

ECOLE NATIONALE DU GENIE RURAL, DES EAUX ET DES FORÊTS

N° attribué par la bibliothèque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'ENGREF

Spécialité: Sciences de l'Eau

préparée dans l'Unité de Recherche Hydrosystèmes et Bioprocédés

Cemagref, Antony

dans le cadre de **l'Ecole Doctorale Géosciences et Ressources Naturelles**

présentée et soutenue publiquement par

Marie BOURQUI

le 4 avril 2008

à l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

Centre de Paris

**Impact de la variabilité spatiale des pluies
sur les performances des modèles hydrologiques**

JURY

Cyril Kao
Cécile Loumagne
Roger Moussa
François Anctil
Gil Mahé
Hervé Andrieu
Rémy Garçon

Président
Directeur de thèse
Co-Directeur de thèse
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur

À Pierry

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée au sein de l'équipe Hydrologie du Cemagref à Antony. Qui dit équipe dit évidemment que le chemin, du début où l'on ne sait pas trop ce qu'on va faire jusqu'à la rédaction finale, n'a pas été parcouru seule...

Je voudrais en premier lieu remercier Cécile Loumagne, ma directrice de thèse, et Roger Moussa, mon co-directeur, de m'avoir fait confiance pour mener ces travaux. Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'on fait l'honneur d'être membres de mon jury : Gil Mahé et François Anctil qui ont été de méticuleux et complémentaires rapporteurs du manuscrit; Hervé Andrieu et Rémy Garçon (Arrêtes Rémy avec tes 300 mm !) pour leur rôle d'examineur et enfin Cyril Kao pour avoir accepté de présider ce jury. Je remercie également les personnes qui ont participé aux comités de suivi avec mes encadrants : Pierre Ribstein, Jacques Lavabre et Gérard Dégoutte.

Je voudrais aussi exprimer ma profonde gratitude et mon immense estime à Charles Perrin, qui a eu la délicate tâche de me suivre, de m'orienter, de m'épauler et de m'aider au quotidien jusqu'au dernier point du manuscrit. Sans son investissement sans limites (enfin je les ai cherchées, je n'ai pas trouvées) dans le suivi de mes travaux, le bilan de cette thèse aurait été moins positif que ce qu'il est à ce jour !

Une spéciale dédicace pour Vazken Andréassian, chef de l'équipe du groupe hydrologie, mais en fait bien plus qu'un chef d'équipe (conteur, chanteur, apiculteur, marieur, historien...).

Une pensée aussi pour Claude Michel, qui a désormais rendu son tablier, mais qui est l'instigateur de presque toutes les méthodes utilisées dans l'équipe.

Je voudrais donc remercier sincèrement ces trois "mentors" de l'équipe pour m'avoir mis sur les rails de la modélisation hydrologique et de m'en avoir fait comprendre toute la rigueur nécessaire.

Le dernier chapitre de cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'aimable concours d'Eric Martin et de Pere Quintina Segui de Météo-France à Toulouse, qui m'ont fourni les simulations du modèle SIM. Je les en remercie vivement. Je ne voudrais pas non plus oublier

Gilles Bonnet qui m'a donné accès au cluster de Clermont-Ferrand et qui, avec l'assistance de Lionel, m'a permis de gagner un temps inouï dans les calculs et l'organisation du travail.

Plus amplement maintenant, un grand merci à tous les membres permanents de l'équipe Hydrologie (Marine pour l'animation de la rubrique people, Jean-Louis pour les bases SIG, sans oublier Julien, Mamoutou, Pierre et Maria-Helena). Le même grand merci aux thésards et ex-thésards de l'équipe: merci à Thib, pour son appui sur les méthodes multi-modèle et aussi son soutien "piscicologique" et son aide à redémarrer la machine quand la motivation venait à manquer et aussi ravie qu'il soit devenu un excellent compagnon de ski de rando "social"; à Nico, grand gestionnaire des données Safran et collecteur de données hydrologiques mais aussi adepte des "boundaries conditions"; à Lionel, pour son appui technique informatique ; à Audrey, pour m'avoir supportée en tant que colocataire du bureau ; à Jean Luc, pour son soutien à coup de baklavas et aussi à Claudia, Nanée et Ludo. Je ne veux pas non plus oublier les stagiaires de l'équipe Seb, Bastien, Golnoush, Blandine et les nombreux autres...

Je voudrais remercier aussi les membres des autres équipes de l'unité HBAN du Cemagref d'Antony avec qui nous partageons les locaux pour leur accueil et leur gentillesse. En particulier, les écotoxo-pisci-épurateurs Yannick, Seb, Antoine, Vivien, Fred, Bastien et les autres pour l'animation pleine d'entrain autour de la machine à café et ailleurs. Ceux du deuxième sont aussi méritants notamment Béné (rédac' en chef RLP et courageuse et rigoureuse relectrice du manuscrit de cette thèse), Yves, François et Julien pour leur bonne humeur quasi permanente. Merci aussi à Sophie et Valérie pour la gestion de "choc" des affaires administratives, toujours avec le sourire !

Au Cemagref, bien sûr, on travaille dur mais c'est parce que l'on a l'occasion de se détendre ! Merci donc au participants quasi-infatigables de l'activité frisbee avec une dédicace pour François son précurseur. Merci aussi à ceux qui ont instauré les parcelles de jardin car biner les tomates et planter les salades en fin d'après midi après avoir déboguer un fortran, ça fait du bien ! Merci également à tous les apprentis apiculteurs dont j'ai fait partie et notamment à Vazken qui a fait des pieds et des mains pour installer les ruches sur le centre. Merci aussi à Evelyne et Laura de la billetterie ASSCR, leurs places de spectacles m'ont permis de découvrir d'innombrables lieux culturels parisiens.

Une dédicace aux membres encore actifs (ils se reconnaîtront !) du Club International d'Hydrologie Sociale, ainsi qu'au bar-restaurant chez Mamane pour son couscous excellent et son accueil extrêmement chaleureux tout au long de mes trois années et quelque de thèse.

Bon, il y a Paris, il y a la thèse, mais on garde toujours ses origines... Je voulais faire donc un petit coucou à la famille, aux "coupines" et "coupins" souvent très loin de la "grande ville". Ils n'ont pas pu faire grand-chose pour moi pour la thèse proprement dite mais ils ont été là au bon moment. Je voudrais particulièrement les remercier d'avoir fait le déplacement jusqu'à la capitale pour la soutenance et de s'être occupé de l'énorme pot de thèse : Emilie, Sophie(s), Céline, Cécile, Laurent, mon frère (digne représentant de Florence, d'Adèle et du dernier à naître), Christian, les tontons, les cousins, Pierre et Blanche, la famille Stolzenberg et mes infatigables mère et grand-mère.

Sans oublier évidemment Geoffroy que je remercie du "fond du cœur" pour avoir mis sa "griffe" dans le graphisme du PPT.

Le chapitre thèse est terminé, comme dirait Vazken, la suite est écrite, mais je n'ai pas encore trouvé où !

Bonne lecture

Résumé

La variabilité spatiale des précipitations est souvent considérée comme une importante source d'erreurs en modélisation hydrologique. Est-ce une idée reçue ? La lecture des nombreuses études publiées sur la question n'apporte en tout cas aujourd'hui pas de conclusions claires.

L'objectif de cette thèse est d'analyser l'impact de la variabilité spatiale des pluies sur les performances des modèles hydrologiques. Dans ce travail, nous avons cherché à dépasser les limites des études existantes (faible nombre de cas) et à parvenir à des conclusions aussi générales que possible en utilisant environ 200 bassins français, plusieurs modèles hydrologiques et deux pas de temps (horaire et journalier). L'essentiel du travail s'est concentré sur des modèles hydrologiques globaux qui ont été modifiés pour prendre en compte la variabilité spatiale des pluies. Nous avons cherché à quantifier les gains de performance rendus possibles par une prise en compte de cette variabilité. Dans ce travail, la variabilité des pluies a été évaluée sur la base du réseau de postes pluviométriques au sol.

Deux approches ont été explorées :

- La première consiste à introduire dans la structure du modèle global un indice de variabilité de précipitations, permettant de moduler le fonctionnement du modèle en fonction de l'hétérogénéité plus ou moins forte de la pluie sur le bassin.
- La seconde consiste à appliquer une approche multi-modèle : plusieurs modèles fonctionnant en parallèle sont alimentés par des pluies différentes issues des postes présents sur le bassin, leurs simulations étant combinées suivant différentes stratégies d'agrégation.

Les résultats des nombreux tests réalisés indiquent que les gains de performances qui peuvent être attendus par introduction d'information sur la variabilité des pluies sont, en moyenne sur notre échantillon de bassins versants, très limités. Sur certains bassins, des gains significatifs ont pu être obtenus, sans qu'il soit cependant possible d'identifier de déterminants physiques ou climatiques communs aux bassins versants concernés.

Une analyse complémentaire sur la sensibilité d'un modèle distribué à la spatialisation des pluies indique également l'influence limitée de la variabilité de la pluie sur les performances du modèle, en moyenne sur l'échantillon de bassins.

Mots-clés : Hydrologie, Modélisation pluie-débit, Précipitations, Variabilité spatiale

Abstract

The spatial variability of rainfall is often regarded as a significant source of errors in hydrological modelling. Is it a preconceived idea? In any case, the literature does not provide clear conclusions to this issue.

The objective of this thesis is to analyze the impact of the spatial variability of rainfall on the performance of hydrological models. In this work, we sought to overtake the limits of existing studies (limited number of study cases) and to reach conclusions as general as possible by using about 200 French basins, several hydrological models and two time steps (hourly and daily). Most of the work was focused on lumped rainfall-runoff models that were modified to account for rainfall spatial variability. We tried to quantify the improvement of model performance obtained by taking into account this variability. In this work, rainfall spatial variability was evaluated using the ground network of raingauges.

Two approaches were explored:

- The first one consists in introducing an index of rainfall spatial variability in the structure of the lumped rainfall-runoff model. This index more or less modifies the model functioning depending on the level of rainfall heterogeneity.
- The second one consists in applying a multi-model approach: several models are run in parallel, each of them being fed by the rainfall input of a single raingauge. Their outputs are then combined following different aggregation strategies.

The results of the large number of tests we made indicate that the gains in model performance that can be expected from introducing the information on rainfall spatial variability are very limited on average on our catchment set. On some catchments, significant gains could be obtained, but it was not possible to identify common physical or climatic characteristics between these basins.

A complementary analysis on the sensitivity of a distributed model to the rainfall spatial distribution also showed the limited influence of the rainfall variability on model performances, on average on the test catchment set.

Keywords: Hydrology, Rainfall-runoff modelling, Precipitations, Spatial variability

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....27

CHAPITRE 1 SENSIBILITE DES MODELES HYDROLOGIQUES AUX ENTrees DE PRECIPITATIONS31

1.1. Introduction.....31
 1.2. De la mesure de la précipitation à l'estimation de la pluie de bassin.....32
 1.3. Incertitudes sur les précipitations, sources d'erreurs en modélisation pluie-débit.....36
 1.4. Les modèles pluie-débit et la variabilité spatiale des précipitations.....43
 1.5. Pourquoi et comment les modèles hydrologiques devraient-ils prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations ?.....53

CHAPITRE 2 PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA BASE DE DONNEES.....57

2.1. Introduction.....57
 2.2. Quelles données utiliser pour représenter la variabilité spatiale des précipitations ?.....58
 2.3. Constitution de la base de données.....58
 2.4. Description des échantillons utilisés.....62
 2.5. Synthèse.....75

CHAPITRE 3 INTRODUCTION D'INDICES DE VARIABILITE SPATIALE DES PRECIPITATIONS DANS UN MODELE HYDROLOGIQUE GLOBAL : METHODES.....77

3.1. Comment prendre en compte la variabilité spatiale des pluies dans un modèle global ?...77
 3.2. Impact de l'hétérogénéité de la pluie de bassin sur le rendement en eau d'un événement pluvieux.....79
 3.3. Indices descriptifs de l'hétérogénéité spatiale des précipitations sans intégration du positionnement des postes82
 3.4. Indice prenant en compte l'éloignement des précipitations par rapport à l'exutoire.....86

3.5. Introduire les effets de l'hétérogénéité des pluies dans un modèle global : le cas des modèles de la famille GR.....	90
3.6. Evaluation du modèle et des méthodes testées	104
3.7. Synthèse.....	110

CHAPITRE 4 INTRODUCTION D'INDICES DE VARIABILITE SPATIALE DES PRECIPITATIONS DANS UN MODELE HYDROLOGIQUE GLOBAL : ANALYSE DES RESULTATS..... 113

4.1. Introduction.....	113
4.2. Examen des performances des modèles obtenues après l'introduction d'indices de variabilité des précipitations pour l'hypothèse Pic.....	114
4.3. Synthèse de l'introduction de l'hypothèse Pic et essai d'interprétation.....	136
4.4. Analyse de l'Hypothèse Volume	141
4.5. Synthèse.....	145

CHAPITRE 5 UNE APPROCHE MULTI-MODELE POUR LA PRISE EN COMPTE EXPLICITE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PRECIPITATIONS : PRESENTATION 149

5.1. Le problème	149
5.2. Un Multi-Modèle pour prendre en compte la distribution des précipitations	151
5.3. Quel(s) modèle(s) multiplier ?.....	161
5.4. Synthèse.....	163

CHAPITRE 6 UNE APPROCHE MULTI-MODELE POUR LA PRISE EN COMPTE EXPLICITE DE LA VARIABILITE SPATIALE DES PRECIPITATIONS : EVALUATION DES PERFORMANCES 165

6.1. Introduction.....	165
6.2. Evaluation d'un Multi-Modèle à deux entrées par distribution des précipitations groupées géographiquement en deux zones dites Amont et Aval	166
6.3. Autre calcul de deux entrées pluviométriques des sous-modèles.....	180
6.4. Passage d'un modèle global à un Multi-Modèle à n entrées	190
6.5. Synthèse des tests effectués.....	201

<u>CHAPITRE 7 SYNTHÈSE DES TESTS SUR DES MODÈLES GLOBAUX ET ANALYSE DE SENSIBILITÉ SUR UN MODÈLE DISTRIBUÉ</u>	<u>205</u>
7.1. Introduction.....	205
7.2. Synthèse des différentes approches testées dans la thèse	206
7.3. Information apportée par l'étude d'un modèle distribué	213
7.4. Le modèle distribué testé.....	213
7.5. Deux modes d'introduction des précipitations dans un modèle distribué	217
7.6. Echantillon de bassins versants testés	219
7.7. Résultats obtenus.....	221
7.8. Synthèse de l'expérience effectuée.....	227
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>	<u>231</u>
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</u>	<u>241</u>
<u>ANNEXE 1 LISTE DES BASSINS VERSANTS UTILISÉS.....</u>	<u>251</u>
<u>ANNEXE 2 ARTICLE PUBLIÉ DANS LE RED BOOK DE L'AISH.....</u>	<u>261</u>
<u>ANNEXE 3 ÉTUDE DE LA VARIATION DES VOLUMES SIMULÉS FACE À L'AUGMENTATION DE LA VARIANCE DES PRÉCIPITATIONS.....</u>	<u>275</u>
<u>ANNEXE 4 VALEURS DE L'INDICE D'HÉTÉROGÉNÉITÉ STATISTIQUE SUR LES ÉCHANTILLONS</u>	<u>279</u>
<u>ANNEXE 5 PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE DE MODÈLES UTILISÉS.....</u>	<u>293</u>
<u>ANNEXE 6 ANALYSES COMPLÉMENTAIRES RÉSULTATS CHAPITRE 4 : INTRODUCTION DE L'INDICE STATISTIQUE DANS L'APPROCHE B ET UTILISATION DE L'HYPOTHÈSE INVERSE AU PAS DE TEMPS JOURNALIER.....</u>	<u>299</u>
<u>ANNEXE 7 COMPLÉMENTS SUR L'ÉTUDE DE L'INTRODUCTION D'INDICE D'HÉTÉROGÉNÉITÉ STATISTIQUE AU SEIN DU MODÈLE GR4H (HYPOTHÈSE PIC)</u>	<u>305</u>

<u>ANNEXE 8 HETEROGENEITE ANTERIEURES DES PRECIPITATIONS ET DEBITS SUPERIEURS A UN SEUIL</u>	<u>313</u>
<u>ANNEXE 9 PERFORMANCES INITIALES DE TROIS STRUCTURES DE MODELES AU PAS DE TEMPS HORAIRE</u>	<u>317</u>
<u>ANNEXE 10 COMPARAISON DES CUMULS ANNUELS DE PRECIPITATION AMONT/AVAL DES BASSINS</u>	<u>321</u>
<u>ANNEXE 11 INTRODUCTION D'UNE INFORMATION PARTIELLE DE LA PLUIE DE BASSIN AU MULTI-MODELE</u>	<u>325</u>
<u>ANNEXE 12 ILLUSTRATION DES MEILLEURES COMBINAISONS ET SOUS- ECHANTILLONNAGE DE POSTES PLUVIOMETRIQUES</u>	<u>329</u>

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Etudes de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations avec des modèles distribués	46
Tableau 2.1 Caractéristiques de l'échantillon des 182 bassins versants en termes de nombre de postes par bassin et de superficie	65
Tableau 2.2 Caractéristiques hydro-climatiques annuelles des 182 bassins de l'échantillon, calculées à partir des chroniques disponibles (de 7 à 30 ans de données)	66
Tableau 2.3 Caractéristiques de l'échantillon des 99 bassins versants en termes de nombre de postes par bassin et de superficie.	73
Tableau 2.4 Caractéristiques hydro-climatiques annuelles des 99 bassins de l'échantillon calculées à partir des chroniques disponibles (10 ans de données pour toutes les variables sur la période 1995-2005)	73
Tableau 3.1. Récapitulatif des approches de modifications effectuées au sein du modèle avec l'indice IND et sa valeur médiane $IND_{\tilde{D}}$ sur la chronique des pluies	100
Tableau 3.2. Récapitulatif des essais de modifications effectuées au sein de modèle avec l'indice IND et sa valeur médiane sur la chronique des pluies IND_L	101
Tableau 3.3 Résumé des modifications testées.....	112
Tableau 5.1 Caractéristiques des quatre modèles pluie-débit testés en version Multi-Modèle	163
Tableau 5.2 Synthèse des différentes stratégies de distribution, de pondération et de choix de structures de modèle.....	164
Tableau 6.1 Nombre combinaisons de postes pluviométriques en deux sous-groupes en fonction du nombre de pluviomètres initial de chaque bassin.	181
Tableau 7.1 Composition (nombre de bassins pour chaque version) des deux modèles "idéaux" A_{priori} et $A_{posteriori}$	210
Tableau 0.1 Noms des stations, superficies, indices médians et nombre de postes pluviométriques.....	302
Tableau 0.2 Valeurs par bassin des critères de performance en calage et en contrôle pour la structure initiale du modèle GR4J et écarts obtenus avec l'approche modifiée.....	303
Tableau 0.3 Noms des stations, superficies, indices médians et nombre de postes pluviométriques des bassins	304
Tableau 0.4 Valeurs moyennes par bassins des critères de performances en calage et en contrôle pour la structure initiale du modèle GR4J et écarts obtenus avec l'approche modifiée	304
Tableau 0.1 Noms des cours d'eau et des stations, superficies (S), indices moyen d'hétérogénéité (Ind moyen) et nombre de postes pluviométriques (Nb postes) des bassins du tableau 1	312
Tableau 0.2 Valeurs moyennes des critères de performance en calage et en contrôle par bassin de plus de 5000 km ² pour la structure initiale du modèle GR4H et écarts obtenus (EC) avec ceux de l'approche modifiée pour K=0,3 (soulignés : écarts significatifs sur les trois critères C2M en contrôle; italique : au moins un critère insensible ; en gras : effets contraires sur les critères) EC bilan est construit selon la formule décrite dans le chapitre 3 (Partie 3.6.3).....	312

Liste des figures

Figure 2.1 Nombre de pluviomètres nécessaires pour une description acceptable de la pluie de bassin en fonction de la surface du bassin (Schaake (2000) d'après Oudin (2004)).....	59
Figure 2.2 Localisation des 182 bassins versants utilisés au pas de temps journalier (exutoires: points rouges; contours: lignes grises).....	63
Figure 2.3 Distribution des superficies de l'échantillon (abscisse en log).....	63
Figure 2.4 Distribution du nombre de postes pluviométriques disponibles par bassin sur les 182 bassins	64
Figure 2.5 Densité de postes pluviométriques pour 100 km ² en fonction de la superficie des bassins. La ligne continue représente la densité conseillée par Shaake (2000).....	65
Figure 2.6 A) Précipitations annuelles et débits annuels moyens pour les 182 bassins (indicatif du rendement du bassin) B) Précipitations annuelles et ETP moyennes annuelles (indicatif de l'aridité du bassin)....	67
Figure 2.7 Indices Q/P en en fonction de P/E sur les 182 bassins, calculés sur les valeurs annuelles moyennes (ligne grise représente Q/P=1 et la ligne noire Q=P-E).....	67
Figure 2.8 Répartition des indices de variabilité (%) des pluies annuelles pour les 182 bassins versant.	68
Figure 2.9 Localisation de 99 bassins versants (exutoires: points rouges et contours: lignes grises).....	70
Figure 2.10 Distribution des superficies de l'échantillon	70
Figure 2.11 Répartition géographiques des postes pluviométriques rattachés aux 99 bassins versants de l'échantillon	71
Figure 2.12 Distribution du nombre de postes pluviométriques disponibles par bassin sur les 99 bassins versants de l'échantillon.....	72
Figure 2.13 Densité de postes pluviométriques pour 100 km ² en fonction de la superficie des bassins. La ligne continue représente la densité conseillée par (Schaake, 2000).....	72
Figure 2.14 a) Précipitations annuelles et débit annuels moyens pour les 99 bassins (indicatif du rendement du bassin) b) Précipitations annuelles et ETP moyenne annuelle (indicatif de l'aridité du bassin).....	74
Figure 2.15 Indices Q/P en en fonction de P/E sur les 99 bassins, calculés sur les valeurs annuelles moyennes (ligne grise représente Q/P=1 et la ligne noire Q=P-E).....	74
Figure 2.16 Répartition des indices de variabilité des pluies annuelles pour les 99 bassins versants.....	75
Figure 3.1. Hyétoigrammes journaliers des quatre postes pluviométriques fictifs utilisés pour illustrer l'indice élaboré.....	85
Figure 3.2. Chronique des pluies journalières moyennes et écarts-types associés à la série pluviométrique de la Figure 3.1.....	85
Figure 3.3. Chronique des indices journaliers : C.V (coefficient de variation des pluies journalières) et IND (indice élaboré) de la série pluviométriques de la Figure 3.1	86
Figure 3.4 Répartition des pluviomètres sur un bassin versant fictif d'environ 2000 km ² pris en exemple. Les distances sont : $d_1 = 14$ km, $d_2 = 20$ km, $d_3 = 40$ km et $d_4 = 55$ km.	89
Figure 3.5 Chronique de l'indice journalier IND_L issue de la série de quatre postes pluviométriques illustrée en Figure 3.1	89
Figure 3.6 Structure de GR4J et emplacement des réservoirs et de ses quatre paramètres (le détail des équations et la signification des variables sont disponibles en Annexe.5	91
Figure 3.7 Emplacement des modifications A, B, C, D et E au sein de la structure du modèle GR4J.....	94
Figure 3.8 Relation entre le critère de NS et le critère C2M.....	106
Figure 3.9 Illustration de la légende des figures de type BoxPlot présentées dans cette thèse.....	110
Figure 4.1 BoxPlot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des différences de performance pour le critère C2M Racine-Q en contrôle entre le modèle modifié CALÉ et le modèle initial GR4J sur les 182 bassins versants de l'échantillon pour les deux hypothèse (de Base et Inverse) et les cinq lieux d'introduction : A) Modification pluie nette, B) Modification pluie efficace, C) Modification coefficient séparateur routage, D) Modification temps de transfert E) Modification des échanges	118
Figure 4.2 Evolutions des moyennes et des médianes des trois critères de performances obtenues en contrôle par le modèle initial et par le modèle modifié pour l'approche A [a) C2M-Q b) C2M-RQ et c) C2M log Q]. Performances évaluées en phase de contrôle pour l'approche A (modification pluie nette) et	

	l'hypothèse Inverse pour l'échantillon journalier de 182 bassins versants. [K=0 représente le modèle initial, les traits continus la valeur de la médiane et de la moyenne du critère pour ce modèle].....	120
Figure 4.3	Evolution des moyennes et des médianes des trois critères de performances obtenues en contrôle par le modèle initial et par le modèle modifié pour l'approche B [a) C2M-Q b) C2M-RQ et c) C2M log Q]. Performances évaluées en phase de contrôle pour l'approche B (modification pluie efficace) et l'hypothèse Inverse pour l'échantillon journalier de 182 bassins versants. [K=0 représente le modèle initial, les traits continus la valeur de la médiane et de la moyenne du critère pour ce modèle].....	122
Figure 4.4	Evolution des taux de remplissage des réservoirs de production (A) et routage (B) pour le modèle GR4J pour la simulation des débits du bassin de la Drôme à Loriol-sur-Drôme.....	123
Figure 4.5	Box Plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des écarts de performance du critère C2M-RQ en contrôle sur les 182 bassins versants de l'échantillon entre le modèle CALÉ pour l'approche A avec saisonnalité et le modèle initial GR4J pour les deux hypothèses (de Base et Inverse) par type de d'introduction supplémentaire de saisonnalité : I) Via le taux de remplissage du réservoir de production II) Via le taux de remplissage du réservoir de routage: III) Via le complément du taux du réservoir de production IV) Via le complément du taux du réservoir de transfert.....	125
Figure 4.6	Box Plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des écarts de performance du critère C2M-RQ en contrôle sur les 182 bassins versant de l'échantillon entre le modèle CALÉ pour l'approche B avec saisonnalité et le modèle initial GR4J pour les deux hypothèse (de Base et Inverse) par type de d'introduction supplémentaire de saisonnalité : I) Via le taux de remplissage du réservoir de production II) Via le taux de remplissage du réservoir de routage: III) Via le complément du taux du réservoir de production IV) Via le complément du taux du réservoir de transfert.....	126
Figure 4.7	Critère de performance moyen C2M-RQ par bassin versant entre l'approche CALÉ sans saisonnalité et celle avec saisonnalité pour les solutions I et III (Approche B et hypothèse Inverse).....	127
Figure 4.8	Distribution [(-) Médiane et (+) Moyenne] des valeurs optimales du coefficient multiplicateur K (sans tenir compte de K=0) obtenues sur l'échantillon de 182 bassins versants (Tous) et sur les 64 bassins où l'utilisation de cette valeur (pour l'approche B et l'hypothèse Inverse) a induit un écart de performance supérieur à 0,01 par rapport à la structure initiale avec une évaluation sur le critère C2M-Q.....	129
Figure 4.9	Valeurs optimales de K (sans tenir compte de K=0 représentant le modèle initial) pour chaque bassin en fonction de sa superficie [Les points intermédiaires entre deux valeurs testées par exemple 0,25 entre 0,3 et 0,4 indiquent que le meilleur critère moyen de performances a été obtenu sur ces deux valeurs].....	130
Figure 4.10	Valeurs optimales de K pour chaque bassin en fonction de son indice médian d'hétérogénéité (on distingue les bassins versants ayant significativement amélioré leurs performances avec l'approche modifiée).....	131
Figure 4.11	BoxPlot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des différences de performance du critère C2M-RQ en contrôle entre le modèle modifié CALÉ (pour trois valeurs de K) et le modèle initial GR4H sur les 99 bassins versants de l'échantillon pour les deux hypothèses (de Base et Inverse) et les cinq lieux d'introduction : A) Modification pluie nette B) Modification pluie efficace.....	133
Figure 4.12	Valeurs de K optimales (exceptée de K=0 représentant le modèle Initial) pour chaque bassin versant en fonction de leur superficie.....	135
Figure 4.13	Valeurs de K optimales pour chaque bassin versant en fonction de leur indice moyen d'hétérogénéité de positionnement.....	135
Figure 4.14	Indice d'hétérogénéité statistique du jour j en fonction de la hauteur des précipitations journalières moyennes du jour j pour les bassins versants de (a) de la Marne à Noisiel sur la période 1975-1900 [3632 observations de pluie de valeur médiane 2 mm] (b) de la Drôme à Loriol sur la période 1995-2002 [2922 observations de pluie de valeur médiane 3 mm] [le trait horizontal indique la valeur médiane de l'indice sur toute la chronique].....	137
Figure 4.15	Valeurs de la pluie efficace de jour j de la version modifiée, en fonction de la pluie efficace de la version initiale pour des simulations en contrôle sur la période 1996-2002 du bassin versant de la Drôme à Loriol sur Drôme selon l'hypothèse de Base (a) ou Inverse (b) pour l'approche B.....	138
Figure 4.16	Indice d'hétérogénéité statistique de l'heure h en fonction de la hauteur des précipitations horaires moyennes de l'heure h pour les bassins versant de (a) Le Furan à Andrézieux-Bouthéon sur la période 1995-2002 [7880 événements de pluies de valeur médiane 0,25 mm] (b) L'Ill à Ensisheim sur la période 1995-2002 [16104 événements de pluies de valeur médiane 0,33 mm] [le trait gris indique la valeur moyenne de l'indice sur toute la chronique et le pointillé la médiane].....	139
Figure 4.17	Indice d'hétérogénéité de position de l'heure h en fonction de la hauteur des précipitations horaires moyenne de l'heure h pour les bassins versant pour L'Ill à Ensisheim sur la période 1995-2002 [le trait	

horizontal indique la valeur moyenne de l'indice sur toute la chronique confondue pour ce cas avec la médiane] La borne inférieure des valeurs d'indices, 0.286, décrit le cas où toute la pluie est tombée sur le poste le plus proche de l'exutoire.	140
Figure 4.18 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères de performances moyens C2M-RQ en contrôle des 182 bassins de l'échantillon au pas de temps journalier pour le modèle initial GR4J avec coefficient fixe (Initial) et l'approche modifiée avec coefficient dépendant à chaque pas de temps de l'indice d'hétérogénéité statistique pour les dix valeurs de K (A) pour l'hypothèse de Base et B) pour l'hypothèse Inverse. [La ligne pointillée représente la valeur médiane de ce critère pour le modèle initial sans correction et le tiret plein la moyenne].....	143
Figure 4.19 Box plot de la distribution du coefficient correcteur fixe des pluies appliqué au modèle en fonction de l'hypothèse testée et du coefficient K	144
Figure 4.20 Ecart calculé sur le critère de performance C2M-RQ par bassin entre le modèle initial et le modèle avec coefficient correcteur de pluies fixé à 1.3 (en abscisse) et le modèle avec l'approche B, l'hypothèse Inverse et K=1.0 (en ordonnée)	145
Figure 5.1 Représentation schématique de notre approche Multi-Modèle avec : P_i : pluviomètre, Q_i : débit de chaque sous-modèle, ω_i = poids des débits à déterminer, Q : débit simulé par le modèle (à gauche) ou le Multi-Modèle (à droite).....	153
Figure 5.2 Représentation de l'approche globale classique avec une lame d'eau moyenne en entrée (a) et de l'approche semi-globale visant à prendre en compte la variabilité spatiale de précipitations (b). En rouge, les interrogations suscitées pour l'élaboration de cette approche alternative	155
Figure 5.3 Le bassin du Doubs à Neublans (7390 km ²), son réseau hydrographique principal simplifié, et ses 12 postes pluviométriques (Y).....	161
Figure 6.1 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-RQ (gauche) et C2M-Q (droite) en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global (Initial) et les stratégies de distribution amont-aval des précipitations avec un Multi-Modèle à entrées, avec distribution des paramètres (PXD) ou sans distribution des paramètres (PD) pour les deux essais de pondérations des débits de sortie des sous-modèles (EQ et PO).	167
Figure 6.2 Performances moyennes obtenues en contrôle sur C2M-Q pour les deux versions distribuées du Multi-Modèle sur chacun des bassins-périodes en fonction de la valeur des performances initiales de la version globale de GR4H ; (A) représente la version distribuée de la pluie et des paramètres et (B) la version où la pluie seulement est distribuée.	168
Figure 6.3 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-R en calage sur l'échantillon pour les sous-modèles alimentés par les pluies dites Amont et Aval selon les deux stratégies de distribution.	169
Figure 6.4 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global (Initial) et la stratégie de Multi-Modèle avec deux sous-modèles alimentés par deux entrées Amont-Aval de précipitations avec différentes valeurs du poids donné au débit simulé par le sous-modèle Aval	171
Figure 6.5 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global initial et la stratégie de Multi-Modèle à deux sous-modèles avec entrées de pluie Amont-Aval où le poids des deux débits de sortie est calé manuellement parmi cinq valeurs.....	172
Figure 6.6 Rapport entre cumuls annuels moyens des pluies Amont et Aval en fonction de la meilleure approche en termes de critère C2M-Q pour chaque bassin versant pour cinq combinaisons de sortie du Multi-Modèle (le chiffre représente le poids du débit issu du sous-modèle aval) et le modèle initial global alimenté par la pluie de bassin.....	173
Figure 6.7 Distribution des quatre paramètres de GR4H global et des sous-modèles amont et aval dans le cas de la stratégie PXD (X1 capacité du réservoir de routage, X2 capacité du réservoir de production, X3 paramètre d'échange X4 temps de réponse des hydrogrammes unitaires).....	175
Figure 6.8 Gains obtenus en contrôle pour chaque bassin période de l'échantillon sur le critère C2M-Q par la méthode PXD et la version globale en fonction de la distance euclidienne des vecteurs dits Amonts et Aval optimisés	176
Figure 6.9 Relations entre quatre attributs représentant les bassins versants et les gains de performance obtenus sur C2M-Q en contrôle avec la méthode PXD appliquée sur le modèle GR4H.	177
Figure 6.10 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q en contrôle sur l'échantillon pour IHACRES global et les quatre stratégies possibles pour le Multi-Modèle à deux sous-modèles Amont/Aval.....	178

Figure 6.11 Distribution des critères moyens de performances C2M-Q en contrôle par bassin versant de MORDOR5 (A) et MORDOR6 (B) et des quatre stratégies de Multi-Modèle à deux sous-modèles Amont-Aval.....	179
Figure 6.12 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en contrôle sur l'échantillon de 73 bassins versants pour la version globale initiale (Initial), pour la version Multi-Modèle avec des entrées pluviométriques Amont-Aval (EQ-PXD) et la version Multi-Modèle version EQ-PXD avec deux sous-modèles dont les entrées sont établies en sélectionnant la meilleure combinaison (best COMBIN).....	182
Figure 6.13 Ecart entre les performances obtenues sur le critère C2M Q par bassin versant entre par l'approche Multi-Modèle à deux entrées générées aléatoirement en fonction du nombre total de combinaisons testées pour ce bassin.....	183
Figure 6.14 Ecarts sur les critères de performances C2M-Q par bassin versant entre la meilleure combinaison de pluviomètres introduite dans le Multi-Modèle et le modèle initial [Ecart(BestCombin - Initial)] en fonction des écarts obtenus entre le Multi-Modèle à deux entrées dit Amont-Aval et le modèle initial [Ecart(Am_Av - Initial)]. Les abscisses et ordonnées positives indiquent les bassins versants où le Multi-Modèle est meilleur que le modèle global pour ce critère.	185
Figure 6.15 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassins versants en contrôle sur l'échantillon de 99 bassins versants avec GR4H en version globale avec une pluie de bassin calculée avec un sous-échantillon optimisé des postes pluviométriques disponibles (Sous-Groupe postes) et sa version de référence où la pluie de bassin est calculée avec la totalité des postes pluviométriques disponibles (Initial).....	186
Figure 6.16 Ecarts sur les critères de performance C2M-Q par bassin versant entre le meilleur sous-échantillonnage de pluviomètres pour le calcul de la pluie de bassin et le modèle dont la pluie d'entrées est calculée avec la totalité des postes présents.....	187
Figure 6.17 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en validation sur l'échantillon pour GR4H global (Initial) et les quatre stratégies possibles de distribution des entrées grâce au Multi-Modèle avec un sous-modèle par poste pluviométrique	191
Figure 6.18 Ecart de performance entre un Multi-Modèle à n sous-modèles et le modèle global initial en fonction de la superficie de chaque bassin versant de l'échantillon	192
Figure 6.19 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en contrôle sur l'échantillon de 99 bassins versants avec GR4H en version globale avec une pluie de bassin calculée avec un seul des postes pluviométriques disponibles (le meilleur parmi les n présents=Best_Post) et sa version de référence où la pluie de bassin est calculée avec la totalité des postes pluviométriques disponibles (Initial).....	194
Figure 6.20 Comparaison de critère de performances (C2M-Q) par bassin obtenues avec pour une version où seul le meilleur des postes pluviométriques est utilisé en entrée de GR4H et avec la version initiale avec pluie de bassin calculée sur tous les postes. Les bassins où les meilleures performances sont atteintes avec un seul poste sont situés au-dessus de la bissectrice ; les performances négatives, restées identiques pour les deux approches, ne sont pas représentées.	195
Figure 6.21 Ecart des critères (C2M-Q) pour un seul poste et avec la version Initiale, par bassin versant en fonction du nombre de postes disponibles. Les ordonnées positives signifient que la version utilisant un seul poste est meilleure.	196
Figure 6.22 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global et le Multi-Modèle avec un sous-modèle par poste pluviométrique dont le poids est fonction de l'aire d'influence de chaque poste.....	198
Figure 6.23 Chronique au pas de temps horaire de l'enveloppe produite par le débit Max et le débit Min de sortie de Multi-Modèle de GR4H (à partir de 16/10/1999)	201
Figure 7.1 Comparaison des écarts de performances Ecart entre les deux versions sélectionnées (INDICE et MULTI-MODELE) et le modèle Initial (les abscisses et les ordonnées positives indiquent que c'est la version modifiée qui surpasse la version Initial globale).....	208
Figure 7.2 BoxPlot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution de performances du critère C2M-RQ en contrôle obtenues pour le modèle Idéal version <i>A priori</i> et le modèle Idéal version <i>A posteriori</i> , le modèle initial GR4H et les approches Multi-Modèle et Indice sélectionnées sur les 99 bassins versants de l'échantillon.....	209
Figure 7.3 Ecart de performances entre modèle Idéal et la version Initial par rapport à de quatre caractéristique de bassins (on distingue les cas le modèle Idéal est issu de l'approche du Multi-Modèle (M-M) ou de l'approche avec Indice (Indices)	211

Figure 7.4	Emplacement des exutoires des bassins ayant plébiscité l'approche Multi-Modèle (MM) ou l'approche Indice pour le modèle Idéal (Significatif indique que l'écart sur le critère C2M-RQ est supérieur à 0.01 par rapport au modèle Initial global)	212
Figure 7.5	Schéma synthétique du système de modélisation SAFRAN-ISBA-MODCOU (d'après Aaron Boone, Météo France).....	215
Figure 7.6	Méthodes d'introduction Pluie Globale et Pluie distribuée sur le modèle maillé SIM.....	218
Figure 7.7	Distribution des superficies des 48 bassins versants de l'échantillon sélectionné.....	220
Figure 7.8	Répartition géographique des contours des 48 bassins versants de l'échantillon sélectionné pour cette expérience.....	220
Figure 7.9	Box Plot de la distribution des performances par bassin sur le critère C2M-Q pour les deux forçages pluviométriques testés sur le modèle SIM.....	221
Figure 7.10	Distribution des écarts de critères moyens de performance sur le critère (C2M-Q) entre les deux versions de SIM pour les 48 bassins versants.....	222
Figure 7.11	Performances par bassin versant pour la version de SIM avec forçage "Pluie globale" en fonction de la performance obtenue avec forçage "Pluie distribuée" (Les bassins les meilleurs pour la Pluie distribuée se situent sous la bissectrice).....	222
Figure 7.12	Ecart de critères de performances entre les deux versions de SIM (Pluie Globale-Pluie Distribuée) pour chaque bassin versant en fonction de sa superficie.	223
Figure 7.13	Critère de bilan par bassin versant sur toute la chronique pour la version de SIM avec forçage pluie globale en fonction du critère de la version avec forçage pluie distribuée (un bilan parfait correspond à la valeur 1).....	224
Figure 7.14	Box Plot de la distribution des performances des 27 bassins versants de l'échantillon pour la version globale initiale alimentée par la pluie de bassin et deux versions du Multi-Modèle calé sur pluie SAFRAN par sous-modèle et validé, soit avec les entrées pluviométriques distribuées (P_distribuée), soit avec la même pluie moyenne de bassin sur chaque sous-modèle (P_globale).....	226
Figure 7.15	Performances par bassin versant pour la version du Multi-Modèle contrôlée avec forçage Pluie globale en fonction de la performance obtenue avec forçage Pluie distribuée (les bassins les meilleurs pour la Pluie distribué se situent sous la bissectrice). On a indiqué sur ce graphique les bassins significativement meilleurs avec GR4H en version Multi-Modèle par rapport à la pluie globale Initiale).....	226
Figure 0.1	Distribution des valeurs d'indices médians d'hétérogénéité calculés sur toutes les chroniques d'observation pluviométrique disponibles de l'échantillon de 182 bassins versant.....	281
Figure 0.2	Indice d'hétérogénéité médian de la chronique pluviométrique de chaque bassin en fonction du nombre de postes pluviométriques utilisés pour ce calcul (a) et de la superficie du bassin (b)	281
Figure 0.3	Répartition des classes représentant les 10 déciles croissants des indices d'hétérogénéité médians sur la chronique au pas de temps journalier (indice calculé uniquement en cas d'événement de pluie au jour considéré).....	282
Figure 0.4	Distribution des indices journaliers d'hétérogénéité et des cumuls journaliers de précipitations associés, sur la période 1997-2002 pour le bassin versant de l'Orne (A) et sur la période 1991-1998 pour le bassin versant de l'Eyrieux (B) (Ordonnées en ordre inverse).....	284
Figure 0.5	Chroniques des indices journaliers pour l'année hydrologique 1997-1998 et hyétogrammes journaliers associés pour le bassin de l'Orne (A) et de l'Eyrieux (B) et.....	285
Figure 0.6	Distribution des valeurs d'indice d'hétérogénéité médian sur l'échantillon de 99 bassins versants sur toute la chronique d'observations (pour tous les bassins : 1995-2005).....	287
Figure 0.7	Indice d'hétérogénéité médian de la chronique pluviométrique de chaque bassin versant en fonction du nombre de postes pluviométriques utilisé pour les calculer (A) et de la superficie du bassin (B)....	287
Figure 0.8	Répartition des 5 déciles (quantiles 0,2; 0,4 etc...) des indices d'hétérogénéité horaires médians sur toute la chronique d'observation de chaque bassin (indice calculé uniquement en cas d'événement de pluie à l'heure considérée).....	288
Figure 0.9	Indice médian calculé sur les cumuls journaliers en fonction des indice médians calculés sur les cumuls horaires correspondant sur la même période d'observation	290
Figure 0.10	Hyétogrammes horaires des trois postes pluviométriques et indices d'hétérogénéité associés. (L'origine des heures est le 7 aout 1995 à 0 h).....	291
Figure 0.11	Hyétogrammes journaliers des trois postes pluviométriques et indices d'hétérogénéité associés. Jour 1 signifie le 7 aout 1995.....	291
Figure 0.1	Ecart sur les critères moyens de performance C2M Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale du modèle GR4J pour les valeurs de K=1 et K=0.4 en fonction de leur superficie	

	(échelle logarithmique). [En ligne pointillée, le seuil de significativité d'amélioration ou de dégradation des performances]	300
Figure 0.2	Ecart sur les critères de performance C2M Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4J pour la valeur de K=1 en fonction A) du nombre de postes pluviométriques ayant servi à calculer la pluie de bassin et l'indice associé B) de l'indice médian d'hétérogénéité du bassin versant	301
Figure 0.1	BoxPlot de la distribution des différences de performance du critère C2M-RQ en contrôle entre le modèle modifié CALÉ et le modèle initial GR4J sur les 182 bassins versants de l'échantillon pour les deux hypothèses (de Base et Inverse) et deux lieux d'introduction : A) Modification pluie nette B) Modification pluie efficace	306
Figure 0.2	Moyenne et médiane pour l'échantillon HORAIRE de 99 bassins versants des trois critères de performances en contrôle de A) C2M Q, B) C2M RQ et C) C2M log Q du modèle initial GR4H et des versions modifiées avec l'approche B (modification pluie efficace de la fonction de production) et l'hypothèse de Base [0 représente le modèle initial, les traits continus la valeur de la médiane et de la moyenne des critères pour ce modèle]	308
Figure 0.3	Valeurs de K optimales pour chaque bassin versant en fonction de sa superficie (carrés rouges : bassins versants où l'écart de performances sur le critère C2M-RQ entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H est supérieur à 0,01, soit 27 éléments sur 99).....	309
Figure 0.4	Valeur de K optimales pour chaque bassin versant en fonction de son indice d'hétérogénéité moyen (carrés rouges : bassins versants où l'écart de performances sur le critère C2M-RQ entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H est supérieur à 0,01, soit 27 éléments sur 99).....	309
Figure 0.5	Ecart sur les critères moyens de performance C2M-Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H pour les valeurs de K=0,3 et K=0,6 en fonction de la superficie. [En ligne pointillée, le seuil arbitraire de significativité d'amélioration ou de dégradation des critères de performances].....	310
Figure 0.6	Ecart sur les critères moyens de performance C2M-Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H pour les valeurs de K=0,3 en fonction de leur indice moyen d'hétérogénéité. [En ligne pointillée, les seuils arbitraires de significativité d'amélioration ou de dégradation des critères de performances].....	311
Figure 0.1	Relation entre l'indice d'hétérogénéité spatiale des pluies antérieures (valeur maximale et valeur moyenne) et la valeur du débit considéré (le trait gris représente la médiane des indices sur toutes les pluies non nulles de la chronique) pour le bassin versant de la Drôme à Loriol.	314
Figure 0.2	Relation entre les précipitations moyennes journalières (valeur maximale et valeur moyenne sur j, j-1 et j-2) et la valeur du débit considéré pour le bassin versant de la Drôme à Loriol.	315
Figure 0.1	Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères moyens C2M-RQ en calage sur l'échantillon pour les quatre modèles testés. MO=MORDOR, IHA=IHACRES	318
Figure 0.2	Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères moyens C2M-RQ(A) et C2M Q (B) en validation sur l'échantillon pour les quatre modèles testés.	319
Figure 0.1	Pluie moyenne annuelle aval en fonction de la pluie moyenne annuelle amont sur la période 1995 - 2005 pour les 99 bassins de l'échantillon.....	322
Figure 0.2	Répartition géographique du rapport (représenté en cinq classes) entre la pluie moyenne annuelle Amont et pluie moyenne annuelle Aval.....	323
Figure 0.1	Evolution des C2M-RQ médian et moyen sur l'échantillon de 99 bassins versants selon la valeur de α en contrôle (0 représente une même pluie sur les deux sous-modèles).....	326

"Je ne veux pas du chemin où se traînent les pas de la foule"

Callimaque [Epigrammes, XXVIII, 1-2]

Introduction générale

Dans la Grèce Antique, Aristote soutenait que l'eau alimentant les rivières venait du fin fond des cavernes où le froid transforme l'air en eau, tandis qu'Anaxagore, de 150 ans son aîné, avait déjà admis que les pluies étaient la principale source d'alimentation des rivières. Rétrospectivement, l'erreur d'interprétation d'Aristote semble évidente, mais Nace (1969) lui accorde des circonstances atténuantes : Aristote vivait dans une région semi-aride et il ne pouvait imaginer facilement que la pluie fut plus qu'un appoint pour les fleuves et les sources.

