN D. G., 1988. Problems of rainfall-runoff modeling in arid and semiarid regions. *Hydrological Sciences Journal*, 33:4, 379-400

- REIMANN C., FILZMOZER P., GARETT R. & DUTTER R., 2009. *Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R*. Wiley. ISBN: 978-0-470-98581-6
- RESCAN M., 2005. Prédiction des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale jusqu'en 2099 par application des sorties du modèle d'évolution du climat HadCM3 au modèle hydrologique GR2M. Mémoire de DEA. Université Montpellier 2.
- RIBSTEIN P., 1990. Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. Thèse de Doctorat. ISSN : 0767-2888. ISBN : 2-7099-0997-9. Editions de l'ORSTOM
- ROCHE., 1963. *Hydrologie de surface*, Ed. Gauthier-Villars, Paris
- RODIER J., 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'ouest du Congo. ORSTOM, Paris, France.
- Rouché, N., Mahé, G., Ardoin-Bardin, S., Brissaud, B., Boyer, J.F., Crès, A., Dieulin, C., Bardin, G., Commelard, G., Paturel, J.E., Dezetter, A., Servat, E. (2010). Constitution d'une grille de pluies mensuelles pour l'Afrique, période 1900-2000. *Sécheresse* 21, 4, 336-338.
- Sangaré, S., Mahé, G., Paturel, J.E., Bangoura, Y. (2002). Bilan hydrologique du fleuve Niger en Guinée de 1950 à 2000. *Sud Sciences et Technologies*, EIER, Ouagadougou, 9, 21-33.
- SCHULZE R. E., 2011. Approaches towards practical adaptive management options for selected water-related sectors in South African a context of climate change. ISSN 1816-7950 (On-line) = *Water SA* Vol. 37 No. 5 WRC 40-Year Celebration Special Edition 2011
- SERVAT E., DEZETTER A., 1988. SIMPLE et ROSEN: Deux méthodes d'optimisation non linéaire. ORSTOM
- SERVAT E., DEZETTER A., 1990. Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. *Hydrol. Continent.*, 5, no 2, 1990: 147-165.
- SERVAT E., DEZETTER A., 1991. Selection of calibration objective functions in context of rainfall-runoff modelling in Sudanese savannah area. *Hydrol. Sci. J* 36(4),307-330.
- SIVAKUMAR B., BERNDTSSON R. & PERSSON M., 2001a. Monthly runoff prediction using phase space reconstruction. *Hydrological Sciences Journal*, 46:3, 377-387
- SIVAKUMAR B., BERNDTSSON R., OLSSON J. & JINNO K., 2001b. Evidence of chaos in the rainfall-runoff process. *Hydrological Sciences Journal*, 46:1, 131-145
- SIVAPALAN M., TAKEUCHI K., FRANKS S. W., GUPTA V. K., KARAMBIRI H., LAKSHMI V., LIANG X., McDONNELL J. J., MENDIONDO E. M., O'CONNELL P. E., OKI T., POMEROY J. W. , SCHERTZER D., UHLENBROOK S. & ZEHE E., 2003. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48:6, 857-880
- SMITH K., BONIECKA L., BARI, MA & CHARLES, SP, 2009. The impact of climate change on rainfall and streamflow in the Denmark River catchment, Western Australia, Department of Water. *Surface water hydrology*, HY 30
- SUTANUDJAJA E. H., VAN BEEK L. P. H., DE JONG S. M., VAN GEER F. C., & BIERKENS M. F. P., 2014. Calibrating a large-extent high-resolution coupled groundwater-land surface model using soil moisture and discharge data. *Water Resources Research*, VOL. 50, 687–705, doi:10.1002/2013WR013807
- TOWLER E., RAJAGOPALAN B., GILLELAND E., SUMMERS R. S., Yates D., & KATZ R. W., 2010. Modeling hydrologic and water quality extremes in a changing climate: A statistical approach based on extreme value theory. *Water Resour. Res.*, 46, W11504, doi: 10.1029/2009WR008876.
- TRAORE A. Z., 1985. *Géologie et hydrogéologie des plateaux Mandingues (Mali) : région de Koula-Nossombougou*.

Applied geology. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1985. French. <tel-00783566>

TREIDEL H., MARTIN-BORDES J. L. & GURDAK J. J., 2012. Climate Change Effects on Groundwater Resources: a global synthesis of findings and recommendations. International Association of Hydrogeologists. CRC Press/Balkema, ISBN: 978-0-415-68936-6

UN-WATER/WWAP/2006/10, 2006. Rapport national sur la mise en valeur des ressources en eau :

Mali. Une étude de cas du WWAP préparée pour le 2^{ème} Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, L'eau, une responsabilité partagée.

WANG J. , HONG Y. , LI L., GOURLEY J. J., KHAN S. I., YILMAZ K. K., ADLER R. F., POLICELLI F. S., HABIB S., IRWN D., LIMAYE A. S., KORME T., OKELLO T., 2011. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model. Hydrological Sciences Journal, 56:1, 84-98

WILBY R. L., 2010. Evaluating climate model outputs for hydrological applications. Hydrological Sciences Journal, 55:7, 1090-1093

WHITEHEAD P. G., WILBY R. L., BATTARBEE R. W., KERNAN M. & WADE A. J., 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. Hydrological Sciences Journal, 54:1, 101-123

XU C.-Y. & SINGH V.P., 1996. A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations. Water Resources Management 12: 31–50, 1998

YANG M. S. & LEE K. T., 2001. Determination of probability distributions for Strahler stream lengths based on Poisson process and DEM, Hydrological Sciences Journal, 46:5, 813-824

YANG Y. S., KALIN R. M., ZHANG Y., LIN X. & ZOU L., 2001. Multi-objective optimization for sustainable groundwater resource management in a semiarid catchment. Hydrological Sciences Journal, 46:1, 55-72

ZANNOU A. B. Y., 2011. Analyse et Modélisation du Cycle Hydrologique Continental pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau au Bénin : Cas du Bassin de l'Ouémé à bétéro. Thèse de Doctorat. Université d'Abomey-Calavi.

Quelques sites web :

<http://www.hydrosciences.fr/sierem/>

<http://www.ipcc-data.org/>

<http://ceda-wps2.badc.rl.ac.uk/ui/home>

<http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/modelsData/HWSD/HWSD.en.html>

<http://cera-www.dkrz.de/>

<http://www.icsu-wds.org/services/data-portal>

<http://swat.tamu.edu/>

www.weap21.org

Glossaire de la modélisation : <http://www.aiaccess.net/>

Annexes

Annexe 1: Script

```
#####1971-1980#####
lif<-
read.table("cru_ts3.20.1971.19
80.pre.dat", header=F)
Ysn= 6.75
Yns= 14.25
Xwe= -14.25
Xew=-6.75
if (Yns<Ysn) {
y= Yns
Yns= Ysn
Ysn=y
}
if (Xew<Xwe) {
x= Xew
Xew= Xwe
Xwe=x
}
Y0=-89.75
X0=-179.75
grid= 0.5
nbreY= 10
TStepTotal= 12*nbreY
TS= TStepTotal-1
Y1id = round ((1/grid)*(Ysn-
Y0)-1, 0)
Y2id = round ((1/grid)*(Yns-
Y0)+1, 0)
X1id = round ((1/grid)*(Xwe-
X0)-1, 0)
X2id = round ((1/grid)*(Xew-
X0)+1, 0)
ks =lif[X1id ]
a=X1id+1
for ( i in a: X2id ) {
ks<- cbind(ks,lif[i])
}
sk = ks[Y1id,]
b=Y1id+1

for ( k in b: Y2id){
sk<- rbind(sk,ks[k,])
}
for ( n in 1: TS){
b1 = Y1id + n*360
b2 = Y2id + n*360
for ( j in b1: b2){
sk<- rbind(sk,ks[j,])
}
}
#####
af = nrow(sk)
bf = ncol(sk)
for(i in 1: af) {
for(j in 1 : bf) {cf = sk[i,j]
if(cf==-999) sk[i,j]=0
}
}
#####
sk1 = sk[1,]
b1= 12*(Y2id-Y1id+1)
for ( k1 in 2: b1){
sk1 <- rbind(sk1 ,sk[k1,])
}
sk11 = sk1[1,]
b1= (Y2id-Y1id+1)
for ( k1 in 2: b1){
sk11 <- rbind(sk11 ,sk1[k1,])
}
bs= (Y2id-Y1id+1)+1
sk12 = sk1[bs,]
bs1= (Y2id-Y1id+1)+2
bs2= 2*(Y2id-Y1id+1)
for ( k2 in bs1: bs2) {
sk12 <- rbind(sk12 ,sk1[k2,])
}
bss= 2*(Y2id-Y1id+1)+1
sk13 = sk1[bss,]
bss1= 2*(Y2id-Y1id+1)+2

bs1s= 3*(Y2id-Y1id+1)
for ( k3 in bss1: bs1s){
sk13 <- rbind(sk13 ,sk1[k3,])
}
bs4= 3*(Y2id-Y1id+1)+1
sk14 = sk1[bs4,]
bs41= 3*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s4= 4*(Y2id-Y1id+1)
for ( k4 in bs41: bs1s4) {
sk14 <- rbind(sk14 ,sk1[k4,])
}
bs5= 4*(Y2id-Y1id+1)+1
sk15 = sk1[bs5,]
bs51= 4*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s5= 5*(Y2id-Y1id+1)
for ( k5 in bs51: bs1s5) {
sk15 <- rbind(sk15 ,sk1[k5,])
}
bs6= 5*(Y2id-Y1id+1)+1
sk16 = sk1[bs6,]
bs61= 5*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s6= 6*(Y2id-Y1id+1)
for ( k6 in bs61: bs1s6){
sk16 <- rbind(sk16 ,sk1[k6,])
}
bs7= 6*(Y2id-Y1id+1)+1
sk17 = sk1[bs7,]
bs71= 6*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s7= 7*(Y2id-Y1id+1)
for ( k7 in bs71: bs1s7){
sk17 <- rbind(sk17 ,sk1[k7,])
}
bs8= 7*(Y2id-Y1id+1)+1
sk18 = sk1[bs8,]
bs81= 7*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s8= 8*(Y2id-Y1id+1)
for ( k8 in bs81: bs1s8){
sk18 <- rbind(sk18 ,sk1[k8,])
}
bs9= 8*(Y2id-Y1id+1)+1
```

```

sk19 = sk1[bs9,]
bs91= 8*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s9= 9*(Y2id-Y1id+1)
for ( k9 in bs91: bs1s9){
  sk19 <- rbind(sk19 ,sk1[k9,])
}
bs90= 9*(Y2id-Y1id+1)+1
sk190 = sk1[bs90,]
bs901= 9*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s90= 10*(Y2id-Y1id+1)
for ( k10 in bs901: bs1s90){
  sk190 <- rbind(sk190
,sk1[k10,])
}
bs91= 10*(Y2id-Y1id+1)+1
sk191 = sk1[bs91,]
bs911= 10*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s91= 11*(Y2id-Y1id+1)
for ( k11 in bs911:
bs1s91){sk191 <- rbind(sk191
,sk1[k11,])
}
bs92= 11*(Y2id-Y1id+1)+1
sk192 = sk1[bs92,]
bs921= 11*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s92= 12*(Y2id-Y1id+1)
for ( k12 in bs921: bs1s92){
sk192 <- rbind(sk192
,sk1[k12,])
}
c = sk11[,1]
b2= (Y2id-Y1id+1)
for (n in 0: b2) {
c[n] = (Y1id-1)*0.5+Y0
+n*0.5
}
ko = c
c1 = sk11[,1]
b3= (X2id-X1id+1)
for (m in 0: b3) {
c1[m] = (X1id-1)*0.5+X0
+m*0.5
}
a1= (X2id-X1id+1)
for (n in 1: a1) {
  year<- cbind(ko, c1[n],
sk11[n]/10,sk12[n]/10,sk13[n]/
10,sk14[n]/10,sk15[n]/10,sk16[
n]/10,sk17[n]/10,sk18[n]/10,sk
19[n]/10,sk190[n]/10,sk191[n]/
10,sk192[n]/10)
write.table( year, file =
'1971.txt', append = T,sep =
"\\t", row.names = FALSE,
col.names = FALSE)
}
#### year 2#####
b2y=12*(Y2id-Y1id+1)+1
sk2 = sk[b2y,]
b2y1=12*(Y2id-Y1id+1)+2
b2ys= 2*12*(Y2id-Y1id+1)
for ( ky2 in b2y1: b2ys){
sk2 <- rbind(sk2 ,sk[ky2,])
}
sk11 = sk2[1,]
b1= (Y2id-Y1id+1)
for ( k1 in 2: b1){
  sk11 <- rbind(sk11 ,sk2[k1,])
}
bs= (Y2id-Y1id+1)+1
sk12 = sk2[bs,]
bs1= (Y2id-Y1id+1)+2
bs2= 2*(Y2id-Y1id+1)
for ( k2 in bs1: bs2) {
  sk12 <- rbind(sk12 ,sk2[k2,])
}
bss= 2*(Y2id-Y1id+1)+1
sk13 = sk2[bss,]
bss1= 2*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s= 3*(Y2id-Y1id+1)
for ( k3 in bss1: bs1s){
  sk13 <- rbind(sk13 ,sk2[k3,])
}
bs4= 3*(Y2id-Y1id+1)+1
sk14 = sk2[bs4,]
bs41= 3*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s4= 4*(Y2id-Y1id+1)
for ( k4 in bs41: bs1s4) {
  sk14 <- rbind(sk14 ,sk2[k4,])
}
bs5= 4*(Y2id-Y1id+1)+1
sk15 = sk2[bs5,]
bs51= 4*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s5= 5*(Y2id-Y1id+1)
for ( k5 in bs51: bs1s5) {
  sk15 <- rbind(sk15 ,sk2[k5,])
}
bs6= 5*(Y2id-Y1id+1)+1
sk16 = sk2[bs6,]
bs61= 5*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s6= 6*(Y2id-Y1id+1)
for ( k6 in bs61: bs1s6){
  sk16 <- rbind(sk16 ,sk2[k6,])
}
bs7= 6*(Y2id-Y1id+1)+1
sk17 = sk2[bs7,]
bs71= 6*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s7= 7*(Y2id-Y1id+1)
for ( k7 in bs71: bs1s7){
  sk17 <- rbind(sk17 ,sk2[k7,])
}
bs8= 7*(Y2id-Y1id+1)+1
sk18 = sk2[bs8,]
bs81= 7*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s8= 8*(Y2id-Y1id+1)
for ( k8 in bs81: bs1s8){
  sk18 <- rbind(sk18 ,sk2[k8,])
}
bs9= 8*(Y2id-Y1id+1)+1
sk19 = sk2[bs9,]

```



```

bs91= 8*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s9= 9*(Y2id-Y1id+1)
for ( k9 in bs91: bs1s9){
  sk19 <- rbind(sk19 ,sk2[k9,])
}
bs90= 9*(Y2id-Y1id+1)+1
sk190 = sk2[bs90,]
bs901= 9*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s90= 10*(Y2id-Y1id+1)
for ( k10 in bs901: bs1s90){
  sk190 <- rbind(sk190
,sk2[k10,])
}
bs91= 10*(Y2id-Y1id+1)+1
sk191 = sk2[bs91,]
bs911= 10*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s91= 11*(Y2id-Y1id+1)
for ( k11 in bs911: bs1s91){
  sk191 <- rbind(sk191
,sk2[k11,])
}
bs92= 11*(Y2id-Y1id+1)+1
sk192 = sk2[bs92,]
bs921= 11*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s92= 12*(Y2id-Y1id+1)
for ( k12 in bs921: bs1s92){
  sk192 <- rbind(sk192
,sk2[k12,])
}
c = sk11[,1]
b2= (Y2id-Y1id+1)
for (n in 0: b2) {
  c[n] = (Y1id-1)*0.5+Y0
+n*0.5
}
ko = c
c1 = sk11[,1]

b3= (X2id-X1id+1)
for (m in 0: b3) {
  c1[m] = (X1id-1)*0.5+X0
+m*0.5
}
a1= (X2id-X1id+1)
for (n in 1: a1) {
  year<- cbind(ko, c1[n],
sk11[n]/10,sk12[n]/10,sk13[n]/
10,sk14[n]/10,sk15[n]/10,sk16
[n]/10,sk17[n]/10,sk18[n]/10,s
k19[n]/10,sk190[n]/10,sk191[n
]/10,sk192[n]/10)
write.table( year, file =
'1972.txt', append = T,sep =
"\t", row.names = FALSE,
col.names = FALSE)
}
##### year 3#####
b3y=2*12*(Y2id-Y1id+1)+1
sk3 = sk[b3y,]
b3y1= 2*12*(Y2id-Y1id+1)+2
b3ys= 3*12*(Y2id-Y1id+1)
for ( ky3 in b3y1: b3ys){
  sk3 <- rbind(sk3 ,sk[ky3,])
}
sk11 = sk3[1,]
b1= (Y2id-Y1id+1)
for ( k1 in 2: b1){
  sk11 <- rbind(sk11 ,sk3[k1,])
}
bs= (Y2id-Y1id+1)+1
sk12 = sk3[bs,]
bs1= (Y2id-Y1id+1)+2
bs2= 2*(Y2id-Y1id+1)
for ( k2 in bs1: bs2) {
  sk12 <- rbind(sk12 ,sk3[k2,])
}
}
bss= 2*(Y2id-Y1id+1)+1
sk13 = sk3[bss,]
bss1= 2*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s= 3*(Y2id-Y1id+1)
for ( k3 in bss1: bs1s){
  sk13 <- rbind(sk13 ,sk3[k3,])
}
bs4= 3*(Y2id-Y1id+1)+1
sk14 = sk3[bs4,]
bs41= 3*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s4= 4*(Y2id-Y1id+1)
for ( k4 in bs41: bs1s4) {
  sk14 <- rbind(sk14 ,sk3[k4,])
}
bs5= 4*(Y2id-Y1id+1)+1
sk15 = sk3[bs5,]
bs51= 4*(Y2id-Y1id+1)+2
bs1s5= 5*(Y2id-Y1id+1)
.....

```


ANNEXE 2 : STATION DE BANANKORO

A. BANANKORO	Calage 1971-1980				Calage 1981-1999				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
parametre1	0.5143952214	0.5788802065	0.5959285129	0.6489000410	0.4171598826	0.5035263811	0.4884844815	0.5609342489	
parametre2	0.5197901637	0.5592055503	0.5102392859	0.5325988887	0.5288720515	0.5594616045	0.5203885528	0.5432562519	
Nash	89.389	91.652	89.699	90.978	88.872	90.473	89.137	90.2	
Rac2 Nash	91.2	93.002	89.852	91.214	91.3	90.878	89.38	89.518	
B. BANANKORO	Validation 1981-1999				Validation 1971-1980				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	Qobs	635670	635670	635670	635670	930533	930533	930533	
	Qcalc	914339	897846	920331	907085	780933	812924	806668	821921
	Nash	76.118	78.9	78.183	80.02	80.817	83.979	82.038	83.979
Rac2 Nash	81.052	84.081	79.232	81.433	91.312	91.968	90.785	91.441	
C1. BANANKORO	Validation 1981-1999				Validation 1971-1980				
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	
	Qobs	635670	635670	635670	635670	930533	930533	930533	
	Qcalc	735924	1062148	790950	1025829	614030	993063	665125	961279
	Nash	90.149	47.327	88.93	61.656	59.542	89.148	65.42	89.087
Rac2 Nash	89.208	70.34	86.346	72.134	80.85	91.689	83.834	91.241	
C2. BANANKORO	Validation 1981-1999				Validation 1971-1980				
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	
	Qobs	635670	635670	635670	635670	930533	930533	930533	
	Qcalc	762430	755592	1100758	1086133	660101	697231	954977	965043
	Nash	88.498	89.566	46.196	48.86	68.978	73.075	88.744	90.953
Rac2 Nash	87.76	88.859	66.11	69.927	86.202	87.384	92.133	93.303	
C3. BANANKORO	Validation 1981-1999				Validation 1971-1980				
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	
	Qobs	635670	635670	635670	635670	930533	930533	930533	
	Qcalc	625737	887612	942276	1223076	528797	838881	774726	1135586
	Nash	86.97	78.645	75.993	11.636	47.123	84.997	78.97	86.534
Rac2 Nash	89.627	82.136	79.725	54.761	73.929	91.44	89.902	87.972	
D1. BANANKORO	Validation 1971-1980				Validation 1981-1999				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5788802065	0.5143952214	0.6489000410	0.5959285129	0.5035263811	0.4171598826	0.5609342489	0.4884844815
	parametre2	0.5592055503	0.5197901637	0.5325988887	0.5102392859	0.5594616045	0.5288720515	0.5432562519	0.5203885528
	Nash	83.428	84.331	86.865	87.522	76.199	78.043	82.918	83.246
Rac2 Nash	85.964	91.739	86.545	91.736	83.249	87.71	84.049	89.03	
D2. BANANKORO	Validation 1971-1980				Validation 1981-1999				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5143952214	0.5788802065	0.5959285129	0.6489000410	0.4171598826	0.5035263811	0.4884844815	0.5609342489
	parametre2	0.5592055503	0.5197901637	0.5325988887	0.5102392859	0.5594616045	0.5288720515	0.5432562519	0.5203885528
	Nash	89.023	91.299	89.57	90.849	88.656	90.268	89.012	90.078
Rac2 Nash	91.161	92.45	89.975	90.894	91.816	90.024	89.822	88.88	
D3. BANANKORO	Validation 1971-1980				Validation 1981-1999				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5788802065	0.5143952214	0.6489000410	0.5959285129	0.5035263811	0.4171598826	0.5609342489	0.4884844815
	parametre2	0.5197901637	0.5592055503	0.5102392859	0.5325988887	0.5288720515	0.5594616045	0.5203885528	0.5432562519
	Nash	85.494	85.945	87.661	88.223	78.332	79.035	83.947	83.935
Rac2 Nash	86.403	92.605	86.554	92.193	82.852	88.335	83.627	89.608	
E1. BANANKORO	Validation 1971-1980				Validation 1981-1999				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5959285129	0.5143952214	0.6489000410	0.5788802065	0.4884844815	0.4171598826	0.5609342489	0.5035263811
	parametre2	0.5102392859	0.5197901637	0.5325988887	0.5592055503	0.5203885528	0.5288720515	0.5432562519	0.5594616045
	Nash	83.655	85.315	85.666	86.95	82.102	84.509	84.502	86.488
Rac2 Nash	84.608	91.383	87.127	92.184	84.629	91.045	86.088	90.343	
E2. BANANKORO	Validation 1971-1980				Validation 1981-1999				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5143952214	0.5959285129	0.5788802065	0.6489000410	0.4171598826	0.4884844815	0.5035263811	0.5609342489
	parametre2	0.5102392859	0.5197901637	0.5325988887	0.5592055503	0.5203885528	0.5288720515	0.5432562519	0.5594616045
	Nash	89.363	89.675	91.494	90.818	88.854	89.12	90.417	90.142
Rac2 Nash	91.086	89.938	92.716	91.26	91.063	89.579	90.488	89.797	
E3. BANANKORO	Validation 1971-1980				Validation 1981-1999				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5959285129	0.5143952214	0.6489000410	0.5788802065	0.4884844815	0.4171598826	0.5609342489	0.5035263811
	parametre2	0.5197901637	0.5102392859	0.5592055503	0.5325988887	0.5288720515	0.5203885528	0.5594616045	0.5432562519
	Nash	83.149	85.013	84.295	86.23	81.703	84.304	83.88	86.185
Rac2 Nash	84.606	91.22	87.051	91.905	84.851	90.846	86.48	90.075	

ANNEXE 2 : STATION DE BARANAMA

A. BARANAMA	Calage 1973-1980				Calage 1981-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
parametre1	0.4945880187	0.5337569461	0.4937064031	0.5329554738	0.4152690628	0.4698437602	0.4143848245	0.4677007426	
parametre2	0.5012074543	0.5432869001	0.4982386788	0.5378422375	0.5223071989	0.5644553187	0.5195611654	0.5608910233	
Nash	87.347	86.505	86.967	86.089	83.012	82.688	82.532	82.128	
Rac2 Nash	92.267	91.949	92.013	91.705	85.181	84.899	84.876	84.468	
B. BARANAMA	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	Qobs	83057	83057	83057	83057	-999999	-999999	-999999	
	Qcalc	97495	95386	98000	95939	-999999	-999999	-999999	
	Nash	74.474	75.481	73.969	74.817	79.686	80.28	79.318	79.754
Rac2 Nash	79.093	80.51	78.554	79.884	88.649	88.716	88.533	88.487	
C1. BARANAMA	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980				
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	
	Qobs	83057	83057	83057	83057	-999999	-999999	-999999	
	Qcalc	86146	106493	86629	107090	-999999	-999999	-999999	
	Nash	81.692	59.179	81.077	58.925	62.345	86.688	62.343	86.291
Rac2 Nash	84.146	71.187	83.606	70.699	78.189	92.289	78.239	92.116	
C2. BARANAMA	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980				
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	
	Qobs	83057	83057	83057	83057	-999999	-999999	-999999	
	Qcalc	98202	96131	97294	95196	-999999	-999999	-999999	
	Nash	73.618	74.401	74.816	75.876	79.615	80.295	79.379	79.712
Rac2 Nash	78.379	79.689	79.262	80.692	88.701	88.794	88.474	88.393	
C3. BARANAMA	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980				
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	
	Qobs	83057	83057	83057	83057	-999999	-999999	-999999	
	Qcalc	86833	107272	85943	106312	-999999	-999999	-999999	
	Nash	81.053	58.038	81.701	60.055	62.849	86.293	61.83	86.669
Rac2 Nash	83.593	70.278	84.149	71.604	78.557	92.098	77.865	92.297	
D1. BARANAMA	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5337569461	0.4945880187	0.5329554738	0.4937064031	0.4698437602	0.4152690628	0.4677007426	0.4143848245
	parametre2	0.5432869001	0.5012074543	0.5378422375	0.4982386788	0.5644553187	0.5223071989	0.5608910233	0.5195611654
	Nash	83.29	82.152	83.021	81.871	76.399	76.344	76.228	76.079
Rac2 Nash	90.259	89.197	90.02	89.07	80.013	82.946	79.807	82.675	
D2. BARANAMA	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4945880187	0.5337569461	0.4937064031	0.5329554738	0.4152690628	0.4698437602	0.4143848245	0.4677007426
	parametre2	0.5432869001	0.5012074543	0.5378422375	0.4982386788	0.5644553187	0.5223071989	0.5608910233	0.5195611654
	Nash	86.88	86.077	86.555	85.701	82.628	82.353	82.171	81.799
Rac2 Nash	92.277	91.117	92.077	90.904	83.981	85.135	83.736	84.693	
D3. BARANAMA	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5337569461	0.4945880187	0.5329554738	0.4937064031	0.4698437602	0.4152690628	0.4677007426	0.4143848245
	parametre2	0.5012074543	0.5432869001	0.4982386788	0.5378422375	0.5223071989	0.5644553187	0.5195611654	0.5608910233
	Nash	85.226	83.806	84.821	83.416	78.432	77.595	78.152	77.298
Rac2 Nash	90.793	90.532	90.464	90.345	81.636	82.869	81.333	82.614	
E1. BARANAMA	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4937064031	0.4945880187	0.5329554738	0.5337569461	0.4143848245	0.4152690628	0.4677007426	0.4698437602
	parametre2	0.4982386788	0.5012074543	0.5378422375	0.5432869001	0.5195611654	0.5223071989	0.5608910233	0.5644553187
	Nash	87.341	86.962	86.493	86.077	83.007	82.528	82.674	82.113
Rac2 Nash	92.244	92.031	91.88	91.761	85.245	84.807	84.979	84.371	
E2. BARANAMA	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4945880187	0.4937064031	0.5337569461	0.5329554738	0.4152690628	0.4143848245	0.4698437602	0.4677007426
	parametre2	0.4982386788	0.5012074543	0.5378422375	0.5432869001	0.5195611654	0.5223071989	0.5608910233	0.5644553187
	Nash	87.344	86.965	86.498	86.082	83.01	82.53	82.686	82.126
Rac2 Nash	92.236	92.042	91.883	91.763	85.227	84.828	84.952	84.411	
E3. BARANAMA	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4937064031	0.4945880187	0.5329554738	0.5337569461	0.4143848245	0.4152690628	0.4677007426	0.4698437602
	parametre2	0.5012074543	0.4982386788	0.5432869001	0.5378422375	0.5223071989	0.5195611654	0.5644553187	0.5608910233
	Nash	87.345	86.966	86.504	86.088	83.01	82.531	82.681	82.12
Rac2 Nash	92.275	92.002	91.948	91.704	85.199	84.855	84.928	84.429	

ANNEXE 2 : STATION DE BARO

A. BARO	Calage 1950-1970				Calage 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.5882445453	0.6171479833	0.5940296066	0.6240535438	0.5058560744	0.5574543511	0.5102351882	0.5624853415
parametre2	0.5258995072	0.5677584220	0.5278150940	0.5681016784	0.5603351955	0.6085638781	0.5592196161	0.6054061295
Nash	90.71	92.274	90.52	92.003	83.229	83.938	82.406	82.933
Rac2 Nash	92.669	94.257	92.46	93.972	89.439	90.021	88.81	89.319
B. BARO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	222184	222184	222184	222184	277639	277639	277639	277639
	239720	231575	239651	232055	244073	249284	243697	248821
	Nash	78.297	80.377	77.29	79.149	86.96	89.67	86.611
Rac2 Nash	83.942	86.92	83.244	86.062	92.476	93.583	92.275	93.311
C1. BARO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	222184	222184	222184	222184	277639	277639	277639	277639
	216373	253357	216384	253707	219386	272618	218715	272445
	Nash	82.784	71.589	81.848	70.342	81.077	89.639	80.459
Rac2 Nash	87.885	80.89	87.25	80.037	90.28	91.74	89.891	91.754
C2. BARO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	222184	222184	222184	222184	277639	277639	277639	277639
	236931	228406	242461	232527	241297	245866	246488	252264
	Nash	78.064	80.022	77.466	79.409	86.181	88.742	87.361
Rac2 Nash	83.747	86.609	83.416	86.336	92.118	93.085	92.615	93.78
C3. BARO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	222184	222184	222184	222184	277639	277639	277639	277639
	213377	250445	219413	256642	216258	269668	221869	275412
	Nash	81.99	71.754	82.575	70.107	79.639	89.389	81.867
Rac2 Nash	87.435	80.835	87.672	80.066	89.478	91.703	90.671	91.775
D1. BARO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.6171479833	0.5882445453	0.6240535438	0.5940296066	0.5574543511	0.5058560744	0.5624853415	0.5102351882
	0.5677584220	0.5258995072	0.5681016784	0.5278150940	0.6085638781	0.5603351955	0.6054061295	0.5592196161
	Nash	89.364	90.699	89.189	90.418	79.137	79.284	78.412
Rac2 Nash	91.051	93.998	90.849	93.762	85.98	88.648	85.412	88.02
D2. BARO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.5882445453	0.6171479833	0.5940296066	0.6240535438	0.5058560744	0.5574543511	0.5102351882	0.5624853415
	0.5677584220	0.5258995072	0.5681016784	0.5278150940	0.6085638781	0.5603351955	0.6054061295	0.5592196161
	Nash	90.349	91.919	90.193	91.679	82.775	83.532	82.008
Rac2 Nash	92.233	93.932	92.074	93.679	89.044	89.636	88.478	88.951
D3. BARO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.6171479833	0.5882445453	0.6240535438	0.5940296066	0.5574543511	0.5058560744	0.5624853415	0.5102351882
	0.5258995072	0.5677584220	0.5278150940	0.5681016784	0.5603351955	0.6085638781	0.5592196161	0.6054061295
	Nash	90.177	91.515	89.961	91.194	80.81	80.632	79.98
Rac2 Nash	91.577	94.462	91.321	94.187	86.674	89.26	86.023	88.6
E1. BARO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.5940296066	0.5882445453	0.6240535438	0.6171479833	0.5102351882	0.5058560744	0.5624853415	0.5574543511
	0.5278150940	0.5258995072	0.5681016784	0.5677584220	0.5592196161	0.5603351955	0.6054061295	0.6085638781
	Nash	90.685	90.491	92.233	91.957	83.212	82.391	83.912
Rac2 Nash	92.494	92.607	94.09	94.098	89.288	88.944	89.923	89.39
E2. BARO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.5882445453	0.5940296066	0.6171479833	0.6240535438	0.5058560744	0.5102351882	0.5574543511	0.5624853415
	0.5278150940	0.5258995072	0.5681016784	0.5677584220	0.5592196161	0.5603351955	0.6054061295	0.6085638781
	Nash	90.709	90.519	92.274	92.003	83.229	82.406	83.936
Rac2 Nash	92.67	92.455	94.256	93.973	89.436	88.813	90.026	89.311
E3. BARO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.5940296066	0.5882445453	0.6240535438	0.6171479833	0.5102351882	0.5058560744	0.5624853415	0.5574543511
	0.5258995072	0.5278150940	0.5677584220	0.5681016784	0.5603351955	0.5592196161	0.6085638781	0.6054061295
	Nash	90.689	90.496	92.234	91.958	83.21	82.389	83.907
Rac2 Nash	92.493	92.612	94.091	94.097	89.291	88.94	89.917	89.395

ANNEXE 2 : STATION DE DIALAKORO

A. DIALAKORO	Calage 1957-1970				Calage 1971-1980			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.5585458039	0.6062488028	0.6278483646	0.6698996907	0.4349899001	0.5133960190	0.5012157371	0.5691961094
parametre2	0.5033083138	0.5385270557	0.5110787927	0.5306285233	0.4650294821	0.4936875014	0.4495181049	0.4694769678
Nash	92.058	94.327	92.837	93.888	81.113	82.09	80.915	81.676
Rac2 Nash	92.928	94.861	92.387	93.472	86.966	87.16	85.371	85.903
B. DIALAKORO	Validation 1971-1980				Validation 1957-1970			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	1220256	1220256	1220256	1220256
	-999999	-999999	-999999	-999999	947928	997760	988742	1021260
	Nash	48.167	54.345	50.182	54.861	79.303	83.627	80.56
Rac2 Nash	66.67	72.137	66.101	69.974	90.739	92.063	90.247	91.106
C1. DIALAKORO	Validation 1971-1980				Validation 1957-1970			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	1220256	1220256	1220256	1220256
	-999999	-999999	-999999	-999999	791839	1158522	852828	1153515
	Nash	76.96	9.706	72.517	24.66	62.905	90.4	68.365
Rac2 Nash	83.084	50.032	79.215	54.416	81.873	93.888	84.474	92.665
C2. DIALAKORO	Validation 1971-1980				Validation 1957-1970			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	1220256	1220256	1220256	1220256
	-999999	-999999	-999999	-999999	832221	882185	1125320	1159420
	Nash	72.669	75.05	3.105	9.566	69.291	73.979	87.741
Rac2 Nash	78.867	81.253	46.252	52.556	85.915	87.599	92.498	93.475
C3. DIALAKORO	Validation 1971-1980				Validation 1957-1970			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	1220256	1220256	1220256	1220256
	-999999	-999999	-999999	-999999	702133	1018073	963711	1309977
	Nash	81.498	53.539	46.966	-40.861	52.293	84.63	78.282
Rac2 Nash	86.426	68.444	67.961	29.268	75.724	92.285	88.987	91.849
D1. DIALAKORO	Validation 1957-1970				Validation 1971-1980			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.6062488028	0.5585458039	0.6698996907	0.6278483646	0.5133960190	0.4349899001	0.5691961094	0.5012157371
	0.5385270557	0.5033083138	0.5306285233	0.5110787927	0.4936875014	0.4650294821	0.4694769678	0.4495181049
	Nash	89.327	90.934	91.36	92.078	67.637	69.571	73.78
Rac2 Nash	89.843	94.575	90.242	93.998	76.953	83.272	78.562	84.932
D2. DIALAKORO	Validation 1957-1970				Validation 1971-1980			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.5585458039	0.6062488028	0.6278483646	0.6698996907	0.4349899001	0.5133960190	0.5012157371	0.5691961094
	0.5385270557	0.5033083138	0.5306285233	0.5110787927	0.4936875014	0.4650294821	0.4694769678	0.4495181049
	Nash	91.723	94.007	92.735	93.785	80.843	81.84	80.781
Rac2 Nash	92.713	94.426	92.365	93.296	86.955	86.75	85.466	85.584
D3. DIALAKORO	Validation 1957-1970				Validation 1971-1980			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.6062488028	0.5585458039	0.6698996907	0.6278483646	0.5133960190	0.4349899001	0.5691961094	0.5012157371
	0.5033083138	0.5385270557	0.5110787927	0.5306285233	0.4650294821	0.4936875014	0.4495181049	0.4694769678
	Nash	90.451	91.961	91.781	92.48	70.963	71.344	75.417
Rac2 Nash	90.189	95.153	90.298	94.221	77.938	84.205	78.935	85.607
E1. DIALAKORO	Validation 1957-1970				Validation 1971-1980			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.6278483646	0.5585458039	0.6698996907	0.6062488028	0.5012157371	0.4349899001	0.5691961094	0.5133960190
	0.5110787927	0.5033083138	0.5306285233	0.5385270557	0.4495181049	0.4650294821	0.4694769678	0.4936875014
	Nash	88.383	89.849	90.25	90.868	75.132	76.618	76.79
Rac2 Nash	88.452	93.447	90.719	94.052	80.139	86.645	81.929	86.636
E2. DIALAKORO	Validation 1957-1970				Validation 1971-1980			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.5585458039	0.6278483646	0.6062488028	0.6698996907	0.4349899001	0.5012157371	0.5133960190	0.5691961094
	0.5110787927	0.5033083138	0.5306285233	0.5385270557	0.4495181049	0.4650294821	0.4694769678	0.4936875014
	Nash	92.04	92.821	94.311	93.875	81.03	80.835	81.912
Rac2 Nash	92.952	92.324	94.833	93.474	86.752	85.468	86.847	85.947
E3. DIALAKORO	Validation 1957-1970				Validation 1971-1980			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.6278483646	0.5585458039	0.6698996907	0.6062488028	0.5012157371	0.4349899001	0.5691961094	0.5133960190
	0.5033083138	0.5110787927	0.5385270557	0.5306285233	0.4650294821	0.4495181049	0.4936875014	0.4694769678
	Nash	88.659	90.03	89.97	90.704	73.887	75.909	75.079
Rac2 Nash	88.463	93.527	90.681	94.017	79.927	86.239	81.679	86.196

ANNEXE 2 : STATION DE FARANAH

A. FARANAH	Calage 1969-1980				Calage 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.5777350156	0.5995304825	0.5840943091	0.6056808268	0.3642267032	0.4251150566	0.3660003443	0.4276324503
parametre2	0.4713878699	0.5101180307	0.4703755769	0.5086432991	0.4309296358	0.4779558959	0.4320332751	0.4785689865
Nash	81.872	84.354	82.206	84.655	57.619	59.945	57.35	59.522
Rac2 Nash	85.666	89.273	85.74	89.303	62.784	65.399	62.832	65.336
B. FARANAH	Validation 1981-1995				Validation 1969-1980			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	36923	36923	36923	36923	67511	67511	67511	67511
	70852	68231	70998	68436	43071	42995	43120	43041
	Nash	-0.457	1.958	-1.856	0.131	46.361	49.483	46.078
Rac2 Nash	22.348	28.877	21.96	28.291	71.521	72.593	71.289	72.317
C1. FARANAH	Validation 1981-1995				Validation 1969-1980			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	36923	36923	36923	36923	67511	67511	67511	67511
	64750	73864	65015	73959	34675	51465	34551	51605
	Nash	21.079	-21.75	19.27	-23.044	21.03	65.772	20.363
Rac2 Nash	35.833	15.079	35.128	14.846	52.475	82.615	51.818	82.53
C2. FARANAH	Validation 1981-1995				Validation 1969-1980			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	36923	36923	36923	36923	67511	67511	67511	67511
	70130	67465	71728	69208	42876	42670	43315	43365
	Nash	1.164	3.6	-3.547	-1.593	45.429	48.224	47.005
Rac2 Nash	23.605	30.076	20.672	27.056	70.874	71.692	71.928	73.201
C3. FARANAH	Validation 1981-1995				Validation 1969-1980			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	36923	36923	36923	36923	67511	67511	67511	67511
	64006	73118	65765	74713	34324	51254	34902	51817
	Nash	22.276	-19.703	17.995	-25.163	19.519	65.096	21.87
Rac2 Nash	36.874	16.48	34.05	13.416	51.163	82.253	53.119	82.88
D1. FARANAH	Validation 1969-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.5995304825	0.5777350156	0.6056808268	0.5840943091	0.4251150566	0.3642267032	0.4276324503	0.3660003443
	0.5101180307	0.4713878699	0.5086432991	0.4703755769	0.4779558959	0.4309296358	0.4785689865	0.4320332751
	Nash	80.644	82.923	81.032	83.272	51.013	52.593	50.755
Rac2 Nash	84.781	88.58	84.906	88.627	55.283	65.892	55.389	65.755
D2. FARANAH	Validation 1969-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.5777350156	0.5995304825	0.5840943091	0.6056808268	0.3642267032	0.4251150566	0.3660003443	0.4276324503
	0.5101180307	0.4713878699	0.5086432991	0.4703755769	0.4779558959	0.4309296358	0.4785689865	0.4320332751
	Nash	81.41	83.919	81.769	84.224	57.065	59.437	56.811
Rac2 Nash	85.997	88.232	86.093	88.263	63.098	64.196	63.138	64.165
D3. FARANAH	Validation 1969-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.5995304825	0.5777350156	0.6056808268	0.5840943091	0.4251150566	0.3642267032	0.4276324503	0.3660003443
	0.4713878699	0.5101180307	0.4703755769	0.5086432991	0.4309296358	0.4779558959	0.4320332751	0.4785689865
	Nash	81.547	83.864	81.898	84.195	53.507	54.288	53.228
Rac2 Nash	84.556	89.791	84.655	89.831	55.187	67.191	55.299	67.03
E1. FARANAH	Validation 1969-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.5840943091	0.5777350156	0.6056808268	0.5995304825	0.3660003443	0.3642267032	0.4276324503	0.4251150566
	0.4703755769	0.4713878699	0.5086432991	0.5101180307	0.4320332751	0.4309296358	0.4785689865	0.4779558959
	Nash	81.849	82.179	84.322	84.624	57.614	57.344	59.933
Rac2 Nash	85.355	86.021	89.009	89.53	62.641	62.966	65.19	65.53
E2. FARANAH	Validation 1969-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.5777350156	0.5840943091	0.5995304825	0.6056808268	0.3642267032	0.3660003443	0.4251150566	0.4276324503
	0.4703755769	0.4713878699	0.5086432991	0.5101180307	0.4320332751	0.4309296358	0.4785689865	0.4779558959
	Nash	81.872	82.207	84.354	84.654	57.619	57.35	59.945
Rac2 Nash	85.644	85.762	89.251	89.324	62.805	62.81	65.407	65.328
E3. FARANAH	Validation 1969-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.5840943091	0.5777350156	0.6056808268	0.5995304825	0.3660003443	0.3642267032	0.4276324503	0.4251150566
	0.4713878699	0.4703755769	0.5101180307	0.5086432991	0.4309296358	0.4320332751	0.4779558959	0.4785689865
	Nash	81.846	82.175	84.316	84.62	57.615	57.346	59.934
Rac2 Nash	85.376	85.998	89.029	89.507	62.62	62.988	65.182	65.538

ANNEXE 2 : STATION DE GOUALA

A. GOUALA	Calage 1961-1970				Calage 1971-1978			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.7428762029	0.7766445253	0.7166279891	0.7539897374	0.7415710915	0.7822328128	0.7255779653	0.7691520233
parametre2	0.4015537937	0.4162794524	0.4002938310	0.4150587275	0.4324141056	0.4490019449	0.4371194341	0.4540554990
Nash	73.924	75.344	71.829	73.143	89.256	90.072	87.638	88.517
Rac2 Nash	80.645	82.259	78.353	79.881	90.968	91.727	89.423	90.424
B. GOUALA	Validation 1971-1978				Validation 1961-1970			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	Nash	88.326	88.938	86.219	86.595	72.995	74.256	70.481
Rac2 Nash	90.353	91.404	88.889	89.999	80.16	81.166	77.331	78.163
C1. GOUALA	Validation 1971-1978				Validation 1961-1970			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	Nash	85.477	88.293	51.616	86.745	74.321	70.597	-6.283
Rac2 Nash	90.178	89.222	64.107	87.71	82.854	77.104	5.37	73.554
C2. GOUALA	Validation 1971-1978				Validation 1961-1970			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	Nash	24.086	87.258	87.549	87.642	10.129	71.242	72.631
Rac2 Nash	32.442	89.362	90.792	91.309	23.896	77.652	80.25	81.265
C3. GOUALA	Validation 1971-1978				Validation 1961-1970			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999	-999999
	Nash	-3.408	85.538	81.941	88.918	-6.776	66.733	73.27
Rac2 Nash	6.546	85.884	88.488	90.445	4.771	72.987	82.5	77.295
D1. GOUALA	Validation 1961-1970				Validation 1971-1978			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.7766445253	0.7428762029	0.7539897374	0.7166279891	0.7822328128	0.7415710915	0.7691520233	0.7255779653
	0.4162794524	0.4015537937	0.4150587275	0.4002938310	0.4490019449	0.4324141056	0.4540554990	0.4371194341
	Nash	73.073	74.252	70.818	71.869	87.444	87.593	85.521
Rac2 Nash	79.026	82.68	76.409	80.358	88.465	91.413	86.278	90.377
D2. GOUALA	Validation 1961-1970				Validation 1971-1978			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.7428762029	0.7766445253	0.7166279891	0.7539897374	0.7415710915	0.7822328128	0.7255779653	0.7691520233
	0.4162794524	0.4015537937	0.4150587275	0.4002938310	0.4490019449	0.4324141056	0.4540554990	0.4371194341
	Nash	73.707	75.139	71.621	72.938	89.001	89.816	87.372
Rac2 Nash	80.704	81.752	78.483	79.291	90.433	91.779	88.853	90.459
D3. GOUALA	Validation 1961-1970				Validation 1971-1978			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.7766445253	0.7428762029	0.7539897374	0.7166279891	0.7822328128	0.7415710915	0.7691520233	0.7255779653
	0.4015537937	0.4162794524	0.4002938310	0.4150587275	0.4324141056	0.4490019449	0.4371194341	0.4540554990
	Nash	73.341	74.516	71.072	72.116	88.026	88.175	86.13
Rac2 Nash	78.801	83.052	76.084	80.778	88.955	91.36	86.804	90.341
E1. GOUALA	Validation 1961-1970				Validation 1971-1978			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.7166279891	0.7428762029	0.7539897374	0.7766445253	0.7255779653	0.7415710915	0.7691520233	0.7822328128
	0.4002938310	0.4015537937	0.4150587275	0.4162794524	0.4371194341	0.4324141056	0.4540554990	0.4490019449
	Nash	73.577	71.451	74.964	72.745	89.074	87.439	89.887
Rac2 Nash	81.451	76.92	82.922	78.581	91.166	88.752	91.797	89.871
E2. GOUALA	Validation 1961-1970				Validation 1971-1978			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.7428762029	0.7166279891	0.7766445253	0.7539897374	0.7415710915	0.7255779653	0.7822328128	0.7691520233
	0.4002938310	0.4015537937	0.4150587275	0.4162794524	0.4371194341	0.4324141056	0.4540554990	0.4490019449
	Nash	73.923	71.827	75.343	73.142	89.238	87.617	90.046
Rac2 Nash	80.613	78.386	82.239	79.905	90.876	89.475	91.599	90.496
E3. GOUALA	Validation 1961-1970				Validation 1971-1978			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.7166279891	0.7428762029	0.7539897374	0.7766445253	0.7255779653	0.7415710915	0.7691520233	0.7822328128
	0.4015537937	0.4002938310	0.4162794524	0.4150587275	0.4324141056	0.4371194341	0.4490019449	0.4540554990
	Nash	73.58	71.454	74.97	72.751	89.063	87.432	89.872
Rac2 Nash	81.47	76.875	82.936	78.549	91.266	88.708	91.922	89.796

ANNEXE 2 : STATION D'IRADOUGOU

A. IRADOUGOU	Calage 1965-1970				Calage 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
parametre1	0.5922790604	0.6421603388	0.5928526852	0.6436085398	0.4189409252	0.4953505080	0.4137208961	0.4894059349	
parametre2	0.5554669429	0.5761014398	0.5514773664	0.5713590670	0.5986206536	0.6087595167	0.5971740587	0.6035361780	
Nash	77.737	78.246	76.889	77.251	72.264	70.527	70.848	68.918	
Rac2 Nash	71.776	70.585	70.782	69.39	73.891	67.25	72.994	65.929	
B. IRADOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1965-1970				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	Qobs	15230	15230	15230	23513	23513	23513	23513	
	Qcalc	25236	25410	25502	25763	18179	20099	17904	19813
	Nash	41.693	41.912	37.956	37.416	63.829	65.224	62.142	63.229
Rac2 Nash	48.758	48.845	46.48	46.122	74.536	70.058	73.397	68.699	
C1. IRADOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1965-1970				
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	
	Qobs	15230	15230	15230	23513	23513	23513	23513	
	Qcalc	22694	27798	22986	28128	16521	22043	19813	21714
	Nash	59.569	17.917	56.425	12.887	50.038	73.688	63.229	72.258
Rac2 Nash	57.264	37.906	54.976	35.202	64.283	75.414	68.699	74.575	
C2. IRADOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1965-1970				
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	
	Qobs	15230	15230	15230	23513	23513	23513	23513	
	Qcalc	25473	25683	25265	25490	18162	20099	17919	19812
	Nash	37.842	37.696	41.798	41.636	63.042	64.327	62.922	64.109
Rac2 Nash	46.651	46.488	48.59	48.486	73.607	69.005	74.323	69.74	
C3. IRADOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1965-1970				
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	
	Qobs	15230	15230	15230	23513	23513	23513	23513	
	Qcalc	22956	28053	22724	27873	16521	22017	16285	21740
	Nash	56.452	13.012	59.534	17.793	49.313	72.823	48.868	73.113
Rac2 Nash	55.158	35.551	57.084	37.564	63.365	74.457	63.783	75.529	
D1. IRADOUGOU	Validation 1965-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.6421603388	0.5922790604	0.6436085398	0.5928526852	0.4953505080	0.4189409252	0.4894059349	0.4137208961
	parametre2	0.5761014398	0.5554669429	0.5713590670	0.5514773664	0.6087595167	0.5986206536	0.6035361780	0.5971740587
	Nash	76.061	76.177	75.211	75.183	65.372	64.518	64.169	63.149
Rac2 Nash	67.97	71.941	66.924	70.795	65.757	68.021	64.983	66.812	
D2. IRADOUGOU	Validation 1965-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5922790604	0.6421603388	0.5928526852	0.6436085398	0.4189409252	0.4953505080	0.4137208961	0.4894059349
	parametre2	0.5761014398	0.5554669429	0.5713590670	0.5514773664	0.6087595167	0.5986206536	0.6035361780	0.5971740587
	Nash	77.655	78.166	76.819	77.176	72.251	70.515	70.843	68.913
Rac2 Nash	71.767	70.412	70.798	69.207	73.897	67.215	73.005	65.904	
D3. IRADOUGOU	Validation 1965-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.6421603388	0.5922790604	0.6436085398	0.5928526852	0.4953505080	0.4189409252	0.4894059349	0.4137208961
	parametre2	0.5554669429	0.5761014398	0.5514773664	0.5713590670	0.5986206536	0.6087595167	0.5971740587	0.6035361780
	Nash	76.453	76.518	75.586	75.514	65.723	64.657	64.384	63.231
Rac2 Nash	68.026	72.14	66.953	71.001	65.79	68.015	64.995	66.809	
E1. IRADOUGOU	Validation 1965-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5928526852	0.5922790604	0.6436085398	0.6421603388	0.4137208961	0.4189409252	0.4894059349	0.4953505080
	parametre2	0.5514773664	0.5554669429	0.5713590670	0.5761014398	0.5971740587	0.5986206536	0.6035361780	0.6087595167
	Nash	77.735	76.887	78.242	77.248	72.23	70.817	70.478	68.864
Rac2 Nash	71.722	70.834	70.487	69.484	74.241	72.619	67.486	65.656	
E2. IRADOUGOU	Validation 1965-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5922790604	0.5928526852	0.6421603388	0.6436085398	0.4189409252	0.4137208961	0.4953505080	0.4894059349
	parametre2	0.5514773664	0.5554669429	0.5713590670	0.5761014398	0.5971740587	0.5986206536	0.6035361780	0.6087595167
	Nash	77.735	76.887	78.241	77.247	72.263	70.848	70.524	68.915
Rac2 Nash	71.758	70.798	70.559	69.412	73.887	72.998	67.236	65.941	
E3. IRADOUGOU	Validation 1965-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5928526852	0.5922790604	0.6436085398	0.6421603388	0.4137208961	0.4189409252	0.4894059349	0.4953505080
	parametre2	0.5554669429	0.5514773664	0.5761014398	0.5713590670	0.5986206536	0.5971740587	0.6087595167	0.6035361780
	Nash	77.737	76.889	78.244	77.25	72.233	70.82	68.876	68.676
Rac2 Nash	71.739	70.819	70.512	69.462	74.245	72.615	67.5	65.644	

ANNEXE 2 : STATION DE KANKAN

A. KANKAN	Calage 1950-1970				Calage 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
parametre1	0.6053462758	0.6296442897	0.5826068702	0.6128575362	0.5323393108	0.5779934475	0.5138148670	0.5632854388	
parametre2	0.5645612002	0.6068693561	0.5689750885	0.6084953088	0.6089269762	0.6578274325	0.6130875058	0.6594844062	
Nash	88.804	90.149	88.74	89.888	83.818	85.391	83.359	84.569	
Rac2 Nash	91.176	92.396	91.035	91.758	84.771	85.641	84.419	84.607	
B. KANKAN	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	Qobs	147692	147692	147692	213816	213816	213816	213816	
	Qcalc	185414	179436	185366	190302	195735	191325	198455	
	Nash	80.966	83.414	80.568	82.612	86.188	88.423	86.141	88.187
Rac2 Nash	79.799	82.718	79.618	81.826	91.257	91.991	91.153	91.352	
C1. KANKAN	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	
	Qobs	147692	147692	147692	213816	213816	213816	213816	
	Qcalc	169998	194054	168663	202811	177080	208491	177651	211905
	Nash	84.295	77.583	83.642	73.805	82.811	87.676	81.91	87.697
Rac2 Nash	83.565	77.641	83.009	74.976	90.443	89.896	89.471	89.803	
C2. KANKAN	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	
	Qobs	147692	147692	147692	213816	213816	213816	213816	
	Qcalc	193763	187497	177393	172928	199027	204795	182940	189651
	Nash	78.348	80.984	82.485	84.481	87.369	89.039	84.616	87.252
Rac2 Nash	77.441	80.423	81.647	83.893	91.406	91.553	90.743	91.6	
C3. KANKAN	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	
	Qobs	147692	147692	147692	213816	213816	213816	213816	
	Qcalc	177673	202811	161328	188110	185361	218064	169674	202606
	Nash	82.891	73.805	84.41	79.513	84.514	87.593	79.916	87.41
Rac2 Nash	81.587	74.976	84.68	79.224	90.628	89.431	89.051	90.049	
D1. KANKAN	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.6296442897	0.6053462758	0.6128575362	0.5826068702	0.5779934475	0.5323393108	0.5632854388	0.5138148670
	parametre2	0.6068693561	0.5645612002	0.6084953088	0.5689750885	0.6578274325	0.6089269762	0.6594844062	0.6130875058
	Nash	87.832	89.07	87.531	88.51	81.436	82.586	80.559	81.391
Rac2 Nash	89.694	92.464	89.311	91.794	81.359	86.059	80.69	84.946	
D2. KANKAN	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.6053462758	0.6296442897	0.5826068702	0.6128575362	0.5323393108	0.5779934475	0.5138148670	0.5632854388
	parametre2	0.6068693561	0.5645612002	0.6084953088	0.5689750885	0.6578274325	0.6089269762	0.6594844062	0.6130875058
	Nash	88.491	89.856	88.473	89.629	83.498	85.074	83.072	84.298
Rac2 Nash	90.669	92.236	90.627	91.58	84.206	85.547	83.923	84.539	
D3. KANKAN	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.6296442897	0.6053462758	0.6128575362	0.5826068702	0.5779934475	0.5323393108	0.5632854388	0.5138148670
	parametre2	0.5645612002	0.6068693561	0.5689750885	0.6084953088	0.6089269762	0.6578274325	0.6130875058	0.6594844062
	Nash	88.45	89.674	88.165	89.119	82.427	83.462	81.563	82.202
Rac2 Nash	90.269	92.72	89.795	92.061	82.073	86.267	81.336	85.09	
E1. KANKAN	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5826068702	0.6053462758	0.6128575362	0.6296442897	0.5138148670	0.5323393108	0.5632854388	0.5779934475
	parametre2	0.5689750885	0.5645612002	0.6084953088	0.6068693561	0.6130875058	0.6089269762	0.6594844062	0.6578274325
	Nash	88.532	88.444	89.928	89.657	83.61	83.124	85.195	84.36
Rac2 Nash	91.683	90.166	92.669	91.239	85.485	83.463	86.05	84.019	
E2. KANKAN	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.6053462758	0.5826068702	0.6296442897	0.6128575362	0.5323393108	0.5138148670	0.5779934475	0.5632854388
	parametre2	0.5689750885	0.5645612002	0.6084953088	0.6068693561	0.6130875058	0.6089269762	0.6594844062	0.6578274325
	Nash	88.8	88.737	90.148	89.888	83.816	83.356	85.391	84.568
Rac2 Nash	91.16	91.038	92.387	91.763	84.755	84.427	85.631	84.617	
E3. KANKAN	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5826068702	0.6053462758	0.6128575362	0.6296442897	0.5138148670	0.5323393108	0.5632854388	0.5779934475
	parametre2	0.5645612002	0.5689750885	0.6068693561	0.6084953088	0.6089269762	0.6130875058	0.6578274325	0.6594844062
	Nash	88.509	88.417	89.919	89.648	83.592	83.104	85.188	84.353
Rac2 Nash	91.693	90.158	92.675	91.231	85.497	83.45	86.059	84.008	

ANNEXE 2 : STATION DE KEROUANE

A. KEROUANE	Calage 1973-1980				Calage 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.7145104933	0.7249702913	0.7117549820	0.7246270064	0.7795519495	0.7835250628	0.7722425971	0.7793633830
parametre2	0.6298576372	0.6735731330	0.6309897729	0.6752900072	0.5519959354	0.5738877032	0.5573491618	0.5786170417
Nash	79.129	79.713	78.358	78.806	77.699	78.502	76.657	77.364
Rac2 Nash	83.371	83.891	83.234	83.638	78.781	80.247	78.768	80.014
B. KEROUANE	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	Qobs	45432	45432	45432	44680	44680	44680	44680
	Qcalc	41288	40578	41298	41291	40495	41230	40546
	Nash	76.816	77.563	75.858	76.478	77.848	78.444	77.235
Rac2 Nash	79.35	80.114	79.262	79.819	82.301	83.347	82.284	83.179
C1. KEROUANE	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	Qobs	45432	45432	45432	44680	44680	44680	44680
	Qcalc	39873	41947	39849	40288	41480	40134	41608
	Nash	77.354	76.453	76.173	75.489	78.339	77.718	77.647
Rac2 Nash	81.321	77.675	80.963	77.592	83.503	81.984	83.44	81.837
C2. KEROUANE	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	Qobs	45432	45432	45432	44680	44680	44680	44680
	Qcalc	41474	40740	41113	41670	40818	40858	40227
	Nash	75.916	76.498	76.752	77.544	76.967	77.519	78.102
Rac2 Nash	79.232	79.857	79.38	80.073	81.993	83.019	82.582	83.502
C3. KEROUANE	Validation 1981-1995				Validation 1973-1980			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	Qobs	45432	45432	45432	44680	44680	44680	44680
	Qcalc	40037	42133	39686	40609	41861	39820	41231
	Nash	76.275	75.519	77.251	76.422	77.428	76.804	78.553
Rac2 Nash	80.952	77.643	81.337	77.62	83.144	81.698	83.796	82.114
D1. KEROUANE	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.7249702913	0.7145104933	0.7246270064	0.7117549820	0.7835250628	0.7795519495	0.7793633830
	parametre2	0.6735731330	0.6298576372	0.6752900072	0.6309897729	0.5738877032	0.5519959354	0.5786170417
	Nash	78.809	79.369	77.979	78.401	77.598	78.396	76.531
Rac2 Nash	81.862	84.893	81.708	84.602	78.379	80.497	78.28	80.326
D2. KEROUANE	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.7145104933	0.7249702913	0.7117549820	0.7246270064	0.7795519495	0.7835250628	0.7722425971
	parametre2	0.6735731330	0.6298576372	0.6752900072	0.6309897729	0.5738877032	0.5519959354	0.5786170417
	Nash	78.945	79.531	78.166	78.627	77.625	78.427	76.586
Rac2 Nash	82.155	84.709	82.068	84.405	78.536	80.358	78.548	80.102
D3. KEROUANE	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.7249702913	0.7145104933	0.7246270064	0.7117549820	0.7835250628	0.7795519495	0.7793633830
	parametre2	0.6298576372	0.6735731330	0.6309897729	0.6752900072	0.5519959354	0.5738877032	0.5786170417
	Nash	79.086	79.659	78.288	78.716	77.694	78.497	76.641
Rac2 Nash	83.113	84.131	82.918	83.904	78.633	80.397	78.513	80.257
E1. KEROUANE	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.7117549820	0.7145104933	0.7246270064	0.7249702913	0.7722425971	0.7795519495	0.7793633830
	parametre2	0.6309897729	0.6298576372	0.6752900072	0.6735731330	0.5573491618	0.5519959354	0.5786170417
	Nash	79.127	78.355	79.713	78.805	77.691	76.647	78.499
Rac2 Nash	83.407	83.196	83.86	83.667	79.002	78.538	80.36	79.898
E2. KEROUANE	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.7145104933	0.7117549820	0.7249702913	0.7246270064	0.7795519495	0.7722425971	0.7835250628
	parametre2	0.6309897729	0.6298576372	0.6752900072	0.6735731330	0.5573491618	0.5519959354	0.5786170417
	Nash	79.129	78.358	79.713	78.805	77.695	76.653	78.499
Rac2 Nash	83.346	83.258	83.851	83.676	78.738	78.797	80.2	80.048
E3. KEROUANE	Validation 1973-1980				Validation 1981-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.7117549820	0.7145104933	0.7246270064	0.7249702913	0.7722425971	0.7795519495	0.7793633830
	parametre2	0.6298576372	0.6309897729	0.6735731330	0.6752900072	0.5519959354	0.5573491618	0.5738877032
	Nash	79.126	78.354	79.713	78.805	77.685	76.641	78.496
Rac2 Nash	83.432	83.172	83.9	83.63	79.042	78.506	80.404	79.862

ANNEXE 2 : STATION DE KISSIDOUGOU

A. KISSIDOUGOU	Calage 1960-1970				Calage 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.7548987865	0.7617518361	0.7465945207	0.7539366182	0.7303350924	0.7420231151	0.7220308070	0.7342229652
parametre2	0.4732659781	0.4884470189	0.4751011560	0.4909000203	0.5004689550	0.5184049881	0.5002986342	0.5175367777
Nash	88.556	89.242	88.866	89.569	88.1	88.529	87.93	88.352
Rac2 Nash	91.522	92.725	91.8	93.005	91.973	92.777	91.865	92.642
B. KISSIDOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1960-1970			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	37502	37502	37502	37502	45691	45691	45691	45691
	41196	40340	41155	40286	46764	46246	46748	46227
	87.838	88.313	87.689	88.16	88.307	89.019	88.628	89.373
Rac2 Nash	90.689	91.728	90.66	91.696	92.456	93.46	92.706	93.705
C1. KISSIDOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1960-1970			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	37502	37502	37502	37502	45691	45691	45691	45691
	39877	41620	39787	41612	45379	47569	45311	47598
	88.123	87.752	87.991	87.556	88.878	88.104	89.166	88.473
Rac2 Nash	91.241	91.005	91.213	90.955	93.373	92.292	93.585	92.562
C2. KISSIDOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1960-1970			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	37502	37502	37502	37502	45691	45691	45691	45691
	41661	40807	40696	39824	47334	46818	46186	45661
	87.541	88.036	87.931	88.382	88.702	89.41	88.187	88.934
Rac2 Nash	90.369	91.45	90.952	91.946	92.579	93.602	92.557	93.537
C3. KISSIDOUGOU	Validation 1971-1995				Validation 1960-1970			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	37502	37502	37502	37502	45691	45691	45691	45691
	40340	42089	39329	41149	45941	48148	44756	47025
	87.95	87.354	88.105	87.902	89.357	88.413	88.64	88.118
Rac2 Nash	90.994	90.657	91.428	91.277	93.538	92.396	93.393	92.434
D1. KISSIDOUGOU	Validation 1960-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.7617518361	0.7548987865	0.7539366182	0.7465945207	0.7420231151	0.7303350924	0.7342229652	0.7220308070
	0.4884470189	0.4732659781	0.4909000203	0.4751011560	0.5184049881	0.5004689550	0.5175367777	0.5002986342
	88.444	89.126	88.746	89.438	87.892	88.309	87.716	88.12
Rac2 Nash	91.674	92.415	91.946	92.684	92.013	92.452	91.889	92.321
D2. KISSIDOUGOU	Validation 1960-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.7548987865	0.7617518361	0.7465945207	0.7539366182	0.7303350924	0.7420231151	0.7220308070	0.7342229652
	0.4884470189	0.4732659781	0.4909000203	0.4751011560	0.5184049881	0.5004689550	0.5175367777	0.5002986342
	88.492	89.181	88.799	89.502	88.018	88.451	87.849	88.276
Rac2 Nash	91.847	92.29	92.132	92.555	92.227	92.382	92.112	92.256
D3. KISSIDOUGOU	Validation 1960-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.7617518361	0.7548987865	0.7539366182	0.7465945207	0.7420231151	0.7303350924	0.7342229652	0.7220308070
	0.4732659781	0.4884470189	0.4751011560	0.4909000203	0.5004689550	0.5184049881	0.5002986342	0.5175367777
	88.538	89.221	88.846	89.544	88.039	88.463	87.863	88.272
Rac2 Nash	91.349	92.856	91.616	93.14	91.765	92.861	91.648	92.72
E1. KISSIDOUGOU	Validation 1960-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.7465945207	0.7548987865	0.7539366182	0.7617518361	0.7220308070	0.7303350924	0.7342229652	0.7420231151
	0.4751011560	0.4732659781	0.4909000203	0.4884470189	0.5002986342	0.5004689550	0.5175367777	0.5184049881
	88.533	88.843	89.219	89.547	88.072	87.898	88.498	88.317
Rac2 Nash	91.754	91.54	92.928	92.773	92.082	91.728	92.826	92.562
E2. KISSIDOUGOU	Validation 1960-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.7548987865	0.7465945207	0.7617518361	0.7539366182	0.7303350924	0.7220308070	0.7420231151	0.7342229652
	0.4751011560	0.4732659781	0.4909000203	0.4884470189	0.5002986342	0.5004689550	0.5175367777	0.5184049881
	88.555	88.864	89.239	89.568	88.1	87.93	88.529	88.351
Rac2 Nash	91.57	91.75	92.78	92.947	91.97	91.869	92.763	92.656
E3. KISSIDOUGOU	Validation 1960-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.7465945207	0.7548987865	0.7539366182	0.7617518361	0.7220308070	0.7303350924	0.7342229652	0.7420231151
	0.4732659781	0.4751011560	0.4884470189	0.4909000203	0.5004689550	0.5002986342	0.5184049881	0.5175367777
	88.53	88.84	89.215	89.542	88.073	87.898	88.501	88.32
Rac2 Nash	91.705	91.591	92.872	92.83	92.086	91.724	92.841	92.548