Il ne fait plus débat aujourd'hui que les précipitations (solides ou liquides) sont la source d'alimentation des cours d'eau. Cette eau précipitée est concentrée par le bassin versant, unité d'étude classique en hydrologie, pour donner les débits observés à l'exutoire. Les débits sont donc le produit de la pluie et de la façon dont cette dernière est transformée par le bassin versant par activation d'un certain nombre de processus hydrologiques (évapotranspiration, écoulements de surface, de sub-surface ou profonds, etc.). La variabilité temporelle des débits (alternance de périodes de basses et de hautes eaux) est donc intimement liée à celle des quantités d'eau précipitées sur le bassin (alternance de périodes sèches et pluvieuses).

Pour simuler et analyser la relation qui existe entre pluies précipitées sur le bassin et débits observés à son exutoire, on utilise des modèles hydrologiques, aussi appelés modèles pluie-débit. Ces modèles utilisent classiquement comme entrée une pluie moyenne de bassin, quantité d'eau totale précipitée sur le bassin sur le pas de temps d'étude (typiquement l'heure, le jour, le mois ou l'année). Cette quantité d'eau totale est, la plupart du temps, estimée à partir d'un réseau d'observation au sol, composé de pluviomètres, dispositifs de mesure par définition ponctuels. A partir de ces informations, la tâche de l'hydrologue pour estimer la

lame d'eau moyenne précipitée pourrait être simple... si le champ précipitant était homogène sur l'ensemble du bassin. Or, ce n'est bien entendu jamais le cas.

En effet, la variabilité temporelle des pluies se double d'une variabilité spatiale, liée à la dynamique météorologique et aux effets combinés du relief. Il est bien connu par exemple qu'à la fin de l'été, les augets de certains pluviographes situés dans les Cévennes s'affolent alors qu'à seulement quelques kilomètres de là, d'autres peuvent rester d'une imperturbable immobilité. Cette variabilité spatiale induit au moins deux problèmes majeurs pour l'hydrologue, sources de tracasseries pour lui et d'erreurs pour ses résultats.

Le premier vient de la mesure de la pluie à proprement parler. Comment en effet observer sur des dizaines voire des milliers de kilomètres carrés la pluie tombée sur le bassin ? La quantification du phénomène pluvieux, étendu et variable spatialement, à partir de quelques mesures ponctuelles fixes dans l'espace, soulève en effet un délicat problème d'échantillonnage. La qualité de ce dernier dépendra à la fois des caractéristiques des dynamiques météorologiques sur le bassin, des pas de temps d'observation et de la densité et de la répartition du réseau d'observation. Il en découle un problème d'estimation de la quantité d'eau totale précipitée sur le bassin. On doit en fait admettre que l'on ne peut pas connaître aujourd'hui la quantité d'eau exacte précipitée sur le bassin, et que la lame d'eau moyenne estimée est entachée d'une incertitude liée notamment à cette variabilité spatiale de pluies.

Le second problème soulevé par la variabilité spatiale des précipitations est son rôle dans la façon dont le bassin va réagir en termes de débits à l'exutoire. Intuitivement, on peut penser qu'une pluie localisée à l'amont du bassin ne donnera pas la même réponse à l'exutoire qu'une même pluie tombée à l'aval. De même, la réponse du bassin sera certainement différente si la pluie tombe sur une zone déjà humide ou sur une zone plutôt sèche. Pour prendre en compte ces différentes configurations dans un modèle, la réponse la plus immédiate consiste à prendre explicitement en compte cette variabilité par un schéma de discrétisation spatiale du bassin, comme le font de plus en plus de modèles hydrologiques. Or beaucoup de modèles existants adoptent une approche globale de la transformation pluie-débit. Par globale, on entend une approche qui ne prend pas en compte explicitement cette variabilité spatiale des caractéristiques du bassin ou des entrées de pluie. Au niveau des entrées du modèle,

l'hypothèse forte de cette approche globale est que la simulation des débits à l'exutoire du bassin versant n'a pas besoin de tenir compte de la variabilité spatiale des pluies pour être efficace, autrement dit, que la quantité d'eau totale précipitée sur le bassin est une information suffisante pour la bonne simulation des débits.

Cette hypothèse est-elle valable ? Limite-t-elle les performances des modèles globaux de simulation pluie-débit ? Ces modèles sont-ils condamnés à ne pas pouvoir bénéficier de l'information relative à la variabilité spatiale des précipitations ? La prise en compte de cette variabilité permettrait-elle des améliorations significatives de la simulation des débits ? Le sujet fait débat depuis des décennies dans la communauté hydrologique. Partisans et détracteurs de la prise en compte de la variabilité spatiale des pluies s'affrontent, sans qu'il semble aujourd'hui se dégager de consensus sur son intérêt pour la modélisation hydrologique. C'est donc à ces questions que l'on se propose d'essayer de répondre dans le cadre de cette thèse. L'objectif premier est d'explorer des voies de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations au sein de modélisations hydrologiques globales. L'orientation de cette thèse sur les modèles globaux vient du fait que ces modèles sont aujourd'hui largement utilisés par les ingénieurs et gestionnaires pour leur facilité d'utilisation et leur relative fiabilité. Imparfaits comme tout modèle, ils demeurent cependant largement perfectibles et la prise en compte de la variabilité des pluies dans ces modèles pourrait être une voie d'amélioration de leurs performances.

Pour répondre à l'apparente contradiction entre la nature globale des modélisations analysées dans le cadre de cette thèse et la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations, nous proposons dans la suite de ce manuscrit un certain nombre d'approches originales, pour lesquelles nous avons testé différentes variantes. Pour conférer à nos résultats une significativité statistique et s'assurer de leur généralité, nous avons choisi de ne pas nous concentrer sur un bassin précis mais de diversifier les cas d'études sur une base de données aussi large que possible.

Ce mémoire est organisé en sept chapitres. Le premier propose une synthèse bibliographique sur la question de l'estimation des précipitations et du rôle de leur variabilité dans un contexte de modélisation pluie-débit. Nous y résumons les principales conclusions des nombreuses études menées sur la question ainsi que les hypothèses généralement formulées

sur l'effet de la variabilité des pluies sur les débits. Le deuxième chapitre décrit l'échantillon de bassins versants sur lequel nous nous sommes appuyés pour réaliser nos tests de modélisation. Le troisième chapitre présente un premier type de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations dans la modélisation globale, fondé sur la construction d'indices synthétiques de variabilité. Le quatrième chapitre détaille les résultats de l'application de cette approche sur notre échantillon de bassins versants. Les cinquième et sixième chapitres présentent une seconde approche s'appuyant sur une démarche multi-modèle, avec les résultats obtenus sur notre échantillon de bassins. Pour les deux types d'approches proposés, de nombreuses variantes ont été testées, pour rendre l'analyse aussi complète que possible. Le septième chapitre propose une synthèse de tous les résultats obtenus et repositionne ces résultats par rapport à ceux d'une approche de modélisation distribuée prenant en compte explicitement la variabilité spatiale des pluies. Enfin, la conclusion générale propose un résumé des principales avancées de ce travail et des perspectives qu'il ouvre pour la suite.

Chapitre 1

Sensibilité des modèles hydrologiques aux entrées de précipitations

1.1. Introduction

La pluie¹ est une des variables climatiques fondamentales à prendre en compte pour toute étude traitant de la gestion de la ressource en eau. A l'échelle du bassin versant, cette variable est logiquement considérée comme l'élément hydrologique clé à l'origine de la réponse du bassin en termes de débit. Dans le cadre des modèles de transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant (appelés modèles pluie-débit), la donnée de précipitations est considérée comme l'entrée climatique principale. Les modèles y sont bien plus sensibles qu'à l'évapotranspiration potentielle (ETP), l'autre donnée utilisée en entrée (Oudin *et al.*, 2004; Oudin *et al.*, 2006b). La variabilité temporelle de la pluie cause des variations de débit, ces variations étant d'autant plus délicates à modéliser qu'elles sont rapides (Anctil *et al.*, 2006).

L'estimation et le choix des précipitations utilisées comme entrées des modèles pluie-débit sont donc cruciaux pour leur bon fonctionnement (minimisation de leurs erreurs). En d'autres termes, aucun modèle, qu'il soit empirique ou élaboré sur des fondements physiques ne sera capable de produire des simulations satisfaisantes de débits si ses entrées ne caractérisent pas correctement les précipitations réelles (Beven, 2001). Or la difficulté pour représenter correctement la pluie, vient essentiellement du fait que c'est un phénomène à la

¹ Dans le cadre de cette thèse, on utilisera indifféremment les termes "pluie" et "précipitation" bien que leur signification météorologique soit différente. Voir Glossaire international d'Hydrologie:

<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/aglo.htm>

fois non continu dans le temps et variable dans l'espace. Roche(1964) indique que: *C'est un fait d'observation courante que lors d'une précipitation chaque point d'une aire donnée ne reçoit pas la même quantité d'eau. On désigne ce phénomène par "hétérogénéité spatiale de la pluie".*

Cette hétérogénéité spatiale va induire des difficultés supplémentaires dans l'estimation de la pluie moyenne réellement tombée sur le bassin et dans la formulation de sa transformation en débit.

Ce chapitre traitera tout d'abord des origines et des incertitudes des mesures de précipitations, puis des différentes méthodes existant pour transformer cette mesure en une pluie représentative du bassin. Cette pluie, appelée ici pluie de bassin, est celle qui est utilisée en tant qu'entrée des modèles pluie-débit. Ensuite, on discutera des incertitudes sur le calcul de cette pluie de bassin associées à la variabilité spatiale des précipitations et leurs conséquences en modélisation pluie-débit. Pour finir, on abordera les problèmes complexes résultant de cette variabilité spatiale des précipitations "*per se*" sur la fiabilité de l'estimation des débits par les modèles.

1.2. De la mesure de la précipitation à l'estimation de la pluie de bassin

1.2.1. Evolution des techniques de la mesure des pluies

Les premières mesures de précipitations, du moins en Europe, remontent à plus de 400 ans. En 1639, l'Italien Benetto Castelli écrit à Gallilée pour lui annoncer qu'il a mesuré, grâce à un récipient qu'il marquait, heure par heure, une précipitation d'une durée de 8 heures à Pérouse en Italie (Biswas, 1970). On peut ajouter qu'en France, c'est Perrault et Marriott qui sont considérés comme les précurseurs dans la mesure des précipitations vers 1670 Perrault (1674) d'après L'hôte (1990). L'Observatoire de Paris archive des données de précipitations sur la région depuis 1688 (L'hôte, 1990).

Aujourd'hui, la pluie est généralement une donnée provenant avant tout d'une mesure effectuée ponctuellement par un pluviomètre². Toutes les longues séries historiques de précipitations ont été acquises par des postes pluviométriques. L'arrivée, au début des années 80, de données de type RADAR n'a pas permis de supplanter la donnée au sol, du moins en terme d'estimation des quantités tombées (Tetzlaff et Uhlenbrook, 2005). Plus récemment, des données de précipitations provenant de satellites comme METEOSAT sont arrivées sur le marché des candidats à l'entrée des modèles pluie-débit. Le système PERSIANN a permis un début de conversion des données satellite pour une estimation quantitative des précipitations (Yilmaz *et al.*, 2005).

1.2.2 Sources d'incertitudes dans la mesure

La donnée de précipitation en provenance d'un réseau sol est collectée, analysée et extrapolée spatialement depuis de nombreuses années.

Une première source d'erreurs des données de précipitations existe au niveau de la mesure brute initiale de cette donnée ponctuelle. Ces incertitudes proviennent essentiellement de la résolution temporelle, de l'entretien de l'appareil et de son exposition, des effets du vent, de la taille de l'orifice ou de l'obstruction par des éléments extérieurs. Ces incertitudes dépendent aussi de la hauteur mesurée de pluie. Certaines de ces erreurs peuvent être évaluées au moment de la mesure et un code qualité ou un code contexte (emplacement du poste) vient parfois renseigner les données (c'est par exemple le cas dans la base pluviométrique journalière de Météo-France). Cependant, ce type d'incertitude, quoique certainement non négligeable, n'entre pas dans notre sujet d'étude et pour plus de détails, on pourra se reporter aux revues bibliographiques de Sieck (2007), Sevruk (2005) et à Rodda (1967).

De fortes incertitudes demeurent ainsi dans le protocole de collecte de ces données en termes de qualité, mais aussi en termes de quantité, c'est-à-dire dans l'estimation de la précision spatiale nécessaire à ces mesures pour avoir une estimation fiable des quantités moyennes

² On utilisera le mot générique "pluviomètre" sans distinction entre pluviomètre totalisateur et pluviographes à augets mesurant les intensités instantanées.

précipitées au sein du bassin versant. Ce deuxième type d'incertitude a principalement pour origine la variabilité spatiale des précipitations.

1.2.3 De la mesure de la pluie à l'estimation de la lame d'eau moyenne précipitée

La construction d'une entrée de pluie d'un modèle pluie-débit consiste à passer de plusieurs pluies ponctuelles constituant le réseau à une hauteur d'eau précipitée moyenne sur une surface donnée. Dans le cas d'un modèle pluie-débit global, c'est la pluie dite "de bassin" qui sera utilisée comme entrée. Pour un modèle semi-distribué, on utilisera une pluie à l'échelle du sous-bassin et pour un modèle distribué, on travaillera sur les quantités de pluies au niveau de la maille de la grille de discrétisation. Par la suite, on s'intéressera essentiellement à l'estimation de la pluie à l'échelle du bassin.

De nombreuses méthodes ont été élaborées pour passer de précipitations ponctuelles du réseau de pluviomètres sur le bassin versant à une pluie unique représentative de la quantité moyenne de pluie tombée sur le bassin. La difficulté d'extrapolation des pluies ponctuelles vers la pluie de bassin a été identifiée par les hydrologues dès le début du XX^{ème} siècle. Les premières publications par Thiessen (1911) et Horton (1923) en témoignent. On peut citer quatre méthodes principales de construction de la pluie de bassin, sachant que chacune présente d'innombrables variantes (Pour une liste plus exhaustive, on se reportera à la revue de Singh et Chowdhury (1985):

1. La méthode la plus simple statistiquement est la moyenne arithmétique. D'un point de vue hydrométéorologique, cette méthode consiste à faire l'hypothèse que chaque pluviomètre possède la même aire d'influence sur le bassin versant ;
2. Une seconde technique, légèrement plus élaborée, est la moyenne pondérée. La méthode des polygones de Thiessen est probablement la plus utilisée dans cette catégorie. Dans cette approche, chaque pluviomètre est pondéré par une zone d'influence déterminée géométriquement (aire du polygone adjacent) ;
3. Une troisième méthode est celle des isohyètes supposée prendre en compte les schémas de champs de précipitations et leurs effets orographiques. A partir du réseau et des pentes du bassin versant, on détermine les zones d'égale pluviométrie. La pluie de bassin est calculée à partir des différentes superficies comprenant les zones dites "d'égale pluviométrie" (Reed et Kincer, 1917) ;

4. Pour finir, il existe de nombreuses méthodes dites "géostatistiques" où l'estimation des précipitations en chaque point d'une grille est une fonction de la distance aux pluviomètres les plus proches. Les différentes valeurs sont ensuite agrégées pour former la pluie de bassin. Le krigeage, qui appartient à cette classe de méthodes, utilise les variogrammes des champs de précipitations (la variance d'une paire de points en fonction de leur distance) (Delhomme, 1978; Habertland et Kite, 1998). Cette méthode serait préconisée si le réseau est peu dense ou bien mal reparti (Lebel, 1984).

Ces nombreuses méthodes d'estimation de la pluie de bassin possèdent chacune leurs avantages et leurs inconvénients en terme de simplicité de mise en œuvre, de calcul et d'exactitude *a priori* du résultat. Cependant, toutes pourraient fournir des quantités de précipitations plus ou moins "parfaites" si le champ pluviométrique pouvait être considéré comme constamment uniforme sur tout le bassin, ou, si on pouvait mesurer la pluie correctement en tout point du bassin versant. Or, ces deux conditions sont délicates à remplir. En effet, il est généralement admis que les champs précipitants sont variables dans l'espace, et que la densité du réseau de pluviographes est contrainte à un nombre limité d'éléments sur le bassin versant pour des raisons techniques et économiques.

Ainsi, la valeur véritable de cette pluie de bassin reste toujours inobservée, comme cela est souligné par Sugarawa (1993) : "*we cannot observe the mean areal rainfall itself*" et Storm (1989) : "*Since the precipitation varies in space, it is impossible to achieve an exact estimate of the total precipitation depth*".

1.2.4 Erreurs affectant la pluie de bassin

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la variabilité spatiale des pluies affecte la précision apparente des estimations de la pluie de bassin nécessaire pour l'hydrologie. Elle rend aussi impossible la connaissance véritable de cette même pluie de bassin. Ce genre de problèmes d'estimation a été souligné très tôt avec par exemple les publications de Sutcliffe (1966) et Wilson (1979).

Par exemple, la pluie de bassin pourra être surestimée si les postes présents captent une précipitation qui sera extrapolée à tout le bassin, alors qu'il ne pleut pas sur la partie du

bassin non instrumentée. A l'inverse, cette pluie pourra être sous-estimée si les champs de précipitations passent en quelque sorte entre les mailles du filet que constitue le réseau de mesure (dans le cas d'événements localisés notamment) (Datin, 1998).

Ces erreurs peuvent être systématiques. Par exemple, pour un bassin versant montagneux où les postes sont situés dans la vallée, cela va conduire à sous-estimer la pluie. Ces types d'erreurs pourraient être *a priori* corrigés par une optimisation de la densité et de la localisation des postes pluviométriques. En pratique, elle peut être délicate à réaliser pour des raisons techniques et financières. Ces erreurs peuvent être aussi plus aléatoires pour les bassins versants de plaine, pour toutes les pluies non orographiques et pour les bassins dont les réseaux sont véritablement sous-dimensionnés (manquant aussi aléatoirement les pluies tombées sur le bassin). Cette multitude de sources d'erreurs aléatoires peuvent cependant se compenser à l'échelle du réseau disponible sur le bassin.

La question est de savoir si les incertitudes sur les données de pluie dues à leur hétérogénéité vont affecter la qualité des débits simulés par les modèles. Il s'agit également de savoir comment le modèle peut faire face à ces incertitudes indirectement provoquées par la variabilité spatiale des précipitations.

1.3. Incertitudes sur les précipitations, sources d'erreurs en modélisation pluie-débit

Les sources d'incertitudes en modélisation pluie-débit sont multiples. On peut en citer cinq principales :

- la structure du modèle elle-même, quelle que soit la famille de modèles (base empirique ou base physique) car le modèle est avant tout une approximation de la réalité hydrologique (Beven et Freer, 2001),
- l'estimation des paramètres du modèle (Wood, 1976),
- les erreurs de mesures sur les débits, notamment sur les forts débits qui correspondent souvent à une zone d'extrapolation des courbes de tarage (Hansen *et al.*, 1996),
- la confusion qu'il peut exister entre bassin versant topographique et bassin versant hydrogéologique, notamment pour le bouclage des bilans en eau du modèle (Le Moine *et al.*, 2007),

- enfin, les erreurs provoquées par l'inexactitude des données d'entrées, essentiellement les précipitations (Sun *et al.*, 2000), ce type d'erreur est notamment induit par l'hétérogénéité spatiale des variables d'entrées combinée à une représentation spatiale inadéquate au sein du modèle et à la non prise en compte explicite de cette hétérogénéité (Singh, 1997).

C'est sur cette dernière source d'incertitude que notre recherche va porter. On peut diviser les incertitudes provoquées par la variabilité spatiale des précipitations sur l'efficacité des modèles pluie-débit en deux parties :

- les incertitudes provoquées par des erreurs induites par la méthode de calcul de la pluie de bassin : la mauvaise estimation des volumes d'entrée qui en découle peut provoquer des erreurs sur les sorties du modèle, comme par exemple une sous-estimation des débits de pointe si le volume total des précipitations est sous-estimé par le réseau pluviométrique.
- une autre source d'incertitudes plus délicate à interpréter est celle provoquée par l'effet de la variabilité spatiale proprement dite des précipitations ("*per se*") au sein du bassin versant sur la répartition des débits à l'exutoire. Cela correspond au fait que pour une même hauteur de pluie de bassin, la répartition des débits à l'exutoire sera différente, selon que la pluie est homogène ou non.

1.3.1 Relation entre incertitudes sur la pluie de bassin et erreurs sur la simulation des débits.

1.3.1.1 Effet du réseau pluviométrique

Les incertitudes dans le calcul de la pluie de bassin, dues à la variabilité spatiale des précipitations, se traduisent en incertitudes dans l'estimation des débits, sorties des modèles pluie-débit, car elles induisent une mauvaise estimation des volumes d'entrée (Storm *et al.*, 1989). Le problème soulevé dans cette partie porte sur les effets "indirects" dans la modélisation pluie-débit, de la mauvaise estimation de la pluie de bassin due à la variabilité spatiale des précipitations.

On peut partir de l'hypothèse que les erreurs d'estimation de la pluie de bassin augmentent avec la diminution de la densité du réseau pluviométrique (Robinson, 2005). En effet, plus le réseau est dense, plus celui-ci aura de chances de capter des intensités locales qui auront un

ponds significatif dans la valeur finale de la pluie de bassin. De nombreux travaux ont tenté d'analyser si la variation de la densité du réseau pluviométrique avait un effet sur l'efficacité des modèles.

Dawdy et Bergman (1969), Wilson (1979), Hamlin (1983), Troutman (1983), Bras *et al* (1988), Duncan (1993), Michaud et Sorooshian (1994b), Georgakakos *et al* (1995), Dong *et al* (2005), Anctil *et al* (2006) ont par exemple recherché si les performances de différents modèles pluie-débit étaient affectées par l'utilisation de diverses entrées de "pluie de bassin" calculées sur la base de sous-échantillonnages de postes pluviométriques disponibles sur le bassin. En général, ces auteurs font état de meilleures performances des modèles lorsqu'un réseau de mesure de précipitations dense est utilisé en comparaison à un réseau de mesure beaucoup plus diffus. Les pionniers de ce genre de travaux, Dawdy et Bergman (1969) ont étudié un bassin versant de 25 km². En diminuant progressivement la densité du réseau de pluviomètres, ces auteurs arrivent à la conclusion qu'une mauvaise représentation de l'hétérogénéité spatiale des précipitations peut amener à des erreurs d'environ 20% sur les débits de pointe. Dans ces travaux, Wilson (1979) détecte seulement une légère amélioration dans l'estimation des volumes de sortie de leur modèle dans une étude sur des pluies synthétiques, en passant de 1 à 20 postes sur 10 événements d'un bassin tropical de 60 km². Michaud et Sorooshian (1994b) ont, eux, observé que passer d'une densité de 1 poste pour 2.5 km² à 1 poste pour 20 km² sur un bassin versant de 150 km² situé sous un climat semi-aride conduit à de plus fortes erreurs sur les débits simulés, tant en cas de surestimation que de sous-estimation des lames d'eau moyennes "réelles" (c'est-à-dire calculées avec la plus forte densité de pluviomètres).

Cependant, des performances équivalentes en utilisant la totalité du réseau, peuvent être obtenues avec seulement un sous-échantillon des postes disponibles. Par exemple, Dong *et al* (2005) trouvent que la relation effectuée par corrélations croisées entre les débits observés et les pluies de bassin s'améliore considérablement en passant de 1 à 5 postes sur les 26 présents, avant d'atteindre un palier pour leur bassin versant de 17000 km². Ces auteurs confirment ces résultats en corrélant les précipitations estimées avec les débits simulés par le modèle HBV. Cependant, ils indiquent aussi que les sous-échantillonnages des postes pluviométriques induisent de meilleures performances pour le modèle uniquement si ces postes sont situés à proximité du centre du bassin (qui est, pour ce cas particulier, la zone où il pleut le plus).

Autre exemple, avec un modèle de prévision pluie-débit par réseau de neurones, Anctil *et al* (2006) obtiennent des performances équivalentes par rapport à celles obtenues en utilisant la totalité du réseau grâce à des combinaisons de seulement 11 postes parmi les 23 que possède le bassin versant étudié de 3324 km² situé sur la Loire-Amont.

Ces résultats pourraient faire penser que les modèles sont capables de s'adapter jusqu'à un certain point aux entrées de précipitations et qu'un réseau pluviométrique même de taille modeste, peut générer de très bonnes estimations de la pluie de bassin. Anctil *et al* (2006) le confirment en confrontant l'évolution des performances de leur modèle de prévision à l'évolution d'un indice de qualité de l'estimation des pluies de bassin (GORE et BALANCE). Ces indices partent du principe que la meilleure estimation de la pluie est obtenue en utilisant tous les postes disponibles et ils la comparent à l'estimation de pluie obtenue avec divers sous-échantillonnages du réseau (pour plus de précision, se reporter aux explications d'Andréassian *et al.* (2001)). Anctil *et al.* (2006) remarquent qu'en dessous de 10 postes sur les 23 disponibles, la qualité estimée de la pluie diminue fortement par rapport à celle calculée avec tout le réseau disponible et qu'en deçà, les performances de leur modèle en pâtissent lourdement.

Andréassian *et al.* (2001) confrontent les performances de trois modèles globaux, obtenues sur trois bassins versants français de superficie et de climats différents, à des indices de qualité de l'estimation de la pluie d'entrée (GORE et BLANCE). Par des sous-échantillonnages aléatoires de différentes pluies ponctuelles fournies pour les postes pluviométriques, les auteurs trouvent que, plus l'estimation de la pluie est jugée correcte, plus les performances des trois modèles auront tendance à être régulièrement de bonne qualité. Ces bonnes performances s'accompagnent d'une meilleure stabilité³ du vecteur de paramètres. Ce résultat rejoint ceux de Duncan *et al* (1993), qui concluent dans leur étude sur un bassin versant québécois de 4800 km², que l'augmentation de la densité de pluviomètres amène à une meilleure stabilité des vecteurs de paramètres du modèle.

³ On appelle ici stabilité du vecteur de paramètres, la concordance des valeurs prises par le vecteur s'il est optimisé sur des périodes temporelles différentes.

1.3.1.2 Sensibilité aux erreurs sur les pluies

D'excellentes performances peuvent être atteintes avec une estimation biaisée de la pluie. Ce type de constat prouve la faculté que possèdent les modèles à adapter leur vecteur de paramètres aux erreurs dans les données d'entrées de précipitations. Cet avis est partagé par de nombreux auteurs (Dawdy *et al.*, 1969; Troutman, 1983; Bell et Moore, 2000; Andréassian *et al.*, 2001).

Cependant, cette adaptation des modèles aux erreurs des données d'entrées dépend du type d'erreur qui peut être soit systématique soit aléatoire. Oudin *et al.* (2006b), notent dans leur étude effectuée sur 12 bassins versants américains, que l'impact des erreurs des données d'entrées sur les performances des modèles pluie-débit est plus important si ces erreurs sont de type aléatoire plutôt que de type systématique (par exemple surestimation ou sous-estimation systématique des précipitations par un réseau trop peu dense ou mal positionné). En effet, dans le cas d'erreurs systématiques, les modèles peuvent être capables d'adapter, jusqu'à un certain point, les paramètres contrôlant le bilan en eau du bassin lors du calage. Ces mêmes auteurs remarquent, toutefois, que cette faculté d'adaptation aux erreurs systématiques dépend de la structure des deux modèles qu'ils ont testés lors de leur analyse : GR4J et une version simplifiée globale de TOPMODEL. Le modèle GR4J possède les moyens de compenser les erreurs systématiques de surestimation (jusqu'à 2 fois la pluie d'entrée) en adaptant les paramètres de sa fonction d'échanges souterrains. Ce résultat sur la capacité de correction de la fonction d'échange est confirmé dans l'étude de Le Moine *et al.* (2007), TOPMODEL, ne possédant pas ce type de fonction dans sa structure, peut uniquement compenser ce type d'erreurs par ajustement de sa fonction d'évapotranspiration et ceci seulement jusqu'à un certain seuil (environ 1.25 fois la pluie d'entrée). Par contre, la fonction d'échanges souterrains ne permet pas au modèle GR4J de maintenir durablement ses performances initiales en cas de renforcement de la sous-estimation des pluies d'entrée. Dans cette même configuration, pour TOPMODEL, les pertes sont moins importantes qu'en cas de surestimation car le réajustement par l'évapotranspiration est plus évident en termes de seuil de quantité d'eau manquante à compenser. Pour finir sur cette étude, on peut ajouter que les variations de performances liées à l'augmentation des erreurs sont univoques pour les 12 bassins de l'échantillon testé. Les baisses de performances, par l'accroissement des erreurs aléatoires dans les précipitations d'entrée, sont observées sur les deux types de modèles et pour tous les bassins versants.

En résumé, les modèles arrivent à s'adapter, par l'optimisation de leur vecteur de paramètres, aux imperfections provoquées *a priori* par la variabilité spatiale des précipitations, sur l'estimation des précipitations en entrée. Néanmoins, cette faculté d'adaptation des modèles semble dépendante de leur structure.

Les erreurs dans les précipitations d'entrée les plus facilement compensables sont les erreurs systématiques de surestimation ou de sous-estimation des précipitations moyennes sur un bassin. Ces erreurs peuvent donc être corrigées par l'ajustement des paramètres si les données de précipitations proviennent d'un réseau de mesure suffisamment dense. Mais, le sous-dimensionnement d'un réseau de pluviomètres peut amener, selon les événements, à une alternance d'erreurs tantôt de sous-estimation et tantôt de surestimation des lames d'eau moyennes dite "vraies" (Michaud *et al.*, 1994b). De plus, cette densité minimale est dépendante de la superficie du bassin versant à modéliser : un bassin de plus faible superficie nécessite une densité de postes supérieure par rapport à un bassin de plus grande taille (Andréassian *et al.*, 2001). Les effets "indirects" de la variabilité spatiale des précipitations sur les débits seront eux aussi certainement dépendants de l'échelle spatiale de modélisation qui, pour un modèle global, est représentée par la superficie du bassin versant.

Par contre, la variabilité spatiale des précipitations peut être à l'origine d'erreurs plus aléatoires dans les entrées de précipitations (via la faculté, difficilement estimable, qu'a le réseau pluviométrique de capter ou non les champs précipitants) et ce type d'erreurs à un impact sur les performances des modèles pluie-débit quelle que soit leur architecture (Xu et Vandewiele, 1994; Oudin *et al.*, 2006b). L'origine et la détermination des effets de ce type d'erreur est difficile à quantifier dans le calcul de la pluie de bassin. Aussi, ce type d'erreur dans les données d'entrée apparaît comme difficilement remédiable par la structure et difficilement compensable par l'adaptation des paramètres des modèles.

1.3.2 Relation entre les effets de la variabilité spatiale des précipitations *per se* et les incertitudes sur la simulation des débits.

Après avoir présenté les nombreuses études sur la sensibilité des modèles à la densité du réseau de postes pluviométriques utilisés pour calculer la pluie de bassin, la question de l'effet de l'échantillonnage spatial proprement dit de cette pluie (c'est-à-dire l'effet direct de son hétérogénéité spatiale) sur les performances des modèles se pose.

En effet, un deuxième problème complètement différent et plus délicat à interpréter se pose sur les conséquences de la variabilité spatiale de précipitations *per se* sur la précision de la simulation des débits. La variabilité spatiale des précipitations peut influencer la répartition des débits à l'exutoire du fait de la non-linéarité de la réponse du bassin en fonction des intensités de précipitations. Si cette hypothèse est confirmée, il deviendrait nécessaire au modèle pluie-débit de prendre en compte ce phénomène afin d'améliorer significativement ses performances.

Dans sa revue bibliographique sur ce problème, Singh (1997) indique que la répartition spatiale des précipitations *stricto sensu* a une influence sur la forme des hydrogrammes qui représentent la répartition temporelle des volumes à l'exutoire. L'auteur ajoute que l'intensité de cette relation est aussi liée à la superficie et à la forme des bassins versants.

Wilson (1979) affirmait en conclusion de son étude que, même si les volumes d'entrée ne sont pas erronés, si la distribution spatiale des précipitations n'est pas préservée, les modèles peuvent se retrouver avec de fortes divergences dans les volumes de sortie selon le type d'averse (par exemple convective ou stratiforme⁴) (pour plus d'informations sur les types d'averses, il est intéressant de consulter la revue de Smith (1993)). Toujours selon Wilson (1979) le fait par exemple qu'une sous-estimation des pluies n'engendre pas la même magnitude d'erreur de sous-estimation des débits qu'une surestimation des pluies de même grandeur⁵, est la preuve du rôle joué par la répartition spatiale de la pluie dans la répartition des volumes à l'exutoire.

Or, ce type d'incertitude, qui pourrait influencer sur la pertinence des sorties des modèles pluie-débit, a longtemps été ignoré par les hydrologues. Cela pourrait provenir du fait des relativement bonnes performances obtenues par les modèles globaux malgré l'utilisation

⁴ En général, il existe deux types de précipitation :

Les précipitations dites **stratiformes** sont des précipitations continues mais avec une faible intensité provenant de systèmes dépressionnaires à large échelle. Le type principal de nuage qui y est associé est de la famille des stratus (nimbostratus, stratus) et des stratocumulus d'où la dénomination de ce type de précipitations.

La deuxième forme de précipitation est la précipitation **convective**. Ce type de précipitation est en général orageuse, de courte durée, de forte intensité et de faible extension spatiale. Elle est produite par des types de nuages « cumulus » et plus particulièrement les "cumulonimbus" formant ce qu'on appelle en hydrométéorologie des systèmes convectifs de méso-échelle. Voir aussi définition du Glossaire Météorologique de l'American Meteorological Society <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/search?id=mesoscale-convective-system1>

⁵ Phénomène qu'on peut désigner par non-linéarité de la réponse pluie-débit

d'une pluie de bassin ignorant la structure des averses. Ainsi, comme l'affirme Hamlin (1983) : "*The successful use of mean catchment rainfall has inhibited studies of the importance of the spatial and temporal nature of precipitations*".

1.4. Les modèles pluie-débit et la variabilité spatiale des précipitations

1.4.1 Quel est le degré de désagrégation spatiale des modèles nécessaire à la prise en compte de la variabilité spatiale des pluies?

La question de l'intérêt de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations dans les modèles pluie-débit a été étudiée en lien avec le degré spatial de désagrégation nécessaire pour les précipitations en entrée de ces modèles. Ainsi pour de nombreux modélisateurs, plus la taille des mailles d'une grille du modèle distribuée est fine, plus le modèle est supposé prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations (et par la même occasion des critères physiques du bassin versant). De nombreuses études ont analysé l'effet de la variabilité spatiale des précipitations par l'intermédiaire de l'impact de la résolution des données d'entrées dans un modèle pluie-débit distribué sur la simulation des débits.

Une des premières études a été réalisée par Beven et Hornberger (1982) à partir d'un modèle semi-distribué uniquement par sa fonction de production. Partant d'un bassin d'une superficie 287 km² situé dans l'Illinois (USA) et décrit comme homogène en terme de sol, les auteurs le divisent en trois zones de superficie équivalente selon leur distance à l'exutoire. A l'aide d'un modèle de génération stochastique de précipitations au pas de temps horaire, ils génèrent différentes structures d'averses centrées sur une des trois zones divisant le bassin : l'amont, le centre ou l'aval. Ils testent leur modèle de façon semi-distribuée grâce à ce zonage, ainsi qu'une version globale où chaque zone reçoit la même quantité de pluie moyenne. En inversant la structure des averses (la pluie amont va à la pluie aval et inversement), ils remarquent que les effets de la distribution des pluies sont faibles sur les volumes de sorties du modèle et même sur la hauteur des pics de crue simulés. En revanche, l'effet de la structure de l'averse est plus significatif sur le délai d'occurrence des pics de crue (appelé ici le "timing" des hydrogrammes). Cette répercussion provient, selon les auteurs, du fait que le temps de réponse du bassin étudié est long par rapport à la durée de l'averse (ici prise inférieure à 24 heures). Les auteurs concluent que, dans les cas de bassins versants

homogènes en terme de production des ruissellements (donc au niveau de leur type de sols), l'utilisation d'un modèle global pourrait être adaptée pour une reconstitution correcte des volumes de sorties. Mais, dans ce cas particulier où le temps de réponse du bassin est long par rapport à la durée de l'averse, la modélisation distribuée serait intéressante du fait de l'influence du schéma spatial de l'averse dans le "timing" des hydrogrammes.

Une seconde étude marquante concernant l'impact de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations *per se* dans les modèles est celle d'Obled *et al* (1994). Ils ont testé une version semi-distribuée du modèle TOPMODEL au pas de temps horaire sur un bassin versant de 71 km² de climat méditerranéen du Sud Est de la France (Le Real Collobrier). Les précipitations de ce bassin ont été évaluées par un réseau constitué de 21 pluviomètres. L'idée était de faire varier les entrées selon trois types de précipitation de diverses résolutions et densités de postes utilisés : (1) PU5 qui correspond à la pluie moyenne arithmétique calculée sur une base de cinq postes pluviométriques, (2) PU21 qui correspond à une pluie de bassin calculée à partir d'une fonction de surface de type Spline (un substitut de krigeage) pour la totalité des postes présents, (3) PS21 qui correspond à la pluie d'entrée calculée pour neuf sous-bassins d'une surface de 6 à 8 km² par la même fonction de surface de type Spline utilisée pour PU21. L'étude est faite sur 19 événements (9 pour le calage et 10 pour la validation). Pour chaque type de précipitation, le modèle a été recalibré. En termes de valeurs horaires sur les 19 événements modélisés, les auteurs ne remarquent pas de contradiction sur les quantités obtenues, les deux types de précipitations moyennes PU5 et PU21 étant bien corrélées. En termes de quantités cumulées sur les 19 événements, une différence modeste est observée (2131mm pour PU21 contre 2071 mm pour PU5). En termes de critère de performances du modèle, l'utilisation de PU21 permet un gain de 0.03 point sur le critère de Nash par rapport à PU5 (0.77 contre 0.80). Les auteurs notent que les vecteurs de paramètres optimisés du modèle varient significativement selon le type d'entrée utilisé. L'utilisation de l'entrée spatialisée de pluie PS21 ne permet pas d'améliorer les performances du modèle, bien au contraire. Le critère de performance moyen obtenu avec cette pluie distribuée sur neuf sous-bassins est de 0.78. Ce résultat est moindre que celui obtenu avec la pluie globale PU21, alors que les volumes d'entrée sont exactement les mêmes. La source d'erreur majeure identifiée par les auteurs est que, si le modèle est nourri avec des entrées distribuées de précipitations, il se produit des pics secondaires que le bassin versant parvient à lisser en réalité. Les auteurs concluent que la répartition spatiale des précipitations n'est pas suffisante pour surpasser les effets de lissage du modèle. Selon eux, ce

résultat peut être lié au type de processus d'infiltration préférentiel de TOPMODEL qui est de type Dunne (dit ruissellement sur surfaces saturées) (Dunne, 1970). Ce type d'infiltration est représenté par le modèle comme les aires contributives au ruissellement au sein du bassin. Les auteurs suggèrent que ce bassin est constitué en réalité uniquement de très petites aires contributives au ruissellement et qu'il est donc peu sensible au schéma spatial des précipitations.

De nombreuses autres études ont analysé l'influence du degré de spatialisation nécessaire pour la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations. Celles-ci sont synthétisées dans le Tableau 1.1. En résumé, beaucoup d'analyses sont faites sur la densité minimale de postes nécessaire pour pouvoir discrétiser les pluies en entrée des mailles des modèles distribués. On peut remarquer qu'en général, les auteurs concluent que l'augmentation de la taille des cellules d'un modèle distribué réduit le ruissellement donc, par conséquent, les pointes de crue. Mais aucune perspective claire n'est démontrée, les études étant généralement établies sur la base d'un unique bassin versant expérimental souvent sur-instrumenté par rapport aux bassins suivis en conditions opérationnelles.

On peut aussi relativiser la majorité de ces résultats à propos des effets de la variabilité spatiale des précipitations car ces études ont majoritairement recours à l'utilisation de données synthétiques, soit de précipitations, soit de débits, où les débits de référence sont les débits simulés par le réseau le plus dense. Ces données synthétiques rendent les résultats très dépendants des modèles utilisés, notamment de la formulation de leur fonction de production (augmentation des volumes de sortie causée par exemple par le ruissellement de type Hortonien mais dans une moindre mesure si le modèle est basé sur le refus d'infiltration) ou dans leur module de routage (différence dans le "timing" des hydrogrammes). Finalement, on peut rappeler que les modèles, aussi distribués soient-ils, restent des représentations grossières de la réalité et l'utilisation de données de référence issues du modèle amènent un risque certain de trouver des résultats vérifiant les hypothèses sur lesquels les modèles sont construits.

Tableau 1.1 Etudes de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations avec des modèles distribués

Référence	Type de modèle	Analyse réalisée	Nombre de bassins et superficie	Type de données	Climat	Conclusions
(Faures <i>et al.</i> , 1995)	Distribué KINEROS Hortonien	Variation du nombre de postes définissant la pluie d'entrée de 1 à 5	1 (4.4 ha)	Max 5 pluviomètres, 10 événements Pas de temps 5 min	Walnut Gulch Watershed (GW) semi-aride	Les incertitudes sur l'estimation des débits sont fortement liées au nombre de postes. Baisse des pics de débits en utilisant la plus fine échelle spatiale. 4 postes sont nécessaires au minimum
(Lopes, 1996)	Distribué KINEROS Hortonien	Bassin découpé en 20 aires et 9 réseaux de drainage Effet de la densité des postes Calé sur la plus forte densité de postes	1 (6.73 km ²)	10 pluviomètres, 3 événements Débits synthétiques	WGW semi-aride	La densité des postes pluviométriques minimale n'est pas la même en cas de pluie homogène ou non. 5 postes sont suffisants pour une pluie homogène Ce chiffre devient très variable pour une pluie hétérogène
(Michaud <i>et al.</i> , 1994b)	Distribué KINEROS Hortonien	Cellules de 4 ou 16 km ²	1 (148 km ²)	58 pluviomètres 10 événements Pas de temps de 4 min ou 1 heure	WGW semi-aride	L'utilisation d'une grille de 4 km ² est trop lâche pour indiquer au modèle les fortes intensités bien que les volumes d'entrée sont préservés (problème de réduction du ruissellement de type Hortonien)
(Ogden et Julien, 1994)	Distribué à base physique CASC2D +Green et Ampt infiltration	Cellules de 1, 2, 3, 4, 6, 8 km ²	2: 32 km ² et 121 km ²	Radar type NEXRAD 30 événements Débits synthétiques Pas de temps 2 heures	Semi-aride	Volumes de pluies ruisselées diminuent si la taille des cellules augmente donc les volumes de crues simulés sont moindres.
(Arnaud <i>et al.</i> , 2002)	Distribué Trois modèles avec différente interceptions de la plate forme MERCEDES -Interception complète -Coefficient de ruissellement constant -Interception partielle	Deux schémas de précipitation : RU Uniforme (moyenne) NRU Non uniforme Effet de la superficie du bassin versant	4 bassins factices de 20 à 1500 km ² Partant du plus grand, on réduit la surface de ½, ¼ et 1/8 But: conserver la même morphologie du coup considérée comme homogène	44 pluviomètres 50 événements classés selon leur fréquence Débits synthétiques	Semi- aride Région de Mexico	Les volumes simulés varient considérablement entre les RU et NRU. Les variations sont plus fortes sur les grands bassins. Les événements les moins sensibles au schéma précipitant sont les plus extrêmes. Les modèles avec réservoir d'interception sont les plus sensibles.
(Booij, 2002)	Distribué Coefficient de ruissellement constant	Bassin globale puis divisé en 4, 17 et 65 Calé sur la plus fine résolution spatiale et temporelle Test de la sensibilité à la résolution du bassin et de la pluie d'entrée. But: Reconstitution des débits de fréquence "extrêmes"	1 bassin de 30000 km ² (La Meuse)	Pluie générée stochastiquement . Pas de temps variable <= jour	Tempéré	Conclusion : plus grande importance de la résolution du bassin que de celle des pluies La résolution, minimale de la pluie (globale) suffit pour reconstituer les extrêmes.
(Vischel et Lebel, 2007)	Distribué type SCS	Grille de résolution initiale de 1 km. Test de résolutions 5 10, 20 25 50 100 km	zone de 10000 km ² au mais uniquement observation du ruissellement simulé sur la zone	548 événements Evalués sur un réseau de 30 postes pluviométriques	Semi-Aride (Sahel)	Diminution du net ruissellement avec l'agrégation des entrées de précipitations (seuil d'acceptabilité de 20 km)

1.4.2 Une insuffisance des modèles globaux? Comparaison de modèles globaux et distribués

Dans le cadre de la modélisation hydrologique, si la variabilité spatiale des précipitations avait un effet significatif sur la répartition des débits, les modèles dits distribués censés prendre en compte la structure spatiale de leurs entrées devraient avoir un net avantage pour la simulation des débits par rapport aux modèles dit globaux supposés ignorer cette structure spatiale (Smith *et al.*, 2004b).

De nombreuses études mentionnent ce défaut *a priori* des modèles globaux et ont donc entrepris de confronter leurs performances avec des modèles distribués ou semi distribués confrontés à la variabilité spatiale des précipitations. En complément de ces investigations, certaines études analysent aussi les effets des différentes hypothèses de fonctions de production utilisées dans les modèles globaux:

- Krajewski *et al* (1991) testent la sensibilité de plusieurs versions d'un modèle à base physique à la variabilité spatiale et temporelle des entrées. Pour cela, ils divisent un bassin versant de 7.5 km² situé dans l'Iowa en sous-bassins selon des critères topographiques. L'infiltration du modèle est calculée en utilisant la formule du SCS (Soil Conservation Service). 1000 événements de précipitation sont générés stochastiquement par simulation de Monte Carlo à pas de temps et d'espace fins. La "vraie" réponse du bassin est générée au pas de temps 5 min par ces pluies artificielles supposées représenter une densité de 12 postes par km² (87 sous-bassins homogènes). Pour le modèle distribué, ils testent (1) des entrées au pas de temps horaire calculées pour les 87 sous-bassins, puis (2) une entrée calculée par des polygones de Thiessen à partir d'un sous-échantillon de 5 postes parmi 87 et enfin (3) une entrée globale avec un poste unique placé au centre du bassin versant. Les entrées du modèle global, fonctionnant aussi au pas de temps horaire sont représentées par ce même poste unique situé au centre du bassin. Ils déduisent que les effets de la variation de l'échantillonnage spatial ne sont pas prédominants par rapport à ceux provoqués par les changements de pas de temps. Ils concluent qu'un seul poste est suffisant pour modéliser les pics de crue de ce bassin de 7.5 km². Ils remarquent que le modèle global amène à de sévères sous-estimations des pics de crue par rapport au modèle distribué. Ils attribuent l'incapacité du modèle global à

reconstituer les pics de crue lors de précipitations hétérogènes à la non-linéarité de la réponse du bassin.