ANNEXE 2 : STATION DE KOULIKORO

A. KOULIKORO	Calage 1950-1970				Calage 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
parametre1	0.5406458827	0.5948992779	0.5990226646	0.6479927459	0.4318077756	0.5159893058	0.4857779638	0.5590440191	
parametre2	0.4730515203	0.5055431036	0.4763584045	0.4958059377	0.4901680823	0.5199778168	0.4811295509	0.5026830342	
Nash	90.852	92.882	90.631	91.742	85.619	87.525	85.351	86.634	
Rac2 Nash	91.697	93.402	90.038	91.037	90.322	90.894	88.644	89.09	
B. KOULIKORO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	Qobs	1007110	1007110	1007110	1700194	1700194	1700194	1700194	
	Qcalc	1447666	1392328	1448491	1391028	1474714	1440954	1496302	
	Nash	70.499	75.908	71.771	75.323	81.974	86.204	82.304	84.982
Rac2 Nash	76.906	81.738	75.913	79.123	91.566	92.487	90.512	90.963	
C1. KOULIKORO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	
	Qobs	1007110	1007110	1007110	1700194	1700194	1700194	1700194	
	Qcalc	1184072	1634366	1243366	1147458	1731772	1225873	1712999	
	Nash	86.599	45.768	84.835	54.425	64.838	90.268	69.357	89.767
Rac2 Nash	87.964	65.987	85.314	67.235	82.525	92.748	84.508	91.549	
C2. KOULIKORO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	
	Qobs	1007110	1007110	1007110	1700194	1700194	1700194	1700194	
	Qcalc	1269692	1229959	1648201	1245844	1333928	1608731	1661253	
	Nash	82.38	84.733	48.443	54.143	73.004	77.807	88.682	91.306
Rac2 Nash	83.83	86.411	64.965	69.874	87.183	88.296	93.061	93.772	
C3. KOULIKORO	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	
	Qobs	1007110	1007110	1007110	1700194	1700194	1700194	1700194	
	Qcalc	1055170	1436125	1408317	1045535	1552149	1351272	1908608	
	Nash	85.66	70.351	76.294	18.551	51.96	86.771	78.577	90.031
Rac2 Nash	88.997	76.785	80.189	52.8	75.062	91.629	89.172	90.994	
D1. KOULIKORO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5948992779	0.5406458827	0.6479927459	0.5990226646	0.5159893058	0.4318077756	0.5590440191	0.4857779638
	parametre2	0.5055431036	0.4730515203	0.4958059377	0.4763584045	0.5199778168	0.4901680823	0.5026830342	0.4811295509
	Nash	87.183	88.321	88.413	89.052	73.42	75.546	78.406	79.232
Rac2 Nash	88.392	92.505	87.369	91.386	81.275	87.913	81.977	88.601	
D2. KOULIKORO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5406458827	0.5948992779	0.5990226646	0.6479927459	0.4318077756	0.5159893058	0.4857779638	0.5590440191
	parametre2	0.5055431036	0.4730515203	0.4958059377	0.4763584045	0.5199778168	0.4901680823	0.5026830342	0.4811295509
	Nash	90.534	92.574	90.518	91.625	85.373	87.299	85.213	86.504
Rac2 Nash	91.951	92.572	90.281	90.594	90.532	90.209	88.909	88.572	
D3. KOULIKORO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5948992779	0.5406458827	0.6479927459	0.5990226646	0.5159893058	0.4318077756	0.5590440191	0.4857779638
	parametre2	0.4730515203	0.5055431036	0.4763584045	0.4958059377	0.4901680823	0.5199778168	0.4811295509	0.5026830342
	Nash	88.489	89.444	88.976	89.562	75.71	76.663	79.574	79.975
Rac2 Nash	88.264	93.436	87.163	91.868	81.305	88.519	81.793	89.12	
E1. KOULIKORO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5990226646	0.5406458827	0.6479927459	0.5948992779	0.4857779638	0.4318077756	0.5590440191	0.5159893058
	parametre2	0.4763584045	0.4730515203	0.4958059377	0.5055431036	0.4811295509	0.4901680823	0.5026830342	0.5199778168
	Nash	88.006	88.267	89.767	89.38	81.898	82.597	84.428	84.513
Rac2 Nash	87.968	91.347	89.938	91.989	85.368	90.262	87.057	90.24	
E2. KOULIKORO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5406458827	0.5990226646	0.5948992779	0.6479927459	0.4318077756	0.4857779638	0.5159893058	0.5590440191
	parametre2	0.4763584045	0.4730515203	0.4958059377	0.5055431036	0.4811295509	0.4901680823	0.5026830342	0.5199778168
	Nash	90.849	90.627	92.856	91.718	85.596	85.325	87.451	86.56
Rac2 Nash	91.757	89.97	93.228	91.165	90.143	88.793	90.564	89.294	
E3. KOULIKORO	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5990226646	0.5406458827	0.6479927459	0.5948992779	0.4857779638	0.4318077756	0.5590440191	0.5159893058
	parametre2	0.4730515203	0.4763584045	0.5055431036	0.4958059377	0.4901680823	0.4811295509	0.5199778168	0.5026830342
	Nash	88.116	88.343	89.446	89.187	81.561	82.4	83.927	84.233
Rac2 Nash	87.919	91.419	90.056	91.834	85.512	90.094	87.342	90.01	

ANNEXE 2 : STATION DE KOUROUSSA

A. KOUROUSSA	Calage 1950-1970				Calage 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
parametre1	0.4536986499	0.5085030016	0.4758085676	0.5282161284	0.3979565999	0.4742977445	0.4174266524	0.4896087456	
parametre2	0.4747546471	0.5186825658	0.4751847072	0.5133775747	0.4754473852	0.5116174380	0.4718452732	0.5031203986	
Nash	82.773	85.226	83.591	85.74	81.626	83.818	82.272	84.294	
Rac2 Nash	88.544	90.573	88.395	90.347	86.599	88.005	86.086	87.581	
B. KOUROUSSA	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	Qobs	179895	179895	179895	179895	261155	261155	261155	
	Qcalc	228056	217707	230351	221488	234297	244460	236255	244192
	Nash	77.443	81.292	77.933	81.337	79.438	83.253	80.141	83.463
Rac2 Nash	81.38	85.808	80.761	84.928	89.554	90.693	89.443	90.565	
C1. KOUROUSSA	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	
	Qobs	179895	179895	179895	179895	261155	261155	261155	
	Qcalc	180960	262350	187392	261724	191013	289024	194482	285845
	Nash	82.256	60.442	83.541	62.969	65.839	81.5	67.849	82.988
Rac2 Nash	87.131	73.654	87.059	73.624	83.218	87.377	84.218	87.774	
C2. KOUROUSSA	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	
	Qobs	179895	179895	179895	179895	261155	261155	261155	
	Qcalc	217222	208426	241831	231606	222981	233122	248229	256138
	Nash	80.581	83.406	73.41	77.869	77.628	81.721	81.301	84.434
Rac2 Nash	83.204	86.794	78.429	83.458	89.001	90.229	89.569	90.69	
C3. KOUROUSSA	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970				
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	
	Qobs	179895	179895	179895	179895	261155	261155	261155	
	Qcalc	173789	249913	195343	274700	182139	275225	203905	300128
	Nash	81.449	68.157	83.516	53.806	62.457	83.26	70.961	80.558
Rac2 Nash	87.21	76.764	86.613	70.042	81.548	88.631	85.604	86.171	
D1. KOUROUSSA	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5085030016	0.4536986499	0.5282161284	0.4758085676	0.4742977445	0.3979565999	0.4896087456	
	parametre2	0.5186825658	0.4747546471	0.5133775747	0.4751847072	0.5116174380	0.4754473852	0.5031203986	
	Nash	77.548	79.033	79.351	80.692	71.176	72.769	73.916	75.09
Rac2 Nash	84.122	88.851	84.458	89.371	79.198	85.066	79.469	85.785	
D2. KOUROUSSA	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4536986499	0.5085030016	0.4758085676	0.5282161284	0.3979565999	0.4742977445	0.4174266524	
	parametre2	0.5186825658	0.4747546471	0.5133775747	0.4751847072	0.5116174380	0.4754473852	0.5031203986	
	Nash	82.237	84.745	83.2	85.37	81.29	83.489	82.001	84.035
Rac2 Nash	88.649	89.584	88.538	89.537	87.366	86.688	86.794	86.426	
D3. KOUROUSSA	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.5085030016	0.4536986499	0.5282161284	0.4758085676	0.4742977445	0.3979565999	0.4896087456	
	parametre2	0.4747546471	0.5186825658	0.4751847072	0.5133775747	0.4754473852	0.5116174380	0.4718452732	
	Nash	79.544	80.622	80.879	81.983	73.711	74.206	75.85	76.309
Rac2 Nash	84.231	89.99	84.471	90.318	78.654	86.242	78.911	86.869	
E1. KOUROUSSA	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4758085676	0.4536986499	0.5282161284	0.5085030016	0.4174266524	0.3979565999	0.4896087456	
	parametre2	0.4751847072	0.4747546471	0.5133775747	0.5186825658	0.4718452732	0.4754473852	0.5031203986	
	Nash	82.24	83.104	84.674	85.253	81.163	81.846	83.437	83.968
Rac2 Nash	87.17	89.25	89.542	90.873	85.066	87.202	86.957	88.316	
E2. KOUROUSSA	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4536986499	0.4758085676	0.5085030016	0.5282161284	0.3979565999	0.4174266524	0.4742977445	
	parametre2	0.4751847072	0.4747546471	0.5133775747	0.5186825658	0.4718452732	0.4754473852	0.5031203986	
	Nash	82.773	83.591	85.22	85.733	81.621	82.268	83.8	84.277
Rac2 Nash	88.551	88.388	90.515	90.39	86.478	86.199	87.764	87.794	
E3. KOUROUSSA	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4758085676	0.4536986499	0.5282161284	0.5085030016	0.4174266524	0.3979565999	0.4896087456	
	parametre2	0.4747546471	0.4751847072	0.5186825658	0.5133775747	0.4754473852	0.4718452732	0.5031203986	
	Nash	82.246	83.109	84.612	85.203	81.12	81.81	83.361	83.905
Rac2 Nash	87.163	89.258	89.587	90.82	85.183	87.086	87.194	88.099	

ANNEXE 2 : STATION DE MANDIANA

A. MANDIANA	Calage 1957-1970				Calage 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.4892098567	0.5430643251	0.4926920146	0.5464142473	0.4323053656	0.5020673582	0.4319720922	0.5018907071
parametre2	0.5179847992	0.5499955249	0.5146092279	0.5437777909	0.5949357508	0.6262714599	0.5962950646	0.6226649050
Nash	83.486	83.943	81.942	82.104	85.245	85.348	84.564	84.448
Rac2 Nash	85.488	84.505	84.105	82.938	87.206	85.112	86.439	84.099
B. MANDIANA	Validation 1971-1995				Validation 1957-1970			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	217703	217703	217703	217703	292685	292685	292685	292685
	270960	269448	275161	273838	275024	295368	273715	293963
	Nash	82.417	83.26	81.323	82.006	81.03	82.17	79.16
Rac2 Nash	81.396	81.742	79.982	80.203	85.54	83.785	84.153	82.246
C1. MANDIANA	Validation 1971-1995				Validation 1957-1970			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	217703	217703	217703	217703	292685	292685	292685	292685
	233065	307317	237227	311793	246690	326697	245400	325476
	Nash	82.868	73.516	82.184	72.137	72.083	80.239	69.942
Rac2 Nash	83.495	74.901	82.373	73.248	80.415	81.428	78.732	80.512
C2. MANDIANA	Validation 1971-1995				Validation 1957-1970			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	217703	217703	217703	217703	292685	292685	292685	292685
	272816	271483	273289	271801	273967	294073	274772	295256
	Nash	81.673	82.359	82.074	82.906	79.198	80.042	80.994
Rac2 Nash	80.486	80.684	80.9	81.262	84.199	82.139	85.495	83.888
C3. MANDIANA	Validation 1971-1995				Validation 1957-1970			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	217703	217703	217703	217703	292685	292685	292685	292685
	234968	309515	235319	309579	245628	325589	246461	326583
	Nash	82.115	72.672	82.942	72.993	69.993	78.826	72.033
Rac2 Nash	82.602	73.868	83.273	74.293	78.79	80.307	80.359	81.636
D1. MANDIANA	Validation 1957-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.5430643251	0.4892098567	0.5464142473	0.4926920146	0.5020673582	0.4323053656	0.5018907071	0.4319720922
	0.5499955249	0.5179847992	0.5437777909	0.5146092279	0.6262714599	0.5949357508	0.6226649050	0.5962950646
	Nash	79.734	79.916	78.41	78.248	78.661	78.655	78.108
Rac2 Nash	80.794	84.277	79.519	82.842	80.326	84.339	79.518	83.544
D2. MANDIANA	Validation 1957-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.4892098567	0.5430643251	0.4926920146	0.5464142473	0.4323053656	0.5020673582	0.4319720922	0.5018907071
	0.5499955249	0.5179847992	0.5437777909	0.5146092279	0.6262714599	0.5949357508	0.6226649050	0.5962950646
	Nash	83.242	83.728	81.748	81.912	85.098	85.208	84.453
Rac2 Nash	85.161	84.247	83.883	82.675	86.956	85.019	86.243	84.033
D3. MANDIANA	Validation 1957-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	0.5430643251	0.4892098567	0.5464142473	0.4926920146	0.5020673582	0.4323053656	0.5018907071	0.4319720922
	0.5179847992	0.5499955249	0.5146092279	0.5437777909	0.5949357508	0.6262714599	0.5962950646	0.6226649050
	Nash	80.824	80.701	79.355	78.943	79.795	79.269	79.039
Rac2 Nash	81.288	84.595	79.878	83.148	80.749	84.372	79.849	83.558
E1. MANDIANA	Validation 1957-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.4926920146	0.4892098567	0.5464142473	0.5430643251	0.4319720922	0.4323053656	0.5018907071	0.5020673582
	0.5146092279	0.5179847992	0.5437777909	0.5499955249	0.5962950646	0.5949357508	0.6226649050	0.6262714599
	Nash	83.477	81.934	83.93	82.091	85.245	84.564	85.346
Rac2 Nash	85.301	84.284	84.371	83.054	87.222	86.423	85.125	84.083
E2. MANDIANA	Validation 1971-1995				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.4892098567	0.4926920146	0.5430643251	0.5464142473	0.4323053656	0.4319720922	0.5020673582	0.5018907071
	0.5146092279	0.5179847992	0.5437777909	0.5499955249	0.5962950646	0.5949357508	0.6226649050	0.6262714599
	Nash	83.484	81.94	83.936	82.098	85.245	84.564	85.346
Rac2 Nash	85.488	84.104	84.498	82.934	87.203	86.443	85.119	84.089
E3. MANDIANA	Validation 1957-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	0.4926920146	0.4892098567	0.5464142473	0.5430643251	0.4319720922	0.4323053656	0.5018907071	0.5020673582
	0.5179847992	0.5146092279	0.5499955249	0.5437777909	0.5949357508	0.5962950646	0.6262714599	0.6226649050
	Nash	83.473	81.931	83.928	82.089	85.245	84.564	85.346
Rac2 Nash	85.3	84.284	84.376	83.056	87.225	86.42	85.118	84.093

ANNEXE 2 : STATION D'OUARAN

A. OUARAN	Calage 1957-1970				Calage 1971-1985				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
parametre1	0.4115404934	0.4873051744	0.4108629979	0.4866948065	0.3299123048	0.4278341022	0.3319411761	0.4289576318	
parametre2	0.4582877081	0.4897756453	0.4598331790	0.4883369509	0.5005757614	0.5237019582	0.4992622842	0.5201165807	
Nash	85.223	86.754	84.8	85.884	85.766	86.767	85.594	86.349	
Rac2 Nash	88.318	89.803	87.996	89.034	90.808	90.469	90.392	89.656	
B. OUARAN	Validation 1971-1985				Validation 1957-1970				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	Qobs	115330	115330	115330	115330	206385	206385	206385	
	Qcalc	171805	163534	169198	161475	167379	181152	169149	183702
	Nash	72.465	77.559	73.231	77.904	77.326	81.258	77.304	80.8
Rac2 Nash	78.468	82.928	78.802	82.628	87.891	88.986	87.71	88.369	
C1. OUARAN	Validation 1971-1985				Validation 1957-1970				
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	
	Qobs	115330	115330	115330	115330	206385	206385	206385	
	Qcalc	121371	214613	120503	211729	125452	233481	128503	234760
	Nash	84.322	25.76	83.981	28.197	51.932	82.602	52.91	82.296
Rac2 Nash	89.021	58.966	88.452	59.552	73.756	86.435	74.059	86.156	
C2. OUARAN	Validation 1971-1985				Validation 1957-1970				
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	
	Qobs	115330	115330	115330	115330	206385	206385	206385	
	Qcalc	169576	161838	171425	163161	167805	182964	168725	181896
	Nash	73.095	77.639	72.605	77.834	76.915	80.653	77.715	81.407
Rac2 Nash	78.603	82.558	78.67	83	87.547	88.274	88.055	89.081	
C3. OUARAN	Validation 1971-1985				Validation 1957-1970				
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	
	Qobs	115330	115330	115330	115330	206385	206385	206385	
	Qcalc	120832	212073	121035	214266	127493	233977	126457	234261
	Nash	83.997	27.442	84.308	26.529	52.256	82.219	52.599	82.682
Rac2 Nash	88.38	59.374	89.097	59.145	73.619	86.14	74.208	86.457	
D1. OUARAN	Validation 1957-1970				Validation 1971-1985				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4873051744	0.4115404934	0.4866948065	0.4108629979	0.4278341022	0.3299123048	0.4289576318	0.3319411761
	parametre2	0.4897756453	0.4582877081	0.4883369509	0.4598331790	0.5237019582	0.5005757614	0.5201165807	0.4992622842
	Nash	74.63	75.33	74.405	74.931	58.996	66.871	59.916	67.416
Rac2 Nash	80.023	86.591	79.76	85.991	75.613	83.708	75.567	83.442	
D2. OUARAN	Validation 1957-1970				Validation 1971-1985				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4115404934	0.4873051744	0.4108629979	0.4866948065	0.3299123048	0.4278341022	0.3319411761	0.4289576318
	parametre2	0.4897756453	0.4582877081	0.4883369509	0.4598331790	0.5237019582	0.5005757614	0.5201165807	0.4992622842
	Nash	84.888	86.436	84.527	85.626	85.633	86.632	85.486	86.246
Rac2 Nash	88.404	89.042	88.112	88.348	90.903	90.117	90.497	89.346	
D3. OUARAN	Validation 1957-1970				Validation 1971-1985				
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4873051744	0.4115404934	0.4866948065	0.4108629979	0.4278341022	0.3299123048	0.4289576318	0.3319411761
	parametre2	0.4582877081	0.4897756453	0.4598331790	0.4883369509	0.5005757614	0.5237019582	0.4992622842	0.5201165807
	Nash	77.091	76.791	76.587	76.191	61.805	67.704	62.382	68.15
Rac2 Nash	80.201	87.37	79.872	86.664	75.701	83.82	75.615	83.539	
E1. OUARAN	Validation 1957-1970				Validation 1971-1985				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4108629979	0.4115404934	0.4866948065	0.4873051744	0.3319411761	0.3299123048	0.4289576318	0.4278341022
	parametre2	0.4598331790	0.4582877081	0.4883369509	0.4897756453	0.4992622842	0.5005757614	0.5201165807	0.5237019582
	Nash	85.222	84.799	86.753	85.881	85.759	85.585	86.763	86.347
Rac2 Nash	88.379	87.934	89.809	89.028	90.675	90.515	90.389	89.728	
E2. OUARAN	Validation 1957-1970				Validation 1971-1985				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4115404934	0.4108629979	0.4873051744	0.4866948065	0.3299123048	0.3319411761	0.4278341022	0.4289576318
	parametre2	0.4598331790	0.4582877081	0.4883369509	0.4897756453	0.4992622842	0.5005757614	0.5201165807	0.5237019582
	Nash	85.222	84.799	86.754	85.883	85.766	85.594	86.763	86.347
Rac2 Nash	88.34	87.972	89.784	89.053	90.793	90.406	90.435	89.684	
E3. OUARAN	Validation 1957-1970				Validation 1971-1985				
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
	parametre1	0.4108629979	0.4115404934	0.4866948065	0.4873051744	0.3319411761	0.3299123048	0.4289576318	0.4278341022
	parametre2	0.4582877081	0.4598331790	0.4897756453	0.4883369509	0.5005757614	0.4992622842	0.5237019582	0.5201165807
	Nash	85.222	84.799	86.754	85.883	85.757	85.583	86.764	86.347
Rac2 Nash	88.357	87.958	89.828	89.009	90.69	90.5	90.423	89.7	

ANNEXE 2 : STATION DE SIGUIRY

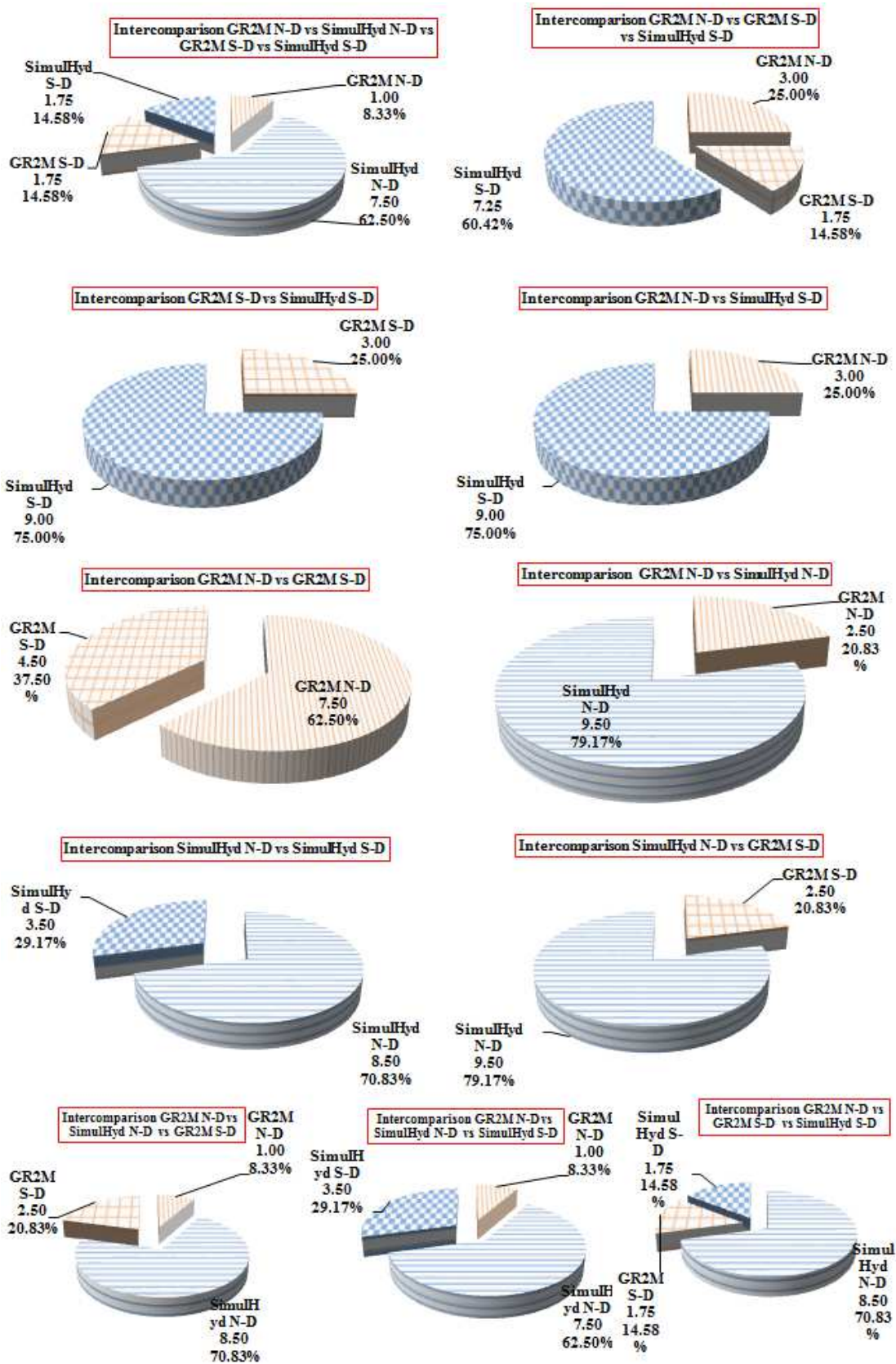
A. SIGUIRY	Calage 1950-1970				Calage 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.5709367075	0.6122260175	0.6340215989	0.6725670392	0.5383057966	0.5964722515	0.6106673577	0.6606510416
parametre2	0.5030663599	0.5412772853	0.5106425450	0.5330182088	0.5042297815	0.5417640032	0.5013637970	0.5236785668
Nash	90.251	92.538	90.969	92.071	79.703	80.872	79.689	80.525
Rac2 Nash	92.003	94.148	91.658	92.841	80.177	81.389	79.593	80.558
B. SIGUIRY	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	Qobs	944891	944891	944891	1218673	1218673	1218673	1218673
	Qcalc	1092122	1046082	1083263	1243996	1264970	1286785	1301093
	Nash	78.88	80.574	79.253	80.322	89.541	92.271	90.555
Rac2 Nash	78.557	80.719	78.623	80.074	92.937	94.532	92.248	93.117
C1. SIGUIRY	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	Qobs	944891	944891	944891	1218673	1218673	1218673	1218673
	Qcalc	934821	1189177	962171	1091533	1403367	1164328	1412902
	Nash	79.281	73.642	79.751	85.47	88.959	88.091	90.361
Rac2 Nash	81.326	75.111	81.1	76.115	92.698	90.513	92.785	90.503
C2. SIGUIRY	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	Qobs	944891	944891	944891	1218673	1218673	1218673	1218673
	Qcalc	950705	911200	1240683	1106530	1125887	1442909	1464638
	Nash	78.741	78.847	72.197	85.454	87.729	89.173	90.534
Rac2 Nash	80.568	81.39	73.401	75.797	92.21	93.099	89.863	91.335
C3. SIGUIRY	Validation 1971-1995				Validation 1950-1970			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	Qobs	944891	944891	944891	1218673	1218673	1218673	1218673
	Qcalc	817695	1037055	1106170	975016	1250785	1309049	1580797
	Nash	73.217	79.284	79.629	76.979	90.31	92.103	83.646
Rac2 Nash	79.983	79.392	79.175	68.775	88.947	92.654	93.599	85.678
D1. SIGUIRY	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.6122260175	0.5709367075	0.6725670392	0.6340215989	0.5964722515	0.5383057966	0.6606510416
	parametre2	0.5412772853	0.5030663599	0.5330182088	0.5106425450	0.5417640032	0.5042297815	0.5236785668
	Nash	87.954	89.679	89.604	90.431	75.583	75.718	77.564
Rac2 Nash	89.486	93.836	89.789	93.241	76.454	80.763	77.037	80.999
D2. SIGUIRY	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.5709367075	0.6122260175	0.6340215989	0.6725670392	0.5383057966	0.5964722515	0.6106673577
	parametre2	0.5412772853	0.5030663599	0.5330182088	0.5106425450	0.5417640032	0.5042297815	0.5236785668
	Nash	89.87	92.172	90.842	91.947	79.368	80.549	79.568
Rac2 Nash	91.854	93.602	91.69	92.579	80.013	80.958	79.625	80.311
D3. SIGUIRY	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.6122260175	0.5709367075	0.6725670392	0.6340215989	0.5964722515	0.5383057966	0.6606510416
	parametre2	0.5030663599	0.5412772853	0.5106425450	0.5330182088	0.5042297815	0.5417640032	0.5236785668
	Nash	89.056	90.738	90.07	90.884	77.047	76.965	78.159
Rac2 Nash	89.768	94.557	89.804	93.568	76.782	81.369	77.054	81.314
E1. SIGUIRY	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.6340215989	0.5709367075	0.6725670392	0.6122260175	0.6106673577	0.5383057966	0.6606510416
	parametre2	0.5106425450	0.5030663599	0.5330182088	0.5412772853	0.5013637970	0.5042297815	0.5236785668
	Nash	87.237	88.483	89.07	89.354	75.706	76.574	76.514
Rac2 Nash	88.155	92.667	90.354	93.473	75.601	80.6	77.04	81.207
E2. SIGUIRY	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.5709367075	0.6340215989	0.6122260175	0.6725670392	0.5383057966	0.6106673577	0.5964722515
	parametre2	0.5106425450	0.5030663599	0.5330182088	0.5412772853	0.5013637970	0.5042297815	0.5236785668
	Nash	90.235	90.953	92.521	92.055	79.701	79.687	80.797
Rac2 Nash	92.045	91.578	94.102	92.866	80.156	79.613	81.276	80.556
E3. SIGUIRY	Validation 1950-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.6340215989	0.5709367075	0.6725670392	0.6122260175	0.6106673577	0.5383057966	0.6606510416
	parametre2	0.5030663599	0.5106425450	0.5412772853	0.5330182088	0.5042297815	0.5013637970	0.5236785668
	Nash	87.476	88.651	88.8	89.187	75.6	76.508	75.843
Rac2 Nash	88.15	92.768	90.329	93.407	75.609	80.572	77.012	81.122

ANNEXE 2 : STATION DE TINKISSO

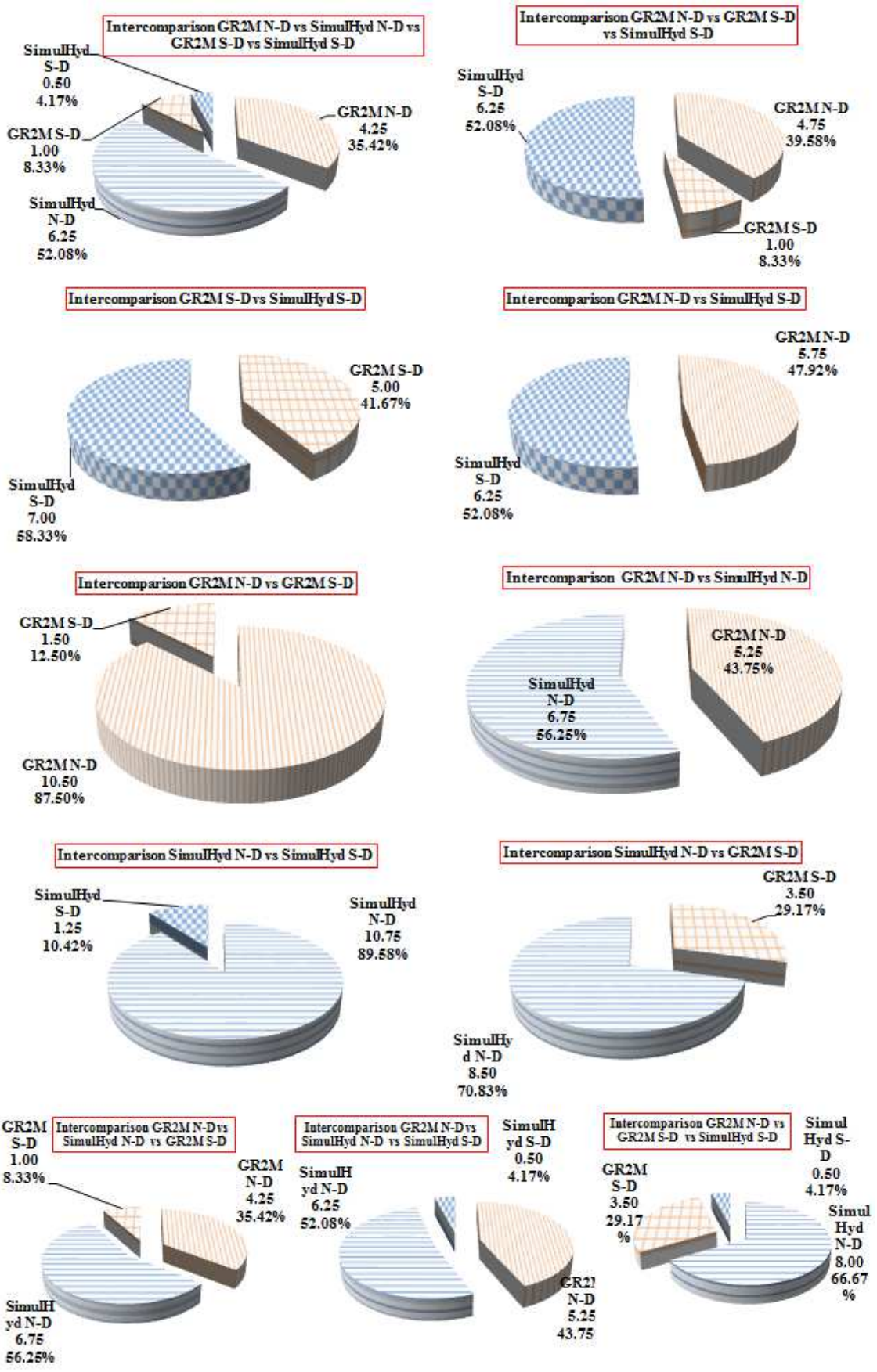
A. TINKINSSO	Calage 1958-1970				Calage 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
parametre1	0.4340903585	0.5017026065	0.4459269073	0.5136525659	0.4004614139	0.4841013144	0.4141387939	0.4965403882
parametre2	0.5104522932	0.5477390005	0.5080126595	0.5418260419	0.5008624549	0.5327700966	0.4955872429	0.5265215898
Nash	86.142	87.657	86.102	87.499	82.09	84.696	82.254	84.791
Rac2 Nash	88.03	88.933	87.792	88.636	85.847	86.455	85.569	86.374
B. TINKINSSO	Validation 1971-1995				Validation 1958-1970			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	Qobs	60647	60647	60647	86038	86038	86038	86038
	Qcalc	75632	73890	75875	83791	88194	84531	88446
	Nash	80.403	83.926	80.773	84.077	84.57	86.919	86.834
Rac2 Nash	83.063	85.623	83.146	85.598	88.952	89.078	88.617	88.79
C1. TINKINSSO	Validation 1971-1995				Validation 1958-1970			
	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D
	Qobs	60647	60647	60647	86038	86038	86038	86038
	Qcalc	58555	90818	59086	67542	105493	68371	105617
	Nash	80.239	64.657	80.531	66.357	70.88	82.169	71.868
Rac2 Nash	86.564	74.038	86.693	74.555	83.611	84.126	83.925	83.764
C2. TINKINSSO	Validation 1971-1995				Validation 1958-1970			
	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D
	Qobs	60647	60647	60647	86038	86038	86038	86038
	Qcalc	73315	71475	78255	81046	85127	87363	91805
	Nash	81.557	84.574	79.188	82.914	83.524	85.999	85.428
Rac2 Nash	84.353	86.506	81.654	84.472	88.813	88.891	88.567	87.877
C3. TINKINSSO	Validation 1971-1995				Validation 1958-1970			
	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D	SimulHyd S-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	Gr2m N-D
	Qobs	60647	60647	60647	86038	86038	86038	86038
	Qcalc	56679	88169	61054	65354	102225	70691	108946
	Nash	78.702	69.036	81.823	61.451	68.635	83.602	74.011
Rac2 Nash	86.469	76.415	86.62	71.971	82.586	85.144	84.827	82.576
D1. TINKINSSO	Validation 1958-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.5017026065	0.4340903585	0.5136525659	0.4459269073	0.4841013144	0.4004614139	0.4965403882
	parametre2	0.5477390005	0.5104522932	0.5418260419	0.5080126595	0.5327700966	0.5008624549	0.5265215898
	Nash	78.345	79.219	78.823	79.584	70.828	73.534	72.019
Rac2 Nash	81.939	86.921	81.958	86.936	76.835	84.87	77.11	
D2. TINKINSSO	Validation 1958-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.4340903585	0.5017026065	0.4459269073	0.5136525659	0.4004614139	0.4841013144	0.4141387939
	parametre2	0.5477390005	0.5104522932	0.5418260419	0.5080126595	0.5327700966	0.5008624549	0.5265215898
	Nash	85.741	87.281	85.763	87.185	81.835	84.451	82.011
Rac2 Nash	88.027	88.232	87.845	87.978	86.529	85.398	86.272	
D3. TINKINSSO	Validation 1958-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	SimulHyd N-D	Gr2m S-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.5017026065	0.4340903585	0.5136525659	0.4459269073	0.4841013144	0.4004614139	0.4965403882
	parametre2	0.5104522932	0.5477390005	0.5080126595	0.5418260419	0.5008624549	0.5327700966	0.4955872429
	Nash	80.572	80.657	80.778	80.875	72.99	74.572	74.027
Rac2 Nash	82.157	87.609	82.082	87.587	76.24	85.645	76.474	
E1. TINKINSSO	Validation 1958-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.4459269073	0.4340903585	0.5136525659	0.5017026065	0.4141387939	0.4004614139	0.4965403882
	parametre2	0.5080126595	0.5104522932	0.5418260419	0.5477390005	0.4955872429	0.5008624549	0.5265215898
	Nash	85.986	85.952	87.461	87.314	81.883	82.049	84.454
Rac2 Nash	87.306	88.35	88.383	88.986	84.584	86.598	85.533	
E2. TINKINSSO	Validation 1958-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.4340903585	0.4459269073	0.5017026065	0.5136525659	0.4004614139	0.4141387939	0.4841013144
	parametre2	0.5080126595	0.5104522932	0.5418260419	0.5477390005	0.4955872429	0.5008624549	0.5265215898
	Nash	86.14	86.099	87.648	87.49	82.081	82.248	84.687
Rac2 Nash	87.998	87.821	88.88	88.676	85.677	85.729	86.293	
E3. TINKINSSO	Validation 1958-1970				Validation 1971-1995			
	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	Gr2m N-D	Gr2m S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
	parametre1	0.4459269073	0.4340903585	0.5136525659	0.5017026065	0.4141387939	0.4004614139	0.4965403882
	parametre2	0.5104522932	0.5080126595	0.5477390005	0.5418260419	0.5008624549	0.4955872429	0.5327700966
	Nash	85.969	85.938	87.423	87.28	81.85	82.017	84.418
Rac2 Nash	87.336	88.319	88.432	88.941	84.754	86.437	85.698	

Annexes 3: performance de simulation par les modèles, « approche totalisante »

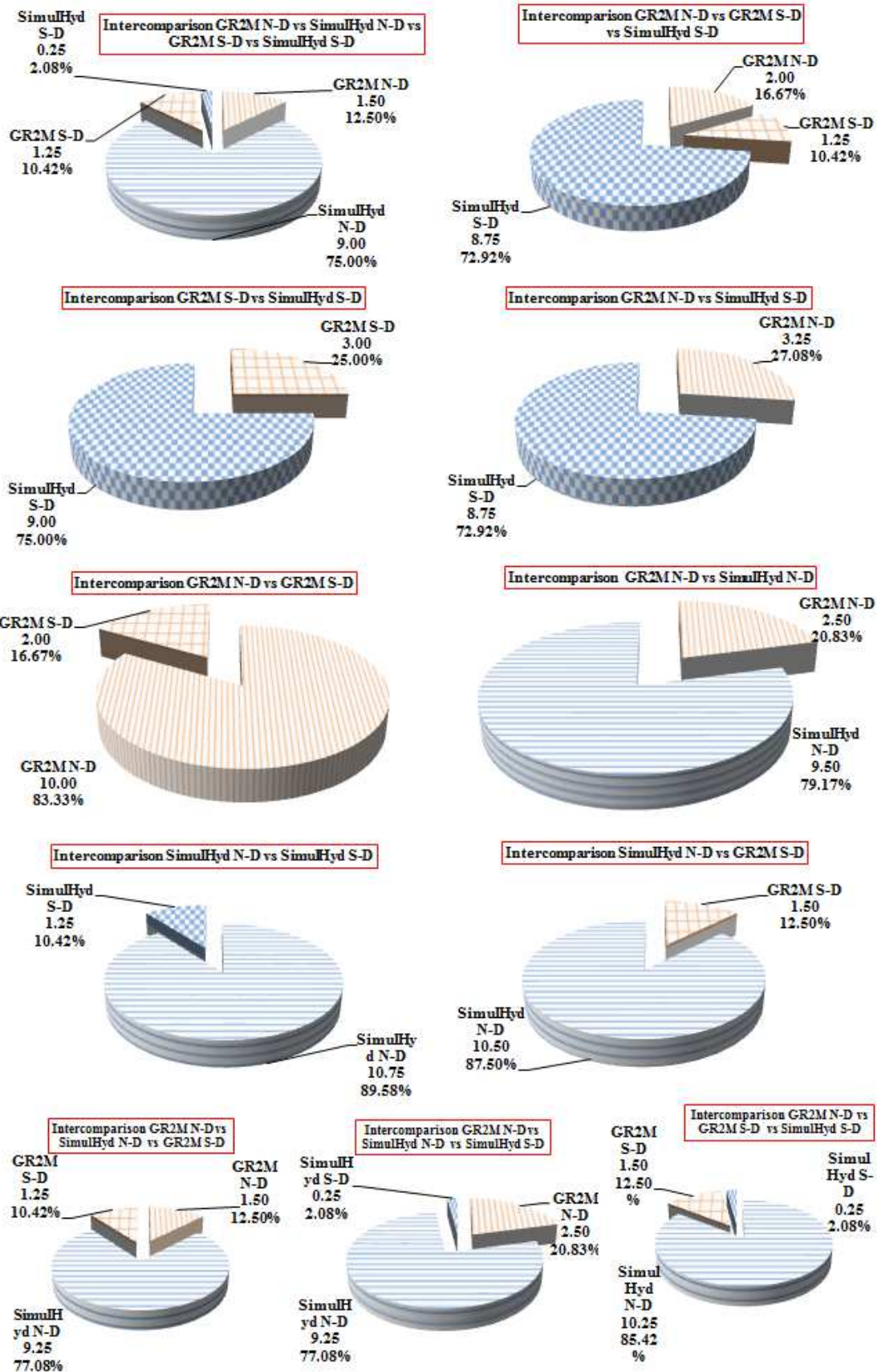
ANNEXE 3 : STATION DE BANANKORO



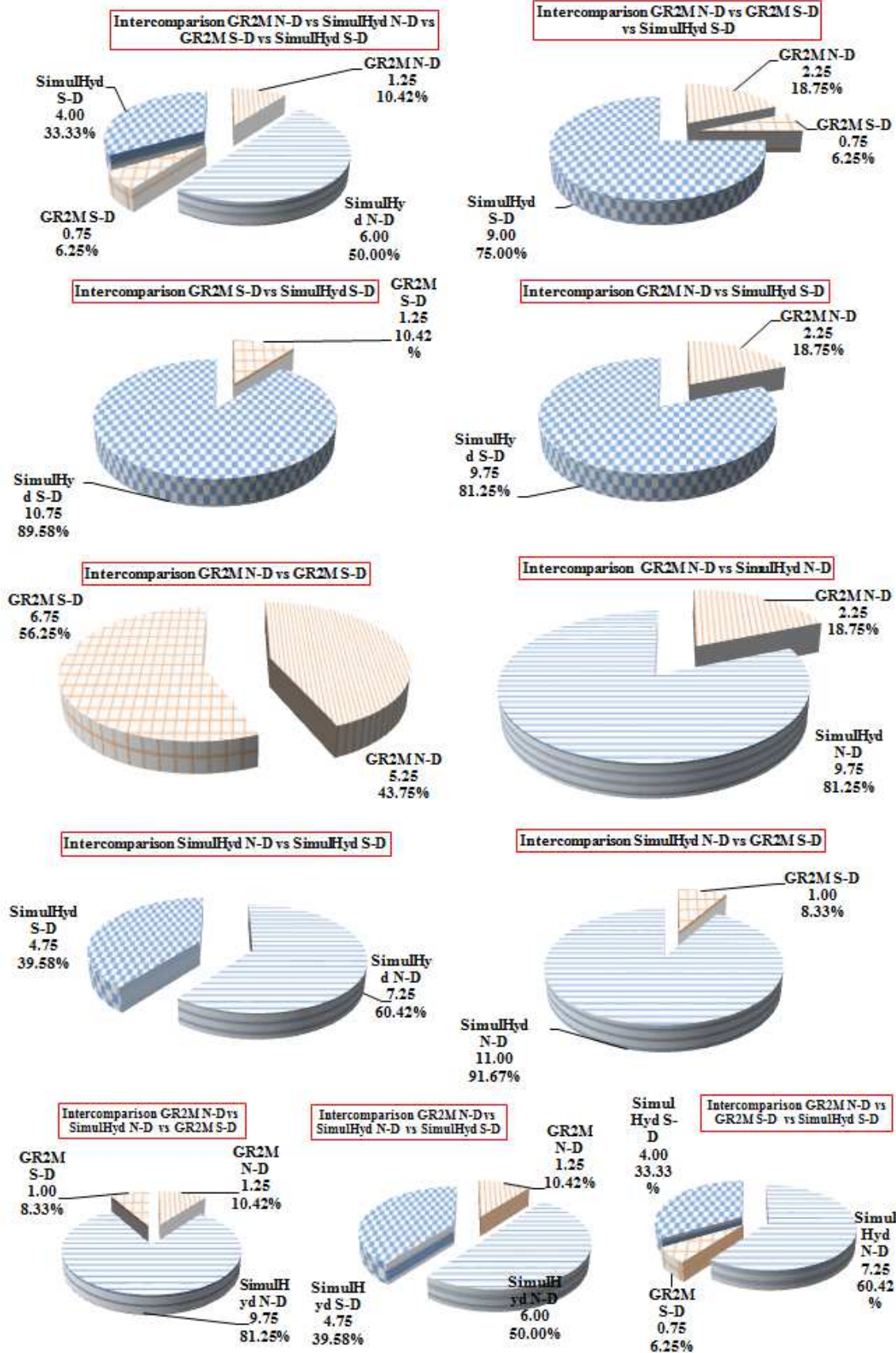
ANNEXE 3 : STATION DE BARANAMA



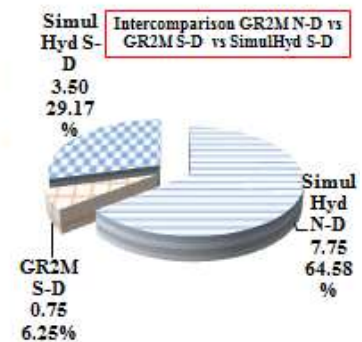
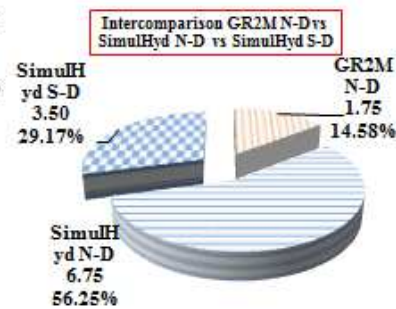
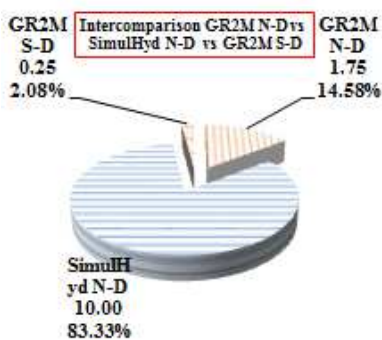
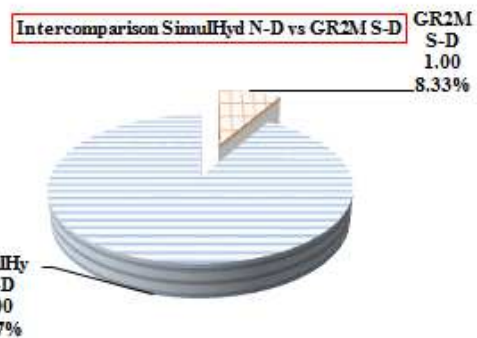
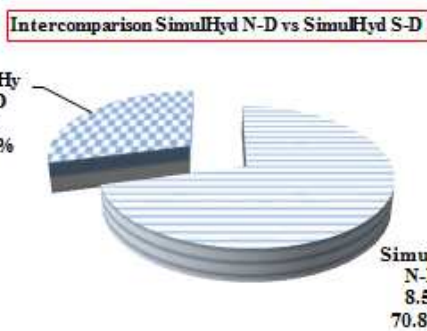
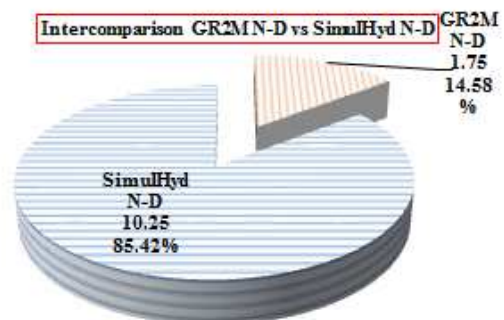
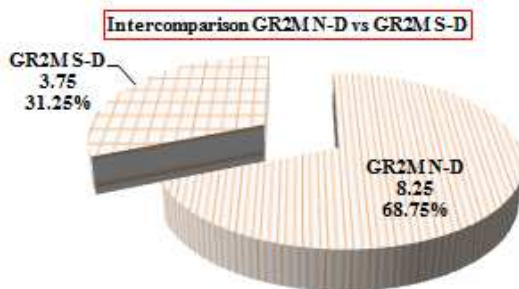
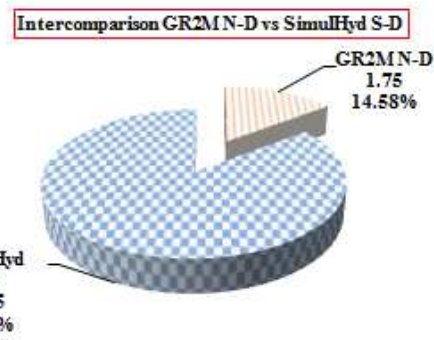
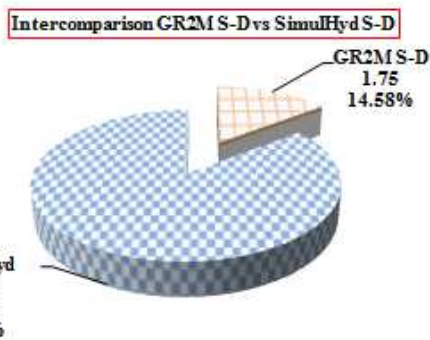
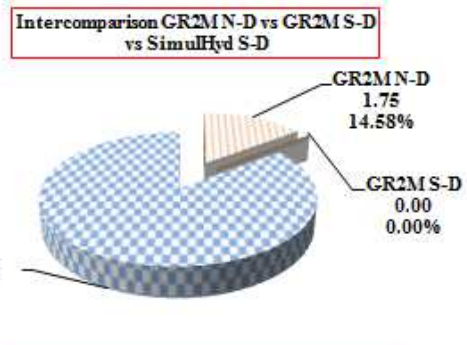
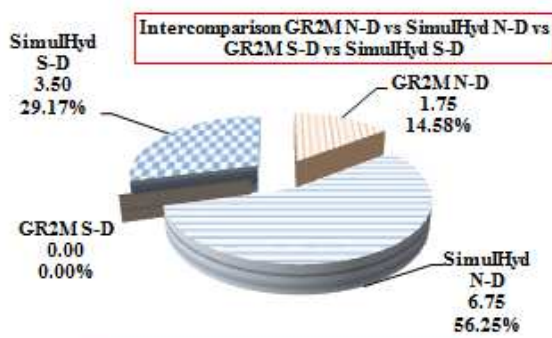
ANNEXE 3 : STATION DE BARO



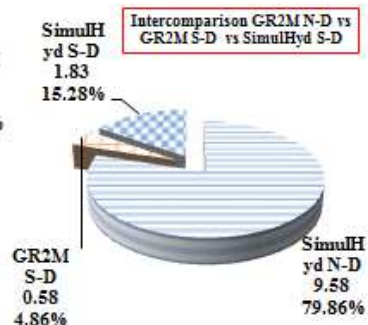
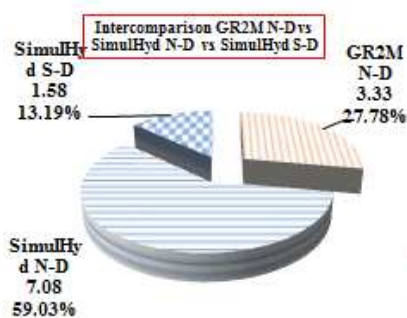
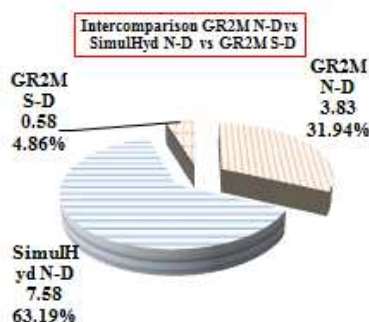
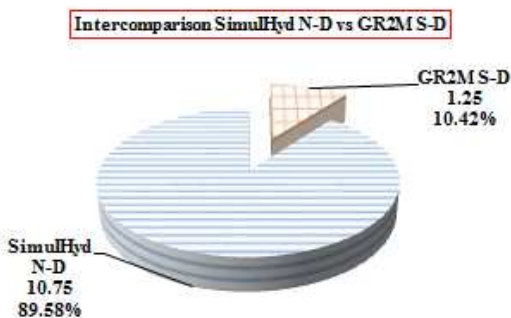
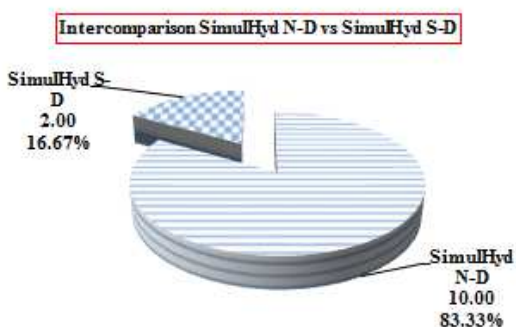
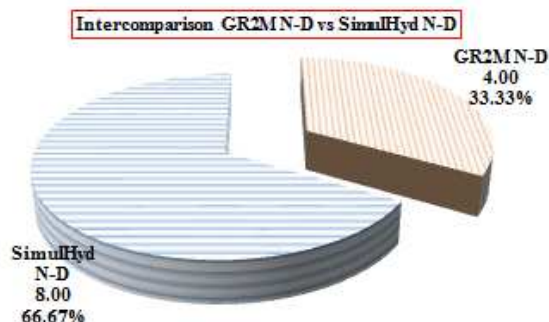
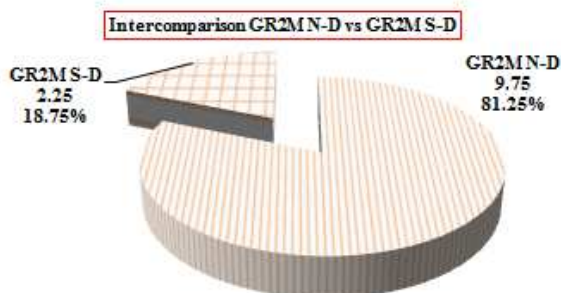
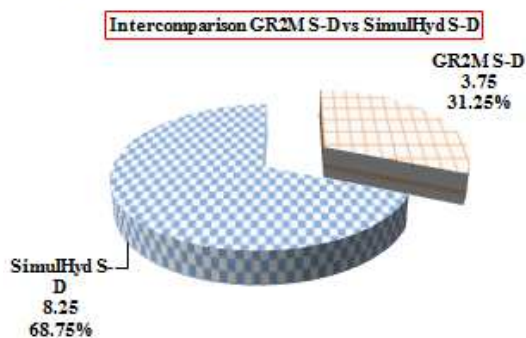
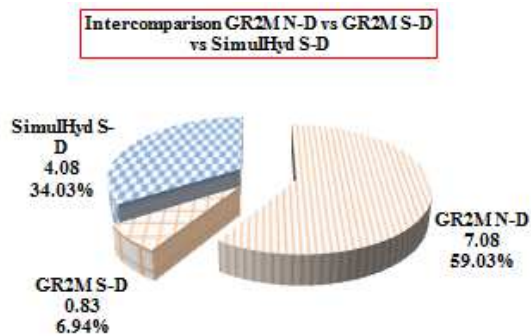
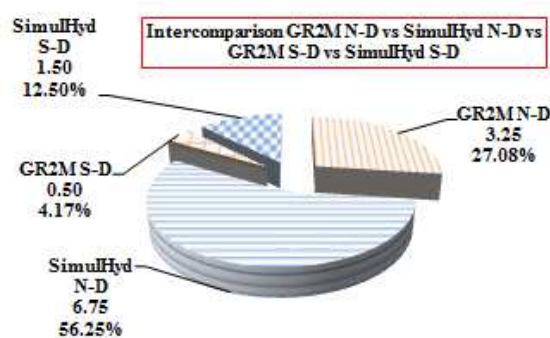
ANNEXE 3 : STATION DE DIALAKORO



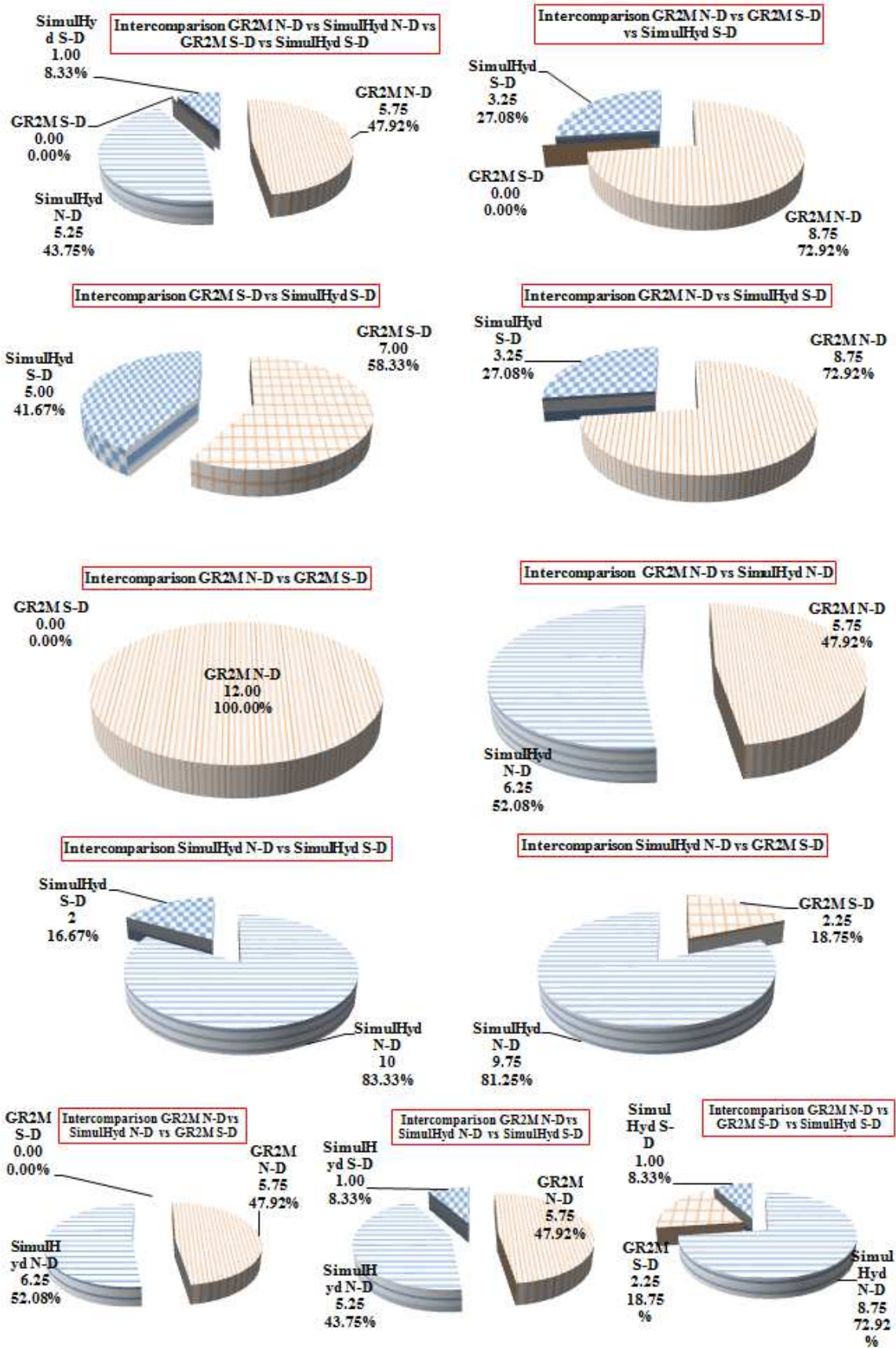
ANNEXE 3 : STATION DE FARANAH



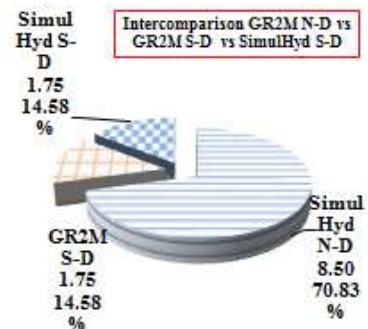
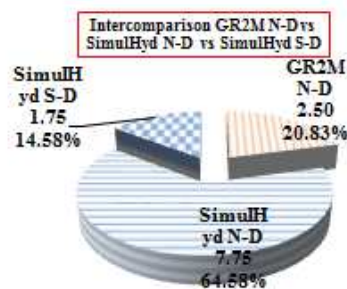
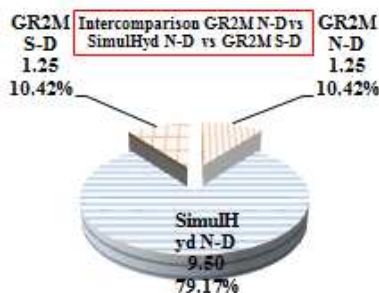
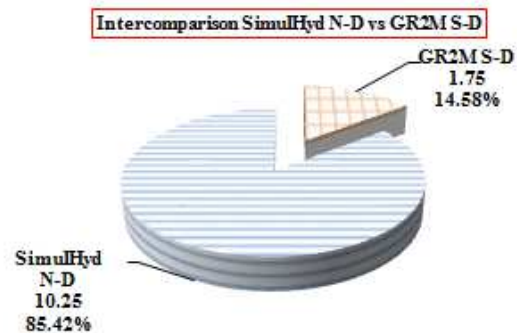
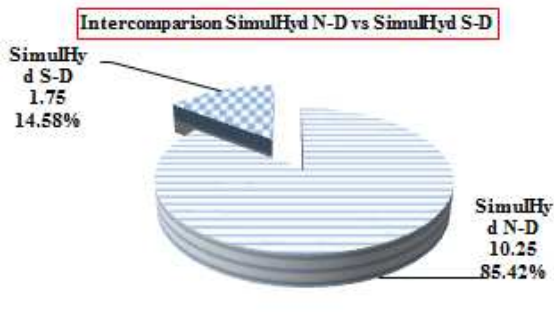
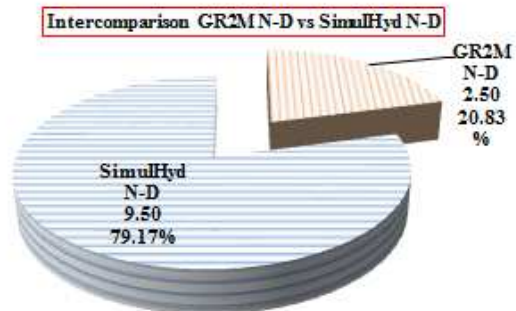
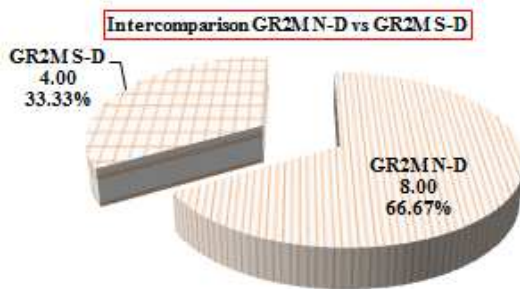
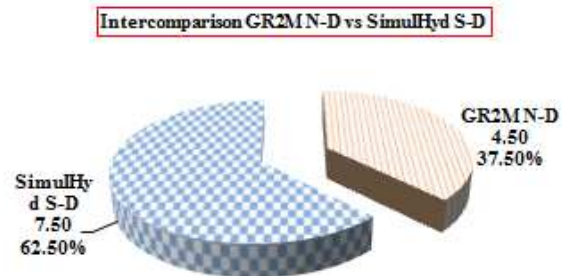
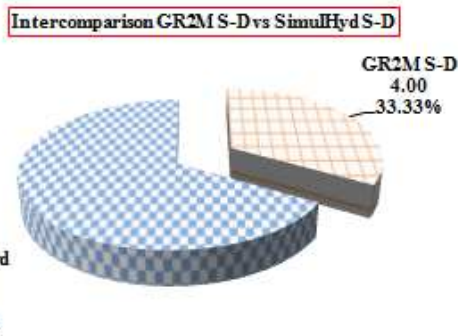
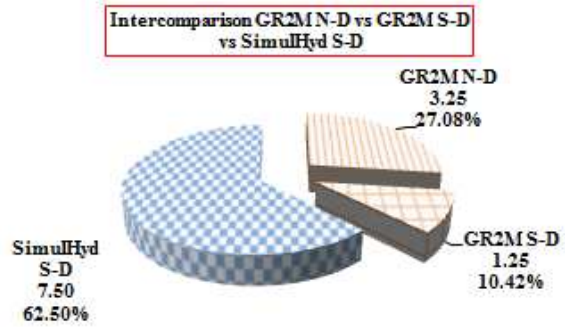
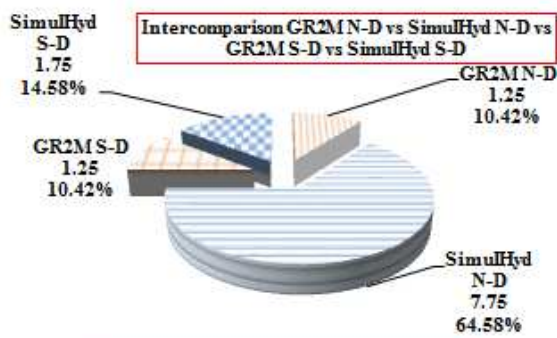
ANNEXE 3 : STATION DE GOUALA



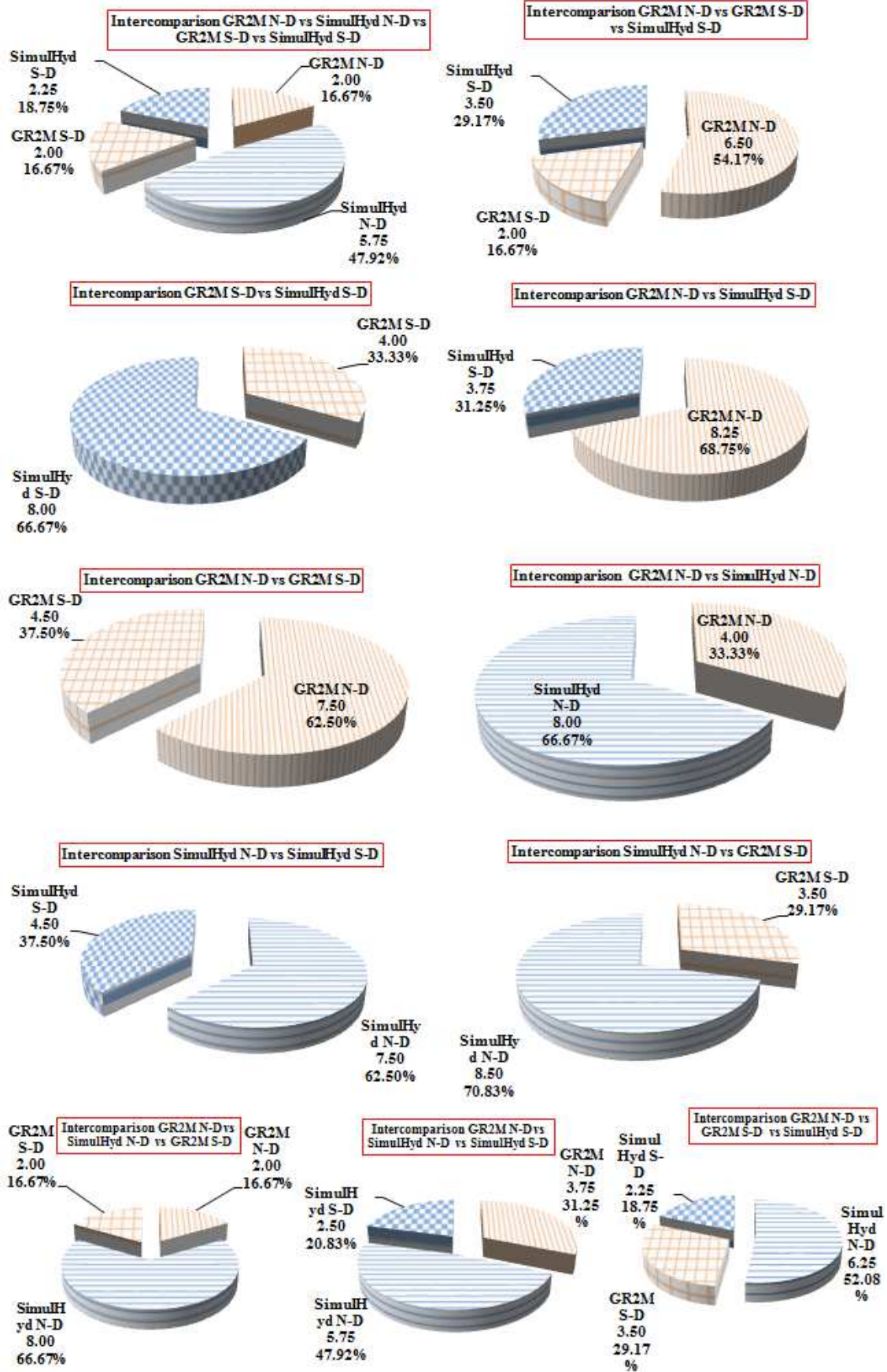
ANNEXE 3 : STATION D'IRADOUGOU



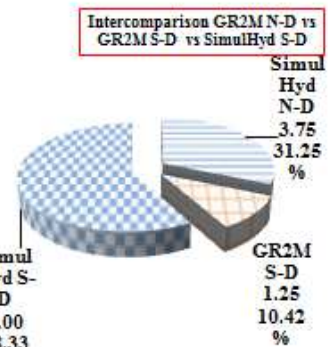
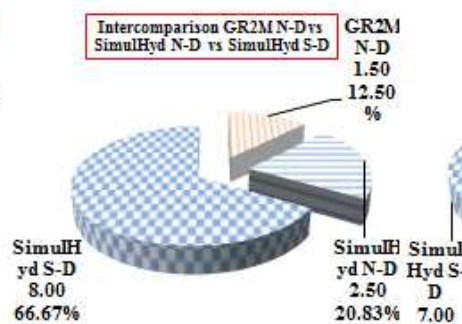
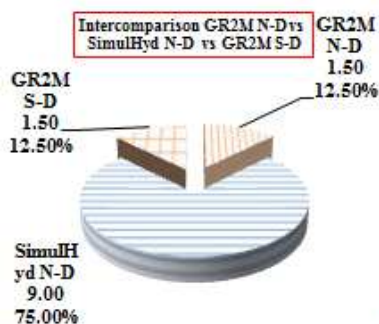
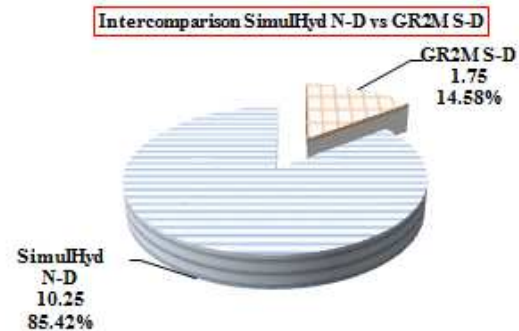
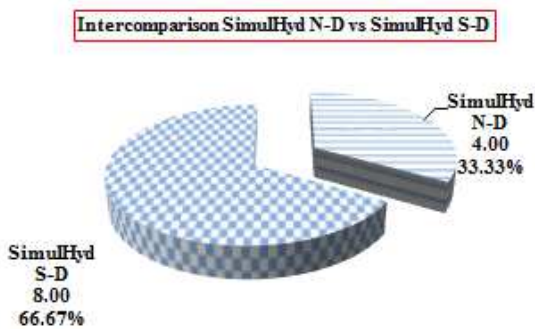
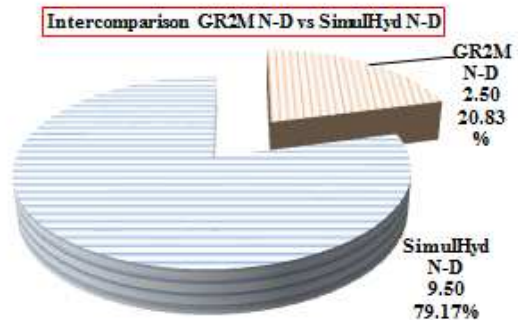
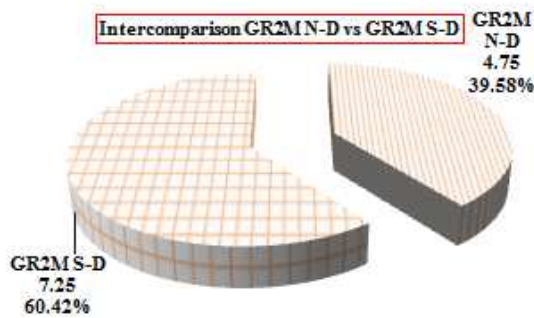
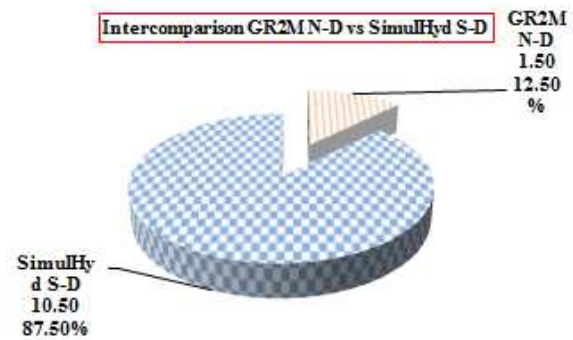
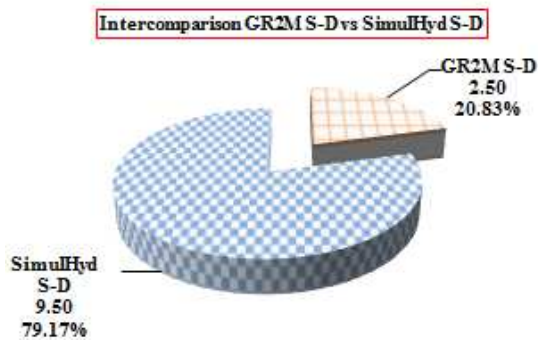
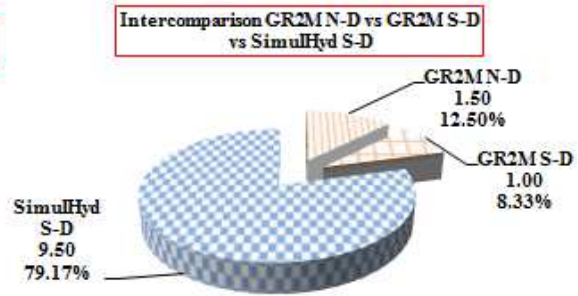
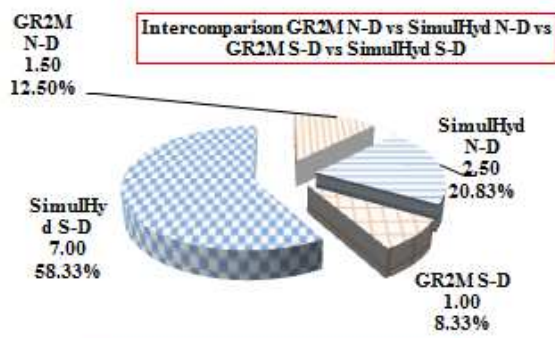
ANNEXE 3 : STATION DE KANKAN



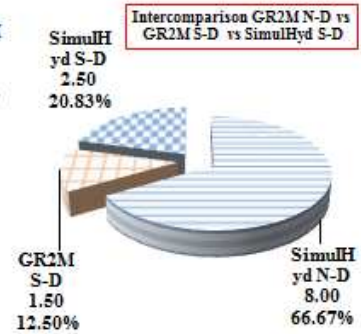
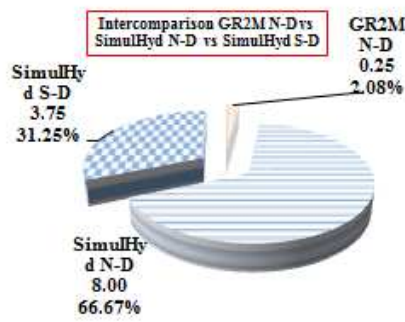
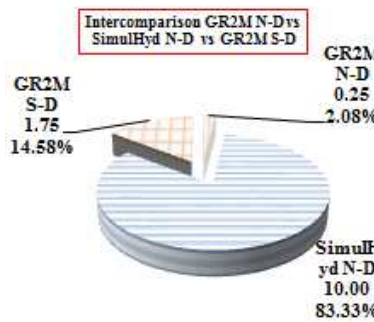
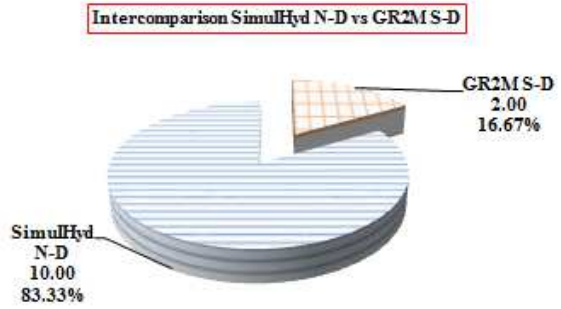
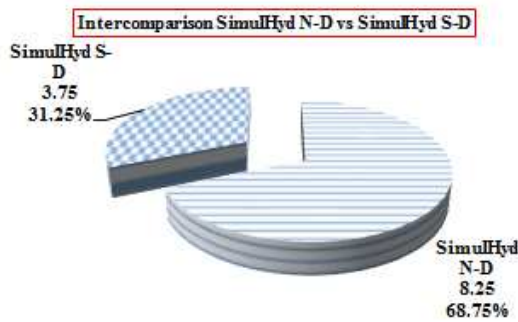
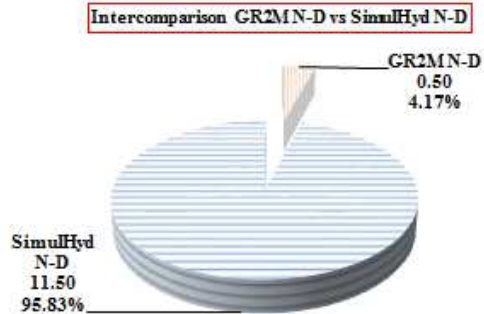
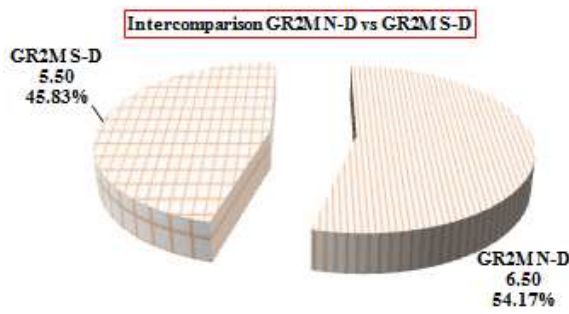
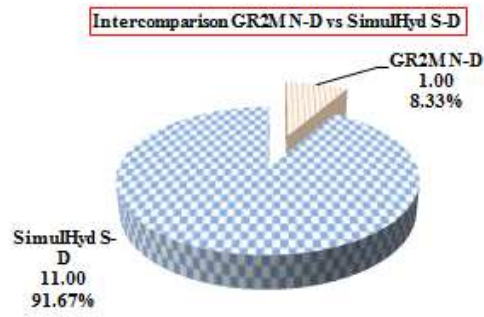
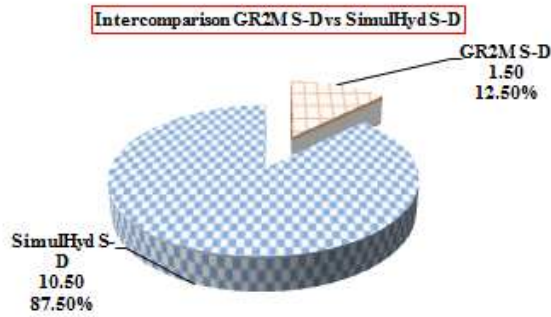
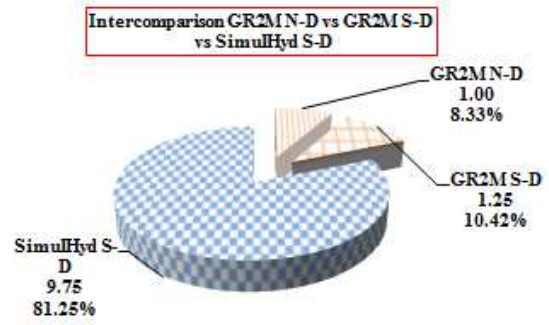
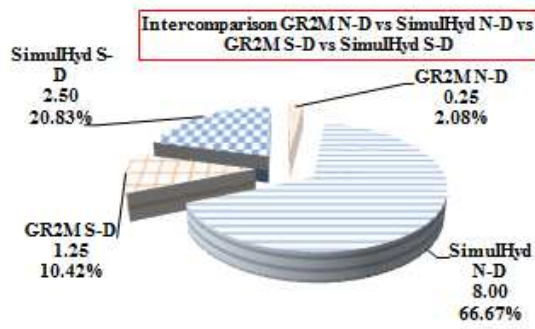
ANNEXE 3 : STATION DE KEROUANE



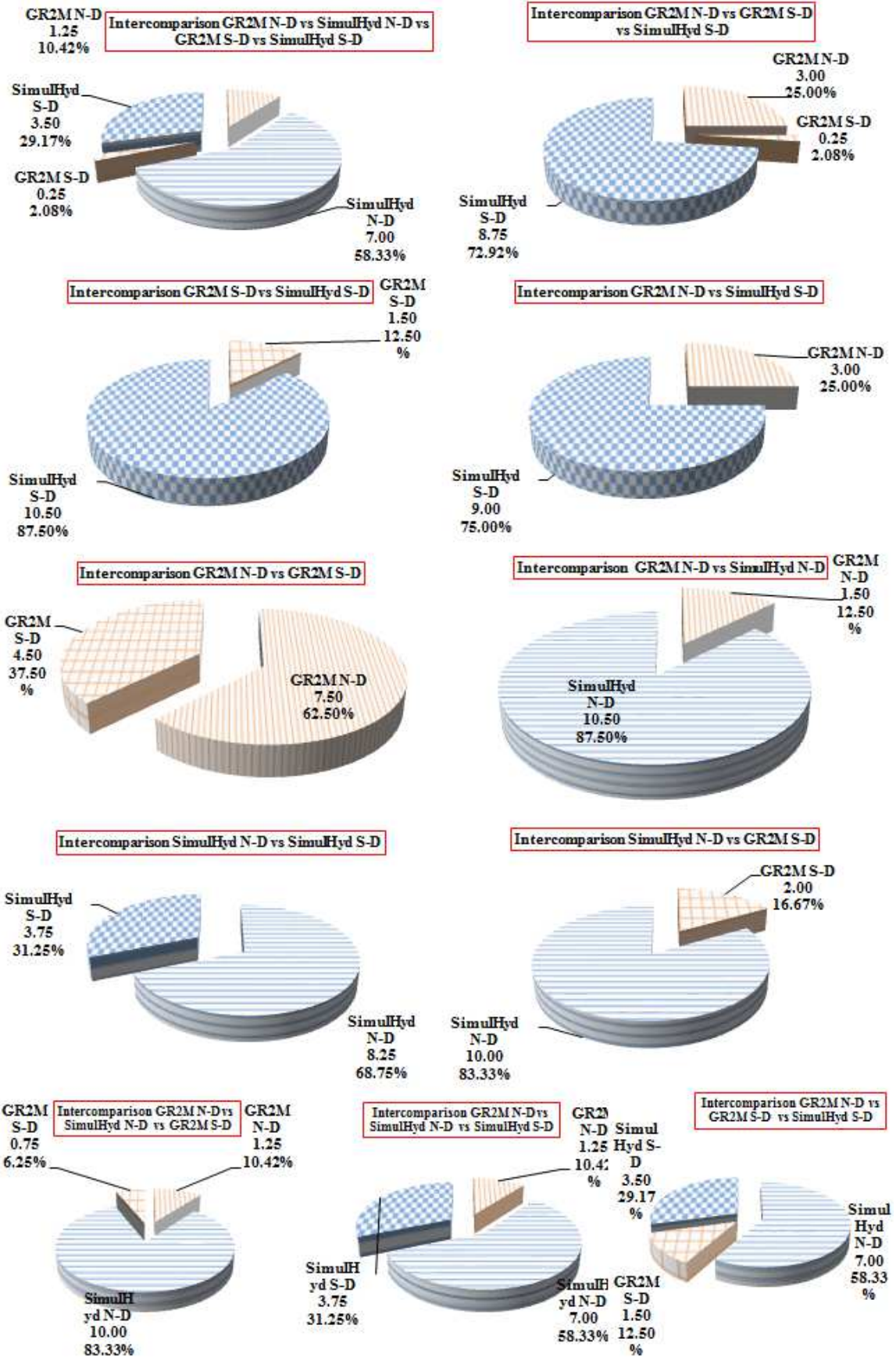
ANNEXE 3 : STATION DE KISSIDOUGOU



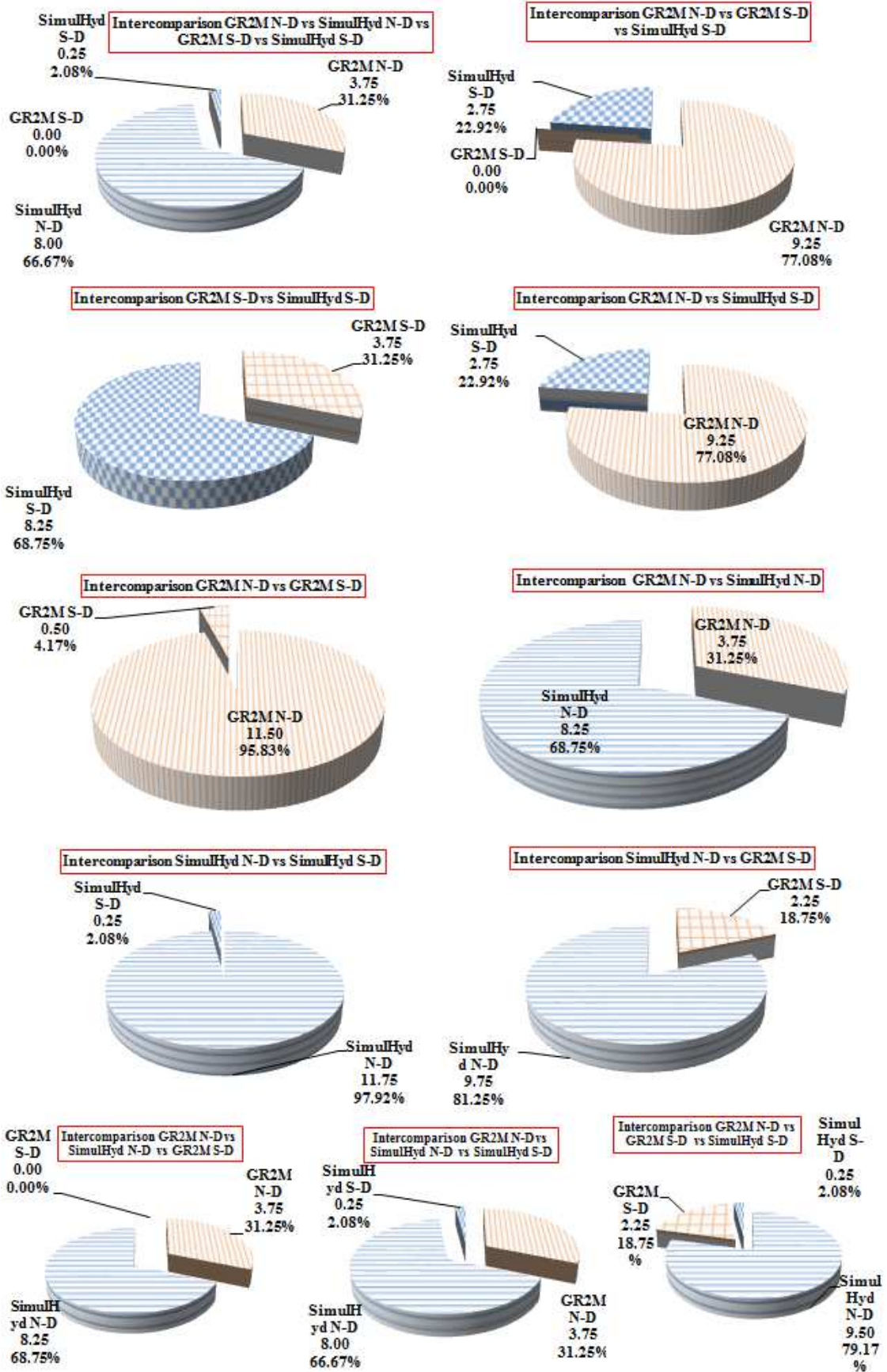
ANNEXE 3 : STATION DE KOULIKORO



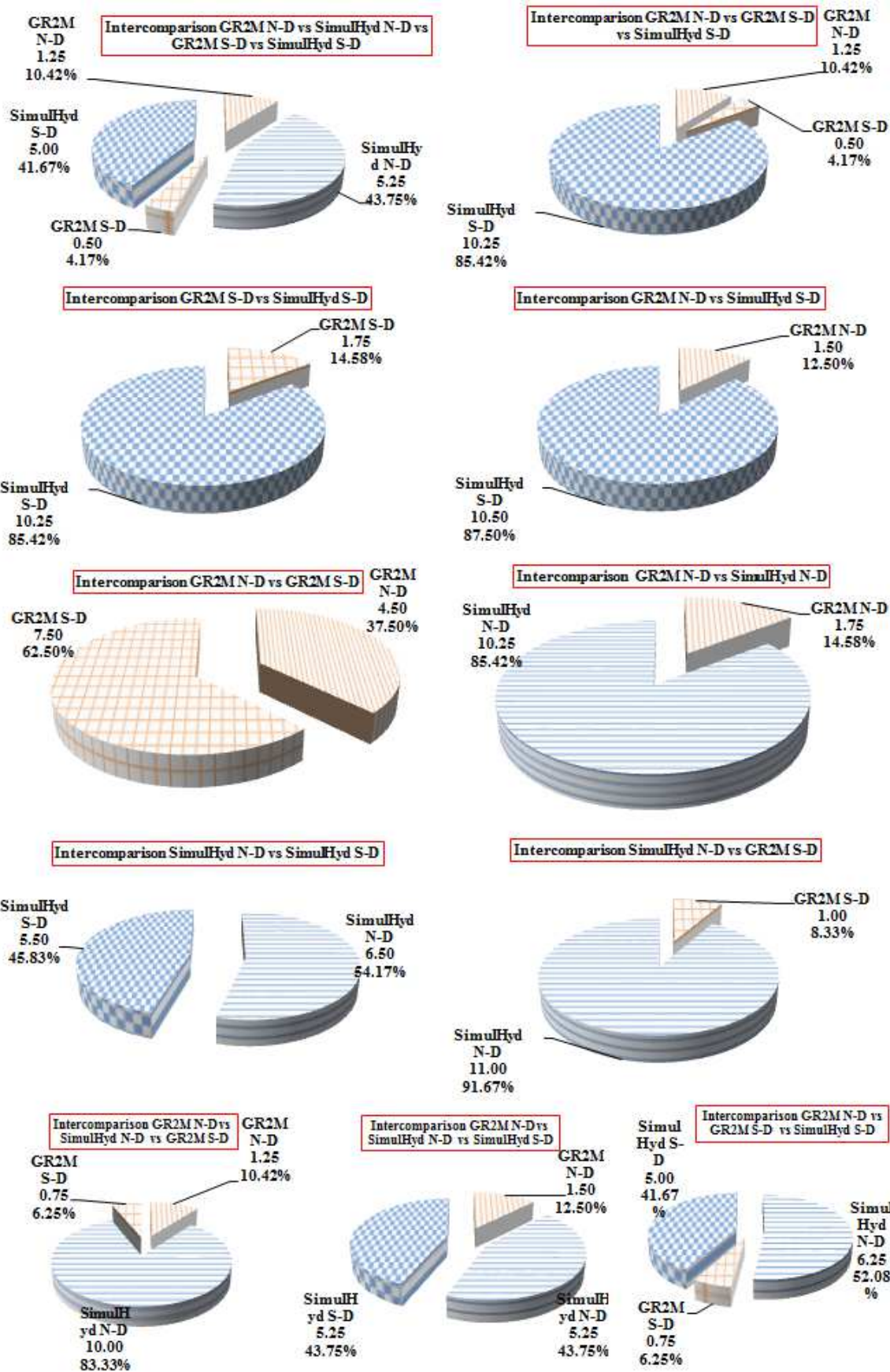
ANNEXE 3 : STATION DE KOUROUSSA



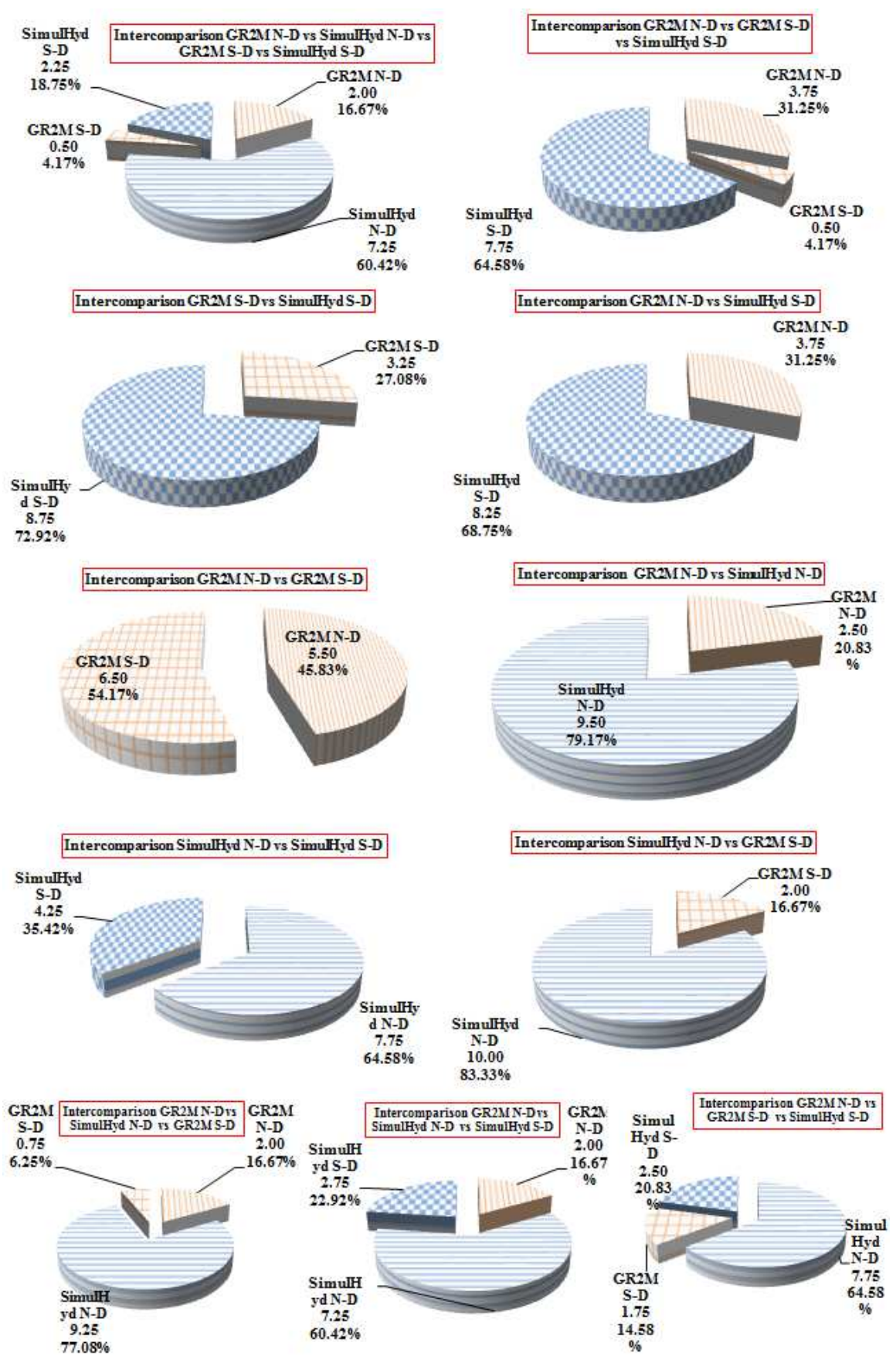
ANNEXE 3 : STATION DE MANDIANA



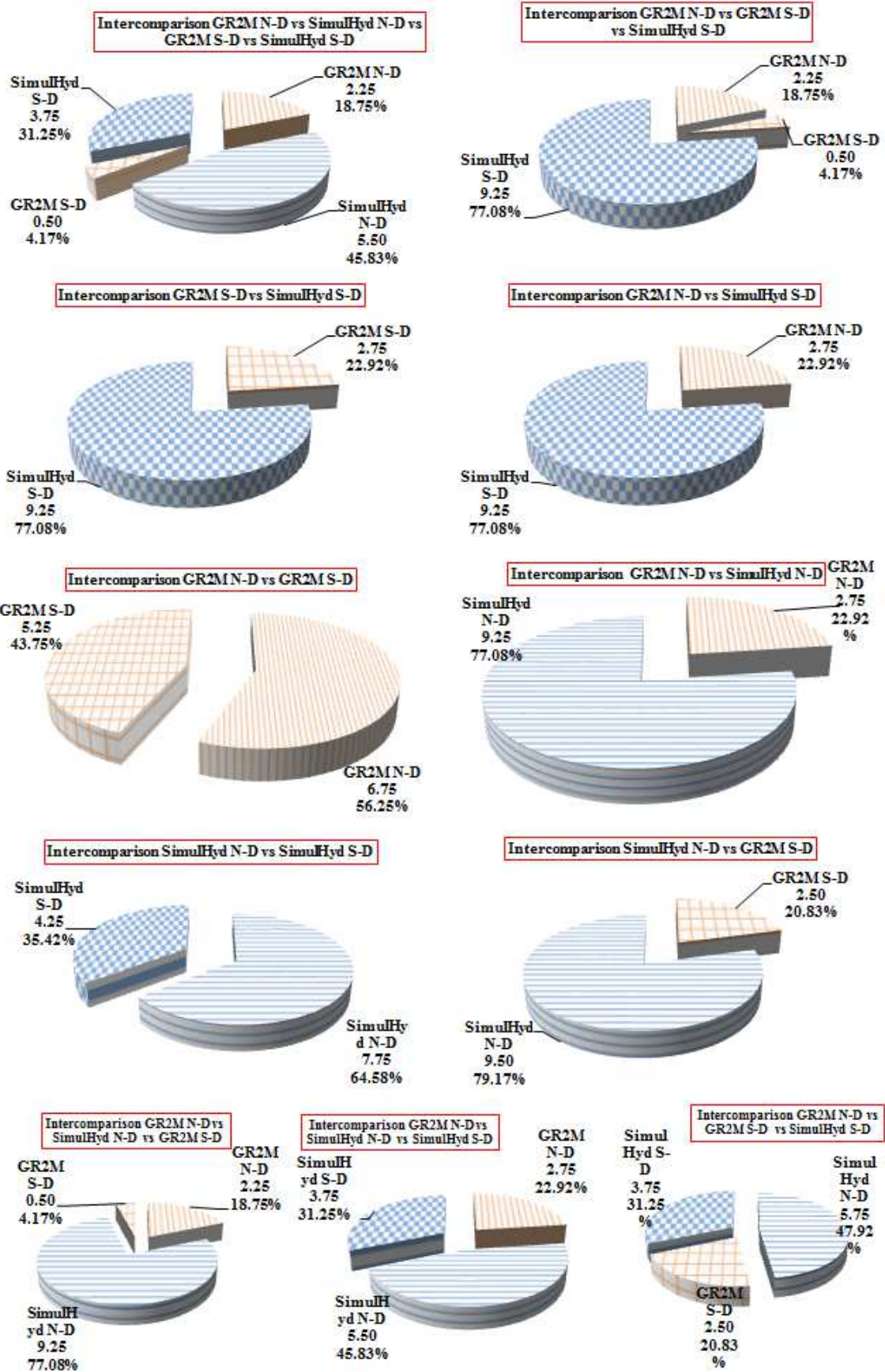
ANNEXE 3 : STATION D'OUARAN



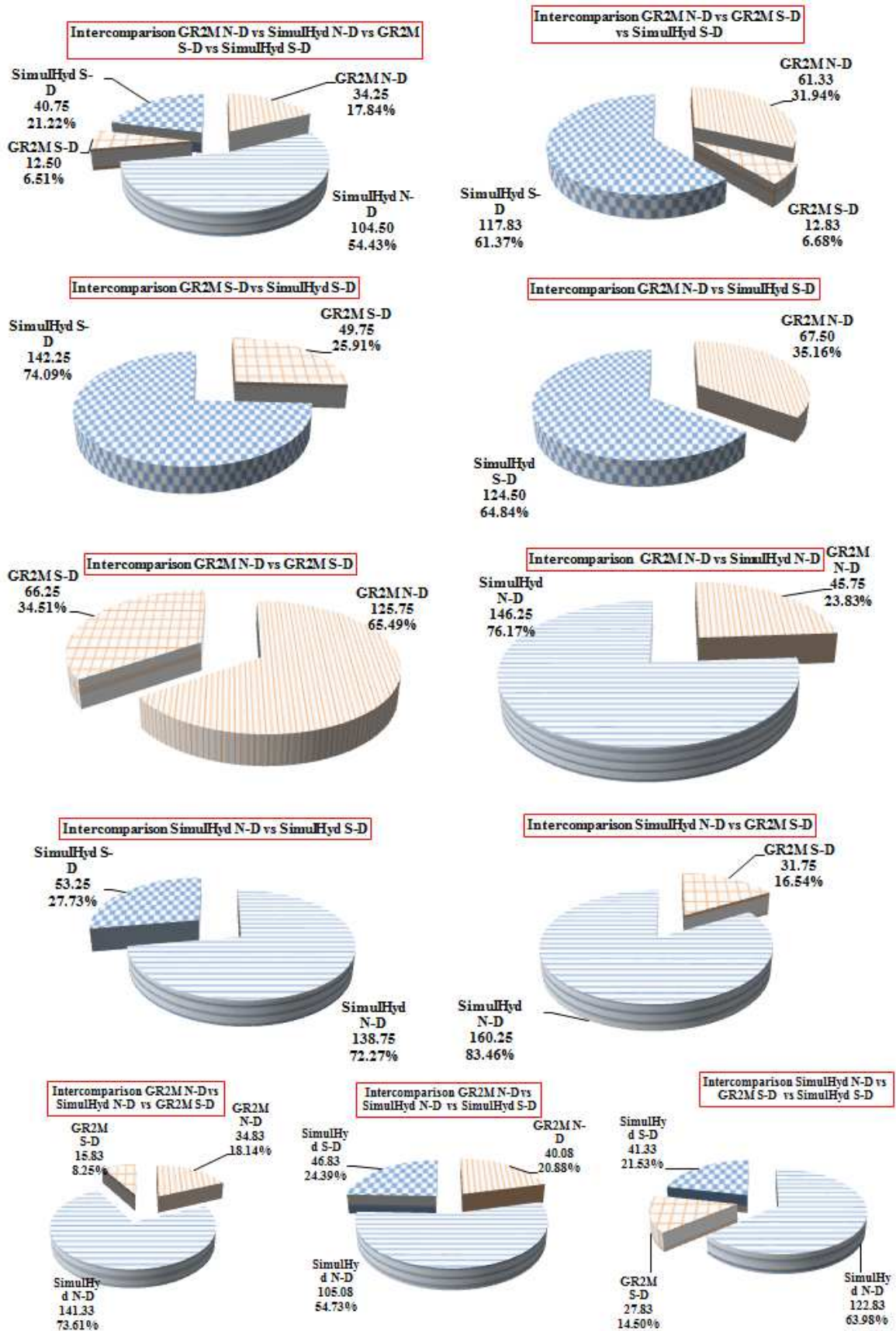
ANNEXE 3 : STATION DE SIGUIRY



ANNEXE 3 : STATION DE TINKISSO



ANNEXE 3 : SEIZE BASSINS VERSANTS COMME UN ENSEMBLE



Annexes 4: méthode d'atténuation d'incertitudes, résultats

ANNEXE 4 : STATION DE BANANKORO (CALAGE 1971-1999)

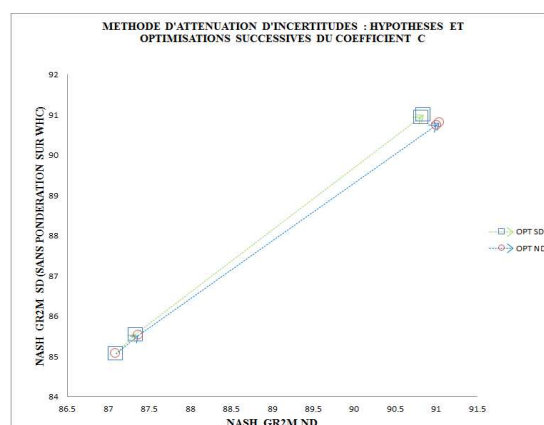
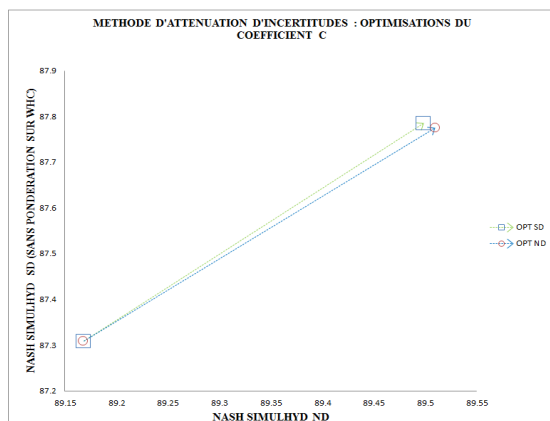
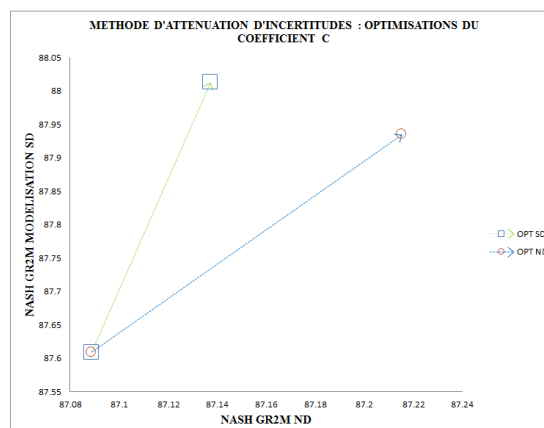
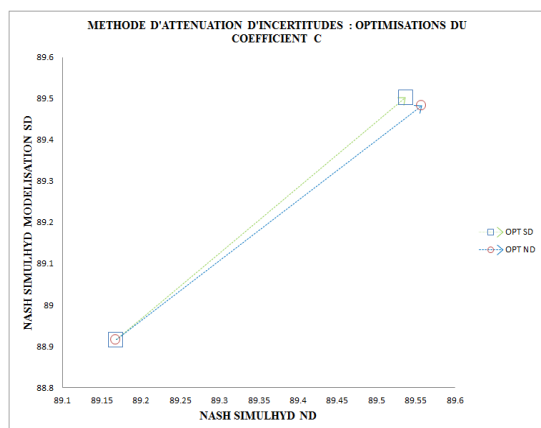


Diagramme d'en haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [X1= 0.5908565043, X2=0.5452574058] et SimulHyd non-distribuée [X1=0.5288714456, X2=0.5664077488]», avec optimisation du coefficient c = 1.0425 sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient c = 0.8083 sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme d'en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [X1= 0.5120516177, X2= 0.5561800496] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation du coefficient c = 1.0383 sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient c = 0.8788 sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme d'en haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [X1= 0.5258233615, X2= 0.5215533271] et GR2M non-distribuée [X1= 0.4497395324, X2= 0.5311986764]», avec optimisation du coefficient c = 0.8356 sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient c = 0.4681 sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme d'en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [X1= 0.4414728463, X2= 0.5185898611] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient c = 1.0319, 3.5919, 2.9345 sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient c = 0.7728, 2.9345, 2.2771 sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE BARANAMA (CALAGE 1973-1995)

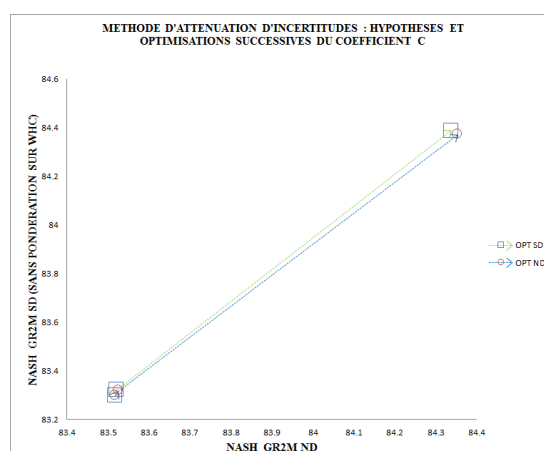
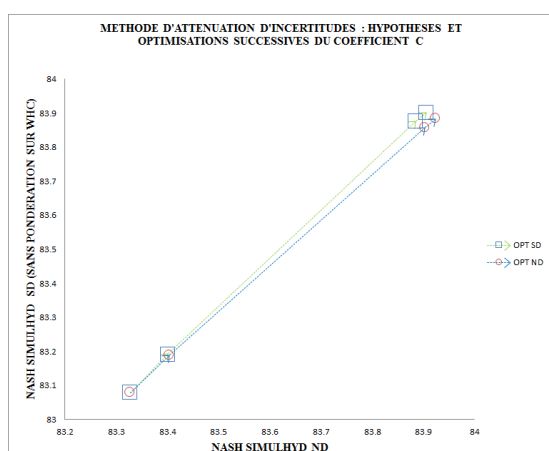
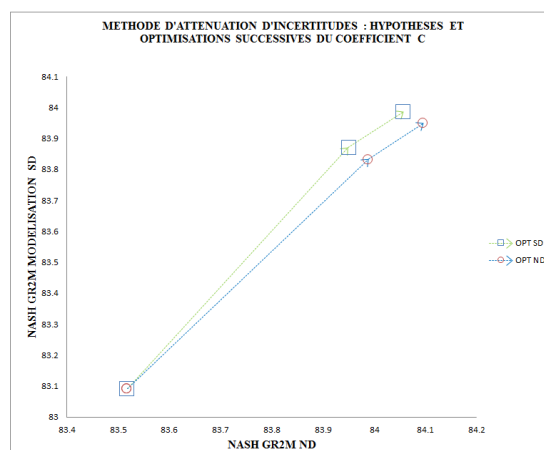
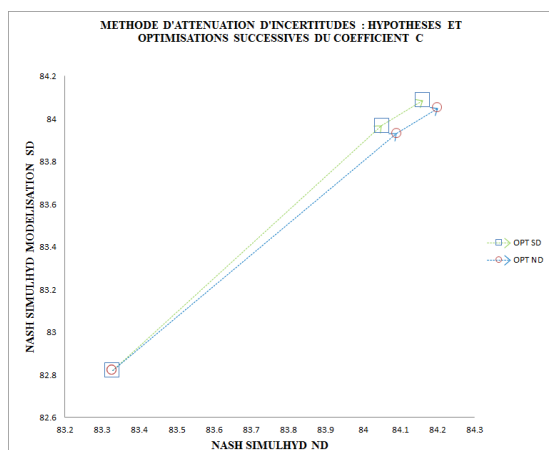


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4841270164$, $X_2 = 0.5612727596$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1 = 0.4858901200$, $X_2 = 0.5652365345$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0, 0.8948, 0.7299$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0, 0.7299, 0.5650$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4852098177$, $X_2 = 0.5613397404$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.3366, 0.8948, 0.7605$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.2786, 0.7605, 0.6261$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4349000384$, $X_2 = 0.5190106932$] et GR2M non-distribuée [$X_1 = 0.4359483150$, $X_2 = 0.5211283867$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.0, 0.7475, 0.5819$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.0, 0.5819, 0.4163$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4358025405$, $X_2 = 0.5196942037$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.1551, 1.07063$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.0913, 0.9381$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE BARO (CALAGE 1950-1995)

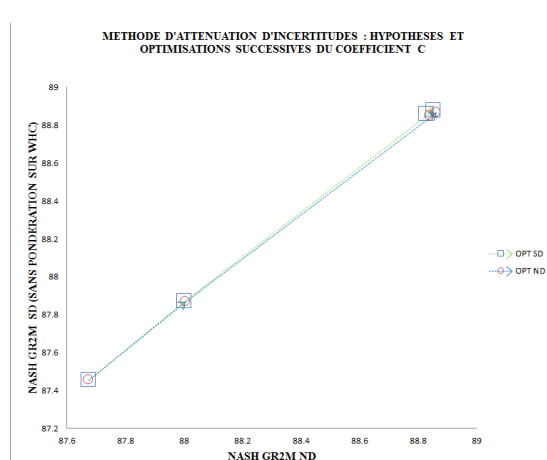
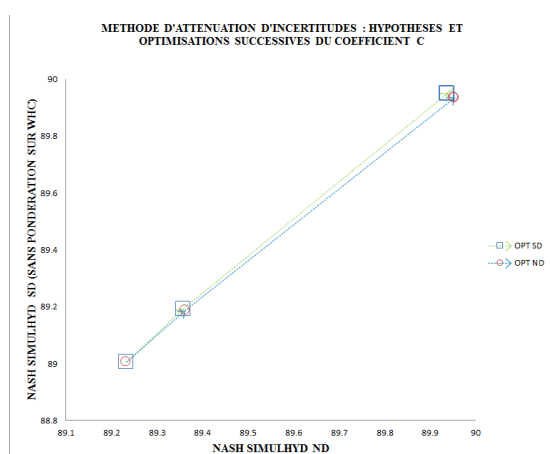
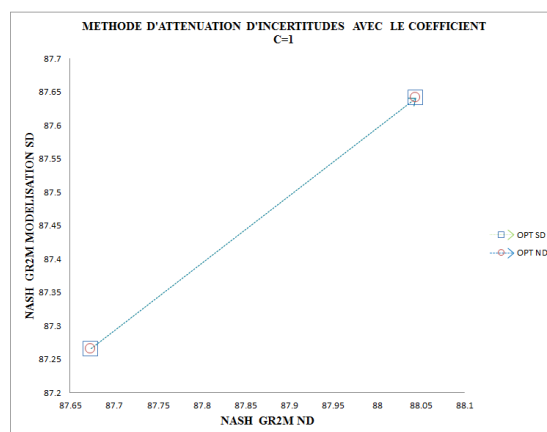
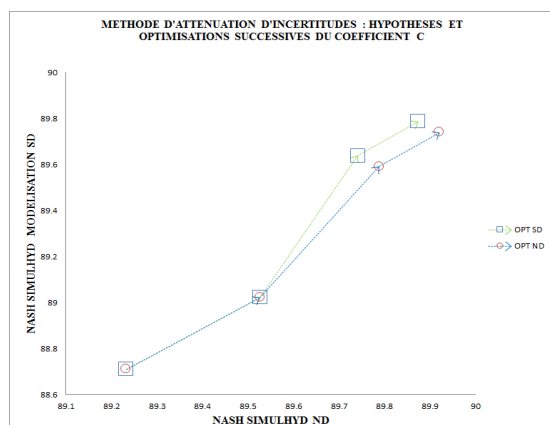


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.6021336465$, $X_2= 0.5792382841$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1= 0.5954213634$, $X_2= 0.5795493372$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.8133$, 1.4047 , 1.0875 sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.7909$, 1.0875 , 0.7702 sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5941703038$, $X_2= 0.5789382419$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.8076$, 1.8137 , 1.5833 sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.6714$, 1.5833 , 1.3529 sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5651935591$, $X_2= 0.5350754872$] et GR2M non-distribuée [$X_1= 0.5587579408$, $X_2= 0.5346264338$], sans processus d'optimisation sur le coefficient c , la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5578870253$, $X_2= 0.5341237420$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.3927$, 2.5780 , 2.3559 sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.2442$, 2.3559 , 2.1339 sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE DIALAKORO (CALAGE 1957-1980)

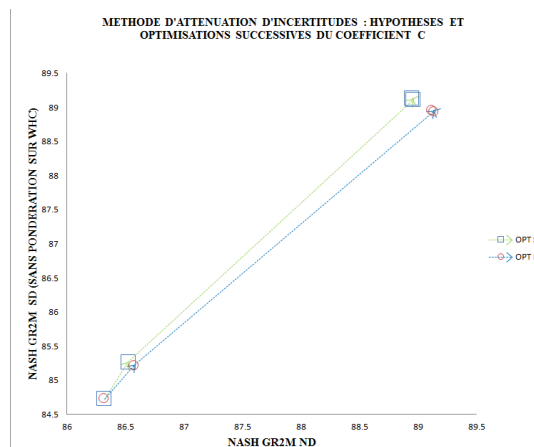
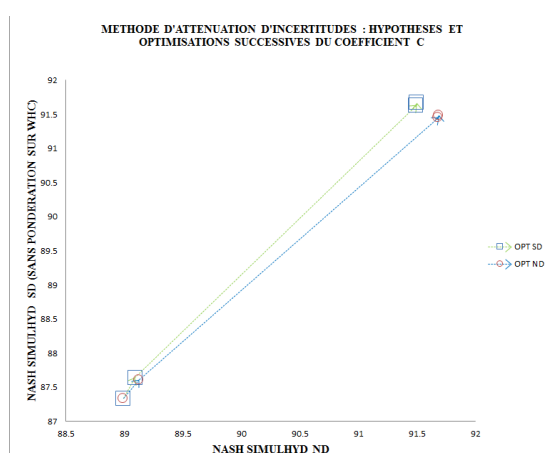
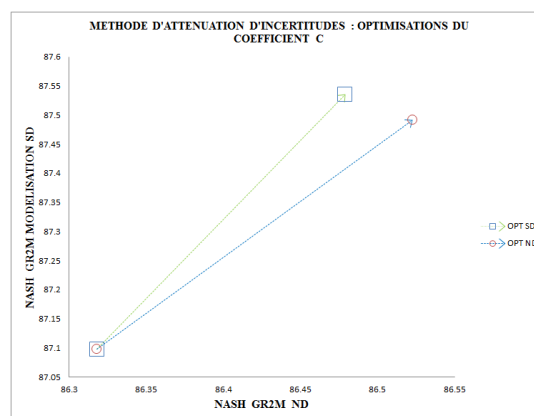
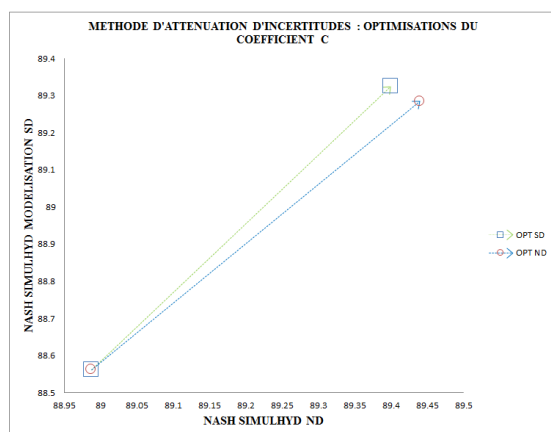


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.6345443357$, $X_2 = 0.5083262278$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1 = 0.5733912413$, $X_2 = 0.5219299617$], avec optimisation du coefficient $c = 1.2915$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.9942$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.5636080569$, $X_2 = 0.5104141747$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.8831, 3.3314, 2.6362$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.5917, 2.6362, 1.9410$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.5850956595$, $X_2 = 0.4847624697$] et GR2M non-distribuée [$X_1 = 0.5165828443, X_2 = 0.4818333270$], avec optimisation du coefficient $c = 1.0130$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.6930$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.5111394584, X_2 = 0.4762010600$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.2095, 3.4417, 2.7582$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.8330, 2.7582, 2.0748$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE FARANAH (CALAGE 1969-1995)

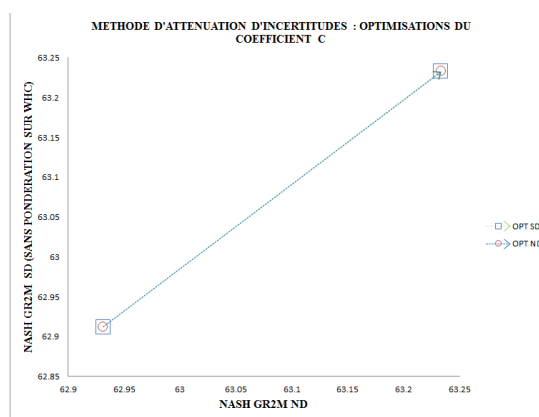
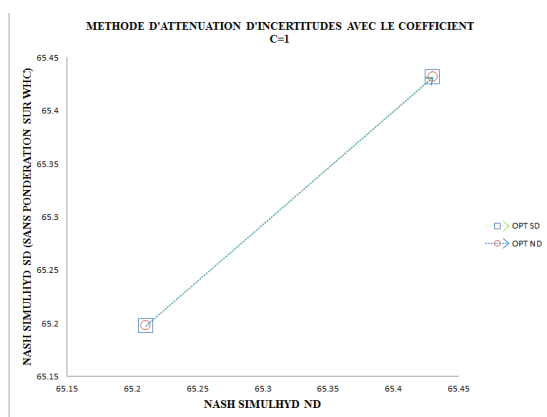
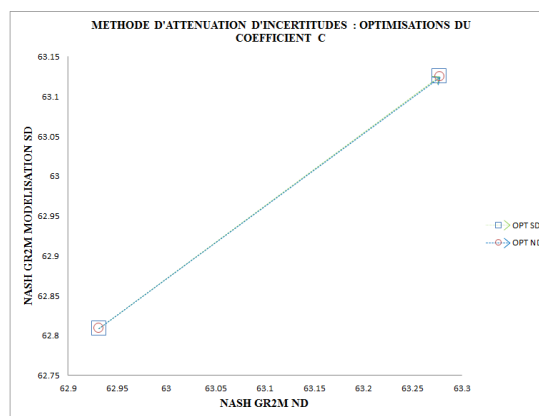
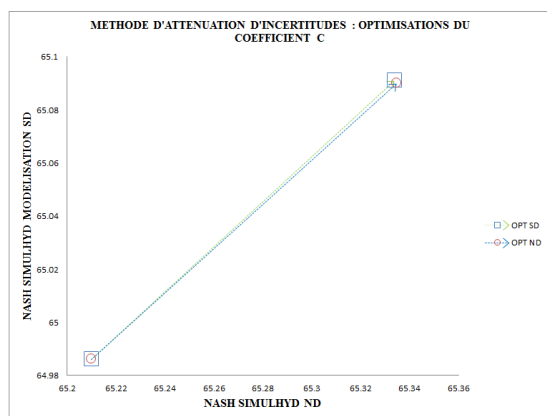


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1=0.4993344075$, $X_2=0.4970503968$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1=0.4953515746$, $X_2=0.4983766498$], avec optimisation du coefficient $c = 0.2349$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.2564$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND) ; les hypothèses , faible et forte, ne sont pas appliquées car elles permettent des légères augmentations de Nash mais s'accompagnent de la dégradation des deux critères bilan et bilan absolu.

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1=0.4953907999$, $X_2=0.4976414663$] et SimulHyd non-distribuée», sans processus d'optimisation sur le coefficient c , la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1=0.4568818511$, $X_2=0.4492360413$] et GR2M non-distribuée [$X_1=0.4530643979$, $X_2=0.4492613599$], avec optimisation du coefficient $c = 0.4159$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.4356$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1=0.4533460093$, $X_2=0.4489566074$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation du coefficient $c = 1.3419$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 1.3032$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE GOUALA (CALAGE 1961-1978)

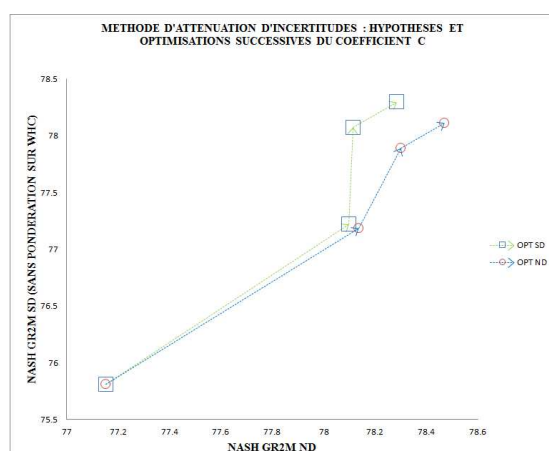
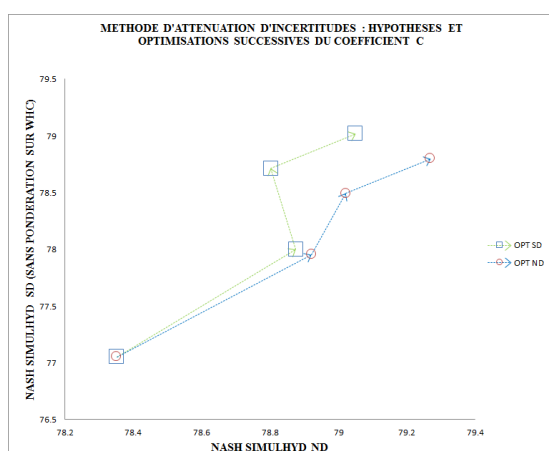
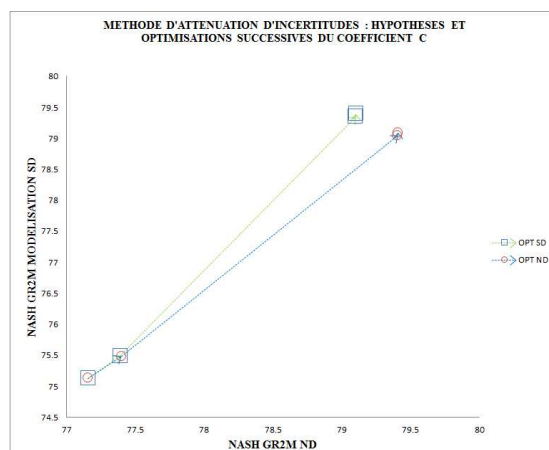
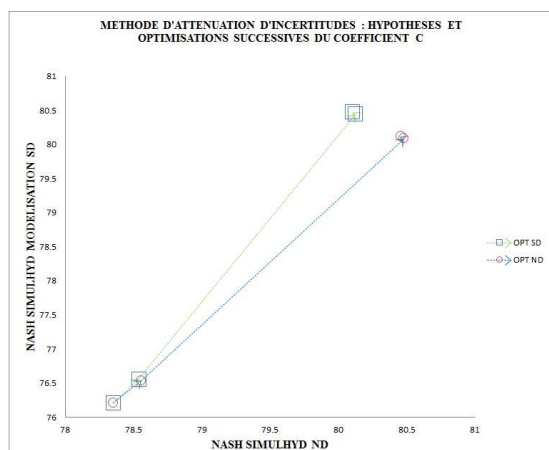


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.7600794115$, $X_2 = 0.4235707407$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1 = 0.7797484971$, $X_2 = 0.4229005225$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.5901, 2.0709, 1.4686$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.4552, 1.4686, 0.8663$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.7616573583$, $X_2 = 0.4221729196$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.1366, 1.5035, 0.9566$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.8821, 0.9566, 0.4096$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.7212125896$, $X_2 = 0.4081635443$] et GR2M non-distribuée [$X_1 = 0.7437632935$, $X_2 = 0.4079852834$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.6316, 2.1656, 1.5815$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.5238, 1.5815, 0.9973$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.7241745843$, $X_2 = 0.4067609329$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.4584, 1.8476, 1.3172$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.2192, 1.3172, 0.7868$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION D'IRADOUGOU (CALAGE 1965-1995)

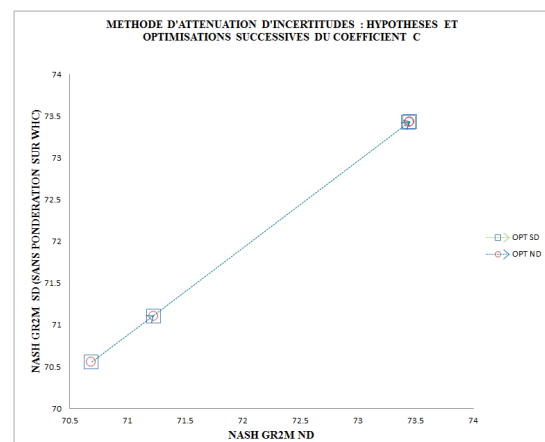
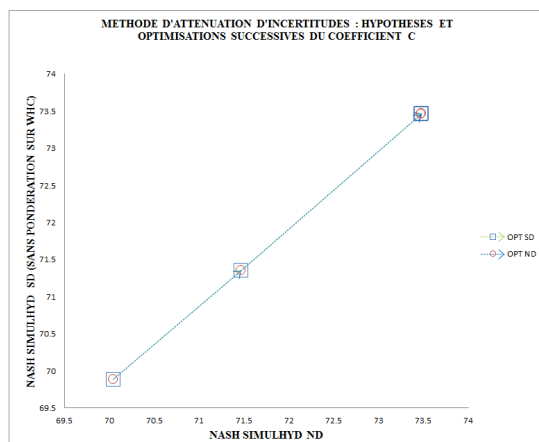
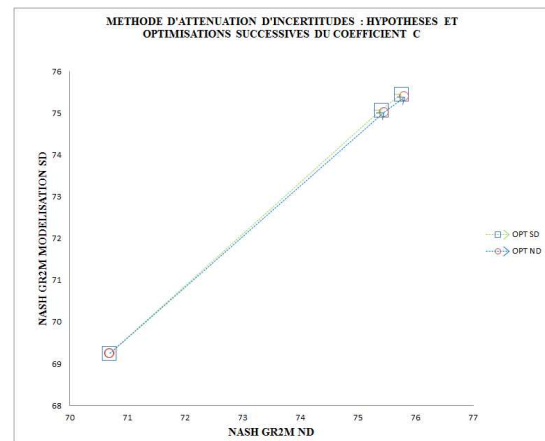
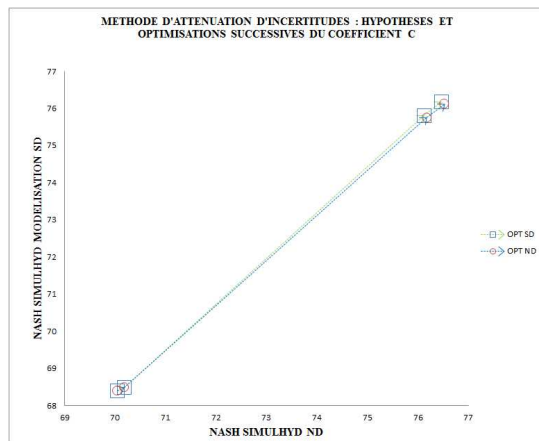


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.5227560304$, $X_2= 0.5976708893$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1= 0.5277035656$, $X_2= 0.6014697652$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.2018, 1.7712, 1.6120$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.2460, 1.6120, 1.4527$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5269312873$, $X_2= 0.6021974230$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 2.0305, 3.1733, 3.1103$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 2.0060, 3.1103, 3.0473$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.4505748424$, $X_2= 0.5839972892$] et GR2M non-distribuée [$X_1= 0.4552934635, X_2= 0.5864844956$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.0, 1.6211, 1.4665$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.0442, 1.4665, 1.3119$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.4546781056, X_2= 0.5857690621$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.2540, 2.8705, 2.8095$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.2422, 2.8095, 2.7485$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE KANKAN (CALAGE 1950-1995)

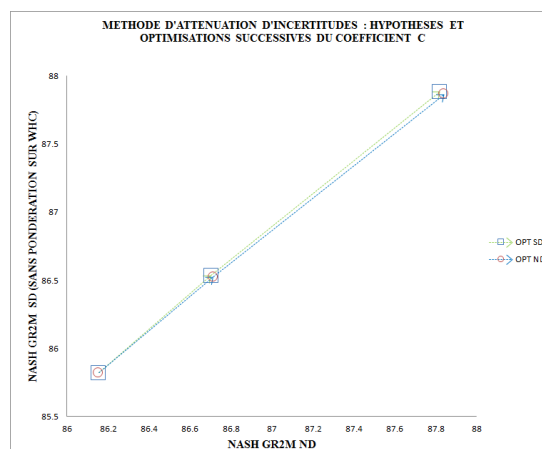
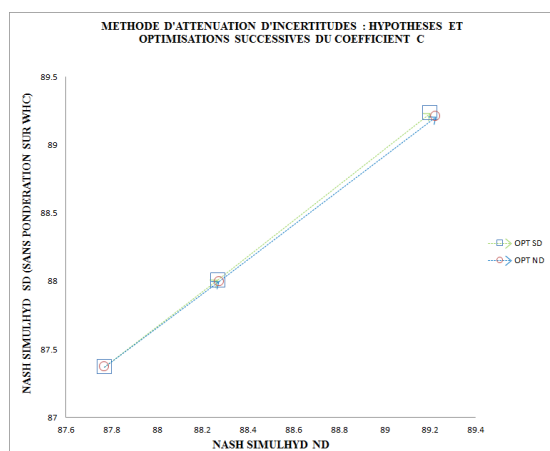
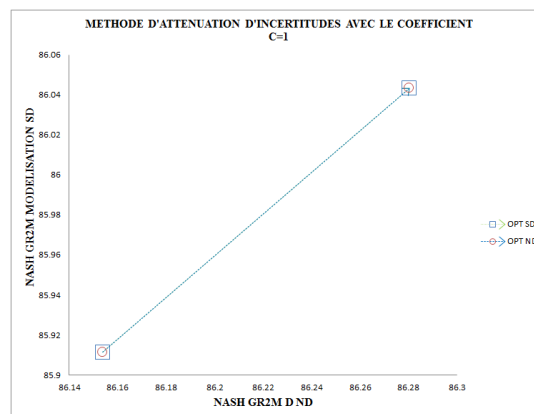
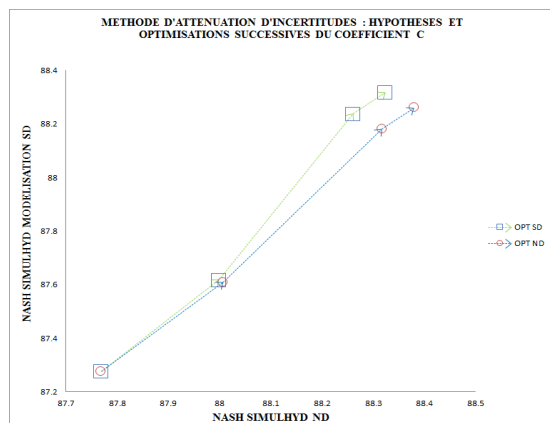


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.5889732875$, $X_2= 0.6316783420$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1= 0.6038238367$, $X_2= 0.6302832817$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.8364, 1.4063, 1.0641$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.7021, 1.0641, 0.7219$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.6030793537$, $X_2= 0.6274617074$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.3989, 2.3945$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.2485, 2.1166$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND); l'hypothèse forte n'est pas appliquée malgré qu'elle permette une légère amélioration du critère bilan mais s'accompagne de la dégradation du critère bilan absolu, la valeur de Nash étant quasi-stationnaire.