- Naden(1992) a comparé les simulations de 7 événements de pluies hivernales intenses sur le bassin de la Tamise en Grande-Bretagne (7000 km²) avec une méthodologie incorporant à la fois la variabilité spatiale des sols et des précipitations. Elle a utilisé un procédé basé sur la méthode de l'hydrogramme unitaire exploitant la structure du réseau de drainage (temps de réponse) et la réponse des versants. L'auteur trouve que c'est la réponse des versants qui domine sur le temps de routage du réseau et qui masque ainsi les impacts de la variabilité spatiale de précipitations. Elle explique que malgré la grande superficie du bassin et sa géologie mixte, les types de sol et les précipitations peuvent être considérés comme uniformes. En effet, les réponses de versants sont équivalentes sur les sept événements de pluie, le bassin versant jouant un rôle de filtre passe-bas. L'auteur conclut que pour ce bassin, une approche globale est largement suffisante pour simuler avec succès les événements de crue.
- Michaud et Sorooshian (1994a) comparent trois approches de modélisation sur le bassin de Walnut Gulch en Arizona (150 km²). Il s'agit du modèle pluie-débit KINEROS, modèle complexe distribué développé pour les régions arides et du SCS un modèle plus simple testé à la fois dans sa version globale et sa version distribuée. Les tests se font sur 8 événements d'averses au pas de temps 5 min dont les données proviennent des 98 postes pluviométriques de ce bassin de recherche expérimental. Le modèle global SCS obtient de piètres performances par rapport aux deux autres modèles distribués considérés eux comme équivalents. Les auteurs concluent que l'infériorité du modèle global est logique car il ne tient pas compte des variabilités spatiales des précipitations considérables dans ce genre d'environnement semi-aride.
- Shah *et al* (1996) testent différentes versions de désagrégation des pluies synthétiques en entrée de SHE, un modèle distribué à base physique ainsi qu'une version globale de ce modèle. Ces modèles sont testés selon les conditions d'humidité antérieures aux événements de pluie étudiés d'un bassin de 10.5 km² situé en amont de la Wye River (Royaume-Uni). Ils trouvent que pour leur modèle distribué sous conditions antérieures humides, de bonnes prédictions peuvent être obtenues avec une pluie globale moyenne calculée à partir d'un seul poste pluviométrique. En revanche, sous conditions antérieures sèches, l'utilisation d'une pluie globale de bassin amène à de fortes erreurs sur la simulation des débits. Leur modèle global arrive, quant à lui, à de

bonnes prédictions de débits, sous conditions antérieures d'humidité forte. Mais, sous conditions antérieures sèches, les performances de ce modèle baissent sévèrement. Ils attribuent ce résultat à la plus forte non linéarité de la réponse pluie-débit sous conditions antérieures sèches. Dans cette configuration, le ruissellement est majoritairement de type Hortonien.

- Finnerty *et al* (1997) explorent la sensibilité du modèle global SAC-SMA (Sacramento) à la variation spatiale et temporelle de la résolution des données d'entrée de précipitations issues du radar NEXRAD sur des bassins et des sous-bassins synthétiques. Le modèle a été calé globalement sur un bassin versant réel de 800 km² grâce à des données provenant d'un réseau de postes pluviométriques à un pas de temps de 6 heures. Ils trouvent que passer à des échelles spatiales et temporelles plus fines que celles pour lesquelles le modèle a été calibré amène à un accroissement des ruissellements de surface et de l'écoulement de base du bassin. De même, passer à une échelle temporelle plus fine (de 6 h à 1 h) en conservant l'échelle spatiale, conduit aussi à une augmentation des ruissellements de surface. Ces effets sont attribués à la simplification spatiale et temporelle des intensités des pluies tombées, ainsi qu'au lissage des événements de très courte durée. Cependant, les hydrogrammes simulés aux plus fines échelles spatiales et temporelles n'ont pas été comparés aux observés.
- Koren *et al* (1999) explorent les effets de la variabilité spatiale des précipitations en utilisant quatre modèles globaux : SAC-SMA, "OSU Multilayer model" (tous deux supposés ignorer la variabilité spatiale des précipitations), le modèle SWB et une version modifiée de SAC-SMA (censés prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations). Des précipitations au pas de temps horaire provenant de données radar NEXRAD à la résolution initiale de 16 km² sont utilisées comme entrées pour un bassin versant de 65000 km² situé à la frontière entre l'Arkansas et l'Oklahoma. Cinq échelles spatiales intermédiaires ont été testées via des sous-bassins synthétiques entre 16 km² (constituant la résolution maximale) et 65000 km² (résolution minimale soit le bassin en entier). Les paramètres d'échelle restent constants et donc le modèle n'est pas recalibré à chaque changement. Les auteurs montrent qu'en affinant l'échelle spatiale de modélisation, les ruissellements de surface augmentent considérablement ainsi que, dans une moindre mesure, les volumes des débits totaux en sortie. Tous les modèles paraissent dépendants de

l'échelle spatiale, mais le niveau de dépendance varie avec la fonction de production utilisée par les modèles. Le modèle OSU, avec un mécanisme unique par excès d'infiltration est le plus sensible. Les deux versions de SAC-SMA construites avec des mécanismes mixtes de saturation et refus d'infiltration sont, elles, moins sensibles. Les débits simulés par chaque version n'ont pas été confrontés à des observations réelles, mais les auteurs indiquent s'être focalisés sur la recherche des modèles les plus indépendants possible de l'échelle spatiale d'utilisation, ceci dans le but de les utiliser sur des bassins versants non jaugés de diverses superficies.

- Corral *et al.* (2000) ont travaillé sur la comparaison des versions semi-distribuée de grille 1 km² et globale du modèle TOPMODEL et d'une version globale du modèle SCS. Le bassin étudié est un bassin versant méditerranéen de 48 km². Les précipitations proviennent de données radar au pas de temps 30 min. Les auteurs trouvent que le modèle distribué est plus performant que les deux modèles globaux en termes de reproduction des pics de crue et des récessions. Cependant, les auteurs concluent qu'il est impossible de distinguer les effets de la variabilité spatiale des précipitations de ceux de la discrétisation du modèle.
- Bell *et al.* (2000) examinent la sensibilité à la résolution des données d'entrée du modèle pluie-débit global PDM et du modèle distribué SGM. Le bassin étudié est celui de la Brue (135 km²) situé dans le sud-ouest de l'Angleterre. Les données de précipitations proviennent de 49 pluviomètres couplés à des données de type radar. Ils comparent les performances de leur modèle global à différentes versions de leur modèle distribué selon l'agrégation des cellules de 2 km, 5 km puis 10 km sur deux événements de précipitations, l'un stratiforme (considéré comme un champ précipitant homogène), l'autre convectif (considéré comme un champ plus variable spatialement). Le modèle distribué est calé pour chaque résolution. Ils trouvent que la différence de performances entre le modèle distribué et global est faible pour l'événement stratiforme et qu'occasionnellement, sur d'autres événements de même type, le modèle global se trouve être le meilleur. Pour l'événement convectif, c'est la version distribuée à plus fine résolution (2 km) qui possède sensiblement les meilleures performances juste devant les versions 5 km et 10 km. De plus, les auteurs ont testé les performances des versions de résolution 2, 4, 6, 8, 10 et 16 km (16 km correspond à une pluie globale) du modèle distribué calé sur la version 2 km. Ils remarquent que les performances se maintiennent si chaque version est recalibrée à

chaque fois pour les deux types d'événements de pluie. Mais que, pour l'événement dit convectif, les performances chutent avec l'augmentation de l'échelle de résolution du modèle si on conserve les paramètres optimisés avec la version 2 km. Ceci prouverait que les paramètres peuvent s'adapter aux erreurs d'entrée du modèle.

Pour résumer, on peut dire qu'en général, il ressort de ces travaux que l'utilisation du modèle global (ou l'augmentation de la taille de la grille d'un modèle distribué) conduit à une diminution de la production du bassin. Ceci est plus spécialement vrai pour les modèles ayant une fonction de production de type Hortonien. Ceci est confirmé par Winchell *et al* (1998) lors de l'analyse de la sensibilité à la variabilité spatiale des précipitations, de deux types de modèles, l'un fonctionnant par refus d'infiltration (type Hortonien), l'autre par ruissellement sur surfaces saturées (type Dunne). Toutefois, une bonne partie des analyses conduisent à une plus grande sensibilité des débits simulés à l'échantillonnage temporel des précipitations qu'à leur distribution spatiale. Toutes les études s'accordent sur le fait qu'en cas de pluies stratiformes, les modèles globaux sont équivalents, voire meilleurs que les modèles distribués (surtout s'ils sont recalibrés). Pour des événements de pluie convectifs, les modèles distribués conservent un léger avantage du fait de l'accroissement de la non-linéarité de la réponse hydrologique. Cet avantage des modèles distribués diminue lorsque la surface du bassin augmente.

Il est intéressant de rappeler que la plupart de ces investigations sont réalisées sur des bassins versants particuliers à partir de données synthétiques, tant en termes de précipitations qu'en termes de débits (les auteurs justifiant en général cette utilisation par le manque de données disponibles). Dans beaucoup de cas, les comparaisons de débits simulés sont faites par rapport à un débit de référence, l'hydrogramme dit "vrai", souvent généré par le modèle avec résolution spatiale la plus fine des données d'entrées. Les résultats sont donc souvent dépendants du modèle utilisé. Ils sont surtout rarement confrontés à la réalité hydrologique: les débits observés.

Finalement, au regard de ces nombreuses études réalisées avec un modèle sous telle résolution spatiale et temporelle, sur tel bassin de telle superficie et de tel climat, recalibré ou non lors du changement d'échelle, il devient très difficile d'avoir des conclusions clairement établies sur l'intérêt de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations par les modèles. Beaucoup de résultats demeurent contradictoires. Pour

beaucoup, c'est la variabilité spatiale des précipitations qui provoque la non-linéarité de la réponse hydrologique et c'est cette non-linéarité qui serait mal prise en compte par les modèles globaux. Mais ce type de conclusion proviendrait surtout du fait qu'on compare les simulations des modèles globaux aux débits simulés par les modèles distribués, où l'augmentation de la résolution spatiale accentue souvent ce phénomène de non-linéarité.

Cependant, on peut remarquer que, plus le bassin est de faible superficie, plus les effets de la variabilité spatiale des précipitations se font ressentir, ainsi que ceux de la qualité nécessaire des données d'entrées (soit la densité minimale de pluviomètres). Mais souvent les effets sont difficilement interprétables car les pas de temps diminuent aussi lorsque que l'on se dirige vers la modélisation des petits bassins (où l'on peut voir des pas de temps de 2 min, l'intérêt de pas de temps si fin restant discutable). Obed *et al* (1994) sont parmi les seuls à avoir travaillé entièrement sur des données réelles. Après leur étude sur un petit bassin méditerranéen de 71 km² au pas de temps horaire, ils affirment: *"In fact, it seems that the spatial variability of rainfall, although important, is not sufficiently organized in time and space to overcome the effect of smoothing and dampening when running off through this rural medium sized catchment"*.

Afin de mettre de l'ordre dans ce type de conclusions sur l'écart *a priori* de performances entre modèles globaux et distribués du fait de la variabilité spatiale des précipitations et afin de résoudre convenablement l'énigme des effets *per se* de la variabilité spatiale des précipitations sur les répartitions de débits, le National Weather Service (NWS) aux Etats-Unis a engagé le Distributed Model Intercomparaison Projet (DMIP).

Ce projet est destiné à la comparaison à partir de données observées, de plusieurs modèles distribués et d'un modèle global. Ces modèles sont utilisés pour la prévision des débits aux USA. Une étude sur l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur les performances de ces modèles est aussi prévue. Des équipes d'hydrologues du monde entier concernées par le problème ont la possibilité de collaborer sur ce projet. Les ambitions et les différentes phases de ce projet sont détaillées par Smith *et al* (2004b).

Sept bassins versants sont sélectionnés, représentant des superficies de 65 km² à 2500 km². Tous sont situés dans les Etats de l'Arkansas, l'Illinois, l'Oklahoma et du Missouri. Pour ces bassins, on dispose de données horaires sur sept années et les précipitations sont déterminées par des données radar de type NEXRAD de résolution 4 km×4 km.

Dans le cadre de ce projet, Smith *et al* (2004a) ont testé l'hypothèse que, pour les bassins marqués par une forte variabilité des précipitations et/ou un lissage faible du signal d'entrée

des pluies, les modèles distribués seront plus performants que les modèles globaux . L'étude a été réalisée sur trois des bassins du projet DMIP de superficie allant de 800 km² à 1495 km². Ils ont défini des indices pour évaluer la variabilité spatiale des pluies du bassin (d'ordre général et de localisation) et des analyses en ondelettes pour déterminer la capacité de filtrage et de lissage des précipitations d'entrée du bassin sur les débits observés. Pour les événements d'averses simulés, ils trouvent que pour le bassin versant où la pluie est décrite comme la plus hétérogène (The Blue Catchment), le modèle distribué utilisé peut présenter des améliorations par rapport aux modèles globaux. Ce bassin présente aussi un faible niveau de filtrage des précipitations. Les auteurs concluent que pour ce bassin, la pluie est suffisamment variable spatialement pour interagir avec les effets de lissage par le bassin. Pour les deux autres bassins où la variabilité spatiale des pluies est moins prononcée, les résultats sont plus contrastés (égalité des deux modèles pour un, avantage au modèle global pour l'autre). Ils constatent aussi que pour les événements les plus lissés par le bassin, le modèle distribué n'apporte aucune amélioration par rapport au modèle global.

1.5. Pourquoi et comment les modèles hydrologiques devraient-ils prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations ?

1.5.1 Résultats de la synthèse bibliographique

Les études commentées précédemment sur l'importance de la variabilité spatiale des précipitations pour une meilleure simulation des débits amènent à plusieurs conclusions :

1. Cette variabilité spatiale ne se manifeste pas de la même manière partout. Par exemple, la variabilité des précipitations dites convectives des bassins semi-arides aurait un impact hydrologique plus important que celle des précipitations dites stratiformes.
2. Si cette variabilité spatiale a des effets sur la répartition des débits, ceux-ci seraient surtout modifiés dans leur répartition temporelle et non sur la hauteur des pics ou les volumes d'écoulement.
3. Cette variabilité spatiale des précipitations serait une composante de la non-linéarité de la réponse du bassin. Mais, les effets de la variabilité spatiale des précipitations

peuvent être compensés par les effets de lissage du bassin, ce dernier pouvant jouer le rôle de filtre passe-bas.

4. L'influence de la variabilité spatiale des précipitations pourrait être associée au processus d'infiltration majoritaire sur le bassin (et surtout sur lequel le modèle est construit). Le ruissellement de type Hortonien (par refus d'infiltration) serait plus sensible à ce phénomène que le ruissellement de type Dunne (dit sur surfaces saturées). Par exemple, la forte sensibilité des bassins semi-arides à la variabilité spatiale des précipitations pourrait être certainement due à la part prépondérante du ruissellement de type Hortonien dans ce type de climat.
5. L'influence de la variabilité spatiale des précipitations est dépendante de l'échelle spatiale et temporelle de modélisation. Si cette échelle augmente, la variabilité spatiale diminue et les effets de lissage du bassin deviennent prépondérants.
6. L'influence de la variabilité spatiale des précipitations est sensible à la résolution temporelle. Plus l'échelle d'observation des précipitations et des débits est fine, plus les effets de la variabilité spatiale des précipitations seront importants par rapport aux effets de lissage du bassin.
7. Plus la variabilité spatiale des précipitations est forte, plus l'incertitude sur l'estimation des paramètres du modèle hydrologique augmente. Cependant, les modèles possèdent aussi une certaine faculté pour adapter leurs paramètres aux mauvaises informations sur les précipitations si un minimum d'information est disponible.
8. Les modèles sont généralement plus sensibles à une meilleure précision des volumes d'entrées qu'à leur répartition dans l'espace.
9. Enfin, certaines études ont conclu que la variabilité spatiale des précipitations n'est généralement pas suffisamment organisée dans l'espace pour contrebalancer les effets de lissage et qu'un modèle global peut s'avérer amplement suffisant pour modéliser les débits de la plupart des bassins.

1.5.2 Stratégies de recherche envisagées

Aucun consensus n'est donc clairement établi sur la nécessité de prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations dans les modèles pluie-débit. De nombreux partis pris existent, mais ceux-ci sont basés généralement sur des bassins singuliers et/ou des

événements très spécifiques. De plus, de nombreuses études se sont appuyées sur des bases de données synthétiques de débits, qui ne font que retranscrire les hypothèses de construction des modèles (le débit "vrai" étant celui qui est simulé par le modèle aux plus fines échelles spatiales et temporelles).

Le principal objectif de cette thèse est de comprendre si les modèles globaux, qui n'utilisent que la lame d'eau moyenne comme entrée, peuvent et ont intérêt à utiliser une information sur la variabilité spatiale des averses. En d'autres termes, est-ce que cette non prise en compte est la source d'erreurs grossières dans la simulation des débits ? Ou bien le modèle s'adapte-t-il à l'absence de cette information par l'intermédiaire de son jeu de paramètres ?

De plus, la variabilité spatiale des précipitations est-elle vraiment prépondérante dans ses effets sur les générations de débits ? D'autres sources de variabilité peuvent supposer avoir des effets sur la répartition des débits (lithologie, pédologie, occupation du sol, topographie...), et éventuellement masquer l'effet de cette variabilité.

Aucune étude générale sur la sensibilité à la prise en compte de la variabilité spatiale dans un modèle n'a été menée jusqu'à présent sur la base d'un grand échantillon de bassins et sur des données observées en continu.

Les recherches menées ici sortent du cadre des comparaisons de modèles distribués / modèles globaux et visent à rechercher si un modèle global peut bénéficier lui-même de l'information sur la variabilité des pluies pour réduire les erreurs dans la simulation des débits et améliorer ses performances. Au delà des querelles entre approches de modélisation, nous cherchons à mieux comprendre la sensibilité du système réel que nous étudions, le bassin versant, à cette variabilité spatiale des précipitations.

Afin de dégager certaines pistes de réponse à ces problématiques, il s'agit de rechercher une méthodologie alternative au modèle distribué pour la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations dans un modèle global. Ceci sera fait sans passer par des méthodes classiques de désagrégation en une grille qui pourrait mener à d'autres erreurs dont on ne pourrait distinguer les origines et qui pourraient masquer les améliorations.

On va donc proposer ici des méthodes parcimonieuses de prise en compte explicite de la variabilité spatiale des précipitations dans un modèle global, applicables sur n'importe quel bassin pour lequel des données pluviométriques permettent une estimation minimum de la variabilité spatiale des entrées de pluie.

Chapitre 2

Présentation et description de la base de données

2.1. Introduction

Pour l'analyse de l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la modélisation pluie-débit, nous nous appuyons sur un grand échantillon de bassins versants. Par grand échantillon, nous entendons un nombre suffisamment important de bassins versants pour obtenir une significativité statistique des performances des modèles testés. Le fait de travailler sur un grand nombre de bassins versants induit une diversité climatique, hydrologique, géographique et géomorphologique des cas étudiés. Cette diversité permet de conduire à des conclusions relativement indépendantes des caractéristiques particulières de tel ou tel bassin et donc plus générales (Linsley, 1982).

Cette approche évite de limiter la portée des conclusions sur des méthodes et des modèles à un bassin particulier. En effet, une qualité recherchée pour un modèle pluie-débit (voire même un modèle en général) est qu'il puisse être appliqué sur le plus grand nombre de cas possibles et à terme sur n'importe quel bassin versant intéressant pour une utilisation en opérationnel (Andréassian *et al.*, 2006).

Le travail sur de grandes bases de données est aujourd'hui rendu possible grâce aux capacités de calcul de plus en plus importantes, à la mise à disposition de plus en plus généralisée de données par les services chargés de les collecter et par l'existence de longues séries sur un grand nombre de stations de jaugeage et de pluviomètres.

Pour notre étude, nous avons besoin de longues séries temporelles continues de données nécessaires à l'alimentation et à l'évaluation des modèles testés. Les modèles utilisés dans cette thèse nécessiteront trois types de données, utilisées classiquement en modélisation pluie-débit; à savoir la pluie, l'évapotranspiration potentielle (ETP) et le débit.

Afin de rechercher l'influence des échelles spatiales et temporelles sur la variabilité des pluies dans les modèles, outre l'utilisation d'un large spectre de bassins versants (de 23 à 43000 km²), nous utiliserons des modèles à différents pas temps : journalier et horaire.

2.2. Quelles données utiliser pour représenter la variabilité spatiale des précipitations ?

Pour évaluer la pluie de bassin et sa variabilité spatiale en modélisation pluie-débit, on utilise majoritairement les réseaux de postes pluviométriques et les données des radars météorologiques. Nous nous sommes appuyés dans le cadre de ce travail, sur les bases de données de hauteurs de précipitations issues des réseaux de postes pluviométriques. A cela plusieurs raisons :

- l'équipe hydrologie du Cemagref d'Antony dans laquelle est réalisée cette thèse, disposait déjà de larges bases de données particulièrement au pas de temps journalier. Les travaux de Makhoulf (1994), Edijatno et al.(1999), Perrin et al.(2001), Andréassian (2002); Mathevet, (2005) et Le Moine *et al* (2007) ont largement contribué à la récolte de ces données ;
- les données de radar ne sont pas encore disponibles sur de longues périodes sur de nombreux bassins;
- la donnée radar est encore délicate à utiliser du fait des nombreuses incertitudes amenées par la transformation de ce type de donnée provenant d'une mesure indirecte (réflectivité d'une onde de faible longueur) en quantité précipitée. Elle reste également toujours très dépendante du réseau au sol (Tetzlaff *et al.*, 2005).

2.3.Constitution de la base de données

2.3.1 Critères de sélection des bassins versants

Pour représenter les champs de pluie des bassins et leur variabilité dans l'espace, nous nous sommes imposé d'avoir un minimum de deux postes pluviométriques par bassin versant.

Quoique la représentativité de la variabilité des pluies à partir de deux postes soit certainement discutable, cette condition va nous permettre d'introduire le maximum de bassins versants dans notre échantillon. Cette situation (un nombre limité de postes fonctionnant en même temps) est cependant fréquente si on se fie au réalisme des conditions opérationnelles, en particulier sur les petits bassins versants.

Afin de déterminer au mieux la pluie de bassin, la sélection du nombre minimal de postes en fonction de la superficie a été établie dans le mesure du possible en respectant le critère de densité minimale acceptable (Figure 2.1) utilisé dans le cadre du projet MOPEX (Schaake *et al.*, 2006). Ce critère ne tient pas compte de la physiographie du bassin versant, mais, est assez sélectif pour être utilisé sur la plupart des bassins (Oudin, 2004; Mathevet, 2005).

Superficie du bassin (km ²)	50	200	500	1 200	2 000	3 000	6 000	10 000
Nb de stations pluviométriques	2	3	4	5	6	7	8	9

Figure 2.1 Nombre de pluviomètres nécessaires pour une description acceptable de la pluie de bassin en fonction de la surface du bassin (Schaake (2000) d'après Oudin (2004)).

Les durées des chroniques de précipitation, d'ETP et de débit doivent être au minimum de cinq années. En effet, la procédure utilisée pour le calage et le contrôle des modèles testée dans cette thèse est le split-sample test, où une partie des données est réservée pour le calage du modèle et l'autre pour le contrôle (Klemeš, 1983). Par expérience issue des travaux antérieurs au Cemagref, nous avons choisi des chroniques de cinq ans au minimum comprenant une année de mise en route du modèle (initialisation des réservoirs), deux années pour le calage des paramètres du modèle et deux années pour le contrôle. Cette durée de chronique implique que toutes les variables climatiques (sous-entendu pour les précipitations, chaque poste pluviométrique) soient disponibles sur toute la période sélectionnée qu'elle soit continue ou non. Cependant, pour chaque poste pluviométrique, nous tolérerons un maximum de 10% de lacunes par an. Ces lacunes seront comblées avec les autres données disponibles. Pour les débits, ce seuil de lacunes est fixé à 60% par an. Ce seuil peut paraître élevé. Cependant, très peu de bassins atteignent ce taux de lacunes. De plus, nous sommes dans un cadre comparatif et chaque version de modèle hydrologique testée reçoit la même quantité de données observées pour effectuer le calage de ses paramètres. Outre ces critères les plus importants, recouvrant le nombre de pluviomètres minimal, les

lacunes et la durée des chroniques, d'autres critères annexes sont utilisés pour la construction de la base de données :

- les bassins versants doivent couvrir un maximum de diversité dans le spectre des caractéristiques physiques (superficie, sol, géologie..);
- les bassins versants doivent couvrir un maximum de diversité climatique;
- les bassins doivent être peu influencés par la neige, car nous n'avons pas utilisé de module neige dans le cadre de ce travail;
- les bassins doivent être peu influencés par les ouvrages de retenue d'eau, car nous ne disposons pas de données sur ces aspects.

Le Cemagref disposant de conséquentes bases de données climatiques et hydrologiques, les bassins que nous avons sélectionnés ici ont tous été déjà utilisés dans les travaux antérieurs. Finalement, la totalité des données utilisées ici provient des thèses de Perrin (2000)⁶ pour le pas de temps journalier et de la thèse en cours de Nicolas le Moine pour le pas de temps horaire.

Le critère qui a été le plus sélectif est celui du nombre de postes présents sur le bassin. Du fait de ce critère, nous avons dû faire le choix de nous limiter à des bassins versants français, qui somme toute, représentent une assez large diversité climatique. De plus, utiliser des données d'un même pays permet d'avoir une relative homogénéité dans leur origine (collecte et traitement de débits par la banque HYDRO et des précipitations principalement par Météo France). Mis à part les travaux traitant de l'impact des barrages réservoirs (Payan *et al.*, 2007) et des précipitations neigeuses (thèse en cours d'Audrey Valéry), les bassins des bases de données du Cemagref subissent des influences limitées des retenues d'eau et de la neige.

2.3.2 Mise en œuvre pratique

Après rassemblement des données disponibles, deux genres de critères ont été évalués pour extraire les bassins versants répondant à nos exigences :

⁶ Cette thèse avait déjà rassemblé de nombreuses données issues de travaux antérieurs.

- Critère de sélection spatiale

A l'aide d'un système d'informations géographique représentant les contours et les exutoires des bassins versants dont nous possédons les données de débits, nous avons sélectionné ceux qui possédaient au minimum deux postes pluviométriques. Puis, les bassins ont subi un second traitement selon le nombre de postes nécessaires par rapport à leur superficie.

- Critères de sélection temporel

La seconde phase du traitement consiste à regarder la concomitance des chroniques des différentes séries pluviométriques et de la série de débit. Chaque série pluviométrique pouvant contenir des lacunes (un maximum de 10% de la durée sur la série temporelle), nous avons considéré qu'un pas de temps pouvait être utilisé pour l'étude si et seulement si au moins 80% des postes disponibles fournissaient une information de pluie à ce pas de temps. Ceci nous permet de limiter le biais dû aux lacunes dans l'établissement de la variabilité des pluies à chaque pas de temps.

Ce critère est extrêmement sélectif, car on peut s'apercevoir qu'il existe, pour certains bassins, un grand nombre de postes pluviométriques disponibles, mais qu'en tenant compte des lacunes et des diverses périodes d'observation de chaque poste, les périodes d'études se trouvent très réduites.

La sélection de données d'ETP ne présente, quant à elle, pas de difficultés particulières,. nous avons utilisé des données d'ETP de Penman provenant d'une trentaine de stations météorologiques pour l'ensemble des bassins. Une ETP moyenne interannuelle pour chaque bassin a été calculée au pas de temps journalier et horaire. Ce type de données d'ETP suffit amplement à la modélisation globale, Oudin (2004) ayant montré que les différences entre ETP datées et interannuelles étaient presque totalement absorbées par les réservoirs de production des modèles pluie-débit qui agissent comme des filtres passe-bas.

Ainsi, pour le pas de temps journalier, 182 bassins versants français ont été extraits. Les précipitations de ces bassins sont représentées par un nombre de postes pluviométriques allant de 2 à 105. La durée des chroniques d'observation va de 7 à 30 ans.

Pour le pas de temps horaire, 99 bassins versants ont été extraits. Les précipitations des bassins sont représentées par 2 à 16 postes pluviométriques. La durée de chroniques est de 10 ans pour tous ces bassins.

La liste détaillée des bassins (superficie, nombre de postes et caractéristiques hydroclimatiques annuelles) de ces deux échantillons est disponible en **Annexe 1**.

2.4. Description des échantillons utilisés

2.4.1 Echantillon au pas de temps journalier

2.4.1.1 Répartition géographique, superficies et densités de postes pluviométriques

Nous avons pu retenir 182 bassins versants français dont la répartition géographique est présentée à la Figure 2.2. Ils sont principalement situés au sein des grands bassins versant français de la Seine en amont de Paris, de la Sarthe en amont de Neuville, de la Moselle en amont de Haucquencourt et des petits bassins amont de la Loire, de l'Allier et du Lot.

Cette répartition nous permet de couvrir plusieurs types de conditions climatiques (continentales, océaniques et méditerranéennes). La quatrième tendance du climat français, le climat montagnard, n'est pas représentée du fait des précipitations neigeuses. La courbe de répartition des superficies de cet échantillon est donnée à la Figure 2.3. La taille des bassins versants varie de 30 à 43800 km² avec une superficie médiane de 188 km². 10 % des bassins font moins de 50 km² et 10 % font plus que 5000 km².

Les données de précipitations proviennent de la banque de données PLUVIO de Météo France, celles de débits de la banque HYDRO du MEDDA. Pour les 182 bassins versants sélectionnés, 625 postes pluviométriques ont été nécessaires, sachant qu'il y a plusieurs bassins emboîtés utilisant les mêmes postes.

Nous avons essayé d'évaluer la répartition des postes sur chaque bassin versant. Aucun critère général d'évaluation n'existe. Cependant, on peut dire que plus le nombre de postes est important sur le bassin (donc logiquement plus le bassin est grand), plus on peut penser que les postes pluviométriques seront repartis correctement au sein de ce bassin. Cependant, nous n'avons aucune idée a priori de la façon dont ces postes doivent être positionnés afin d'évaluer correctement, à la fois les pluies de bassin et la variabilité spatiale de ces pluies. On peut seulement affirmer que plus le nombre de postes est faible, plus leur positionnement va être aléatoire et plus la qualité de l'information aura de chances d'être moindre.

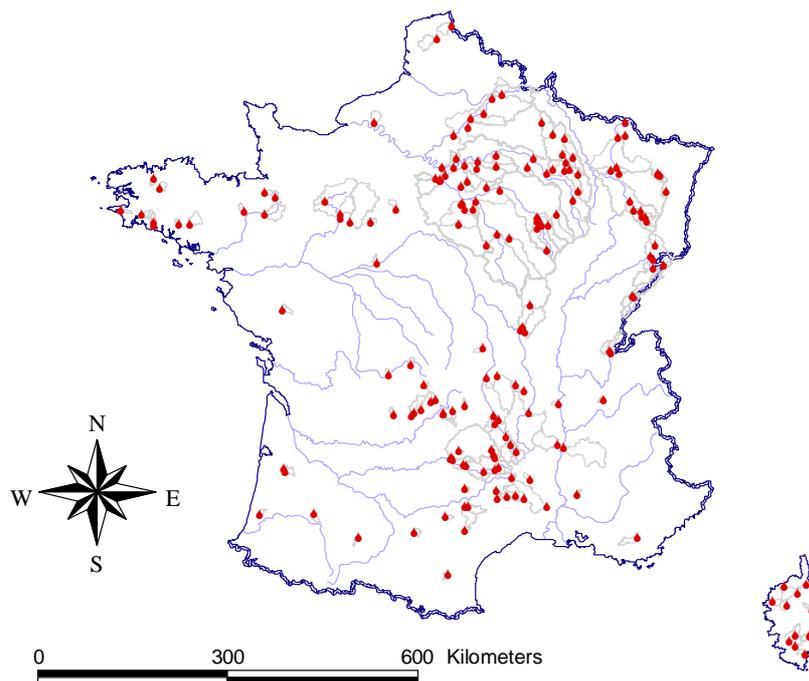


Figure 2.2 Localisation des 182 bassins versants utilisés au pas de temps journalier (exutoires: points rouges; contours: lignes grises)

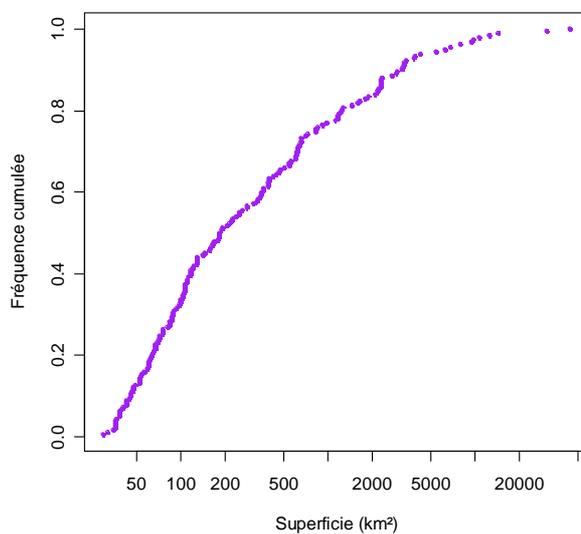


Figure 2.3 Distribution des superficies de l'échantillon (abscisse en log)

La Figure 2.4 montre la distribution du nombre de postes pluviométriques par bassin sur notre échantillon. On remarque que pour un peu plus de 20 % des bassins (soit une quarantaine), seuls deux postes pluviométriques sont présents. Pour un peu plus 20 % des bassins, seuls trois postes sont disponibles. Finalement, pour près de 50% des bassins de

l'échantillon, les précipitations sont représentées par moins de quatre postes pluviométriques. Ceci témoigne de la difficulté de trouver des données sur un grand échantillon, mais témoigne aussi, de la réalité hydrologique des données disponibles d'un point de vue opérationnel. Néanmoins, cette remarque sur le faible nombre de postes par bassin est aussi liée au fait qu'il y a beaucoup de petits bassins dans la base de données (médiane à 200 km²).

Cependant, pour un certain nombre de bassins versants, on ne peut travailler qu'avec une faible densité de données pluviométriques.

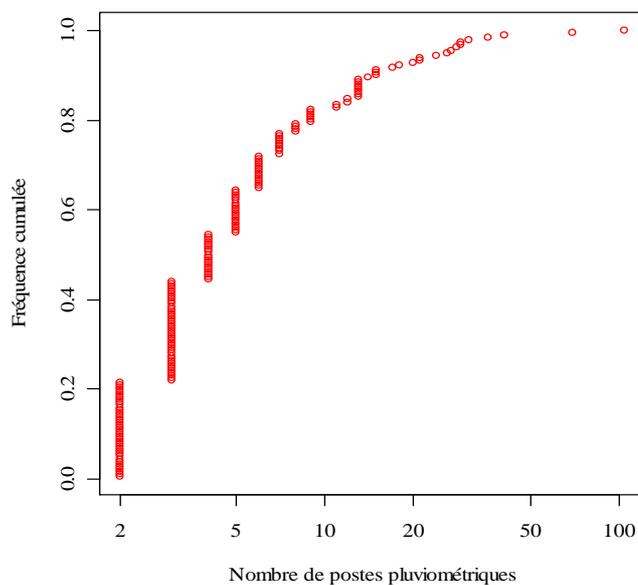


Figure 2.4 Distribution du nombre de postes pluviométriques disponibles par bassin sur les 182 bassins

Malgré cela, si on regarde la densité de postes pour 100 km² par rapport à la superficie (Figure 2.5), on peut remarquer que la majorité des bassins sont au dessus de la limite conseillée par Schaake (2000) (voir Figure 2.1, la limite y est représentée par un trait noir). Ceci est particulièrement vrai pour les bassins les plus grands (au delà de 2000 km²). Par exemple, pour le bassin de la Seine à Paris-Austerlitz (43800 km²), le nombre de points de mesure requis théoriquement est d'environ 30. Pour ce bassin, nous avons pu récolter pour cette étude 105 points de mesures, soit trois fois plus. Pour les bassins plus petits, on constate qu'un certain nombre d'entre eux sont situés en dessous du seuil minimal de postes. Il s'agit généralement de bassins entre 50 et 500 km², où la pluie est observée par seulement deux postes pluviométriques.

Le Tableau 2.1 résume les statistiques de cet échantillon de données au pas de temps journalier en termes de superficie et de nombre de postes pluviométriques.

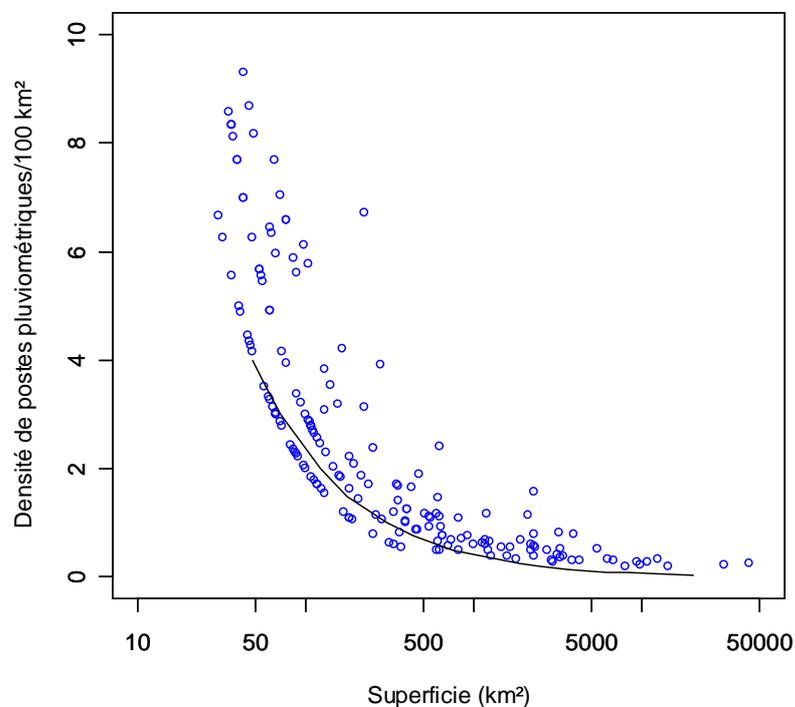


Figure 2.5 Densité de postes pluviométriques pour 100 km² en fonction de la superficie des bassins. La ligne continue représente la densité conseillée par Shaake (2000)

Tableau 2.1 Caractéristiques de l'échantillon des 182 bassins versants en termes de nombre de postes par bassin et de superficie

	Superficie (km ²)	Nombre de postes pluviométriques
Min	30	2
Médiane	188	4
Moyenne	1431	7
Max	43800	105

2.4.1.2 Caractéristiques hydro-climatiques

Diverses conditions hydro-climatiques sont représentées dans les bassins versants de cette base de données (voir Tableau 2.2). La Figure 2.6 a représente les pluies moyennes annuelles en fonction soit des débits moyens annuels (rendement du bassin), soit des ETP annuelles

(aridité du bassin) pour les 182 éléments de notre échantillon. Les pluies de bassins ont été calculées à partir de la moyenne arithmétique des différents postes sur chaque bassin. Ce graphique permet de montrer la diversité des comportements hydrologiques des bassins à partir des régimes pluviométriques auxquels ils sont soumis. On peut voir que les précipitations annuelles varient de 560 mm à 1830 mm. Pour une même quantité de pluie annuelle, on observe différents rendements, ce qui confirme la diversité hydrologique de notre échantillon. On remarque aussi sur ce graphique que 4 à 5 bassins versants ont un écoulement annuel supérieur aux précipitations annuelles. Outre l'origine hydrogéologique possible de cet excédent d'eau, ces comportements peuvent venir d'une sous-estimation des pluies annuelles de bassin.

Tableau 2.2 Caractéristiques hydro-climatiques annuelles des 182 bassins de l'échantillon, calculées à partir des chroniques disponibles (de 7 à 30 ans de données)

	Précipitations annuelles (mm/an)	ETP annuelles (mm/an)	Débits annuels (mm/an)
Min	566	633	29
Médiane	885	722	438
Moyenne	964	765	512
Max	1835	1224	1655

La Figure 2.6 b nous renseigne sur l'aridité de certains bassins où l'ETP moyenne annuelle dépasse les précipitations. Cette situation s'observe généralement sur des bassins où la pluviométrie annuelle est faible. Une quinzaine de bassins de l'échantillon sont concernés par ce phénomène.

La Figure 2.7 donne une idée plus synthétique des bilans en eau des bassins versants avec la comparaison des indices adimensionnels que sont l'aridité (P/E : soit le rapport de la pluie annuelle à l'ETP annuelle) et le rendement (Q/P : rapport du débit annuel sur la pluie annuelle). Les bassins conservatifs doivent être situés sous la ligne grise (rendement inférieurs à 1) et au dessus de la ligne noire représentant la courbe $Q=P-E$ c'est-à-dire les bassins où le débit est supérieur à la neutralisation des précipitations par l'ETP. On retrouve donc en dehors de ces limites, les quelques bassins problématiques en terme de rendement cités précédemment, mais aussi des bassins pour lesquels les pertes sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle (situés sous la courbe $Q=P-E$). Outre l'hypothèse d'une

mauvaise estimation des différentes quantités observées, ces observations peuvent provenir d'échanges souterrains avec les bassins voisins (Le Moine *et al.*, 2007).

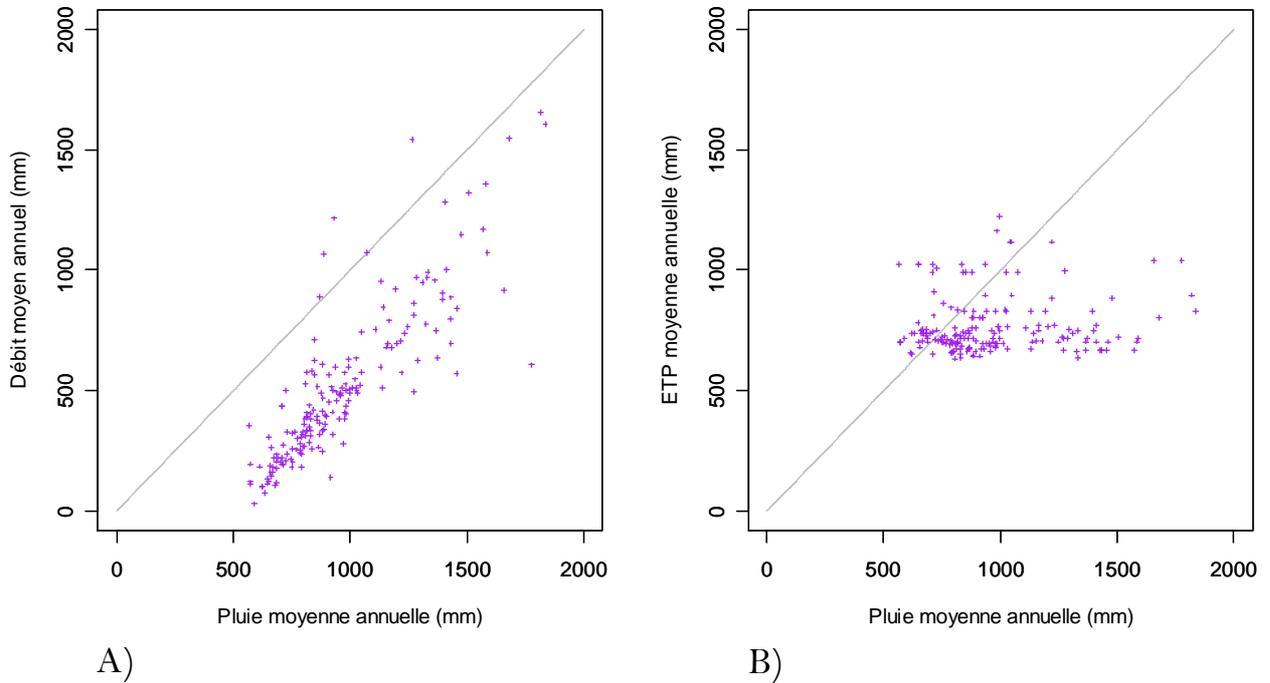


Figure 2.6 A) Précipitations annuelles et débits annuels moyens pour les 182 bassins (indicatif du rendement du bassin) B) Précipitations annuelles et ETP moyennes annuelles (indicatif de l'aridité du bassin)

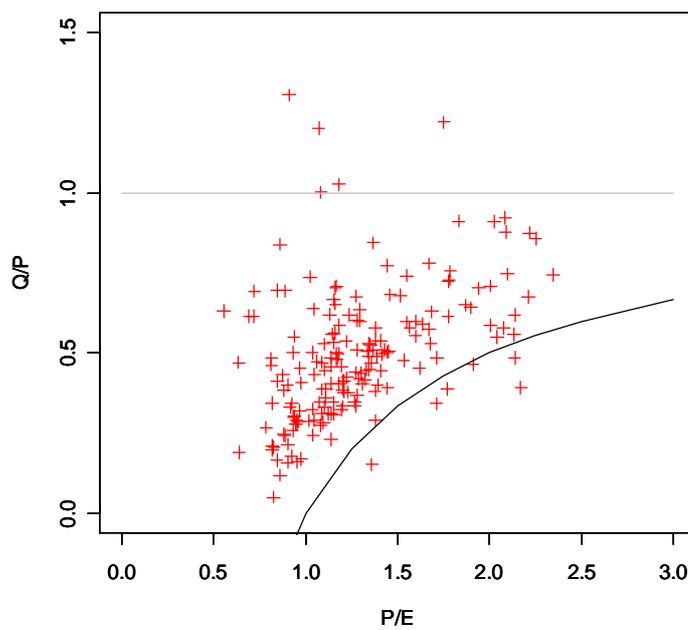


Figure 2.7 Indices Q/P en en fonction de P/E sur les 182 bassins, calculés sur les valeurs annuelles moyennes (ligne grise représente $Q/P=1$ et la ligne noire $Q=P-E$)

La variabilité spatiale des précipitations peut être définie globalement à l'échelle du bassin par un indice de variabilité spatiale des pluies annuelles, sur la base des différents postes pluviométriques de chaque bassin. Cet indice est défini par :

$$CV(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (PA_{Moyenne} - PA_i)^2}{PA_{Moyenne}} \cdot 100 \quad \text{Eq. 1}$$

où $PA_{Moyenne}$ est la pluie annuelle moyenne sur le bassin et PA_i la pluie annuelle sur le poste i , la bassin versant comportant n postes.

La Figure 2.8 montre la répartition géographique de ce coefficient à l'intérieur de l'échantillon. Les bassins où les pluies annuelles sont peu variables spatialement sont les petits bassins amont de la Seine et de la Sarthe. Ceux où les précipitations sont globalement les plus hétérogènes spatialement sont les bassins de la zone Cévenole et Loire amont et les bassins amont de la Moselle.

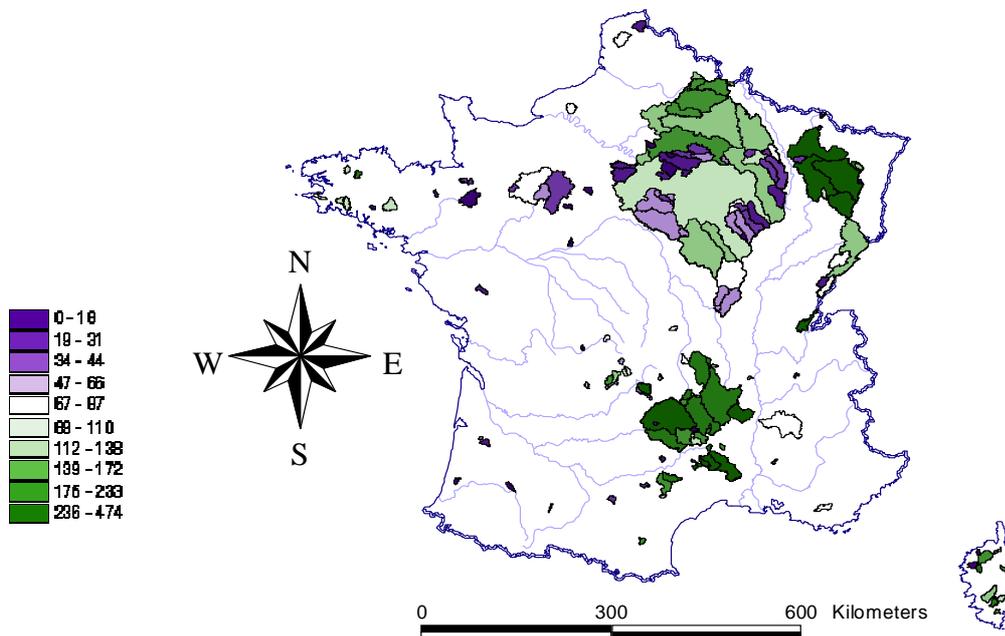


Figure 2.8 Répartition des indices de variabilité (%) des pluies annuelles pour les 182 bassins versant.

Pour exemple, le bassin versant de l'Eyrieux à Saint Fortunat en Ardèche (664 km²) possède l'une des variabilités des pluies annuelles de ses pluviomètres les plus fortes, avec des pluies annuelles s'échelonnant de 872 à 2200 mm pour ses 6 postes pluviométriques (pour une pluie de bassin annuelle de 1220 mm). Inversement, le bassin versant du Lunain à Episy dans l'Yonne (252 km²) possède l'une des variabilités les plus faibles dans les pluies annuelles de ses différents pluviomètres. Celles-ci s'échelonnent de 572 mm à 700 mm pour une pluie annuelle de bassin de 633 mm.

2.4.2 Echantillon au pas de temps horaire

Nous présentons ici une analyse similaire à celle faite précédemment sur l'échantillon de bassins au pas de temps journalier.

2.4.2.1 Répartition géographique, superficies et densités de postes pluviométriques

Nous avons pu retenir 99 bassins versants français dont les données sont disponibles au pas de temps horaire. Leur répartition géographique est présentée à la Figure 2.9. Le nombre de bassins dans cet échantillon, plus faible qu'au pas de temps journalier, vient de la moindre disponibilité des données, notamment pluviométriques, au pas de temps horaire.

Les données de débit sont, comme au pas de temps journalier, issues de la banque HYDRO. Ces bassins versants sont un sous-ensemble de la base de données horaires utilisée par Le Moine *et al* (2007), dont les données de précipitations et débits sont exclusivement représentées sur la période allant de 1995 à 2005. Les bassins sélectionnés sont principalement répartis dans le centre de la France et à l'Est. A l'instar de la base de données au pas de temps journalier, cette seconde base de données ne possède que peu de bassins versants situés dans la partie Sud-Est de la France notamment dans la zone cévenole et Loire amont

La courbe de répartition des superficies de cet échantillon est donnée par la Figure 2.10. La taille des bassins versants varie de 26 à 9390 km² avec une superficie médiane de 1450 km², soit des bassins relativement plus grands qu'au pas de temps journalier mais avec une

gamme de superficie plus étendue. 10 % des bassins font moins de 200 km² et 10 % font plus que 5000 km².

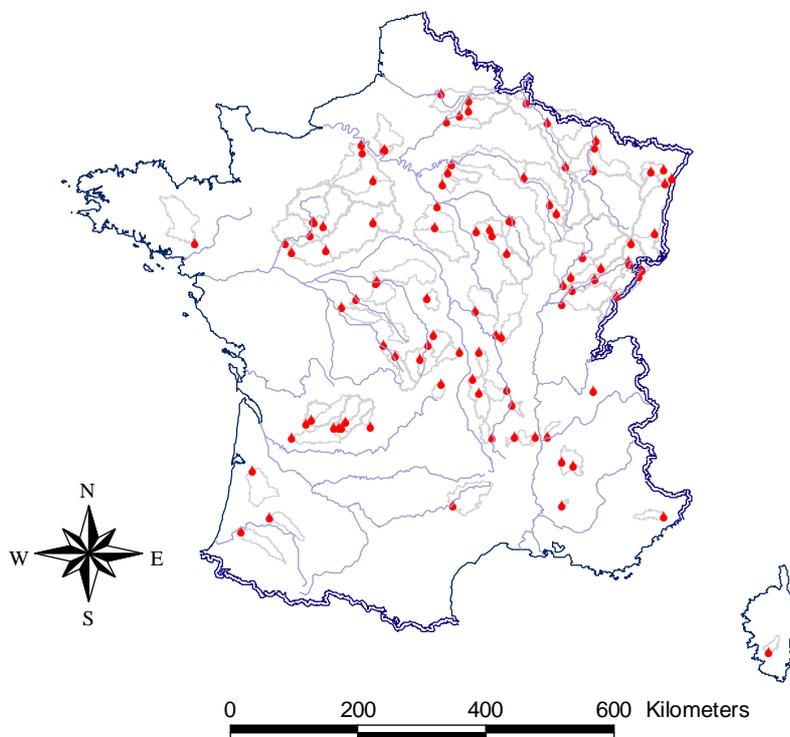


Figure 2.9 Localisation de 99 bassins versants (exutoires: points rouges et contours: lignes grises)

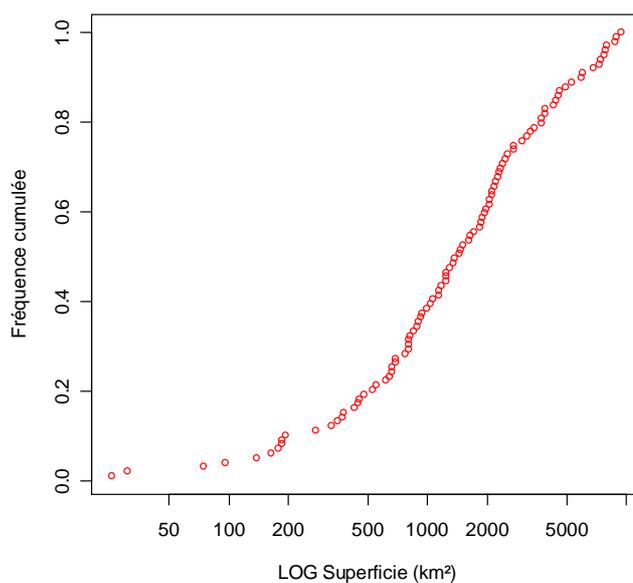


Figure 2.10 Distribution des superficies de l'échantillon

Les données de précipitations proviennent de la banque de données PLUVIO de Météo France. 222 postes pluviométriques ont été nécessaires sachant qu'il y a, ici aussi, certains bassins emboîtés qui se partagent les mêmes postes. Le Figure 2.11 présente la répartition des postes pluviométriques autour des bassins de l'échantillon. On peut faire les mêmes remarques qu'au pas de temps journalier au sujet de la qualité de la disposition des postes au sein des bassins versants.

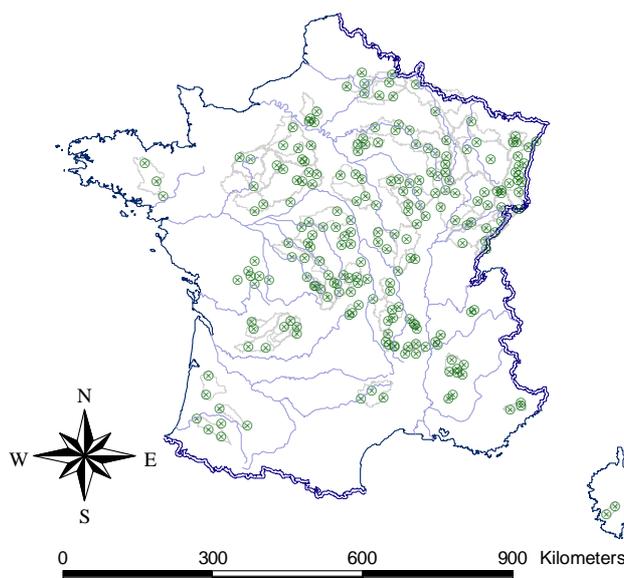


Figure 2.11 Répartition géographiques des postes pluviométriques rattachés aux 99 bassins versants de l'échantillon

Comme pour la base de données au pas de temps journalier, la Figure 2.12 et la Figure 2.13 illustrent la distribution du nombre de postes pluviométriques disponibles par bassin et la densité de postes pour 100 km² par rapport à la superficie de ces bassins. On peut effectuer des conclusions similaires à celles établies pour le pas de temps journalier, quoique les densités de postes pour 100 km² soient légèrement inférieures.

Le Tableau 2.3 indique les statistiques générales pour la superficie des bassins versants et le nombre de postes par bassin. On remarque que la superficie médiane est bien plus élevée qu'au pas de temps journalier soit 1450 km² contre 188 km². Le nombre médian de postes par bassin reste le même (quatre), ce qui conduit à une plus faible densité de l'information pluviométrique disponible pour ce pas de temps d'étude.

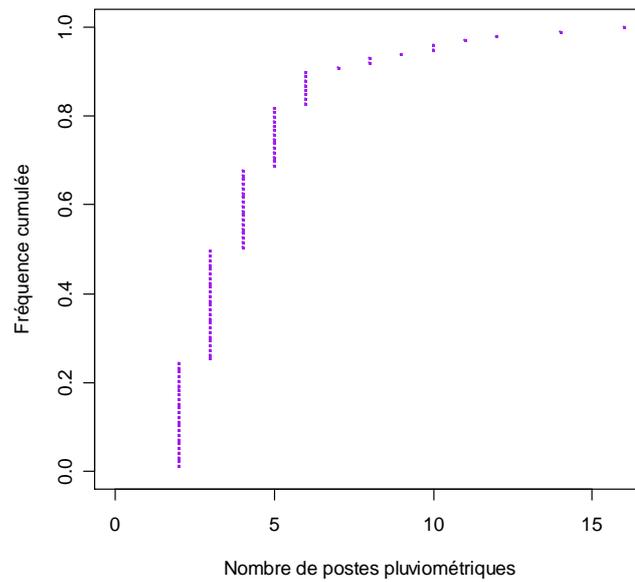


Figure 2.12 Distribution du nombre de postes pluviométriques disponibles par bassin sur les 99 bassins versants de l'échantillon

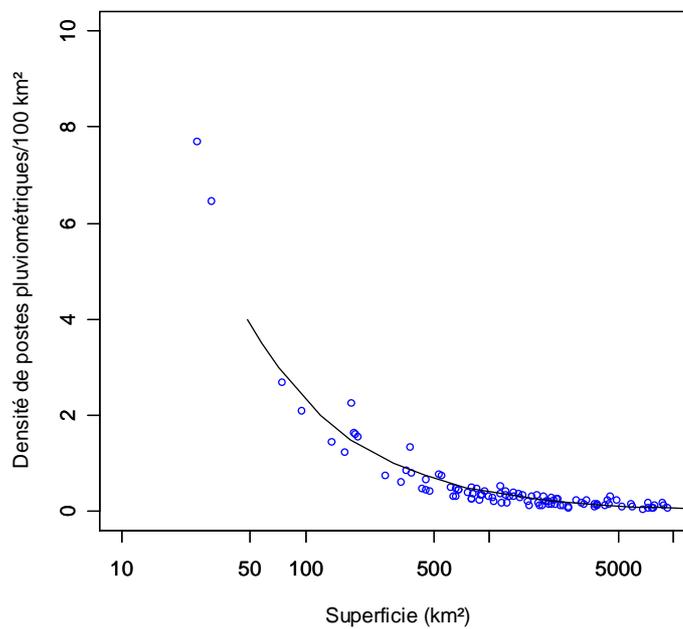


Figure 2.13 Densité de postes pluviométriques pour 100 km² en fonction de la superficie des bassins. La ligne continue représente la densité conseillée par (Schaake, 2000)

Tableau 2.3 Caractéristiques de l'échantillon des 99 bassins versants en termes de nombre de postes par bassin et de superficie.

	Superficie (km ²)	Nombre de postes pluviométriques
Min	26	2
Médiane	1450	4
Moyenne	2265	4
Max	9390	16

2.4.2.2 Caractéristiques hydro-climatiques

Le Tableau 2.4 résume les caractéristiques hydro-climatiques annuelles de cet échantillon. Les mêmes ordres de grandeurs caractéristiques du climat français sont retrouvés dans cet échantillon. La Figure 2.14 représente les pluies moyennes annuelles en fonction de débits moyens annuels (rendement du bassin) et des ETP annuelles (aridité du bassin) pour les 99 bassins de notre échantillon. Comme au pas de temps journalier, les pluies de bassin ont été calculées à partir de la moyenne arithmétique des différents postes présents sur chaque bassin. On ne trouve, pour cet échantillon, que deux bassins où l'écoulement annuel dépasse les précipitations annuelles. De même, beaucoup de bassins sont dans des conditions d'aridité relative. Il s'agit surtout de bassins où les précipitations annuelles sont faibles par rapport à la moyenne de l'échantillon (moins de 1000 mm par an).

Tableau 2.4 Caractéristiques hydro-climatiques annuelles des 99 bassins de l'échantillon calculées à partir des chroniques disponibles (10 ans de données pour toutes les variables sur la période 1995-2005)

	Précipitations annuelles (mm/an)	ETP annuelles (mm/an)	Débit moyens annuels (mm/an)
Min	617	539	37
Médiane	919	662	341
Moyenne	967	664	381
Max	2010	809	1472

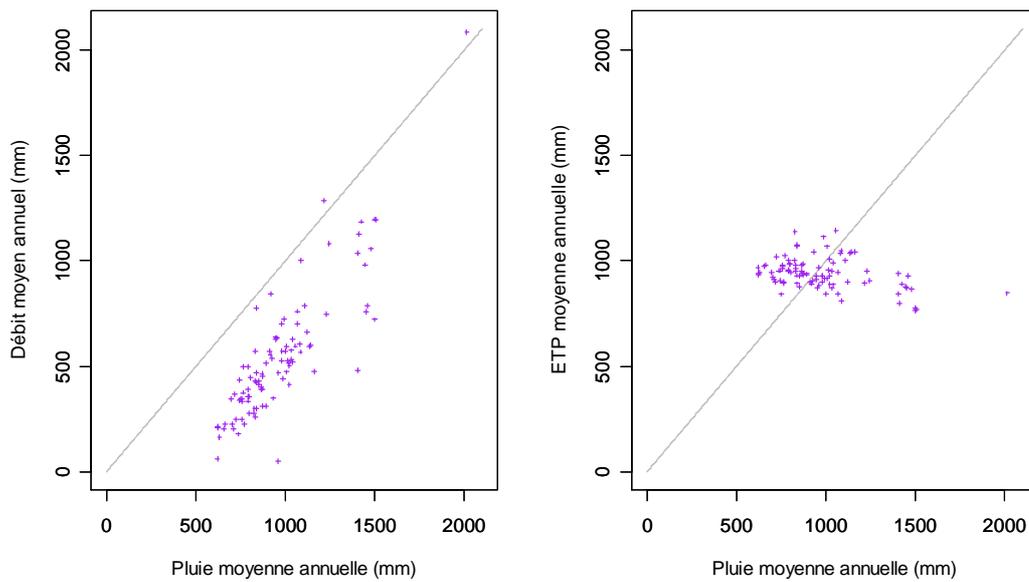


Figure 2.14 a) Précipitations annuelles et débit annuels moyens pour les 99 bassins (indicatif du rendement du bassin) b) Précipitations annuelles et ETP moyenne annuelle (indicatif de l'aridité du bassin)

Comme pour la base au pas de temps journalier, le rapport Q/P en fonction de P/E est présenté à la Figure 2.15. On peut y remarquer les quelques bassins situés sur la courbe ($Q=P-E$). Les mêmes commentaires que sur l'échantillon au pas de temps journalier peuvent être faits ici, sauf qu'aucun bassin ne passe sous la ligne ($Q=P-E$).

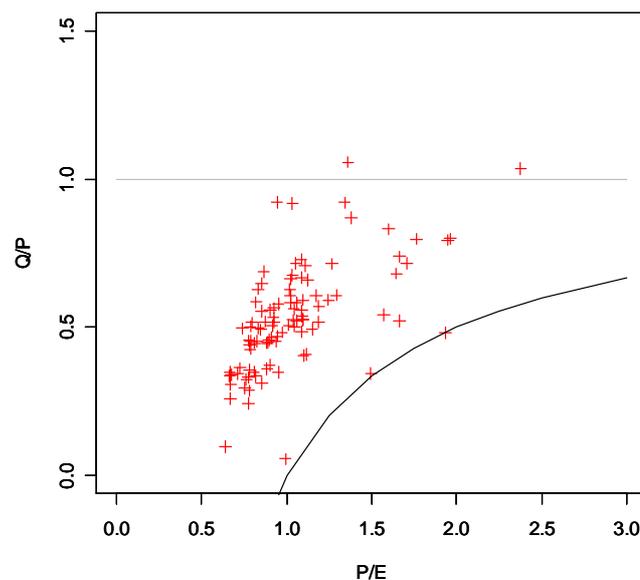


Figure 2.15 Indices Q/P en en fonction de P/E sur les 99 bassins, calculés sur les valeurs annuelles moyennes (ligne grise représente $Q/P=1$ et la ligne noire $Q=P-E$)

Similairement à l'échantillon précédent, la variabilité spatiale des précipitations est définie globalement pour chaque bassin par l'indice de variabilité des pluies annuelles relevé sur les différents postes pluviométriques de chaque bassin. On rappelle que cet indicateur, basé sur les pluies annuelles, est indépendant du pas de temps d'observation initial des données. La Figure 2.16 montre la répartition géographique de ce coefficient à l'intérieur de l'échantillon. Les bassins où les pluies annuelles sont peu variables spatialement sont surtout les bassins situés au niveau de la Sarthe. Ceux où les précipitations sont globalement les plus hétérogènes spatialement sont les bassins de la zone vosgienne à l'est et les quelques bassins du centre Sud du pays.

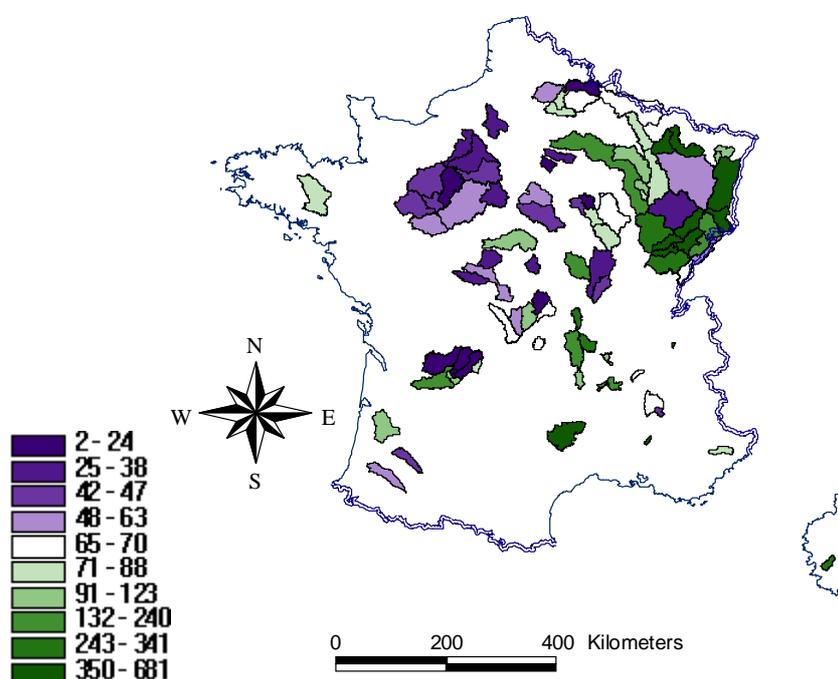


Figure 2.16 Répartition des indices de variabilité des pluies annuelles pour les 99 bassins versants

2.5. Synthèse

Nous avons constitué une base de données relativement diversifiée en termes de conditions physiques et hydrologiques. Un nombre important de bassins a pu être rassemblé pour tirer des conclusions assez générales. Une des limites de cet échantillon vient, d'une part du fait que nous ne disposons que d'une faible quantité de bassins représentant le pourtour méditerranéen (où l'hétérogénéité des pluies est considérée en général comme très

importante) et d'autre part, que pour de nombreux bassins versants, la variabilité des pluies ne sera mesurée qu'à partir de deux points de mesure seulement.

Pour finir, une dernière remarque concernant notre analyse de la qualité de ces données. Seules les séries où les lacunes étaient jugées excédentaires à 10 % par an pour les précipitations et à 60 % pour les débits ont été écartées. Pour la suite logique du traitement (qualité intrinsèque de la donnée), nous adopterons la même démarche que les thèses précédentes de l'équipe ayant travaillé sur de grands échantillons, c'est-à-dire conserver dans notre échantillon l'ensemble des bassins sans sélection *a priori*. Outre qu'il n'existe pas de critère de sélection objectif, on peut espérer que la diversité des sources d'erreurs possibles peut être considérée comme un phénomène aléatoire et neutre vis-à-vis de la modélisation pluie-débit (Oudin, 2004). Cependant, nous sommes conscients que la critique préalable des données est un aspect à ne pas négliger avant toute étude hydrologique sur un bassin précis.

Notons par ailleurs que nous n'avons pu obtenir dans le cadre de ces travaux d'indication sur la qualité intrinsèque des différents postes pluviométriques utilisés. Météo-France réalise actuellement une classification de ses postes, sur une échelle de 0 à 5 en fonction de l'environnement du poste. Cette classification n'étant pas achevée, nous n'avons pas pu en disposer dans le cadre de nos travaux.

Chapitre 3

Introduction d'indices de variabilité spatiale des précipitations dans un modèle hydrologique global : Méthodes

3.1. Comment prendre en compte la variabilité spatiale des pluies dans un modèle global ?

Les modèles globaux constituent une solution efficace et pratique pour les besoins opérationnels d'estimation des débits à l'échelle du bassin versant. Cette catégorie de modèles est souple à mettre en œuvre et peut produire rapidement, avec des exigences modestes en données, des estimations plus que correctes des débits (Bergström, 1991). Néanmoins, une des insuffisances majeures, généralement montrée du doigt par la communauté hydrologique, est leur incapacité à prendre *explicitement* en compte la variabilité spatiale des caractéristiques des bassins et des précipitations (Kalinga et Gan, 2006; Lauzon *et al.*, 2006). En effet, le principe d'un modèle global est que l'échelle spatiale adoptée est celle du bassin versant et, par conséquent, les entrées du modèle sont connues uniquement à l'échelle indivisible de ce bassin. L'hypothèse sous-jacente de l'approche globale est que la prise en compte de variables et paramètres moyens sur le bassin est suffisante pour obtenir une bonne simulation des débits à l'exutoire. Ici, nous nous intéressons seulement à la question de la variabilité spatiale de la pluie car Andréassian *et al.* (2004) et Bourqui *et al.* (2006) (disponible en **Annexe 2**) ont montré qu'elle avait un rôle beaucoup plus important que celle des caractéristiques du bassin versant. L'entrée de précipitation d'un modèle pluie-débit global est donc constituée uniquement de la pluie de bassin, c'est-à-dire la lame d'eau moyenne sur toute la superficie de ce bassin (voir paragraphe I.4). Cette lame d'eau moyenne

ne décrit pas la variabilité spatiale des précipitations d'entrée. Existe-t-il une ou des méthodes permettant d'exploiter explicitement cette variabilité tout en conservant la nature globale du modèle ?

Si on posait la question à propos de la recherche de méthodes sur la prise en compte de la variabilité spatiale des pluies, certains hydrologues nous diraient : "Mais, c'est très simple, utilisez un modèle distribué". Oui, mais...

D'un côté, bien que les modèles distribués soient "a priori" les mieux adaptés à la prise en compte explicite de la variabilité spatiale des précipitations par la multiplication des entrées à l'échelle de leurs mailles, ce sont des modèles complexes comportant de nombreux paramètres, ce qui entraîne souvent des difficultés importantes de paramétrisation et limite leur robustesse (le manque de robustesse correspond à une chute des performances lorsque l'on passe du calage au contrôle). Le contrôle, qui est effectué sur des données autres que celles du calage, est la phase qui permet de juger réellement le modèle pour des applications opérationnelles (Beven, 1989).

D'un autre côté, les modèles globaux, quant à eux, ont des structures parcimonieuses en paramètres et quelquefois meilleures et plus adaptées que les modèles distribués pour un objectif de simulation de débits (Refsgaard et Knudsen, 1996; Reed *et al.*, 2004). Ces structures ne peuvent malheureusement *a priori* pas prendre en compte la variabilité des pluies.

Nous allons donc essayer d'adapter un modèle global pour prendre en compte l'hétérogénéité des pluies.

Il s'agit ici de rechercher une méthode alternative conservant l'approche de la modélisation globale (absence de désagrégation du bassin, des entrées et des paramètres) mais intégrant la variabilité spatiale des précipitations.

On peut noter que l'élaboration de cette approche est réellement novatrice pour ce type de modèles et n'a jamais, à notre connaissance, été détaillée dans la littérature traitant de la modélisation hydrologique globale.

En modélisation globale, la donnée d'entrée climatique principale est une pluie unique, qui est généralement une moyenne arithmétique, pondérée ou non, résultant des mesures ponctuelles des n pluviomètres installés au sein du bassin versant considéré. Ainsi, sans porter atteinte à la structure globale du modèle, l'objectif ici est surtout d'informer le modèle à chaque pas de temps, de la possible variabilité des précipitations en entrée en y intégrant une information dérivant de la variance observée des pluies. Il s'agirait donc d'une

information de deuxième ordre complétant celle introduite en entrée du modèle à savoir la lame d'eau moyenne. Selon sa valeur, le modèle pourrait adapter son fonctionnement pour refléter l'effet de cette variabilité.

Nous avons donc élaboré une méthode simple, utilisant un indicateur de la variabilité spatiale des pluies, facilement applicable sur un grand nombre de bassins versants instrumentés classiquement. Cette méthode s'appuie uniquement sur l'information disponible à partir des différents pluviomètres sur le bassin versant. Cette information sera seulement dérivée des valeurs de données discrètes provenant des n ($n > 1$) pluviomètres du bassin concerné.

Nous chercherons aussi à introduire dans un deuxième temps une information simple sur le lieu d'occurrence des différentes hauteurs de pluies. Ceci sera fait par l'intermédiaire du positionnement des pluviomètres installés au sein du bassin via leur éloignement par rapport à l'exutoire. De cette façon, on introduit une information un peu plus riche dans le modèle avec une prise en compte synthétique de la localisation de la pluie, qui est communément considérée comme un élément influençant significativement la réponse du bassin.

La mise en œuvre de cette approche nécessite d'évaluer :

- l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la variabilité des débits à l'exutoire : définir une ou plusieurs hypothèses qui vont décrire l'effet que devrait produire, sur les débits et/ou les états internes du modèle, une pluie hétérogène par rapport à une pluie homogène de même lame d'eau,
- la façon de transmettre cette information qualitative au modèle : à quel niveau (sur les états internes, les entrées elles-mêmes) et comment le modèle doit être informé de la possible hétérogénéité spatiale des pluies qui affectent le bassin versant.

3.2. Impact de l'hétérogénéité de la pluie de bassin sur le rendement en eau d'un événement pluvieux

L'hypothèse principale généralement formulée, est que, **si une pluie est très hétérogène, elle générera un écoulement différent de celui généré par une pluie homogène de même lame d'eau**. La question est de savoir maintenant dans quelle mesure cet écoulement sera différent afin d'adapter le fonctionnement du modèle.

Sivapalan *et al.* (1997) affirment que pour une pluie moyenne donnée, plus l'hétérogénéité spatiale est grande, plus elle générera de débit. Ce serait pour eux une conséquence directe de la non-linéarité des processus de génération des débits. L'hypothèse faite par les auteurs pour expliquer cette augmentation du débit est qu'une pluie plus hétérogène à l'échelle du bassin versant implique de plus fortes intensités à un endroit précis et une augmentation de la saturation et du ruissellement local par rapport au reste du bassin non ou moins soumis à la pluie. Il y aurait en conséquence une évapotranspiration globalement de moindre importance sur le reste du bassin comparativement à celle produite par une pluie uniformément répartie sur tout le bassin. Cette plus faible évapotranspiration provoquerait une augmentation des volumes écoulés.

C'est ce même phénomène qu'a observé Habets (1998) au cours de son étude sur l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur le ruissellement sous-maîles (donc global) du modèle distribué MODCOU. Une surestimation de la part de la surface couverte par les précipitations (induite logiquement par la non prise en compte d'une forte variabilité spatiale) induirait une surestimation de l'évaporation de la maille.

Plus spécifiquement, dans le cadre de la modélisation pluie-débit, de nombreuses études portant sur la réduction de la taille des mailles de modèles distribués afin de mieux prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations ont conclu à une augmentation du ruissellement direct, en particulier lorsque des ruissellements de type Hortonien sont représentés dans le modèle (voir Chapitre 1 tableau 1 avec les publications de Michaud *et al.* (1994a); Ogden *et al.* (1994); Vischel *et al.* (2007). Cette augmentation du ruissellement dit direct, même s'il est noté sur des surfaces moindres du bassin, provoquera une anticipation et une augmentation de la hauteur des pics de crue sans toutefois provoquer de changements au niveau des volumes totaux écoulés.

En conséquence, il est souvent suggéré que les modèles globaux, lors d'événements de pluies spatialement hétérogènes, auraient tendance à sous-estimer les pointes de crues (Krajewski *et al.*, 1991; Kalinga *et al.*, 2006; Moulin, 2007). Les origines de cette sous-estimation seraient, selon certaines références, une conséquence directe de la non prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations et de la plus forte non-linéarité de la réponse du bassin induite par celle-ci. En effet, ces auteurs affirment généralement que cette sous-estimation des pointes de crues est moindre lors des événements de pluie uniforme.

Rappelons cependant que la plupart des conclusions portant sur l'augmentation du ruissellement direct et induisant la précocité et l'augmentation de la hauteur des pics de

crues émanent d'études qui utilisent des débits *synthétiques* produits par la plus fine échelle de modélisation du modèle distribué étudié, et non des données réelles. A ce propos, l'**Annexe 3** présente une étude théorique sur la sensibilité des volumes simulés, par cinq modèles globaux, à l'augmentation de la variabilité spatiale des précipitations. On peut y remarquer, que pour les modèles étudiés, plus la variance des pluies synthétiques d'entrée du modèle augmente et plus les volumes simulés augmentent (relativement aux volumes simulés initialement grâce à une pluie homogène).

Enfin, que peut-on conclure sur l'impact hydrologique de la variabilité spatiale des précipitations ?

Une certaine confusion règne sur les effets entre augmentation des volumes écoulés, et précocité et augmentation des pics mais sans augmentation de volume.

Ainsi, l'absence de postulats forts basés sur des débits *observés*, nous oblige à faire deux hypothèses (associées à leurs hypothèses contraires) pour introduire les effets de l'hétérogénéité des précipitations:

- **HYPOTHESE dite Pic :**

Les précipitations spatialement hétérogènes génèreraient plus d'écoulements directs⁷ qu'une pluie uniforme de même lame d'eau. Cet accroissement d'écoulements directs est la cause des écoulements plus rapides et plus intenses, mais sans pour autant provoquer de variation absolue des volumes écoulés. L'hypothèse inverse sera que les précipitations dites hétérogènes génèreraient moins d'écoulements directs.

- **HYPOTHESE dite Volume :**

Les précipitations hétérogènes causent l'augmentation globale des volumes écoulés, c'est-à-dire qu'une pluie hétérogène spatialement produit plus de volumes écoulés à l'exutoire qu'une pluie homogène de même lame d'eau (modification du bilan en eau avec accroissement de la pluie efficace). L'hypothèse inverse sera que les précipitations dites hétérogènes génèreraient moins de volumes écoulés.

⁷ L'écoulement dit direct peut ici être assimilé au ruissellement. Cependant, comme nous travaillons dans cette thèse sur des modèles à réservoirs, nous préférons éviter d'utiliser ce terme de ruissellement. En effet, aucune correspondance directe avec des processus physiques ne peut être établie dans ce cadre.

Ces deux hypothèses sur l'effet de la variabilité spatiale des précipitations vont être appliquées aux modèles globaux à l'aide d'indices descriptifs de la répartition spatiale des précipitations.

3.3. Indices descriptifs de l'hétérogénéité spatiale des précipitations sans intégration du positionnement des postes

La méthode utilisée ici est basée sur l'élaboration d'un indicateur d'hétérogénéité des précipitations observées qui sera introduit dans le modèle pour le renseigner sur le degré de variabilité de la pluie. On testera sans a priori les hypothèses Pic et Volume.

Cet indicateur, basé uniquement sur l'information observée à chaque pas de temps, prendra des valeurs différentes selon le niveau d'hétérogénéité des pluies observées pour ce pas de temps. L'objectif était d'établir un indice simple, calculable sur chaque bassin et comparable entre les différents bassins, quel que soit le nombre total de pluviomètres disponibles (à partir de deux).

On rappelle que la pluie de bassin est calculée à partir de la moyenne arithmétique des différents postes pluviométriques disponibles pour le bassin. Ce choix, qui a le mérite d'être simple et de conduire à des estimations généralement raisonnables de la pluie de bassin, n'est probablement pas optimal dans tous les cas dans une perspective de modélisation hydrologique, en particulier lorsque les postes présents ne sont pas répartis de façon homogène. Des méthodes d'interpolation plus évoluées pourraient dans ce cas être préférées (moyenne pondérée de type Thiessen, krigeage). Cependant, les gains attendus en termes de simulation des débits ne sont pas forcément énormes (cf travaux cités dans le chapitre 1). Ici, par souci d'homogénéité et de simplicité, nous nous en sommes tenus à une moyenne arithmétique.

Pour l'évaluation de variabilité, la mesure statistique la plus simple qui représente la dispersion des valeurs prises par les différents postes pluviométriques autour de la moyenne arithmétique est l'écart-type.

3.3.1 Formulation mathématique de l'indice d'hétérogénéité IND

La pluie moyenne arithmétique \bar{P}_j est définie au pas de temps j par :

$$\bar{P}_j = \frac{1}{n} \sum_i^n P_{i,j} \quad \text{Eq. 2}$$

avec :

n : Nombre de postes pluviométriques fournissant une observation de pluie le jour j

$P_{i,j}$: Pluie observée sur le poste i le jour j (i allant de 1 à n)

L'écart-type EC_j des précipitations du jour j est donné par la racine carrée de la variance (soit la racine de la somme des écarts à la moyenne au carré) :

$$EC_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{i,j} - \bar{P}_j)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

Un indice de variabilité très simple est défini par la normalisation de l'écart type par la moyenne. L'écart-type ayant la même dimension que la moyenne des pluies (en mm), l'indice sera sans dimension. Ce rapport est indiqué en statistique comme le coefficient de variation (CV). On le définira par :

$$CV_j = \frac{EC_j}{\bar{P}_j} \quad \text{si } \bar{P}_j \neq 0$$
$$CV_j = 0 \quad \text{sinon} \quad \text{Eq. 4}$$

Intervalle de variation:

CV est positif ou nul. CV est nul si l'écart-type est nul, c'est-à-dire si la pluie est homogène sur le bassin (quel que soit i , on a $P_{i,j} = \bar{P}_j$). CV augmente en même temps que la dispersion des n pluies autour de la moyenne. On peut remarquer que la borne supérieure du CV va dépendre du nombre de postes pluviométriques :

Si la pluie est non nulle sur un seul poste (qu'on appellera P_K), on a alors $\bar{p} = \frac{P_K}{n}$, ainsi le calcul de CV se fait de la façon suivante :

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \left((n-1) \left(\frac{P_K}{n} \right)^2 + (P_K - \frac{P_K}{n})^2 \right)}}{\frac{P_K}{n}} = \frac{\sqrt{\frac{P_K^2}{n^2} \left(\frac{n-1}{n} - \frac{(n-1)^2}{n} \right)}}{\frac{P_K}{n}} = \sqrt{n-1} \quad \text{Eq. 5}$$

De même si P_K devient grand devant P_i (pour $i \neq K$) alors CV tends vers $\sqrt{n-1}$. Ainsi CV peut être compris entre 0 et 1 si et seulement si n est égal à 2. En effet, l'écart-type de la moyenne calculée à partir de deux "individus" ne peut dépasser la moyenne.

Afin de rendre l'indice indépendant du nombre de postes, et pour le garder dans un intervalle de variation standard, on choisit la normalisation suivante :

$$IND_{(j)} = \frac{CV_j}{\sqrt{n-1}} \quad \text{Eq. 6}$$

où $IND_{(j)}$ désignera l'indice d'hétérogénéité des pluies au pas de temps j

3.3.2 Illustration sur cas fictifs

Afin de donner une idée des valeurs prises par cet indice, on utilisera une chronique fictive de quatre postes pluviométriques sur dix jours, dont le hyétogramme est représenté à la Figure 3.1. La Figure 3.2 présente la chronique correspondante de la moyenne arithmétique et de l'écart type de ces pluies. On peut remarquer qu'aux jours 3, 7, 8 et 10, les différences de valeurs entre les quatre postes font que l'écart-type dépasse la moyenne arithmétique. Les chroniques d'indices CV (sans transformation entre 0 et 1) et IND sont, quant à elles, représentées en Figure 3.3. On peut y remarquer que les indices correspondent logiquement aux différences qui existaient entre la moyenne et l'écart-type. Le jour 3 représente l'hétérogénéité maximale possible, avec de la pluie sur seulement un poste sur les quatre présents. Par la même occasion, la pluie moyenne de ces postes n'est pas très élevée du fait qu'il n'a plu que sur un seul des quatre postes. On peut voir aussi que l'indice n'est pas dépendant de la pluie moyenne initiale. Le jour 2, par exemple, avec une pluie moyenne de 3 mm, possède le même indice d'hétérogénéité que le jour 9 avec ses 13 mm de pluie moyenne.

Les valeurs prises par cet indice sur notre échantillon de bassins sont analysées (répartition géographique et lien avec les caractéristiques hydro-climatiques) en **Annexe 4**.

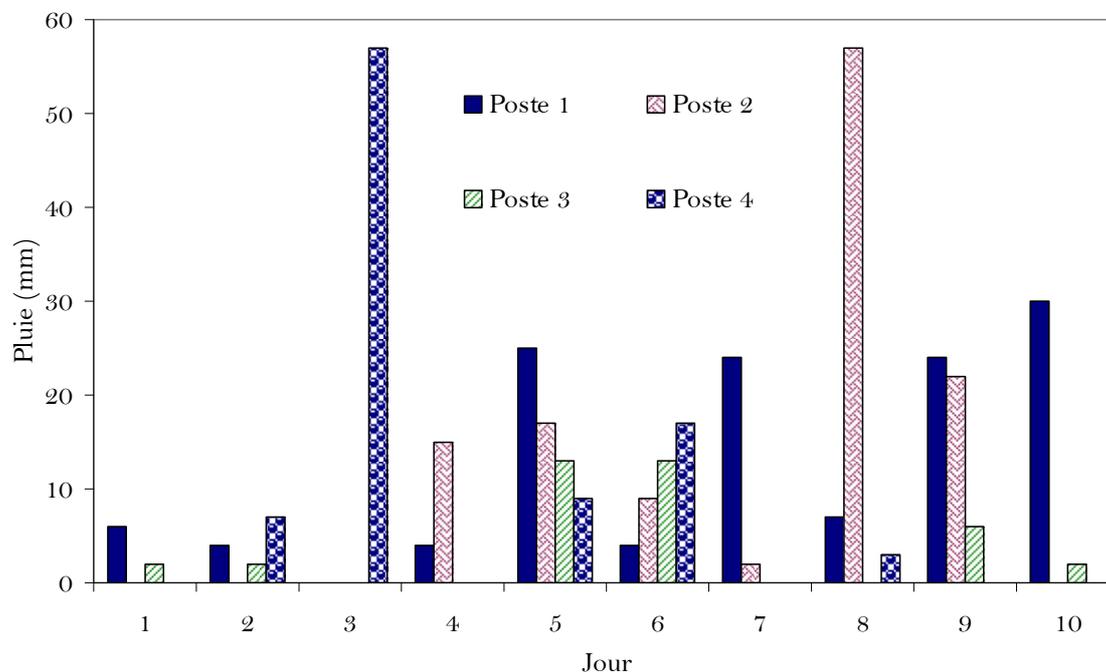


Figure 3.1. Hyétoigrammes journaliers des quatre postes pluviométriques fictifs utilisés pour illustrer l'indice élaboré

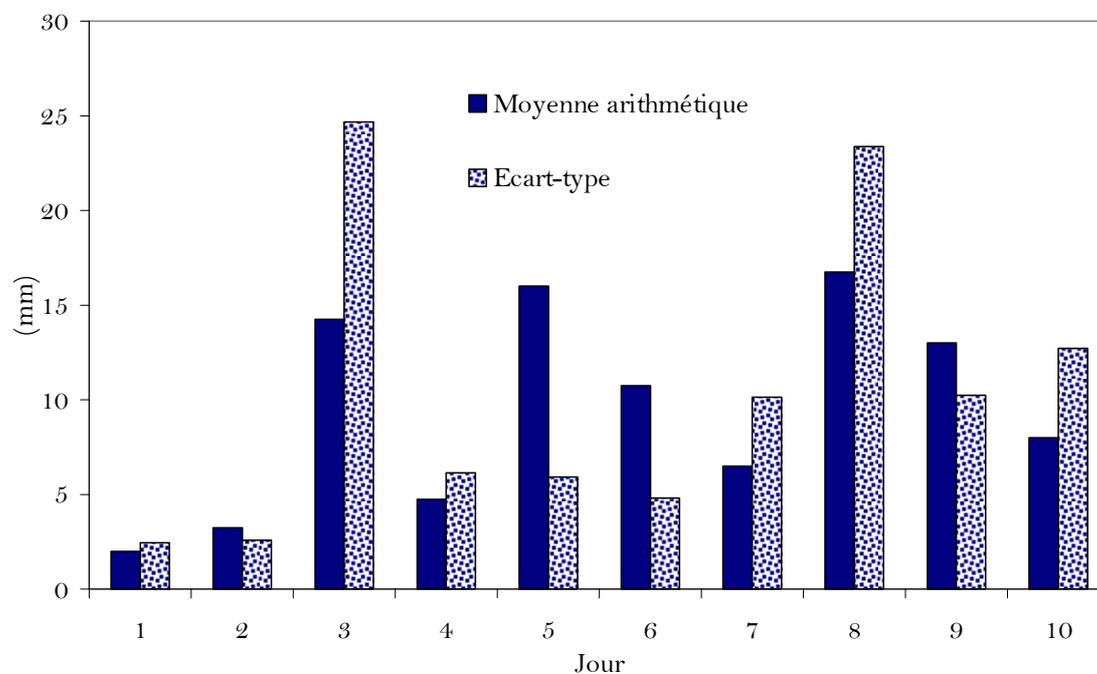


Figure 3.2. Chronique des pluies journalières moyennes et écarts-types associés à la série pluviométrique de la Figure 3.1

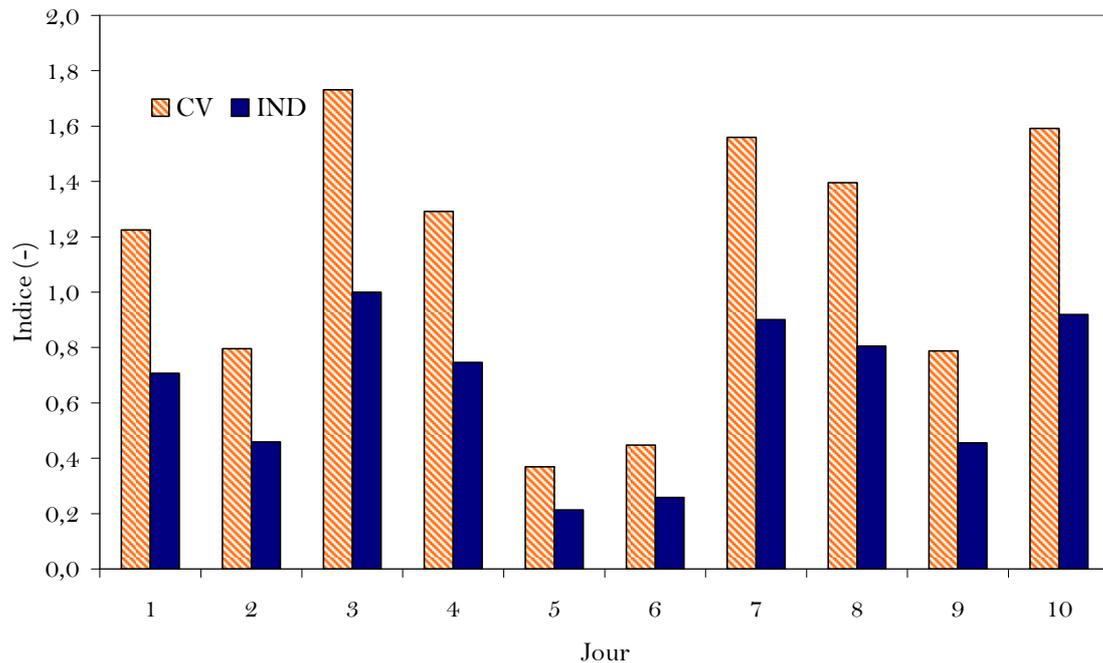


Figure 3.3. Chronique des indices journaliers : C.V (coefficient de variation des pluies journalières) et IND (indice élaboré) de la série pluviométriques de la Figure 3.1

3.4. Indice prenant en compte l'éloignement des précipitations par rapport à l'exutoire

Le procédé est, ici, toujours fondé sur la recherche d'un indicateur simple pour traduire l'hétérogénéité des pluies, mais en tenant compte cette fois-ci de la distance des précipitations observées à l'exutoire. Cet indicateur est donc spécialement élaboré pour avoir une indication supplémentaire sur la localisation de la pluie selon sa proximité de l'exutoire, c'est-à-dire plutôt à l'amont ou plutôt à l'aval du bassin versant.

Selon la forme du réseau hydrographique principal, la distance considérée sera différente. La distance euclidienne entre le poste et l'exutoire est jugée pertinente pour la majorité des bassins versants de l'échantillon qui possèdent des formes classiques avec un chevelu en forme de "feuille d'arbre". Une deuxième solution, la longueur du linéaire hydrographique jusqu'à l'exutoire, est utilisée pour les rares bassins de l'échantillon ayant des formes plus

particulières de leur réseau hydrographique comme le bassin du Doubs à Neubans qui a une forme de fer à cheval (voir Partie 5.3.2).