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.5502140198$, $X_2= 0.5877111980$] et GR2M non-distribuée [$X_1= 0.5702355397$, $X_2= 0.5835578933$], sans processus d'optimisation sur le coefficient c , la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5691032712$, $X_2= 0.5839668031$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.6940, 2.8822$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.5000, 2.6039$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE KEROUANE (CALAGE 1973-1995)

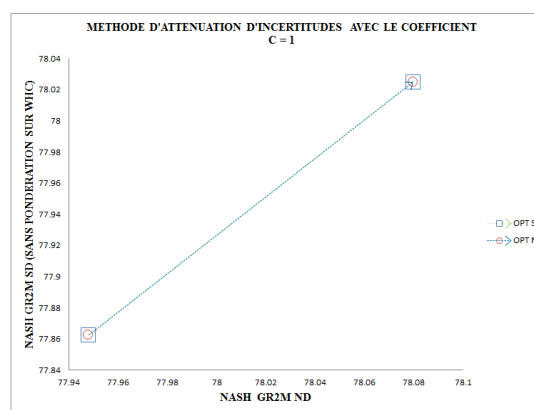
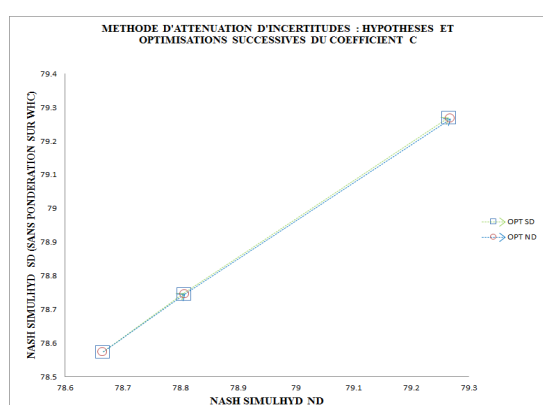
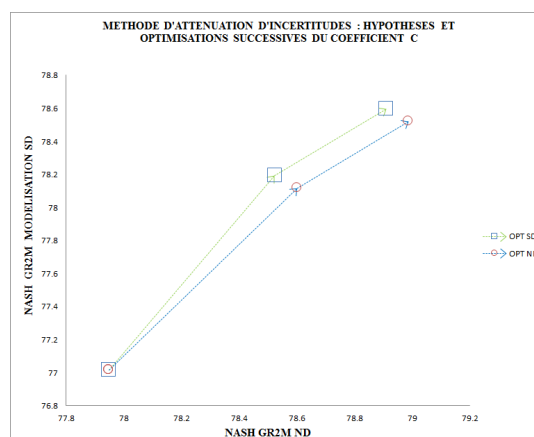
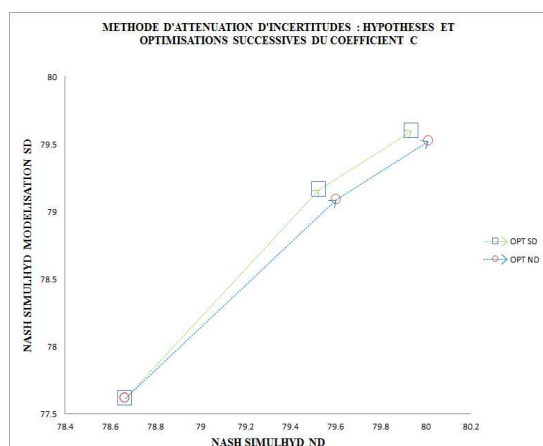


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.7568101988$, $X_2= 0.6107169987$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1= 0.7579266342$, $X_2= 0.6089322583$]], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.0, 1.0390, 0.8086$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.0, 0.8086, 0.5782$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.7579266342$, $X_2= 0.6089310445$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.7965, 1.5997$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.7233, 1.4885$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.7462149050$, $X_2= 0.5840402829$] et GR2M non-distribuée [$X_1= 0.7508276281, X_2= 0.5811633815$]], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.0, 0.9005, 0.6704$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.0, 0.6704, 0.4404$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.7504714883, X_2= 0.5810558216$] et GR2M non-distribuée», sans processus d'optimisation sur le coefficient c , la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

ANNEXE 4 : STATION DE KISSIDOUGOU (CALAGE 1960-1995)

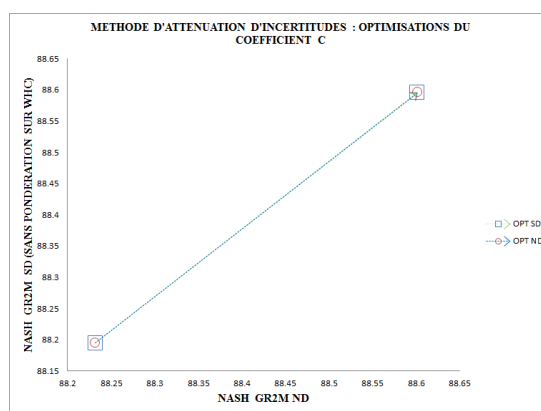
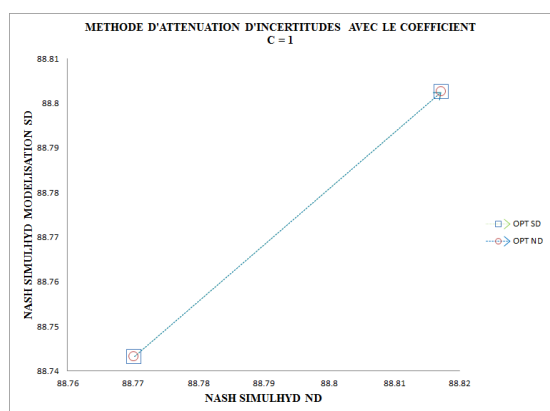
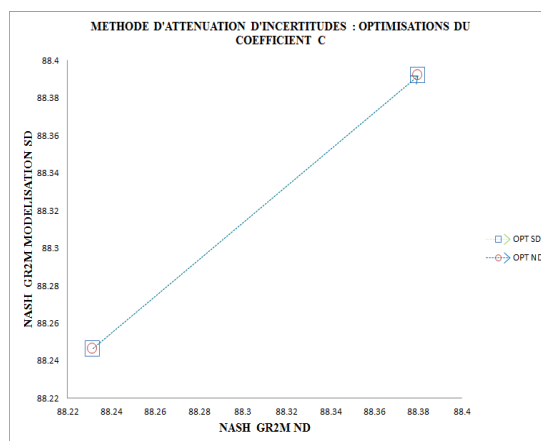
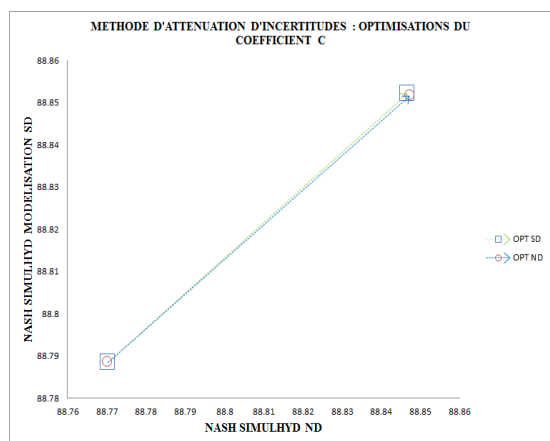


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.7420088221$, $X_2 = 0.5068165210$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1 = 0.7496925466$, $X_2 = 0.5058377534$], avec optimisation du coefficient $c = 0.3049$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.3354$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.7483932029$, $X_2 = 0.5069321999$] et SimulHyd non-distribuée», sans processus d'optimisation sur le coefficient c , la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.7320834308$, $X_2 = 0.4893437338$] et GR2M non-distribuée [$X_1 = 0.7391156835$, $X_2 = 0.4898018670$], avec optimisation du coefficient $c = 0.4691$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.4738$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.7385198231$, $X_2 = 0.4906642112$] et GR2M non-distribuée », avec optimisation du coefficient $c = 1.7822$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 1.7112$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE KOULIKORO (CALAGE 1950-1995)

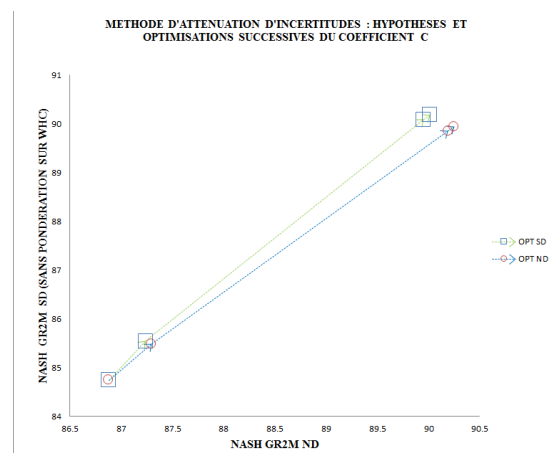
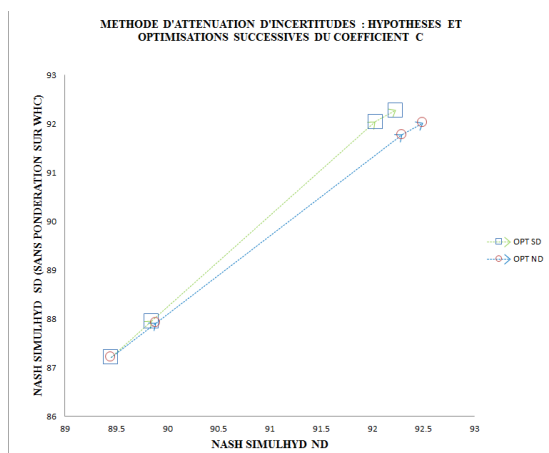
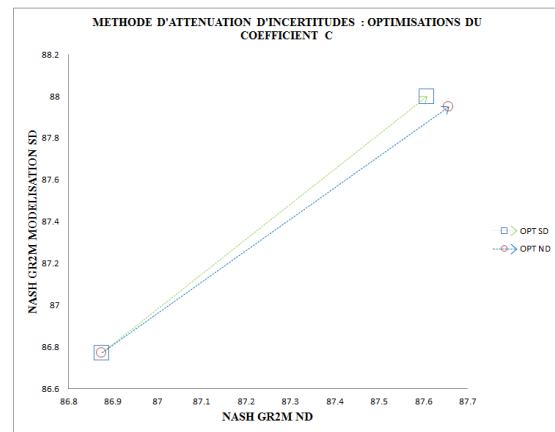
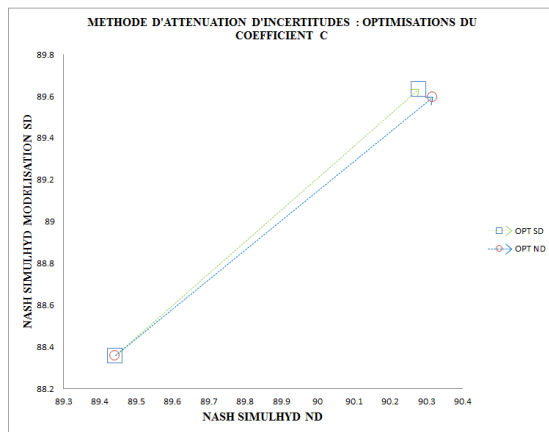


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.6077510434$, $X_2= 0.4982951478$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1= 0.5587875054$, $X_2= 0.5128470192$], avec optimisation du coefficient $c = 2.0572$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 1.7012$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5424377115$, $X_2= 0.5048179199$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.5144, 3.8546, 2.9598$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.1652, 2.9598, 2.0650$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.5486782949$, $X_2= 0.4761928624$] et GR2M non-distribuée [$X_1= 0.4911138319, X_2= 0.4788854635$], avec optimisation du coefficient $c = 2.0449$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 1.6327$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.4811400460, X_2= 0.4730770304$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.6120, 4.1656, 3.2816$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.1698, 3.2816, 2.3976$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE KOUROUSSA (CALAGE 1950-1995)

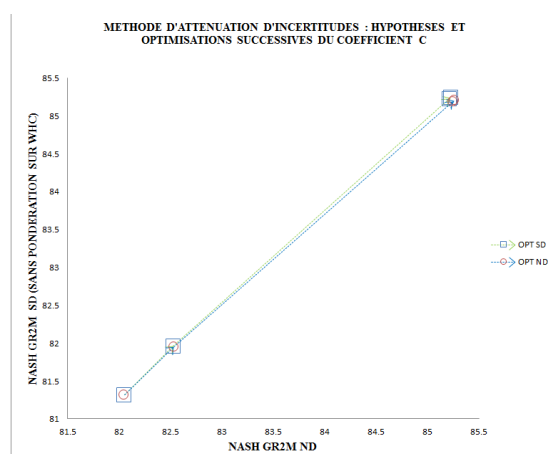
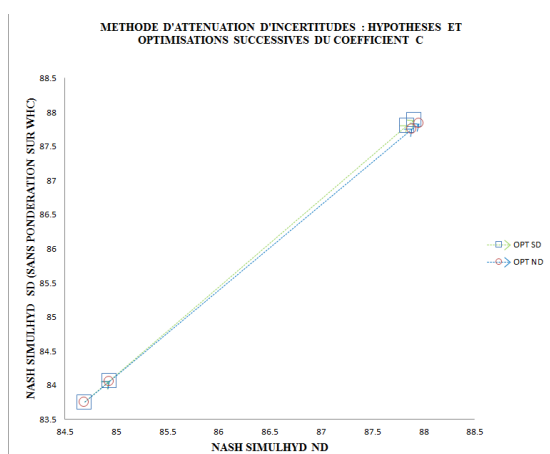
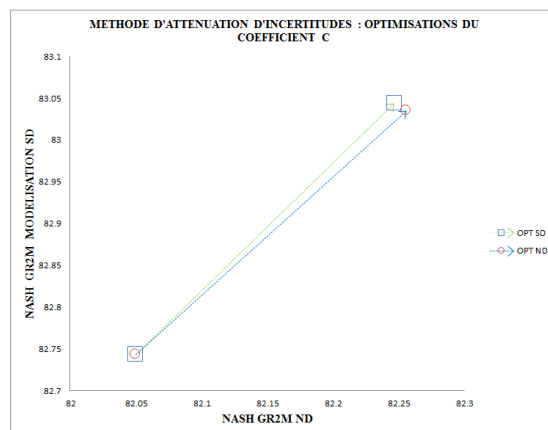
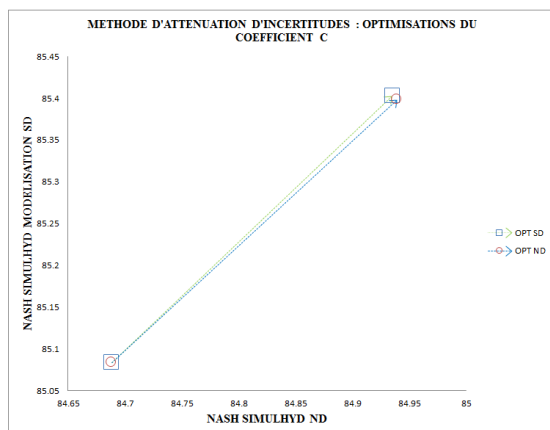


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.5133220453$, $X_2 = 0.5099535171$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1 = 0.4958189729$, $X_2 = 0.5152657972$], avec optimisation du coefficient $c = 0.5338$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.4734$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4908792487$, $X_2 = 0.5083871512$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.6405, 2.3270, 2.0679$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.5740, 2.0679, 1.8088$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.4542503309$, $X_2 = 0.4718839597$] et GR2M non-distribuée [$X_1 = 0.4325614136, X_2 = 0.4735236804$], avec optimisation du coefficient $c = 0.5025$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.4155$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4320891711, X_2 = 0.4684022800$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.0104, 2.4895, 2.2513$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.8769, 2.2513, 2.0131$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE MANDIANA (CALAGE 1957-1995)

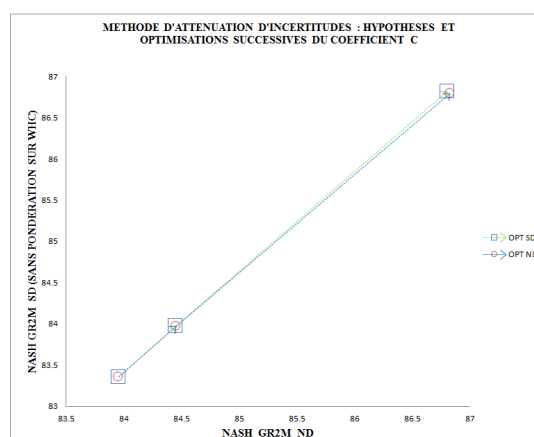
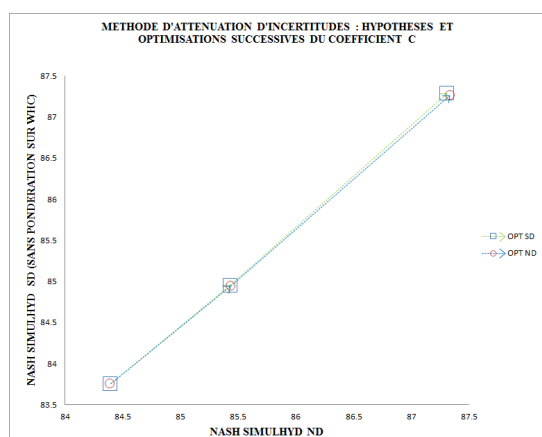
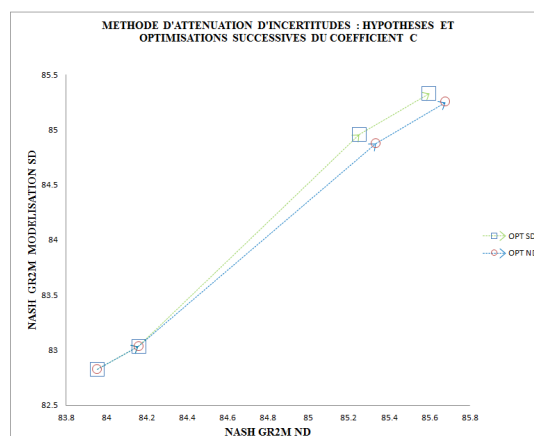
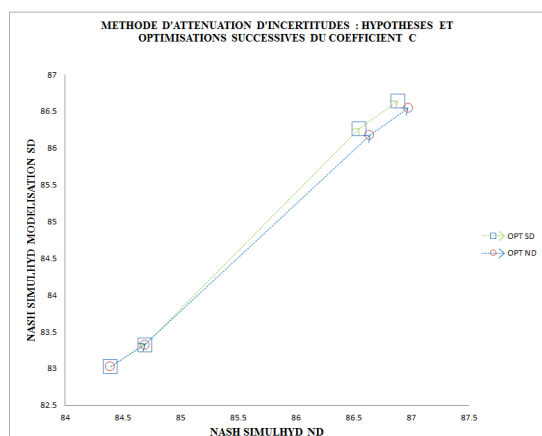


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.5204147632$, $X_2 = 0.5859871376$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1 = 0.5195087930$, $X_2 = 0.5895009401$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.6211, 2.0490, 1.7064$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.6252, 1.7064, 1.3638$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.5166232234$, $X_2 = 0.5880310688$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.6005, 2.7553$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.4968, 2.5139$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.4577891383$, $X_2 = 0.5566863905$] et GR2M non-distribuée [$X_1 = 0.4566444578$, $X_2 = 0.5579246946$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.5218, 1.6726, 1.3465$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.5204, 1.3465, 1.0204$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4545967821$, $X_2 = 0.5575282749$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.1464, 2.7156$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.0325, 2.4733$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION D'OUARAN (CALAGE 1957-1985)

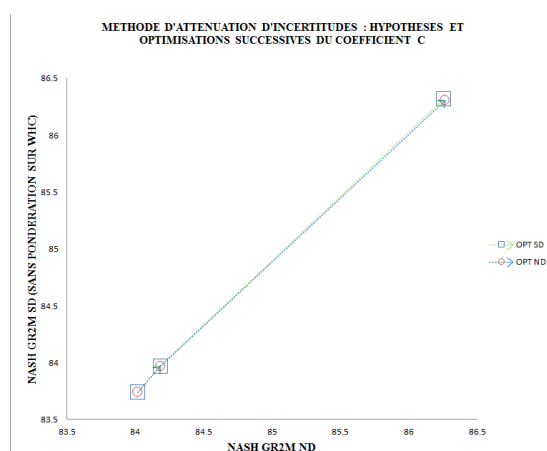
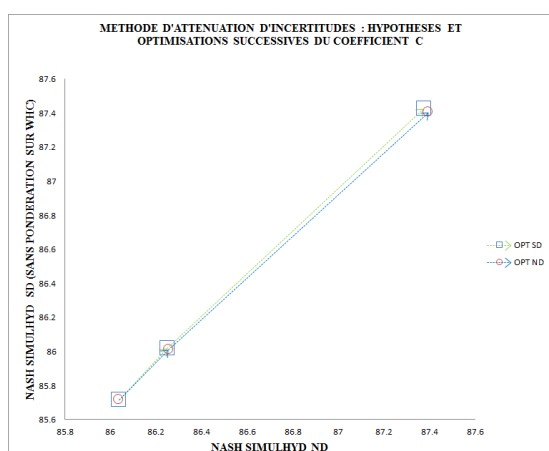
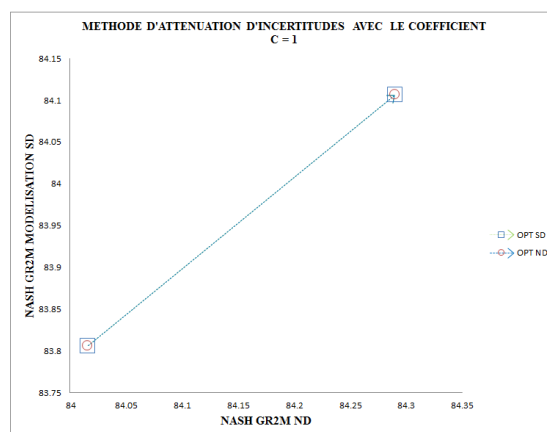
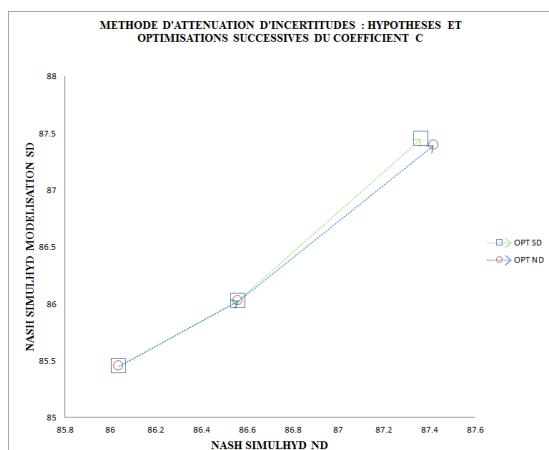


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.4638752872$, $X_2 = 0.4995935480$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1 = 0.4634276210$, $X_2 = 0.5024106324$], avec optimisation successive du coefficient $c = 0.8731, 1.6302$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.8350, 1.3554$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.4609225126$, $X_2 = 0.5003417614$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.8485, 2.0202$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.7222, 1.8016$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1 = 0.3795245172$, $X_2 = 0.4724091137$] et GR2M non-distribuée [$X_1 = 0.3782019585, X_2 = 0.4722882830$], sans processus d'optimisation sur le coefficient c , la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1 = 0.3767932998, X_2 = 0.4716741633$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 0.8815, 2.9572$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.7635, 2.7612$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE SIGUIRY (CALAGE 1954-1995)

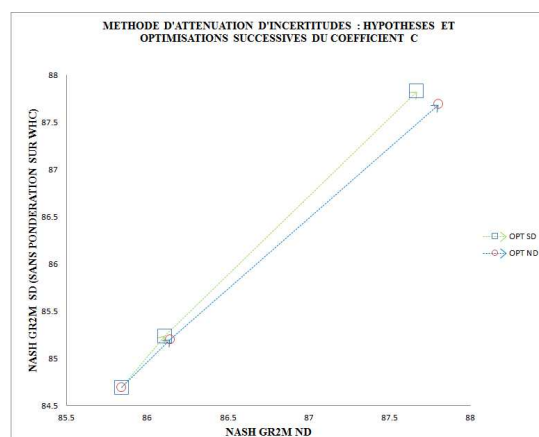
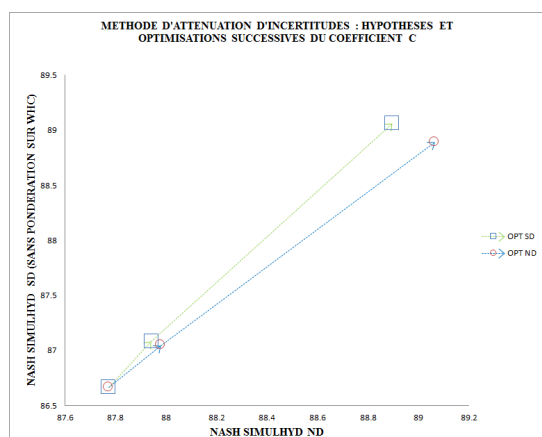
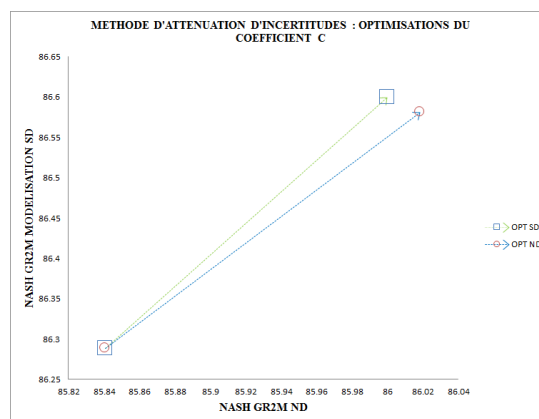
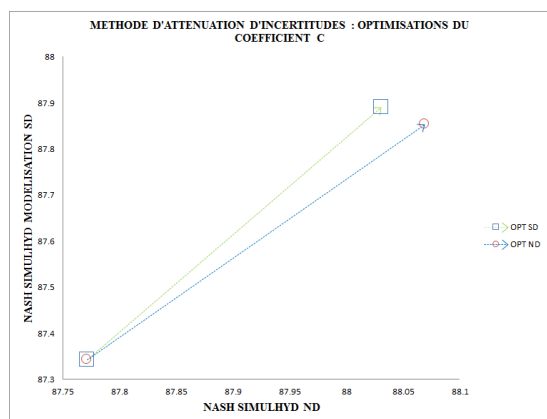


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.6672680214$, $X_2= 0.5284694227$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1= 0.6049613687$, $X_2= 0.5415717465$], avec optimisation du coefficient $c = 1.2327$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.9085$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5963772509$, $X_2= 0.5328946038$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.1873$, 2.8388 sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 0.8347$, 2.0860 sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.6244426437$, $X_2= 0.5057882114$] et GR2M non-distribuée [$X_1= 0.5564523869$, $X_2= 0.5040635255$], avec optimisation du coefficient $c = 0.9726$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation du coefficient $c = 0.7349$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.5517352327$, $X_2= 0.4976587087$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.4396$, 3.4709 sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.0788$, 2.7466 sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

ANNEXE 4 : STATION DE TINKISSO (CALAGE 1958-1995)

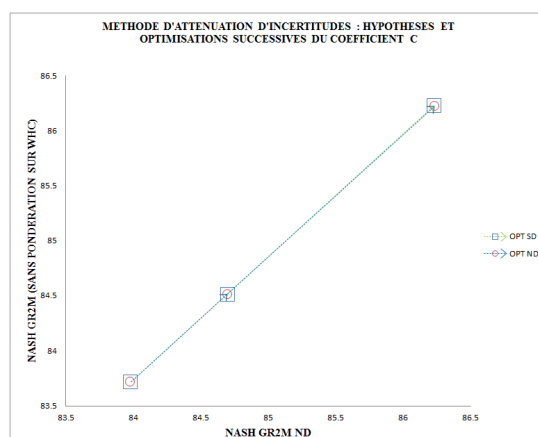
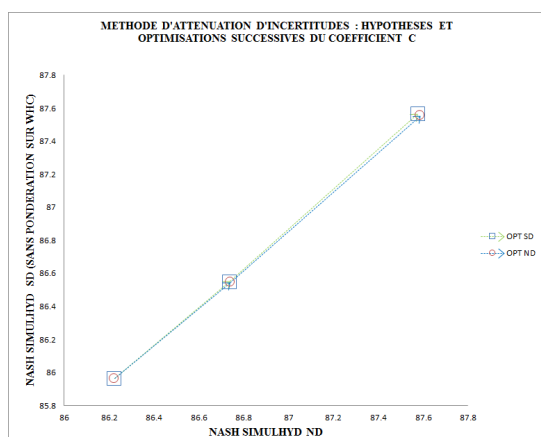
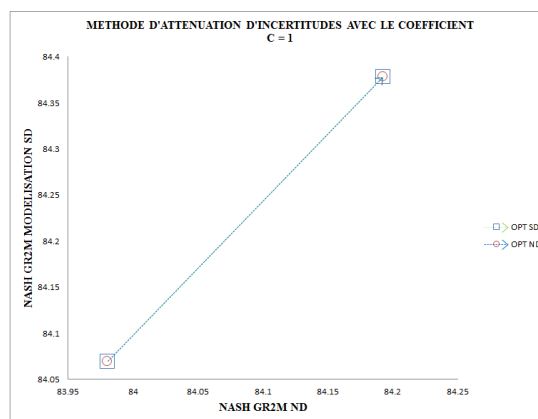
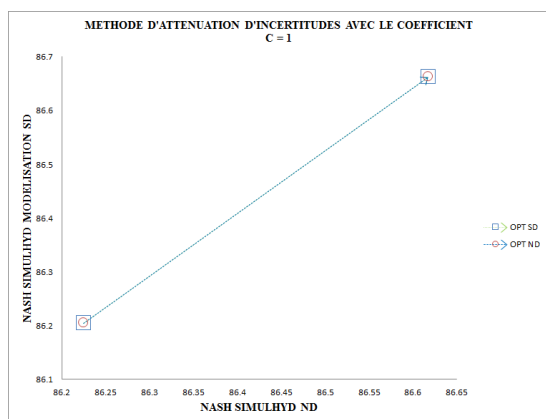


Diagramme du haut à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.5047864346$, $X_2= 0.5354674913$] et SimulHyd non-distribuée [$X_1= 0.4919661716$, $X_2= 0.5422239870$], sans processus d'optimisation sur le coefficient c, la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

Diagramme en bas à gauche. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant SimulHyd semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.4902487260$, $X_2= 0.5406244371$] et SimulHyd non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.0817, 1.7893$ sur SimulHyd semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.0160, 1.6489$ sur SimulHyd non-distribuée (OPT ND).

Diagramme du haut à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée avec coefficient de pondération [$X_1= 0.4302285709$, $X_2= 0.5015883930$] et GR2M non-distribuée [$X_1= 0.4163567883, X_2= 0.5059426221$], sans processus d'optimisation sur le coefficient c, la valeur $c=1$ donne la meilleure compromis entre le critère de Nash, le critère de bilan et celui du bilan absolu.

Diagramme en bas à droite. « Méthode d'atténuation d'incertitudes utilisant GR2M semi-distribuée sans coefficient de pondération sur WHC [$X_1= 0.4155741577, X_2= 0.5050798649$] et GR2M non-distribuée», avec optimisation successive du coefficient $c = 1.3939, 2.4746$ sur GR2M semi-distribuée (OPT SD) et optimisation successive du coefficient $c = 1.3232, 2.3415$ sur GR2M non-distribuée (OPT ND).

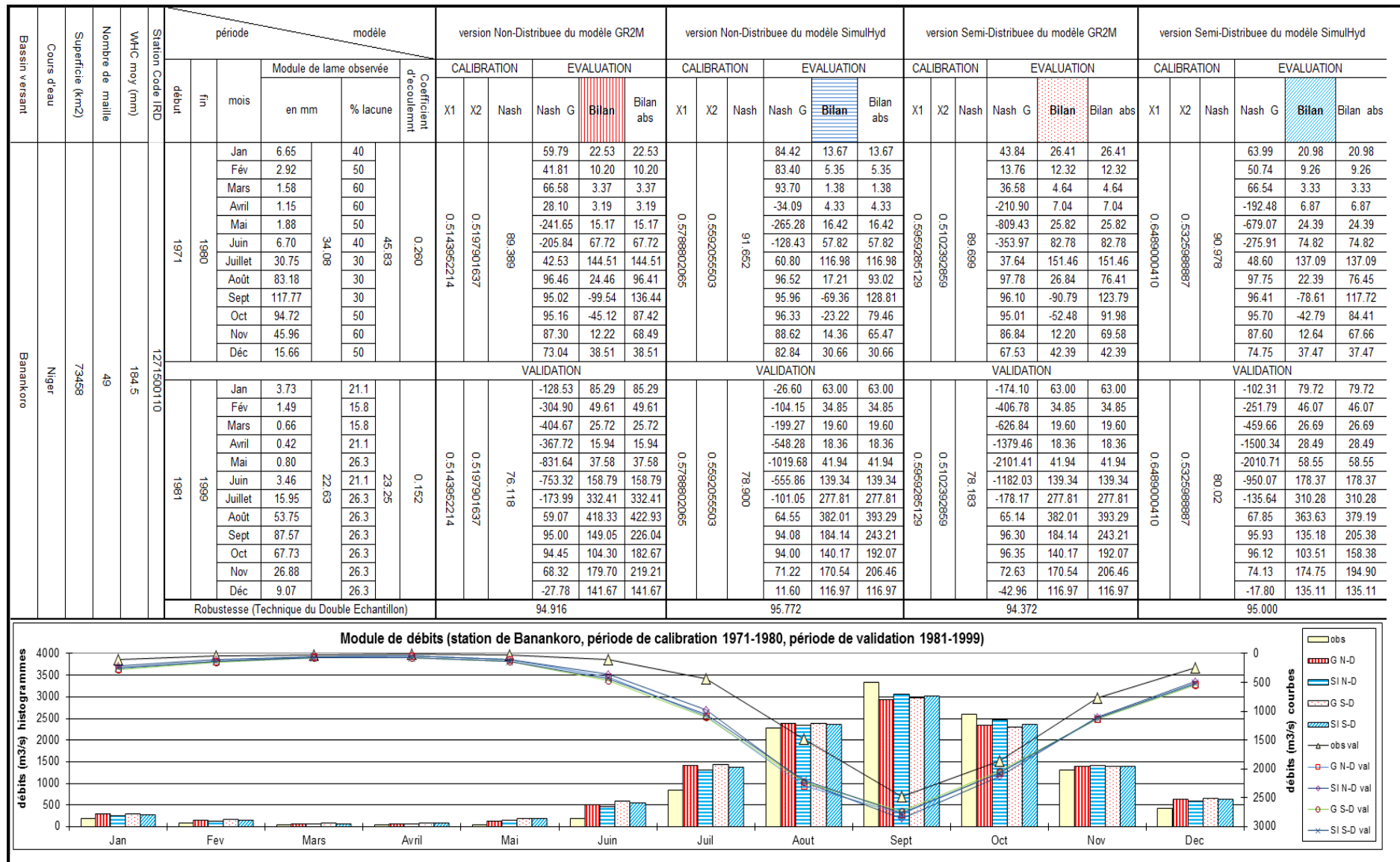
Annexes 5: Résultats d'Intercomparaison des versions de modèles, présentation en Tableau

ANNEXE 5 : STATION DE BANANKORO

Banankoro	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.50	2.00	0.25	0.25	1.00	0.25	1.75	2.50	0.50	2.50	0.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	1.50	0.50	0.50	1.00	0.50	1.50	2.00	1.00	2.00	1.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.00	7.50	1.75	1.75	3.00	1.75	7.25	7.50	4.50	8.50	3.50
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val)	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Scores		1.00	7.50	3.50	1.00	8.50	2.50	8.50	1.75	1.75	3.00	9.00

Banankoro	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.50	2.00	0.50	0.50	2.00	0.50	2.50	0.25	0.25	1.00	2.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	1.50	1.00	0.50	1.50	1.00	2.00	0.50	0.50	1.00	2.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		1.00	7.50	3.50	1.00	8.50	2.50	8.50	1.75	1.75	3.00	9.00
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
			X2	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val)	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
Scores		1.00	7.50	3.50	1.00	8.50	2.50	8.50	1.75	1.75	3.00	9.00		

Tableau récapitulatif (Banankoro)



ANNEXE 5 : STATION DE BARANAMA

Baranama	Actions	modèles	(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions		
			GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	
Biais	Périodes 1973-1980 & 1981-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	1.25	1.00	0.75	0.00	1.50	0.75	0.75	2.25	0.75	2.50	0.50	
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)	1.00	1.25	0.25	0.50	1.25	0.25	1.50	2.25	0.75	2.25	0.75	
		Calibration Nash	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	
		Validation Nash	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	
		Robustesse TDE	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	
		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
Variance	Périodes 1973-1980 & 1981-1995	Sensibilité aux échantillons	X2	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	
		Scores	4.25	6.25	1.00	0.50	4.75	1.00	6.25	10.50	1.50	10.75	1.25	

Baranama	Actions	modèles	(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		
			GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D	
Biais	Périodes 1973-1980 & 1981-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	2.00	1.00	0.00	1.25	1.00	0.75	1.25	1.75	0.00	2.25	0.75	
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)	1.25	1.25	0.50	1.00	1.75	0.25	1.75	0.75	0.50	1.50	1.50	
		Calibration Nash	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	
		Validation Nash	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	
		Robustesse TDE	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	
		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Variance	Périodes 1973-1980 & 1981-1995	Sensibilité aux échantillons	X2	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	
		Scores	5.25	6.25	0.50	4.25	6.75	1.00	8.00	3.50	0.50	5.75	6.25	

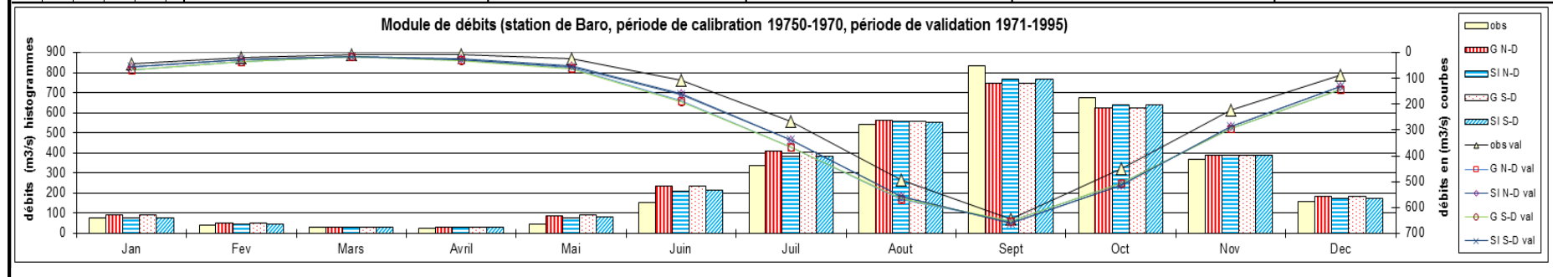
ANNEXE 5 : STATION DE BARO

Baro	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.00	2.50	0.25	0.25	0.25	0.25	2.50	2.25	0.75	2.75	0.25
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	2.50	0.00	0.00	0.75	0.00	2.25	2.75	0.25	3.00	0.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.50	9.00	1.25	0.25	2.00	1.25	8.75	10.00	2.00	10.75	1.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		2.50	9.25	0.25	1.50	9.25	1.25	10.25	1.50	0.25	3.25	8.75

Baro	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.00	2.75	0.25	0.00	2.75	0.25	2.50	0.25	0.25	0.50	2.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	2.50	0.00	0.50	2.50	0.00	2.75	0.25	0.00	0.75	2.25
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		2.50	9.25	0.25	1.50	9.25	1.25	10.25	1.50	0.25	3.25	8.75
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
			X2	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Scores		2.50	9.25	0.25	1.50	9.25	1.25	10.25	1.50	0.25	3.25	8.75		

Tableau récapitulatif (Baro)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle		version Non-Distribuee du modèle GR2M				version Non-Distribuee du modèle SimulHyd				version Semi-Distribuee du modèle GR2M				version Semi-Distribuee du modèle SimulHyd																		
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient de coulement	CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION															
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs												
Baro	Niandan	13108	15	161,6	1171501805	1950	1970	Jan	15.61	9.524	0.297	0.5892445453	0.5258996072	90.710	89.54	46.33	71.10	0.6171479833	0.5677584220	92.274	92.36	-1.67	64.00	0.5940296066	0.5278150940	90.520	89.15	44.16	71.68	0.5681016784	92.003	91.80	-1.82	64.89						
								Fév	7.79	4.762					88.62	26.11	41.58				92.34	2.77	35.96				88.57	25.84	41.55			92.03	2.94	36.83						
								Mars	5.89	4.762					89.77	-8.05	33.56				89.79	-10.04	33.07				89.84	-4.36	33.56			89.58	-6.74	32.85						
								Avril	4.95	9.524					75.58	8.42	39.12				77.81	10.92	38.61				73.40	15.68	41.15			75.95	16.55	39.43						
								Mai	9.42	4.762					-0.25	152.58	160.45				38.36	114.32	127.48				-14.42	167.55	175.33			26.83	129.53	141.76						
								Juin	30.25	4.762					63.61	313.47	350.26				77.10	211.53	270.51				60.40	325.37	361.22			73.80	232.23	287.43						
								Juillet	68.66	9.524					83.80	265.89	446.40				86.09	170.72	406.01				83.81	255.82	447.83			85.68	169.72	411.22						
								Août	110.64	9.524					96.99	76.32	272.02				97.39	59.47	253.23				97.14	51.41	268.70			97.50	34.12	248.55						
								Sept	164.65	9.524					96.22	-333.94	481.13				96.84	-253.95	426.65				96.15	-336.27	480.50			96.75	-260.26	429.50						
								Oct	137.79	14.29					96.10	-203.81	364.50				96.56	-142.05	349.00				96.10	-199.68	368.58			96.52	-138.46	351.45						
								Nov	72.37	9.524					92.53	75.87	285.00				92.70	77.17	281.75				92.26	74.33	292.49			92.45	76.59	290.27						
								Déc	32.35	9.524					91.45	95.52	149.16				93.94	46.76	115.69				91.04	93.74	152.05			93.43	46.82	120.11						
						Robustesse (Technique du Double Echantillon)										97.173				97.736				97.069				97.604												
						Baro	Niandan	13108	15	161,6	1171501805	1971	1995	Jan	8.69	56.0	0.255	0.5892445453	0.5258996072	78.297	48.77	57.56	57.56	0.6171479833	0.5677584220	80.377	76.24	31.72	35.79	0.5940296066	0.5278150940	77.290	48.45	31.72	35.79	0.5681016784	79.115	74.99	31.94	36.85
														Fév	3.84	56.0					28.23	30.92	30.98				69.49	14.93	18.85				28.60	14.93	18.85			68.30	15.04	19.24
														Mars	1.74	60.0					-22.23	17.44	17.44				6.34	12.11	12.84				-34.05	12.11	12.84			-10.75	12.89	13.69
														Avril	1.97	56.0					-179.02	38.79	38.79				-96.50	32.49	32.49				-274.63	32.49	32.49			-167.45	37.44	37.44
														Mai	4.98	40.0					-129.40	113.85	113.85				-28.05	83.84	83.84				-168.60	83.84	83.84			-59.12	92.58	92.58
														Juin	21.06	44.0					12.06	228.17	239.44				44.63	149.67	168.90				1.74	149.67	168.90			33.71	162.28	181.28
														Juillet	54.67	40.0					76.47	306.04	331.42				83.55	210.53	268.39				75.98	210.53	268.39			82.40	216.36	272.36
														Août	100.39	44.0					83.17	219.38	418.59				83.20	185.91	414.57				82.68	185.91	414.57			82.56	182.58	409.02
														Sept	127.79	52.0					92.79	12.31	305.99				92.34	35.94	321.19				92.31	35.94	321.19			91.77	37.41	329.14
														Oct	91.88	52.0					92.93	140.39	206.78				92.75	158.15	212.66				92.78	158.15	212.66			92.62	156.01	216.40
														Nov	43.88	48.0					72.65	187.12	257.77				74.28	168.39	250.89				71.64	168.39	250.89			73.09	167.86	254.63
Déc	18.15	60.0	46.16	112.92	112.92									63.72	85.49	92.34					46.07	85.49	92.34				62.98	85.15	93.45											
Robustesse (Technique du Double Echantillon)										97.173				97.736				97.069				97.604																		



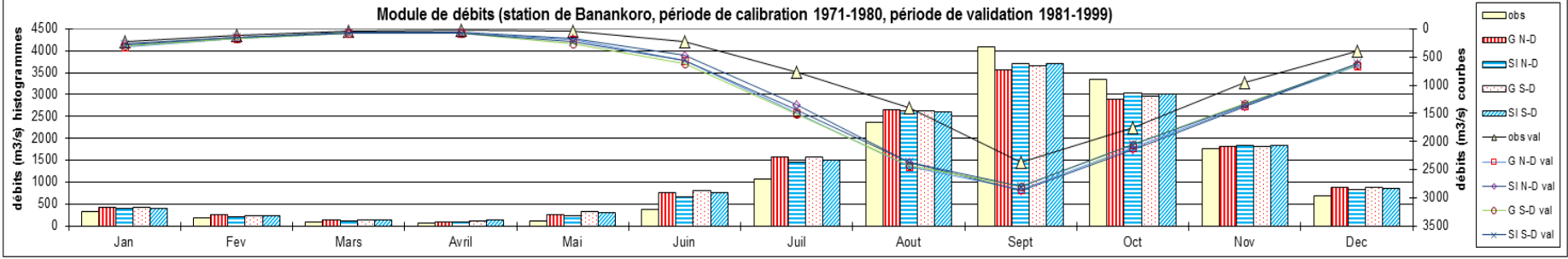
ANNEXE 5 : STATION DE DIALAKORO

Dialakoro	Périodes 1957-1970 & 1971-1980	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1957-1970 & 1971-1980	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	1.75	0.25	0.75	0.75	0.25	2.00	1.25	1.75	2.00	1.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.00	1.25	0.50	1.25	0.50	0.50	2.00	1.00	2.00	1.25	1.75
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.25	6.00	0.75	4.00	2.25	0.75	9.00	5.25	6.75	7.25	4.75
Variance	Périodes 1957-1970 & 1971-1980	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

Dialakoro	Périodes 1957-1970 & 1971-1980	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1957-1970 & 1971-1980	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	1.75	1.00	0.25	2.50	0.25	2.00	0.25	0.75	0.75	2.25
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.00	1.25	1.75	0.00	2.25	0.75	1.25	0.50	1.25	0.50	2.50
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		1.25	6.00	4.75	1.25	9.75	1.00	7.25	0.75	4.00	2.25	9.75
Variance	Périodes 1957-1970 & 1971-1980	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
			X2	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00

Tableau récapitulatif (Dialakoro)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle	version Non-Distribuée du modèle GR2M				version Non-Distribuée du modèle SimulHyd				version Semi-Distribuée du modèle GR2M				version Semi-Distribuée du modèle SimulHyd																																																																																																														
						début	fin		Module de lame observée		Coefficient de coulement	CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION																																																																																																									
									en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs																																																																																																						
Dialakoro	Niger	70591	49	178.8	1171500110	1967	1970	45.07	39.29	0.253	0.5585458039	0.5033083138	92.058	0.6062488028	0.5385270557	94.327	0.6278483646	0.5110787927	92.837	0.669896907	0.5306285233	93.888	92.90	21.72	25.36	91.91	10.44	13.80	83.23	7.41	8.98	32.18	15.44	15.44	-182.78	60.82	60.82	-10.97	124.02	124.02	74.87	148.51	148.51	98.47	74.48	74.48	97.82	-105.70	105.70	97.98	-91.49	98.21	92.70	16.77	100.55	91.26	48.47	55.15																																																																									
																																																											VALIDATION				VALIDATION				VALIDATION				VALIDATION																																																												
																																																											1971	1980	25.90	56.67	0.216	0.5585458039	0.5033083138	48.167	0.6062488028	0.5385270557	54.345	0.6278483646	0.5110787927	50.182	0.669896907	0.5306285233	54.86	76.39	6.26	17.58	89.43	2.16	2.16	43.30	4.16	4.16	-322.64	3.55	3.55	-2068.30	21.15	21.15	-140.65	97.85	97.85	10.80	149.63	149.63	36.32	256.18	256.18	86.28	109.99	152.89	91.61	46.42	57.83	75.74	28.72	28.72	67.74	23.97	23.97																				
																																																																																																																Robustesse (Technique du Double Echantillon)				96.277				97.044				96.128				96.614			



ANNEXE 5 : STATION DE FARANAH

Faranah	Périodes 1969-1980 & 1981-1995	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.00	2.00	0.00	1.00	0.00	0.00	3.00	2.00	1.00	2.00	1.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.75	1.75	0.00	0.50	0.75	0.00	2.25	2.25	0.75	2.50	0.50
		Calibration Nash		0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.75	6.75	0.00	3.50	1.75	0.00	10.25	8.25	3.75	8.50	3.50
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.75	6.75	0.00	3.50	1.75	0.00	10.25	8.25	3.75	8.50	3.50

Faranah	Périodes 1969-1980 & 1981-1995	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.00	2.00	1.00	0.00	2.75	0.25	2.00	0.00	1.00	0.00	3.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.75	1.75	0.50	0.75	2.25	0.00	1.75	0.75	0.50	0.75	2.25
		Calibration Nash		0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		1.75	6.75	3.50	1.75	10.00	0.25	7.75	0.75	3.50	1.75	10.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
			X2	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Scores		1.75	6.75	3.50	1.75	10.00	0.25	7.75	0.75	3.50	1.75	10.25		

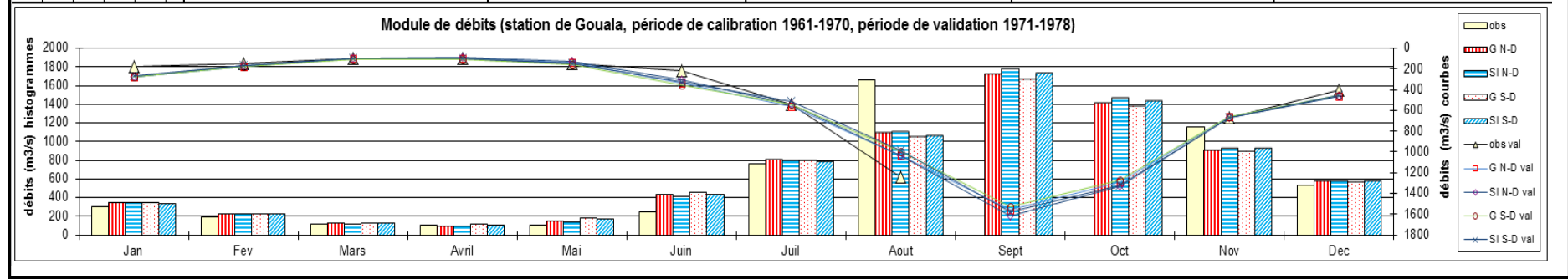
ANNEXE 5 : STATION DE GOUALA

Gouala	Périodes 1961-1970 & 1971-1978	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.38	1.88	0.38	0.38	1.17	0.42	1.42	2.00	1.00	2.50	0.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.88	0.88	0.13	1.13	0.92	0.42	1.67	1.75	1.25	1.50	1.50
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		3.25	6.75	0.50	1.50	7.08	0.83	4.08	9.75	2.25	10.00	2.00
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		3.33	7.08	1.58	3.83	7.58	0.58	9.58	0.58	1.83	7.25	4.75

Gouala	Périodes 1961-1970 & 1971-1978	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.42	2.17	0.42	0.42	2.17	0.42	2.17	0.42	0.42	1.25	1.75
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.92	0.92	1.17	1.42	1.42	0.17	1.42	0.17	1.42	1.00	2.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		3.33	7.08	1.58	3.83	7.58	0.58	9.58	0.58	1.83	7.25	4.75
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
			X2	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
Scores		3.33	7.08	1.58	3.83	7.58	0.58	9.58	0.58	1.83	7.25	4.75		

Tableau récapitulatif (Gouala)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle		version Non-Distribuee du modèle GR2M					version Non-Distribuee du modèle SimulHyd					version Semi-Distribuee du modèle GR2M					version Semi-Distribuee du modèle SimulHyd										
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient decolement	CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	
Gouala	Sankarani	33075	28	164	1271502005	1961	1970	Jan	24.66	20	0.240	0.7428762029	0.4015537937	73.924	93.55	32.39	39.36	0.7766445253	0.4162794524	75.344	94.85	27.93	35.08	0.7166279891	0.4002938310	71.829	93.82	29.88	38.74	0.7539897374	0.4150587275	73.143	94.88	26.26	35.21
								Fév	14.31	40					92.27	18.21	19.65				94.95	13.94	15.77				92.34	17.67	19.06				94.63	13.99	15.43
								Mars	9.62	40					97.72	5.34	7.28				99.02	1.63	4.29				97.00	7.44	8.46				98.65	4.38	5.66
								Avril	7.89	50					94.68	0.56	7.63				95.23	-2.62	7.38				91.96	6.47	8.11				95.06	3.63	6.56
								Mai	8.46	70					66.71	11.85	11.85				80.51	8.38	8.80				15.06	20.70	20.70				36.75	17.61	17.61
								Juin	19.45	40					30.77	88.23	88.23				45.49	76.76	76.76				6.64	99.17	99.17				19.26	89.69	89.69
								Juillet	62.09	10					73.06	29.20	242.60				72.80	21.11	240.78				72.58	22.35	243.85				72.16	15.32	242.86
								Août	134.43	90					88.09	-45.57	45.57				88.58	-44.62	44.62				86.29	-48.91	48.91				86.69	-48.19	48.19
								Sept		100					0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00
								Oct		100					0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00
								Nov	91.02	50					93.22	-97.31	97.31				94.30	-88.05	88.05				92.75	-101.11	101.11				93.95	-90.79	91.15
								Déc	43.43	20					97.88	28.44	39.98				97.95	28.98	38.85				97.96	24.26	37.44				97.94	25.99	37.73
						Robustesse (Technique du Double Echantillon)										97.433					97.656					97.117					97.332				
						1971	1978	Jan	14.46	87.5	0.245	0.7428762029	0.4015537937	88.326	64.66	8.25	8.25	0.7766445253	0.4162794524	88.938	70.95	7.48	7.48	0.7166279891	0.4002938310	86.219	66.12	7.48	7.48	0.7539897374	0.4150587275	86.80	71.62	7.40	7.40
								Fév	11.51	87.5					96.34	2.11	2.11				98.47	1.37	1.37				96.38	1.37	1.37				98.28	1.45	1.45
								Mars	8.07	87.5					99.97	0.14	0.14				99.63	-0.47	0.47				99.86	-0.47	0.47				99.92	-0.22	0.22
								Avril	7.37	75.0					99.56	0.72	0.72				99.27	-0.73	0.90				97.49	-0.73	0.90				99.65	0.79	0.79
								Mai	12.10	62.5					98.25	-2.43	4.21				95.93	-6.08	6.08				97.10	-6.08	6.08				98.70	-0.72	3.20
								Juin	16.74	62.5					47.47	28.62	28.62				64.70	22.26	22.26				31.27	22.26	22.26				49.87	26.08	26.08
								Juillet	44.14	50.0					97.19	4.49	21.30				97.56	-2.19	20.29				97.49	-2.19	20.29				97.39	-9.29	22.11
								Août	100.57	75.0					93.42	-32.86	34.29				93.18	-32.68	35.65				91.95	-32.68	35.65				91.53	-41.04	41.04
								Sept		100.0					0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00
								Oct		100.0					0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00				0.00	0.00	0.00
								Nov	52.69	62.5					98.89	-2.17	12.40				98.65	0.03	14.66				98.46	0.03	14.66				98.17	-1.04	16.65
Déc	32.74	37.5	95.28	23.30	30.43			95.62	22.40	29.31					95.61	22.40	29.31				95.90	21.16	28.48												
Robustesse (Technique du Double Echantillon)										97.433					97.656					97.117					97.332										



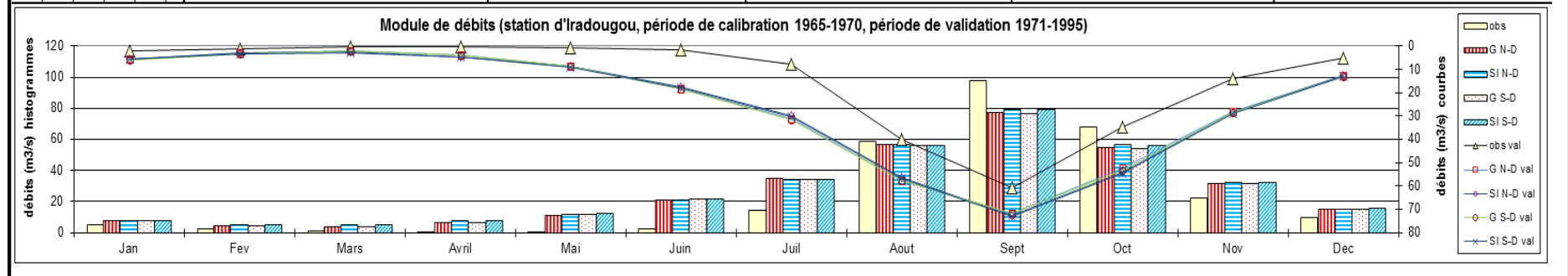
ANNEXE 5 : STATION D'IRADOUGOU

Iradougou	Périodes 1965-1970 & 1971-1995	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		2.00	1.00	0.00	0.00	2.25	0.00	0.75	3.00	0.00	3.00	0.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		1.75	1.25	0.00	0.00	2.50	0.00	0.50	3.00	0.00	3.00	0.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		5.75	5.25	0.00	1.00	8.75	0.00	3.25	12.00	0.00	11.00	1.00
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00

Iradougou	Périodes 1965-1970 & 1971-1995	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		2.00	1.00	0.00	2.00	1.00	0.00	1.50	1.50	0.00	2.25	0.75
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		1.75	1.25	0.00	1.75	1.25	0.00	2.25	0.75	0.00	2.50	0.50
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		5.75	5.25	1.00	5.75	6.25	0.00	8.75	2.25	1.00	8.75	3.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
			X2	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tableau récapitulatif (Iradougou)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle				version Non-Distribuée du modèle GR2M				version Non-Distribuée du modèle SimulHyd				version Semi-Distribuée du modèle GR2M				version Semi-Distribuée du modèle SimulHyd											
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient de coulement	CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION		CALIBRATION		EVALUATION						
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	
Iradougou	Kouroukele	1824	5	194.5	1091504003	1965	1970	Jan	7.62	0	0.232	0.5922790804	0.5564669429	77.737	65.68	21.48	22.50	0.6421603388	0.5761014398	78.246	65.62	21.54	22.58	0.5514773664	0.5928626862	76.889	59.82	23.06	23.82	0.6430685398	0.5713590670	77.251	59.11	23.42	24.04
								Fév	3.07	0					-7.60	17.42	17.42				-64.44	21.00	21.00				-35.03	19.26	19.26				-108.22	23.24	23.24
								Mars	1.51	0					-995.43	24.27	24.27				-1864.45	33.87	33.87				-1291.99	26.85	26.85				-2286	36.68	36.68
								Avril	0.84	0					-12823	48.37	48.37				-18131	59.15	59.15				-14021	51.29	51.29				-19793	62.33	62.33
								Mai	0.81	0					-43658	93.97	93.97				-48424	100.36	100.36				-46232	96.27	96.27				-51398	102.98	102.98
								Juin	3.14	0					-5282	162.08	162.08				-5219	161.86	161.86				-5487.03	163.20	163.20				-5458.08	163.78	163.78
								Juillet	20.66	0					-118.09	182.95	219.14				-110.24	177.61	215.80				-119.06	180.11	220.76				-113.12	176.03	218.11
								Août	85.90	0					92.81	-17.89	116.49				92.76	-17.03	117.29				92.36	-21.99	118.71				92.25	-19.95	117.88
								Sept	138.50	0					89.49	-171.43	177.11				90.25	-153.13	175.30				89.32	-175.74	184.24				90.12	-156.87	177.52
								Oct	99.47	0					92.38	-113.60	116.34				93.47	-95.95	106.90				91.59	-118.36	119.89				92.63	-100.53	116.60
								Nov	31.27	0					76.39	78.98	79.37				71.53	86.86	86.86				74.93	79.90	81.17				69.19	88.39	88.39
								Déc	13.94	0					52.45	46.94	49.02				46.43	49.71	50.06				46.74	49.03	50.85				39.25	52.43	52.43
						Robustesse (Technique du Double Echantillon)											86.276				86.197				85.688				85.493						
						1971	1995	Jan	3.23	0.0	0.154	0.5922790804	0.5564669429	41.693	-111.32	127.24	127.24	0.6421603388	0.5761014398	41.912	-90.72	118.66	118.66	0.5514773664	0.5928626862	37.956	-139.86	118.66	118.66	0.6430685398	0.5713590670	37.42	-120.66	128.27	128.27
								Fév	1.38	4.0					-192.37	64.00	64.00				-216.01	66.20	66.27				-236.87	66.20	66.27				-265.69	71.60	71.60
								Mars	0.65	4.0					-954.53	54.69	54.69				-1908	74.64	74.64				-1103.45	74.64	74.64				-2156.55	79.83	79.83
								Avril	0.56	16.0					-7164	101.89	101.89				-10346	127.20	127.20				-7757.43	127.20	127.20				-11180.75	133.27	133.27
								Mai	1.10	12.0					-5834	248.63	248.63				-6092	259.39	259.39				-6340	259.39	259.39				-6641	270.47	270.47
								Juin	2.02	4.0					-3492	572.44	572.44				-3179.92	548.12	548.12				-3649	548.12	548.12				-3364	562.47	562.47
								Juillet	11.58	4.0					-609.36	826.87	826.87				-527.34	773.75	773.75				-618	773.75	773.75				-543	782.04	782.04
								Août	58.66	0.0					61.46	644.84	732.35				63.77	606.74	701.56				59.14	606.74	701.56				60.92	621.29	719.70
								Sept	86.24	0.0					81.90	390.31	674.03				80.72	431.14	703.15				80.25	431.14	703.15				78.78	447.33	734.44
								Oct	51.09	0.0					56.76	649.04	762.73				52.08	703.62	806.69				52.87	703.62	806.69				47.47	733.26	844.69
								Nov	19.66	0.0					4.85	503.90	595.61				1.61	516.30	605.67				-1.78	516.30	605.67				-6.02	540.43	628.65
Déc	7.43	4.0	-124.47	271.47	271.47			-120.63	267.16	267.16					-150.36	267.16	267.16				-150.36	284.83	284.83												



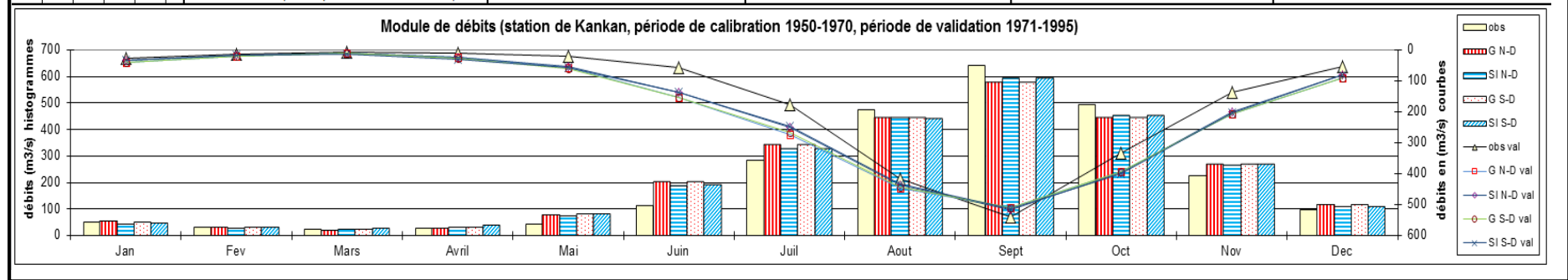
ANNEXE 5 : STATION DE KANKAN

Kankan	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.75	1.50	0.25	0.50	1.25	0.25	1.50	2.00	1.00	2.50	0.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	2.25	0.00	0.25	1.00	0.00	2.00	2.00	1.00	2.75	0.25
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.25	7.75	1.25	1.75	3.25	1.25	7.50	8.00	4.00	10.25	1.75
Variance	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00

Kankan	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		1.00	1.50	0.50	0.75	2.00	0.25	2.00	0.50	0.50	1.50	1.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	2.25	0.25	0.50	2.50	0.00	2.50	0.25	0.25	1.00	2.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		2.50	7.75	1.75	1.25	9.50	1.25	8.50	1.75	1.75	4.50	7.50
Variance	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tableau récapitulatif (Kankan)

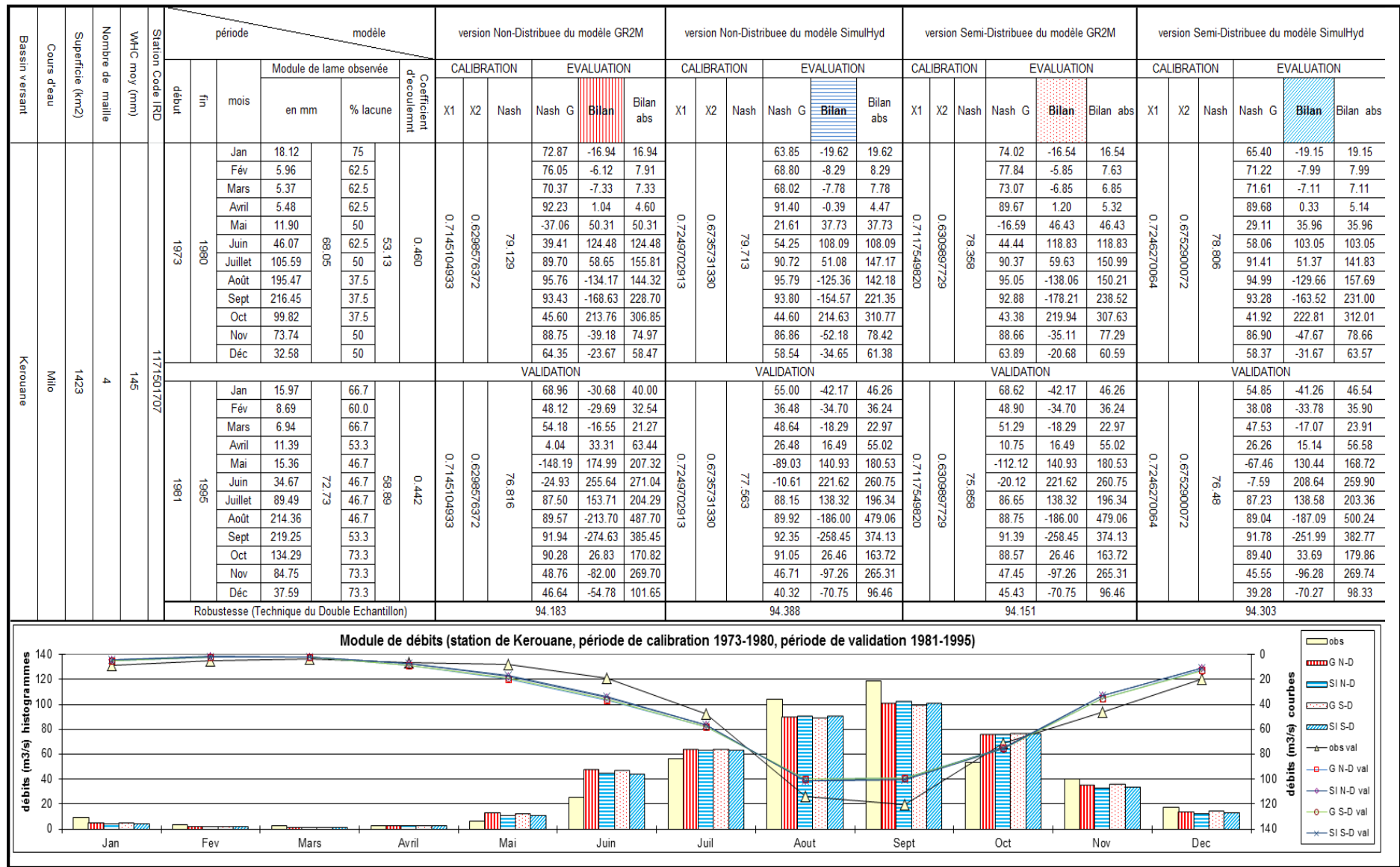
Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle		version Non-Distribuée du modèle GR2M					version Non-Distribuée du modèle SimulHyd					version Semi-Distribuée du modèle GR2M					version Semi-Distribuée du modèle SimulHyd																															
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient de coulement	CALIBRATION			EVALUATION			X1	X2	Nash	EVALUATION		Bilan abs	X1	X2	Nash	EVALUATION		Bilan abs	X1	X2	Nash	EVALUATION		Bilan abs	X1	X2	Nash	EVALUATION		Bilan abs																
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs				Nash G	Bilan					Bilan abs	Nash G					Bilan	Bilan abs					Nash G	Bilan		Bilan abs															
						1950		1970		1950		1970		1950		1970		1950		1970		1950		1970		1950		1970		1950		1970		1950		1970		1950		1970																
Kankan	Milo	10080	14	160.3	1171501705	1950	1970	Jan	13.43	4.762	0.313	0.6053462798	0.5645612002	88.804	92.95	19.54	56.98	0.6296442897	0.6088693561	90.149	92.63	-23.51	60.47	0.5828068702	0.5689750895	88.740	92.96	16.23	57.45	0.6128575362	0.6084453088	89.888	92.54	-20.72	60.77																					
								Fév	7.44	4.762					95.31	1.68	25.48				92.94	-4.09	27.65				93.40	9.11	29.37				87.12	10.79	40.16																					
								Mars	6.48	4.762					88.94	-14.47	38.03				87.59	2.66	37.08				87.39	1.51	38.45				76.26	28.73	51.73																					
								Avril	6.75	4.762					76.41	22.40	50.40				73.16	40.39	57.28				70.97	41.09	58.52				53.97	70.65	76.18																					
								Mai	11.65	4.762					-17.72	196.15	207.39				4.51	176.24	185.77				-30.28	212.36	218.61				-21.69	210.45	214.10																					
								Juin	29.11	4.762					30.91	464.36	464.36				49.47	385.80	393.57				29.21	466.86	466.86				44.00	407.84	410.39																					
								Juillet	74.92	4.762					85.02	324.53	479.91				87.23	246.48	436.86				85.27	320.92	476.88				87.15	251.45	435.72																					
								Août	126.12	4.762					95.57	-152.24	412.01				95.73	-155.32	402.48				95.49	-165.47	417.13				95.64	-168.51	412.33																					
								Sept	165.14	0					95.86	-340.66	544.43				96.27	-258.73	491.84				95.93	-346.01	545.54				96.39	-257.77	487.25																					
								Oct	131.01	0					95.10	-275.57	489.74				95.52	-231.61	473.88				95.08	-278.43	488.07				95.61	-218.91	468.25																					
								Nov	58.29	0					87.21	232.47	378.29				87.59	222.67	366.89				87.00	234.72	381.96				86.89	241.37	380.80																					
								Déc	25.75	0					89.98	128.83	134.53				94.45	78.34	92.01				90.40	125.40	130.24				94.08	84.30	94.84																					
								Robustesse (Technique du Double Echantillon)													95.728						96.338						95.682					96.117																		
								1971							1995						1971						1995						1971						1995																	
								Jan	6.70	4.0					51.02	93.78	103.98				73.39	47.98	77.70				52.44	47.98	77.70				72.17	50.64	79.01																					
								Fév	3.35	4.0					53.63	34.62	52.34				65.75	13.99	44.97				53.34	13.99	44.97				62.04	17.76	47.24																					
								Mars	2.17	0.0					51.72	12.27	36.54				40.45	15.05	40.34				44.92	15.05	40.34				15.89	26.32	47.34																					
								Avril	2.93	4.0					-179.99	76.88	100.22				-158.25	78.37	95.81				-245.16	78.37	95.81				-277.83	104.36	114.00																					
								Mai	5.65	0.0					-251.48	245.44	245.44				-160.29	207.81	207.81				-276.49	207.81	207.81				-218.79	234.88	234.88																					
								Juin	14.94	4.0					-146.06	594.29	594.29				-70.84	480.61	480.61				-142.59	480.61	480.61				-79.66	490.22	490.22																					
								Juillet	46.68	4.0					59.49	612.43	612.43				70.25	479.79	485.00				61.42	479.79	485.00				71.12	459.40	472.08																					
								Août	110.43	8.0					89.19	183.93	637.58				89.56	134.11	624.05				88.84	134.11	624.05				89.29	118.75	634.59																					
								Sept	139.23	8.0					93.99	-188.03	574.43				94.26	-153.84	563.08				93.56	-153.84	563.08				93.82	-157.37	592.25																					
								Oct	88.33	8.0					89.35	369.81	535.68				89.10	395.45	545.36				89.01	395.45	545.36				88.54	413.56	567.66																					
Nov	35.28	4.0	64.98	431.05	506.12	69.04	384.85	471.10	63.85	384.85	471.10	66.87	398.39	485.51																																										
Déc	13.76	4.0	35.68	242.98	242.98	59.73	179.38	184.68	36.06	179.38	184.68	56.84	184.06	189.85																																										



ANNEXE 5 : STATION DE KEROUANE

Kerouane	Actions	modèles	(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions				
			GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D			
Biais	Périodes 1973-1980 & 1981-1995		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	1.00	0.50	0.75	0.75	1.50	0.75	0.75	1.50	1.50	1.25	1.75		
			Evaluation Nash-Garrick (Validation)	1.00	1.25	0.25	0.50	2.00	0.25	0.75	2.00	1.00	2.25	0.75		
			Calibration Nash	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00		
			Validation Nash	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00		
			Robustesse TDE	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00		
			Scores		2.00	5.75	2.00	2.25	6.50	2.00	3.50	7.50	4.50	7.50	4.50	
Variance	Périodes 1973-1980 & 1981-1995		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	
				X2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	
				Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	
			Scores		2.00	5.75	2.00	2.25	6.50	2.00	3.50	7.50	4.50	7.50	4.50	
			Biais	Périodes 1973-1980 & 1981-1995		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
						GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	1.50	0.50				1.00	1.00	1.25	0.75	1.00	1.25	0.75	2.00	1.00		
Evaluation Nash-Garrick (Validation)	1.25	1.25				0.50	1.00	1.75	0.25	1.25	1.25	0.50	2.25	0.75		
Calibration Nash	0.00	1.00				0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00		
Validation Nash	0.00	1.00				0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00		
Robustesse TDE	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00					
Variance	Périodes 1973-1980 & 1981-1995		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	
				X2	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	
				Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	
Scores		3.75	5.75	2.50	2.00	8.00	2.00	6.25	3.50	2.25	8.25	3.75				

Tableau récapitulatif (Kérouane)

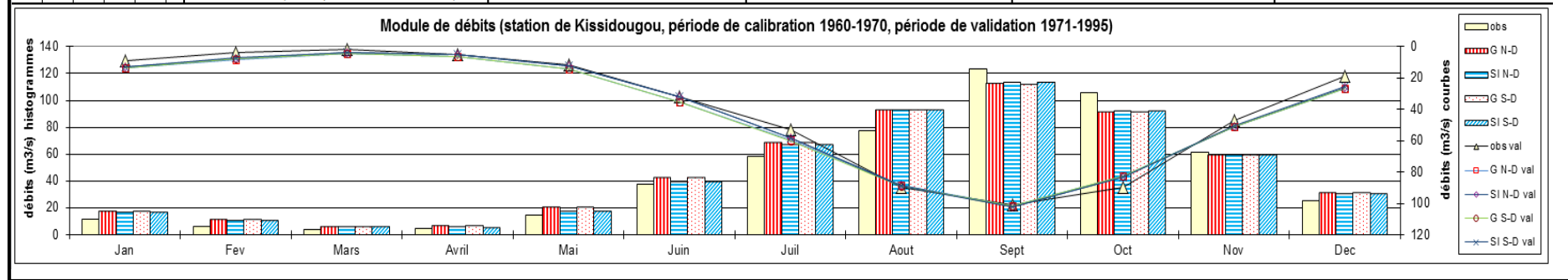


ANNEXE 5 : STATION DE KISSIDOUGOU

Kissidouougou	Actions	modèles	(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
			GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1960-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	3.00	0.00	3.00	0.00	3.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)	0.50	1.50	0.00	1.00	0.50	0.00	2.50	1.75	1.25	2.00	1.00
		Calibration Nash	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Validation Nash	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Scores	1.50	2.50	1.00	7.00	1.50	1.00	9.50	4.75	7.25	4.00	8.00
Variance	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00
		X2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
Kissidouougou	Actions	modèles	(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
			GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1960-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)	0.00	0.00	3.00	0.00	2.50	0.50	0.00	0.00	3.00	0.00	3.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)	0.50	1.50	1.00	0.50	2.50	0.00	1.75	0.25	1.00	0.50	2.50
		Calibration Nash	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Validation Nash	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Scores	1.50	2.50	8.00	1.50	9.00	1.50	3.75	1.25	7.00	1.50	10.50
Variance	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		X2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
		Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tableau récapitulatif (Kissidouyou)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle		version Non-Distribuee du modèle GR2M					version Non-Distribuee du modèle SimulHyd					version Semi-Distribuee du modèle GR2M					version Semi-Distribuee du modèle SimulHyd															
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient deconoulement	CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION								
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs						
Kissidouyou (Nandan)	Nandan	1400	5	132.6	1171501810	1960	1970	Jan	22.20	27.27	0.417	0.7548987865	0.4732659781	98.556	71.25	83.69	83.69	0.7617518361	0.4884470189	89.242	78.07	71.32	71.32	0.7465945207	0.4751011560	88.866	72.28	83.26	83.26	0.7539966182	0.4909000203	89.569	79.23	70.34	70.34					
								Fév	10.73	18.18					39.12	69.43	69.70				53.38	58.80	59.87				40.84	69.52	69.52				55.21	58.83	59.29					
								Mars	6.93	9.091					58.75	41.10	43.01				70.21	31.05	38.41				60.13	40.78	43.00				71.35	30.95	37.62					
								Avril	7.96	9.091					47.06	34.25	50.24				69.72	16.69	36.38				47.83	32.60	49.20				70.51	15.33	36.23					
								Mai	27.60	18.18					80.45	98.87	101.15				90.51	49.24	68.44				81.41	96.62	96.62				91.42	45.94	64.25					
								Juin	70.03	18.18					90.00	73.90	193.09				91.17	27.14	175.70				90.88	74.54	186.00				92.07	26.52	169.63					
								Juillet	111.93	18.18					88.63	170.72	280.79				89.48	146.82	272.94				88.73	167.06	282.16				89.57	142.27	273.81					
								Août	148.72	18.18					91.62	259.83	324.68				91.66	262.12	325.07				91.95	260.79	318.46				91.99	263.47	318.86					
								Sept	229.13	18.18					94.71	-187.99	415.96				94.88	-171.64	406.54				94.79	-191.27	412.91				94.98	-173.96	402.83					
								Oct	202.43	18.18					94.54	-247.36	320.15				94.73	-238.07	312.32				94.61	-242.77	313.86				94.83	-232.58	305.21					
								Nov	112.92	18.18					97.60	-29.69	136.30				97.66	-32.56	135.83				97.77	-29.79	131.44				97.82	-32.65	130.85					
								Déc	47.89	18.18					89.55	103.35	114.72				91.35	90.76	102.59				89.89	104.80	113.74				91.71	91.65	101.55					
					Robustesse (Technique du Double Echantillon)										97.781					98.051					97.801					98.071										
										1171501810	1971	1995	Jan	17.22	32.0	0.425	0.7548987865	0.4732659781	87.638	63.22	159.11	159.11	0.7617518361	0.4884470189	88.313	72.50	134.71	134.71	0.7465945207	0.4751011560	87.689	64.64	134.71	134.71	0.7539966182	0.4909000203	88.16	74.01	130.34	130.34
													Fév	6.70	32.0					-34.60	124.56	124.56				0.34	105.86	105.86				-29.29	105.86	105.86				5.74	102.91	102.91
													Mars	3.40	40.0					-83.05	68.33	68.33				-23.55	55.66	55.66				-76.52	55.66	55.66				-18.05	54.49	54.49
													Avril	9.26	28.0					55.79	46.82	129.65				61.38	5.25	111.55				55.85	5.25	111.55				61.16	2.49	109.85
													Mai	22.19	28.0					72.05	96.76	193.62				77.59	18.94	173.11				70.40	18.94	173.11				75.95	13.42	179.51
													Juin	58.74	32.0					84.41	106.89	341.86				85.62	13.97	291.77				83.55	13.97	291.77				84.64	4.85	297.43
													Juillet	101.60	28.0					88.80	230.35	451.48				89.84	168.18	424.37				88.58	168.18	424.37				89.67	172.18	431.88
													Août	171.07	28.0					94.33	-38.09	467.98				94.28	-42.43	473.81				94.30	-42.43	473.81				94.26	-21.37	478.98
													Sept	186.28	24.0					95.27	36.59	582.48				95.18	59.58	592.86				95.17	59.58	592.86				95.07	65.20	603.63
													Oct	171.30	24.0					95.67	-247.57	501.34				95.79	-233.75	494.49				95.66	-233.75	494.49				95.78	-237.04	488.46
													Nov	87.44	28.0					86.95	133.92	439.00				87.24	123.93	431.10				86.89	123.93	431.10				87.20	112.36	423.34
Déc	36.24	28.0	75.72	264.47									270.57	79.40	238.48					245.49	76.48	238.48				245.49	80.19	232.28				239.62								
Robustesse (Technique du Double Echantillon)										97.781					98.051					97.801					98.071															



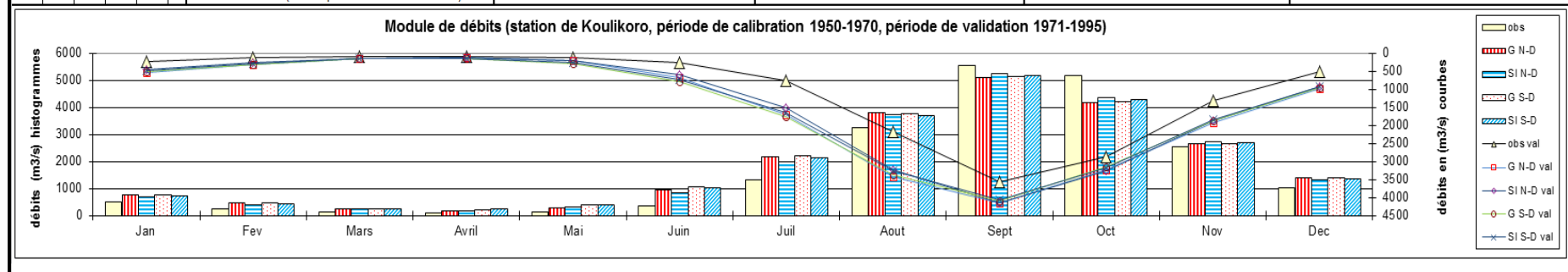
ANNEXE 5 : STATION DE KOULIKORO

Koulikoro	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	2.00	0.00	0.75	0.50	0.00	2.50	1.75	1.25	2.25	0.75
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.00	2.00	0.25	0.75	0.50	0.25	2.25	1.75	1.25	2.00	1.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		0.25	8.00	1.25	2.50	1.00	1.25	9.75	6.50	5.50	8.25	3.75
Variance	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

Koulikoro	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	2.00	0.75	0.25	2.50	0.25	2.00	0.25	0.75	0.50	2.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.00	2.00	1.00	0.00	2.50	0.50	2.00	0.25	0.75	0.50	2.50
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		0.25	8.00	3.75	0.25	10.00	1.75	8.00	1.50	2.50	1.00	11.00
Variance	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
			X2	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00

Tableau récapitulatif (Koulikoro)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	VHC moy (mm)	Station Code IIRD	période		modèle		version Non-Distribuée du modèle GR2M			version Non-Distribuée du modèle SimulHyd			version Semi-Distribuée du modèle GR2M			version Semi-Distribuée du modèle SimulHyd																			
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient de coulement	CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION												
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs				
Koulikoro	Niger	120603	73	180.4	1271500142	1950	1970	Jan	13.27	23.81	0.239	0.5406458827	0.4730515203	90.652	81.43	67.33	81.69	0.5948992779	0.5055431036	92.882	89.13	31.50	61.16	0.5990226646	0.4763684045	90.631	80.79	65.50	83.68	0.6479927459	0.4858059377	91.742	87.90	33.88	64.69			
								Fév	5.95	28.57					57.62	51.65	56.85				81.82	27.95	34.83				58.27	51.08	56.09				36.55	33.23	36.52	45.91	25.74	29.53
								Mars	3.07	28.57					41.55	31.85	35.42				55.02	23.07	27.36				36.55	33.23	36.52				-28.99	28.97	30.47	-55.53	30.03	30.86
								Avril	1.68	28.57					0.12	25.47	27.29				-40.09	27.65	28.86				-28.99	28.97	30.47				-620.22	96.63	96.63	-494.36	89.53	89.53
								Mai	2.50	28.57					-413.49	80.52	80.52				-361.80	79.29	79.29				-620.22	96.63	96.63				-25.25	179.80	179.80	18.04	141.38	141.38
								Juin	11.55	33.33					-10.92	164.46	164.46				32.53	125.71	125.71				-25.25	179.80	179.80				62.89	294.59	302.24	73.51	228.98	250.29
								Juillet	36.53	28.57					61.39	290.31	305.14				74.58	211.16	240.45				62.89	294.59	302.24				80.51	383.71	482.34	81.04	346.59	469.66
								Août	66.69	9.524					80.57	390.59	483.98				81.54	342.06	468.25				80.51	383.71	482.34				94.97	-255.40	317.93	95.51	-202.93	302.14
								Sept	123.76	14.29					94.31	-261.77	341.01				94.89	-197.08	333.24				94.97	-255.40	317.93				89.88	-454.87	569.77	91.35	-372.50	527.65
								Oct	122.37	9.524					88.95	-471.14	589.90				90.67	-374.47	546.47				89.88	-454.87	569.77				89.29	70.20	272.50	89.75	91.18	275.41
								Nov	57.50	4.762					89.29	69.43	280.09				89.29	94.91	290.55				89.29	70.20	272.50				87.05	103.20	140.39	89.75	91.18	275.41
								Déc	27.08	23.81					87.74	104.79	136.50				90.69	78.52	115.76				87.05	103.20	140.39							89.89	79.98	122.77
						Robustesse (Technique du Double Echantillon)						95.909			96.760			95.520			96.063																	
						1971	1995	Jan	4.87	44.0	0.161	0.5406458827	0.4730515203	70.499	-125.28	105.66	105.66	0.5948992779	0.5055431036	75.908	-22.28	76.46	76.46	0.5990226646	0.4763684045	71.771	-126.51	76.46	76.46	0.6479927459	0.4858059377	75.32	-36.25	80.45	80.45			
								Fév	1.88	44.0					-542.73	67.79	67.79				-223.79	47.67	47.67				-557.75	47.67	47.67				-271.87	50.82	50.82			
								Mars	1.01	44.0					-553.47	36.16	36.16				-250.17	25.68	25.68				-592.79	25.68	25.68				-330.98	28.01	28.01			
								Avril	0.70	36.0					-407.59	26.99	26.99				-396.34	26.13	26.13				-550.40	26.13	26.13				-542.65	29.45	29.45			
								Mai	1.31	40.0					-379.04	50.21	50.21				-293.27	46.88	46.88				-560.12	46.88	46.88				-419.50	53.68	53.68			
								Juin	6.55	28.0					-93.19	182.24	182.24				-3.15	129.89	132.18				-145.09	129.89	132.18				-37.44	153.12	153.12			
								Juillet	23.86	40.0					20.33	295.98	306.04				57.07	201.81	222.52				14.05	201.81	222.52				48.24	232.65	244.82			
								Août	60.75	44.0					72.85	297.13	363.78				78.08	230.53	319.22				73.76	230.53	319.22				77.61	253.20	325.49			
								Sept	95.75	40.0					92.61	54.25	321.97				92.60	69.53	317.09				93.23	69.53	317.09				93.14	78.62	300.60			
								Oct	76.17	48.0					90.75	37.52	275.01				91.66	59.05	273.54				91.66	59.05	273.54				92.08	52.68	257.33			
								Nov	38.89	44.0					77.07	96.95	257.34				78.52	79.15	245.01				78.28	79.15	245.01				79.58	77.40	241.12			
Déc	19.82	48.0	62.47	58.95	166.40			64.71	28.16	149.80					64.04	28.16	149.80				65.97	30.63	148.74															



ANNEXE 5 : STATION DE KOUROUSSA

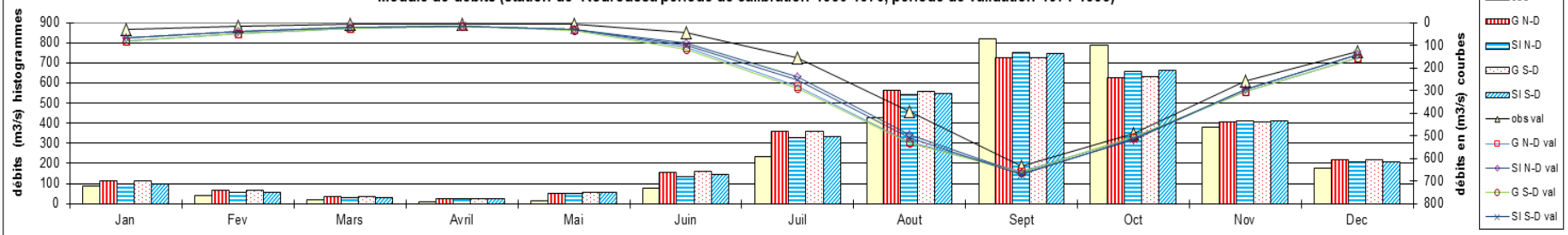
Kouroussa	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	2.00	0.00	0.75	0.50	0.00	2.50	1.75	1.25	2.25	0.75
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.00	2.00	0.25	0.75	0.50	0.25	2.25	1.75	1.25	2.00	1.00
		Calibration Nash		0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.25	7.00	0.25	3.50	3.00	0.25	8.75	7.50	4.50	8.25	3.75
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00

Kouroussa	Périodes 1950-1970 & 1971-1995	Actions modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	2.00	0.75	0.25	2.50	0.25	2.00	0.25	0.75	0.50	2.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.00	2.00	1.00	0.00	2.50	0.50	2.00	0.25	0.75	0.50	2.50
		Calibration Nash		0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		1.25	7.00	3.75	1.25	10.00	0.75	7.00	1.50	3.50	3.00	9.00
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
			X2	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Tableau récapitulatif (Kouroussa)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle		version Non-Distribuée du modèle GR2M					version Non-Distribuée du modèle SimulHyd					version Semi-Distribuée du modèle GR2M					version Semi-Distribuée du modèle SimulHyd															
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient d'écoulement	CALIBRATION			EVALUATION			X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs																								
Kouroussa	Niger	17201	15	157	1171500120	1950	1970	Jan	13.27	23.81	0.244	0.4536986499	0.4747546471	82.773	81.43	67.33	81.69	0.5085030016	0.5186682668	66.226	89.13	31.50	61.16	0.4751847072	83.591	80.79	65.50	83.68	0.5282161284	0.513375747	66.740	87.90	33.88	64.69						
								Fév	5.95	28.57					57.62	51.65	56.85				81.82	27.95	34.83			58.27	51.08	56.09				80.42	29.97	36.44						
								Mars	3.07	28.57					41.55	31.85	35.42				55.02	23.07	27.36			36.55	33.23	36.52				45.91	25.74	29.53						
								Avril	1.68	28.57					0.12	25.47	27.29				-40.09	27.65	28.86			-28.99	28.97	30.47				-55.53	30.03	30.86						
								Mai	2.50	28.57					-413.49	80.52	80.52				-361.80	79.29	79.29			-620.22	96.63	96.63				-494.36	89.53	89.53						
								Juin	11.55	39.33					-10.92	164.46	164.46				32.53	125.71	125.71			-25.25	179.80	179.80				18.04	141.38	141.38						
								Juillet	36.53	28.57					61.39	290.31	305.14				74.58	211.16	240.45			62.89	294.59	302.24				73.51	228.98	250.29						
								Août	66.69	9.524					80.57	390.59	483.98				81.54	342.06	468.25			80.51	383.71	482.34				81.04	346.59	469.66						
								Sept	123.76	14.29					94.31	-261.77	341.01				94.89	-197.08	333.24			94.97	-255.40	317.93				95.51	-202.93	302.14						
								Oct	122.37	9.524					88.95	-471.14	589.90				90.67	-374.47	546.47			89.88	-454.87	569.77				91.35	-372.50	527.65						
								Nov	57.50	4.762					89.02	69.43	280.09				89.29	94.91	290.55			89.28	70.20	272.50				89.75	91.18	275.41						
								Déc	27.08	23.81					87.74	104.79	136.50				90.69	78.52	115.76			87.05	103.20	140.39				89.89	79.98	122.77						
						VALIDATION										-125.28					-22.28					-126.51					-36.25									
						Jan										105.66					76.46					76.46					80.45									
						Fév										67.79					47.67					47.67					50.82									
						Mars										36.16					25.68					25.68					28.01									
						Avril										26.99					26.13					26.13					29.45									
						Mai										50.21					46.88					46.88					53.68									
						Juin										182.24					132.18					132.18					153.12									
						Juillet										306.04					222.52					222.52					244.82									
						Août										363.78					319.22					319.22					325.49									
						Sept										321.97					317.09					317.09					300.60									
						Oct										275.01					273.54					273.54					257.33									
						Nov										257.34					245.01					245.01					241.12									
Déc										166.40					149.80					149.80					148.74															
Robustesse (Technique du Double Echantillon)										95.617					96.539					95.511					96.386															

Module de débits (station de Kouroussa période de calibration 1950-1970, période de validation 1971-1995)



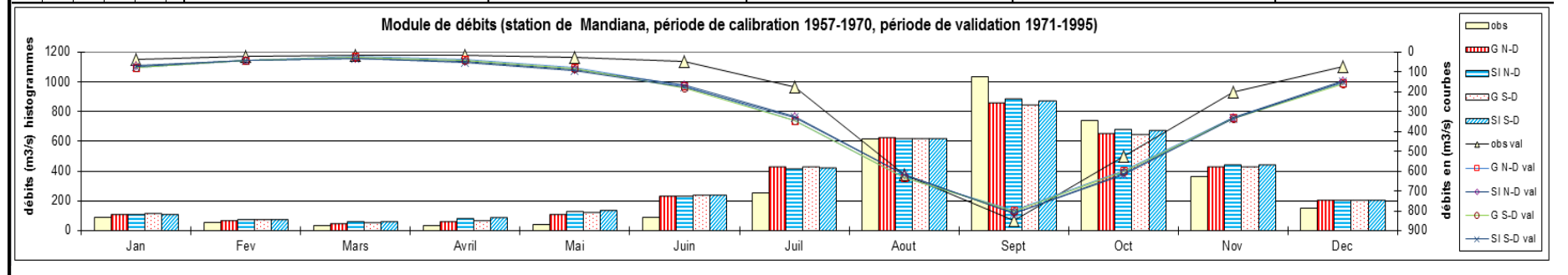
ANNEXE 5 : STATION DE MANDIANA

Mandiana	Périodes 1957-1970 & 1971-1995	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		1.75	1.25	0.00	0.00	2.50	0.00	0.50	3.00	0.00	3.00	0.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		1.00	1.75	0.00	0.25	1.75	0.00	1.25	2.50	0.50	2.75	0.25
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		3.75	8.00	0.00	0.25	9.25	0.00	2.75	11.50	0.50	11.75	0.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			X2	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		3.75	8.00	0.00	0.25	9.25	0.00	2.75	11.50	0.50	11.75	0.25

Mandiana	Périodes 1957-1970 & 1971-1995	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		1.75	1.25	0.00	1.75	1.25	0.00	1.50	1.50	0.00	2.50	0.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		1.00	1.75	0.25	1.00	2.00	0.00	2.00	0.75	0.25	1.75	1.25
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		3.75	8.00	0.25	3.75	8.25	0.00	9.50	2.25	0.25	9.25	2.75
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
			X2	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
Scores		3.75	8.00	0.25	3.75	8.25	0.00	9.50	2.25	0.25	9.25	2.75		

Tableau récapitulatif (Mandiana)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD	période		modèle		version Non-Distribuee du modèle GR2M					version Non-Distribuee du modèle SimulHyd					version Semi-Distribuee du modèle GR2M					version Semi-Distribuee du modèle SimulHyd										
						début	fin	Module de lame observée		Coefficient de coulement	CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			
								en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	
Mandiana	Sankarani	21952	16	171.3	1171501201	1957	1970	Jan	10.49	14.29	0.217	0.4892096567	0.5179847992	83.466	92.98	24.04	28.82	0.5430643251	0.549965249	83.943	96.68	15.00	19.45	0.4826920146	0.5146092279	81.942	91.57	26.15	31.17	0.5464142473	0.5437777909	82.104	95.26	18.34	22.76
								Fév	5.86	21.43					92.64	10.87	14.17				81.89	14.41	18.48				87.73	14.56	18.10				73.01	18.87	22.34
								Mars	4.25	21.43					48.49	6.10	16.70				-11.03	20.67	24.84				5.52	12.23	20.46				-68.34	26.40	29.58
								Avril	3.79	21.43					-27.47	27.52	30.52				-183.39	52.59	52.59				-88.61	35.59	36.30				-256.47	59.29	59.29
								Mai	5.16	28.57					-225.97	73.51	74.40				-354.17	93.29	93.29				-312.82	83.31	83.31				-446.25	101.59	101.59
								Juin	10.87	21.43					-139.55	172.70	172.70				-145.42	174.10	174.10				-159.83	176.85	176.85				-168.09	179.22	179.22
								Juillet	30.77	21.43					15.22	230.80	274.04				21.86	212.46	262.17				14.17	230.43	274.64				19.15	215.02	264.73
								Août	75.57	21.43					92.57	-236.13	290.66				94.93	-200.79	261.53				94.98	-6.05	153.05				94.59	-9.94	163.98
								Sept	122.15	21.43					92.57	-236.13	290.66				93.35	-200.79	261.53				91.64	-248.65	308.24				92.29	-218.91	284.16
								Oct	90.74	28.57					93.41	-116.25	184.79				94.20	-82.03	179.85				92.49	-122.75	199.22				93.15	-91.40	196.95
								Nov	42.57	21.43					83.81	80.64	158.39				81.29	101.18	174.60				82.68	79.67	165.05				80.17	99.39	181.41
								Déc	18.19	28.57					86.62	59.36	59.36				87.77	56.58	56.58				85.33	60.24	60.24				86.02	58.65	58.65
						Robustesse (Technique du Double Echantillon)										95.070					95.017					94.663					94.567				
						1971	1995	Jan	4.53	36.0	0.174	0.4892096567	0.5179847992	82.417	-8.65	73.64	73.64	0.5430643251	0.549965249	83.260	27.82	58.64	58.64	0.4826920146	0.5146092279	81.323	-20.19	58.64	58.64	0.5464142473	0.5437777909	82.01	15.13	64.02	64.02
								Fév	2.44	32.0					2.59	37.75	37.75				29.43	31.90	31.90				-15.13	31.90	31.90				10.64	36.17	36.17
								Mars	1.71	32.0					36.17	19.03	19.44				-63.85	31.09	31.09				19.13	31.09	31.09				-88.97	34.41	34.41
								Avril	1.96	32.0					-130.65	37.50	39.09				-410.96	64.79	64.79				-209.75	64.79	64.79				-506.19	72.57	72.57
								Mai	3.15	32.0					-482.39	107.09	107.09				-608.77	126.96	126.96				-596.09	126.96	126.96				-723.05	138.37	138.37
								Juin	5.59	28.0					-461.52	261.48	261.48				-406.70	250.96	250.96				-530.54	250.96	250.96				-471.42	267.25	267.25
								Juillet	21.64	36.0					13.29	329.66	329.66				32.66	288.81	288.81				13.65	288.81	288.81				31.95	292.30	292.30
								Août	75.54	40.0					92.90	27.84	248.83				93.01	-2.51	240.52				92.98	-2.51	240.52				93.09	-5.70	238.11
								Sept	100.08	36.0					94.89	-92.04	264.93				95.10	-68.18	266.03				94.58	-68.18	266.03				94.70	-64.93	281.17
								Oct	63.89	32.0					88.48	152.70	317.46				87.68	184.18	327.26				87.35	184.18	327.26				86.40	194.10	341.93
								Nov	23.50	28.0					51.00	281.23	332.71				52.54	277.91	327.51				47.73	277.91	327.51				48.79	290.26	338.58
Déc	8.97	36.0	-37.29	157.72	157.72			-13.95	141.51	141.51					-52.79	141.51	141.51				-31.21	151.04	151.04												



ANNEXE 5 : STATION D'OUARAN

Ouaran	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.75	2.00	0.25	0.00	0.75	0.25	2.00	1.50	1.50	2.75	0.25
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	1.25	0.25	1.00	0.50	0.25	2.25	1.00	2.00	1.75	1.25
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		1.25	5.25	0.50	5.00	1.25	0.50	10.25	4.50	7.50	6.50	5.50
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

Ouaran	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		1.00	2.00	0.00	0.75	2.00	0.25	2.50	0.50	0.00	1.00	2.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	1.25	1.25	0.50	2.00	0.50	1.75	0.25	1.00	0.50	2.50
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		1.50	5.25	5.25	1.25	10.00	0.75	6.25	0.75	5.00	1.50	10.50
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00

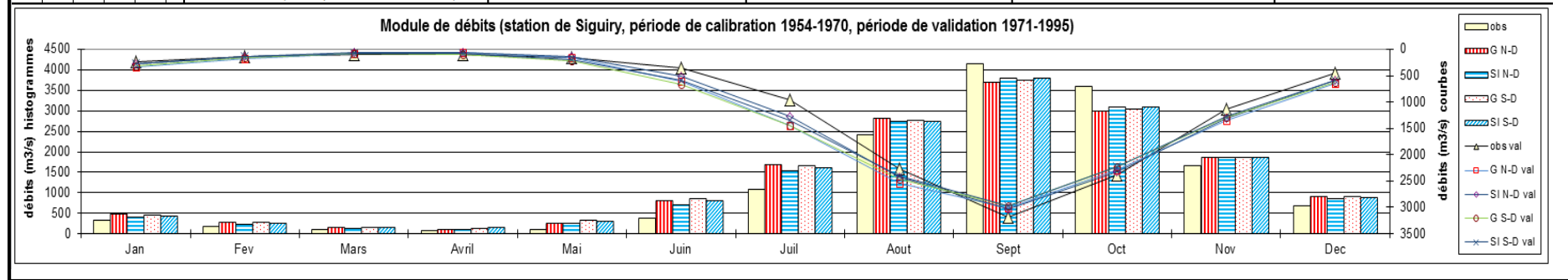
ANNEXE 5 : STATION DE SIGUIRY

Siguiiry	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	2.00	0.25	0.50	0.75	0.25	2.00	1.00	2.00	2.25	0.75
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.75	1.25	0.25	0.75	1.00	0.25	1.75	1.50	1.50	1.50	1.50
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		2.00	7.25	0.50	2.25	3.75	0.50	7.75	5.50	6.50	7.75	4.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00

Siguiiry	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.25	2.00	0.75	0.25	2.50	0.25	2.25	0.25	0.50	0.75	2.25
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.75	1.25	1.00	0.75	1.75	0.50	1.50	0.50	1.00	1.00	2.00
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		2.00	7.25	2.75	2.00	9.25	0.75	7.75	1.75	2.50	3.75	8.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00

Tableau récapitulatif (Siguiry)

Bassin versant	Cours d'eau	Superficie (km ²)	Nombre de maille	WHC moy (mm)	Station Code IRD		période		modèle		version Non-Distribuee du modèle GR2M						version Non-Distribuee du modèle SimulHyd						version Semi-Distribuee du modèle GR2M						version Semi-Distribuee du modèle SimulHyd									
					début	fin	Module de lame observée		Coefficient de coulement	CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION			CALIBRATION			EVALUATION							
							en mm	% lacune		X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs	X1	X2	Nash	Nash G	Bilan	Bilan abs					
					1171500130		1954-1970		45.65		0.287		90.251			0.6122260175			92.538			0.6340215989			0.5106425450			90.969			0.6725670392			0.5330182088				
Tiguiry (Siguiry)	Niger	71064	50	177.1	1171500130	1954	1970	Jan	12.56	17.65	0.287	0.503063599	90.251	82.59	63.47	63.47	0.6122260175	0.5412772853	92.538	93.35	32.92	35.68	0.6340215989	0.5106425450	90.969	85.01	58.61	58.61	0.6725670392	0.5330182088	92.071	91.54	41.06	41.06				
								Fév	6.18	23.53				77.72	34.08	34.08				92.71	16.84	17.82				80.03	32.23	32.23				86.41	14.03	14.59	86.81	12.13	14.01	
								Mars	4.04	23.53				89.71	9.55	14.11				91.71	4.24	11.91				86.41	14.03	14.59				63.37	19.09	21.01	57.46	21.56	22.04	
								Avril	3.03	23.53				87.14	5.42	11.77				86.16	6.83	12.39				63.37	19.09	21.01				47.86	230.90	230.90	19.65	204.95	204.95	
								Mai	4.31	17.65				-101.43	69.86	69.86				-46.98	59.85	59.98				255.66	101.75	101.75				-197.52	94.03	94.03	67.51	289.76	289.76	
								Juin	13.91	17.65				-26.67	206.81	206.81				19.97	156.96	164.05				-47.86	230.90	230.90				-19.65	204.95	204.95	97.97	-194.67	220.58	
								Juillet	40.47	11.76				56.88	339.32	339.32				72.15	254.41	259.82				59.92	330.33	330.33				67.51	289.76	289.76	96.56	171.79	199.06	
								Août	91.01	11.76				97.19	-251.61	271.79				97.86	-192.98	237.70				97.15	230.90	230.90				97.97	-194.67	220.58	99.79	-194.67	220.58	
								Sept	151.06	11.76				96.01	213.90	220.45				96.78	183.15	196.26				96.15	188.64	213.66				97.97	-194.67	220.58	96.56	171.79	199.06	
								Oct	135.16	11.76				97.19	-251.61	271.79				97.86	-192.98	237.70				97.15	230.90	230.90				97.97	-194.67	220.58	99.79	-194.67	220.58	
								Nov	60.74	11.76				93.45	-346.64	384.39				94.60	-290.44	335.75				94.27	-317.35	350.25				94.76	-290.15	325.53	94.76	-290.15	325.53	
								Déc	25.28	11.76				93.64	94.81	178.30				93.31	99.03	185.00				93.97	97.44	172.29				93.78	99.11	176.51	93.78	99.11	176.51	
						Robustesse (Technique du Double Echantillon)											95.676							96.319							95.632							96.024
						1971	1995	Jan	8.72	32.0	0.246	0.503063599	78.880	47.21	59.23	117.22	0.6122260175	0.5412772853	80.574	59.66	25.72	101.38	0.6340215989	0.5106425450	79.253	52.38	25.72	101.38	0.6725670392	0.5330182088	80.32	58.99	27.98	102.58				
								Fév	4.74	32.0				48.99	23.06	63.04				58.12	1.18	52.35				53.06	1.18	52.35				57.82	3.67	53.58				
								Mars	3.93	36.0				52.86	-12.21	44.71				47.60	-22.54	42.62				51.75	-22.54	42.62				49.08	-19.12	43.61				
								Avril	3.46	36.0				48.10	-16.18	40.62				45.34	-19.07	40.20				44.90	-19.07	40.20				46.01	-4.77	41.75				
								Mai	5.72	36.0				45.35	4.40	77.67				50.35	-7.20	72.33				29.47	-7.20	72.33				40.48	24.54	81.79				
								Juin	12.87	40.0				23.69	138.40	161.91				53.03	81.72	134.42				0.88	81.72	134.42				25.98	132.16	163.03				
								Juillet	36.38	36.0				62.74	287.56	301.64				77.23	183.14	223.45				62.47	183.14	223.45				71.02	229.85	257.97				
								Août	85.75	32.0				86.95	165.58	357.70				87.86	95.55	345.71				88.38	95.55	345.71				88.74	85.02	328.05				
								Sept	116.07	36.0				88.16	-95.38	433.83				88.04	-85.27	436.68				88.46	-85.27	436.68				88.41	-127.87	432.95				
								Oct	90.19	36.0				88.21	-58.70	342.16				88.00	-42.46	343.36				87.56	-42.46	343.36				87.54	-96.81	356.56				
								Nov	41.46	40.0				81.81	113.92	236.38				83.58	93.40	227.27				83.11	93.40	227.27				84.16	73.37	224.49				
Déc	17.20	36.0	60.13	115.53	164.28			70.57	77.07	146.61				65.61	77.07	146.61				71.29	74.38	145.09																
Robustesse (Technique du Double Echantillon)											95.676							96.319							95.632							96.024						



ANNEXE 5 : STATION DE TINKISSO

Tinkisso	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		0.75	1.75	0.50	0.00	0.75	0.50	1.75	2.00	1.00	2.50	0.50
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	1.75	0.00	0.75	0.50	0.00	2.50	1.75	1.25	2.25	0.75
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Validation Nash		0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00
		Scores		2.25	5.50	0.50	3.75	2.25	0.50	9.25	6.75	5.25	7.75	4.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
Scores		2.75	5.50	3.75	2.25	9.25	0.50	5.75	2.50	3.75	2.75	9.25		

Tinkisso	Périodes 1971-1980 & 1981-1999	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		1.25	1.75	0.00	0.75	1.75	0.50	2.00	1.00	0.00	1.25	1.75
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		0.50	1.75	0.75	0.50	2.50	0.00	1.75	0.50	0.75	0.50	2.50
		Calibration Nash		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Validation Nash		0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
		Robustesse TDE		0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00
		Scores		2.75	5.50	3.75	2.25	9.25	0.50	5.75	2.50	3.75	2.75	9.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
			X2	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
			Nash (val.)	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
Scores		2.75	5.50	3.75	2.25	9.25	0.50	5.75	2.50	3.75	2.75	9.25		

ANNEXE 5 : SEIZE BASSINS VERSANTS COMME UN ENSEMBLE

16 Bassins	Périodes: avant 1970 et après 1970	Actions / modèles		(4)-modèles-compétitions				(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions		(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		10.13	25.13	3.88	8.88	15.42	3.92	28.67	29.75	18.25	36.00	12.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		10.13	25.38	2.63	9.88	15.92	2.92	29.17	31.00	17.00	34.75	13.25
		Calibration Nash		1.00	12.00	0.00	3.00	5.00	0.00	11.00	10.00	6.00	13.00	3.00
		Validation Nash		0.00	11.00	0.00	5.00	4.00	0.00	12.00	9.00	7.00	11.00	5.00
		Robustesse TDE		2.00	13.00	0.00	1.00	3.00	0.00	13.00	15.00	1.00	15.00	1.00
		Scores		34.25	104.50	12.50	40.75	61.33	12.83	117.83	125.75	66.25	138.75	53.25
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	1.00	9.00	0.00	6.00	1.00	0.00	15.00	11.00	5.00	10.00	6.00
			X2	5.00	3.00	5.00	3.00	8.00	5.00	3.00	9.00	7.00	9.00	7.00
			Nash (val.)	5.00	6.00	1.00	4.00	9.00	1.00	6.00	11.00	5.00	10.00	6.00
Scores		40.08	105.08	46.83	34.83	141.33	15.83	122.83	27.83	41.33	67.50	124.50		

16 Bassins	Périodes: avant 1970 et après 1970	Actions / modèles		(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(3)-modèles-compétitions			(2)-modèles-compétitions	
				GR2M N-D	SimulHyd N-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd N-D	GR2M S-D	SimulHyd S-D	GR2M N-D	SimulHyd S-D
Biais		Evaluation Nash-Garrick (Calibration)		12.42	25.67	9.92	10.17	32.42	5.42	29.17	9.92	8.92	18.00	30.00
		Evaluation Nash-Garrick (Validation)		10.67	25.42	11.92	10.67	32.92	4.42	29.67	7.92	10.42	16.50	31.50
		Calibration Nash		1.00	12.00	3.00	1.00	15.00	0.00	12.00	1.00	3.00	5.00	11.00
		Validation Nash		0.00	11.00	5.00	0.00	16.00	0.00	11.00	0.00	5.00	4.00	12.00
		Robustesse TDE		2.00	13.00	1.00	2.00	14.00	0.00	15.00	0.00	1.00	3.00	13.00
		Scores		40.08	105.08	46.83	34.83	141.33	15.83	122.83	27.83	41.33	67.50	124.50
Variance		Sensibilité aux échantillons	X1	1.00	9.00	6.00	1.00	15.00	0.00	10.00	0.00	6.00	1.00	15.00
			X2	8.00	3.00	5.00	5.00	6.00	5.00	6.00	7.00	3.00	11.00	5.00
			Nash (val.)	5.00	6.00	5.00	5.00	10.00	1.00	10.00	2.00	4.00	9.00	7.00
Scores		40.08	105.08	46.83	34.83	141.33	15.83	122.83	27.83	41.33	67.50	124.50		

ANNEXE 5 : INTERCOMPARAISON (STATISTIQUE SUR LES BASSINS)

CLASSEMENT PAR BASSIN (A)		SIMULHYD ND	SIMULHYD SD	GR2M ND	GR2M SD
BANANKORO	SCORE	1er	2e	3e	4e
BARANAMA	SCORE	1er	2e	3e	4e
BARO	SCORE	1er	2e	3e	4e
DIALAKORO	SCORE	1er	2e	4e	3e
FARANAH	SCORE	1er	2e	3e	4e
GOUALA	SCORE	1er	3e	2e	4e
IRADOUGOU	SCORE	1er	4e	2e	3e
KANKAN	SCORE	1er	2e	3e	4e
KEROUANE	SCORE	1er	3e	2e	4e
KISIDOUGOU	SCORE	2e	1er	4e	3e
KOULIKORO	SCORE	1er	2e	3e	4e
KOUROUSSA	SCORE	1er	2e	3e	4e
MANDIANA	SCORE	1er	3e	2e	4e
OUARAN	SCORE	1er	2e	4e	3e
SIGUIRY	SCORE	1er	2e	4e	3e
TINKISSO	SCORE	1er	2e	3e	4e
NOMBRE DE FOIS	1er	15	1	0	0
	2e	1	11	4	0
	3e	0	3	8	5
	4e	0	1	4	11
NOMBRE DE FOIS	Deux 1er	16	12	4	0
	Deux 2e	0	4	12	16

CLASSEMENT PAR BASSIN (B)		SIMULHYD ND	SIMULHYD SD	GR2M ND	GR2M SD
BANANKORO	INSENSIBILITE	1er	2e	3e	4e
BARANAMA	INSENSIBILITE	1er	2e	3e	4e
BARO	INSENSIBILITE	2e	4e	1er	3e
DIALAKORO	INSENSIBILITE	1er	2e	3e	4e
FARANAH	INSENSIBILITE	1er	2e	3e	4e
GOUALA	INSENSIBILITE	2e	4e	1er	3e
IRADOUGOU	INSENSIBILITE	1er	2e	3e	4e
KANKAN	INSENSIBILITE	1er	4e	3e	2e
KEROUANE	INSENSIBILITE	2e	1er	4e	3e
KISIDOUGOU	INSENSIBILITE	3e	1er	2e	4e
KOULIKORO	INSENSIBILITE	2e	1er	4e	3e
KOUROUSSA	INSENSIBILITE	1er	3e	2e	4e
MANDIANA	INSENSIBILITE	1er	3e	2e	4e
OUARAN	INSENSIBILITE	2e	1er	4e	3e
SIGUIRY	INSENSIBILITE	2e	1er	3e	4e
TINKISSO	INSENSIBILITE	2e	1er	4e	3e
NOMBRE DE FOIS	1er	8	6	2	0
	2e	7	5	3	1
	3e	1	2	7	6
	4e	0	3	4	9
NOMBRE DE FOIS	Deux 1er	15	11	5	1
	Deux 2e	1	5	11	15

Annexes 6 : Interchangeabilité de jeux de paramètres entre versions de modèle

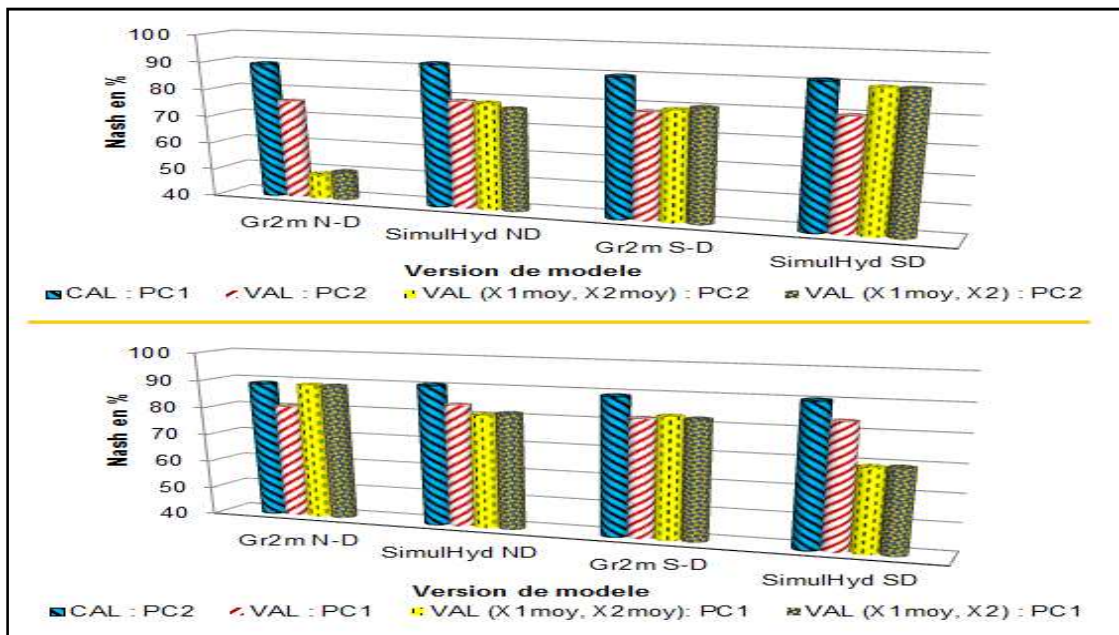
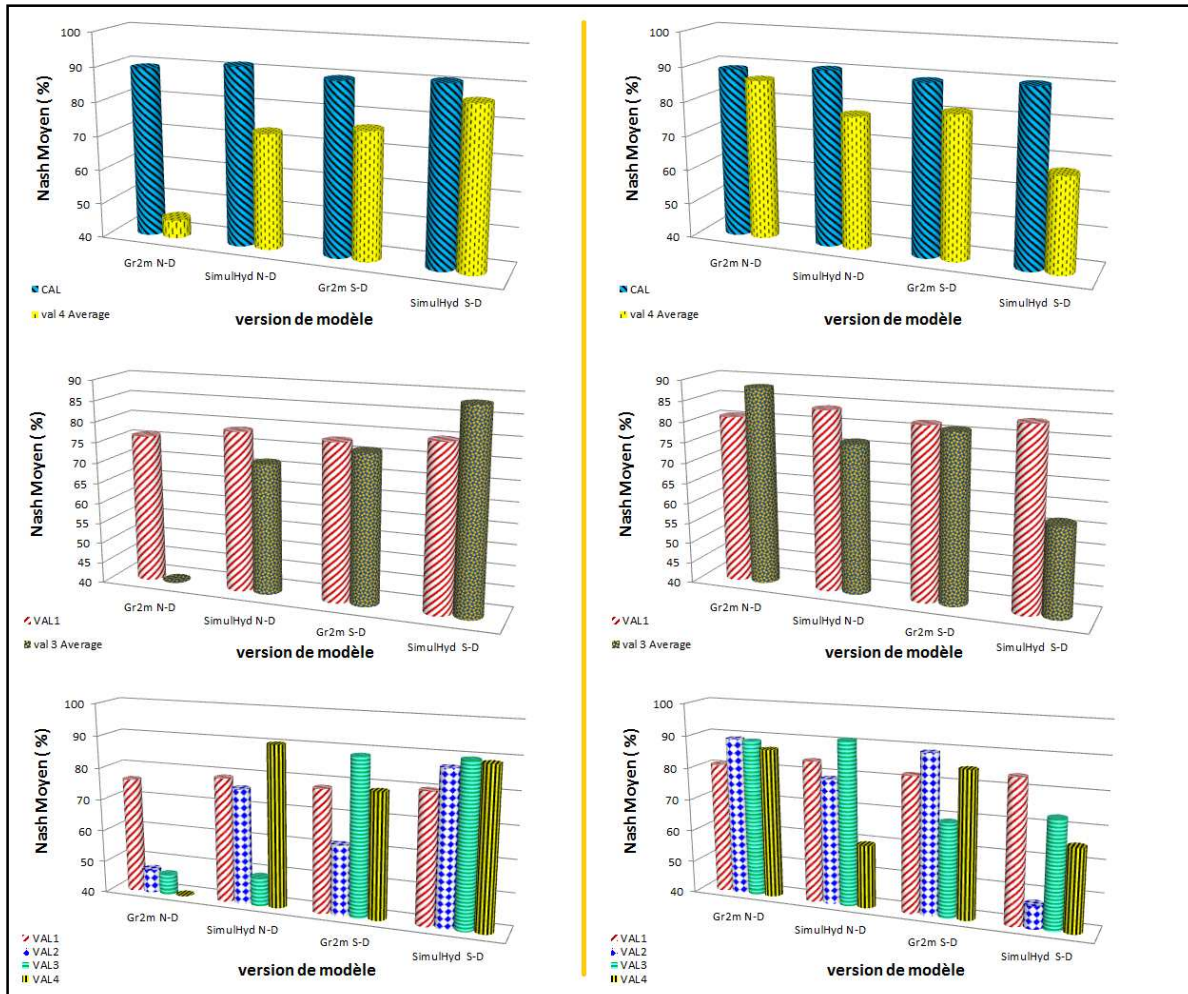
ANNEXE 6 : STRUCTURE DES RESULTATS

<p>Calibration sur la période PC1 (idéalement avant 1970) et validation sur la période PC2 (idéalement après 1970)</p> <p>Cf. Tableau 3-1</p>	<p>Calibration sur la période PC2 (idéalement après 1970) et validation sur la période PC1 (idéalement avant 1970)</p> <p>Cf. Tableau 3-1</p>
--	--

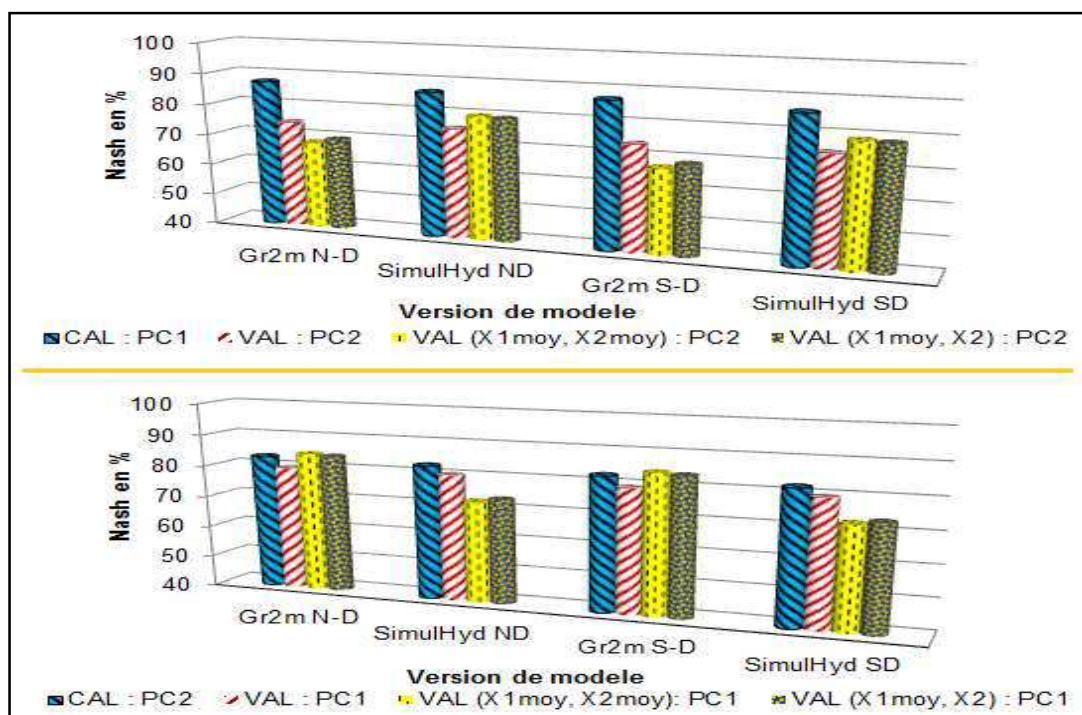
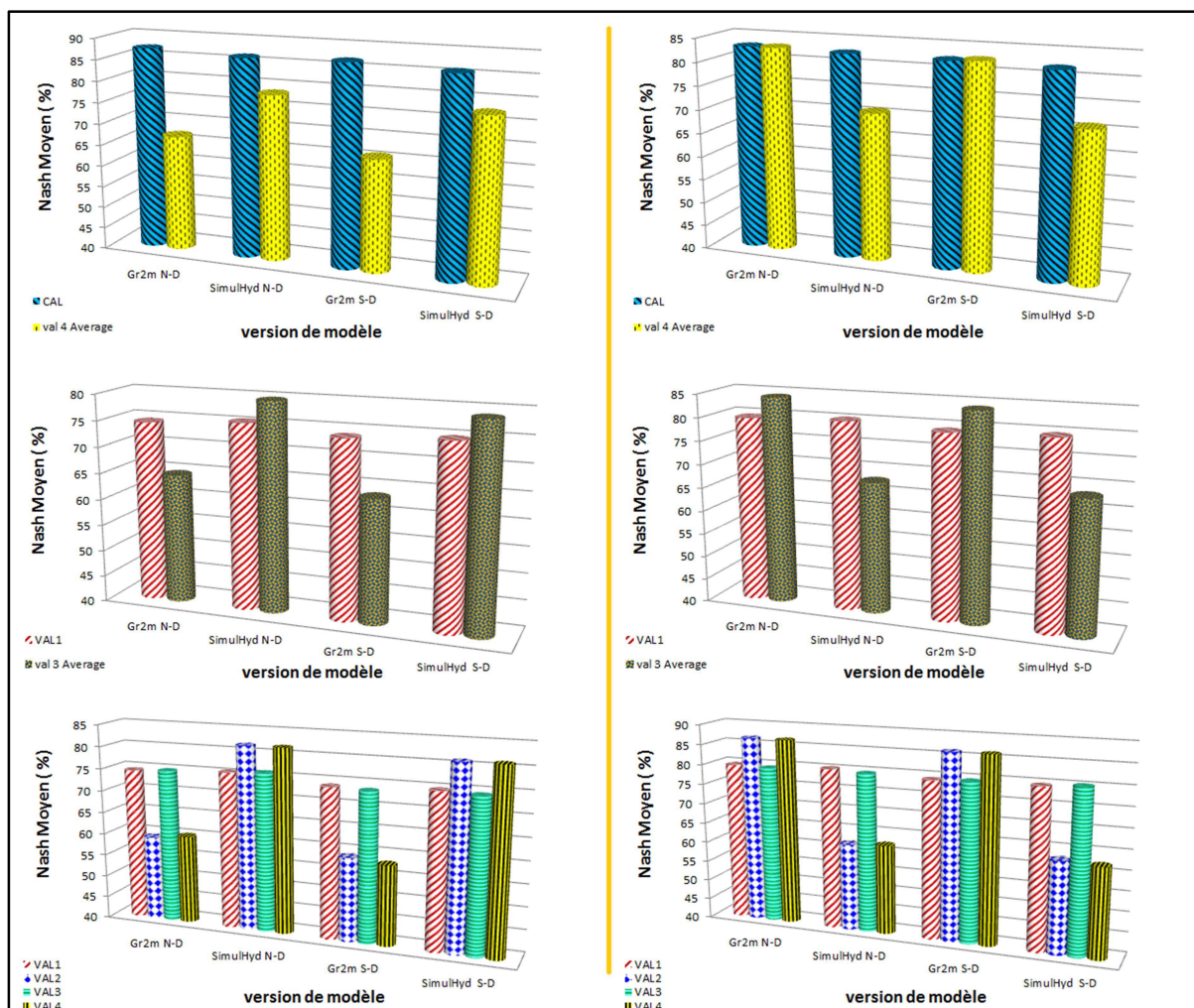
Calibration sur la période PC1 (idéalement avant 1970) ; validation sur la période PC2 (idéalement après 1970) ; validation sur la période PC2 avec le couple composé de X1 moyenné des quatre versions de modèle et de X2 moyenné des quatre versions de modèle ; et validation sur la période PC2 avec le couple composé de X1 moyenné des quatre versions de modèle et de X2 de la version demodèleconsidérée. **(Cf. Tableau 3-1)**