Cet indicateur sera établi, comme précédemment, sur la base des pluies observées sur l'ensemble des pluviomètres à chaque pas de temps. Mais il tient aussi compte de la distance de la pluie (donc du poste pluviométrique) à l'exutoire. On choisit de pondérer la pluie tombée sur chaque poste par la distance à l'exutoire du bassin, et de comparer cette pluie pondérée à la valeur prise par une pluie homogène sur le bassin. L'indice est donc composé de la somme des pluies de chaque poste pondérées par les distances de chaque poste à l'exutoire, le tout rapporté à la somme des distances de chaque poste et à la pluie de bassin.

3.4.1 Formulation mathématique de l'indice d'éloignement IND_L

Dans un premier temps, on construit un indice intermédiaire noté IND_l défini le jour j par :

$$IND_l(j) = \frac{\sum_i^n di P_{i,j}}{\bar{P}_j \sum_i^n di} \quad \text{Eq. 7}$$

avec :

di (km) : distance euclidienne (ou la distance hydraulique) du pluviomètre i à l'exutoire

De manière similaire à l'indice précédent, on peut remarquer que la borne supérieure de IND_l va dépendre du nombre de postes pluviométriques mais aussi de la distance du poste pluviométrique le plus éloigné.

Ainsi, si la pluie observée est non nulle uniquement sur le poste le plus éloigné de l'exutoire, on aura :

$$IND_l(j) = n \frac{d_{\max}}{\sum_i^n di} \quad \text{Eq. 8}$$

avec :

d_{\max} (km) : distance du poste le plus éloigné

$\sum_i^n di = d_{\text{moy}}$ (km) : distance moyenne à l'exutoire pour les n postes.

De même, si la valeur observée sur ce même poste est très forte devant les autres, on aura :

$$IND_i(j) \rightarrow n \frac{d_{\max}}{\sum_i^i di} \quad \text{Eq. 9}$$

Afin de normer l'indice entre 0 et 1, quel que soit le nombre de postes pluviométriques concernés et leur distance maximale à l'exutoire, on prendra comme indice IND_L :

$$IND_L(j) = IND_i(j) \frac{\sum_i^i di}{n * d_{\max}} \quad \text{Eq. 10}$$

Cet indice tend **vers 1** quand les hauteurs de pluies sont maximales sur des postes situés à **l'amont** du bassin et plutôt **vers 0** si les pluies sont maximales sur les postes situés à **l'aval** du bassin. Si **l'indice est égal à 0,5**, les pluies sont réparties de façon homogène entre l'amont et l'aval (cela ne signifie absolument pas que la hauteur de pluie est la même sur tous les postes, car la répartition des postes autour du centre de gravité n'est pas symétrique). Cependant, si chaque poste reçoit la même hauteur de pluie, on aura:

$$IND_L(j) = \frac{\sum_i^i di}{n * d_{\max}} \quad \text{Eq. 11}$$

3.4.2 Illustration

Afin de fournir une idée des valeurs prises par cet indice, on utilisera comme exemple d'application, la même chronique de quatre postes pluviométriques définie précédemment (voir Figure 3.1). La répartition géographique de ces quatre postes au sein du bassin et les valeurs des distances di sont données en Figure 3.4. La Figure 3.5 présente la chronique des valeurs prises par IND_L sur ces 10 jours. On remarque, pour les jours 2, 3 et 6, que les pluies sont plutôt positionnées sur l'amont du bassin (indices largement supérieurs à 0,5). En effet, dans ces trois cas, c'est le poste 4 (le plus éloigné de l'exutoire) qui reçoit le plus d'eau. Pour le jour 5, où l'indice est très légèrement inférieur à 0,5 (0,48), la pluie est considérée comme répartie de façon homogène sur tout le bassin, bien que les hauteurs d'eau varient entre les différents pluviomètres. Pour le jour 7, avec un indice d'environ 0,3, la pluie est concentrée vers l'aval. En effet, on peut constater qu'il n'a plu que sur les deux postes les plus à l'aval du bassin (soit les postes 1 et 2).

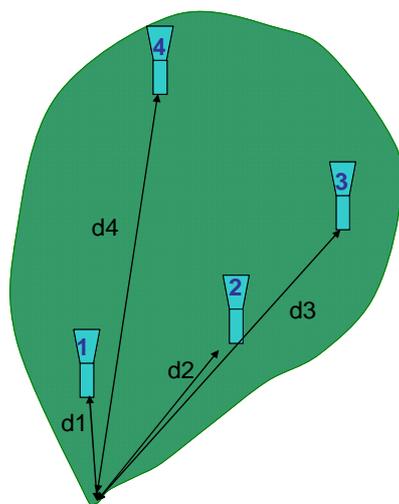


Figure 3.4 Répartition des pluviomètres sur un bassin versant fictif d'environ 2000 km² pris en exemple. Les distances sont : $d_1 = 14$ km, $d_2 = 20$ km, $d_3 = 40$ km et $d_4 = 55$ km.

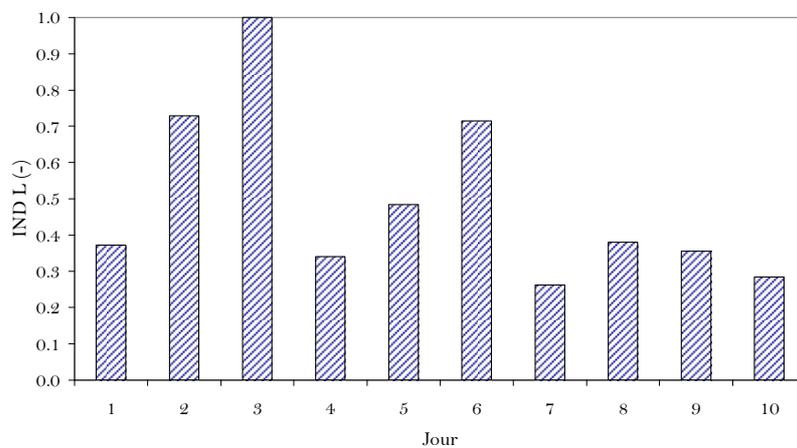


Figure 3.5 Chronique de l'indice journalier IND_L issue de la série de quatre postes pluviométriques illustrée en Figure 3.1

3.5. Introduire les effets de l'hétérogénéité des pluies dans un modèle global : le cas des modèles de la famille GR

Afin de tester l'introduction de notre indice d'hétérogénéité des pluies dans la modélisation globale, nous avons choisi le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres au pas de temps Journalier) du fait de la grande connaissance qu'en a l'équipe Hydrologie du Cemagref. Une structure similaire de ce modèle adaptée au pas de temps horaire a également été utilisée pour les tests à ce pas de temps. Ce modèle est dénommé GR4H (Mathevet, 2005). Au pas de temps journalier, Perrin (2000) a démontré sur un échantillon de 429 bassins versants que le modèle GR4J faisait partie des bons modèles de la littérature hydrologique actuelle. Au pas de temps horaire, Mathevet (2005) a démontré que GR4H était aussi un modèle robuste dans sa catégorie.

La fiabilité de ces structures permet de minimiser les niveaux d'erreurs dues au modèle dans le cadre de notre étude. Cependant, l'approche proposée ici aurait pu être adaptée à d'autres modèles du même type.

3.5.1 Présentation des modèles

3.5.1.1 GR4J : version globale initiale (Perrin *et al.*, 2003)

Le modèle GR4J est un modèle pluie-débit de type global à réservoirs fonctionnant au pas de temps journalier. Pour une classification des différents types de modèles pluie-débit existants et ainsi savoir à quel niveau se situe GR4J, on se reportera à la classification proposée par Nascimento (1995). Ce modèle a été développé au cours de thèses successives encadrées au Cemagref et à l'ENPC (Edijatno, 1991; Makhoulouf, 1994; Nascimento, 1995; Perrin, 2000) dans l'état d'esprit de son précurseur (Michel 1983) pour des applications à l'échelle du bassin versant. Ce modèle fait partie d'une famille de modèles GR fonctionnant à plusieurs pas de temps depuis l'annuel jusqu'à l'horaire (Mouelhi, 2003; Mathevet, 2005). Nous donnons ici une description succincte du modèle GR4J (voir (Perrin *et al.*, 2003) pour une description complète). Ce modèle, dont un schéma est donné en Figure 3.6, fonctionne grâce à deux réservoirs, un de production et un de routage, deux hydrogrammes unitaires et une

fonction d'échange souterrain. Ces éléments font intervenir quatre paramètres optimisés pour chaque bassin en minimisant l'écart des débits simulés par le modèle aux débits observés.

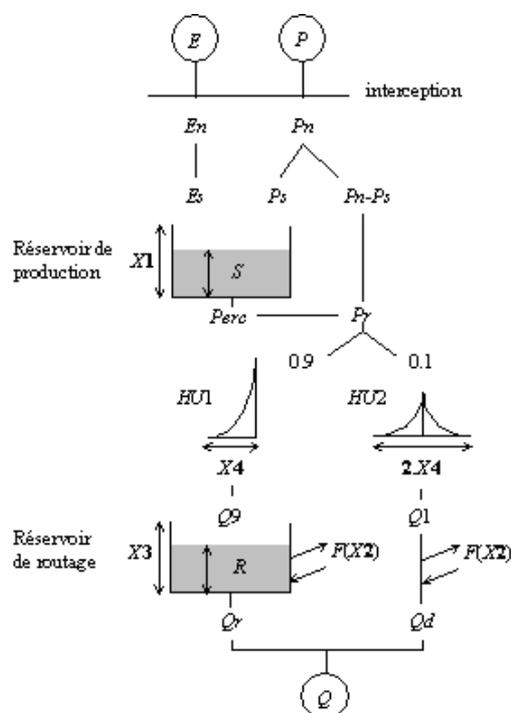


Figure 3.6 Structure de GR4J et emplacement des réservoirs et de ses quatre paramètres (le détail des équations et la signification des variables sont disponibles en Annexe.5

Ces quatre paramètres de GR4J sont:

- **la capacité du réservoir de production, $X1$ (mm)** : ce réservoir contrôle la production des pluies efficaces à partir des entrées de précipitations, ainsi que les pertes par évapotranspiration.
- **le coefficient d'échanges souterrains, $X2$ (mm)** : il peut être soit positif dans le cas d'apports souterrains, soit négatif s'il y a des pertes d'eau, soit égal à zéro s'il n'y a pas d'échange. Il contrôle les échanges souterrains inter-bassins et varie en fonction du taux de remplissage du réservoir de routage. A défaut d'avoir une interprétation physique validée de cette fonction, il est probable qu'elle joue un rôle sur d'autres compartiments du bilan en eau. Des recherches sont en cours sur ce sujet (voir (Le Moine *et al.*, 2007), thèse en cours au Cemagref)

- **la capacité à un jour du réservoir de routage, X_3 (mm)** : ce réservoir non linéaire assure l'essentiel du transfert de l'eau et contrôle les phases de récession.
- **le temps de base de l'hydrogramme unitaire HU_1 , X_4 (jour)** : deux hydrogrammes unitaires (HU_1 et HU_2) sont utilisés dans le modèle. Ils répartissent dans le temps les précipitations efficaces, et simulent le délai entre les pluies et les pics des crues. Les deux hydrogrammes unitaires dépendent du même paramètre de temps X_4 , exprimé en jours.

Le modèle GR4J a été testé dans plusieurs pays et a montré de bons résultats en comparaison à d'autres modèles pluie-débit (Perrin *et al.*, 2003). Il peut facilement être appliqué sur des bassins différents, dès lors que l'on dispose des données nécessaires en entrée (pluie et ETP). Toutes les quantités d'eau (entrée, sortie, variables internes) sont exprimées en mm, c'est-à-dire en lames d'eau en divisant les volumes d'eau par la superficie du bassin versant quand cela est nécessaire.

3.5.1.2 GR4H : version globale initiale (Mathevet, 2005)

La structure de ce modèle fonctionnant au pas de temps horaire est quasi identique à celle fonctionnant au pas de temps journalier à la différence que cette version utilise un seul hydrogramme unitaire de type HU_2 en amont des deux branches séparant le transfert et que certains des paramètres fixes sont modifiés au niveau de la fonction de percolation et de la fonction d'échanges pour être adaptés au pas de temps horaire. Les équations régissant ces modèles sont présentées en détail en **Annexe 5**.

3.5.2 Où introduire les modifications pour tester l'hypothèse dite Pic ?

3.5.2.1 Principe d'introduction

On rappelle que **l'hypothèse Pic** (voir 3.2) est basée sur le fait que la variabilité spatiale des précipitations génèrerait plus d'écoulements dits "directs" mais sans changement du bilan en eau par rapport à une précipitation homogène de même lame d'eau.

Bien que certaines hypothèses sur l'effet de l'hétérogénéité spatiale des précipitations sur les écoulements soient justifiées par la physique des processus (par exemple, ruissellement hortonien), il est difficile de dire *a priori* sur quels composants du modèle on doit faire agir l'indice d'hétérogénéité défini préalablement.

Nous allons introduire l'indice à plusieurs endroits dans la structure du modèle (notés de A à E par la suite) :

- au niveau de la pluie nette (approche A). Selon certaines thèses, la variabilité spatiale des pluies produit plus d'écoulement qu'une même lame d'eau moyenne homogène. Ainsi, l'indice pourrait agir directement sur la quantité de pluie en entrée.
- au niveau de la fonction de production (B). Par analogie avec les processus hydrologiques sensibles à la variabilité spatiale des précipitations, on peut penser que la variabilité spatiale de précipitations peut agir sur la répartition des écoulements au niveau du réservoir de production en modulant son taux de remplissage et donc le rendement d'une pluie.
- au niveau de la fonction de transfert (C). Les écoulements, après la production sont séparés en une branche dite directe allant vers l'exutoire après convolution par l'hydrogramme HU2 et une branche passant par le réservoir de routage après convolution par l'hydrogramme HU1. La séparation de ces deux branches est considérée comme fixe (répartition établie empiriquement à 10 % de l'eau vers la branche rapide et 90 % vers la branche passant par le réservoir de routage). La variabilité spatiale des pluies et leur positionnement sur le bassin pourraient modifier la répartition entre les deux branches d'écoulement, amenant par exemple plus d'eau vers la branche directe qui peut être assimilée aux écoulements rapides.
- au niveau du temps de transfert (approche D). La variabilité spatiale des pluies et leur positionnement sur le bassin pourraient produire une part plus importante d'écoulements de surface plus rapides et ainsi agir sur le temps de réponse du bassin. Au sein du modèle, l'indice pourrait agir directement sur le temps de transfert de la pluie gouverné par les hydrogrammes unitaires et le paramètre X4 assimilé au temps de réponse du bassin.

- au niveau des échanges (approche E). Les valeurs du coefficient d'échange souterrain pourraient servir de coefficients correcteurs des pluies d'entrée et par la même occasion pourraient être utiles pour prendre en compte l'hétérogénéité des pluies. Au sein du modèle, l'indice pourrait agir directement sur la valeur de ce coefficient d'échanges et ainsi faire rentrer ou sortir plus ou moins d'eau suivant l'hétérogénéité des pluies.

Les emplacements des approches A, B, C, D et E au sein du modèle GR sont illustrés en Figure 3.7

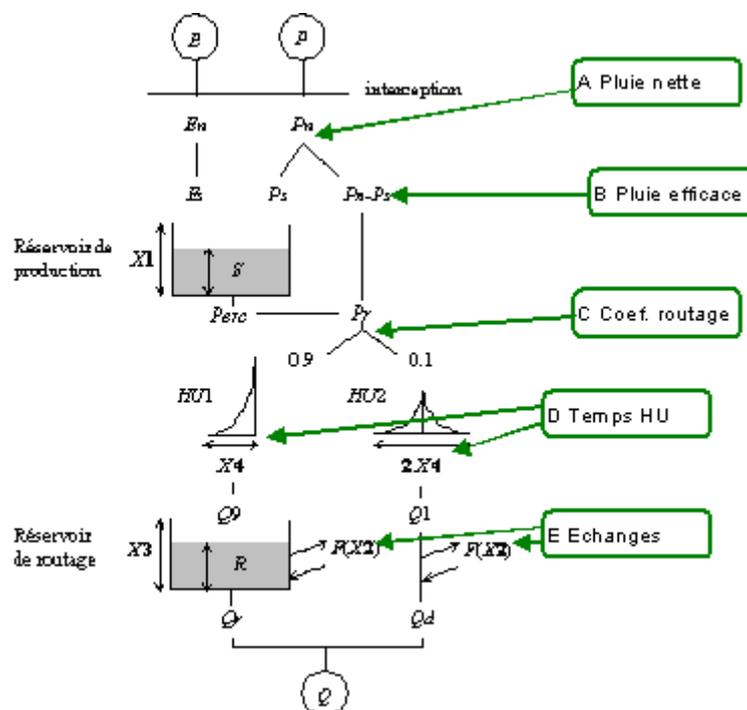


Figure 3.7 Emplacement des modifications A, B, C, D et E au sein de la structure du modèle GR4J

Dans chaque cas, on va considérer deux hypothèses inverses sur l'effet de l'hétérogénéité des pluies, à savoir :

- **Hypothèse dite de Base** : la forte hétérogénéité spatiale de la pluie va avoir tendance à augmenter le rendement (augmentation de la pluie efficace) ou à favoriser les écoulements directs de surface. Au contraire, une pluie très homogène dans l'espace favorisera la stockage. Cette hypothèse correspond à ce qui est généralement admis dans la littérature ;

- **Hypothèse dite Inverse** : inversement, la forte hétérogénéité spatiale de la pluie va avoir tendance à limiter la production de pluie efficace et favoriser l'infiltration (donc des écoulements plus lents). Les pluies réparties de façon homogène dans l'espace auront sous cette hypothèse tendance à provoquer des écoulements plus rapides.

Ces hypothèses sont valables pour le fonctionnement des deux types d'indice : statistique (IND) ou de Localisation (IND_L). Une pluie dite hétérogène peut être soit extrêmement variable statistiquement et/ou concentrée sur une partie plus ou moins distante de l'exutoire du bassin versant.

3.5.2.2 Formulation mathématique des introductions de l'indice au sein du modèle

L'introduction d'un indice, qui va modifier temporairement le fonctionnement du modèle, doit être faite de manière à ne pas déstabiliser complètement celui-ci. En effet, le modèle calé avec des pluies globales sur le bassin donne une première idée du fonctionnement hydrologique du bassin versant, et c'est sur cette base que le fonctionnement du modèle doit être modifié pour obtenir une représentation améliorée du bassin. L'introduction de l'indice devrait permettre au modèle de s'écarter temporairement de son fonctionnement de base, tout en restant sur le long terme proche de son fonctionnement moyen. En effet, nous voulons agir uniquement quand la structure des pluies du pas de temps considéré s'écarte de la position médiane de ces pluies. Cette position médiane est celle qui est globalement prise en compte au sein du modèle via les paramètres qui s'adaptent à ce fonctionnement moyen. Par exemple, le fonctionnement moyen d'un bassin peut être celui d'une hétérogénéité systématique des pluies entre l'amont et l'aval dans le cas d'un régime de précipitations dominé par des pluies orographiques. C'est lors de l'occurrence d'événements de structures différentes, plus ou moins renforcés, que l'indice va intervenir.

Pour cela, nous avons choisi de faire correspondre le fonctionnement moyen du bassin à la valeur médiane de l'indice d'hétérogénéité des pluies observé sur le bassin. Lorsque l'indice sera égal à cette valeur médiane, le fonctionnement de base du modèle restera inchangé. Lorsqu'il sera plus fort ou plus faible que cette médiane, le fonctionnement sera modifié dans des sens opposés.

Ce mode d'introduction doit, *a priori*, moins déstabiliser le modèle qu'une introduction brutale qui consisterait à faire agir l'indice de manière univoque en partant d'une situation d'hétérogénéité ou d'homogénéité maximale, par exemple en considérant que l'écoulement est augmenté dès que la pluie n'est plus homogène et ce d'autant plus que la pluie est hétérogène. En effet, une introduction brutale pourrait introduire des modifications du bilan en eau qui pourraient se révéler préjudiciables pour le modèle.

Nous choisissons donc d'utiliser ici un indice centré autour de la valeur médiane de l'indice d'hétérogénéité. Cet état d'hétérogénéité médian des pluies d'entrée sera désormais considéré comme le cas de neutralité par rapport au modèle initial. Et, on considérera des modifications opposées l'une de l'autre sur le fonctionnement du modèle, suivant que l'indice aura une valeur plus ou moins élevée que la médiane qui représente donc une valeur pivot.

On détaillera les approches les plus délicates à interpréter et à mettre en œuvre comme les approches B et C, les trois autres approches seront présentées de façon synthétique dans le Tableau 3.1 pour IND ; pour l'indice IND_L ces trois approches sont présentées dans le Tableau 3.2.

Approche B : Affaiblir ou augmenter les écoulements vers le réservoir de production

Il s'agit ici de travailler sur la détermination de la pluie efficace Pr qui alimente l'écoulement et de sa partie complémentaire Ps qui alimente le réservoir de production. Ces deux quantités sont issues de la séparation de la pluie nette Pn opérée par la fonction de rendement, qui est une fonction du taux de remplissage du réservoir de production. L'idée est ici d'utiliser l'indice pour diminuer ou augmenter la pluie efficace, et symétriquement augmenter ou diminuer la partie complémentaire Ps .

Dans la suite, on désignera par IND (respectivement IND_L), l'indice d'hétérogénéité de la pluie pour un jour donné et par $IND_{\tilde{D}}$ (respectivement $IND_{\tilde{D},L}$), sa valeur médiane pour les pluies de la période de données disponible. Cette valeur médiane est utilisée comme valeur centrale synonyme de neutralité de l'action de l'indice.

Hypothèse de Base

Cette hypothèse consiste à dire que si la pluie est plus hétérogène que la valeur de l'hétérogénéité médiane sur toute la chronique de pluie (ou pour IND_L : la pluie est plus à l'amont que la distance médiane des pluies par rapport à l'exutoire), on diminue la pluie efficace Pr et donc on augmente Ps .⁸ Elle peut s'écrire de la façon suivante :

Si $IND > IND\tilde{}$, alors Eq. 12

$$Ps^* = Ps + K(IND - IND\tilde{})(Pn - Ps)$$

et $Pr^* = Pn - Ps^*$

Si $IND \leq IND\tilde{}$, alors Eq. 13

$$Ps^* = Ps - K(IND\tilde{} - IND)Ps$$

et $Pr^* = Pn - Ps^*$

où Pr^* et Ps^* sont respectivement la nouvelle pluie efficace et sa partie complémentaire après introduction de l'indice d'hétérogénéité des pluies, et K est un coefficient multiplicateur appartenant à $[0;1]$ (à déterminer par essais successifs) permettant de moduler et ainsi d'adapter le degré d'influence de l'indice sur les fonctions concernées. Lorsque K vaut 0, on retombe sur la formulation du modèle initial.

Ces formulations permettent d'assurer la continuité des quantités d'eau présentes, la somme de Pr^* et Ps^* restant bien égale à Pn .

Cependant, les cas où l'on augmente la valeur de Ps sont soumis à condition. En effet, cette quantité peut devenir supérieure au déficit de saturation du réservoir de production. La valeur Ps^* doit donc être majorée par la valeur de ce déficit, tout surplus rejoignant la quantité Pr .

⁸ Les emplacements de ces quantités ainsi que les équations régissant le modèle GR4 sont décrites en Annexe C.5 (Présentations des modèles utilisés).

Hypothèse Inverse

Cette hypothèse consiste à dire que si la pluie est plus hétérogène que la pluie médiane (ou pour IND_L : la pluie est plus à l'amont que la distance médiane des pluies par rapport à l'exutoire), on augmente la pluie efficace et donc on diminue P_s :

Si $IND > IND\tilde{}$, alors Eq. 14

$$P_s^* = P_s - K(IND - IND\tilde{})P_s$$

et $Pr^* = P_n - P_s^*$

Si $IND \leq IND\tilde{}$, alors Eq. 15

$$P_s^* = P_s + K(IND\tilde{} - IND)(P_n - P_s)$$

et $Pr^* = P_n - P_s^*$

Approche C : Modification du coefficient séparateur des écoulements

Il s'agit ici de travailler sur la séparation des composantes d'écoulement dans le modèle. Initialement, cette séparation est fixe et correspond à 90% de la pluie efficace routée par l'hydrogramme unitaire HU1 et le réservoir de routage, et à 10% de la quantité routée par l'hydrogramme unitaire HU2.

Partant de l'hypothèse que l'hétérogénéité de la pluie peut avoir un impact sur le mode de transfert des écoulements jusqu'à l'exutoire, nous avons voulu voir ici l'effet de l'introduction de l'indice sur le taux de séparation des écoulements.

Hypothèse de Base

Cette hypothèse consiste à dire que si la pluie est plus hétérogène/ou plus à l'amont que la pluie médiane, on diminue la part d'écoulement allant vers HU2 (τ_2) et donc on augmente la partie complémentaire allant vers HU1 puis le réservoir de routage (τ_1) :

Si $IND > IND\tilde{}$, alors Eq. 16

$$\tau_2^* = \tau_2 - K(IND - IND\tilde{})\tau_2$$

et $\tau_1^* = \tau_1 - \tau_2^*$

Si $IND \leq IND\tilde{}$, alors Eq. 17

$$\tau_2^* = \tau_2 + K(IND\tilde{} - IND) \tau_1$$

et $\tau_1^* = \tau_1 - \tau_2^*$

où τ_2^* et τ_1^* sont respectivement les nouveaux taux de séparation des composantes d'écoulement vers l'hydrogramme HU2 et vers l'hydrogramme HU1 après introduction de l'indice d'hétérogénéité des pluies, et K est un coefficient multiplicateur appartenant à $[0;1]$ ayant le même rôle que dans l'approche A.

Ces formulations permettent d'assurer la continuité des quantités d'eau présentes, la somme τ_2^* et de τ_1^* restant bien égales à 1.

Hypothèse Inverse

Cette hypothèse consiste à dire que si la pluie est plus hétérogène ou plus à l'amont que la pluie médiane, on augmente la part d'écoulement allant vers HU2 (τ_2) et donc on diminue la partie complémentaire allant vers HU1 (τ_1):

Si $IND > IND\tilde{}$, alors Eq. 18

$$\tau_2^* = \tau_2 + K(IND - IND\tilde{}) \tau_1$$

et $\tau_1^* = \tau_1 - \tau_2^*$

Si $IND \leq IND\tilde{}$, alors Eq. 19

$$\tau_2^* = \tau_2 - K(IND\tilde{} - IND) \tau_2$$

et $\tau_1^* = \tau_1 - \tau_2^*$

Tableau 3.1. Récapitulatif des approches de modifications effectuées au sein du modèle avec l'indice IND et sa valeur médiane $IND\tilde{}$ sur la chronique des pluies

<u>Approche</u>	<u>Hypothèse</u>	<u>Signification hydrologique :</u> Si la pluie est plus hétérogène que l'hétérogénéité médiane des pluies (soit $(IND > IND\tilde{})$)	<u>Traduction mathématique :</u> On rappelle que les sens de modification dépend du signe de $(IND - IND\tilde{})$	<u>Signification des variables</u>
A	DE BASE	on augmente la pluie nette d'entrée.	$\overline{P^*} = \overline{P} + K(IND\tilde{} - IND)\overline{P}$	\overline{P} (mm) : pluie nette $\overline{P^*}$ (mm) : pluie nette corrigée
	INVERSE	on diminue la pluie nette d'entrée.	$\overline{P^*} = \overline{P} - K(IND\tilde{} - IND)\overline{P}$	
D	DE BASE	on diminue le temps de réponse.	$X4^* = X4 + K(IND\tilde{} - IND)X4$	$X4$ (jour) : paramètre de temps de réponse
	INVERSE	on augmente le temps de réponse	$X4^* = X4 - K(IND\tilde{} - IND)X4$	$X4^*$ (jour) : idem corrigé
E	DE BASE	on augmente la quantité des échanges vers le modèle	$D^* = D + K(IND\tilde{} - IND)D$	D : Valeur d'échange ⁹
	INVERSE	on diminue la quantité des échanges vers le modèle	$D^* = D - K(IND\tilde{} - IND)D$	D^* : corrigée

⁹ Cette valeur dépend de la valeur du paramètre d'échange et du taux de remplissage du réservoir de routage. Les sens de modification vont aussi dépendre du signe du paramètre d'échange.

Tableau 3.2. Récapitulatif des essais de modifications effectuées au sein de modèle avec l'indice IND et sa valeur médiane sur la chronique des pluies IND_L

<u>Approche</u>	<u>Hypothèse</u>	<u>Signification hydrologique:</u> Si la pluie est plus à l'amont que la distance médiane des pluies (soit $(IND_L > IND_L)$):	<u>Traduction mathématique:</u> On rappelle que les sens de modification dépend du signe de $(IND_L - IND_L)$	<u>Signification des variables</u>
A	DE BASE	on augmente la pluie nette d'entrée.	$\bar{P}^* = \bar{P} - K(IND_L - IND_L)\bar{P}$	\bar{P} (mm) : pluie nette
	INVERSE	on diminue la pluie nette d'entrée.	$\bar{P}^* = \bar{P} + K(IND_L - IND_L)\bar{P}$	\bar{P}^* (mm) : pluie nette corrigée
D	DE BASE	on diminue le temps de réponse.	$X4^* = X4 + K(IND_L - IND_L)X4$	$X4$ (jour) : paramètre de temps de réponse
	INVERSE	on augmente le temps de réponse	$X4^* = X4 - K(IND_L - IND_L)X4$	$X4^*$ (jour) : corrigée
E	DE BASE	on augmente la quantité des échanges vers le modèle le temps de réponse	$D^* = D - K(IND_L - IND_L)D$	D : Valeur d'échange ¹⁰
	INVERSE	on diminue la quantité des échanges vers le modèle le temps de réponse	$D^* = D + K(IND_L - IND_L)D$	D^* : idem corrigée

¹⁰ Cette valeur dépend de la valeur du paramètre d'échange et du taux de remplissage du réservoir de routage. Les sens de modification vont aussi dépendre du signe du paramètre d'échange.

3.5.3 Où introduire les modifications pour tester l'hypothèse Volume ?

3.5.3.1 Principe d'introduction

On rappelle que **l'hypothèse dite Volume** (voir 3.2) est basée sur le fait que la variabilité spatiale des précipitations modifierait la quantité en entrée du système avec par exemple une mauvaise quantification de l'ETP ou une sous-estimation de la pluie de bassin en raison d'un réseau trop lâche (événements de pluie évitant une partie du réseau au sol).

L'idée est d'utiliser l'indice d'hétérogénéité comme coefficient correcteur variable des pluies.

Nous avons comparé l'effet de ce coefficient correcteur, calculé à chaque pas de temps sur les pluies en fonction de leur répartition spatiale, à l'effet d'un coefficient correcteur systématique (constant) qui permettrait de retrouver globalement les mêmes quantités de pluies en entrée du modèle sur la période. En effet, les vecteurs de paramètres s'adaptent aux quantités en entrée des modèles, notamment à l'aide de leur fonction de production. En conséquence, si on augmente les quantités totales d'eau en entrée, les paramètres vont s'adapter et il sera difficile de comparer les performances de la version modifiée et la version globale qui servait de référence. De plus, les modèles accueillent généralement favorablement en terme de performances le fait d'augmenter les quantités d'eau brute en entrée (Oudin *et al.*, 2006b)¹¹. Pour cette raison, il est important de comparer les performances de modèles recevant des quantités d'eau comparables en entrée, afin de ne pas introduire un biais qui conduirait à une mauvaise interprétation des résultats. L'objectif est donc bien d'évaluer l'intérêt d'un coefficient correcteur des pluies variable, dépendant de leur hétérogénéité par rapport à un coefficient correcteur fixe conduisant globalement aux mêmes volumes de pluies en entrée du modèle. Ce coefficient correcteur va donc être dépendant de la valeur de l'indice d'hétérogénéité statistique des précipitations d'entrée.

La philosophie d'introduction d'indice est différente par rapport à l'hypothèse dite Pic car ici on va augmenter dans un seul sens les quantités d'eau totales alors que pour l'autre hypothèse on se basait sur un équilibre des quantités d'eau autour d'une situation médiane.

On ne fera donc plus référence à IND définissant la situation médiane du bassin en termes d'indice

¹¹ Un modèle a beaucoup plus de facilité à se débarrasser d'eau excédentaire via par exemple sa fonction d'échange que de faire venir de l'eau en cas de déficit

Pour tester l'hypothèse dite Volume, on va continuer comme dans l'hypothèse précédente (Pic) à considérer deux hypothèses inverses sur l'effet de l'hétérogénéité des pluies, à savoir :

- **Hypothèse dite de Base** : l'hétérogénéité de la pluie provoquerait une sous-estimation de la pluie de bassin. Cette hypothèse, qui correspond à ce qui est généralement admis dans la littérature, constitue ce que nous appellerons dans la suite l'hypothèse de Base.
- **Hypothèse dite Inverse** : inversement, l'hétérogénéité de la pluie va avoir tendance à provoquer une surestimation de la pluie de bassin (ou plutôt on aura tendance à sous-évaluer les pluies en cas d'hétérogénéité : par exemple le réseau voit les intensités maximales d'une pluie qu'on extrapole à tous les bassins alors qu'il a moins plu ailleurs).

3.5.3.2 Formulation mathématique de l'introduction de l'indice comme correcteur du volume

Dans le cas de cette hypothèse, la valeur de l'indice va exclusivement servir de coefficient correcteur des pluies :

Hypothèse de Base

Cette hypothèse consiste à dire que plus la pluie est hétérogène (c'est-à-dire plus la valeur de l'indice tend vers 1), plus on augmente la pluie en entrée du modèle :

$$\bar{P}^* = \bar{P} + K\bar{P}IND \quad \text{Eq. 20}$$

Où \bar{P} est la pluie de bassin et \bar{P}^* la pluie de bassin modifiée.

Hypothèse Inverse

Cette hypothèse consiste à dire que plus la pluie est homogène (c'est-à-dire plus la valeur de l'indice tend vers 0), plus on augmente la pluie en entrée du modèle :

$$\bar{P}^* = \bar{P} + K\bar{P}(1 - IND) \quad \text{Eq. 21}$$

Comme expliqué en introduction, dans un cadre de comparaison avec le modèle initial, on évaluera pour chaque valeur du coefficient K testé, le coefficient fixe (non dépendant de

l'indice d'hétérogénéité) correcteur de pluies à introduire au modèle initial, qui est calculé de manière à assurer une équivalence des volumes en entrée du modèle :

Pour hypothèse de Base :

$$COEF = \frac{\sum_j^n \overline{KP}_j IND_j}{\sum_i^n \overline{P}_j} \quad \text{Eq. 22}$$

Pour hypothèse Inverse:

$$COEF = \frac{\sum_j^n \overline{KP}_j (1 - IND_j)}{\sum_i^n \overline{P}_j} \quad \text{Eq. 23}$$

n étant le nombre de pas de temps sur la période test.

Ainsi pour le modèle initial la pluie nette en entrée \overline{P}_{cor} est égale à :

$$\overline{P}_{cor} = \overline{P} COEF \quad \text{Eq. 24}$$

3.6. Evaluation du modèle et des méthodes testées

3.6.1 Critères de performances

L'analyse de la sensibilité du modèle à l'introduction des indices de variabilité spatiale des précipitations s'appuiera sur l'évaluation de la simulation des débits en contrôle, après calage des paramètres propres à la version du modèle modifié (approche dynamique pour l'analyse de sensibilité du modèle à une modification) qui nous permet de voir l'effet réel de la modification sur les performances du modèles. En effet, il existe deux types d'analyse de sensibilité d'un modèle hydrologique (Andréassian *et al.*, 2001; Andréassian *et al.*, 2004):

- **analyse statique** : elle consiste à caler les paramètres d'un modèle avec des entrées hydroclimatiques de référence et à tester le modèle uniquement en phase de contrôle avec d'autres entrées mais en conservant les mêmes paramètres (ce qui ne permet pas au paramètre de s'adapter à cette modification).

- **analyse dynamique** : elle consiste à recalculer les paramètres des modèles avec chacune des nouvelles entrées. Cela permet au modèle de s'adapter à la modification des entrées. La nouvelle version est donc évaluée à la fois en phases de calage et de contrôle.

Du fait des contraintes d'analyse sur un grand échantillon, l'examen des performances se fait à partir de critères numériques et non des critères graphiques, impossibles à mettre en œuvre sur de grands échantillons de bassins. On choisira comme critère d'évaluation le critère le plus communément utilisé qui est celui de (Nash, 1970), calculé avec la formule suivante :

$$NS = 1 - \frac{\sum_i^N (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})^2}{\sum_i^N (Q_i^{Obs} - \overline{Q}^{Obs})^2} \quad \text{Eq. 25}$$

avec

- Q_i^{Obs} : Débit observé au pas de temps i
- Q_i^{Sim} : Débit calculé au pas de temps i
- \overline{Q}^{Obs} : Débit moyen observé au cours de la période de simulation
- N : Nombre de pas de temps de simulation

NS varie entre $-\infty$ et 1. Si NS est égal à 1, les débits simulés correspondent parfaitement aux données mesurées. Ce critère accorde plus d'importance aux erreurs sur les forts débits, ce qui est intéressant au regard des effets produits *a priori* sur cette gamme de débits par la variabilité spatiale des précipitations. Cependant, afin d'évaluer les modifications induites sur les catégories de débits les plus fréquents, on calculera le critère sur les racines des débits.

Dans sa formulation, le critère de Nash et Sutcliffe (1970) n'est pas bien adapté à l'étude sur de larges échantillons, à cause de son domaine de variation qui n'est pas borné négativement, les valeurs fortement négatives biaisant le calcul de moyennes. La formulation du critère proposé par Mathevet (2005), appelé C2M, permet de compenser certains des problèmes du critère NS notamment son absence de borne inférieure. Cette transformation est décrite par la formule suivante :

$$C2M = \frac{NS}{2 - NS} \quad \text{Eq. 26}$$

On obtient donc un critère borné entre -1 et 1, dont la forme de variation et la relation avec le critère NS est illustré par la Figure 3.8. Cette transformation est réalisée afin de s'affranchir du trop fort poids des bassins aux critères fortement négatifs lors du calcul de la moyenne de ce critère de performances sur un échantillon de plusieurs bassins versants. L'utilisation de ce critère donne pleine signification à la moyenne qui devient le meilleur indice de comparaison pour discerner diverses structures de modélisation.

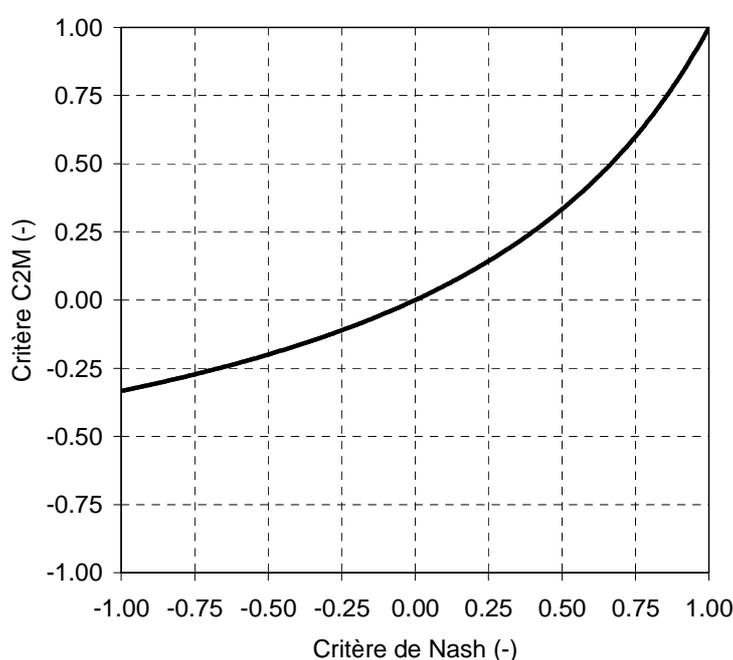


Figure 3.8 Relation entre le critère de NS et le critère C2M

De plus, la capacité du modèle à reproduire le volume d'eau observé sur la période étudiée sera aussi analysée. Le critère utilisé est le critère de bilan. Il est défini par :

$$CB = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i^{Sim}}{\sum_{i=1}^N Q_i^{Obs}} \quad \text{Eq. 27}$$

L'évolution de ce critère permettra de distinguer si on corrige les sous-estimations ou surestimations des volumes d'eau simulés par le modèle initial. Une valeur de 1 indique un

bilan parfait. Une valeur supérieure à 1 indique une surestimation globale des débits par le modèle et inversement.

3.6.2 Procédure de Calage-Contrôle

L'estimation des paramètres passe par une phase de calage. Lors de cette phase de calage, les paramètres sont ajustés de manière à ce que la simulation des débits corresponde le plus étroitement possible à la série de débits mesurés sur la période de calage.

Cette phase de calage des paramètres joue plusieurs rôles :

- un premier, explicite, d'estimation de paramètres non connus.
- un second, implicite, de compensation sur ces paramètres de toutes les erreurs liées au modèle ou aux données dont, peut être, l'adaptation des paramètres du modèle à la variabilité spatiale générale des pluies. Le modèle s'adapte en tout cas à la configuration moyenne du champ pluviométrique tel qu'il est décrit par les postes présents sur le bassin.

Nous allons utiliser ici le schéma classique du “split-sample test”. Cette procédure proposée par Klemeš (1986) permet d'évaluer les performances des modèles dans des conditions proches d'une utilisation opérationnelle. Il s'agit d'effectuer une séparation de la période de données disponibles en deux sous-périodes indépendantes. Un calage du modèle est effectué sur la première sous-période, puis un contrôle du modèle sur la deuxième sous-période. Cette procédure permet en outre d'évaluer efficacement la robustesse des modèles, c'est-à-dire leur capacité à maintenir leur niveau de performances dans des conditions différentes des conditions de calage.

Ainsi pour chaque bassin versant, la chronique est divisée en deux périodes servant alternativement pour le calage et le contrôle. Au début de chaque période, une année de mise en route du modèle (*warm-up*) est utilisée pour limiter les erreurs liées à la méconnaissance des conditions initiales. Pour assurer une certaine significativité, chaque période comporte au minimum deux années servant au calcul des critères.

Un aspect important du calage d'un modèle est le choix de la méthode d'optimisation des paramètres. La méthode d'optimisation automatique des paramètres choisie ici est la

méthode locale directe¹² élaborée par Michel (1989) appelée méthode "Pas-à-Pas". Le point de départ de l'optimisation est un jeu de paramètres médians obtenus sur de nombreux bassins. Ensuite, l'algorithme évolue dans l'espace des paramètres, à la recherche des valeurs "optimales" via l'optimisation (ici, maximisation) d'une fonction objectif. La fonction objectif choisie, ici, est celle basée sur le critère NS calculé sur les racines des débits, considéré comme un bon compromis entre les diverses gammes de débit pour le calage (Oudin *et al.*, 2006a).

3.6.3 Evaluation de la sensibilité du modèle aux modifications introduites

L'analyse de sensibilité du modèle aux méthodes testées se fera donc sur la base de l'évolution des critères de performances du modèle essentiellement en contrôle, car c'est dans cette phase de test que le modèle se place dans des conditions réelles d'application.

On définira pour les différents critères type C2M calculés (soit sur les débits, soit sur les racines de débits) le gain de performances par :

$$\Delta C2M = C2M_{Indice} - C2M_{Initial} \quad \text{Eq. 28}$$

avec $C2M_{Indice}$: Critère de performance moyen obtenu sur l'échantillon obtenu par l'approche introduisant un indicateur de variabilité des précipitations
 $C2M_{Initial}$ Critère de performance moyen obtenu sur l'échantillon par la structure initiale du modèle

Si $\Delta C2M$ est positif, on améliore les performances en utilisant l'indice. Si $\Delta C2M$ est négatif on les dégrade.

Pour le cas particulier du critère de bilan (CB), on va considérer l'écart à un bilan parfait qui correspond à une valeur de 1. Le gain de performances s'exprimera de la manière suivante :

$$\Delta CB = |1 - CB_{Initial}| - |1 - CB_{Indice}| \quad \text{Eq. 29}$$

¹² En opposition aux méthodes globales, déterministes ou stochastiques. Pour plus d'information sur les méthodes d'optimisation des paramètres existantes, on se reportera au chapitre 4.3 de la thèse de Mathevet (2005).

Ce critère de bilan sera essentiellement examiné au cas par cas¹³, pour voir si les bassins versants dont les performances se sont améliorées avec le C2M par l'introduction d'indices, ont aussi réévalué de manière positive les volumes d'eau en sortie du modèle.

La sensibilité du modèle aux méthodes élaborées, sera ainsi avant tout évaluée globalement sur l'échantillon à partir des critères de performances type C2M. A chaque test de solution, un calcul de critères moyens des performances en contrôle sur les deux sous-périodes est fait pour chaque bassin versant. Puis des critères moyens et médians sont calculés pour représenter les performances globales de l'échantillon pour ce critère¹⁴. C'est, en effet, la moyenne arithmétique et la médiane des critères moyens par bassin obtenu sur l'échantillon, statistiques basiques mais néanmoins robustes, qui vont être principalement utilisées pour comparer les résultats.

L'évaluation initiale se fait à l'aide de boîtes à moustaches type BoxPlot (Tukey, 1997)¹⁵ décrivant la distribution, sur les 182 bassins versants de l'échantillon, de l'écart entre les performances du modèle initial et le modèle pour chaque hypothèse et chaque lieu d'introduction. La forme des figurés des BoxPlot utilisés dans ce chapitre est illustrée en Figure 3.9.

¹³ La moyenne de ce critère sur plusieurs bassins n'a pas de signification car il n'est pas borné (le bilan peut être pour chaque bassin soit <1 soit >1)

¹⁴ Par la suite, on appellera critère de performances par bassin en contrôle, la valeur moyenne de ce critère obtenu sur les deux périodes de contrôle utilisées pour chaque bassin.

¹⁵ La boîte à moustaches ou *BoxPlot* une traduction de *Box & Whiskers Plot*, est une invention de Tukey (1977) pour représenter schématiquement une distribution. Plusieurs choix de représentation sont possibles. Ici, on utilise une boîte rectangulaire sur l'intervalle inter-quartiles, prolongée par des lignes jusqu'aux premier et neuvième déciles. On y a aussi indiqué la médiane et la moyenne.