Calibration sur la période PC2 (idéalement après 1970) ; validation sur la période PC1 (idéalement avant 1970) ; validation sur la période PC1 avec le couple composé de X1 moyenné des quatre versions de modèle et de X2 moyenné des quatre versions de modèle ; et validation sur la période PC1 avec le couple composé de X1 moyenné des quatre versions de modèle et de X2 de la version demodèleconsidérée. **(Cf. Tableau 3-1)**

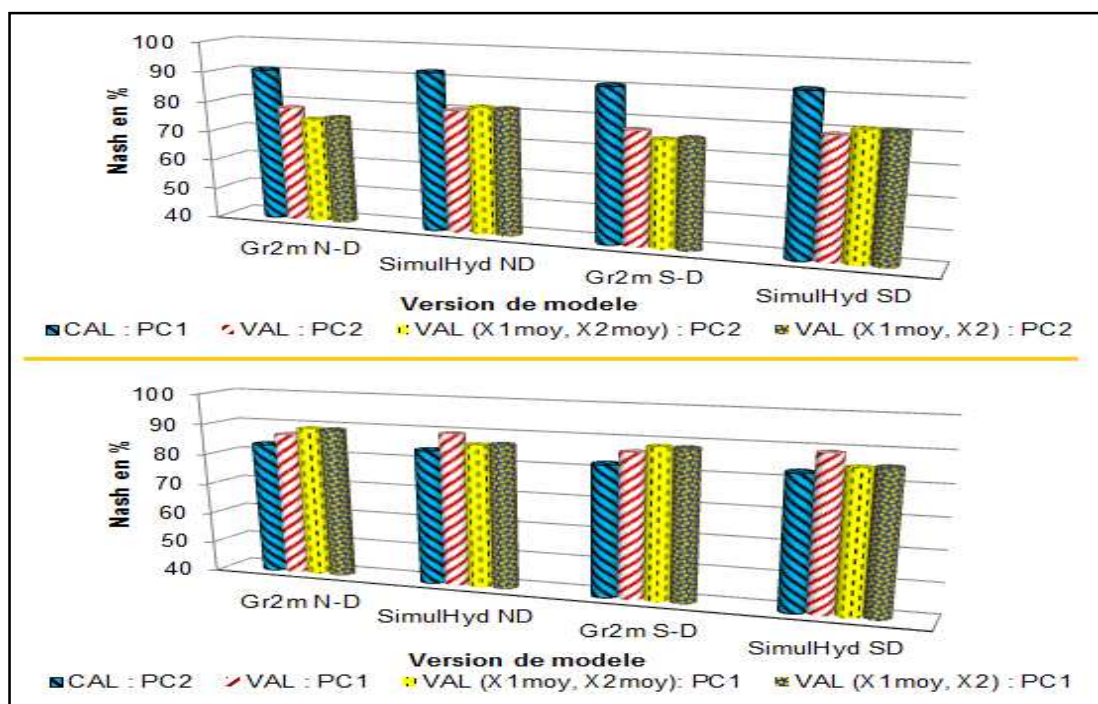
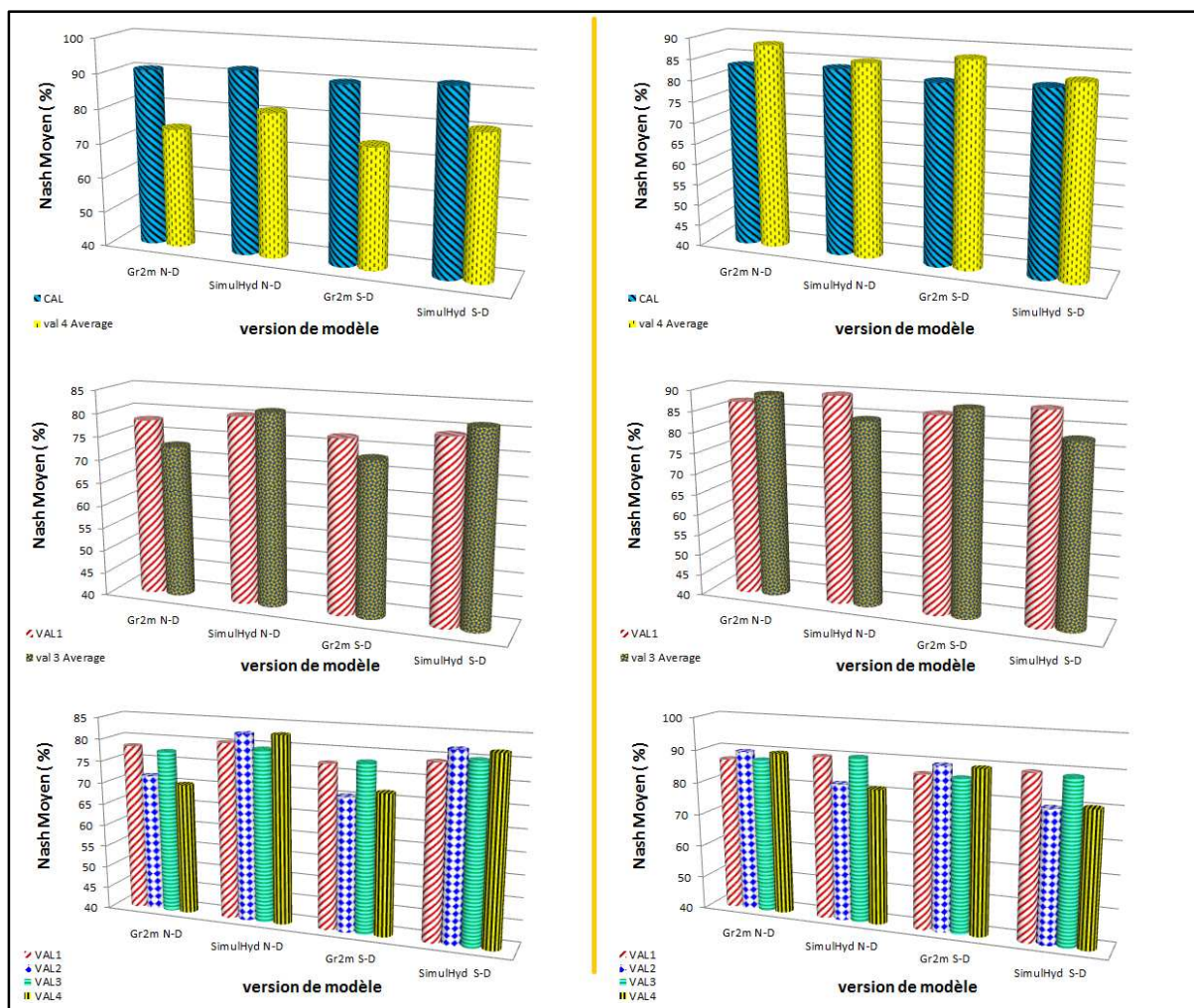
ANNEXE 6 : STATION DE BANANKORO



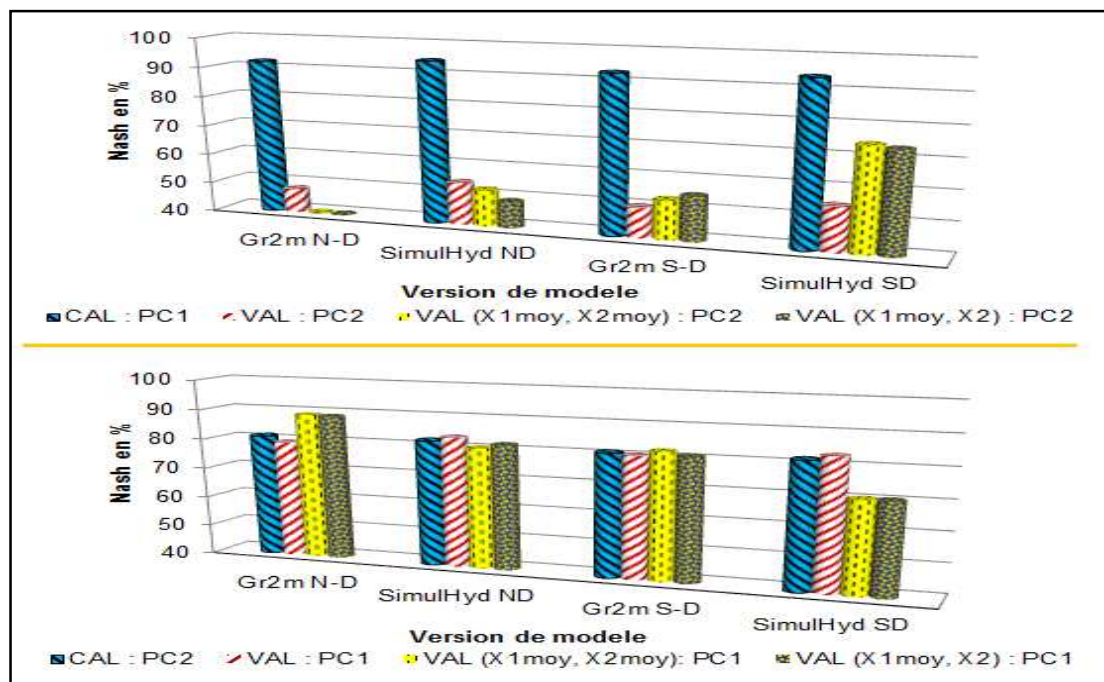
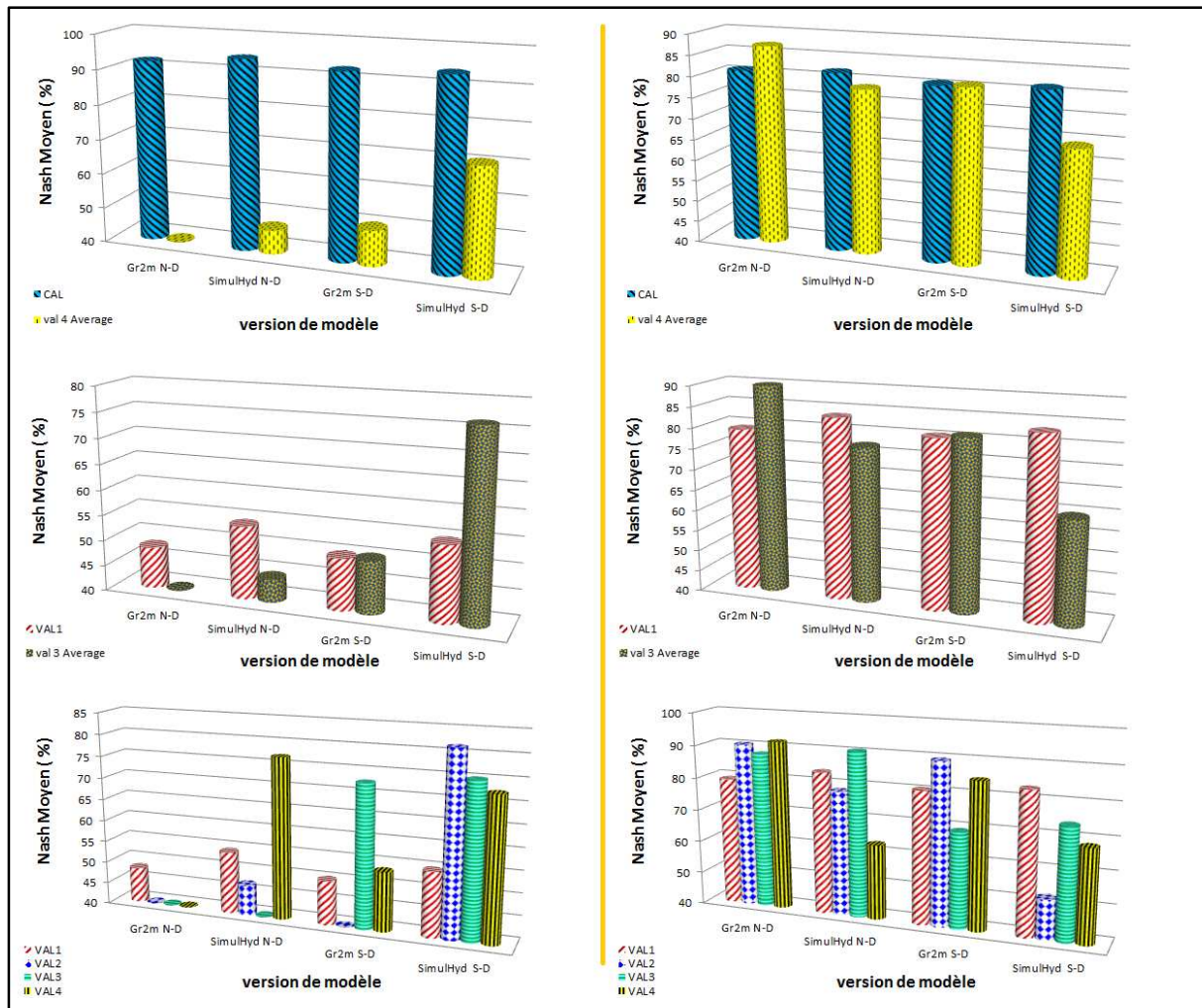
ANNEXE 6 : STATION DE BARANAMA



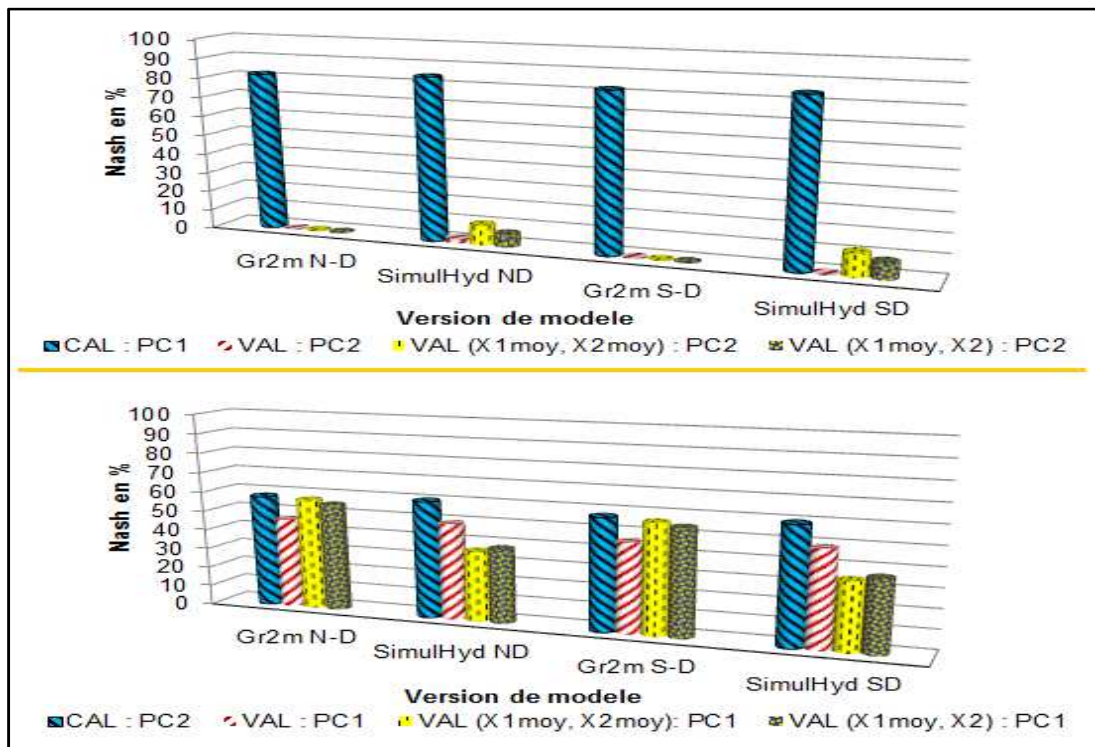
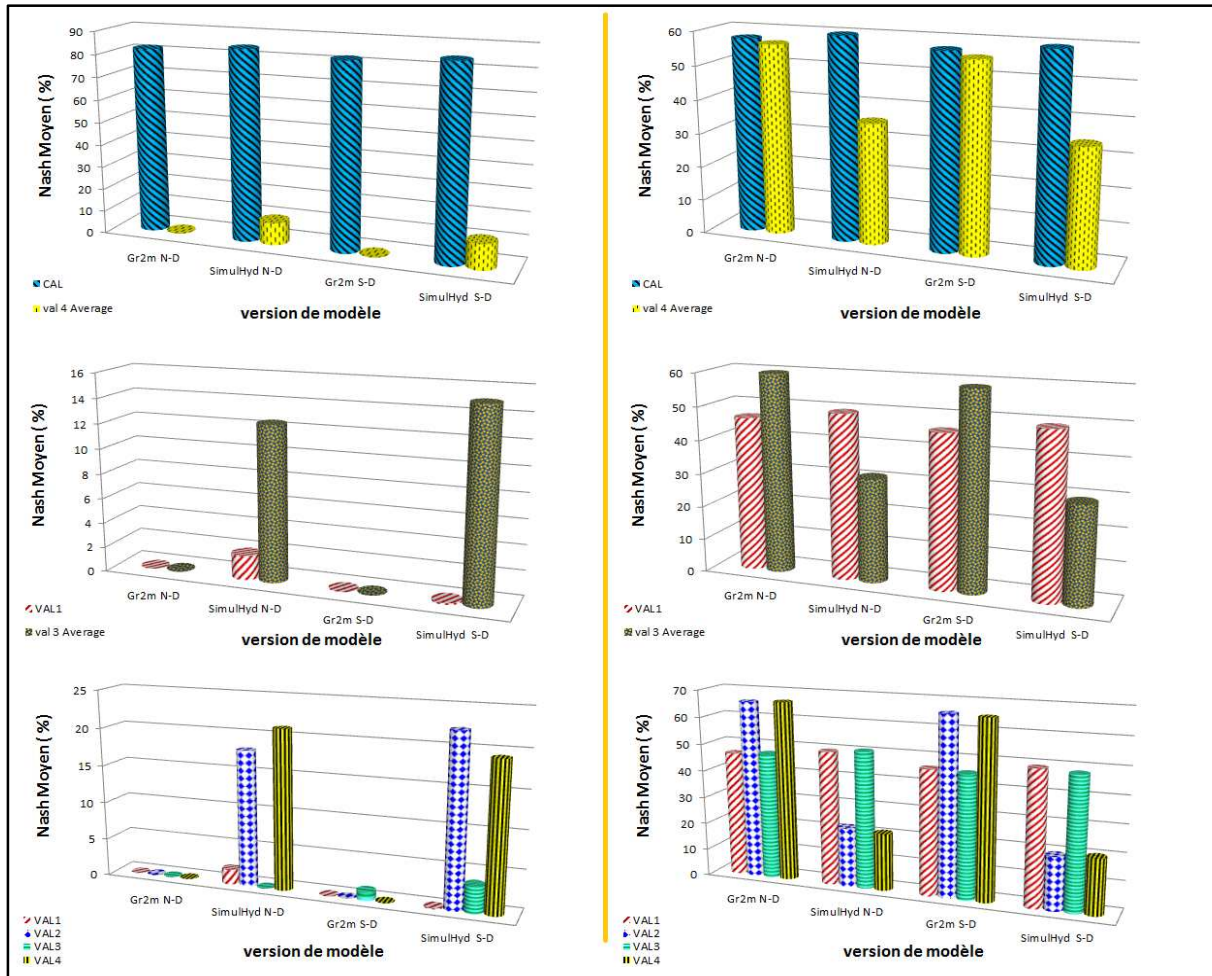
ANNEXE 6 : STATION DE BARO



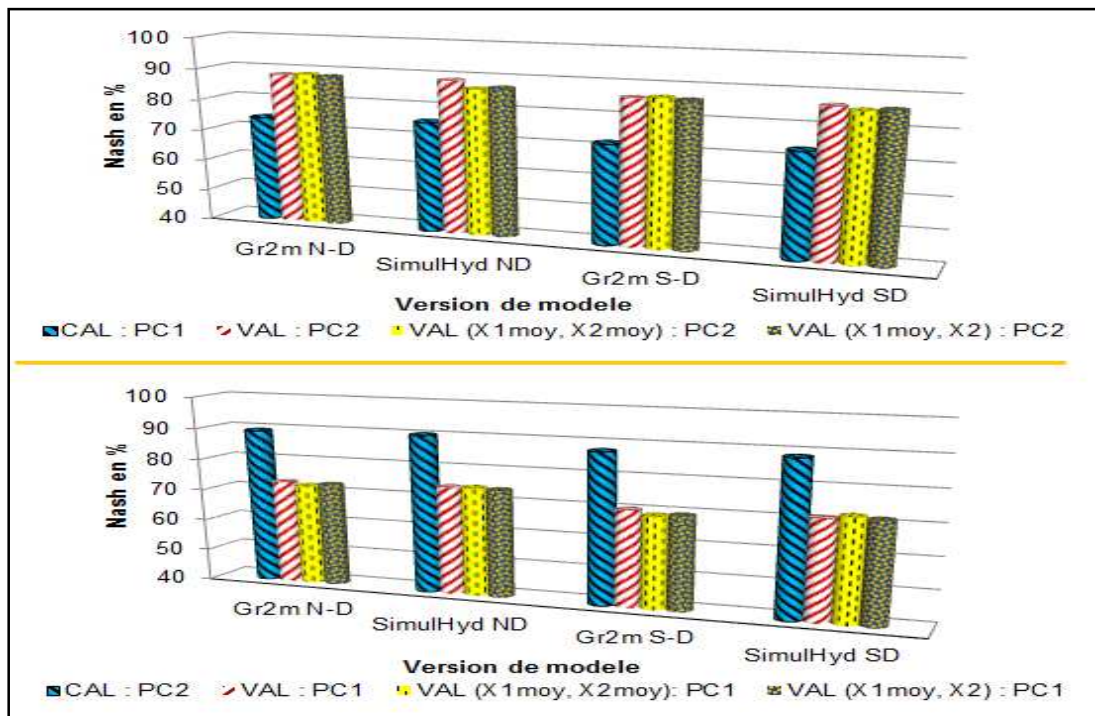
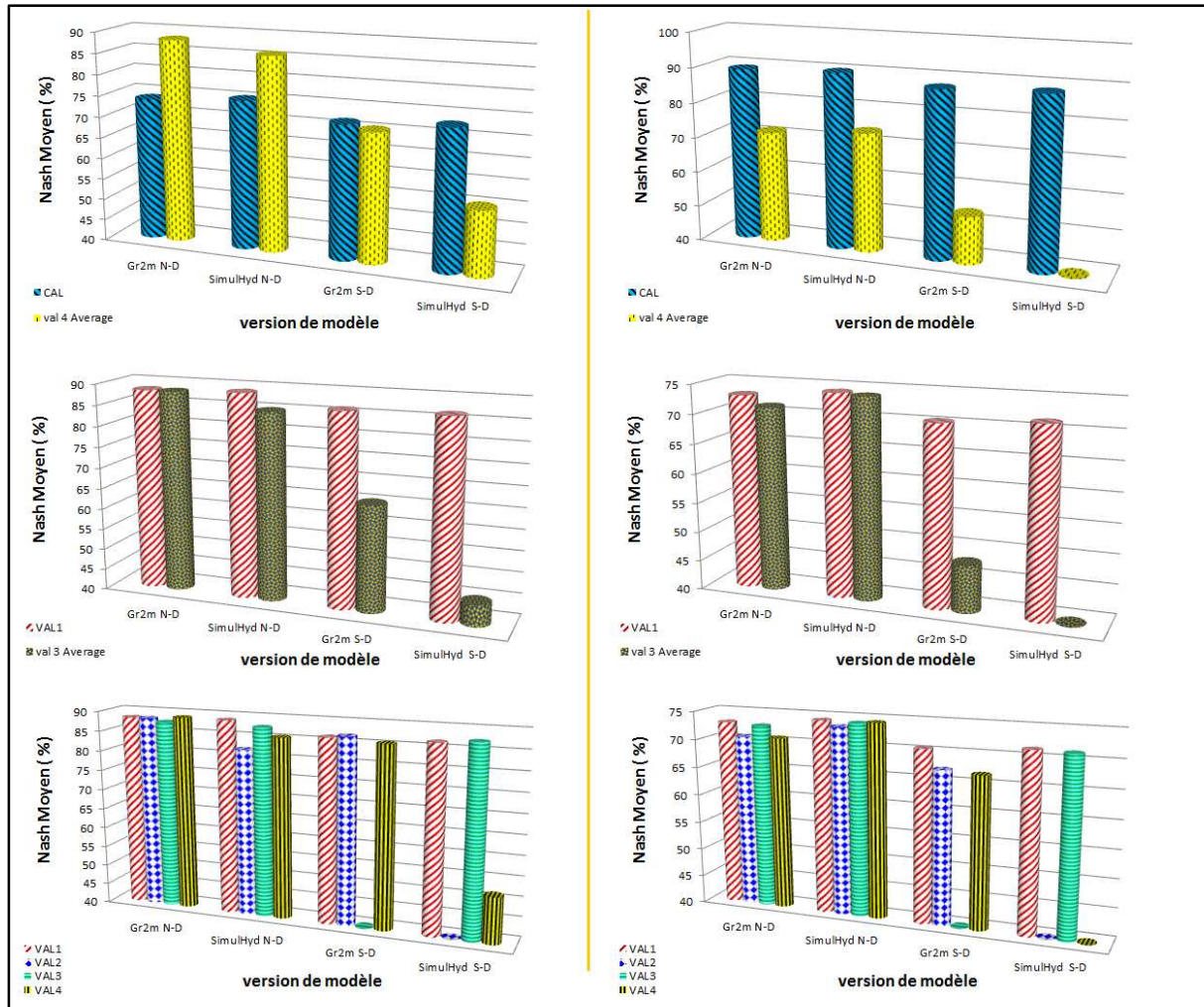
ANNEXE 6 : STATION DE DIALAKORO



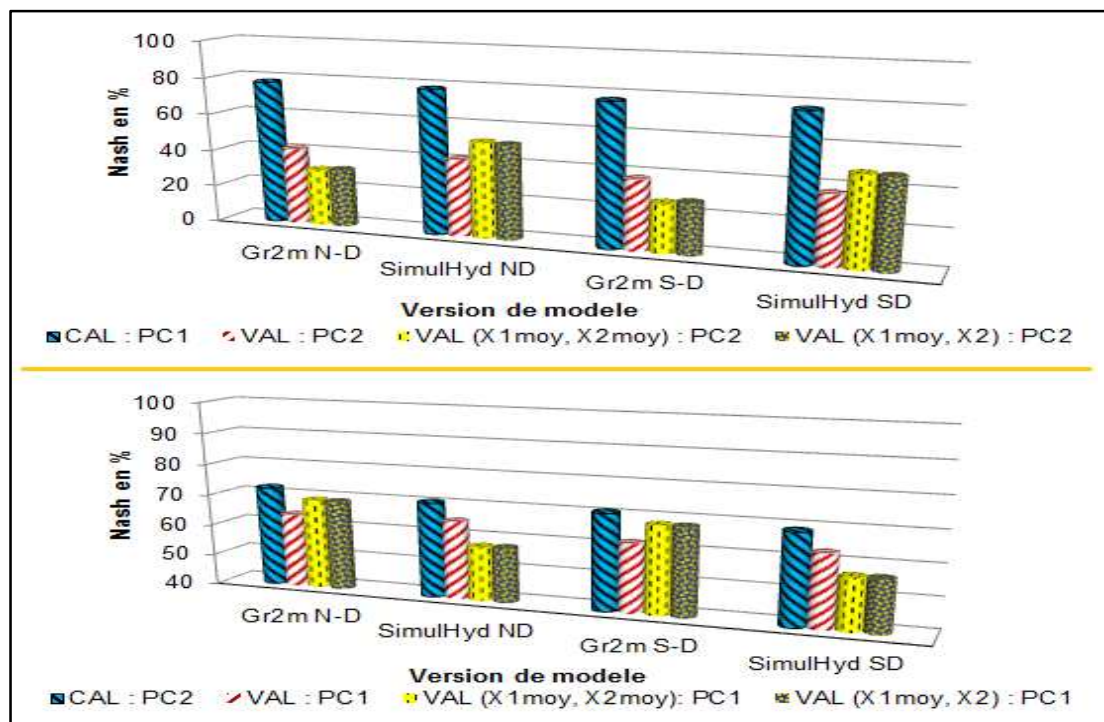
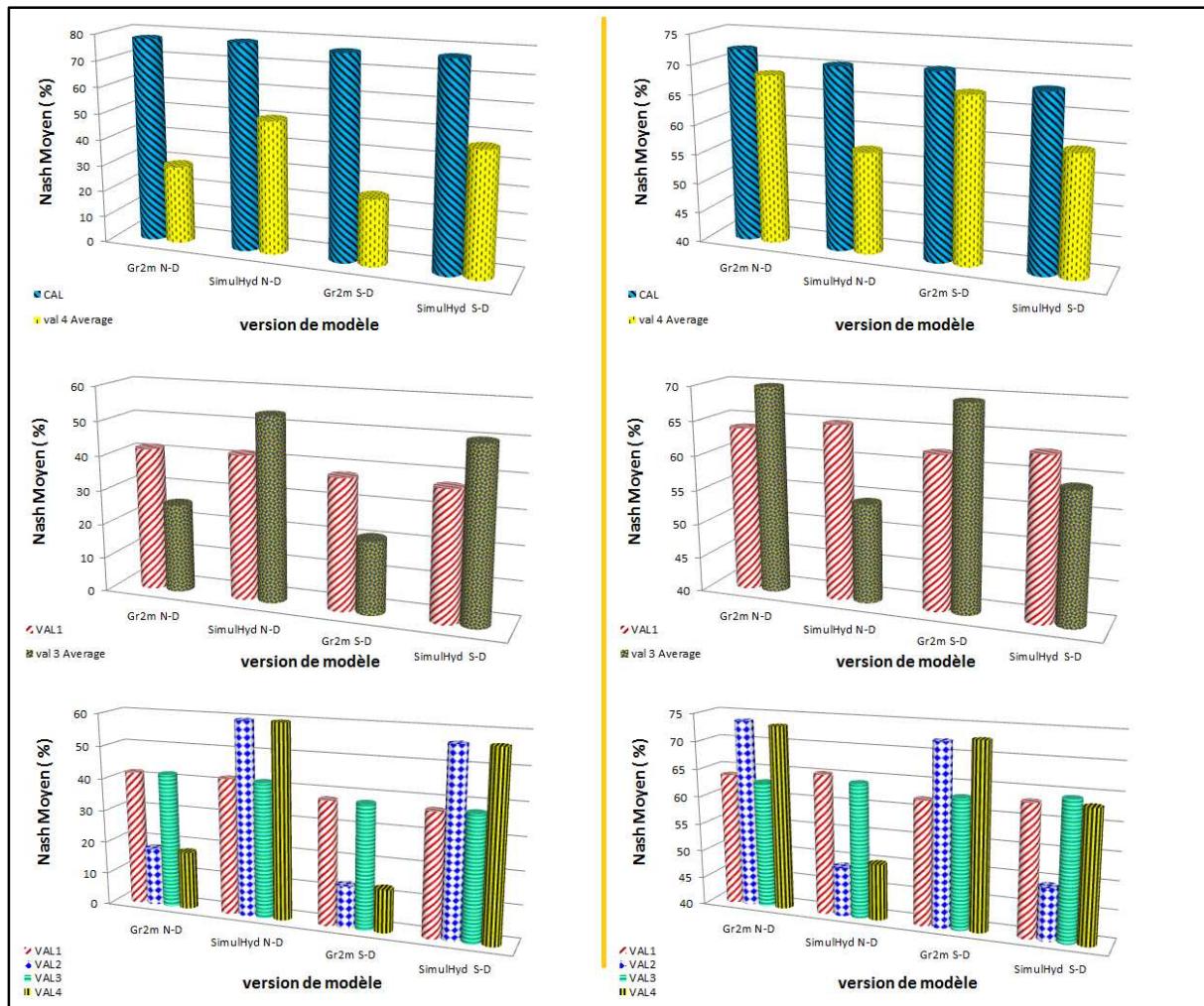
ANNEXE 6 : STATION DE FARANAH



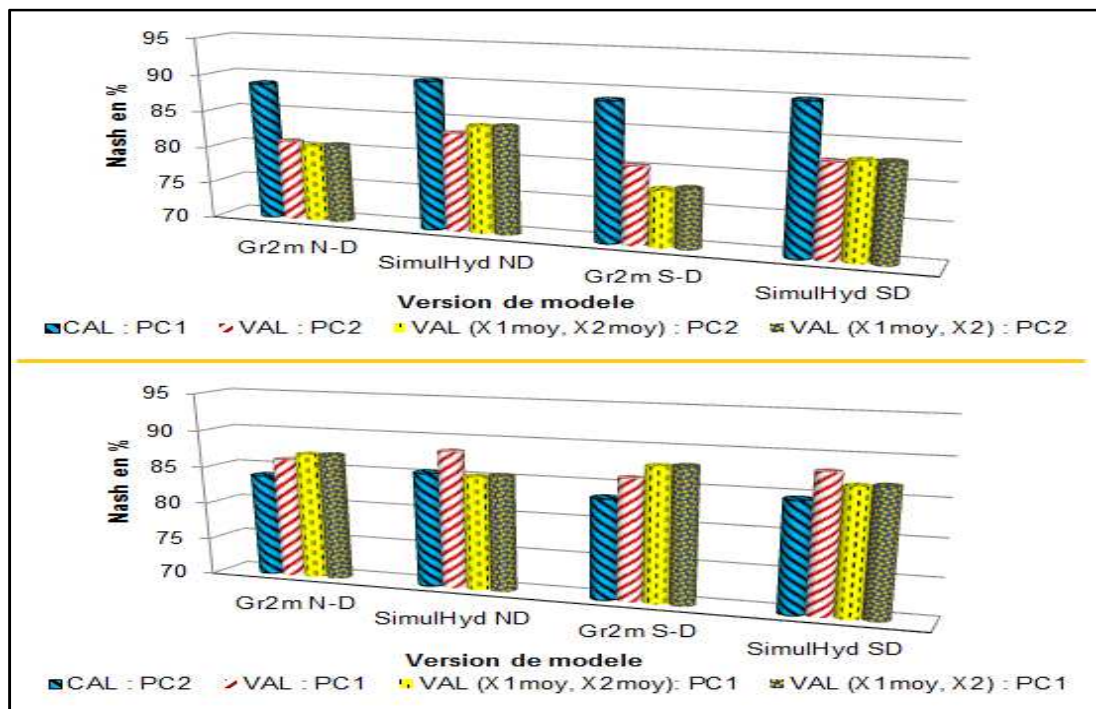
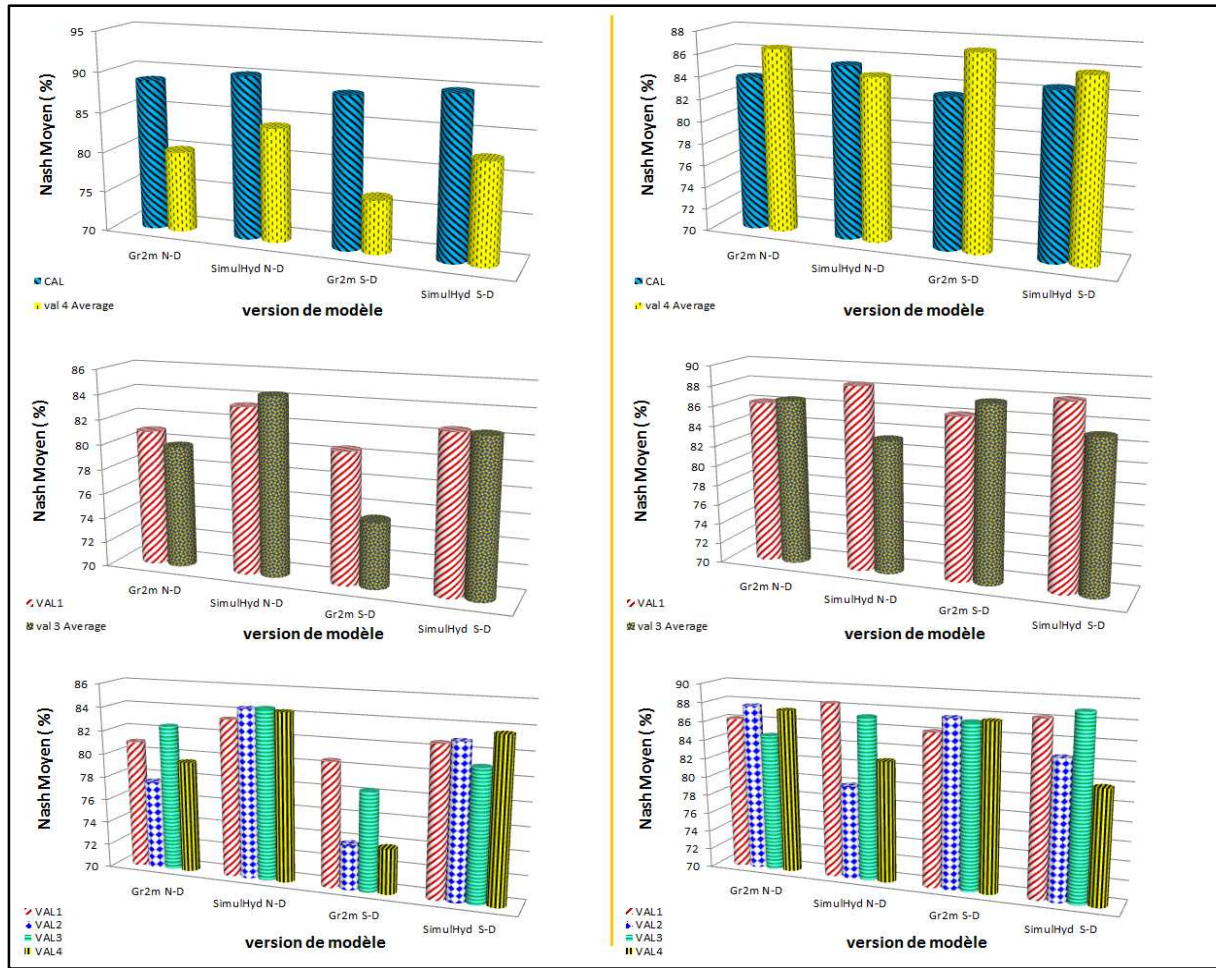
ANNEXE 6 : STATION DE GOUALA



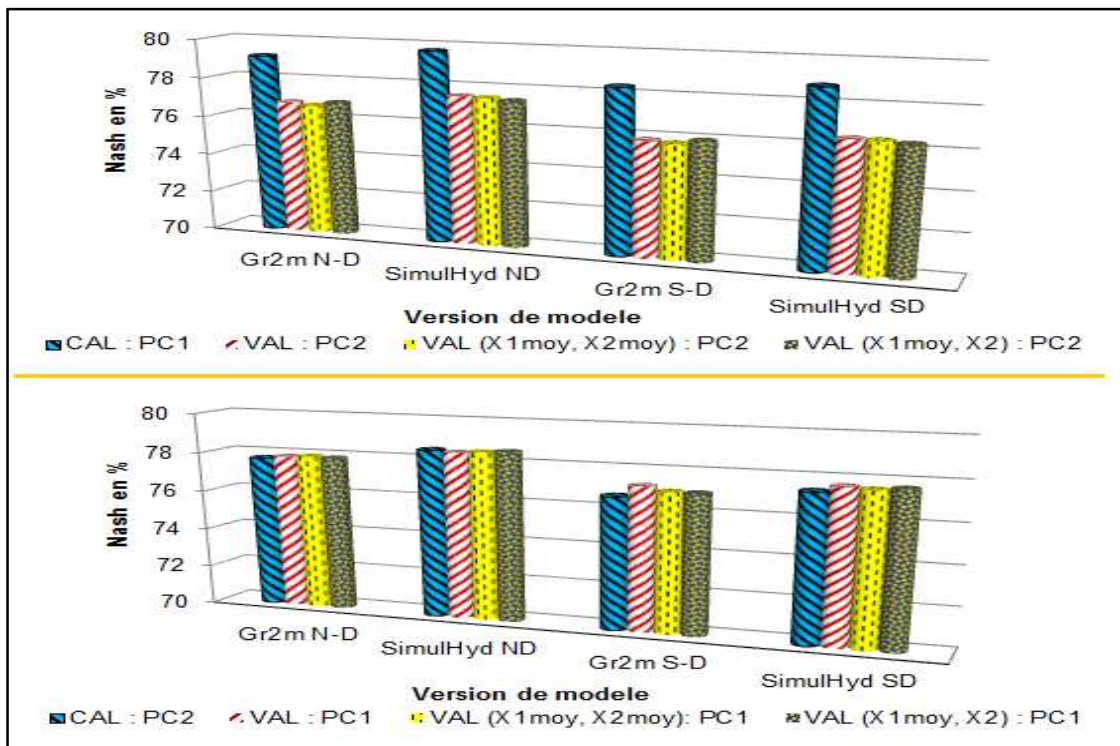
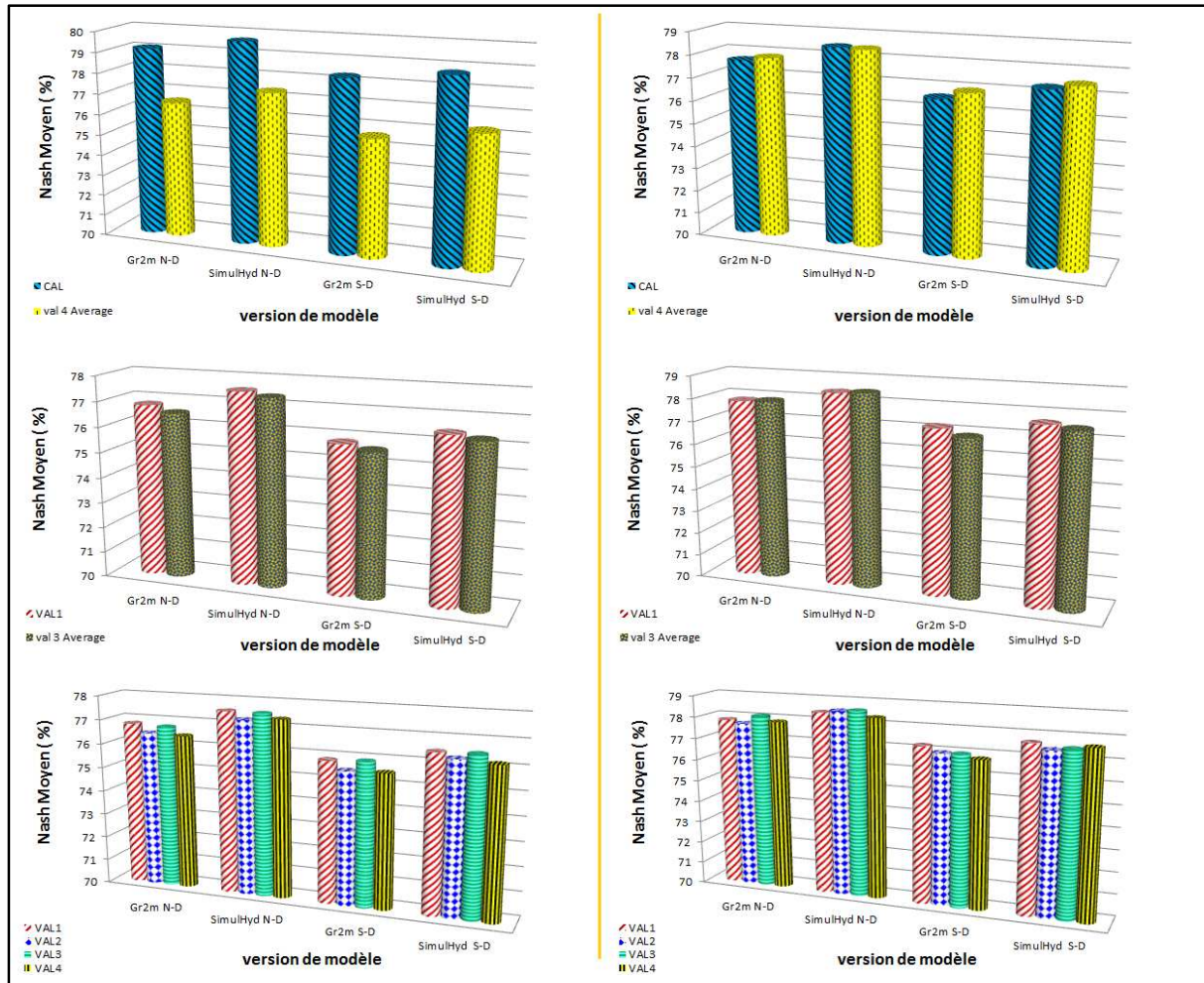
ANNEXE 6 : STATION D'IRADOUGOU



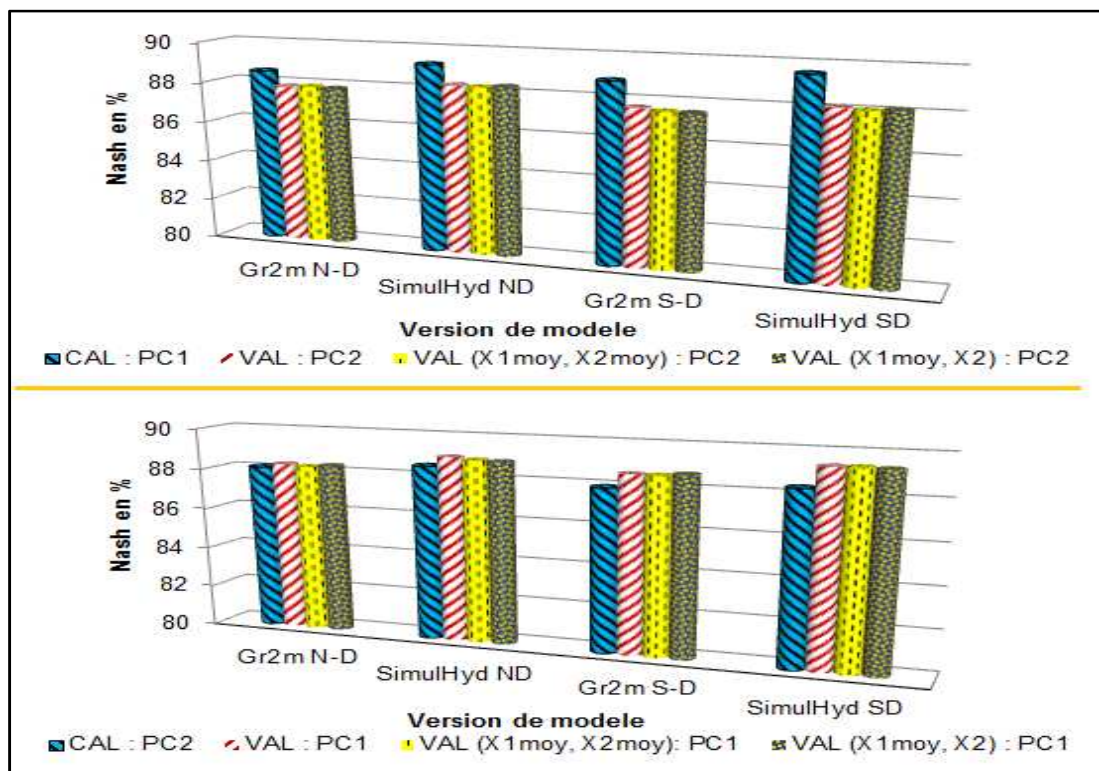
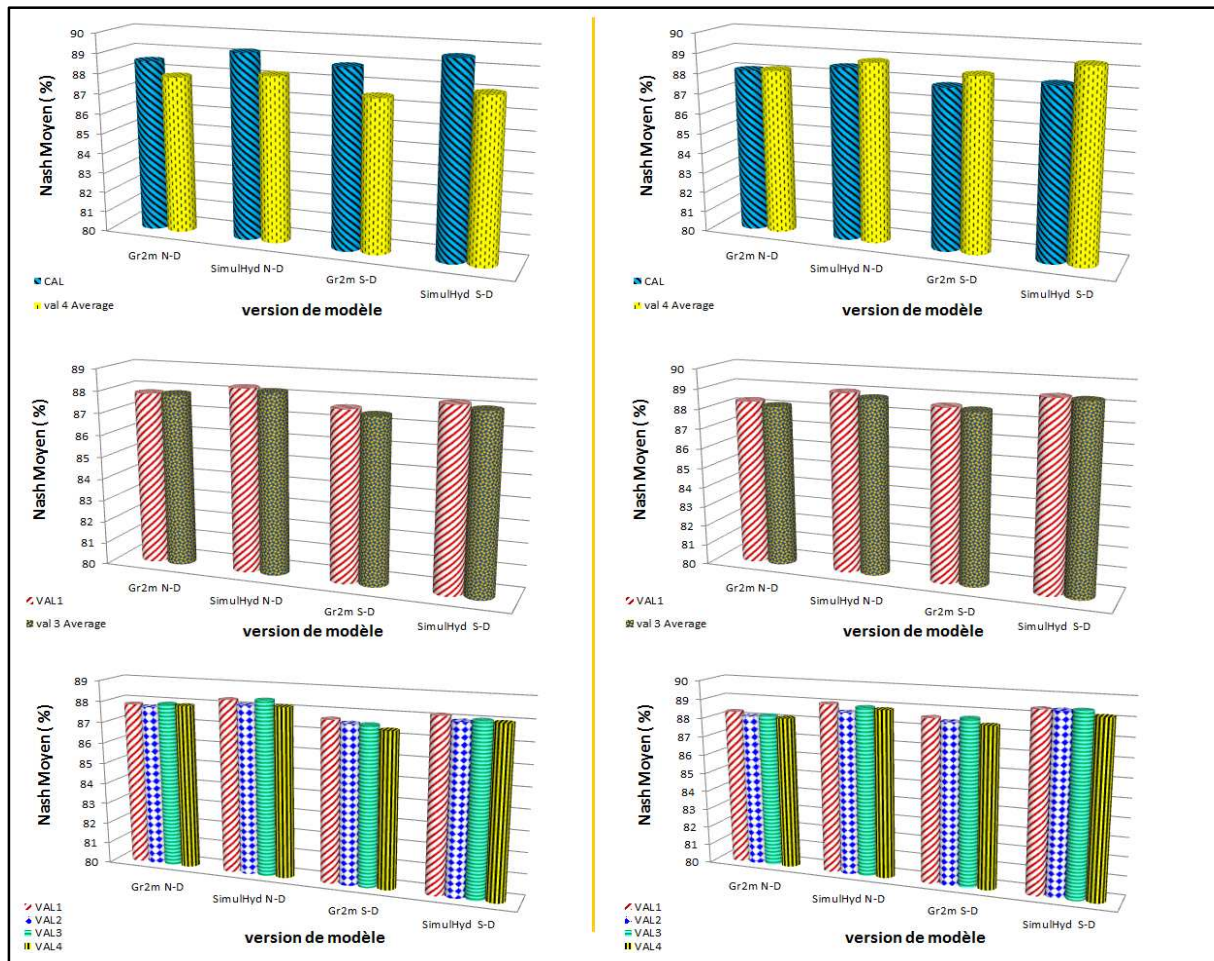
ANNEXE 6 : STATION DE KANKAN



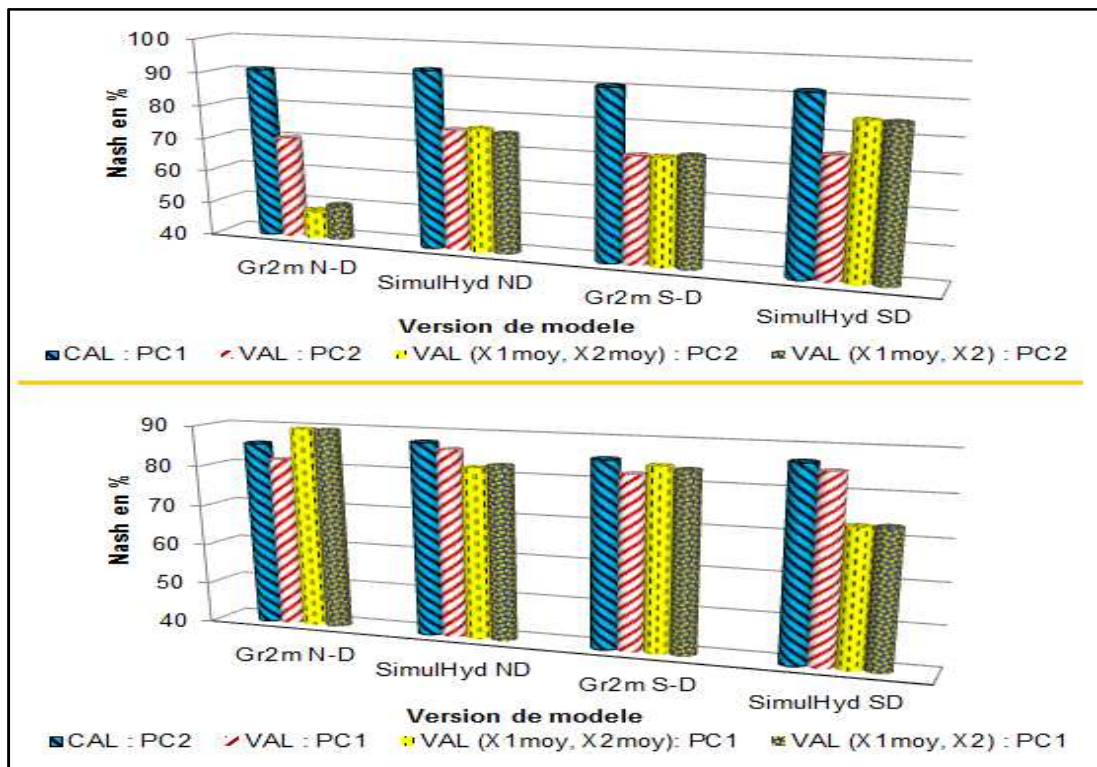
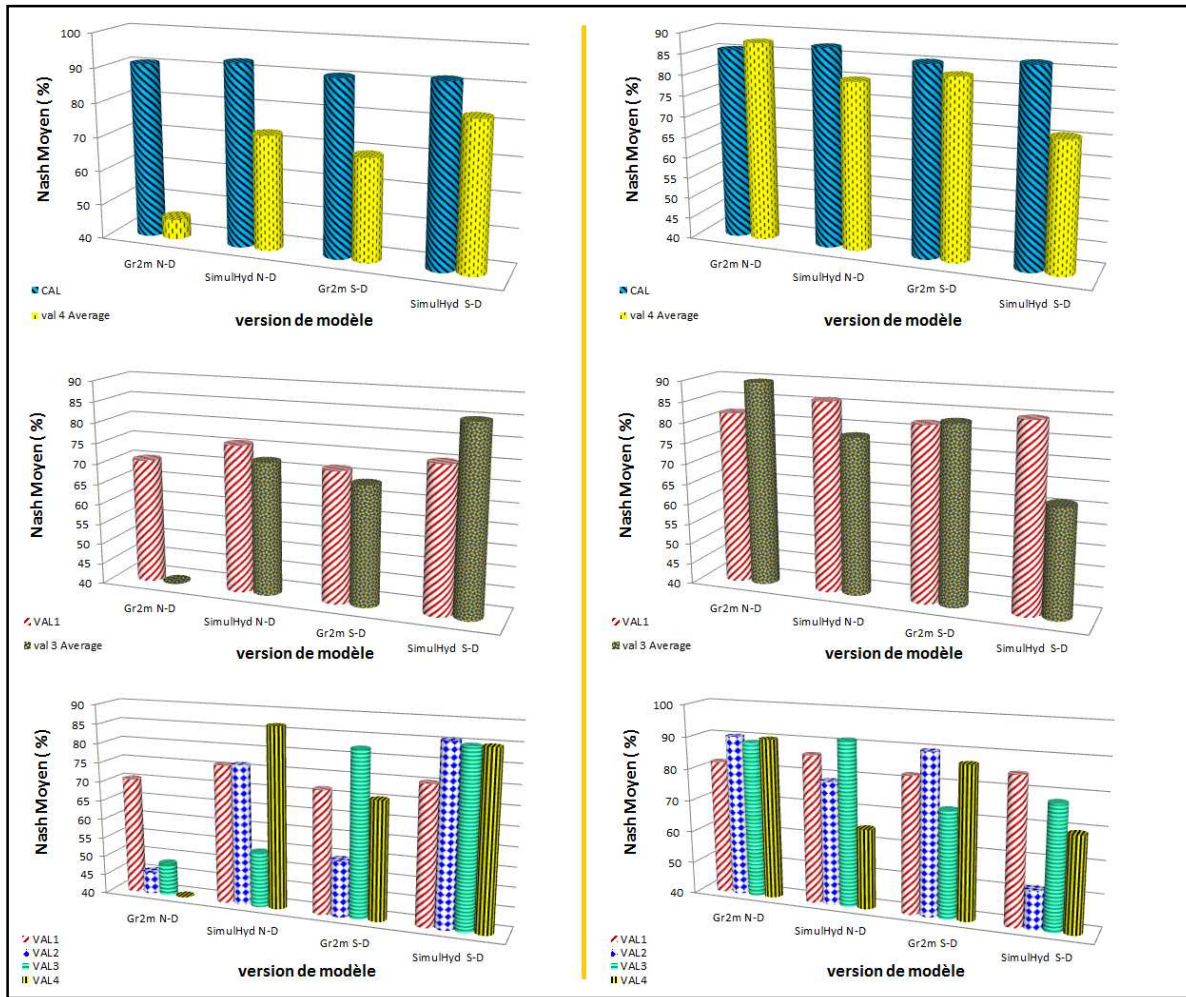
ANNEXE 6 : STATION DE KEROUANE



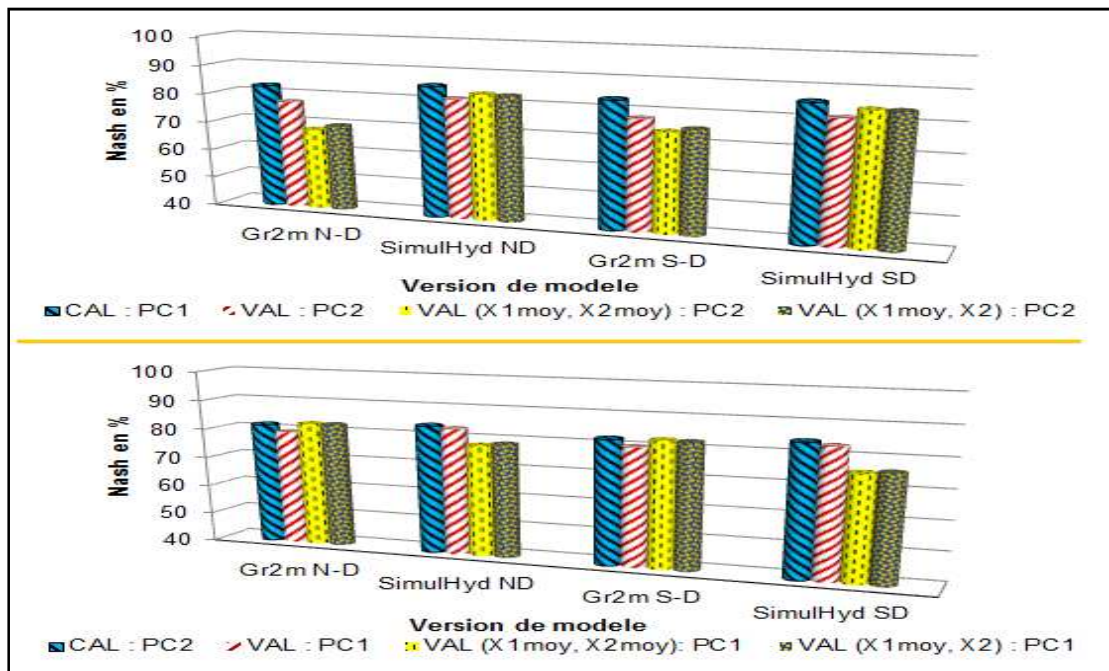
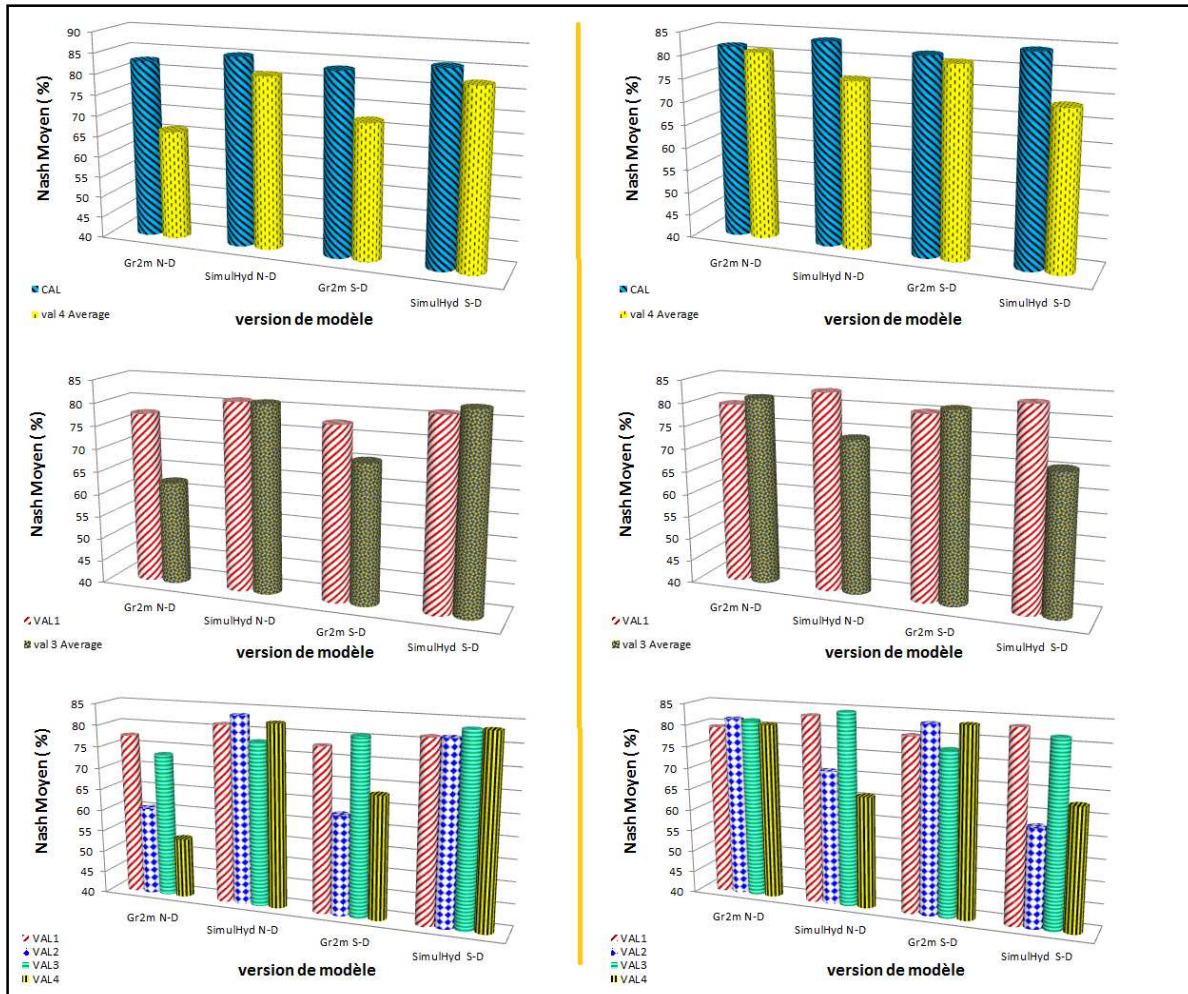
ANNEXE 6 : STATION DE KISSIDOUGOU



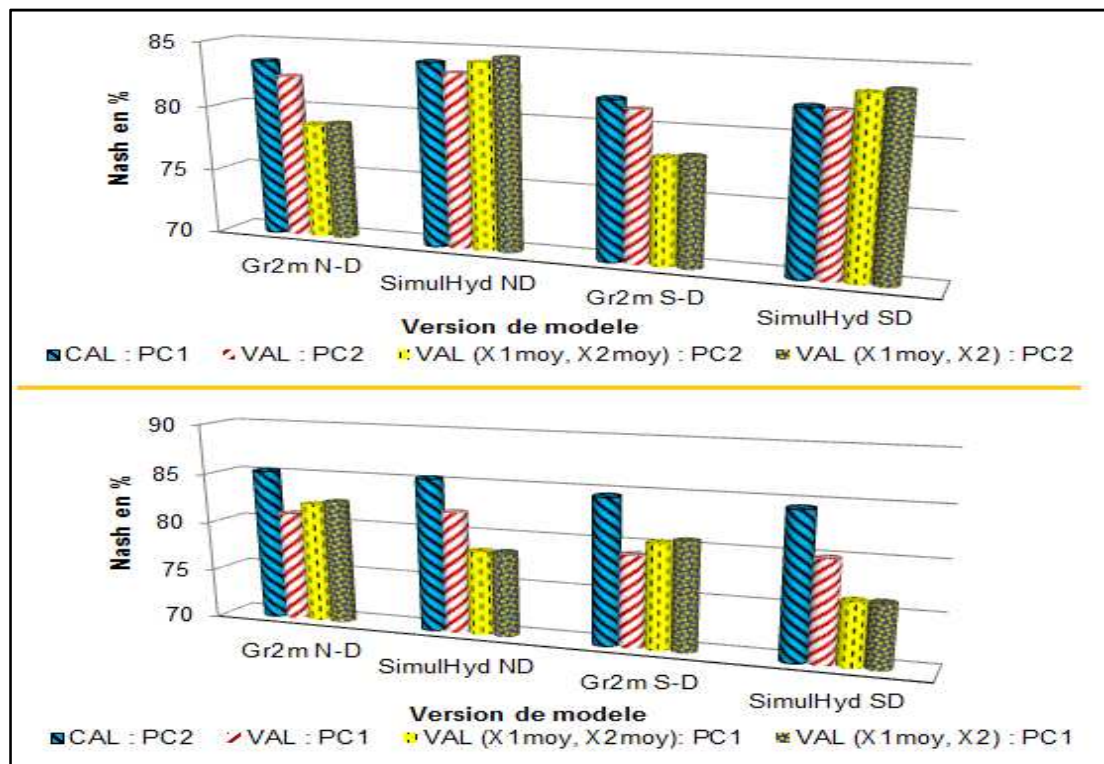
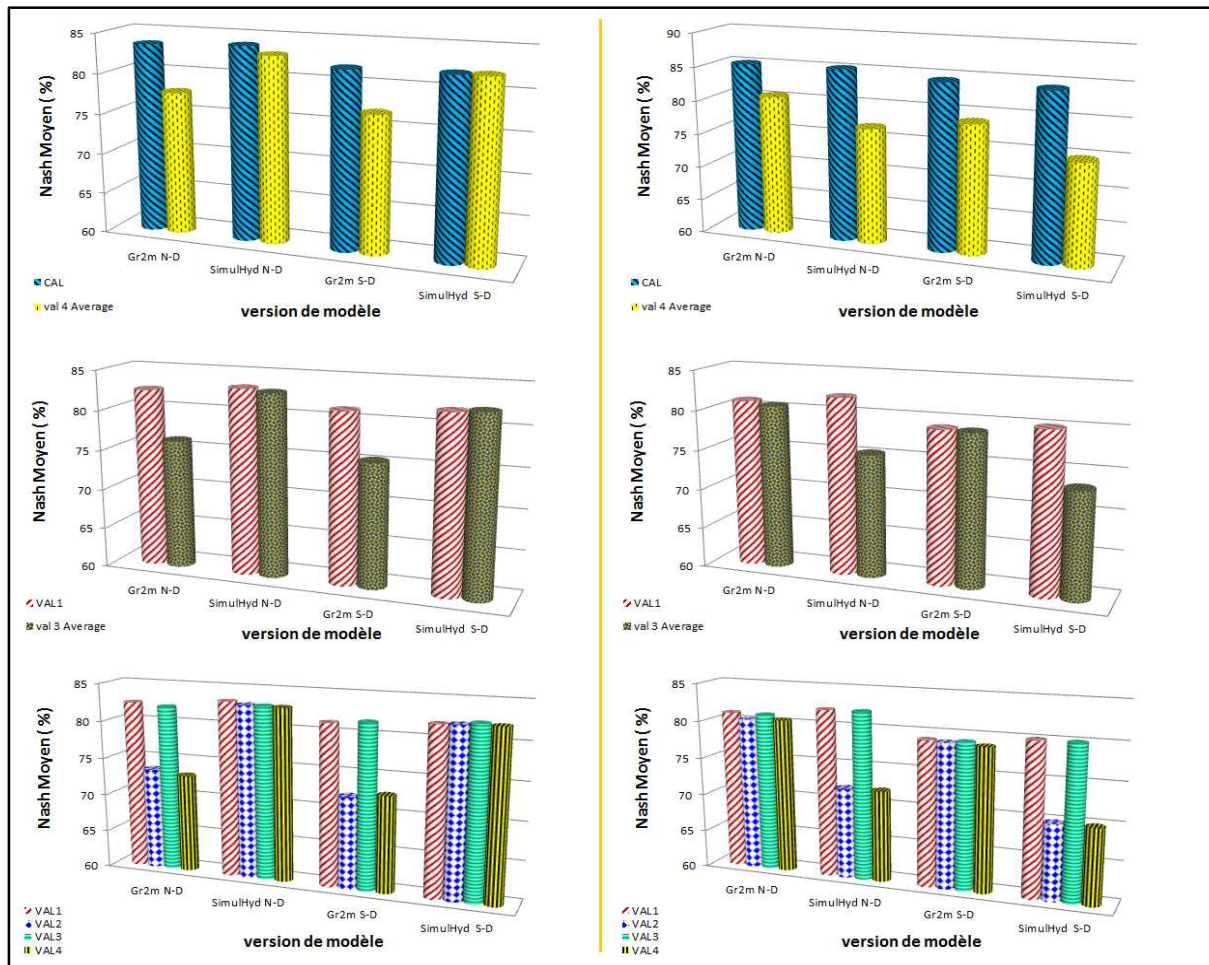
ANNEXE 6 : STATION DE KOULIKORO



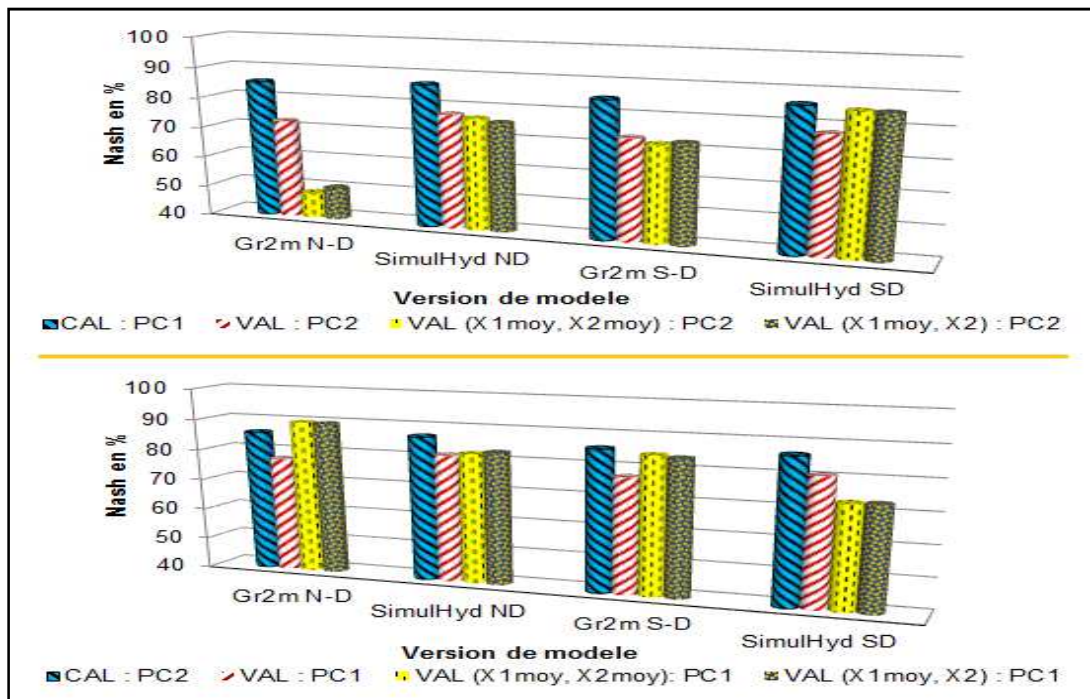
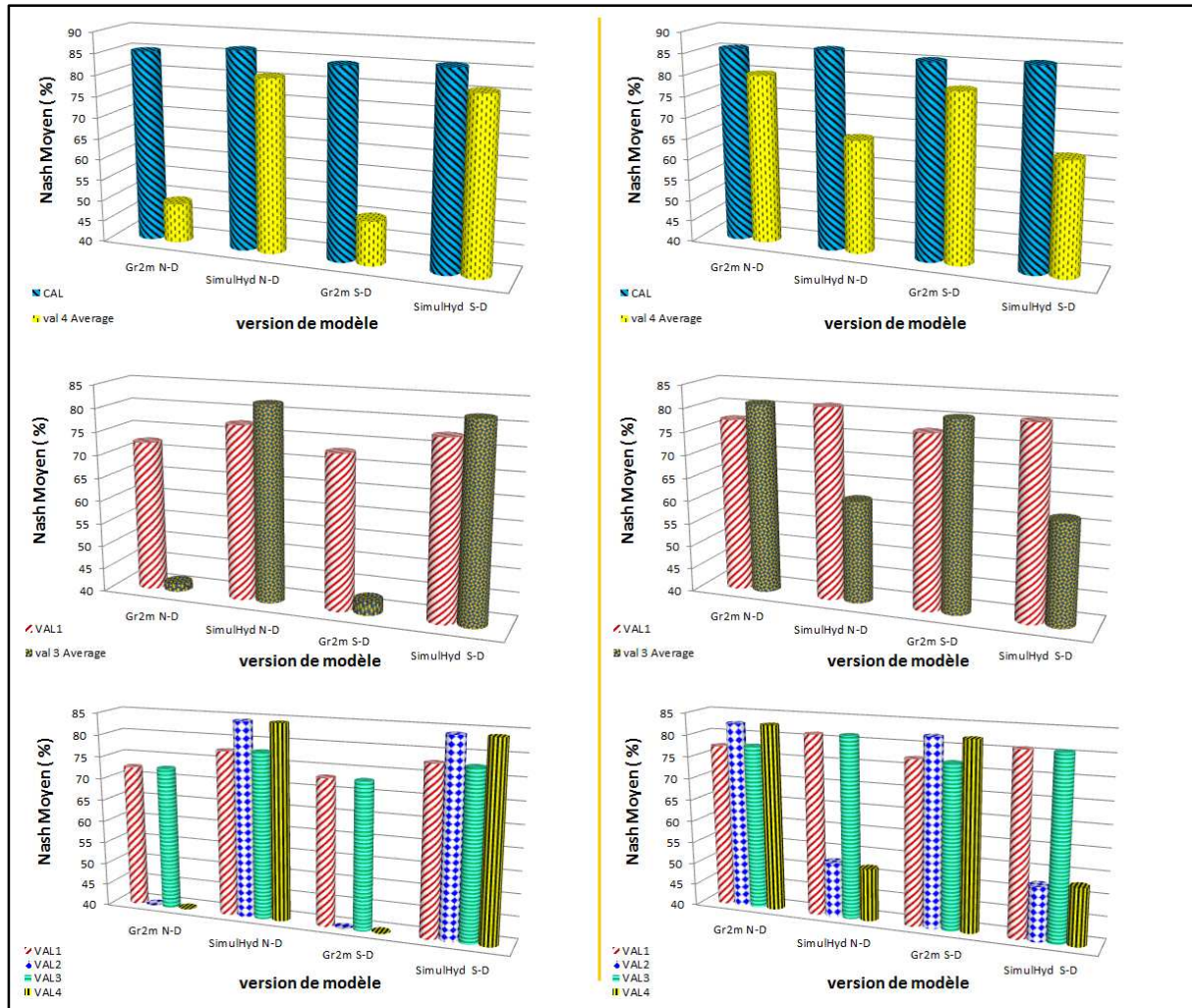
ANNEXE 6 : STATION DE KOUROUSSA



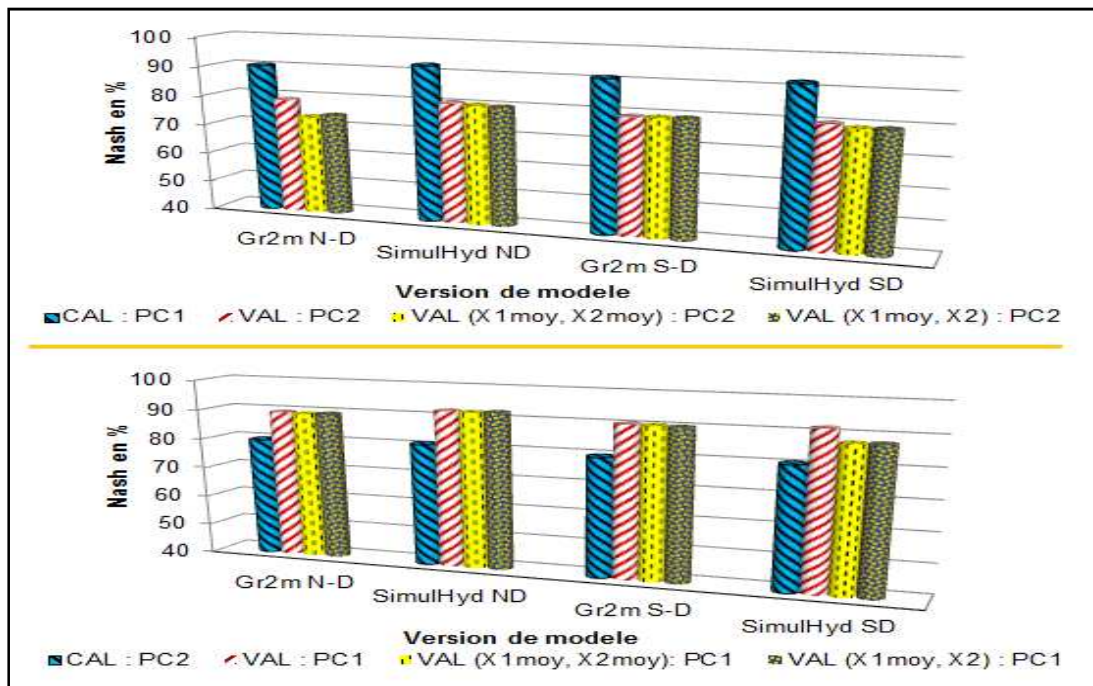
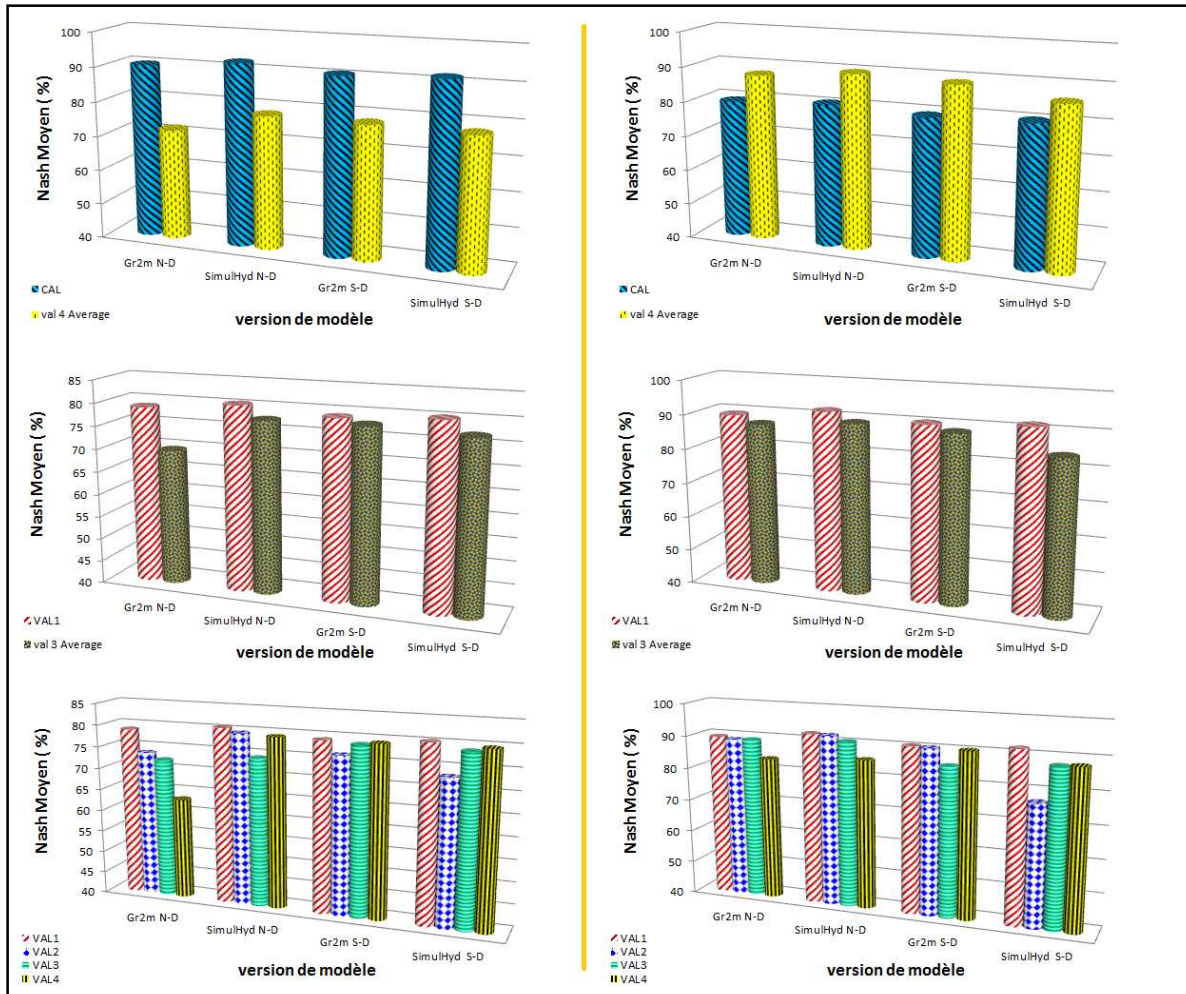
ANNEXE 6 : STATION DE MANDIANA



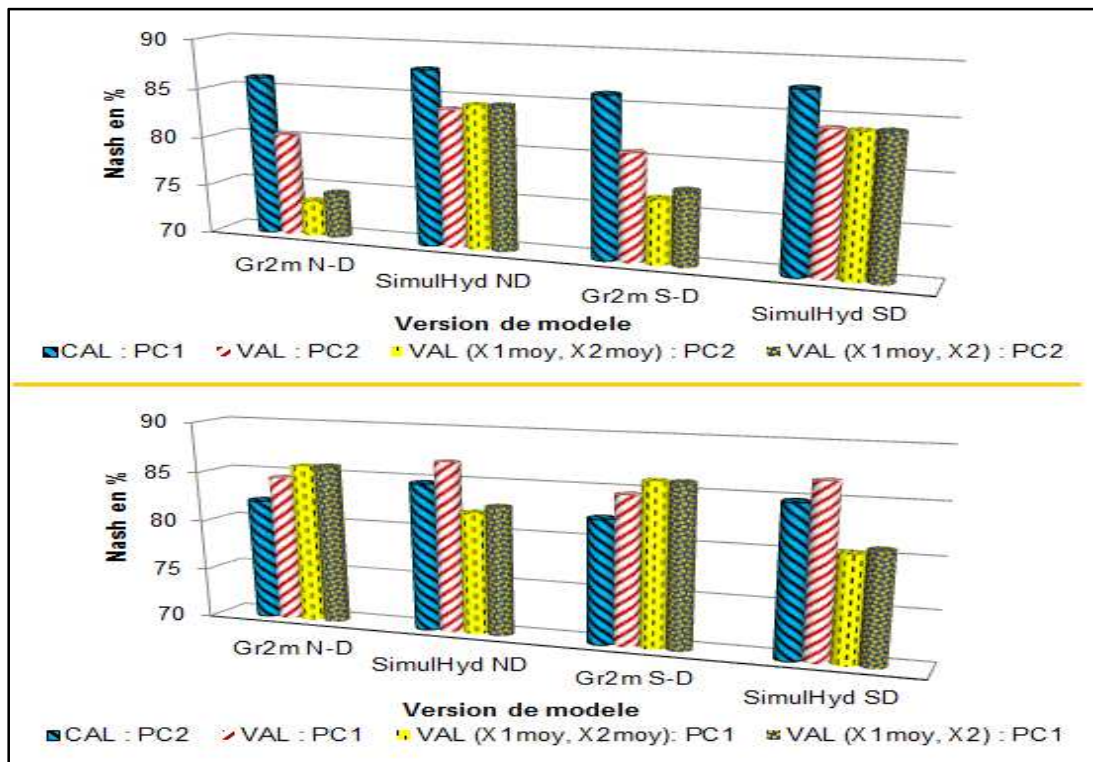
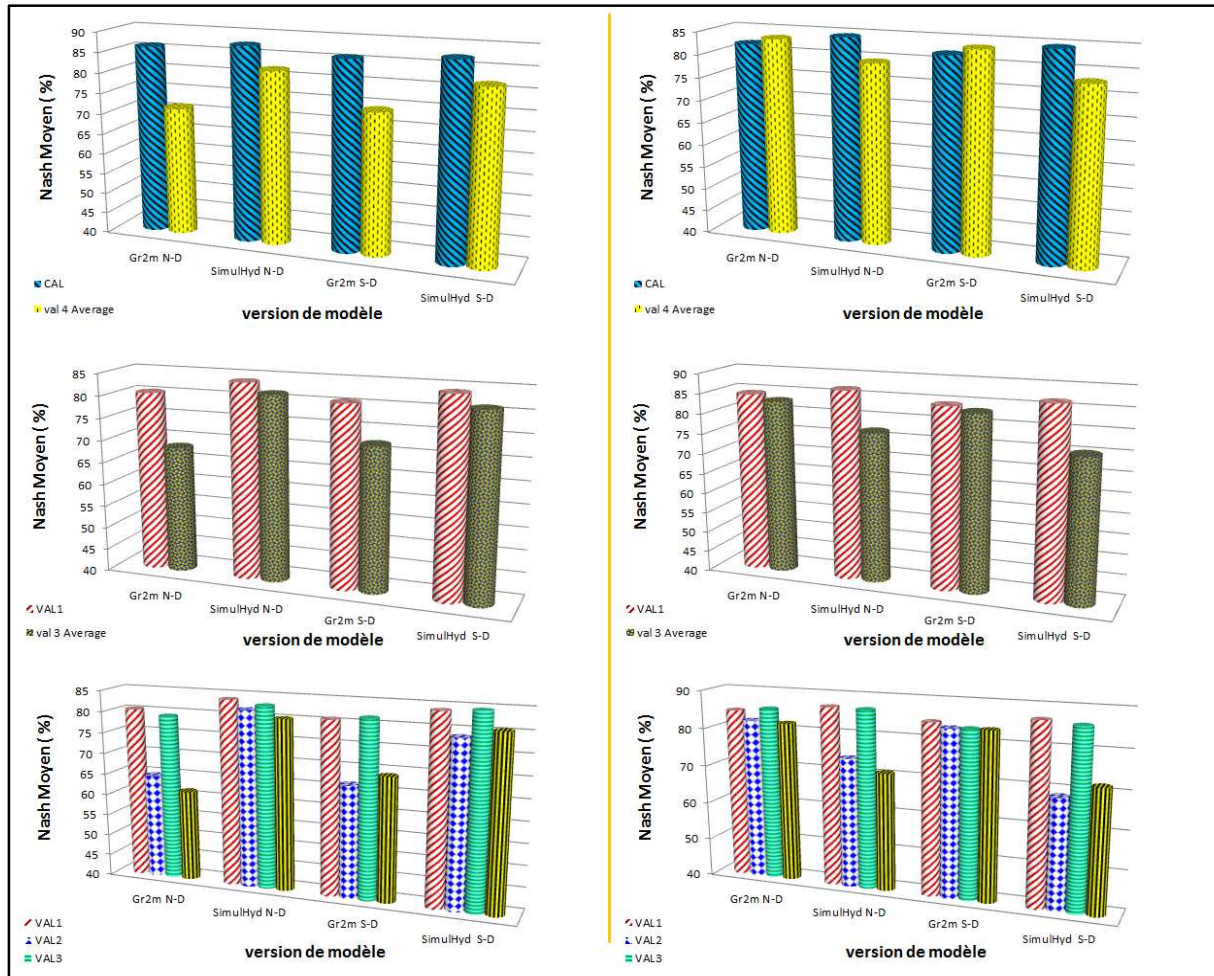
ANNEXE 6 : STATION D'OUARAN



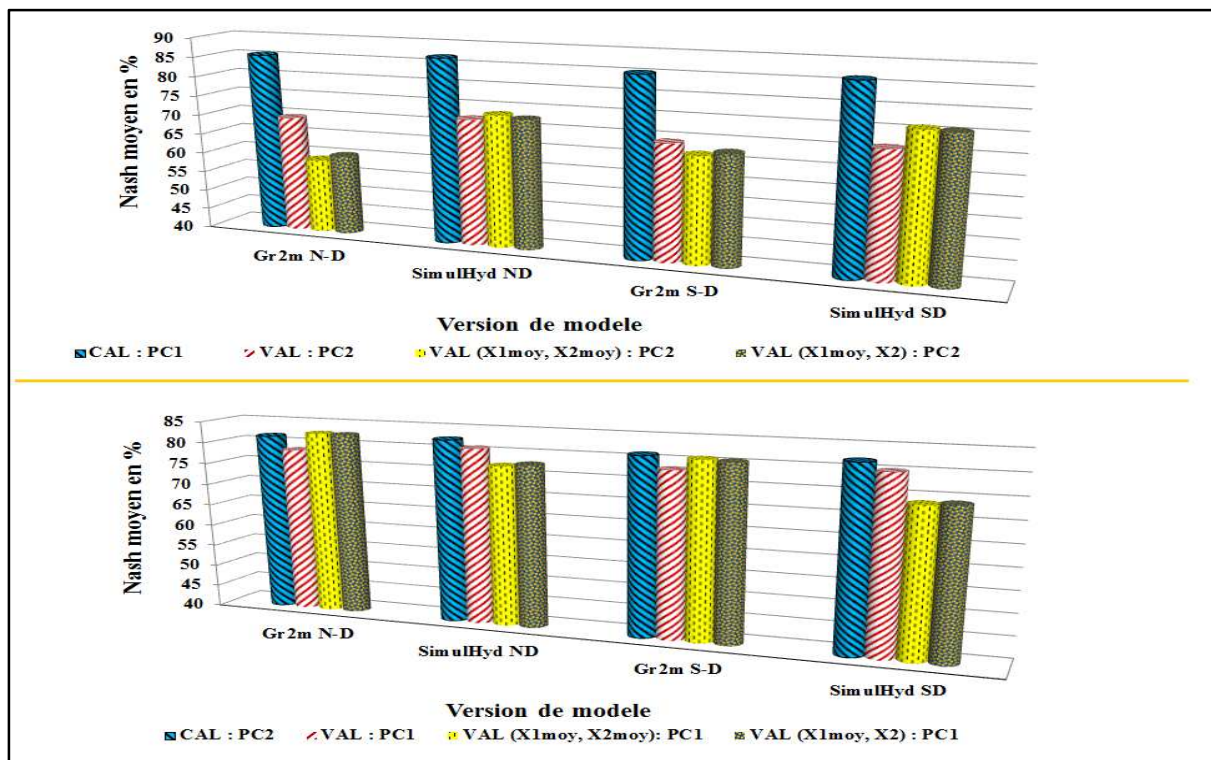
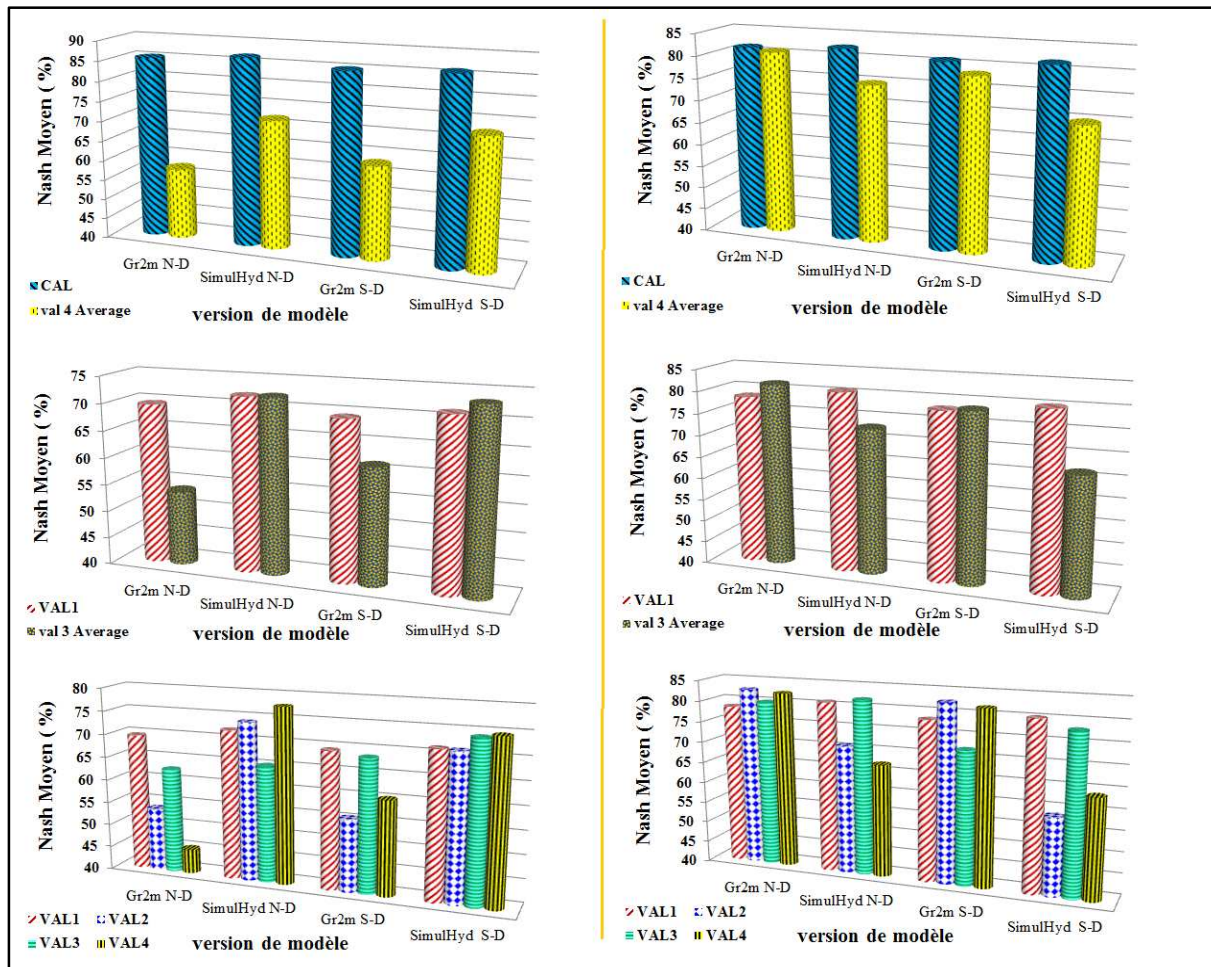
ANNEXE 6 : STATION DE SIGUIRY



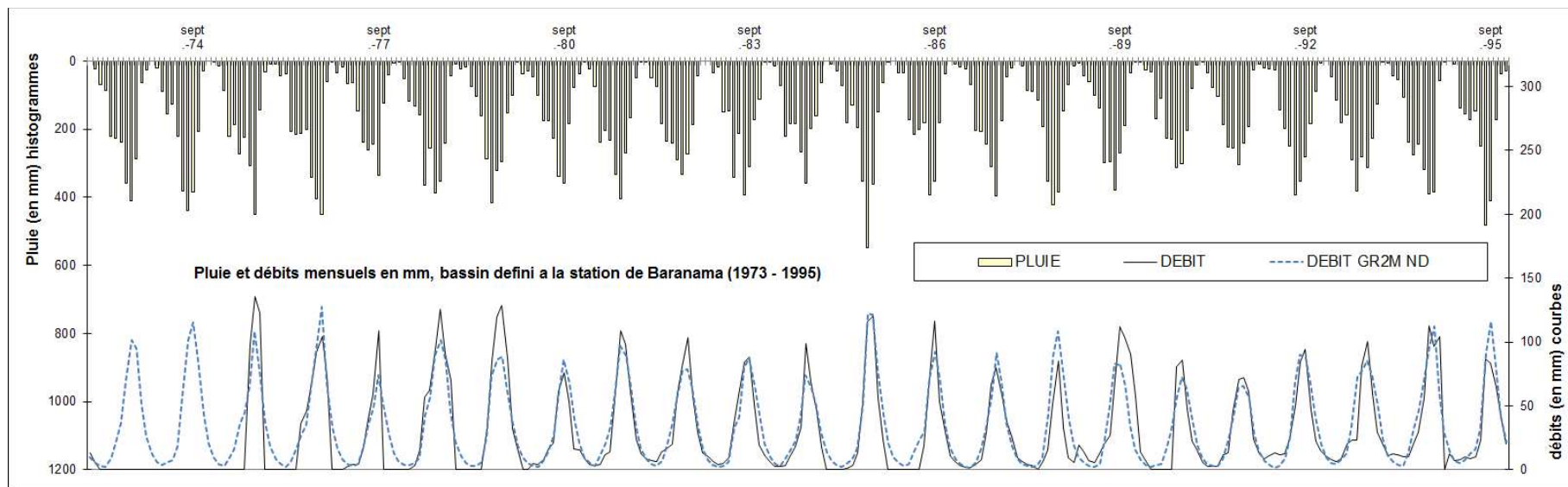
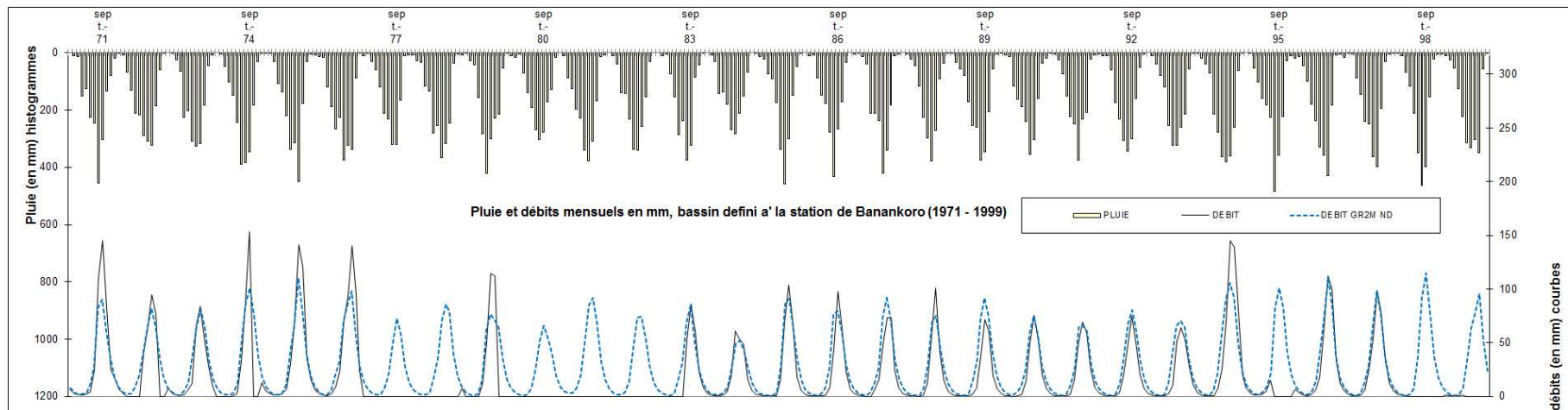
ANNEXE 6 : STATION DE TINKISSO

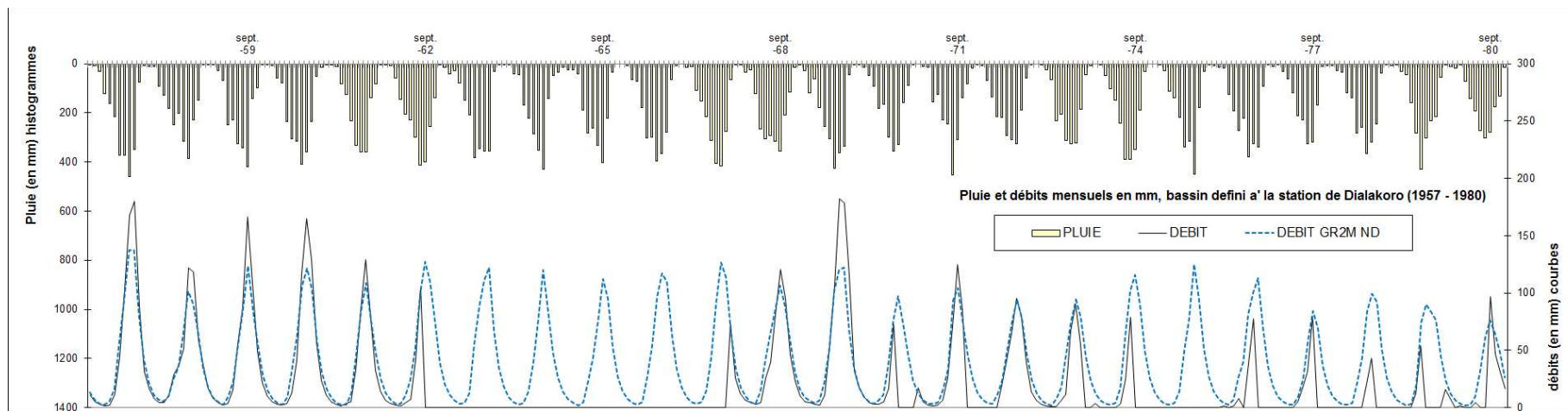
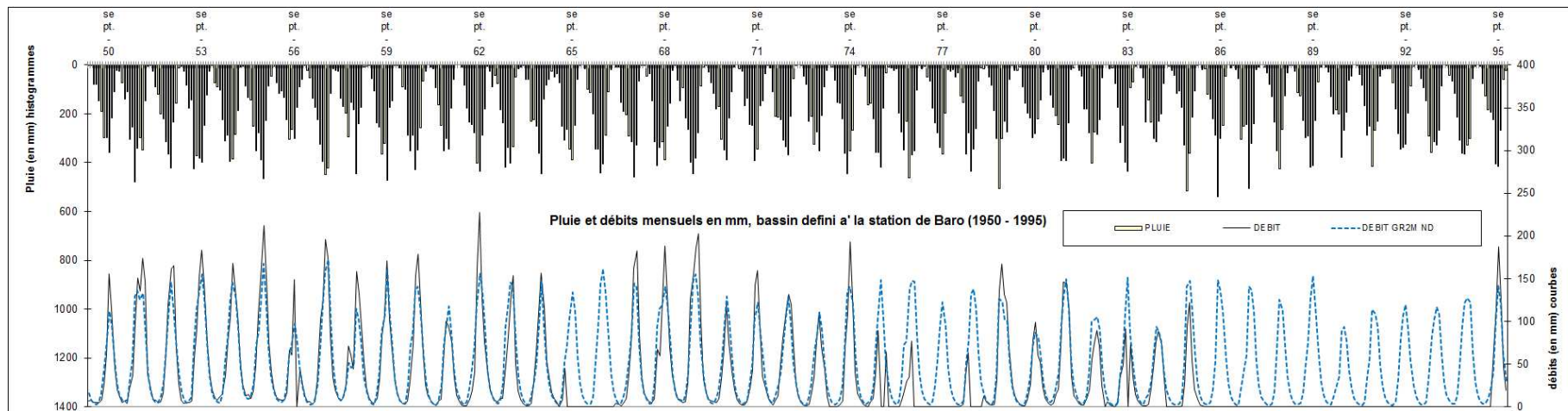


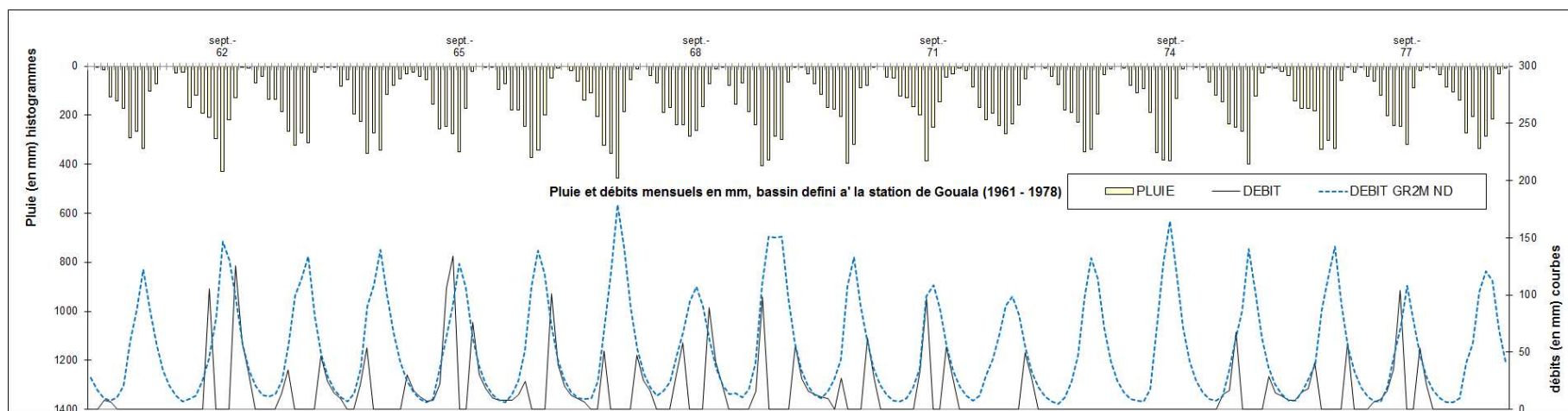
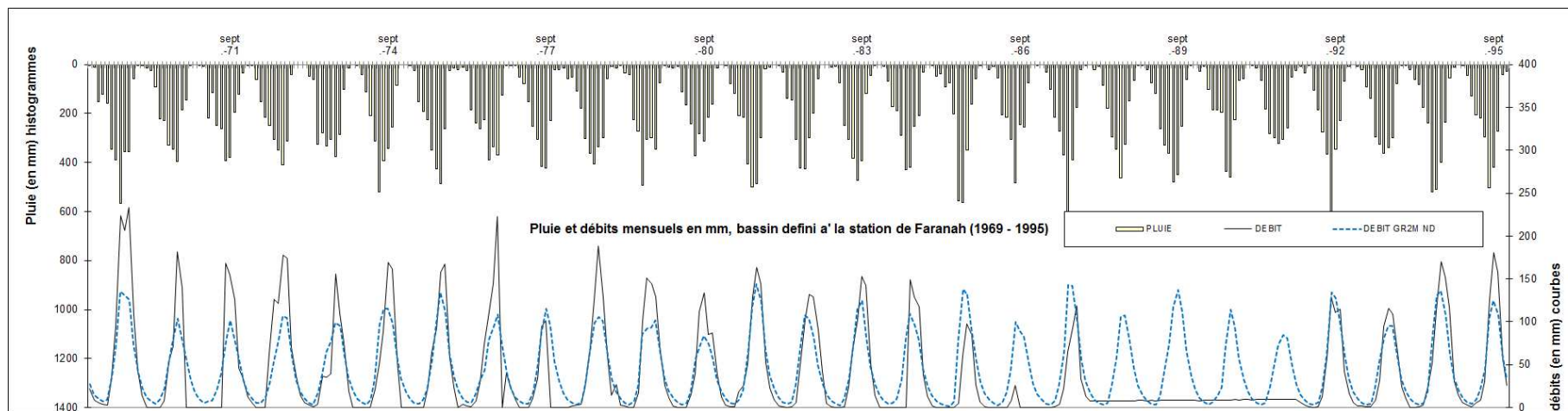
ANNEXE 6 : ENSEMBLE DES SEIZE BASSINS VERSANTS

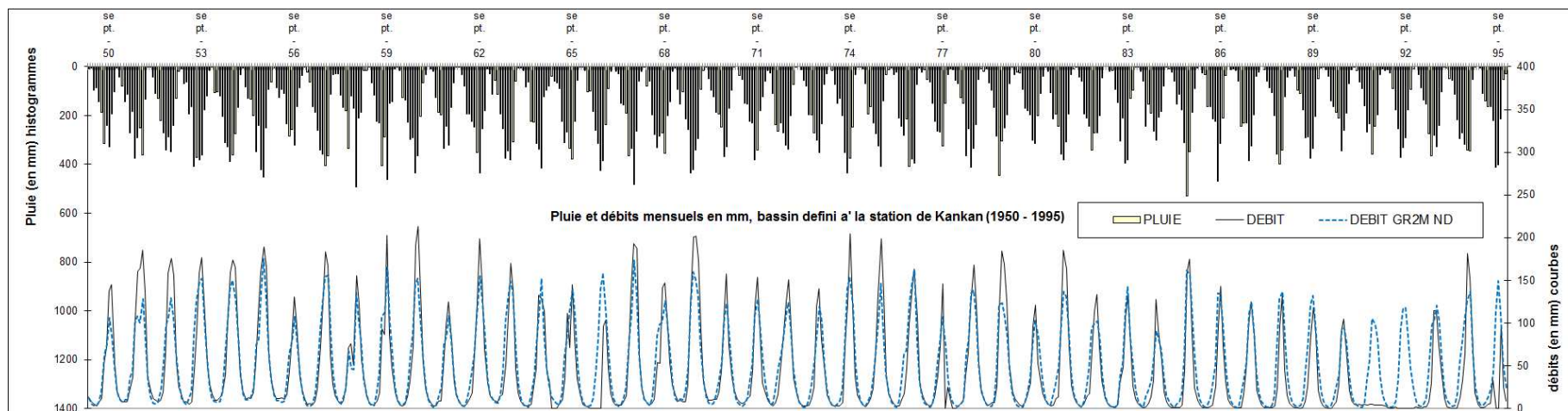
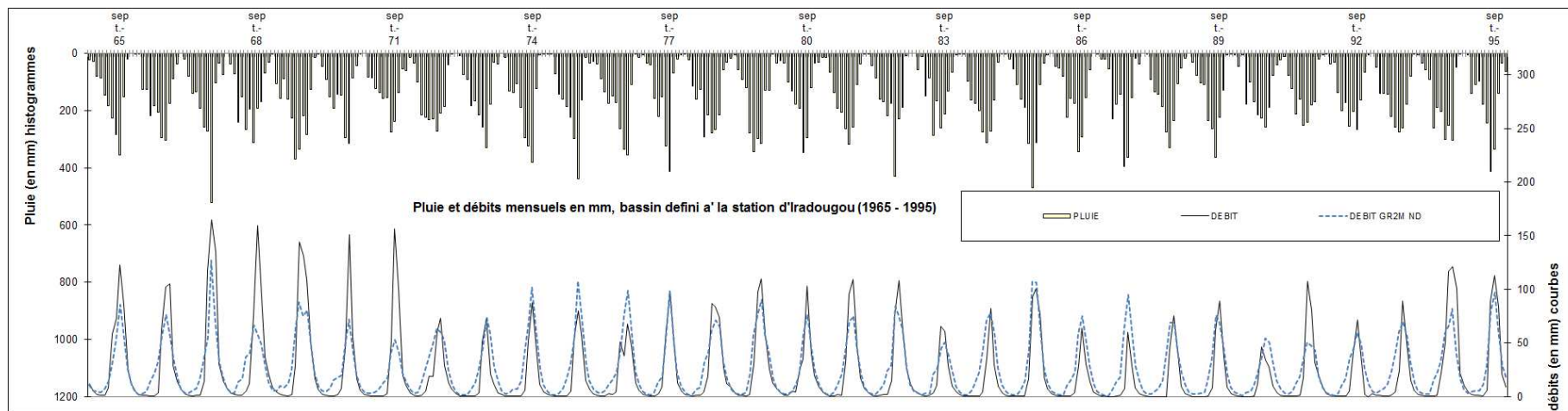


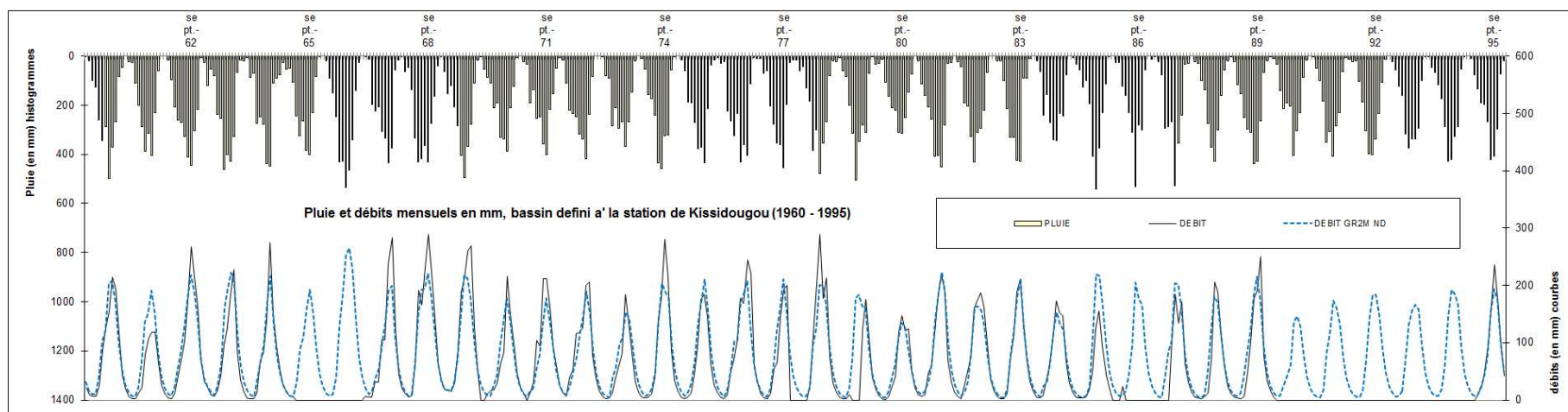
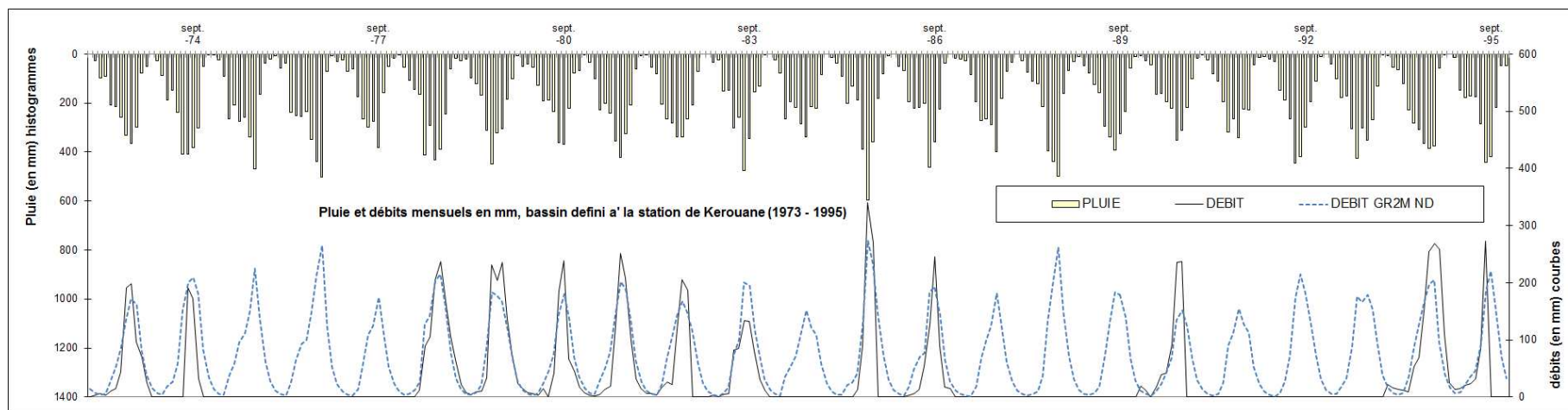
Annexes 7 : Pluies mensuelles observées sur les bassins (en haut), et débits observés et simulés (bas)

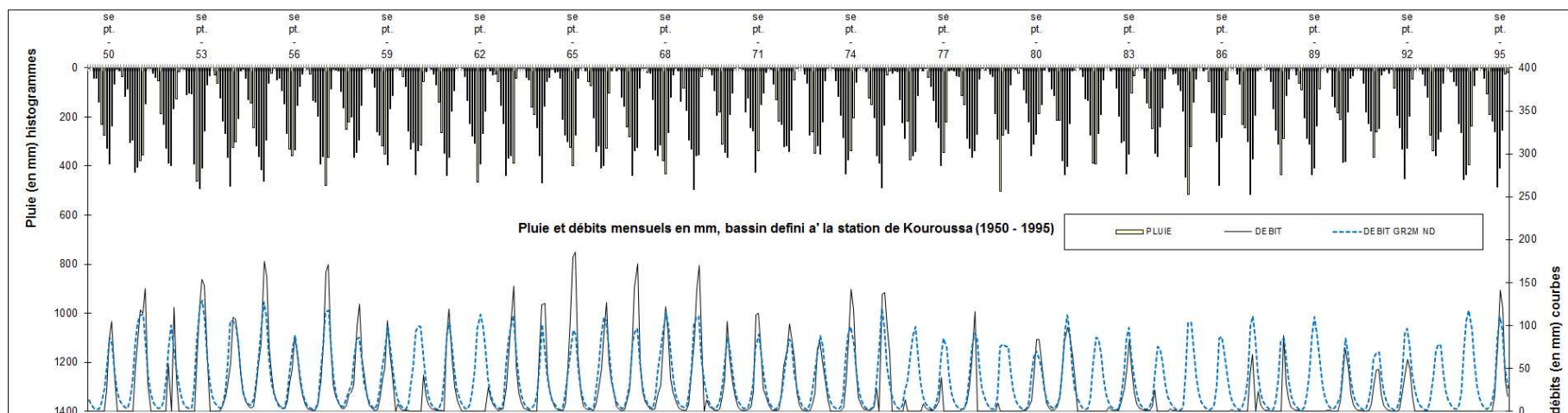
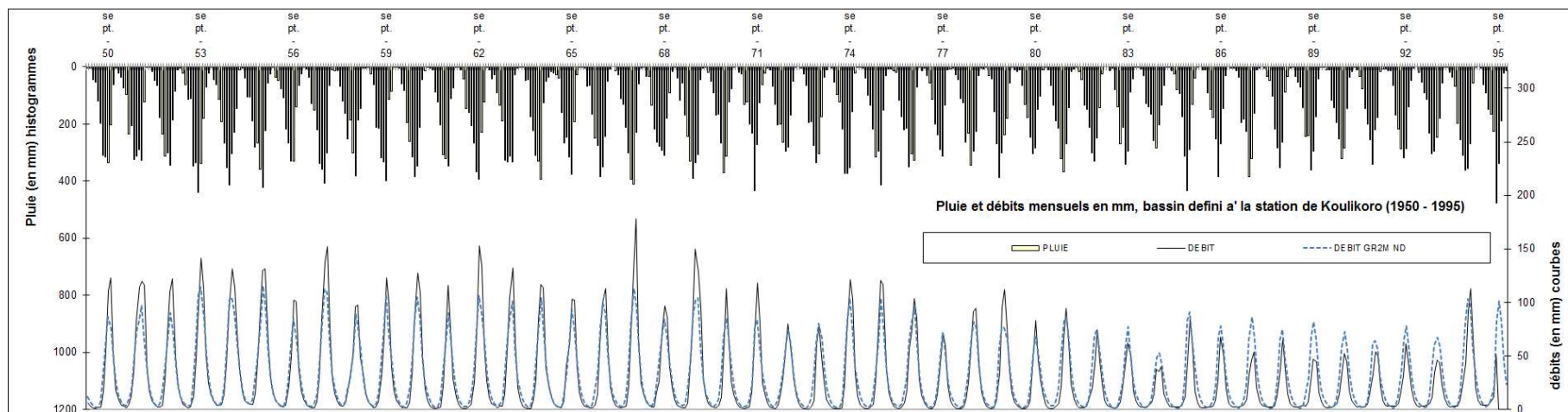


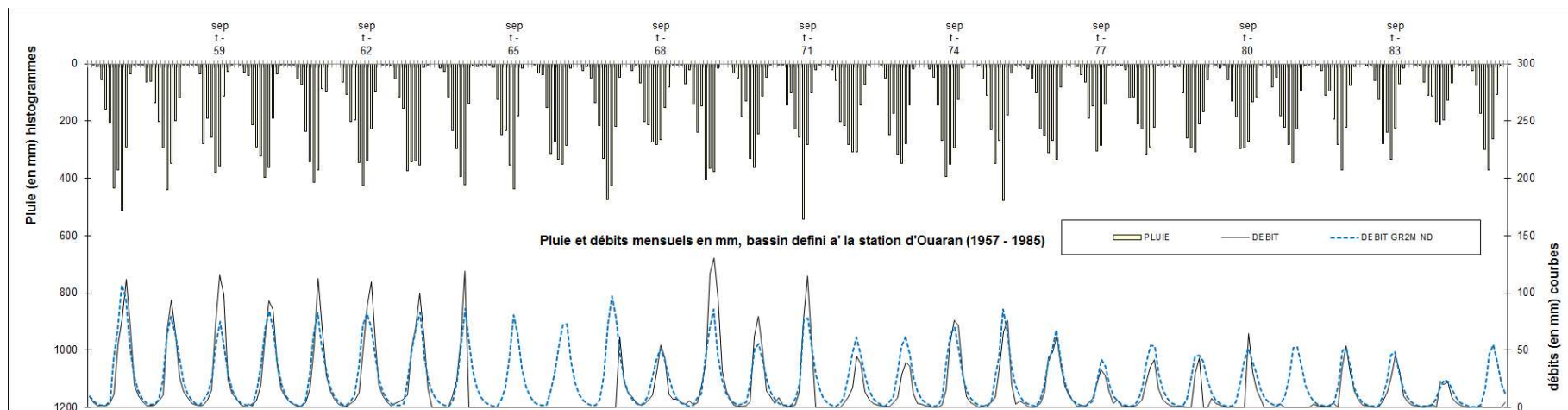
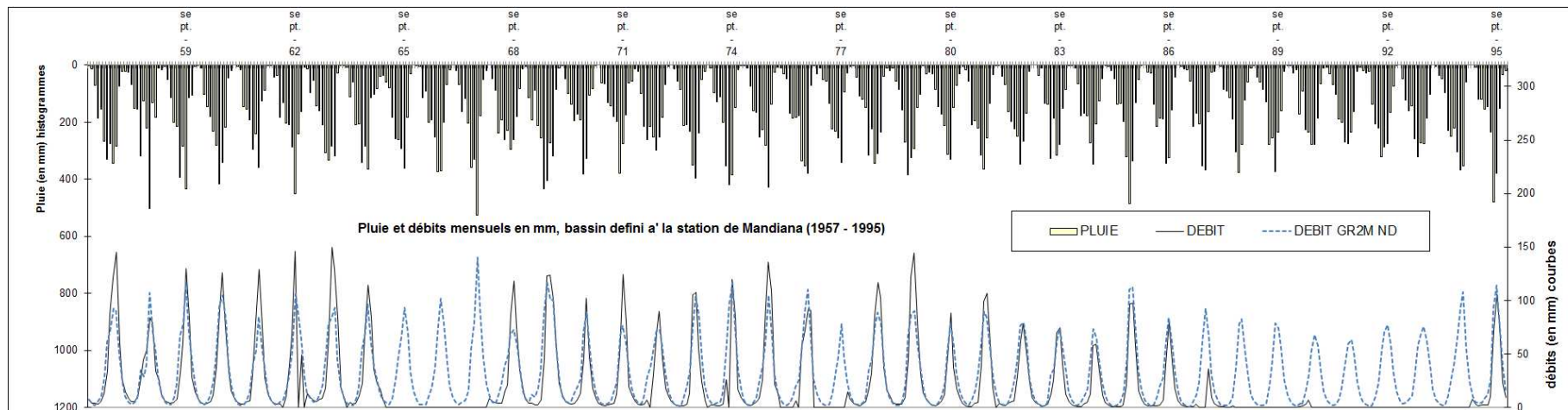


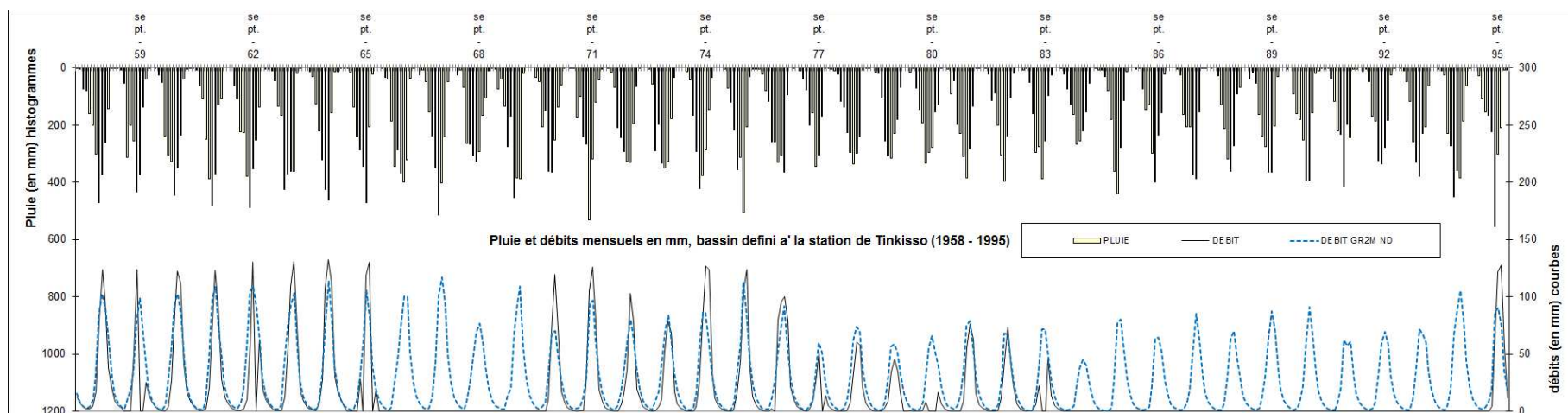
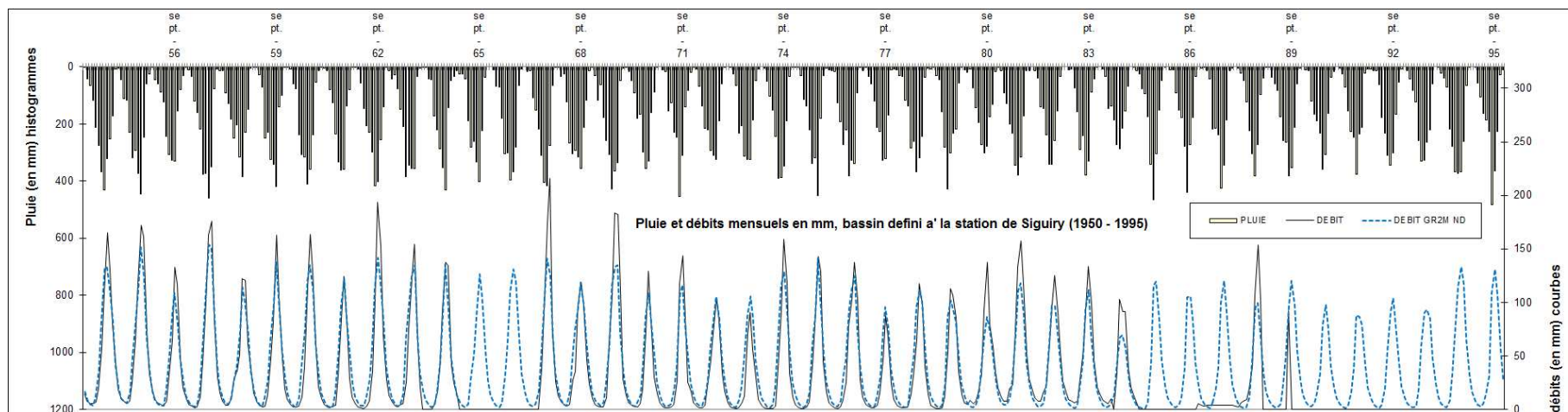