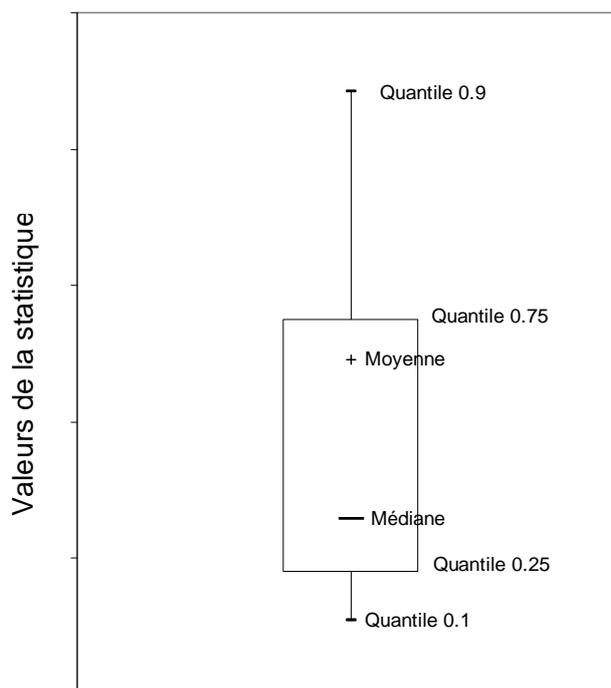


Figure 3.9 Illustration de la légende des figures de type BoxPlot présentées dans cette thèse

3.7. Synthèse

Afin d'évaluer l'influence de la variabilité spatiale des précipitations sur la qualité des simulations d'un modèle global pluie-débit fonctionnant en continu, une méthode de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations au sein du modèle a été élaborée. Elle s'appuie sur des indices de variabilité construits à partir des données du réseau de pluviomètres. L'originalité de cette méthode provient de la conservation de la dimension globale du système sans avoir recours à une distribution spatiale explicite.

Sans le moindre *a priori* sur l'influence de la variabilité spatiale des précipitations sur les débits et sur le fonctionnement des modèles hydrologiques, nous avons essayé de répondre à plusieurs questions tournant autour de la prise en compte de ce phénomène :

- i. De quelles informations le modèle a besoin pour décrire la variabilité globale de précipitations ? La variance au sein du bassin ou bien la localisation des plus forts cumuls ? Afin de répondre à cette question, nous avons élaboré deux indices contenant des informations différentes, soit la variance des pluies avec un indice dit statistique, soit l'hétérogénéité amont/aval avec un indice de positionnement ;

- ii. comment la variabilité spatiale des précipitations va-t-elle influencer la génération des débits au sein du modèle par rapport à une pluie homogène de même lame d'eau ? Pour ceci, nous avons posé deux hypothèses différentes, nommées Pic et Volume, et à chaque test, nous avons essayé de les confirmer en testant un sens *a priori* de modification ou de les infirmer en testant aussi le sens inverse.
- iii. A quel niveau de sa structure le modèle a-t-il besoin d'être informé de la variabilité spatiale des précipitations ? Plusieurs niveaux d'introduction des indices vont être testés, soit sur les fonctions de production et de rendement du modèle, soit dans ses fonctions de routage et temps de transfert (hydrogrammes unitaires).
- iv. Le pas de temps de modélisation et des données d'entrée va-t-il jouer un rôle dans l'intérêt de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations au sein du modèle ? Nous allons tester et comparer les méthodes élaborées aux pas de temps journalier et horaire.

En résumé, nous allons introduire deux types d'indices informatifs dans un modèle global [GR4J ou GR4H] sur cinq niveaux de leur structure (appelés A à E) en posant deux hypothèses (Pic et Volume) d'influence et en testant à chaque fois un sens de variation *a priori* (hypothèse de Base) et le sens inverse (hypothèse Inverse), aux pas de temps horaire et journalier sur un large échantillon de bassins versants français.

Pour évaluer ces structures modifiées et les confronter à la structure initiale, nous allons utiliser un schéma simple de comparaison sur un large échantillon de bassins versants basé sur divers critères de performance classiques (de type Nash) calculés sur les simulations en contrôle (après recalage systématique).

La synthèse de toutes les modifications qui vont être testées est décrite dans le Tableau 3.3. Les résultats de cette série de tests sont analysés dans le chapitre suivant.

Tableau 3.3 Résumé des modifications testées

Hypothèse de modification	Lieux d'introduction pour modification	Sens de modification	Indices évaluant la variabilité spatiale de précipitations
<u>Pic</u> : Modification de la répartition des débits à l'exutoire sans modification des volumes	A : pluie nette	<u>De Base</u> : plus	Indice <u>d'hétérogénéité statistique</u>
	B : pluie efficace	d'écoulement direct si pluie plus hétérogène que	
	C : coefficient routage	l'hétérogénéité médiane	Indice <u>Localisation</u>
	D : Temps de réponse des HU	<u>Inverse</u> : moins	
	E : Echanges avec l'extérieur	d'écoulement direct si pluie plus hétérogène que l'hétérogénéité médiane	
<u>Volume</u> : Modifications des quantités d'eau	A : pluie nette	<u>De Base</u> : les quantités d'eau en entrée augmentent par rapport à la pluie initiale avec l'accroissement de l'hétérogénéité des pluies.	Indice <u>d'hétérogénéité statistique</u>
		<u>Inverse</u> : les quantités d'eau en entrée augmentent par rapport à la pluie initiale l'accroissement de l'homogénéité des pluies	

Chapitre 4

Introduction d'indices de variabilité spatiale des précipitations dans un modèle hydrologique global : Analyse des résultats

4.1.Introduction

Après avoir présenté, dans le chapitre précédent, l'élaboration d'indices définissant l'hétérogénéité des pluies sur le bassin versant, nous présentons dans ce chapitre l'intégralité des résultats traitant de leur introduction dans les modèles globaux GR4J et GR4H pour en modifier le fonctionnement. Les tests d'introduction d'indices se feront sur deux échantillons différents composés de bassins versants représentés par des triplets pluie-ETP-débit aux pas de temps horaire et journalier (décrits dans le chapitre 2), chaque pas de temps étant traité indépendamment. L'utilisation de ces deux pas de temps permettra de tester si les résultats dépendent du pas de temps. Ces doubles tests se justifient par le fait que la variabilité spatiale des pluies dépend de l'intervalle de temps sur lequel elle est étudiée (Lebel, 1984).

Pour les besoins de la méthode, chaque bassin nécessite d'être représenté d'après la valeur médiane prise par l'indice considéré sur toute la chronique d'observation pluviométrique. Cette valeur médiane sert en effet de pivot autour duquel le modèle est modifié par l'indice dans un sens ou dans l'autre selon l'hypothèse de travail (dite de Base ou Inverse).

L'hypothèse d'effet de la variabilité spatiale des précipitations principalement testé ici sera l'hypothèse Pic (voir définition 3.2). Partant de cette hypothèse, utilisant l'indice statistique, nous avons comparé les performances du modèle pris dans sa structure initiale avec celles obtenues pour les différentes solutions testées basées sur les cinq lieux d'introductions, les deux hypothèses de sens de modifications et plusieurs valeurs de K, le coefficient

multiplicateur servant à moduler l'intensité des modifications. Une étude similaire a été réalisée en utilisant l'indice de Localisation.

Par la suite, l'analyse de l'autre hypothèse d'effet de la variabilité spatiale de précipitations, dite l'hypothèse Volume, est également testée pour les deux hypothèses de sens de modifications et plusieurs valeurs de K à l'aide de l'indice Statistique.

Comme cela est discuté au chapitre 2, cette comparaison se fera sur la base de plusieurs critères d'évaluation de performance du modèle. L'objectif est de trouver une solution qui améliorerait au moins un des critères testés sur les bassins où la pluie est considérée comme très hétérogène spatialement, sans dégrader les performances sur les autres bassins de l'échantillon d'analyse. Il est aussi indispensable que cette solution ne provoque pas la dégradation des autres critères de performance testés. En effet, ces autres critères correspondent à l'évaluation du modèle sur d'autres catégories de débit ou d'autres capacités du modèle (critère de bilan). Or, dans l'optique de travail de cette thèse, nous tenons à être efficaces pour un fonctionnement en continu sur tout le régime hydrologique. En évitant de se focaliser sur le suivi individuel de certains événements, l'utilisation et l'évaluation sur de longues périodes en continu permet de garantir l'objectivité et la représentativité des résultats (Leviandier, 1988).

4.2. Examen des performances des modèles obtenues après l'introduction d'indices de variabilité des précipitations pour l'hypothèse Pic

Nous allons présenter les résultats sous forme d'une étude comparative entre les cinq lieux d'introduction possibles et les deux sens de modifications possibles d'après les deux hypothèses établies (de Base et Inverse) décrites dans le chapitre 3 (voir 3.5.2.1) pour l'indice Statistique et l'indice de Localisation.

Nous avons testé par essais successifs les différents lieux d'introduction avec des valeurs de K allant de 0.1 à 1. On rappelle que ce coefficient K est un coefficient multiplicateur appartenant à $]0;1]$ qui permet de moduler et ainsi d'adapter le degré d'influence de l'indice sur les fonctions concernées. La valeur 0 correspond à la structure initiale du modèle sans modification. Ce coefficient n'a pas été optimisé avec les autres paramètres du modèle, car le modèle y est peu sensible relativement à la prédominance des quatre autres paramètres. Ainsi, pour mieux observer son influence dans le modèle, nous avons donc préféré un calage

manuel sur plusieurs valeurs. Il s'agit d'un test systématique de chaque valeur de K entre 0 et 1 avec un pas de 0.1 pour le pas de temps journalier et de 0.3 pour le pas de temps horaire. Pour chaque indice et chaque pas de temps, on commencera systématiquement par une analyse de sensibilité préalable de tous les lieux d'introduction afin de se focaliser sur la méthode la plus efficace.

4.2.1 Utilisation de l'Indice Statistique d'hétérogénéité des précipitations

4.2.1.1 Analyse préliminaire : Etude de sensibilité du lieu d'introduction au pas de temps journalier sur GR4J, hypothèses de Base et Inverse

Afin de sélectionner les modifications pour lesquelles le modèle est le plus sensible, nous avons réalisé une synthèse préalable de tous les tests effectués, c'est-à-dire cinq lieux d'introduction, dix valeurs de K et deux hypothèses gérant le sens de modification (hypothèse de Base et son Inverse). Ceci correspond donc, pour chaque indice, à 100 versions du modèle à tester.

Dans le but de synthétiser tous les résultats obtenus et de sélectionner les plus intéressants, pour chaque bassin, on s'intéressera à l'écart moyen de performance du modèle en contrôle entre l'approche initiale (qui correspond à $K=0$) et la meilleure des 10 modifications intermédiaires issues de la variation croissante des valeurs de $K \neq 0$ pour chacune des deux hypothèses et chaque lieu d'introduction. Pour simplifier, nous n'avons conservé pour l'analyse que le critère C2M sur la racine des débits (C2M-RQ) qui correspond à la fonction objectif utilisée au calage.

L'approche, pour laquelle chaque bassin versant peut choisir la meilleure valeur du coefficient K (dite idéale pour le bassin) après calage des 4 paramètres libres, sera appelée modèle CALÉ. Finalement, nous avons évalué le modèle CALÉ pour chacune des deux hypothèses de Base et Inverse pour chacun des cinq lieux d'introduction.

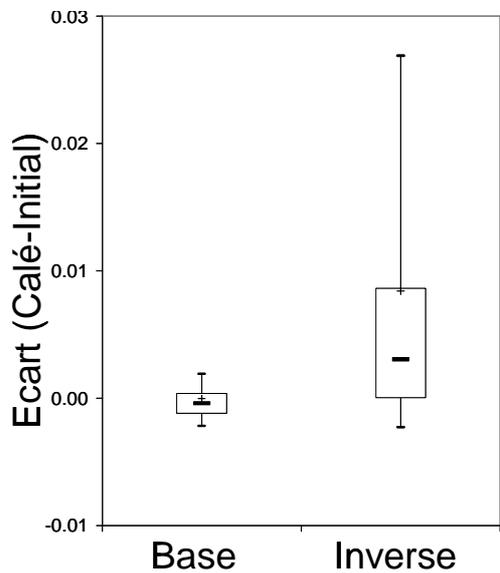
La Figure 4.1 présente une synthèse des résultats sur les cinq lieux d'introduction. Nous pouvons remarquer que seulement deux des cinq lieux d'introduction ont conduit à des

écarts significatifs¹⁶. Il s'agit des approches traitant des lieux relatifs à des modifications dans la fonction de production des modèles. Ces approches sont la modification de la pluie nette (approche A), et celle de la pluie efficace (Approche B). Pour ces deux lieux, les écarts avec la structure initiale ont été réellement significatifs uniquement sur l'hypothèse Inverse. C'est au niveau de l'approche A que le modèle modifié présente les plus gros écarts avec la structure initiale. La médiane de ces écarts est d'environ 0,01 ce qui signifie que la moitié des bassins peut être capable de gagner plus de 0,01 sur le critère étudié s'il avait le choix de l'intensité des modifications induites par l'indice (c'est-à-dire si K était un paramètre libre). Le quantile 0,9 de la distribution de ces écarts s'élève quant à lui à 0,03 c'est-à-dire que sur les 182 bassins versants de l'échantillon environ une vingtaine peuvent gagner au moins 0,03 sur le critère avec cette approche. Nous pouvons noter que cette approche a cependant été **insensible** à l'hypothèse de Base avec certes peu d'écarts positifs, mais aussi peu de négatifs.

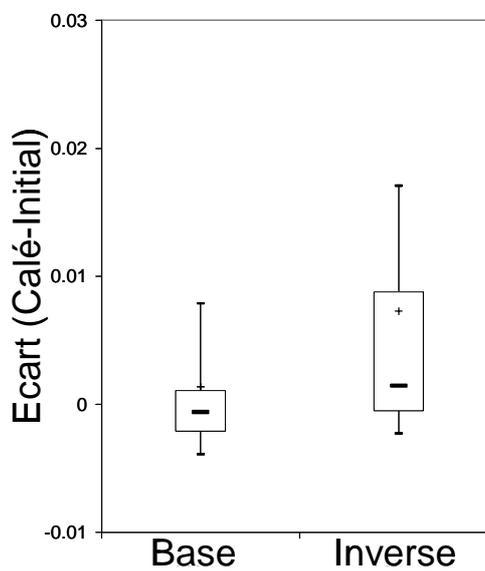
Pour les trois autres solutions de modification testées (C et D toutes deux au niveau des fonctions de routage du modèle et E au niveau de la fonction d'échanges), le modèle a été pratiquement **insensible** aux modifications engagées, quelles que soient l'hypothèse et la valeur de K. En effet, la distribution des écarts de performance est centrée autour de zéro avec des écarts maximaux inférieurs à 0,005 dans un sens d'évolution ou dans l'autre.

Le modèle est donc uniquement sensible à des modifications de sa fonction de rendement. Cependant, l'hypothèse avancée pour cette modification qui semble la plus intéressante va à l'inverse de *l'a priori* posé dans le chapitre 3. En effet, ces résultats préliminaires indiquent que le modèle est surtout sensible au sens de modification décrit par l'hypothèse Inverse, c'est-à-dire que plus la pluie en entrée du modèle est hétérogène, plus la pluie efficace doit être réduite.

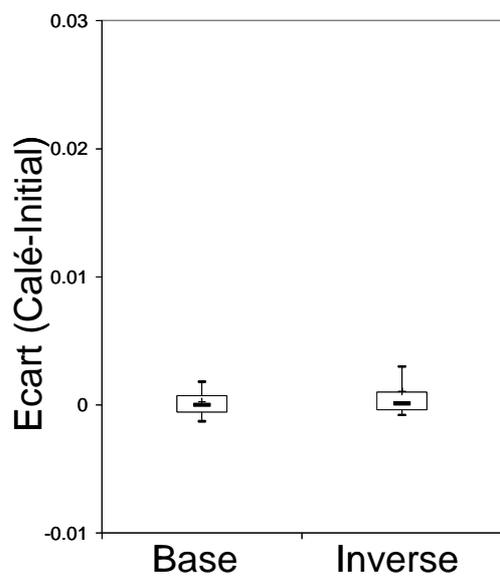
¹⁶ Par convention, un écart de performance pour un critère est, ici jugé significatif, s'il est supérieur à 0,01. Cependant il faut bien garder à l'esprit que ce seuil de significativité est très relatif au critère initial. En effet, la signification des progrès n'est pas la même si le critère initial est de 0,8 ou s'il est de 0,1.



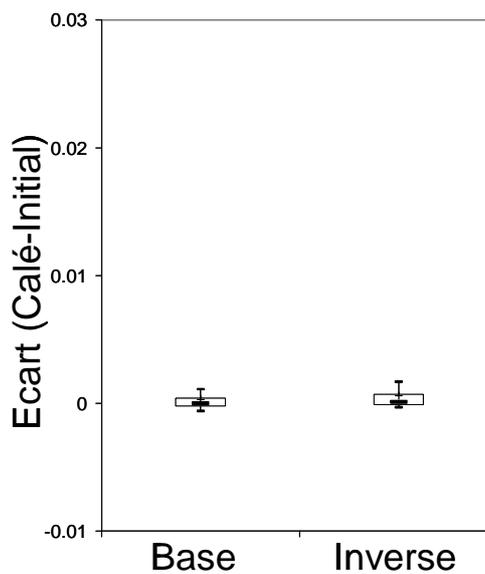
A) MODIF. PLUIE NETTE



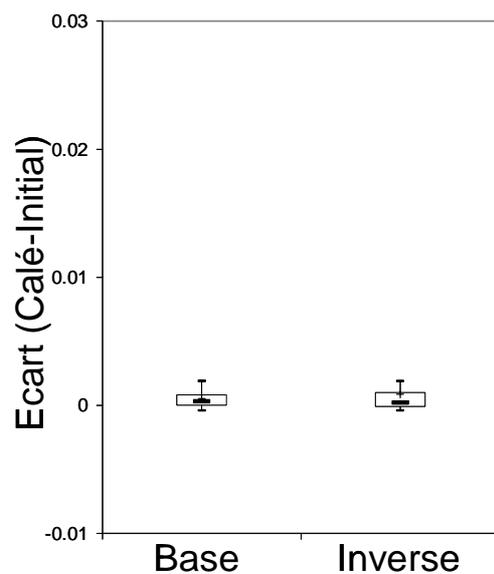
B) MODIF. PLUIE EFFICACE



C) MODIF. COEF. ROUTAGE



D) MODIF. TEMPS DE TRANSFERT



E) MODIF. ECHANGE

Figure 4.1 BoxPlot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des différences de performance pour le critère C2M Racine-Q en contrôle entre le modèle modifié CALÉ et le modèle initial GR4J sur les 182 bassins versants de l'échantillon pour les deux hypothèse (de Base et Inverse) et les cinq lieux d'introduction : A) Modification pluie nette, B) Modification pluie efficace, C) Modification coefficient séparateur routage, D) Modification temps de transfert E) Modification des échanges

Au vu de ces résultats, il s'agit maintenant d'analyser plus en détail les solutions A (modification au niveau de la pluie nette) et B (modification au niveau de la fonction de production).

Au niveau du choix de la valeur de K, les très faibles évolutions constatées sur le critère de performance pendant le calage manuel pour l'approche CALÉ ne justifient pas l'introduction de ce paramètre comme paramètre libre supplémentaire au même titre que les autres paramètres du modèle. Des tests ont malgré tout été effectués en optimisant automatiquement K et confirment ce résultat. La valeur de ce paramètre est, pour la majorité des bassins, située vers sa borne inférieure, indiquant que le modèle a tendance à neutraliser l'effet escompté.

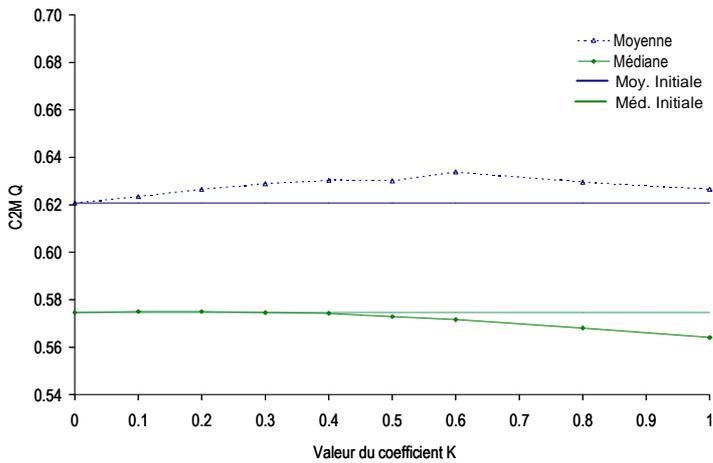
Ainsi, afin de considérer les résultats réels des effets de ces deux approches, les résultats d'ensemble étant issus d'un calage manuel, nous avons observé l'évolution de la moyenne et de la médiane des performances en fonction des valeurs croissantes de K pour les quatre critères évalués.

4.2.1.2 Analyse I : Existe-il une valeur de K comme paramètre fixe ? Essai dans l'approche A (modification de pluie nette en production) et hypothèse Inverse : Etude sur tous les critères

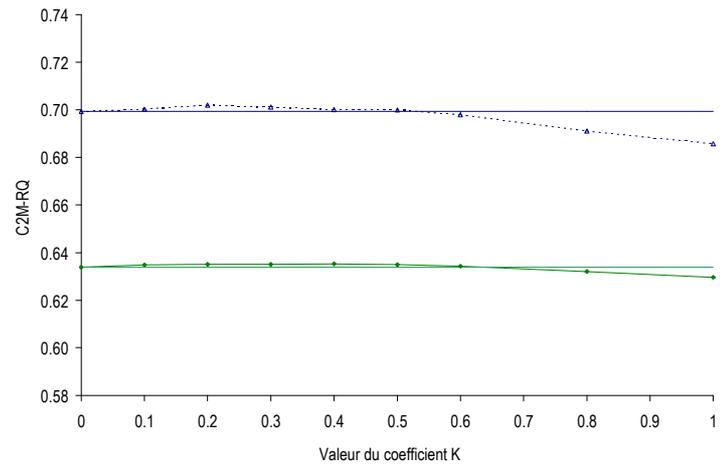
La Figure 4.2 montre l'évolution des moyennes et médianes des trois critères de performance type C2M en contrôle obtenus pour l'approche A (modification de la pluie de nette en entrée), sur l'échantillon de 182 bassins versants au pas de temps journalier avec l'hypothèse Inverse. Evidemment, l'évolution des valeurs de K de 0,1 vers 1 représente l'intensification des modifications induites par l'indice à l'intérieur du modèle.

L'évolution des moyennes et médianes des critères de performances des diverses solutions par rapport à la structure initiale n'est pas significative quelle que soit la valeur de K pour la plupart des critères testés. La médiane des performances sur le C2M-Q et C2M-LogQ arrive malgré cela à un optimum aux alentours de $K=0.4$ sans faire baisser la moyenne par rapport à la structure initiale. Avec cette valeur, aucune évolution n'est obtenue pour le critère C2M-RQ. Cette orientation des résultats n'étant pas évidente *a priori*, une tentative d'explication est réalisée dans la partie 4.3.

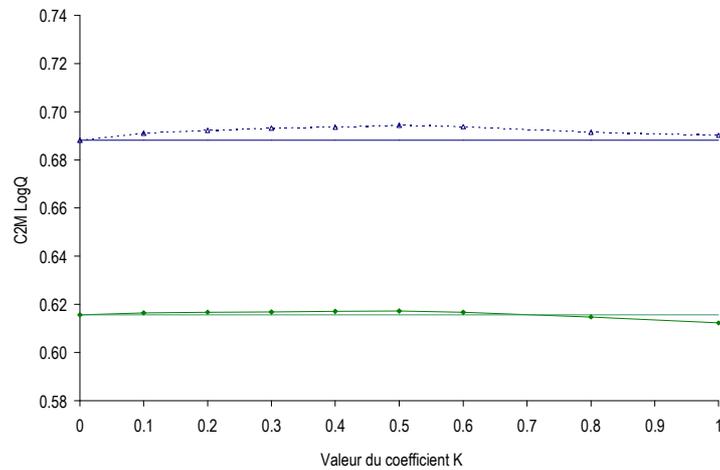
Néanmoins, les gains obtenus ne peuvent être considérés comme significatifs (de l'ordre de 0,005) si on se situe sur les valeurs de K où les autres critères ne sont pas dégradés par rapport à la structure initiale (aux alentours de 0,3).



a)



b)



c)

Figure 4.2 Evolutions des moyennes et des médianes des trois critères de performances obtenues en contrôle par le modèle initial et par le modèle modifié pour l'approche A [a) C2M-Q b) C2M-RQ et c) C2M log Q]. Performances évaluées en phase de contrôle pour l'approche A (modification pluie nette) et l'hypothèse Inverse pour l'échantillon journalier de 182 bassins versants. [K=0 représente le modèle initial, les traits continus la valeur de la médiane et de la moyenne du critère pour ce modèle]

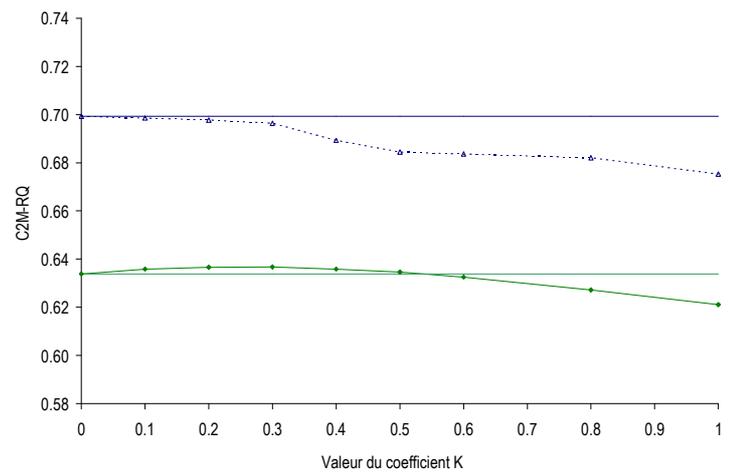
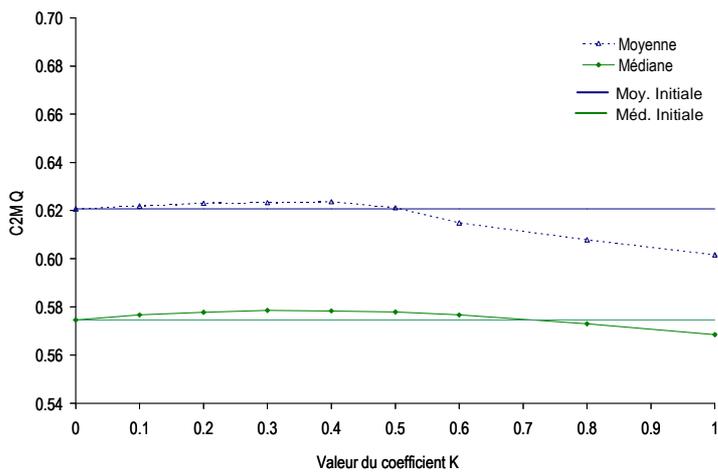
4.2.1.3 Analyse II: Existe-il une valeur de K comme paramètre fixe ? Essai dans l'approche B : modification de pluie efficace en production et hypothèse Inverse : Etude sur tous les critères

La Figure 4.3 montre, comme préalablement pour l'approche A, l'évolution des moyennes et médianes des trois critères de performance type C2M en contrôle du modèle modifié graduellement par l'approche B (une modification de la pluie efficace allant directement vers la fonction de transfert du modèle) et l'hypothèse Inverse.

Comme pour l'analyse précédente, nous pouvons voir que l'évolution des moyennes et médianes des différents critères par rapport à la structure initiale n'est pas significative, quelle que soit la valeur de K. La médiane et la moyenne des performances sur le C2M Q arrivent cependant à un optimum aux alentours de $K=0,3$ avec un gain de 0,005, tandis que pour les autres critères, les évolutions sont à peine visibles.

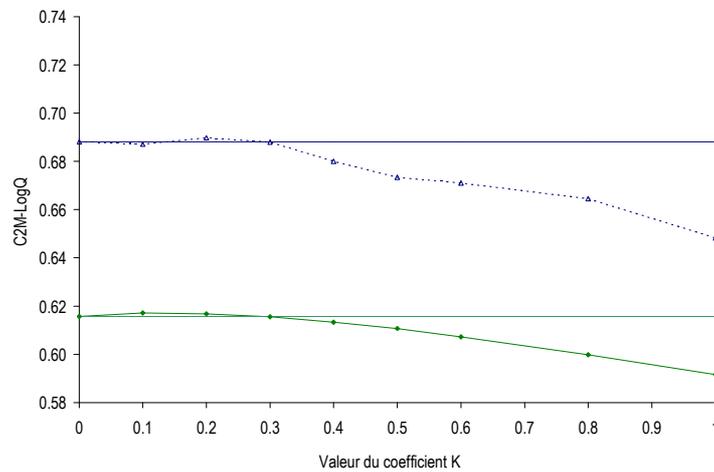
Une valeur unique de K pour tous les bassins ne permet pas de faire progresser les critères représentant tout l'échantillon pour les deux approches, malgré le fait que le modèle CALÉ ait montré des évolutions intéressantes sur ces critères par rapport au modèle initial GR4J.

Nous avons ensuite fait l'hypothèse supplémentaire que l'intensité des modifications à effectuer dépendait de la saison (par exemple conditions antérieures des sols sèches ou humides). Nous avons donc tenté d'améliorer ces deux solutions par l'introduction d'un coefficient de saisonnalité contrôlant avec K les modifications induites par les indices.



a)

b)



c)

Figure 4.3 Evolutions des moyennes et des médianes des trois critères de performances obtenues en contrôle par le modèle initial et par le modèle modifié pour l'approche B [a) C2M-Q b) C2M-RQ et c) C2M log Q]. Performances évaluées en phase de contrôle pour l'approche B (modification pluie efficace) et l'hypothèse Inverse pour l'échantillon journalier de 182 bassins versants. [K=0 représente le modèle initial, les traits continus la valeur de la médiane et de la moyenne du critère pour ce modèle]

4.2.1.4 Analyse III : Introduction d'un coefficient de saisonnalité

L'effet de la variabilité spatiale des précipitations pourrait aussi varier selon l'état d'humidité initiale du bassin. L'idée serait de faire varier le niveau des modifications induites par l'indice

en fonction de la saison ou d'un indicateur de saturation. Les taux de remplissage (compris entre 0 et 1) des deux réservoirs du modèle GR4J (le réservoir de production et le réservoir de routage) peuvent représenter des indicateurs de saisonnalité utiles pour faire varier l'effet de K. En effet, en période sèche, les taux de remplissage de ces réservoirs sont au plus bas donc plus proches de 0 et en période humide, ceux-ci sont plus élevés donc plus proches de 1, comme en témoigne l'exemple pris sur la simulation du bassin de la Drôme en Figure 4.4.

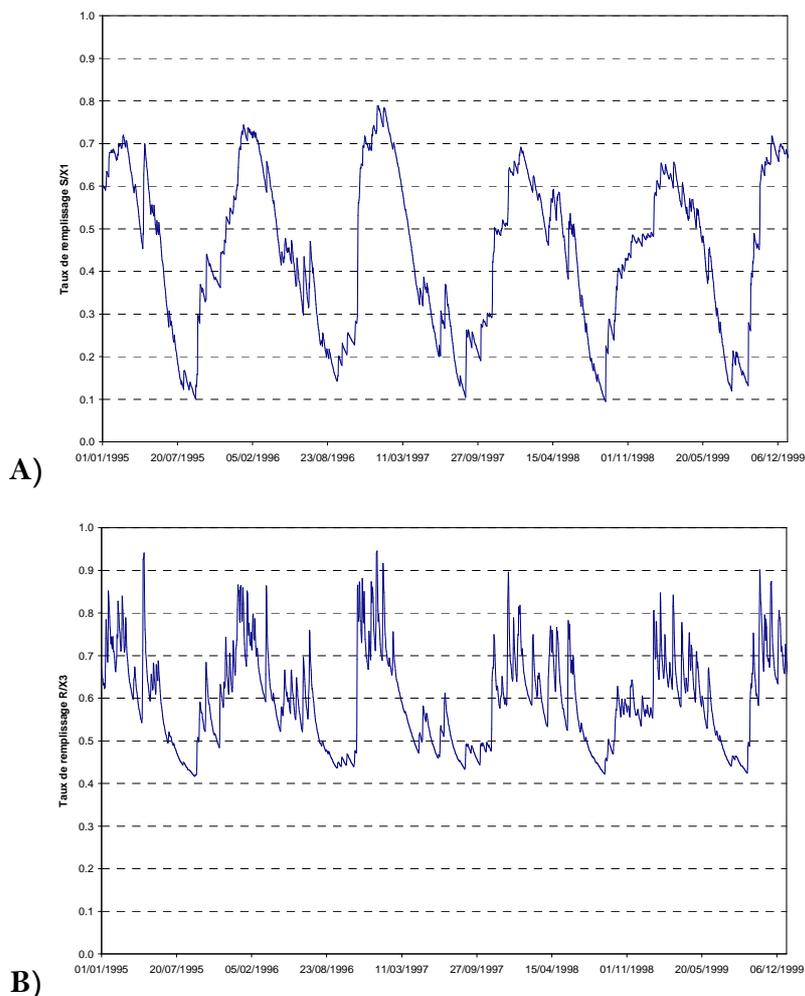


Figure 4.4 Evolution des taux de remplissage des réservoirs de production (A) et routage (B) pour le modèle GR4J pour la simulation des débits du bassin de la Drôme à Loriol-sur-Drôme

On va donc utiliser les taux de remplissage de ces réservoirs comme coefficient multiplicateur de K pour conserver les effets initiaux de notre indice en période humide (donc en hautes eaux) et les affaiblir en périodes sèche (donc en étiage). De même, afin de tester l'hypothèse contraire, on peut aussi produire l'effet inverse en multipliant le coefficient K par le complément à 1 de ces taux de remplissage.

Quatre solutions vont être testées à partir des deux meilleures solutions obtenues précédemment, c'est-à-dire pour les approches A et B toutes deux appliquées sur les hypothèses de Base et Inverse. Comme coefficient multiplicateur du coefficient K, nous allons utiliser :

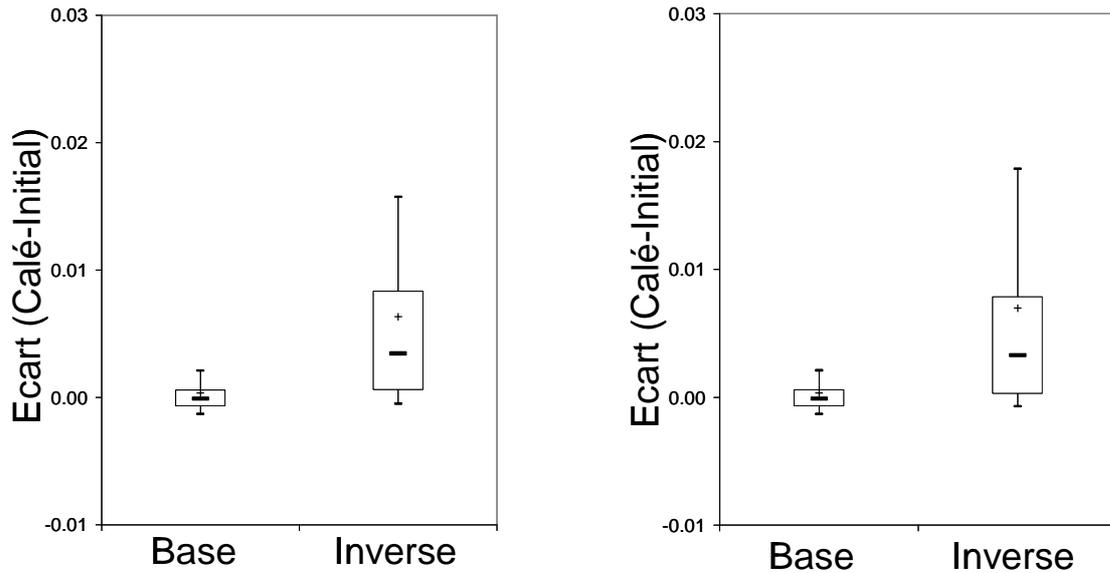
- **Solution I** : Le taux de remplissage du réservoir de production qui produit une intensification des modifications en période humide (hiver).
- **Solution II** : Le taux de remplissage du réservoir de routage (même rôle que I):
- **Solution III** : Le complément du taux du réservoir de production qui produit une intensification des modifications en période sèche (été).
- **Solution IV** : Le complément du taux du réservoir de transfert (même rôle que pour III).

Comme dans les essais précédents, nous allons tester différentes valeurs entre 0 et 1 avec un pas de 0,1 afin de caler à nouveau le coefficient K. Nous allons analyser les résultats par l'intermédiaire de cette approche CALÉ pour les quatre solutions décrites ci-dessus et pour les deux lieux d'introduction décrits (correspondants aux approches A et B).

La Figure 4.5 présente la synthèse de résultats en termes de distribution des écarts du critère de performances C2M-RQ entre la structure initiale et les quatre solutions dans leur version CALÉ pour l'approche A. On peut voir que la distribution des écarts de performances est sensiblement la même que pour la version sans saisonnalité quelle que soit la solution choisie (voir Figure 4.1-A).

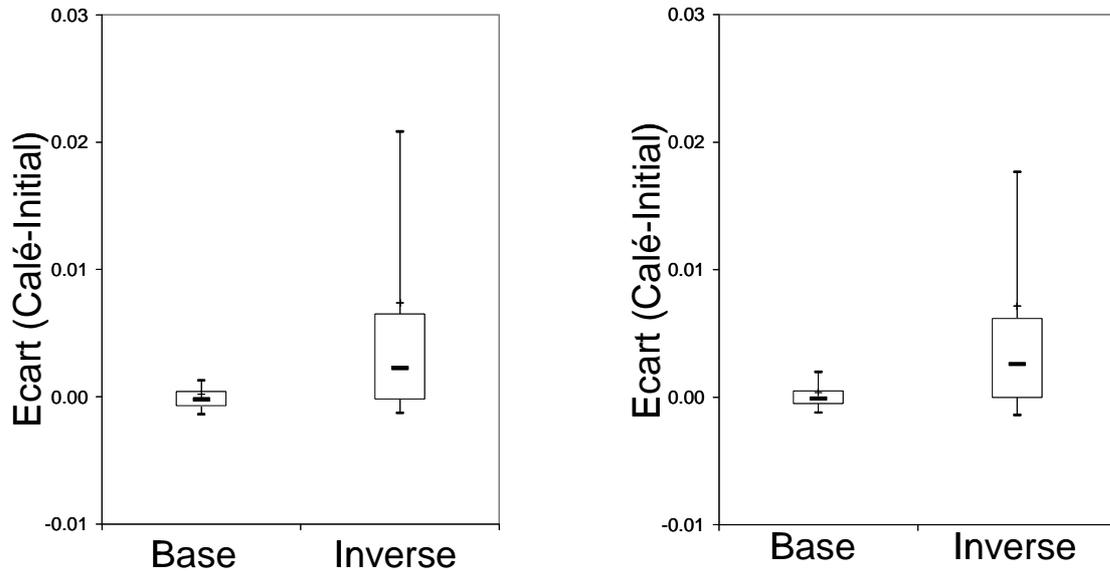
On peut de même remarquer qu'avec cette saisonnalité, le modèle devient plus sensible à l'hypothèse de Base pour les solutions I et II où l'effet est accentué durant les périodes humides sans toutefois pouvoir arriver à des écarts significativement positifs sur les performances.

On retrouve le même type de résultats pour les quatre solutions pour l'approche B (voir Figure 4.6). Les effets étant neutres, la correction induite par la saisonnalité doit se compenser entre les bassins, certains bassins étant bénéficiaires de cette nouvelle information, d'autres non.



Solution I (K fonction Res. Prod.)

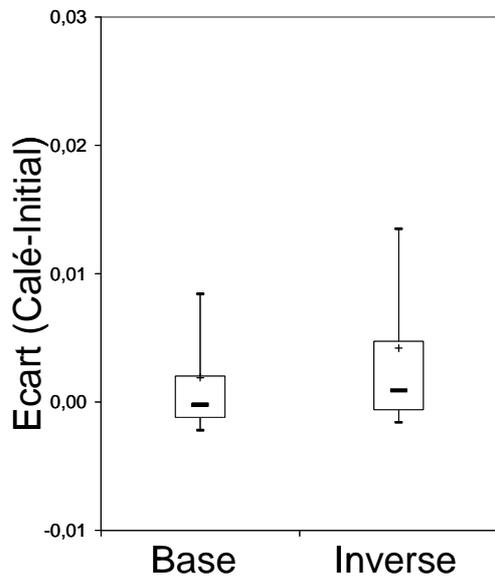
Solution II (K fonction Res. Routage)



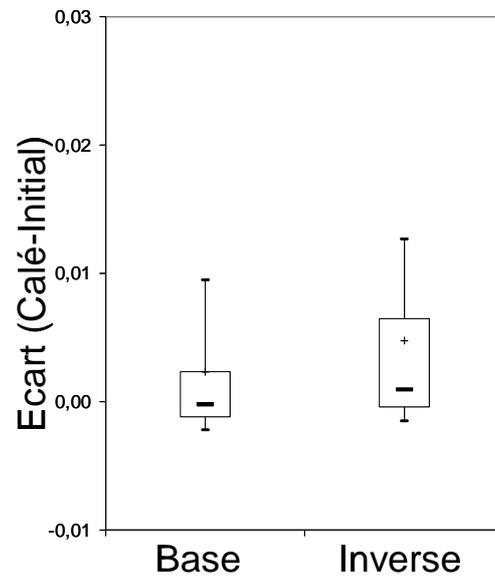
Solution III (K fonction Inv Res. Prod)

Solution IV (K fonction Inv Res. Rout)

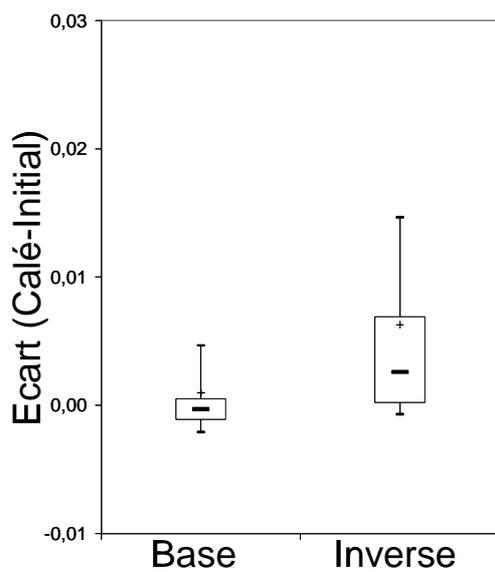
Figure 4.5 Box Plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des écarts de performance du critère C2M-RQ en contrôle sur les 182 bassins versants de l'échantillon entre le modèle CALÉ pour l'approche A avec saisonnalité et le modèle initial GR4J pour les deux hypothèses (de Base et Inverse) par type de d'introduction supplémentaire de saisonnalité : I) Via le taux de remplissage du réservoir de production II) Via le taux de remplissage du réservoir de routage; III) Via le complément du taux du réservoir de production IV) Via le complément du taux du réservoir de transfert.



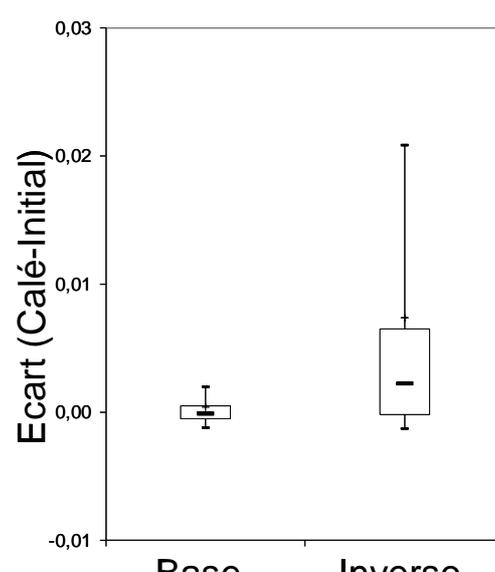
Solution I (K fonction Res. Prod.)



Solution II (K fonction Res. Routage)



Solution III (K fonction Inv Res. Prod)



Solution IV (K fonction Inv Res. Rout)

Figure 4.6 Box Plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des écarts de performance du critère C2M-RQ en contrôle sur les 182 bassins versant de l'échantillon entre le modèle CALÉ pour l'approche B avec saisonnalité et le modèle initial GR4J pour les deux hypothèse (de Base et Inverse) par type de d'introduction supplémentaire de saisonnalité : I) Via le taux de remplissage du réservoir de production II) Via le taux de remplissage du réservoir de routage: III) Via le complément du taux du réservoir de production IV) Via le complément du taux du réservoir de transfert.

Au regard de ces premiers résultats, nous n'irons pas plus loin dans l'analyse de la prise en compte de cette saisonnalité qui n'apporte rien de mieux en termes de performances du modèle par rapport à la solution se passant de cette information supplémentaire. La Figure 4.7 qui compare les critères moyens de performances par bassin sur les versions CALÉ sans saisonnalité ou avec la saisonnalité sur les solutions I et III nous confirme cette conclusion. En effet, on peut voir que les critères de performances moyens par bassin versant varient très peu entre une approche avec saisonnalité et une approche sans, quelle que soit la solution testée.

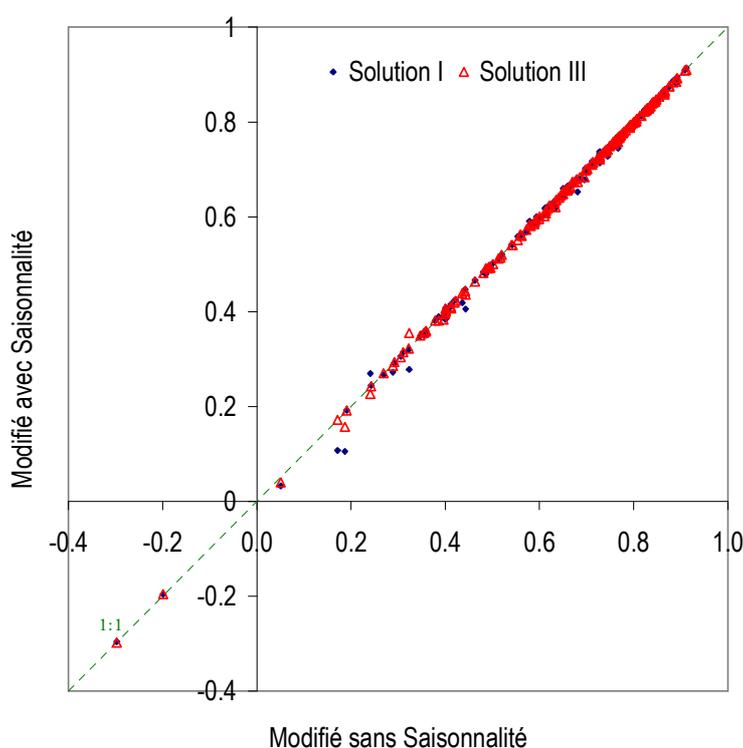


Figure 4.7 Critère de performance moyen C2M-RQ par bassin versant entre l'approche CALÉ sans saisonnalité et celle avec saisonnalité pour les solutions I et III (Approche B et hypothèse Inverse)

4.2.1.5 Analyse IV : Etude des valeurs de K optimales³ par bassin versant et recouplement avec les caractéristiques de bassins

Nous allons désormais nous concentrer sur une des deux meilleures approches d'introduction des indices (sans introduction de la saisonnalité) en réalisant l'analyse des valeurs de K prises par la version CALÉ. Cette solution est constituée de l'approche B et de l'hypothèse de sens de modification Inverse.

Nous avons recherché quelles étaient les valeurs optimales de K obtenues pour chaque bassin versant de l'échantillon. Puis, nous avons analysé les possibles liens entre ces valeurs optimales et certains attributs des bassins versants de l'échantillon aisément identifiables (superficie, indice médian d'hétérogénéité des pluies).

La Figure 4.8 donne la distribution des valeurs de K optimales pour chaque bassin de l'échantillon en excluant $K=0$ qui représente le modèle dans sa version initiale sans modifications.

La valeur de K la plus fréquente en queue de distribution est 0,1 (elle représente les quantiles 0,1 et 0,25 qui sont confondus). Cette valeur indique que les bassins versants ne rejettent aucune modification dans leur fonction de production. Pour tous ces cas, on s'aperçoit que c'est la formulation initiale du modèle (c'est-à-dire $K=0$) qui donne les meilleurs résultats. En tête de distribution, la valeur la plus fréquente (elle représente les quantiles 0,9 et 0,75 qui sont confondus) est 1, c'est-à-dire la valeur maximale qui implique des modifications maximales au sein du modèle. Cette distribution se basant essentiellement sur ces deux valeurs signifie que pour plus de la moitié des bassins de l'échantillon (99 éléments sur 182), soit ceux-ci rejettent l'approche en minimisant les modifications provoquées, soit ceux-ci l'approuvent en maximisant l'effet de l'indice.

³ On appelle ici valeur optimale de K celle qui conduit au meilleur critère de performance parmi les 10 valeurs de K testées pour l'introduction de l'indice.

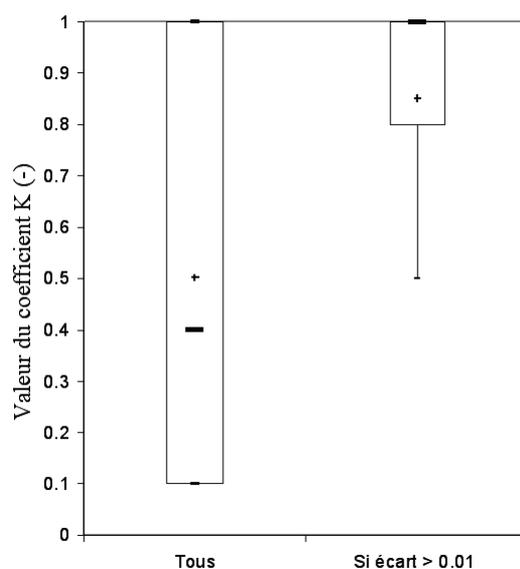


Figure 4.8 Distribution [(-) Médiane et (+) Moyenne] des valeurs optimales du coefficient multiplicateur K (sans tenir compte de $K=0$) obtenues sur l'échantillon de 182 bassins versants (Tous) et sur les 64 bassins où l'utilisation de cette valeur (pour l'approche B et l'hypothèse Inverse) a induit un écart de performance supérieur à 0,01 par rapport à la structure initiale avec une évaluation sur le critère C2M-Q

Si on observe uniquement le groupe des bassins pour lesquels on a obtenu une amélioration significative du critère de performance (soit 64 bassins parmi 182), les valeurs de K plébiscitées sont essentiellement les plus élevées (soit 1,0) (Figure 4.8), seuls six bassins prenant une valeur de K inférieure à 0,8 (quantile 0,9 et 0,75 confondus à la valeur 1,0).

La Figure 4.9 montre la relation entre la valeur optimale de K et la superficie des bassins versants de l'échantillon, ainsi que les valeurs optimales qui ont eu un impact bénéfique du point de vue des performances par rapport à la structure initiale.

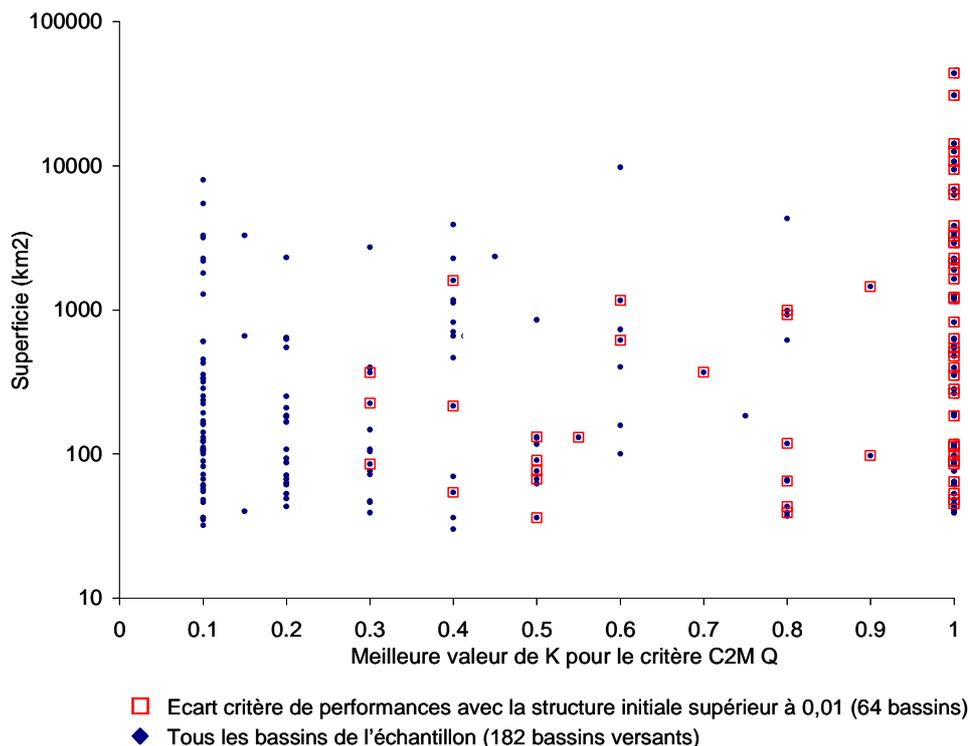


Figure 4.9 Valeurs optimales de K (sans tenir compte de $K=0$ représentant le modèle initial) pour chaque bassin en fonction de sa superficie [Les points intermédiaires entre deux valeurs testées par exemple 0,25 entre 0,3 et 0,4 indiquent que le meilleur critère moyen de performances a été obtenu sur ces deux valeurs]

Cette représentation confirme que les bassins versants qui utilisent des faibles valeurs de K le font pour neutraliser l'effet de l'indice et non pour surpasser la modèle initial. Nous pouvons observer qu'il est délicat d'établir une relation entre cette valeur de K et la superficie des bassins versants.

Si on conserve uniquement les bassins versants où les écarts de performance avec le modèle initial ont été significatifs, on peut voir que toutes les superficies présentes dans l'échantillon peuvent bénéficier d'améliorations du critère C2M-RQ (Figure 4.9 figurés carrés). Cependant, les bassins dont la superficie est supérieure à environ 2000 km² (soit 30 bassins) plébiscitent uniquement des valeurs de K élevées. Les bassins dont la superficie est supérieure à 10000 km² (soit 5 bassins) sont tous significativement améliorés avec une valeur de K de 1. Cependant le nombre de bassins concernés étant très faible, il est impossible d'établir un lien solide de cause à effet (des détails supplémentaires à propos des résultats obtenus sur ces bassins sont disponibles en **Annexe 6**. De la même manière, il est délicat de

relier l'indice d'hétérogénéité médian des pluies du bassin à la valeur optimale de K sur ces bassins (Figure 4.10).

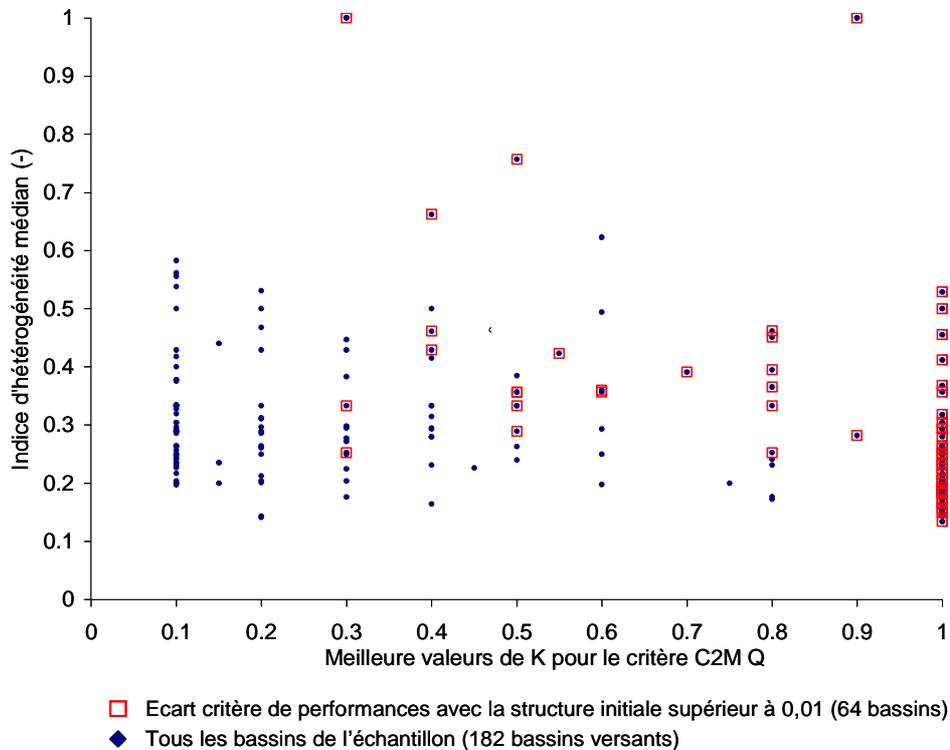


Figure 4.10 Valeurs optimales de K pour chaque bassin en fonction de son indice médian d'hétérogénéité (on distingue les bassins versants ayant significativement amélioré leurs performances avec l'approche modifiée)

Cependant, nous pouvons voir que quatre bassins ayant des pluies définies par l'indice comme très hétérogènes relativement à l'échantillon ont tous été améliorés significativement par l'approche modifiée mais avec des valeurs de K différentes. Au niveau des bassins où les différences ont été significatives (Figure 4.10, figurés carrés), aucune valeur médiane d'indice n'est privilégiée.

4.2.1.6 Analyse V. Etude similaire au pas de temps horaire

Afin d'observer si les résultats décrits précédemment sont liés au choix du pas temps journalier employé, qui pourrait lisser fortement le phénomène de variabilité spatiale des précipitations (Lebel, 1984), des tests identiques ont été réalisés à partir du modèle GR4H sur l'échantillon de 99 bassins versants dont les données sont disponibles au pas de temps

horaire. Le temps de calcul de l'optimisation du modèle horaire étant significativement plus long, le calage manuel de K a été réalisé sur trois valeurs 0,3, 0,6 et 1,0.

Afin d'alléger la rédaction et d'éviter les répétitions, l'analyse des ces résultats est présentée en **Annexe 7**. Les résultats obtenus vont dans le même sens que ceux acquis sur un pas de temps plus large : même hypothèse et même lieu d'introduction significatifs et impossibilité de trouver des caractéristiques communes entre les bassins améliorés. Cependant une nouvelle fois, on constate généralement plus d'améliorations des critères avec les plus grands bassins de l'échantillon (mais le nombre de bassins concernés restant toujours trop peu nombreux pour généraliser). Pour information, les critères initiaux et les caractéristiques des quelques bassins versants ayant vu leurs simulations améliorées sont détaillés en fin d'**Annexe 7**.

Finalement, le fait de passer à un pas de temps horaire où l'hétérogénéité des pluies a été décrite comme plus intense qu'au pas de temps journalier (voir **Annexe 4**) n'a rien changé aux conclusions¹⁷. La seule différence est que le modèle est légèrement plus sensible à l'hypothèse de Base. Un essai d'interprétation est réalisé en Partie 4.3.

Ainsi, l'intensité de la variabilité spatiale des précipitations décrite par l'indice n'influence donc pas les résultats de modélisation; alors que les approches élaborées sont avant tout destinées à l'intention des bassins versants et des pas de temps où la variabilité spatiale des pluies est forte.

4.2.2 Indice de position d'hétérogénéité des précipitations

4.2.2.1 Analyse de sensibilité préalable sur GR4H

Le calcul de cet indice a été uniquement fait sur l'échantillon de 99 bassins versants dont les données sont disponibles au pas de temps horaire¹⁸. Dans un but comparatif, nous avons conservé la méthode utilisant l'indice moyen du bassin comme valeur pivot. Le calage manuel du coefficient K a été réalisé sur trois valeurs 0,3, 0,6 et 1,0.

¹⁷ Les tests effectués sur les mêmes bassins en utilisant les cumuls journaliers calculés à partir des cumuls horaires ont conduit aux mêmes conclusions

¹⁸ Au regard des résultats qui vont suivre, cette analyse nous a paru suffisante et ainsi évite le caractère répétitif de certains commentaires.

On rappelle que cet indice permet d'avoir une information sur la répartition amont/aval des précipitations au sein du bassin. Comme pour le précédent indice qui représentait la variance des précipitations, nous avons recherché les lieux d'introduction pour lesquels le modèle était le plus sensible en analysant les écarts de performance entre le modèle initial et les cinq lieux d'introduction dans leur version CALÉ (avec trois valeurs de K 0.3, 0.6 et 1.0) et les deux hypothèses de travail décrites dans le chapitre 3. La Figure 4.11 présente les résultats des versions CALÉ de l'approche A et B qui sont à nouveau les seules où le modèle a été sensible aux modifications induites, et pour les deux hypothèses de Base et Inverse.

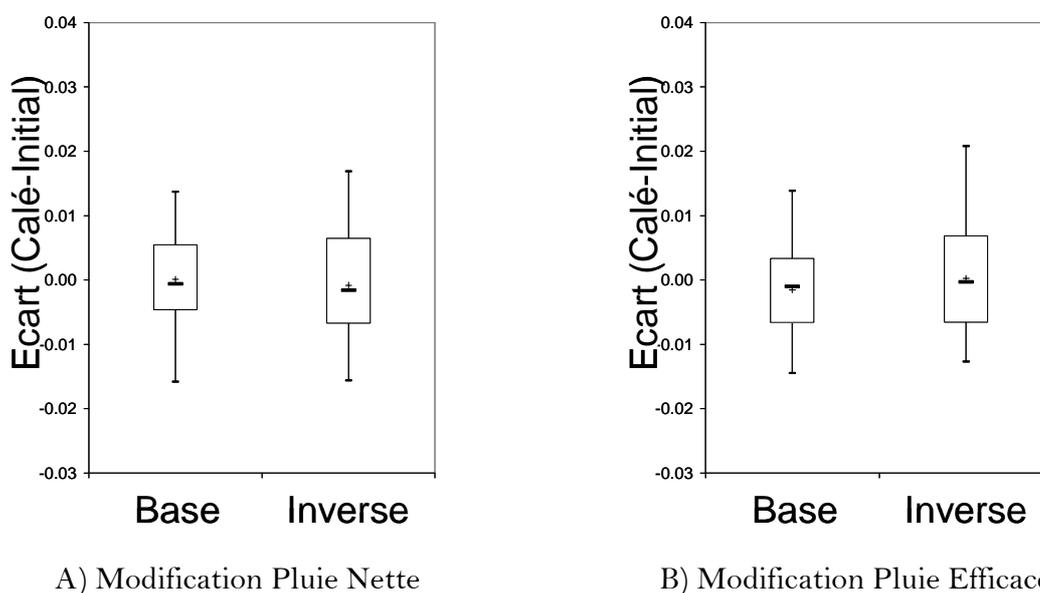


Figure 4.11 BoxPlot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution des différences de performance du critère C2M-RQ en contrôle entre le modèle modifié CALÉ (pour trois valeurs de K) et le modèle initial GR4H sur les 99 bassins versants de l'échantillon pour les deux hypothèses (de Base et Inverse) et les cinq lieux d'introduction : A) Modification pluie nette B) Modification pluie efficace

Contrairement à l'indice Statistique, la différence de sensibilité du modèle entre les deux hypothèses est beaucoup moins marquée, quoiqu'un léger avantage soit donné à l'hypothèse Inverse. Mais il est nécessaire de rappeler que les hypothèses de Base et Inverse n'ont pas exactement la même signification pour les deux indices (voir Chapitre 3).

Par ailleurs, nous pouvons remarquer sur cette même figure que les plus gros écarts positifs sur les critères de performance C2M-RQ sont une nouvelle fois sur l'approche B et l'hypothèse Inverse (Figure 4.11 B). Mais, les écarts maximaux positifs sont beaucoup plus

faibles que pour l'indice Statistique (+0.021 pour le quantile 0.9 dans ce cas contre +0.044 pour l'indice Statistique, [pour rappel, ce quantile représente les 10 meilleurs écarts sur les 99 bassins évalués]). Ceci signifie que les possibilités d'amélioration sont encore plus restreintes que pour l'indice statistique où l'interprétation des résultats n'était déjà pas évidente au regard du peu de bassins pour lesquels le critère s'est amélioré lors du test des valeurs de K .

Si on se réfère à cette solution en observant les choix des valeurs optimales de K en fonction de la superficie du bassin concerné (Figure 4.12), nous retrouvons une situation très similaire à celle obtenue avec l'indice statistique (pour ce pas de temps où le nombre de valeurs de K testées est similaire). En effet, de nombreux bassins se contentent de la valeur la plus faible 0,3 (63 cas sur 99 éléments). Cependant, contrairement à l'autre indice, la part la plus élevée d'amélioration est obtenue avec la valeur $K=1$ (11 bassins versants dans ce cas contre entre 5 pour $K=0.3$ et 1 pour $K=0.6$). Malgré cela, aucun déterminisme ne peut être établi entre les améliorations du critère et la superficie des bassins (Figure 4.12, carrés), ni avec leur indice moyen d'hétérogénéité (Figure 4.13, carrés). Les bassins où la valeur de l'indice médian est supérieure à un seuil d'environ 0,8, ne présentent cependant jamais d'amélioration de performance (15 bassins versants environ). Cette valeur élevée d'indice moyen indique que les précipitations tombent plutôt à l'amont. En conséquence, le modèle global peut s'adapter, par l'intermédiaire de l'optimisation de ses paramètres, à des précipitations situées systématiquement plus à l'amont du bassin.

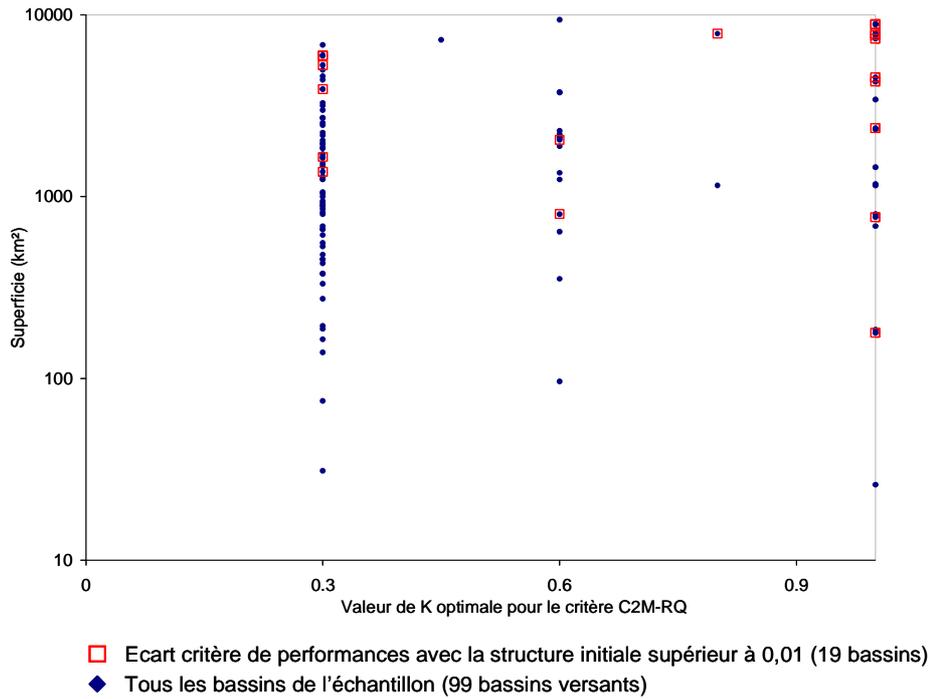


Figure 4.12 Valeurs de K optimales (exceptée de K=0 représentant le modèle Initial) pour chaque bassin versant en fonction de leur superficie

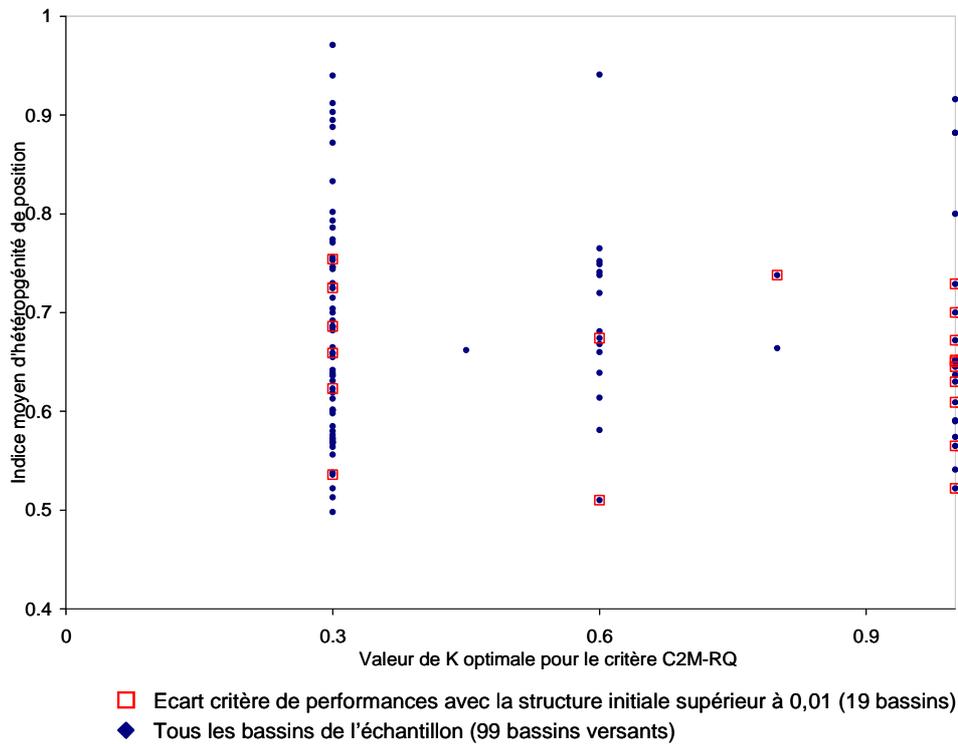


Figure 4.13 Valeurs de K optimales pour chaque bassin versant en fonction de leur indice moyen d'hétérogénéité de positionnement

4.3. Synthèse de l'introduction de l'hypothèse Pic et essai d'interprétation

Pour synthétiser, on peut dire que cette méthode des indices a globalement conduit à des améliorations extrêmement limitées.

4.3.1 Indice d'hétérogénéité Statistique et lame d'eau moyenne correspondante

Pour l'indice décrivant l'hétérogénéité statistique des pluies, l'hypothèse de Base qui stipule que si la pluie est plus hétérogène que l'hétérogénéité moyenne des pluies du bassin, on décale une partie des stocks d'eau au sein du modèle vers des écoulements plus directs, a été perçue soit comme neutre, soit comme inadéquate pour une grande majorité des bassins. Néanmoins, les performances du modèle ont été améliorées sur un petit nombre de bassins en utilisant l'hypothèse Inverse plus spécifiquement sur l'approche B. Cette hypothèse signifie, pour cette approche, que si la pluie est plus hétérogène que l'hétérogénéité médiane des pluies, il faut diminuer le rendement de la fonction de production du modèle, ce qui a pour conséquence une diminution de la pluie efficace allant vers le routage.

Cette conclusion peut paraître, au regard des hypothèses faites dans la littérature, très surprenante. Cependant, ce sont les pluies moyennes les plus fortes en termes de cumul qui conduisent en valeur absolue aux modifications les plus significatives des valeurs de la pluie efficace pour cette approche (car la modification se fait en proportion de la valeur de la pluie elle-même et du différentiel entre l'indice et l'indice médian).

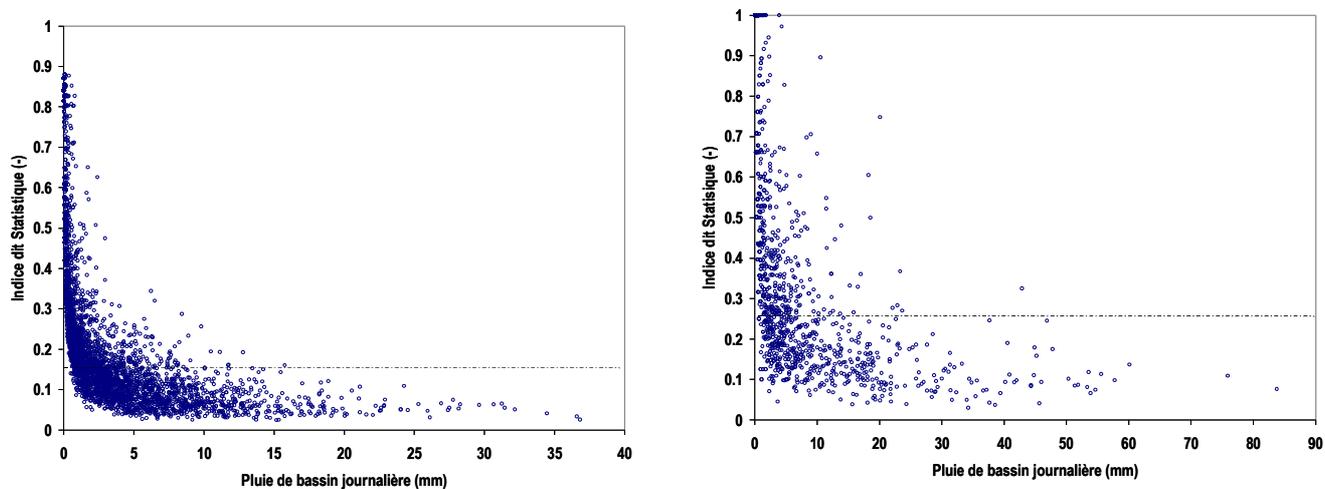
Or, ces forts cumuls ne sont pas forcément ceux qui sont décrits comme les plus hétérogènes spatialement. En effet, si la valeur de la pluie moyenne est élevée, c'est qu'à peu près tous les postes ont reçu de l'eau. Ces pluies sont généralement considérées comme homogènes relativement à des plus faibles cumuls moyens, pouvant pourtant posséder des fortes intensités locales. Cette remarque est illustrée en Figure 4.14 où l'on peut observer l'évolution de l'indice d'hétérogénéité journalier en fonction des cumuls journaliers moyens de précipitations sur deux bassins considérés comme assez contrastés dans la base de données au pas de temps journalier :

- la Marne à Noisiel [H5841010] classée parmi les bassins où la pluie est considérée comme très homogène,
- la Drôme à Loriol [V4626010] classée parmi les plus hétérogènes.

On observe sur cette figure que les valeurs élevées pour l'indice (c'est-à-dire proches de 1) sont quasi systématiquement liées à des cumuls moyens journaliers très faibles pour ces deux exemples.

Cette relation entre hauteurs des cumuls et valeurs de l'indice est cependant beaucoup plus nette sur les précipitations de la Marne. La conséquence du phénomène précédemment décrit est bien visible au sein du modèle si on observe les effets induits sur la pluie efficace par l'introduction de l'indice par l'approche B et l'hypothèse Inverse (Figure 4.15 a). En effet, nous pouvons observer sur cette figure que l'hypothèse Inverse a le plus d'influence sur les fortes pluies censées être plus actives sur les variations significatives des débits. L'hypothèse de Base provoquant uniquement des modifications positives sur les valeurs les plus faibles de pluie efficace apparaît donc comme quasi neutre pour le modèle (Figure 4.15 b).

A ce sujet, l'**Annexe 8** décrit l'hétérogénéité des cumuls journaliers antérieurs (J, J-1 et J-2) des pointes de crues supérieures à un seuil sur les bassins de la Drôme. On peut y voir que les plus fortes crues ne sont que très rarement issues d'événements où de séries d'événements décrits comme spatialement hétérogènes par l'indice statistique.



a) La Marne à Noisiel (12500 km²-41 postes)

b) La Drôme à Loriol (1690 km²-9 postes)

Figure 4.14 Indice d'hétérogénéité statistique du jour j en fonction de la hauteur des précipitations journalières moyennes du jour j pour les bassins versants de (a) de la Marne à Noisiel sur la période 1975-1900 [3632 observations de pluie de valeur médiane 2 mm] (b) de la Drôme à Loriol sur la période 1995-2002 [2922 observations de pluie de valeur médiane 3 mm] [le trait horizontal indique la valeur médiane de l'indice sur toute la chronique]

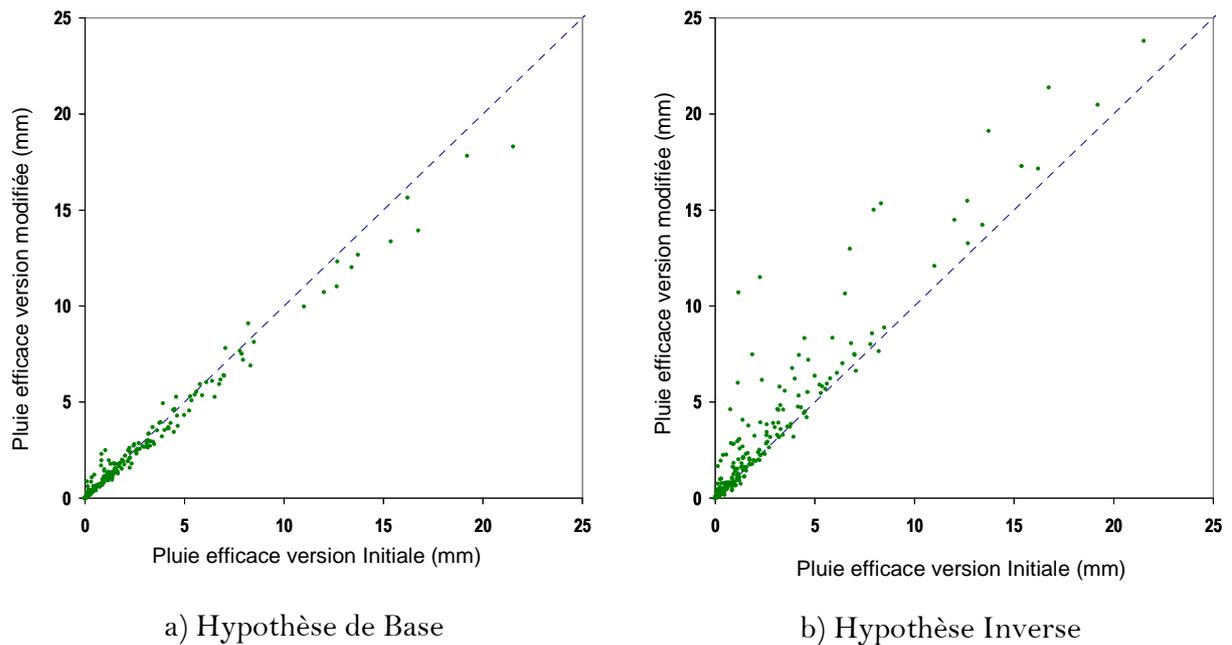
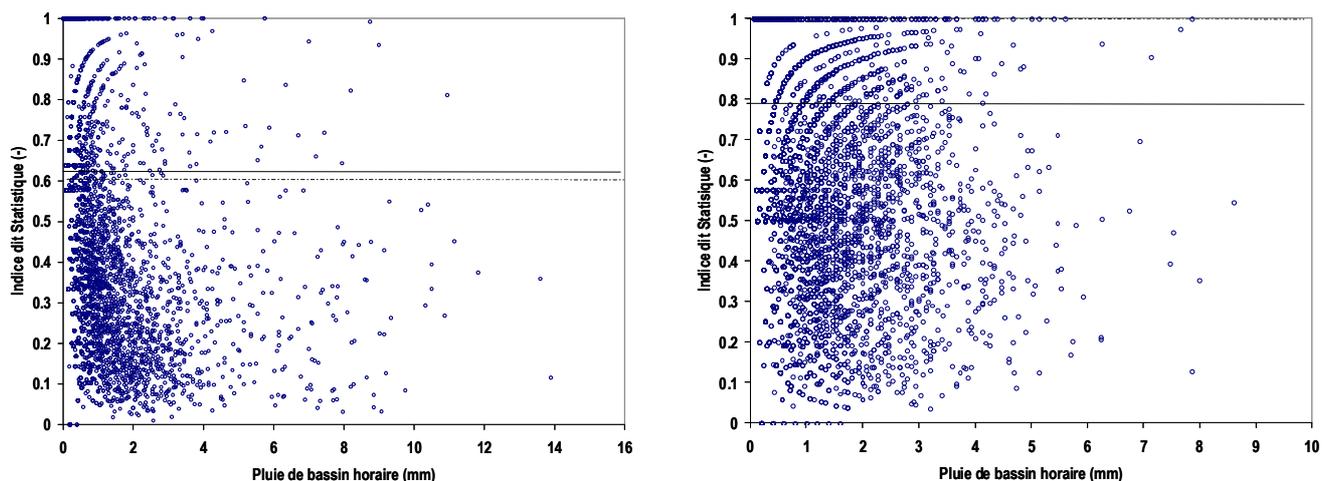


Figure 4.15 Valeurs de la pluie efficace de jour j de la version modifiée, en fonction de la pluie efficace de la version initiale pour des simulations en contrôle sur la période 1996-2002 du bassin versant de la Drôme à Loriol sur Drôme selon l'hypothèse de Base (a) ou Inverse (b) pour l'approche B

En observant maintenant les précipitations au pas de temps horaire, nous pouvons constater une représentation un peu différente entre les valeurs d'indices et les cumuls moyens de précipitations horaires sur deux exemples de bassins versants (Figure 4.16). Le bassin du Furan [K0614010] (Figure 4.16 a) est un bassin où la pluie est considérée en moyenne comme la plus homogène par l'indice. Inversement pour le bassin de l'Ill à Ensisheim [A1310310] (Figure 4.16 b), on remarque que les plus forts cumuls horaires peuvent être décrits comme des événements spatialement hétérogènes ou non sur les deux exemples.

Cette situation pourrait expliquer la plus forte sensibilité du modèle à l'hypothèse de Base pour ce pas de temps. Cependant, la moyenne et la médiane de l'indice sur la chronique étant très élevées, ces forts cumuls horaires même hétérogènes sont souvent considérés comme homogènes pour les hypothèses établies pour le modèle, d'où le plus grand succès pour l'hypothèse Inverse.



a) Le Furan (178 km²-4 postes)

b) L'III (1090 km²-3 postes)

Figure 4.16 Indice d'hétérogénéité statistique de l'heure h en fonction de la hauteur des précipitations horaires moyennes de l'heure h pour les bassins versant de (a) Le Furan à Andrézieux-Bouthéon sur la période 1995-2002 [7880 événements¹⁹ de pluies de valeur médiane 0,25 mm] (b) L'III à Ensisheim sur la période 1995-2002 [16104 événements de pluies de valeur médiane 0,33 mm] [le trait gris indique la valeur moyenne de l'indice sur toute la chronique et le pointillé la médiane]

4.3.2 Indice de Localisation et lames d'eau moyennes correspondantes

En comparaison, si on regarde le même type de représentation pour les bassins de l'III mais avec l'indice de positionnement au pas de temps horaire (Figure 4.17), on remarque que la valeur de l'indice est bien moins dépendante de la hauteur des cumuls. Mais, contrairement à l'autre indice et plus spécialement pour le pas de temps journalier, on peut voir qu'une part non négligeable des précipitations possède des indices dont les valeurs sont proches de la moyenne. Par conséquent, comme l'indice agit comme différentiel autour de cette valeur, le modèle a été logiquement beaucoup moins sensible à ce genre d'approche.

¹⁹ Un événement est, ici, décrit par l'observation de la hauteur de pluie au pas de temps considéré

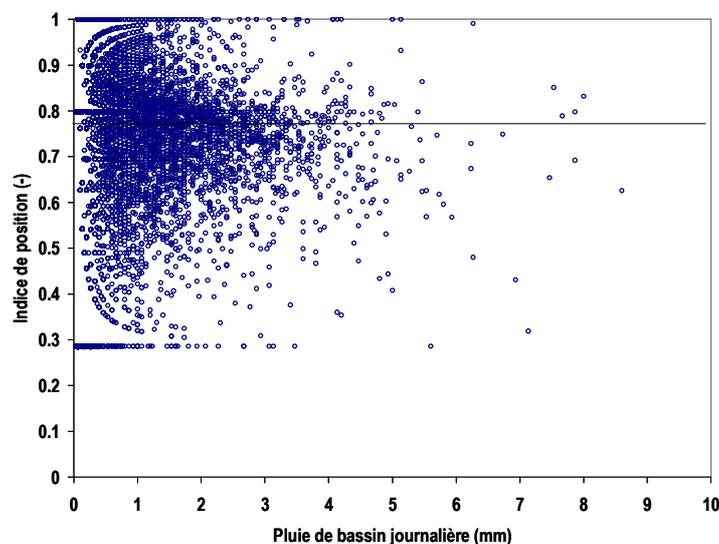


Figure 4.17 Indice d'hétérogénéité de position de l'heure h en fonction de la hauteur des précipitations horaires moyenne de l'heure h pour les bassins versant pour L'III à Ensisheim sur la période 1995-2002 [le trait horizontal indique la valeur moyenne de l'indice sur toute la chronique confondue pour ce cas avec la médiane] La borne inférieure des valeurs d'indices, 0.286, décrit le cas où toute la pluie est tombée sur le poste le plus proche de l'exutoire.

4.3.3 Comportement de modèles globaux et débit de crue

En complément de toutes de ces remarques, il est souvent admis que les modèles globaux possèdent une légère tendance à la sous-estimation des plus forts débits (Leander *et al.*, 2005; Moulin, 2007); Julien Lerat communication personnelle²⁰). De plus, l'utilisation d'un critère d'erreur quadratique au calage, qui n'incite pas le modèle à se risquer sur l'adéquation aux forts débits, pourrait être aussi à l'origine de ce constat (Rémy Garçon, communication personnelle).

Or, ces plus forts débits sont générés par les plus forts cumuls de précipitations. Mais, ces plus forts cumuls sont généralement considérés comme des précipitations homogènes et non

²⁰ Cette sous-estimation a été observé lors du test du modèle GR4J lors de la phase de 2 du projet DMIP Voir; <http://www.weather.gov/oh/hrl/dmip/2/> pour des détails sur ce projet basé sur la comparaison de modèles sur un échantillon commun de bassins versants américains. Toutefois, trop peu de bassins (7) sont concernés pour en tirer des conclusions générales.

hétérogènes. Ainsi, le fonctionnement de l'hypothèse de Base qui préconise une diminution des écoulements directs sur les pluies les plus significatives, va limiter les débits en période de crue. Cette modification peut donc être néfaste au modèle pour l'amélioration de la simulation de ces pics.

4.4. Analyse de l'Hypothèse Volume

Une seconde hypothèse avait été formulée dans le chapitre 3 sur le fait qu'une pluie hétérogène spatialement pouvait générer plus d'écoulement qu'une pluie homogène de même lame d'eau.

Nous avons testé cette hypothèse par l'intermédiaire d'une approche complétant les hauteurs de précipitations en entrée du modèle GR4J, en fonction de l'hétérogénéité des pluies indiquée par l'indice au pas de temps journalier. Un produit de l'indice Statistique et du coefficient K (même rôle que les solutions précédentes) va donc être utilisé comme coefficient correcteur dynamique des pluies d'entrée. Néanmoins, en fonction des propriétés des pluies de chaque bassin en termes d'indice et de cumulés annuels, cette approche modifie plus ou moins la quantité d'eau brute entrant dans le modèle. Ainsi pour chaque bassin, chaque solution testée doit nécessairement être comparée à un modèle possédant un coefficient correcteur fixe des pluies (c'est-à-dire ne dépendant pas de leur hétérogénéité spatiale) pour toute la chronique corrigeant la quantité d'eau totale en la rendant équivalente à celle de l'approche utilisant un coefficient correcteur dynamique. La mise en œuvre de la méthode se fait en comptabilisant dans l'approche modifiée dynamique pour chaque bassin versant la quantité totale d'eau introduite dans le modèle. On compare cette quantité avec les quantités brutes initiales puis on les convertit en coefficient correcteur fixe.

Pour l'échantillon de 182 bassins versants, la quantité d'eau introduite dans le modèle va aussi varier en fonction de chaque valeur de K testée, ainsi les résultats de modélisation de l'échantillon seront comparés deux à deux pour chaque test (10 valeurs de K) : la solution dont le coefficient dépend de l'indice d'hétérogénéité statistique pour $k \neq 0$ et la solution initiale avec coefficient correcteur fixe correspondant.

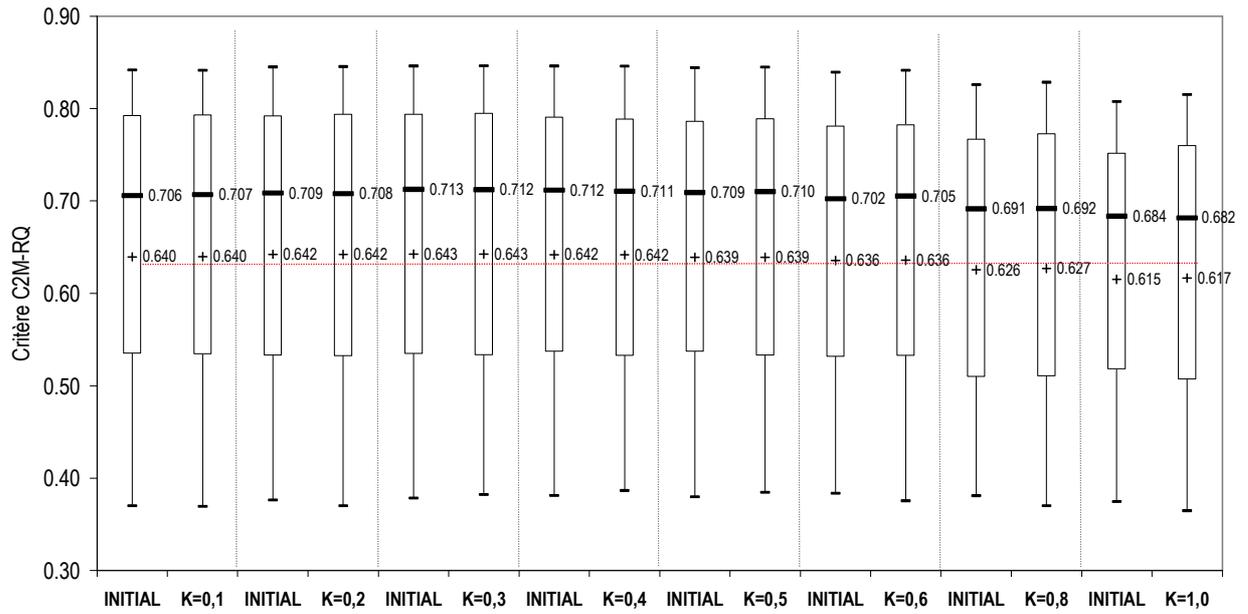
Deux hypothèses ont été testées, une augmentant en termes de quantité d'eau quand la pluie considérée comme hétérogène (hypothèse de Base), l'autre quand la pluie est considérée comme homogène (hypothèse Inverse).

La Figure 4.18 présente les résultats en termes de performances moyennes sur l'échantillon par couple de valeurs K entre le modèle Initial avec correction statique et l'approche modifiée avec correction dynamique.

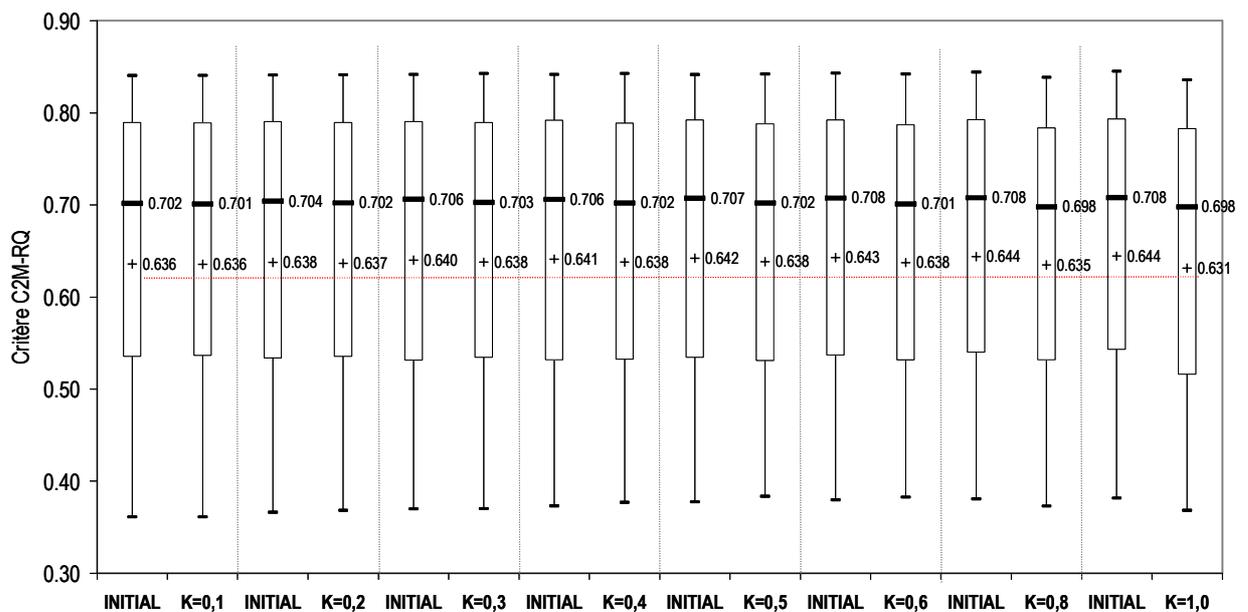
Les résultats indiquent que pour toutes les valeurs de K testées et pour les deux hypothèses, c'est systématiquement le modèle avec coefficient fixe qui obtient des valeurs équivalentes ou légèrement supérieures sur le critère de performances C2M-RQ évalué en phase de contrôle. Ainsi, l'hypothèse qu'une pluie très hétérogène génèrerait systématiquement plus d'écoulement qu'une pluie homogène de même lame d'eau est donc rejetée par le modèle utilisé sur cet échantillon.

De plus, l'hypothèse alternative (dite Inverse) qui stipulait que la pluie moyenne de bassin pouvait être sous-estimée en cas d'hétérogénéité des pluies est aussi globalement rejetée.

Cependant, un résultat intéressant apparaît du point de vue du critère de performance global obtenu par le modèle Initial à coefficient correcteur fixe des pluies. D'après la Figure 4.19, ce critère atteint en effet son léger maximum pour $K=0,3$ ou $0,4$ sous hypothèse de Base et dans une moindre mesure pour $K=1$ sous hypothèse Inverse (pour ces trois cas la moyenne du critère de performance passe de $0,634$ à $0,643$). Ces améliorations sont ainsi meilleures que celles apportées par la meilleure solution d'introduction d'indice pour l'hypothèse I ($0,637$ pour l'approche B et l'hypothèse de Base et $K=0,3$) au pas de temps journalier.