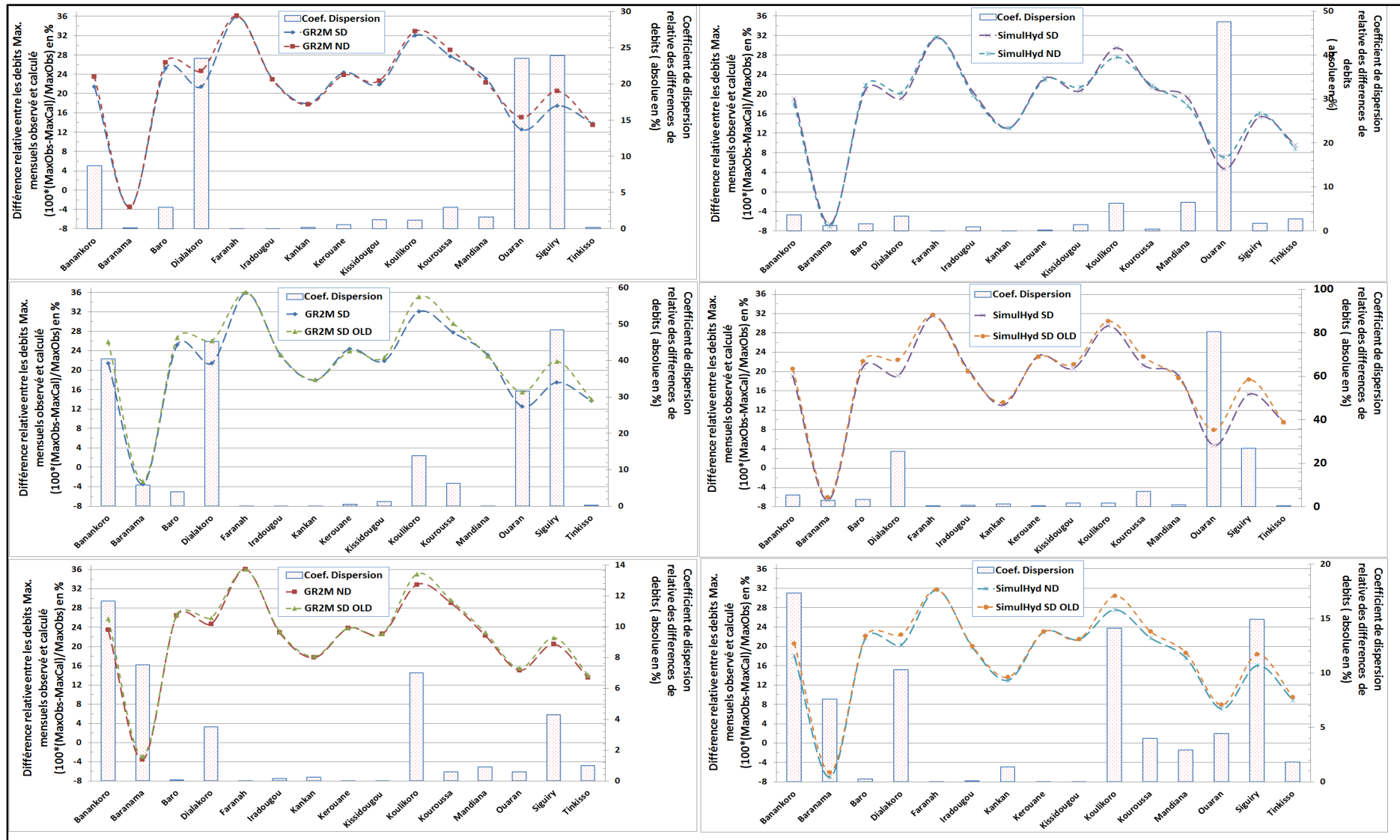


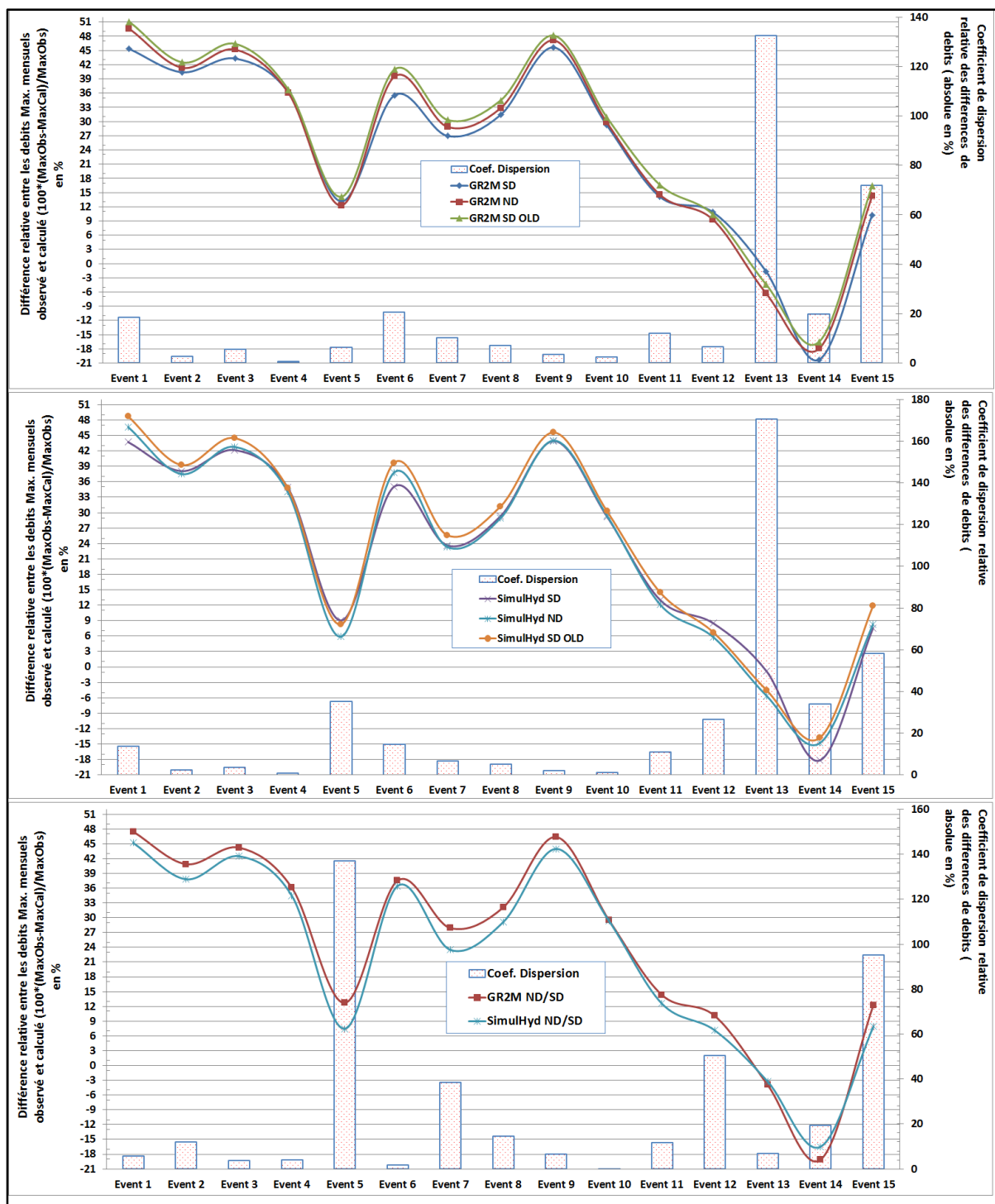


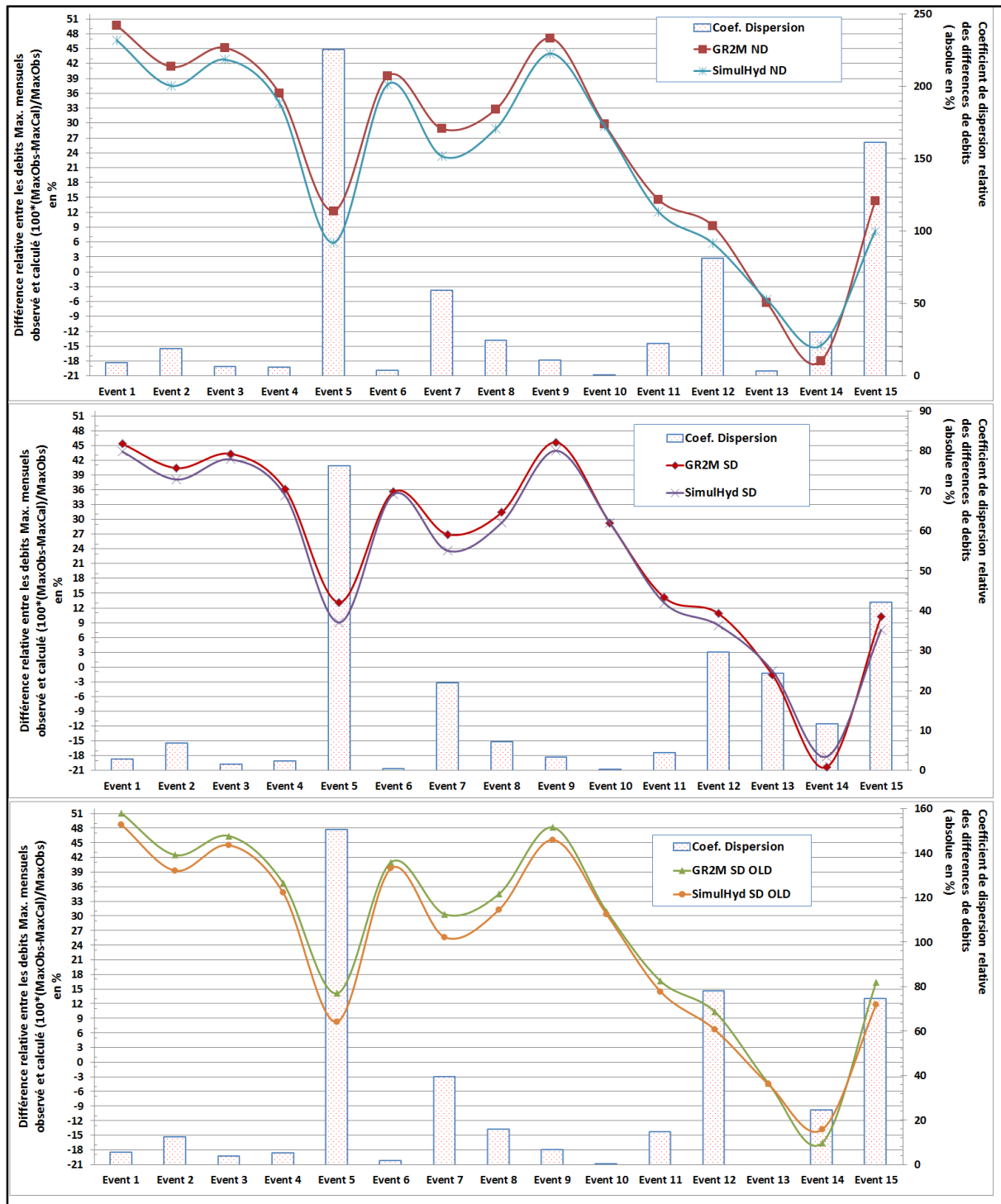


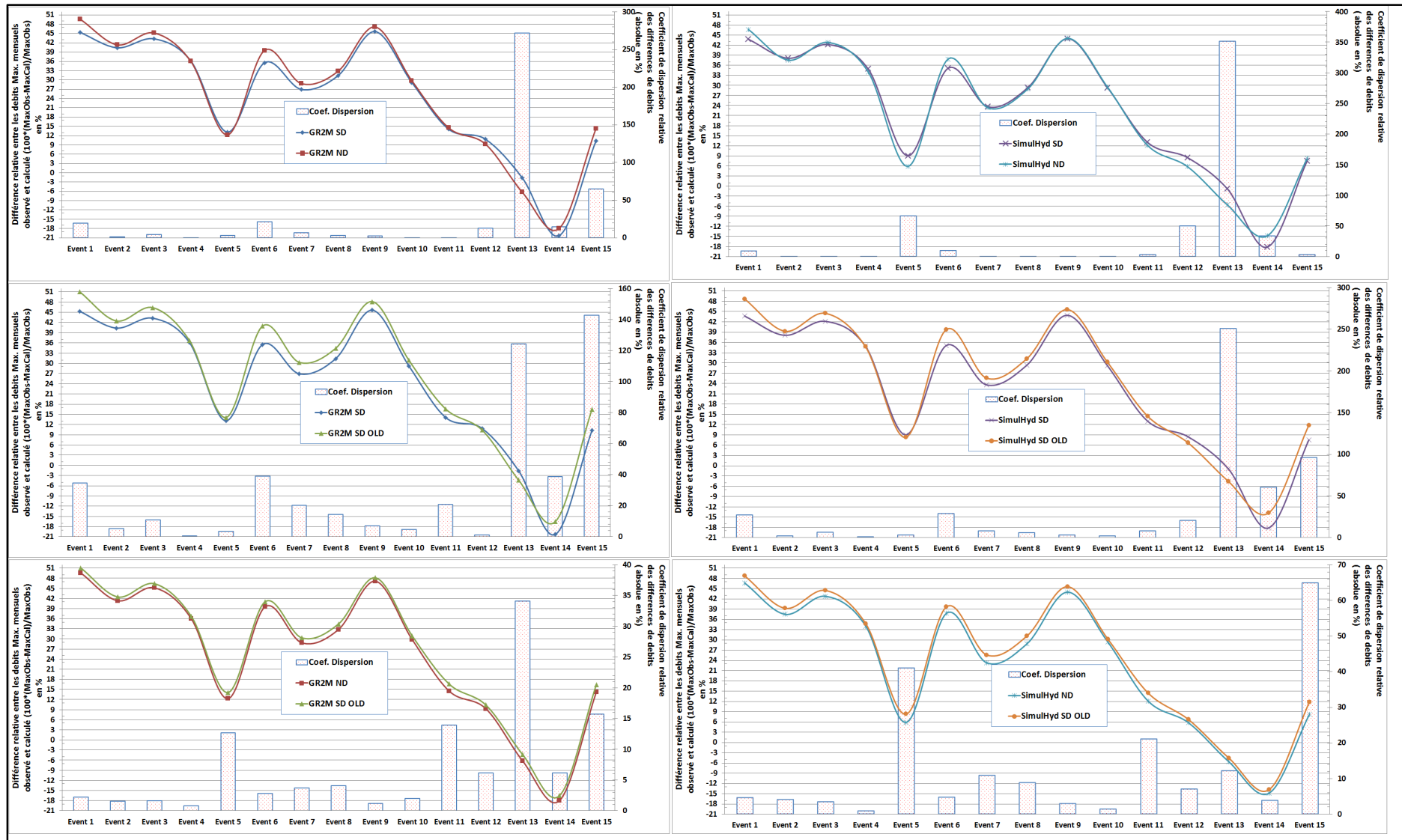


Annexes 8 : Simulation des débits maximum par les versions de modèles



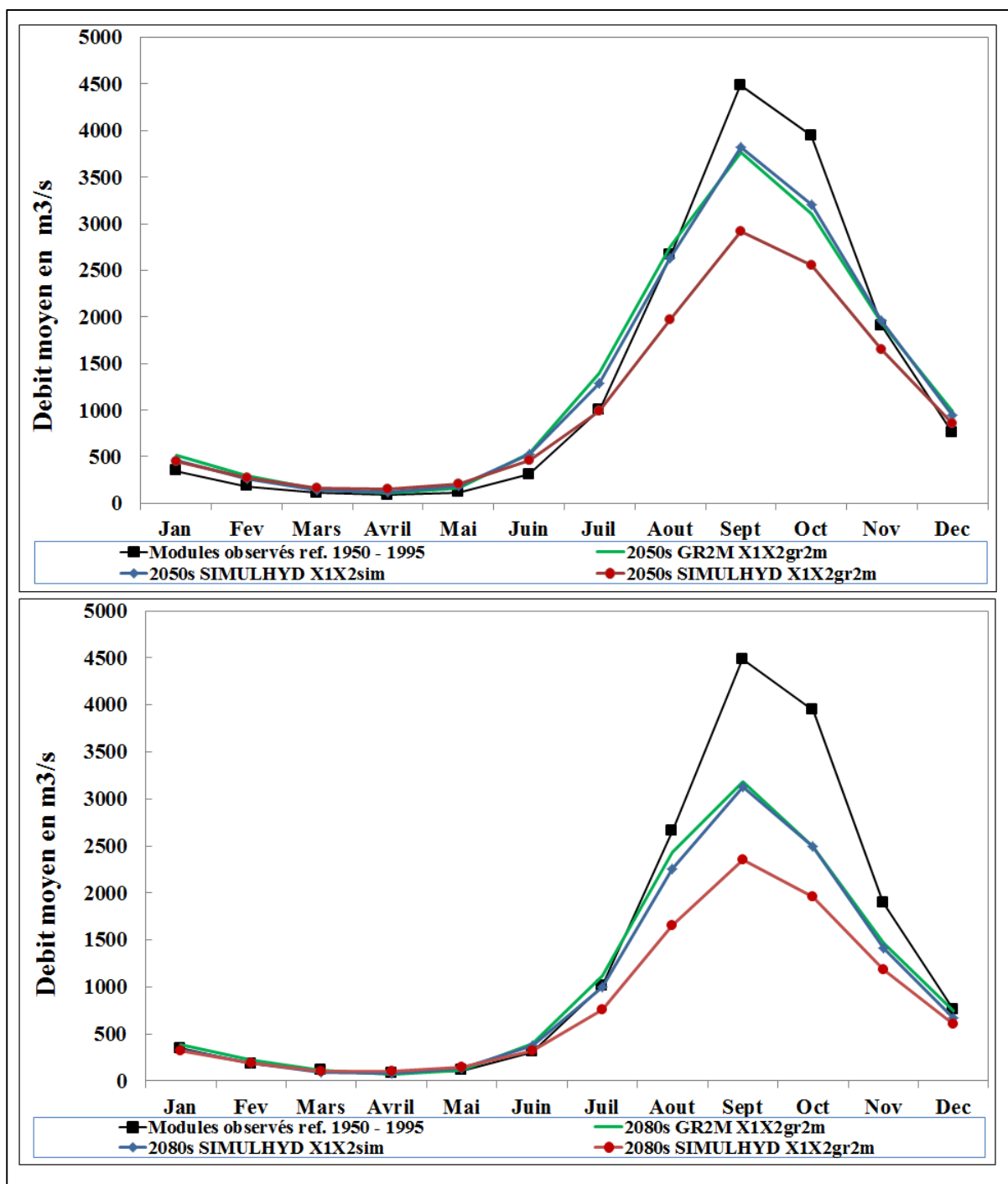




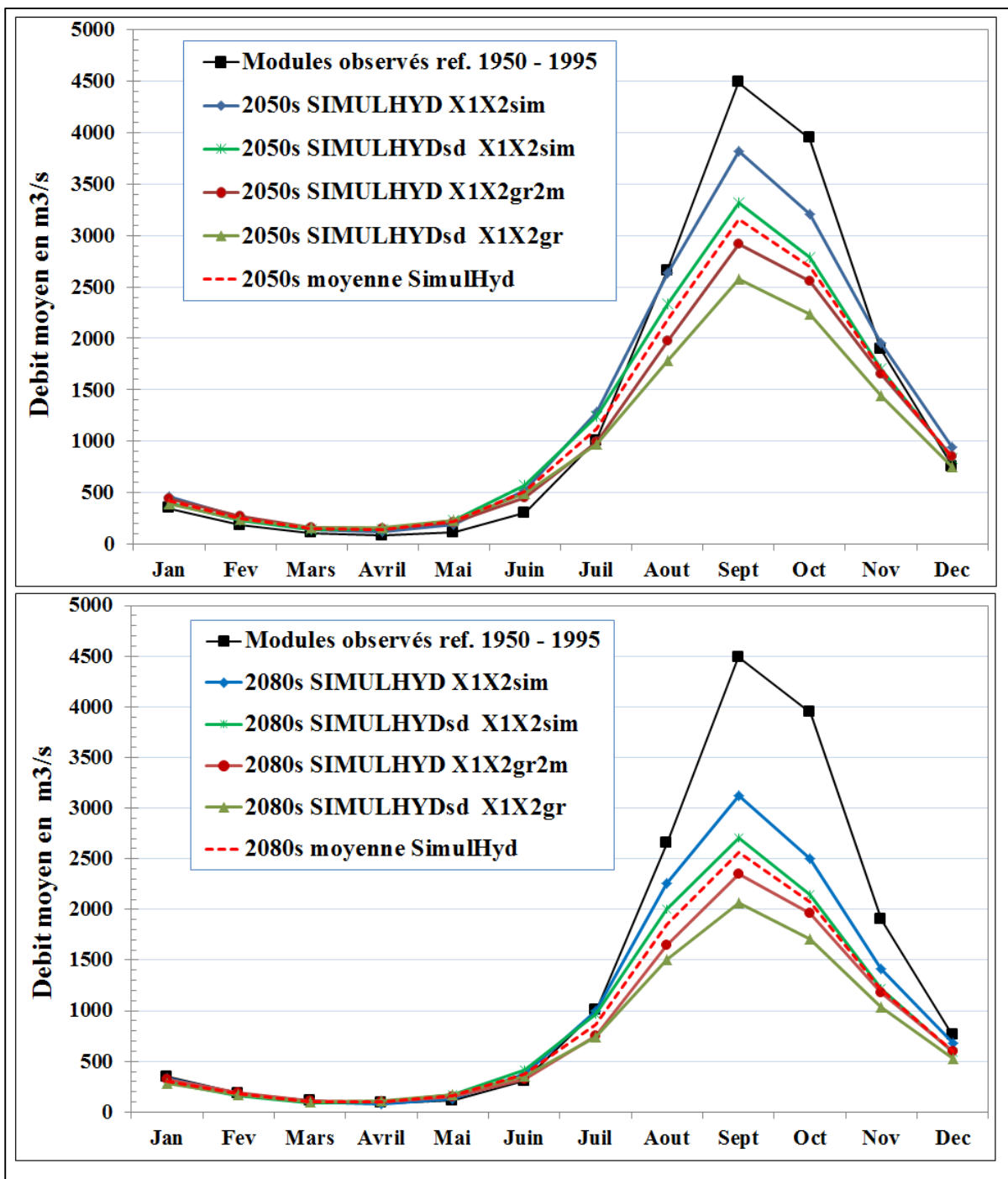


Annexes 9 : Projections hydrométriques aux Horizons 2050 et 2080.

Annexes 9a : En modélisation non-distribuée



Annexes 9b : En modélisation non-distribuée et semi-distribuée



Annexes 10 : Abstracts et Posters de conférences

10.1 [AGU Abstract#H31B-1158] Niger River Basin - Hydrological Modelling: Inter-changeability of parameters between models versions

Niger River Basin - Hydrological Modelling: Inter-changeability of parameters between models versions

H31B-1158
AGU Fall Meeting,
San Francisco, 2013.

Salif Koné^{1,2} **Berkner Travel Fellowship**

1. PhD Student, Université de Bamako (Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée - ISFRA), Sis N'Golomina Road 268, Gate: 238, BP: E475 - Phone/Fax: (+223) 20 21 04 66/Bamako.

2. Department of Geology, Ecole Nationale d'Ingénieurs -Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT) - 410, Av. Van Vollenhoven, BP: 242 - Phone: (+223) 20 22 27 36 / Bamako-Mali, (Email: skonemat@yahoo.fr)

Station	Area (km ²)	Dist. (km)	Flow gauge	Station	Area (km ²)	Dist. (km)	Flow gauge
Marabou	7543	43	07-00-010-107	1960	46	08-10-101	108
Marabou	8000	8	07-00-010-102	1960	46	08-10-101	108
Marabou	1158	15	10-00-002-180	1970	46	08-10-101	108
Marabou	144	44	07-00-010-102	1960	46	08-10-101	108
Marabou	176	4	10-00-010-180	1960	46	08-10-101	108
Marabou	3072	28	07-00-010-102	1960	46	08-10-101	108

Abstract: An enhanced hydrological framework from the existing conceptual model GR2M leads to significant results in interchanging the models parameters, using the parameters obtained during the calibration process of a first model version in the validation process of a second model version. A two parameters and three input variables' conceptual framework called *SimulHyd* is used to simulate the runoff of sixteen watersheds on the Niger River and its tributaries, over eighteen years to forty six years. The first parameter controls the three model input variables and the second controls its output runoff information. Between either a lumped version and a semi-distributed version or the GR2M model and *SimulHyd* model, a set of three significant models parameters inter-changeability are detected: *SimulHyd* is better in validation process after 1970 using the calibrated parameters from GR2M before 1970, in forward modeling; GR2M is better in validation process before 1970 using the calibrated parameters from *SimulHyd* after 1970; and in some cases the models are more efficient in validation than in calibration. The combination both of two hydrological models drifting one of the other and of two concepts of modeling are used to demonstrate a success in the synergy of four models versions to simulate more accurately the behaviors of hydrological systems. This particularity of these models versions, responding positively in models parameters importing and exporting between different models versions, can be explored in the context of assessing climate change impacts on water resources.

1. Introduction: Study area and material

The study area spreads geographically between the twelfth western degree and the seventh northern degree following the longitude, and between the seventh northern degree and thirteenth northern following the latitude, covering partially Guinea, the Ivory Coast, and Mali.

SimulHyd-Data (Input):

- ◆ Precipitation database from British Atmospheric Data Center (BADC)
- ◆ Potential Evapotranspiration from BADC
- ◆ Water Holding Capacity from SIEREM (French database)

SimulHyd-Data (output): runoff for models calibration and validation (from HSM Montpellier, and IRD).

2. Frameworks: SimulHyd and GR2M

GR are Hydrologic models from CMA/GREP

As: Constant (200 mm) or As: Water holding Capacity

(X1, X2): model parameters

SimulHyd stems from proposed modifications of GR2M:

A = (X1), WBC

0.00000001-23.1 (-) 0.00000001-75.1 (-)

GR2M: As=WBC, Water Holding Capacity

SimulHyd: Constant of Evapotrans. As=(X1), WBC

3. SimulHyd Validation (Inter-comparison)

"Robust approach" of inter-comparison results presentation

Classical comparison of four model versions

Inter-comparison Map

Results of a (4) models inter-comparison (a)

Results of a (2) models inter-comparison (b)

Results of a (2) models inter-comparison (c)

4. Results of Inter-changeability of Parameters between models versions

Calibration before 1970 & Validation after 1970

SimulHyd responses positively to parameters importing (a)

GR2M responses positively to parameters importing (b)

Calibration after 1970 & Validation before 1970

GR2M responses positively to parameters importing (b)

SimulHyd responses positively to parameters importing (a)

Parameters importing into SimulHyd semi-distributed is the most promising

Parameters importing into GR2M Non-distributed is the most promising

5. Conclusion and perspectives

The limitation of these methods is related to the accuracy needed in a study when less accuracy is required: more efforts for less results, otherwise:

- ◆ The tool built with these models versions permits to break models dependence to samples in importing calibrated parameter from elsewhere.
- ◆ SimulHyd Semi-distributed (using imported calibrated parameters) would be useful in modelling for Climate Change impacts assessment.
- ◆ GR2M and SimulHyd (using imported calibrated parameters) would be both useful in passed ecosystem restoration studies and in basin filling in runoff data.

References:

ARDON-BARDIN S., 2004. "Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands Bassins hydrographiques en zone Soudano-Sahélienne". PhD Université Montpellier II.

GARREK M., CUNYAN S. C., Nash J. E., 1977. "A criterion of efficiency for rainfall-runoff models". *Journal of Hydrology*, 36 (1978) 375-381.

KONÉ S., 2013. "Niger River Basin - Hydrological Modelling: Following Frameworks, Twenty-Fourth Colloquium of African Geology (CAAG), Abidjan, Côte d'Ivoire, January 8-14, 2013.

KONÉ S., 2007. "Comparaison entre une modélisation semi-distribué et une modélisation globale". MSc, Université Montpellier 2.

PERREN C., 2000. "Vers une unification d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative". PhD, Institut National Polytechnique de Grenoble.

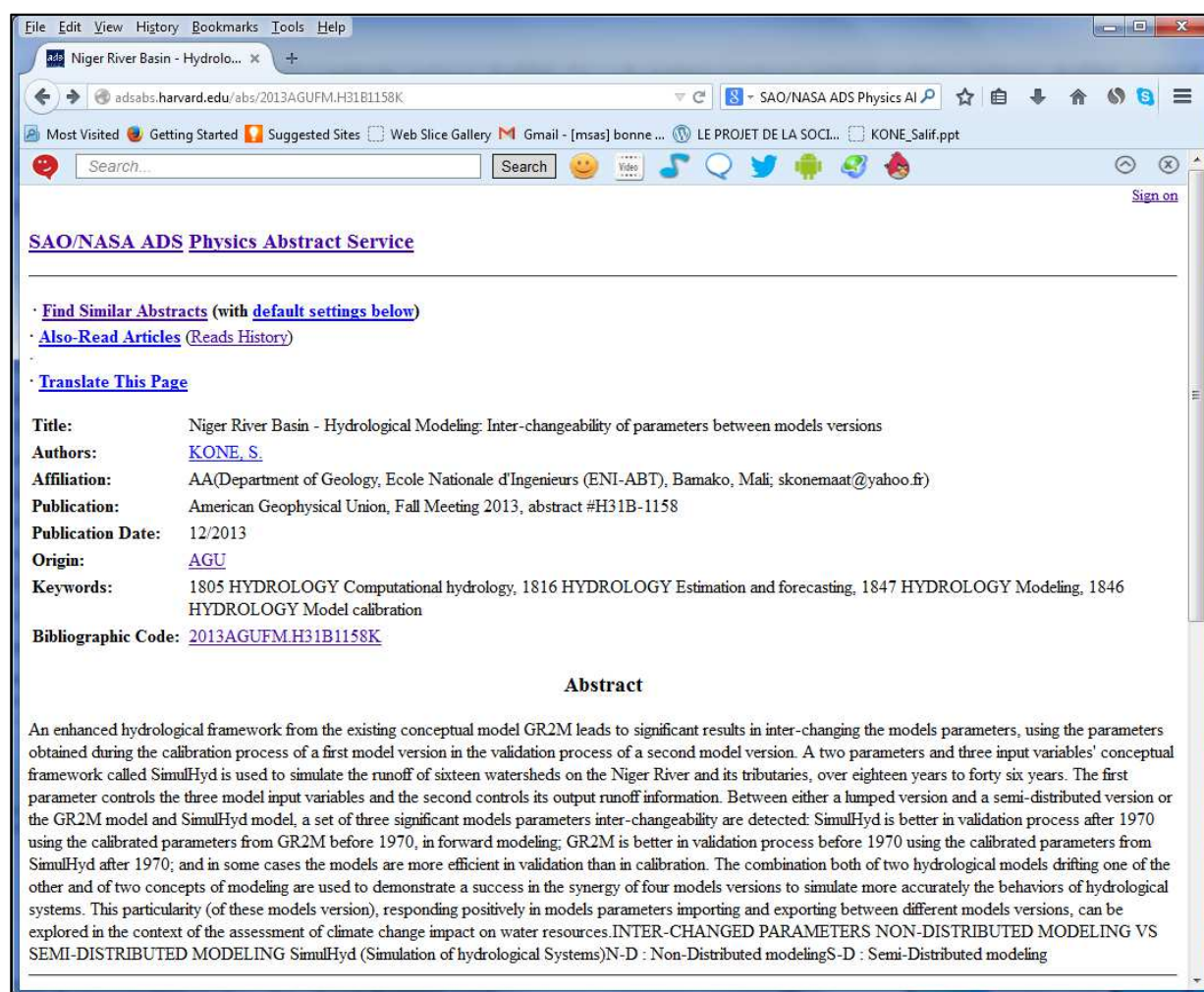
SHUKLA J., JOHSTTER A., 1998. "Simulation of extreme meteorological of catchment in order of using modélisation pluie-débit en zone de climat semi-aride". *Hydrological Sciences*, vol. 43, n°2, 1998, 147-160.

<http://www.compadre.org/physics/theses.htm>

<http://www.ijb-hydro.com/ijb/>

<http://bdr.cerf.ac.uk/>

<http://adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFM.H31B1158K>



SAO/NASA ADS Physics Abstract Service

- [Find Similar Abstracts \(with default settings below\)](#)
- [Also-Read Articles \(Reads History\)](#)
- [Translate This Page](#)

Title: Niger River Basin - Hydrological Modeling: Inter-changeability of parameters between models versions

Authors: [KONE, S.](#)

Affiliation: AA(Department of Geology, Ecole Nationale d'Ingenieurs (ENI-ABT), Bamako, Mali; skonemaat@yahoo.fr)

Publication: American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, abstract #H31B-1158

Publication Date: 12/2013

Origin: [AGU](#)

Keywords: 1805 HYDROLOGY Computational hydrology, 1816 HYDROLOGY Estimation and forecasting, 1847 HYDROLOGY Modeling, 1846 HYDROLOGY Model calibration

Bibliographic Code: [2013AGUFM.H31B1158K](#)

Abstract

An enhanced hydrological framework from the existing conceptual model GR2M leads to significant results in inter-changing the models parameters, using the parameters obtained during the calibration process of a first model version in the validation process of a second model version. A two parameters and three input variables' conceptual framework called SimulHyd is used to simulate the runoff of sixteen watersheds on the Niger River and its tributaries, over eighteen years to forty six years. The first parameter controls the three model input variables and the second controls its output runoff information. Between either a lumped version and a semi-distributed version or the GR2M model and SimulHyd model, a set of three significant models parameters inter-changeability are detected: SimulHyd is better in validation process after 1970 using the calibrated parameters from GR2M before 1970, in forward modeling; GR2M is better in validation process before 1970 using the calibrated parameters from SimulHyd after 1970; and in some cases the models are more efficient in validation than in calibration. The combination both of two hydrological models drifting one of the other and of two concepts of modeling are used to demonstrate a success in the synergy of four models versions to simulate more accurately the behaviors of hydrological systems. This particularity (of these models version), responding positively in models parameters importing and exporting between different models versions, can be explored in the context of the assessment of climate change impact on water resources. INTER-CHANGED PARAMETERS NON-DISTRIBUTED MODELING VS SEMI-DISTRIBUTED MODELING SimulHyd (Simulation of hydrological Systems)N-D : Non-Distributed modelingS-D : Semi-Distributed modeling

Le poster de présentation (de l'abstract ci-dessus), selon la règle d'*American Geophysical Union (AGU)*, est resté disponible en accès libre et téléchargeable sur leur serveur durant le premier semestre 2014 ; et ce même abstrait a fait l'objet de présentation orale enregistrée en vidéo sous le numéro **H31B-1158** durant la session **H21N**, à San Francisco, USA, en Décembre 2013.

Salif Koné, 2013d, Niger River Basin – Hydrological Modelling: Inter-changeability of parameters between models versions. Abstract H31B-1158 presented at 2013 Fall Meeting 2013, AGU, San Francisco, CA, 9-13 Dec. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFM.H31B1158K>
http://virtualoptions.agu.org/media/H31B-1158.+Niger+River+Basin++Hydrological+ModelingA+Inter-changeability+of+parameters+between+models+versions/1_2y7k40ob [04 Septembre 2014]

10.2 [239-CAG24] Niger River Basin - Hydrological Modelling: Enhancing Framework Accuracy

Salif Koné^{1,2}

¹ Department of Geology, Ecole Nationale d'Ingénieurs -Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT) 410, Av. Van Vollenhoven, BP: 242 – Phone: (+223) 20 22 27 36 – Fax: (+223) 20 21 50 38 / Bamako-Mali.

² PhD candidate at Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA) Sis N'Golonina Road 268, Gate: 238, BP: E475 – Phone/Fax: (+223) 20 21 04 66 / Bamako-Mali. skonemaat@yahoo.fr

Abstract: Modelling has become a central component in river basin management and surface water assessment tools; on such river as Niger where more effort is needed to improve understanding of hydrological processes by riverside country researchers and decision-makers, handling and enhancing models are good ways to merge towards an efficient Framework. We used a framework with 2 parameters and 3 input variables to simulate the output of 16 watersheds on Niger River and its tributaries over 50 years. The first parameter of the model controls all the 3 input variables and the second controls the output information. We modified an existing Water Balance Model (WBM)-Genie Rural at 2 parameters and Monthly time step (GR2M), which previously had its first parameter that controlled only 2 of its 3 input information. Based on an inter-comparison approach of different versions of a model (either varying the influence of the controlling-parameter on input information or dealing with a global or semi-distributed structure), we showed the high performance and the validity of the proposed framework. Our results demonstrate that, in conceptual modelling, extending the influence of the input-controlling-parameter to all the model inputs allows more flexibility to the model to better simulate the output information and to have good accuracy in the simulated data. At each time step, this parameter is directly applied to the variables rain and evaporate-transpiration and its inverse is applied to the variable Water Holding Capacity. The other parameter controls the model output. The modification from a 2-input-controlled-variable to a 3-input-controlled-variable, in the framework, produced an improvement in simulation results both in non-distributed (lumped hydrological modelling) and in semi-distributed modelling. This proposed framework on Simulation of Hydrological systems is called SimulHyd. It would be interesting to repeat this study in other regions and to apply the same modification on other Water Balance Models that showed some efficiency on Niger River.

Key-words: Niger River basin; hydrological Modelling; SimulHyd; Inter-comparison; Accuracy

Le poster de présentation de l'abstract ci-dessus se trouve sur la page suivante et son numéro dans le livre des abstracts du colloque, à Addis Abeba (en Janvier 2013), est 239 comme cité ci-dessous :

Salif Koné (2013a), Niger River Basin – Hydrological Modelling: Enhancing Framework Accuracy. **Abstract 239** presented at the Twenty Fourth Colloquium of African Geology (CAG24), Addis Ababa, Ethiopia. January 8-14, 2013.

Niger River Basin - Hydrological Modelling: Enhancing Framework Accuracy



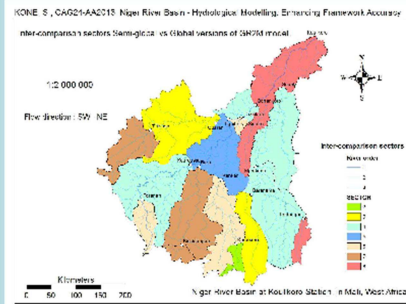
Salif Koné^{1,2}



1. Department of Geology, Ecole Nationale d'Ingénieurs - Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT)
410, Av. Van Vollenhoven, BP: 242 – Phone: (+223) 20 22 27 36 / Bamako-Mali.
2. PhD candidate at Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA)
Sis N'Golonina Road 268, Gate: 238, BP: E475 – Phone/Fax: (+223) 20 21 04 66 /Bamako.
(Email: skonemaat@yahoo.fr)

24th Colloquium of African Geology – Addis Ababa 2013

Abstract: Modelling has become a central component in river basin management and surface water assessment tools; on such river as Niger where more effort is needed to improve understanding of hydrological processes by riverside country researchers and decision-makers, handling and enhancing models are good ways to merge towards an efficient Framework. We used a framework with 2 parameters and 3 input variables to simulate the output of 16 watersheds on Niger River and its tributaries over 50 years. The first parameter of the model controls all the 3 input variables and the second controls the output information. We modified an existing Water Balance Model (WBM)-Genie Rural at 2 parameters and Monthly time step (GR2M), which previously had its first parameter that controlled only 2 of its 3 input information. Based on an inter-comparison approach of different versions of a

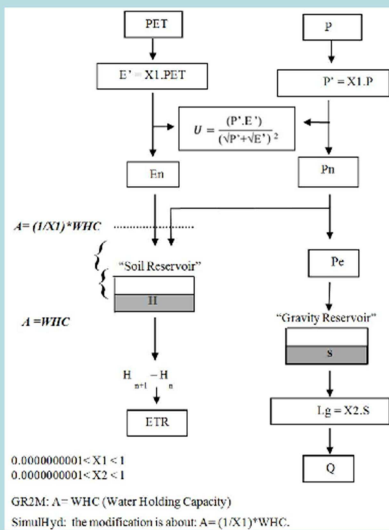


model (either varying the influence of the controlling-parameter on input information or dealing with a global or semi-distributed structure), we showed the high performance and the validity of the proposed framework. Our results demonstrate that, in conceptual modelling, extending the influence of the input-controlling-parameter to all the model inputs allows more flexibility to the model to better simulate the output information and to have good accuracy in the simulated data. At each time step, this parameter is directly applied to the variables rain and evapote-transpiration and its inverse is applied to the variable Water Holding Capacity. The other parameter controls the model output. The modification from a 2-input-controlled-variables to a 3-input-controlled-variables, in the framework, produced an improvement in simulation results both in global

(lumped hydrological modelling) and in semi-global (semi-distributed) modelling. This proposed framework on Simulation of Hydrological systems is called *SimulHyd*. It would be interesting to repeat this study in other regions and to apply the same modification on other Water Balance Models that showed some efficiency on Niger River.

Key-words: Niger river basin; hydrological Modelling; *SimulHyd*; Inter-comparison; Accuracy

Framework



Inter-comparison Method Components

Nash Criteria of Efficiency
If q^d represents the observed runoff and $q^d_{simulated}$ the simulated runoff:
The sum of the residual square is: $F_0^2 = \sum_k (q^d - q^d_{simulated})^2$
which can be compared with a reference model
 $F_0^2 = \sum_k (q^d - \bar{q}^d)^2$
where \bar{q}^d is the average of the observed runoff.
Nash efficiency is defined as: $R^2 = 1 - \frac{F_0^2}{F_0^2 - F_0^2}$
 k is an index-number on the time step.

First proposed Criteria by Garrick and al. (1977) : "Criteria Nash-Garrick"
Supposed: $q^d = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K q^d_{k,d}$, q^d corresponds to the inter-annual runoff average at the date d (d= January for example)
In a monthly time step modelling: $q^d_{k,d}$ would be the observed runoff at the date d and at the k^{th} year of modelling; K would be the total number of years of modelling period.
 q^d would be the average of the observed runoff at the date d (example: all January)
The sum of the residual square is: $F_{1d}^2 = \sum_k (q^d_{k,d} - q^d_{simulated})^2$
which can be compared with a reference model
 $F_{1d}^2 = \sum_k (q^d_{k,d} - \bar{q}^d)^2$
Nash-Garrick efficiency is defined as: $R_d^2 = 1 - \frac{F_{1d}^2}{F_{1d}^2 - F_{1d}^2}$

Double Samples Technique (DST)
 $F = \frac{\sum_{k=1}^K (\sqrt{q^d} - \sqrt{q^d_{simulated}})^2 + \sum_{k=1}^K (\sqrt{q^d} - \sqrt{q^d_{reference}})^2}{\sum_{k=1}^K (\sqrt{q^d} - \sqrt{M})^2}$
 k : is the index-number on the modelling time step.
 q^d : is the observed runoff corresponding to the k^{th} time step.
 $q^d_{simulated}$: is the simulated runoff corresponding to the k^{th} time step.
 K_1 : number of time step of the "Running period"
 K_2 : the end of the first period, on which the model was calibrated.
 K : the total number of the modelling time step.
 \sqrt{M} : the average of $\sqrt{q^d}$ on the totality of the two periods.
 $\sqrt{M} = \frac{1}{K - (K_1 + 1)} \sum_{k=1}^K (\sqrt{q^d} - \sqrt{q^d_{reference}})$
*The concept of "Running period" of models, permits to mitigate the influence of initial conditions; simulation results are not take into account on it.

"Double Calibration Protocol"
$$\left\{ \begin{array}{l} F_{PC1}^{semi-global} - X1_{PC1}^{semi-global} - X2_{PC1}^{semi-global} = 0 \\ F_{PC2}^{semi-global} - X1_{PC2}^{semi-global} - X2_{PC2}^{semi-global} = 0 \end{array} \right.$$

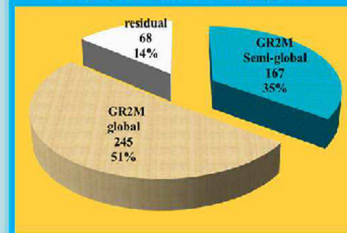
then (the score of global = 1, against 0 for semi-global, or else (the score of semi-global = 1, against 0 for global).
Then for parameter X2
$$\left\{ \begin{array}{l} F_{PC1}^{semi-global} - X2_{PC1}^{semi-global} - X1_{PC1}^{semi-global} = 0 \\ F_{PC2}^{semi-global} - X2_{PC2}^{semi-global} - X1_{PC2}^{semi-global} = 0 \end{array} \right.$$

then (the score of global = 1, against 0 for semi-global, or else (the score of semi-global = 1, against 0 for global).
We sum up the scores. The model version that will have the less score will be the one with the lowest "variance": its parameters are the less sensitive to the samples.

Results of Inter-comparison between SimulHyd and GR2M

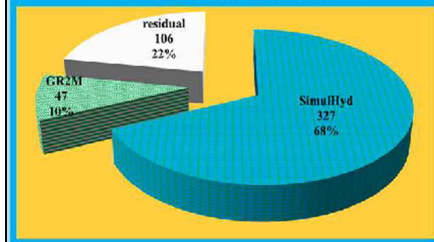
16 Basins				
Efficiency	Actions	Models	SimulHyd	GR2M
Bias	Evaluation Nash-Garrick (calibration)		160	30
	Evaluation Nash-Garrick (validation)		128	16
	Calibration Nash		15	1
	Validation Nash		12	0
Variance	Robustness (DST method)		12	0
	Sensitivity to Samples	X1		
	Nash (val)			
Score			327	47

Inter-comparison Results (Totalizing approach)

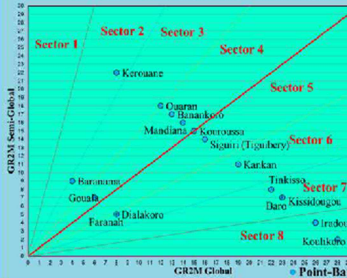


16 Basins				
Efficiency	Actions	Models	GR2M Semi-global	GR2M global
Bias	Evaluation Nash-Garrick (calibration)		82	110
	Evaluation Nash-Garrick (validation)		54	90
	Calibration Nash		2	14
	Validation Nash		4	8
Variance	Robustness (DST method)		5	7
	Sensitivity to Samples	X1	7	5
	Nash (val)	X2	7	5
Score			167	245

Inter-comparison Scores SimulHyd vs GR2M



Inter-comparison Results ("Approach by Basins")



Bibliographical Reference
ARDOIN B. S., 2004. « Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands Bassins hydrographiques en zone Soudano-Sahélienne ». PhD. University Montpellier II.
GARRICK M., CUNNANE C., Nash J.E., 1977. A criterion of efficiency for rainfall-runoff models. Journal of Hydrology, 36 (1978) 375-381.
KONE S., 2007. "Comparaison entre une modélisation semi-globale et une modélisation globale. MSc., University Montpellier II.
PERRIN C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. PhD. Institut National Polytechnique de Grenoble.
SERVAT E., DEZETTER A., 1990. Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. Hydrol. Continent, vol. 5, n°2, 1990: 147-165.
<http://www.cemagref.fr/webgr/index.htm>
<http://www.hydrosciences.org>

10.3 [AGU Abstract#14059 / GC53B-0522]: Hydrological Modelling Improvements Propositions and Applications Results on the Niger River

Salif Kone^{1,2}, Fatogoma Bamba² and Oumar Soumare²

(1) Université des Sciences Juridiques et Politiques de Bamako, Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (USJPB/ISFRA), Bamako, Mali,

(2) Malian National School of Engineers (ENI-ABT), Department of Geology, Bamako, Mali
skonemaat@yahoo.fr

Abstract: The modification of lumped models to corresponding semi-distributed ones implies the identification of an optimal weighting factor on different grids. The necessity of such hypothetical weighting factor is shown through two successful proposed protocols, inter-models and inter-basins, using both versions either of GR2M model or SimulHyd model, on sixteen watersheds on the Niger River and its tributaries, over eighteen to forty six years. The assumption of the first protocol is that the difference in performance between the lumped and the semi-distributed versions of a model is due to the spatial variance of soil information in entry of semi-distributed model version. The correlation between the variance coefficient of Water Holding Capacity (WHC of soil) and the relative difference of model versions (between their performances in terms of Nash criteria) decreases in absolute value from 0.76 to 0.21 when a proposed weighting factor is applied in semi-distributed modelling; so, through the weighting factor the variance information of WHC is taken into account, and the correlation between relative difference of model versions (in terms of performance) and this information is decreased: more this de-correlation is, more the weighting factor that improve the performance of a semi-distributed model is better. The proposed weighting factor is built based on the variance coefficient of WHC. Behind the inter-basins protocol is an assumption that: imbedded basins would have influences during the calibration process of model parameters on a large basin that contains them; it aims to test whether the information from upstream discharge stations could be useful during the modelling process in a downstream discharge station. In the same period, the calibration of a model version on each sixteen basin is performed, following by its validation on fifteens basins using the set of calibrated parameters of the model on the largest basin (Koulikoro). On a basin the lowest the difference of performance is, the highest is the considered influence of this basin to the calibration process of the model parameters on the Koulikoro basin. The coefficient of correlation between the series of relative difference of performances (on a basin) and the series of relative difference of mean WHC values (of each basin against Koulikoro Basin) is - 0.33.]

L'abstract ci-dessus est affiché sur le serveur d'*American Geophysical Union* et pourrait être objet de Poster sur ce serveur pour le 15 et 19 Décembre 2014, à San Francisco, USA.

Salif Koné, 2014b, Hydrological Modelling Improvements Propositions and Applications Results on the Niger River, Abstract#14059 and **GC53B-0522**, failed to be presented at 2014 Fall Meeting, AGU, San Francisco, CA, [15-19 Dec.]
<https://agu.confex.com/agu/fm14/webprogrampreliminary/Paper14059.html> [04 September 2014]

10.4 Connection Zones, Surface Water – Groundwater: Aquifers Associated To Niger Central Delta, In Mali.

CONNECTION ZONES, SURFACE WATER – GROUNDWATER: AQUIFERS ASSOCIATED TO NIGER CENTRAL DELTA, IN MALI

Salif Kone^{1,2}

¹ Department of Geology, at Ecole Nationale d'Ingénieurs -Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT) 410, Av. Van Vollenhoven, BP: 242 – Phone: (+223) 76 39 60 09 / (+223) 20 22 27 36 Bamako-Mali.

² PhD student at Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA) Sis N'Golonina Road 268, Gate: 238, BP: E475 – Phone/Fax: (+223) 20 21 04 66 /Bamako-Mali.

Email: skonemaat@yahoo.fr

Surface water infiltration recharging Mali aquifers occurs through, underlying perched hydrogeological networks, lacustrine zones of the Central Delta or inundation valleys. The mapping of both the Surface water and the Groundwater, their types and availabilities, are briefly presented, and the focus of the study is on the types of hydraulic connections between these water bodies. The aquifers hydraulically connected to the Niger Central Delta flows systems are Continental Terminal/Quaternary, and they concern some areas where either inundation or perennial surface water flow occurs. These aquifers belong to the hydrogeological Unit of Central Delta where the recharge by surface water is estimated to be five percent of the flow loss between the entry and the outlet of this hydrological system. Some attempts of simulation along with a review based on the first studies synthetized in “*Synthese Hydrogeologique du Mali*” would permit to pave the way to other studies on these hydraulically connected zones in Mali. A previews simulation study, about mapping the potential rate of pumping capacity, corroborates some observed structural characteristics and leads to subdivide the area in two hydrogeological sectors, and the present simulation studies focus on the sector “Macina –Diaka” where surface water are in hydraulic relation with groundwater.

Key words: Surface water, Groundwater simulation, Recharge processes, hydraulic relation.

Salif Koné (2013c), Connection Zones, Surface Water – Groundwater: Aquifers Associated To Niger Central Delta, In Mali. Abstract presented at the Second Groundwater and Global Palaeoclimate Signals (G@GPS) meeting, at Bobole, Maputo, Mozambique, October 14-19. http://www.gw-gps.com/wp-content/uploads/2013/10/Mozambique_Full_program-14-19_Oct_2013.pdf [Page 19, 04 September 2014] or <http://www.gw-gps.com/wp-content/uploads/2014/01/Newsletter-1-2013.pdf> [Page 11, 04 September 2014]

10.5 Solar Radiation Management: African Participation Challenges. Fourth Interdisciplinary

Solar Radiation Management: African Participation Challenges

Salif Koné^{1,2}

1. Department of Geology, *Ecole Nationale d'Ingénieurs -Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT)* 410, Av. Van Vollenhoven, BP: 242 – Phone: (+223)20 22 27 36 / Bamako-Mali.
 2. PhD candidate at *Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA)* Sis N'Golomina Road 268, Gate: 238, BP: E475 – Phone/Fax: (+223)20 21 04 66 /Bamako. (Email: skonemaat@yahoo.fr)

4th Interdisciplinary Summer School on Geoengineering at Harvard University, Cambridge, MA, 2013.

KNOWLEDGE AND APPLICATION OF SRM

SRM refers to proposals to cool the Earth by reflecting a small percentage of inbound sunlight back to space, in order to reduce global warming. ⁽¹⁾

Figure from the Royal Society's "Geoengineering the Climate: Science, governance and uncertainty". (Shepherd et al., 2009) (2)

FREE ACCESS TO EXPERIMENTS RESULTS AND DATABASES

For African scientific institutions allow an open access not only to publications, but also to experiments results.

Figure From Google image

MULTI-MODEL MEANS OF SURFACE WARMING (Meehl et al 2007)

From the IPCC Fourth Assessment Report of Working Group 1. ⁽³⁾

MODEL OF COALITION FORMATION AND COMPETITION (Ricke et al., 2013)

(a) Population-Weighted

(b) GDP-Weighted

The benefits of exclusive coalition-implemented solar geoengineering relative to open membership by region in 2070. ⁽⁴⁾

SRM : ALTERNATIVE APPROACHES TO GOVERNANCE ⁽⁵⁾

- o A collection of independent national policies
- o A non-governmental, transnational code of conduct
- o Adapting existing international environmental instruments and institution(s)
- o The formation of a new international instrument or institution

CONCLUSION

Required monitoring stations (Network) to access whether SRM projects are impacting on continental, Regional, or local climate and how strength there are. Equip African scientific institutions or Regional monitoring centers with adequate instrumental and computational capabilities.

REFERENCES:

⁽¹⁾ ⁽⁵⁾ Environmental Defense Fund (EDF), The Royal Society, and TWAS.org. Solar radiation management: the governance of research. ISEN 978-0-85403-933-3

⁽²⁾ John Shepherd, Ken Caldeira, Joanna Haigh, David Keith, Brian Launder, Georgina Mace, Gordon MacKerron, John Pyle, Steve Rayner, Catherine Redgwll, and Andrew Watson. Geoengineering the climate: science, governance and uncertainty. Technical report, Royal Society, 2009. URL "http://royalsociety.org/document.asp?tip=0&id=8770".

⁽³⁾ G.A. Meehl, T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gays, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver, and Z.-C. Zhao. Global Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, September 2007. ISBN 0521880092.

⁽⁴⁾ Katharine L Ricke, Juan B Moreno-Cruz, and Ken Caldeira. Strategic incentives for climate geoengineering coalitions to exclude broad participation. Environ. Res. Lett. 8 (2013) 014021 (8pp). Doi:10.1088/1748-9326/8/1/014021

Poster Session
Harvard University / August 5th – 9th, 2003.

10.7 À Présenter à la Conférence International sur les Bassins Hydrologiques des Grands Fleuves d'Afrique : Tunisie, 26 au 30 Octobre 2015, Hotel Hamamet.

Utilisation de la Géostatistique pour l'Estimation de Paramètres des Modèles Hydrologiques sur des sous-bassins versants du haut Niger à Koulikoro.

Salif Koné^{1,2}, Gil Mahé³, Fatogoma Bamba¹

¹Département de Géologie, École Nationale d'Ingénieurs -Abderhamane Baba Touré, Bamako, Mali

²Docteurant à l'Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA), Bamako, Mali

³Institut de Recherche pour le Développement/ Laboratoire HydroSciences, Montpellier, France

skonemaat@yahoo.fr

La géostatistique, qui permet de comprendre davantage l'inférence spatiale existante au sein de la distribution d'une variable, conduit au développement d'une *méthodologie hydro-géostatistique*, pour l'estimation des paramètres de modèle en hydrologie, sur 15 sous-bassins du haut Niger à Koulikoro. Nous avons « dé-corrélé » la différence de performance des modèles par rapport à la variabilité spatiale des données d'une propriété physique du sol – spécifiquement la capacité de rétention du sol en eau (en Anglais *Water Holding Capacity ou WHC*). Cette dé-corrélation passe par l'application d'un coefficient de pondération des lames d'eau (simulées) en modélisation semi-distribuée ; l'amélioration apportée au modèle hydrologique semi-distribué est alternativement évaluée à travers un procédé dénommé *protocole inter-modèles* : un coefficient de corrélation (entre la série formée par les différences relatives de performance de deux versions de modèle et celle formée par les coefficients de dispersion relative des WHC par bassin versant) qui passe de 0.80 à 0.21 en valeur absolue pour le modèle hydrologique SimulHyd. Ce modèle est issu d'une modification de GR2M, en remplaçant la constante A (ou la capacité maximale du *réservoir sol* au sein du modèle GR2M) par le terme $1/X1.WHC$; avec X1 le paramètre interne de GR2M qui module les données d'entrée de la modélisation ; le coefficient de pondération utilisé au sein de SimulHyd semi-distribué, est bâti à partir de l'information de la variance empirique (dispersion) des valeurs de WHC entre les mailles du bassin versant. Nous proposons un *protocole inter-bassins* dont la vocation est de bâtir un espace dénommé *NASH-WHC*, différent de l'espace géographique habituel, où un modèle semi-distribué avec coefficient de pondération s'illustre mieux ; ce qui se traduit par une meilleure corrélation (un coefficient de 0.48) pour la structure spatiale des point-bassins dans cet espace, (au lieu de 0.36 lorsque le coefficient de pondération n'est pas utilisé). La *méthodologie hydro-géostatistique* constitue un prolongement géostatistique de ce *protocole inter-bassins*, où les outils et démarches de la géostatistique classique est appliqués pour la modélisation et la simulation des valeurs des paramètres des modèles hydrologiques dans cet espace *NASH-WHC* ; et ceci, partant des bassins jaugés pour une possible application sur des bassins non-jaugés. Nos démarches préliminaires, qui ont conduit à des résultats de validation de cette méthodologie, ont consisté à combiner les paramètres X1 de quatre versions différentes des modèles GR2M/SimulHyd (non-distribués/semi-distribués avec coefficient de pondération sur WHC) en vue d'atteindre un nombre élevé d'échantillons pour la modélisation géostatistique (un nombre de 50 échantillons est communément utilisé dans ces types études) ; et la validation croisée, partant des données qui n'ont pas servi lors de cette modélisation, est faite avec ceux (les paramètres X1) de deux autres versions de ces modèles hydrologiques (GR2M/SimulHyd semi-distribués sans coefficient de pondération sur WHC). Idem pour le paramètre X2. Nous explorons l'application de cette méthodologie en considérant à la fois qu'une seule version des modèles GR2M/SimulHyd, en faisant le calage et validation sur quatre périodes différentes pour chacun des 15 échantillons de sous-bassin versant. En plus, le krigeage/co-krigeage des paramètres X1 et X2 est fait séparément sur les

séries de périodes de hautes et de basses eaux. Cette méthodologie permet d'effectuer des prévisions de simulation des ressources sur des bassins versants non-jaugés.

Mot clés : Niger, Modélisation, GR2M, SimulHyd, géostatistique

Stations	Calibration			Estimation « hydro-géostatistique »		
	X1	X2	Nash	X1	X2	Nash
Kouroussa	0.513	0.509	85.21	0.479	0.532	83.81
Faranah	0.499	0.497	65.05	0.62	0.477	48.15

Tableau 1 : Performance en calibration versus Estimation « hydro-géostatistique » des paramètres.

[L'estimation des paramètres de modèles hydrologiques à travers la méthodologie hydro-géostatistique, est suivant l'hypothèse que le sous-bassin n'est pas jaugé. Ainsi, son application sur un bassin jaugé, sans prendre en considération les données de jaugeage de ce dernier, produit un jeu de paramètres qui conduira à une moindre performance du modèle hydrologique en validation que si ce modèle est directement calé avec les données de jaugeage du bassin versant (les débits mensuels). Pour le triplet (X1, X2, Nash), les variations obtenues du passage d'un modèle calé sur un bassin versant à travers les données de jaugeage de ce dernier à ce même modèle validant le jeu de paramètres estimés suivant l'hypothèse que le bassin n'est pas jaugé (méthodologie hydro-géostatistique) sont illustrées dans le **Tableau 1 ci-dessus** sur les sous-bassins de Kouroussa et de Faranah, sur le fleuve Niger. Le modèle utilisé est la version Semi-distribuée de SimulHyd avec coefficient de pondération sur WHC. À la station de Kouroussa, l'écart relatif absolu, du passage de la simulation (lors de la phase de calibration 1950-1995) à celle de la méthodologie « hydro-géostatistique », est respectivement 6.63% pour X1, 4.52% pour X2, et 1.64% pour le critère de Nash. Quant à la station de Faranah (1969-1995) ces valeurs sont 24.25% pour X1, 4.02% pour X2, et 25.98% pour le critère de Nash. Ces valeurs de Nash suggèrent une légère baisse de performance du modèle SimulHyd semi-distribué à la station de Kouroussa (1.64%), alors que cette baisse est relativement drastique à la station de Faranah (25.98%).]

10.8 À Présenter à la Conférence International sur les Bassins Hydrologiques des Grands Fleuves d'Afrique : Tunisie, 26 au 30 Octobre 2015, Hotel Hamamet.

Application de la Modélisation à des Situations Futures et Performances Comparées des Modèles : Sous-bassins du Haut Niger à Koulikoro.

Salif Koné^{1,2}, Gil Mahé³, Fatogoma Bamba¹

¹Département de Géologie, École Nationale d'Ingénieurs -Abderhamane Baba Touré, Bamako, Mali

²Docteurant à l'Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA), Bamako, Mali

³Institut de Recherche pour le Développement/ Laboratoire HydroSciences, Montpellier, France

skonemaat@yahoo.fr

Nous présentons la performance comparée des modèles GR2M et SimulHyd (une variante de GR2M), successivement, à simuler des débits maximum, à faire des projections futures à trois horizons différents (2010-2039, 2040-2069, et 2070-2099), et à reproduire un coefficient de tarissement sur deux périodes contrastées (hautes et basses eaux). Sur un échantillon de quinze sous-bassins versants du haut Niger à Koulikoro (inclus), deux approches complémentaires sont adoptées, l'une dite *régionale* où la valeur la plus élevée de la série de débits observés de chaque exutoire de sous-bassin est considérée, et l'autre dite *ponctuelle*, et qui concerne quinze valeurs de débits maximum à la station de Koulikoro sur la période 1907-1999. Le constat, partant de la première approche (*régionale*), est que la différence relative entre les débits maximum observé et calculé par les modèles est au plus 36 % ; et cette différence entre les résultats de simulation des modèles GR2M et SimulHyd par rapport à l'observation est au plus 8%. Ces pourcentages obtenus partant de la deuxième approche (*ponctuelle*) sont successivement de 50% et 6%. Le modèle SimulHyd simule mieux le débit maximal que le modèle GR2M ; l'exception est faite à la station de Baranama où les deux modèles surestiment le débit maximal. Cette situation de surestimation du débit maximal est constatée lors de l'approche *ponctuelle* en Septembre 1985 et 1991 à la station de Koulikoro. Les projections sont faites partant d'une simple hypothèse de baisse pluviométrique de 10%, sans une étude des sorties des Modèles de Circulation Générale (MCG). De cette hypothèse, les modèles GR2M et SimulHyd produisent les mêmes saisonnalités sur un horizon considéré, seulement que le *concept d'interchangeabilité* de jeu de paramètres entre versions de modèles induit des différences de comportement entre ces deux modèles. Les projections des modules de débit aux horizons 2020 et 2050 sont quasiment les mêmes en amplitude, avec les versions non-distribuées des modèles GR2M et SimulHyd (utilisant leur propre jeu de paramètres respectifs) ; et les amplitudes des débits (en saison de hautes-eaux) sont loin plus faibles à l'horizon 2080 qu'aux horizons 2020 et 2050. Le coefficient de tarissement, généralement calculé partant des données d'observation journalier ou mensuel, peut rendre compte des processus de sub-surface lors de la participation de l'écoulement souterrain au débit à l'exutoire d'un bassin versant, en période de basses eaux. L'adaptation de la méthode mensuelle, du calcul de ce coefficient, aux données d'une « année standard » constituée si possible des modules de débits de la période 1950-1970, idem pour la période 1971-1995, a servi d'explorer certaines subtilités des modèles GR2M et SimulHyd. En optant pour fonction diagnostique, la forme logarithmique du critère de performance de Nash (**Figure 1**), les modèles GR2M et SimulHyd reproduisent mieux, en phase de calage, le coefficient de tarissement sur la période de hautes eaux (1950-1970) ; ce qui est loin d'être le cas sur la période de basses eaux (1971-1995), et Il arrive même que SimulHyd reproduise l'effet inverse observé (une diminution du coefficient de tarissement au lieu d'une augmentation). Ces constats sont davantage valables en utilisant la forme logarithmique de Nash, qu'en utilisant sa forme habituelle. Enfin, pour chaque modèle, l'utilisation du jeu de paramètre calé sur la période de basses eaux (1971-1995), en validation sur la période de hautes eaux (1950-

1970), permet de reconstituer le coefficient de tarissement observé (α) sur cette période de basses eaux. L'*Hydrosystèmes-en-période-hautes-eaux-de-référence* se comporte comme un « modèle en boîte noire » qui prend en son entrée le jeu de paramètres ($X1$, $X2$) [basses eaux] et produit à sa sortie le coefficient de tarissement α [basses eaux]. L'inverse est relativement moins bien vérifié. Le jeu de paramètres garde l'empreinte de la période sur laquelle il a été calé ; et la restitue lorsqu'il est injecté dans un *Hydrosystème-Période-de-Reference*. La suite de cette étude nécessite, d'une part, de partir des sorties des Modèles de Circulation Générale pour investir davantage les comportements comparés des modèles sur les horizons futures, et d'autre part, d'adapter les modèles utilisés pour la prises en compte des processus de sub-surface.

Mot clés : Niger, Modélisation, GR2M, SimulHyd, Tarissement

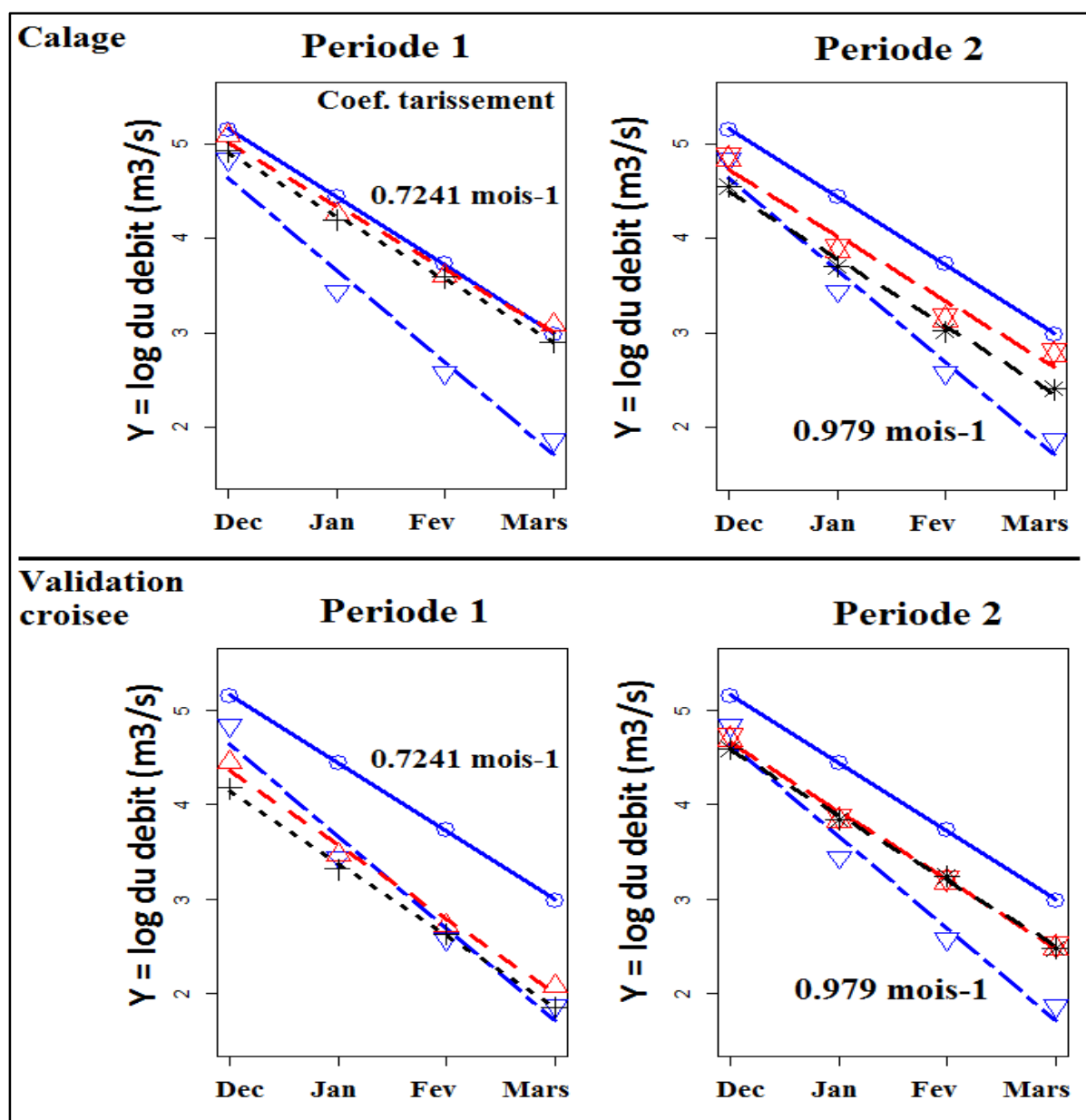


Figure 1 : Estimation de coefficients de tarissement sur le fleuve Niger (à Kouroussa). (Période 1 de hautes eaux [1950-1970] ; période 2 de basses eaux [1971-1995]. Simulation de GR2M en noire [trait pointillé et le signe plus] ; Simulation de SimulHyd en rouge [trait avec brisures et triangle pointé vers le haut] ; les observations sont en bleu [signe rond et trait plein avec une pente de 0.7241 sur 1950-1970 ; signe triangle pointé vers le bas et trait en brisures pointillées avec une pente de 0.979 sur 1971-1995).