A) Modification avec Hypothèse de Base



B) Modification avec Hypothèse Inverse

Figure 4.18 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères de performances moyens C2M-RQ en contrôle des 182 bassins de l'échantillon au pas de temps journalier pour le modèle initial GR4J avec coefficient fixe (Initial) et l'approche modifiée avec coefficient dépendant à chaque pas de temps de l'indice d'hétérogénéité statistique pour les dix valeurs de K (A) pour l'hypothèse de Base et B) pour l'hypothèse Inverse. [La ligne pointillée représente la valeur médiane de ce critère pour le modèle initial sans correction et le tiret plein la moyenne]

La Figure 4.19 présente la distribution sur l'échantillon des coefficients correcteurs fixes équivalents en fonction de l'hypothèse testée et de la valeur de K. Si on se base sur les deux meilleures approches en termes de performance du modèle ($K=0,3$ pour hypothèse de base et $K=1,0$ pour l'hypothèse Inverse), le coefficient correcteur des pluies optimales pour le modèle est situé aux alentours de 1,3.

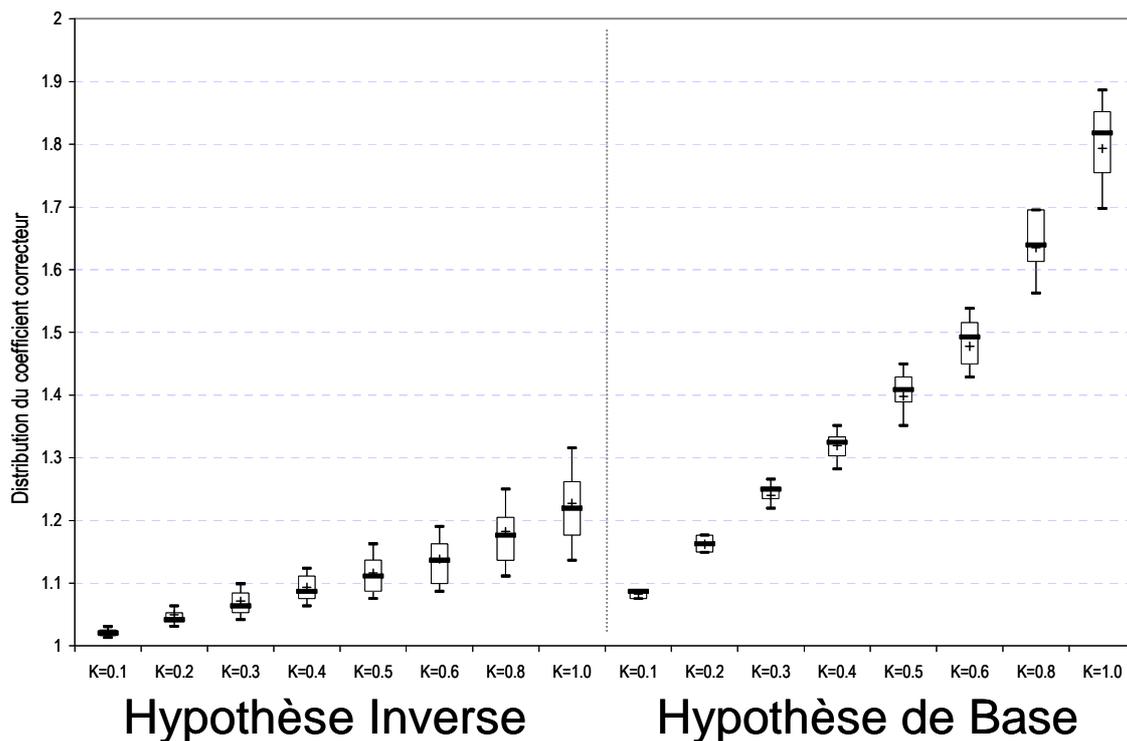


Figure 4.19 Box plot de la distribution du coefficient correcteur fixe des pluies appliqué au modèle en fonction de l'hypothèse testée et du coefficient K

Si nous comparons maintenant les écarts de performance bassin par bassin entre le modèle initial sans correction des pluies et le modèle avec l'approche B pour $K=1,0$ et l'hypothèse Inverse, et ce même modèle avec coefficient correcteur des pluies fixe de 1,3, nous pouvons remarquer que les bassins dont le critère est significativement amélioré par l'approche utilisant l'indice d'hétérogénéité des pluies sont, sauf trois exceptions, aussi systématiquement améliorés par l'introduction d'un coefficient correcteur fixe des pluies. Ainsi ce n'est pas l'information apportée par l'indice que le modèle utilise mais le biais induit par une correction de la quantité d'eau introduite dans le modèle.

La Figure 4.20 présente les écart de performances entre une version avec coefficient correcteur de pluies fixé à 1,3 et la version Initial sans correction de pluie en fonction de

l'écart obtenu entre une approche modifiée par l'indice d'hétérogénéité statistique où le modèle a été le plus sensible (Approche B, $K=1$ et hypothèse Inverse) et la même version Initiale.

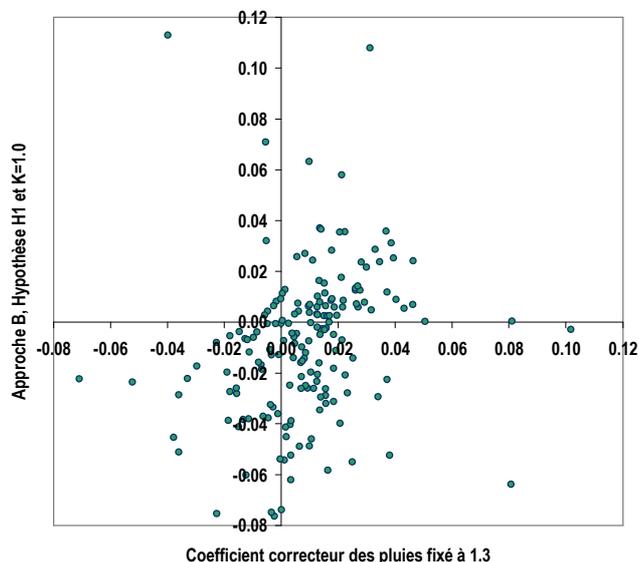


Figure 4.20 Ecart calculé sur le critère de performance **C2M-RQ** par bassin entre le modèle initial et le modèle avec coefficient correcteur de pluies fixé à 1.3 (en abscisse) et le modèle avec l'approche B, l'hypothèse Inverse et $K=1.0$ (en ordonnée)

Ainsi la tentative de neutralisation du biais amené par l'indice en termes de modification de la quantité d'eau totale introduite dans le modèle a échoué et on retrouve le même ordre de grandeur de résultats qu'un coefficient correcteur simple des pluies.

4.5. Synthèse

Nous avons présenté dans ce chapitre une comparaison de performances entre la structure initiale d'un modèle global et plusieurs versions de cette même structure modifiée pour prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations. Pour cela nous avons introduit des indices de variabilité construits à partir des données pluviométriques du réseau sol et testé dans le modèle sur deux pas de temps, l'un journalier, l'autre horaire.

Aucun consensus général ne se dégageant de l'abondante littérature portant sur l'influence de la variabilité spatiale des précipitations sur la transformation pluie-débit, nous avons testé

plusieurs hypothèses concernant l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur la répartition des écoulements à l'exutoire (au niveau des pics de crue et des volumes écoulés).

Malgré tous les efforts consentis pour mettre au point une formulation adéquate de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations, aucune des modifications engagées n'a apporté d'évolution notable des critères de performances sur un large échantillon de bassins versants, quel que soit le pas de temps ou le modèle considéré.

Ces résultats nous suggèrent plusieurs remarques à propos des effets de la variabilité spatiale des pluies et de leur intérêt dans des modèles hydrologiques :

- i. si la méthode testée est une méthode adéquate de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations, alors les hypothèses communément admises sur les effets de ce phénomène semblent contredites par les résultats des tests effectués. En effet, seule l'hypothèse où l'on suggère au modèle de diminuer les écoulements directs en cas d'hétérogénéité des pluies supérieure à une médiane semble satisfaire quelque fois le modèle, alors que l'hypothèse inverse (appelée hypothèse de base) reste sans effet ou est rejetée. Cependant, les pluies décrites comme hétérogènes par l'indice statistique ne sont généralement pas les plus significatives
- ii. Les effets de la variabilité spatiale des précipitations se feraient plutôt ressentir au niveau des fonctions régissant le rendement du modèle et non lors du transfert ou du temps de réponse du bassin.
- iii. Le rôle de la variabilité spatiale des pluies semble secondaire au regard des autres variables dynamiques utilisées en entrée du modèle comme la lame d'eau moyenne qui doit, elle, être considérée comme une information de premier ordre. Le biais du cumul des précipitations apparaît incontestablement comme beaucoup plus influent sur l'évolution des performances du modèle. Ces résultats vont dans les sens de ceux de la thèse de Wendling (1988) qui, lors d'une tentative de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations au sein du modèle global TOPMODEL sur le bassin versant du Réal Collobrier (70 km²), en était arrivé aux mêmes conclusions.
- iv. Le pas de temps de modélisation et des données de précipitations n'a absolument pas influencé le sens des résultats [alors que la variabilité spatiale des précipitations semble plus intense au pas de temps horaire à densité égale du réseau de postes pluviométriques au sein d'un bassin].

- v. Pour finir, on peut ajouter que la prise en compte du positionnement "amont/aval" des plus fortes précipitations par l'intermédiaire de l'indice de positionnement n'est pas apparue non plus comme informative au regard des performances fournies par les structures modifiées à l'aide de cet indice de position de l'hétérogénéité.

Enfin, l'insuccès de cette méthode qui impose au modèle de conserver son caractère entièrement global va nous amener à rechercher des méthodes plus élaborées de modélisation afin de confirmer ou d'infirmer ces résultats. Des essais de distribution des précipitations impliquant de sortir du cadre strictement global du modèle vont donc être testés dans la suite de ces travaux.

Chapitre 5

Une approche Multi-Modèle pour la prise en compte explicite de la variabilité spatiale des précipitations : Présentation

5.1. Le problème

Les méthodes globales de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations sur GR4X ont été élaborées aux pas de temps horaire et journalier. Les résultats ont indiqué que ce type de modèle à réservoirs était de manière générale peu sensible à l'introduction de cette variabilité de manière interne et synthétique. Cette faible sensibilité peut avoir trois origines :

- i. L'une est liée à la nature du bassin versant qui agit comme un filtre passe-bas²¹ par rapport aux précipitations qu'il reçoit, atténuant ainsi l'impact de leur variabilité temporelle et spatiale. Ceci signifierait que, en dehors de quelques cas particuliers, la variabilité spatiale des précipitations n'a que peu d'influence sur la répartition temporelle des débits à l'exutoire des bassins versants, quels que soient les surfaces étudiées, le type de régime pluviométrique et le pas de temps considéré²². Si c'est effectivement le cas, le modèle peut très bien se contenter de lames d'eau moyennes pour simuler les débits sans nécessairement avoir besoin de cette information secondaire qu'est la variance de la lame d'eau moyenne.

²¹Un modèle hydrologique de transformation de la pluie et débit (tout comme le bassin versant) se comporte en effet comme un filtre fréquentiel passe bas. Il convertit les entrées de pluie en modifiant leur distribution spatio-temporelle (de hautes fréquences) et leur volume au moyen de ses fonctions de transfert et de production en débit à l'exutoire (de basses fréquences).

²² En se limitant évidemment aux catégories de superficie, échelles de temps et caractéristiques étudiées dans cette thèse.

- ii. Les indices élaborés et les méthodes d'introductions testées précédemment pourraient ne pas être pertinents pour mettre en évidence l'effet de la variabilité des pluies en continu. Cependant, étant donné le nombre de solutions déjà testées, nous ne creuserons pas davantage cette voie.
- iii. L'approche globale de modélisation hydrologique pourrait ne pas être adaptée à la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations (ce qui rejoindrait une idée communément admise), et la variabilité spatiale des précipitations ne pourrait être décrite efficacement de manière synthétique. Afin d'appréhender les différences d'ordre spatial qui peuvent exister sur cette donnée, il devient nécessaire qu'elle soit détaillée à l'échelle où cette l'information est disponible qui correspond ici aux différents postes pluviométriques ayant servi à calculer la pluie moyenne de bassin.

Nous allons, dans cette seconde partie de thèse, évaluer cette troisième hypothèse en distribuant les données de précipitations.

Dans les chapitres 3 et 4, nous avons recherché à donner au modèle une information complémentaire à la pluie moyenne de bassin et à l'introduire directement dans le modèle en formulant des hypothèses sur l'effet de la variabilité des pluies. Ici, nous allons conserver l'information brute issue de chaque poste pluviométrique pour éviter une perte d'information liée à l'utilisation de la moyenne pour le calcul de la pluie de bassin. Cette lame d'eau moyenne ferait perdre au modèle, outre la variance des pluies, beaucoup d'autres informations utiles comme les hauteurs maximales obtenues ponctuellement aux endroits de mesure de la pluie. Nous allons évaluer si cette perte d'information peut provoquer, du moins en partie, les erreurs de modélisation, notamment les sous-estimations des débits de pointe. La connaissance de la distribution des pluies sur les différents postes pluviométriques pourrait être une solution efficace de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations.

Afin de tester si l'hypothèse d'une distribution des postes pluviométriques pourrait être une alternative profitable aux performances du modèle²³, des essais comparatifs entre la méthode globale alimentée par la lame d'eau moyenne et des méthodes alternatives semi-globales de distribution des postes pluviométriques sont envisagées dans ce chapitre.

²³ Le test de cette hypothèse supplémentaire devrait servir à argumenter le bien-fondé ou non de l'hypothèse ii.

Il s'agira d'optimiser la connaissance de la hauteur de pluie individuelle de chaque pluviomètre en utilisant à chaque fois cette information comme unique entrée d'un modèle global. Les n pluviomètres alimenteront n modèles pluie-débit fonctionnant en parallèle, puis on combinera les sorties des différents modèles pour calculer le débit simulé. Ce type de méthodes a été initialement élaboré dans la thèse de Mathevet (2005).

Ces stratégies s'inspirent des méthodes Multi-Modèles classiquement utilisées en hydrologie qui utilisent des combinaisons de sortie de plusieurs modèles.

5.2. Un Multi-Modèle pour prendre en compte la distribution des précipitations

5.2.1 Description synthétique de la méthode du Multi-Modèle en modélisation hydrologique

La combinaison de variables de sortie de différents modèles est utilisée dans beaucoup de disciplines scientifiques, notamment en économie et en sciences sociales (Clemen (1989), d'après Marshal (2006)). Il s'agit généralement d'utiliser des structures distinctes de modèles simultanément avec des entrées similaires et de combiner les variables de sortie pour former la simulation finale.

Cette méthode est largement utilisée en hydrologie, plus spécifiquement pour prendre en compte les incertitudes sur les paramètres et les structures de modèle (Georgakakos *et al.*, 2004). Elle est aussi tout simplement utilisée pour faire progresser les simulations de modèles (Ajami *et al.*, 2006). Aussi, les Multi-Modèles sont très souvent mis en œuvre dans le cadre de la prévision des débits en temps réels (Roche et Torterotot, 1988; Loumagne, 1995; Shamseldin, 1999; See, 2000; Abrahart, 2002). Cette méthode est, par exemple, mise en œuvre par le Service de Prévision des Crues de la Garonne avec la plate forme de modélisation opérationnelle Sophie (DIREN Midi-Pyrénées, 2004).

L'utilisation de ce genre d'approche basée sur la complémentarité possible des modèles pluie-débit (mise en évidence par Perrin (2000)) part du principe qu'une structure singulière et/ou qu'un jeu de paramètres unique est incapable de reproduire le comportement d'un bassin

versant dans toutes les circonstances; mais qu'en chaque situation, un des modèles pourra apporter plus d'information qu'un autre pour la reconstitution des débits. L'existence d'un nombre pléthorique de structures de modèles pluie-débit (boîtes noires, type réseau de neurones, à réservoirs, linéaires, autorégressifs, à base physique) et le fait qu'il existe quasiment un modèle par hydrologue est probablement le signe qu'un simple modèle ne peut rendre correctement compte de tous les cas rencontrés sur les bassins versants et ainsi donne à cette méthode de combinaison de structures des modèles toute sa justification (Shamseldin et O'Connor, 1996).

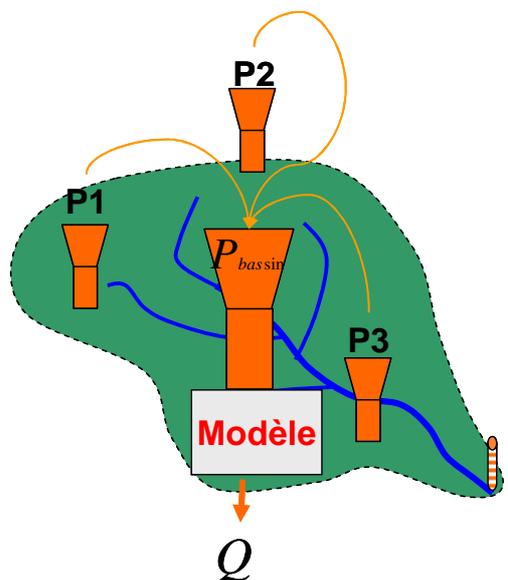
Les approches Multi-Modèle citées ci-dessus, tant en simulation qu'en prévision, arrivent généralement à produire des améliorations de performances par rapport aux modèles utilisés individuellement, même avec des stratégies simples de combinaison des sorties des modèles. L'utilisation de procédures de type Multi-Modèle telles qu'elles sont décrites dans la littérature, va essentiellement nous servir de base pour élaborer notre propre procédure Multi-Modèle. Toutes les techniques décrites utilisent des structures de modèles distinctes (pour la complémentarité) mais des entrées hydroclimatiques identiques. Notre méthode, qui doit nous permettre de distribuer les entrées de précipitations, va être basée sur **la multiplication de la même structure de modèle alimentée par des entrées de précipitations différentes**.

Cette multiplication nous permettra de générer des débits différents pour alimenter le Multi-Modèle, les différences étant causées par les entrées pluviométriques et non par différentes structures de modèles. Aussi, l'idée de faire tourner un modèle de structure similaire pour chaque entrée pluviométrique distincte permet de profiter de la diversité des états internes de ces sous-modèles²⁴ qui vont représenter les différents états d'humidité possibles des parties du bassin versant.

La méthode envisagée est illustrée en Figure 5.1 pour un bassin versant à trois postes pluviométriques.

²⁴ Les modèles utilisés en parallèle dans le protocole du Multi-Modèle seront dénommés **sous-modèles** par la suite.

Approche globale: 1 pluie de bassin 1 modèle



Approche alternative du multi-modèle: 3 pluviomètres, 3 sous-modèles

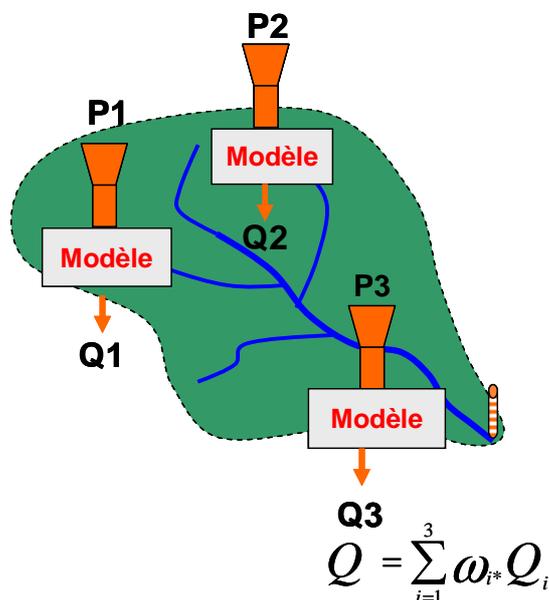


Figure 5.1 Représentation schématique de notre approche Multi-Modèle avec : P_i : pluviomètre, Q_i : débit de chaque sous-modèle, ω_i =poids des débits à déterminer, Q : débit simulé par le modèle (à gauche) ou le Multi-Modèle (à droite).

5.2.2 Mise en œuvre du Multi-Modèle pour prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations : Une même structure de sous-modèle par entrée de précipitation

Chaque entrée de précipitation pour chaque sous-modèle pourra être constituée soit d'un poste pluviométrique, soit d'un regroupement de divers postes pluviométriques préalablement définis. Les entrées climatiques d'ETP couplées à ces précipitations restent, quant à elles, considérées comme globales donc communes à tous les sous-modèles. Ceci est justifié par la faible sensibilité des modèles à la variabilité spatiale de l'ETP, qui est elle-même limitée par rapport à celle des précipitations (Oudin *et al.*, 2004).

La stratégie de modélisation est la suivante :

Supposons n entrées distinctes de pluie (n représente donc soit le nombre de pluviomètres, soit le nombre de groupes de pluviomètres), ce qui équivaut à n sous-modèles, donc n sorties de chaque sous-modèle (les n débits simulés) qui sont alors recomposées selon des

pondérations à définir afin d'obtenir le débit simulé final. **Ce débit est considéré comme la sortie unique de l'ensemble de la modélisation (appelé ici modèle), il sera comparé au débit observé pour le calcul de la fonction objectif en calage et des critères de performance en contrôle.**

L'élaboration de cette méthode, que nous appellerons semi-globale²⁵, pose certaines difficultés :

- Il faut trouver le nombre optimal d'entrées pluviométriques distinctes. Afin d'éviter une information qui pourrait être certaines fois redondante entre les postes et les sous-modèles, il serait intéressant de tester des regroupements de postes pluviométriques. Ces regroupements permettraient de limiter le nombre de sous-modèles et par la même occasion la complexité de l'ensemble de modélisation pluie-débit.
- Ensuite, il est nécessaire d'étudier le nombre de paramètres à optimiser au sein du modèle. Les structures fonctionnant en parallèle étant identiques, est-il possible de conserver des paramètres communs, ou bien chaque vecteur doit-il être calé séparément pour permettre au modèle de s'adapter à chaque entrée pluviométrique ? De plus, la prise en compte de la variabilité des pluies, quoique jugée prépondérante au sein de tout le lot possible de variabilités au sein du bassin versant (voir **Annexe 2**), pourrait aller de pair avec une prise en compte des hétérogénéités comportementales du bassin. Ainsi, une distribution des paramètres censés représenter le comportement du bassin serait nécessaire.
- Enfin, il s'agit de déterminer la règle de composition optimale des débits de sortie. Par quelle combinaison cette information de plusieurs débits issus de simulations provenant de données pluviométriques ponctuelles peut-elle devenir complémentaire et plus proche de la réalité qu'une simulation provenant d'une lame d'eau moyenne ?

²⁵ Cette méthode de distribution d'une même structure de modèle est ici appelée **semi-globale** et non **semi-distribuée**. Elle ne fait en effet pas référence à des débits intermédiaires qui sont transférés aux sous-bassins aval par l'intermédiaire d'une fonction de transfert mais uniquement à une distribution des entrées du modèle. Mais, sachant que la stratégie elle-même est basée sur une distribution des entrées, on se permettra d'utiliser l'expression de méthodes de "type semi-distribués" dans cette thèse.

Une représentation détaillant schématiquement l'approche semi-globale et résumant la différence entre les deux approches de modélisation qui vont être comparées est présentée en Figure 5.2.

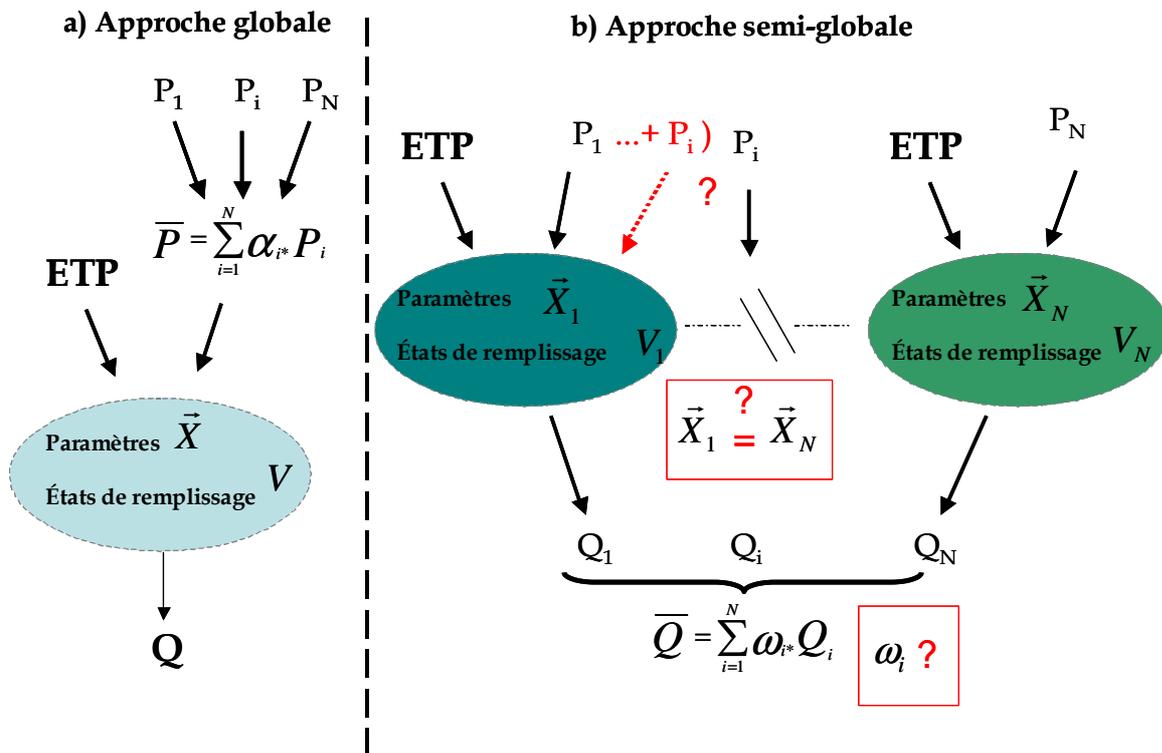


Figure 5.2 Représentation de l'approche globale classique avec une lame d'eau moyenne en entrée (a) et de l'approche semi-globale visant à prendre en compte la variabilité spatiale de précipitations (b). En rouge, les interrogations suscitées pour l'élaboration de cette approche alternative

5.2.3 Stratégies proposées pour la construction du Multi-Modèle

Le schéma initial et la genèse d'inspiration de ces stratégies repose en partie sur la méthode proposée par Mathevet (2005). Il s'agissait de premiers essais encourageants d'utilisation de ce type de méthodes au pas de temps horaire sur un large échantillon de bassins versants pour "valoriser toute l'information pluviométrique disponible".

Plusieurs approches complémentaires seront testées ici afin de dégager le schéma de semi-distribution le plus favorable à une prise en compte de la variabilité spatiale des

précipitations²⁶. Ces approches seront toutes testées empiriquement par essai-erreur en observant les performances obtenues sur un large échantillon de bassins, puis, en comparant ces performances à celles obtenues par le modèle dans sa version à entrée unique.

5.2.3.1 Nécessité de distribution des paramètres ?

Pour ce qui est des paramètres du Multi-Modèle, la question est de savoir si chaque sous-modèle alimenté par sa propre entrée de précipitations a besoin de son propre vecteur de paramètres calé avec cette entrée. Si c'est le cas, outre l'adaptation du vecteur à l'entrée de précipitation, cela permettrait aussi de prendre en compte les attributs de bassins associés à l'espace décrit par le pluviomètre (par exemple l'éloignement de ce poste pluviométrique à l'exutoire du bassin).

Inversement, l'avantage d'utiliser une structure commune de modélisation pour tous les sous-modèles est qu'il devient possible de grouper tous les paramètres en un unique vecteur et ainsi de ne pas complexifier le modèle en termes de degrés de liberté. Le Multi-Modèle sera donc élaboré sur deux types de distribution des entrées pluviométriques de complexité croissante que nous allons ensuite comparer :

- La méthode la plus simple en termes de nombre de paramètres optimisés totaux du Multi-Modèle est de distribuer uniquement les entrées de pluies et non les paramètres. Un seul vecteur est donc optimisé pour caler les n sous-modèles globaux²⁷. Lors de l'optimisation de ce type de semi-distribution, on cale plusieurs sous-modèles en parallèle avec leurs propres entrées de pluie en forçant l'égalité des n vecteurs de paramètres²⁸. On aura donc un vecteur unique pour tous les sous-modèles. Cependant, les sous-modèles fonctionnant indépendamment, l'état de remplissage de leurs réservoirs demeurera dépendant de leurs entrées respectives. En sortie, on recompose les n débits simulés afin de constituer un débit simulé unique qui sera comparé à l'observé. On a ainsi un modèle final composé de n modèles tournant en parallèle mais qui sont contrôlés par un unique vecteur de paramètres.

²⁶ Si bien sûr ce meilleur schéma par rapport à la modélisation globale existe !

²⁷ n représente le nombre d'entrées pluviométriques donc le nombre de sous-modèles

²⁸ Techniquement, on fait tourner les sous-modèles avec le même vecteur de paramètres et la fonction objectif est calculée sur les débits agglomérés composés par les n sorties.

- Une seconde méthode plus complexe consiste à caler un vecteur de paramètres par modèle. Les n vecteurs sont tous optimisés sur le débit total observé puis les n débits simulés sont recomposés par des pondérations adaptées ultérieurement afin de constituer un débit simulé unique qui sera utilisé pour le calcul de la fonction objectif. On a donc une structure de modèle finale à $n \times p$ paramètres (où p est le nombre de paramètres libres du modèle global). Cette nouvelle structure devient ainsi beaucoup plus complexe d'autant plus que le nombre d'entrées pluviométriques augmente. Cependant en phase de calage, la complexité numérique n'augmente pas car les sous-modèles sont calés indépendamment des autres.

5.2.3.2 Quelles stratégies de pondération des débits ?

Une différence fondamentale du Multi-Modèle par rapport à la méthode globale est, outre le fait qu'elle utilise plusieurs modèles en parallèle plutôt qu'un seul, que cette technique nécessite une **agrégation** des débits **en sortie** du modèle plutôt que les données de pluie **en entrée** (lors du calcul de la pluie moyenne de bassin).

Comme pour le calcul d'une pluie de bassin, plusieurs méthodes d'agrégation des débits vont être proposées puis testées dans le Multi-Modèle :

- Une première stratégie sera tout simplement d'utiliser la même méthode que celle utilisée pour les pluies d'entrée en global, soit l'équipondération des débits simulés en établissant leur moyenne arithmétique.
- Une seconde stratégie de pondération est basée sur les performances individuelles *a posteriori* obtenues pour chaque sous-modèle après calage (donc pour chaque entrée pluviométrique). Cette stratégie est adaptée des Multi-Modèles de prévision des débits en temps réel où la mise à jour du Multi-Modèle est fonction des performances de chacun des sous-modèles. Cette méthode convient particulièrement quand un sous-modèle apparaît comme beaucoup plus efficace que les autres (Shamseldin, 1996). Ici, on recompose les débits à partir des critères de performance (de type C2M) obtenus par les sous-modèles en calage. La loi de recomposition du débit simulé final en phase de contrôle à partir des débits simulés par les n sous-modèles est :

$$Q_{Tot.} = \frac{\sum_i^n ((1 + C_i) Q_i)}{\sum_i^n (1 + C_i)} \quad \text{Eq. 30}$$

avec :

$Q_{Tot.}$: Débit simulé total

Q_i : Débit simulé pour le sous modèle i

C_i : Critère de performances de type C2M en calage pour le sous-modèle i ($\in]-1,1]$)

Cette stratégie a pour principal objectif de donner plus de poids aux entrées pluviométriques les plus infirmatives des débits observés et d'affaiblir le poids des entrées les moins performantes. On utilise comme variable de pondération $(1+C2M)$ et non $C2M$ afin de pouvoir tenir compte des sous-modèles qui auraient des performances négatives en calage.

- Une troisième solution est de faire une sélection dynamique des débits de sortie. Ainsi, on pourrait sélectionner à chaque pas de temps un seul des n débits de sortie ou un quantile de leur distribution. On peut par exemple utiliser la médiane des débits simulés par les sous-modèles. Le débit final de sortie sera alors :

$$Q_{tot} = \text{médiane} (Q_i, i = 1, n) \quad \text{Eq. 31}$$

Une autre valeur représentative pourra être prise comme la moyenne des débits maximum et minimum issus des n sous-modèles. Ceci permettrait de ne prendre en considération que les plus fortes différences entre les pluviomètres. Le débit final de sortie sera :

$$Q_{tot} = \frac{1}{2} (Q_{Max} + Q_{Min}) \quad \text{Eq. 32}$$

D'ailleurs, ces débits maximum et minimum simulés par les sous-modèles pourraient déterminer l'enveloppe des erreurs possibles liées à la méconnaissance de la pluie.

Des essais seront aussi faits en prenant uniquement la valeur maximale des débits de sortie. L'utilisation de cette valeur permettrait d'évaluer si elle permet d'améliorer la simulation des pointes de crues par rapport à la version avec la lame d'eau moyenne. Si c'est le cas, ceci sous-entendrait que les pointes de crues sont directement provoquées par un des maxima locaux de précipitation.

- Une dernière solution, la plus logique et intuitive, serait de donner du poids au débit de sortie en fonction de l'aire d'influence de chaque pluviomètre. Cette aire d'influence est calculée à partir des méthodes classiques de polygones de Thiessen (voir définition chapitre 1).

$$Q_{tot} = \sum_{i=1}^N \omega_i Q_i \quad \text{Eq. 33}$$

avec
$$\omega_i = \frac{S_{Thiessen}}{S_{Totale}}$$

$S_{Thiessen}$ = Superficie du l'aire du polygone de Thiessen pour le poste i (km²)

S_{Totale} = Superficie totale du bassin versant (km²)

Cette méthode sera comparée à un modèle global dont la lame d'eau moyenne est calculée avec cette même méthode.

5.2.3.3 Choix du nombre d'entrées pluviométriques pour le Multi-Modèle

La multiplication du nombre des postes pluviométriques peut rendre la solution de Multi-Modèle trop complexe en termes de nombre de paramètres. De plus, pour certains sous-modèles alimentés avec des séries issues de postes pluviométriques très corrélés, l'information pourrait devenir redondante. Ainsi, il est délicat de préétablir le niveau de complexité nécessaire pour le modèle (Boyle *et al.*, 2001). Avant de complexifier fortement le modèle, il serait intéressant de regarder dans un premier temps si une division minimale du modèle en deux sous-modèles pourrait déjà conduire à une meilleure simulation des débits.

En réalisant des regroupements de l'information des postes pluviométriques, on va tester deux stratégies de multiplication des entrées ayant une complexité croissante. La plus simple est le passage d'une entrée (la pluie globale de bassin) à deux entrées, puis nous testerons le passage de deux entrées à n entrées (n étant le nombre de pluviomètres).

Une solution simple est de considérer ces deux entrées comme une pluie de bassin amont et une pluie de bassin aval. En divisant le bassin en deux parties en fonction de leur éloignement à l'exutoire, on donne le même niveau de complexité de modélisation à tous les bassins versants quel que soit le nombre de postes pluviométriques disponibles et leur superficie. Cette première démarche va rendre la comparaison entre modèle et Multi-Modèle plus évidente sur un grand échantillon de bassin.

Dans le but de calculer ces deux pluies représentatives pour chaque bassin, nous avons calculé la distance de chaque poste par rapport à l'exutoire, puis calculé :

- la moyenne arithmétique du groupe de pluviomètres les plus proches de l'exutoire pour former la pluie dite "aval" censée représenter la partie aval des bassins versants ;
- la moyenne arithmétique du groupe de pluviomètres les plus éloignés pour former la pluie dite "amont".

La distance euclidienne par rapport à l'exutoire nous a paru être un bon indicateur global pour hiérarchiser l'éloignement des postes par rapport à cet exutoire²⁹. Néanmoins, nous n'avons pas nécessairement divisé la série en deux. Pour certains bassins, ce choix de répartition est fait selon la répartition géographique réelle des postes. L'étude par l'intermédiaire d'un MNT et d'un SIG du positionnement précis des pluviomètres sur chaque bassin, nous a permis de trancher les cas problématiques. Par exemple, pour certains bassins dont le réseau hydrographique principal possède des formes plus particulières comme le bassin du Doubs à Neubans, nous avons utilisé les distances hydrauliques à l'exutoire qui semblaient plus appropriées à la forme en U du réseau hydrographique principal. La Figure 5.3 illustre la répartition des 12 pluviomètres disponibles pour ce bassin. Ici, les cinq pluviomètres (numérotés 39013004, 25195001, 25056001, 25219002 et 2558802) ont été sélectionnés pour servir à représenter la pluie de bassin aval et les sept autres la pluie de bassin amont.

²⁹ C'est cette méthode de calcul des distances des postes pluviométriques à l'exutoire qui a été utilisée au chapitre 3 pour le calcul de l'indice de localisation, une prise en compte des cas particuliers ayant été faite de la même façon.

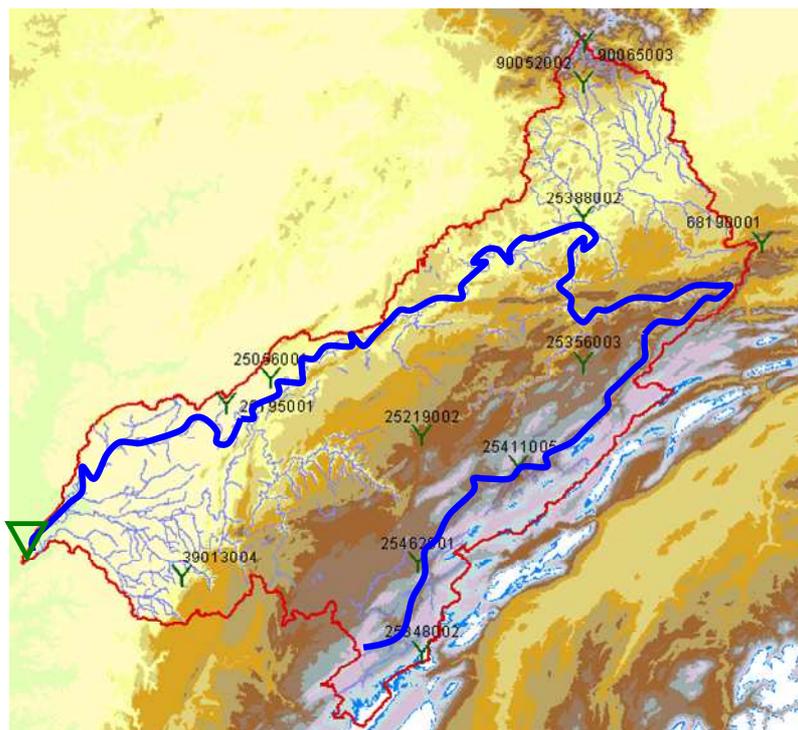


Figure 5.3 Le bassin du Doubs à Neublans (7390 km²), son réseau hydrographique principal simplifié, et ses 12 postes pluviométriques (Y)

Par ailleurs, on testera aussi des stratégies de Multi-Modèle plus complexes consistant à optimiser toute l'information pluviométrique disponible et à prendre un modèle par poste et l'approche initiale entièrement globale. Cette seconde stratégie va nous permettre d'évaluer l'effet de la complexité maximale de notre méthode sur les performances du modèle par rapport à un niveau intermédiaire à deux entrées. De plus, cette méthode a pour but d'adapter la distribution à la superficie du bassin, le nombre de postes présents sur celui-ci augmentant logiquement avec sa superficie.

5.3. Quel(s) modèle(s) multiplier ?

Dans le but de tester la dépendance des résultats des Multi-Modèles à la structure initiale du modèle dupliqué, nous allons tester cette méthode sur plusieurs modèles. En effet, contrairement à la méthode globale des indices testée dans la partie I où le lieu d'introduction était dépendant de la structure globale considérée, cette méthode du Multi-

Modèle peut être appliquée sur n'importe quel modèle global. On pourra donc comparer les évolutions des performances selon différentes structures de modèles.

Cette méthode sera testée uniquement au pas de temps horaire. Nous avons sélectionné différents modèles conçus pour fonctionner à ce pas de temps :

- Le principal modèle qui va être utilisé est une version de la famille GR fonctionnant au pas de temps horaire : GR4H (4 paramètres) déjà utilisé pour l'introduction d'indices d'hétérogénéité.

En plus de cette version horaire de GR dont on analysera particulièrement les résultats, on testera ces stratégies sur trois autres modèles à réservoirs fonctionnant au pas de temps horaire :

- Une version dérivée du modèle IHACRES
- Deux versions du modèle MORDOR à 5 et 6 paramètres respectivement. Dans la version à 5 paramètres, on neutralise le paramètre servant de coefficient correcteur des pluies. Cette neutralisation a pour but de mieux définir le rôle joué par ce paramètre dans la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations au sein de la structure MORDOR.

Le Tableau 5.1 résume les caractéristiques des structures qui vont être testées dans l'approche Multi-Modèle. Le détail de ces structures est disponible en **Annexe 5**.

Ces quatre structures de modèle possèdent des degrés de complexité légèrement différents mais restant tout à fait comparables (de 4 à 6 paramètres optimisés). Elles sont par ailleurs distinctes par leur manière d'appréhender la pluie en entrée (réservoir d'interception nul et fonction d'échanges souterrains pour GR4H; indice des humidités et des pluies antérieures pour IHACRES et coefficient correcteur des pluies ou non pour les deux versions MORDOR).

Tableau 5.1 Caractéristiques des quatre modèles pluie-débit testés en version Multi-Modèle

Modèle	Nombre de paramètres libres	Nombre de réservoirs	Auteurs/Références
GR4H	4	2	(Mathevet, 2005) d'après la version GR4J de (Perrin <i>et al.</i> , 2003)
IHACRES	6	3	(Jakeman, 1990)
MORDOR	5 ou 6	4	(Mathevet, 2005) d'après la version MORDOR 10 de (Garçon, 1999)

Ces modèles ont été sélectionnés car ils sont parmi les plus performants quelle que soit la fonction objectif choisie dans l'étude de comparaison de 20 modèles au pas de temps horaire effectuée par Mathevet (2005). La diversité de ces structures permettra d'étudier la sensibilité des résultats de l'approche Multi-Modèle à la structure du modèle initial et au nombre de ses paramètres.

5.4. Synthèse

Une comparaison des performances de modèles globaux utilisés d'une part avec une seule entrée de précipitation moyenne et d'autre part dans une approche combinant des structures fonctionnant en parallèle avec des entrées distinctes de précipitation, va donc être réalisée. L'objectif est d'établir si l'information contenue dans chaque chronique de distribution des précipitations prise séparément peut-être valorisée pour obtenir une meilleure simulation globale des débits. De nombreuses variantes vont être testées afin d'optimiser la nouvelle information fournie, et ce sur différents modèles globaux à réservoirs. Ces différentes "options" portent sur le nombre de paramètres et d'entrées de précipitation et sur le choix de la règle de composition des débits.

Les multiples stratégies envisagées sont résumées dans le Tableau 5.2. Les acronymes vont servir à définir aisément chaque stratégie individuelle : par exemple PXD-2-PO veut dire le modèle avec deux entrées en distribuant les pluies et les paramètres et en pondérant les sorties en validation.

Tableau 5.2 Synthèse des différentes stratégies de distribution, de pondération et de choix de structures de modèle

Stratégie ou structure	Noms (Acronyme utilisé par la suite)
Structures testées	GR4H MORDOR6 MORDOR5 IHACRES
Type de Distribution	Pluie et paramètres (PXD) Pluie seulement (PD)
Nombre d'entrées / de sous-modèles	2 entrées (Hiérarchisées Amont/Aval) <i>n</i> (nombre de pluviomètres)
Combinaison des sorties	Equipondérée (EQ) Pondérée (PO) <u>Variantes:</u> Médiane des débits (MED), Maximum (MAX), Minimum (MIN)

Chapitre 6

Une approche Multi-Modèle pour la prise en compte explicite de la variabilité spatiale des précipitations : Evaluation des performances

6.1.Introduction

Nous avons consacré le précédent chapitre à la justification du choix et à la description de l'orientation générale des méthodes Multi-Modèles envisagées par la suite. Ce chapitre présente une synthèse des résultats obtenus en utilisant ces structures Multi-Modèles basées sur un modèle global.

Chacune des méthodes décrites dans le chapitre précédent a été testée sur un échantillon de 99 bassins versants au pas temps horaire. L'analyse des résultats est réalisée en s'attardant particulièrement sur le cas du modèle GR4H. Cependant, on passera en revue également les résultats obtenus sur les trois autres structures de modèles en particulier si l'interprétation des résultats varie d'un modèle à l'autre.

Similairement à l'évaluation des méthodologies élaborées aux chapitres 3 et 4, toutes les stratégies ont été testées par split-sample-test sur des périodes de quatre ans en utilisant le critère C2M-RQ comme fonction objectif. Nous avons évalué les stratégies en phase de contrôle du modèle principalement sur les critères C2M-Q ou C2M-RQ. Les résultats sur les autres critères (C2M-LogQ et Bilan) ne seront indiqués qu'en cas de variation significative³⁰ de l'orientation des résultats

³⁰ Dans le cadre de cette étude, le seuil de significativité des résultats sera fixé à +0.02 de différence sur les critères de performances (ceci à la différence des +0.01 de l'analyse de résultats du chapitre 4 où la structure modifiée restait globale).

L'**annexe 9** donne un aperçu des performances globales initiales obtenues par les quatre modèles globaux qui ont servi de point de départ à la méthodologie. Nous pouvons indiquer que, mis à part MORDOR5 (version simplifiée de la structure MORDOR6), les trois modèles ont des performances à peu près équivalentes sur cet échantillon pour les critères étudiés.

6.2. Evaluation d'un Multi-Modèle à deux entrées par distribution des précipitations groupées géographiquement en deux zones dites Amont et Aval

6.2.1 Résultats sur la structure GR4H

Nous avons comparé les versions Multi-Modèle à deux entrées de précipitations issues de la division des postes pluviométriques en deux sous-groupes Amont et Aval, soit par équipondération des deux débits de sortie des sous-modèles (EQ), soit par pondération des ces débits par l'intermédiaire des performances obtenues en calage par les deux sous-modèles (PO). Pour chaque test de pondération, nous avons analysé les versions distribuant les paramètres (PXD) ou non (PD). Comme au chapitre 4, on adoptera des représentations de type Box-Plot afin d'analyser les variations de la distribution des critères de performance moyens par bassin versant sur tout l'échantillon.

6.2.1.1 Analyse globale PD et PXD et EQ-PO

Les distributions des performances moyennes en contrôle sur les critères C2M-RQ et C2M-Q pour les deux stratégies de paramétrisation et de pondération des débits de sortie du modèle du Multi-Modèle sont indiquées en Figure 6.1 avec celle de la version globale de GR4H.

Les performances sont globalement quasi-identiques. Aucune des options de distribution en deux sous-modèles ne permet de dépasser significativement les performances de la version initiale globale de GR4H. De même, les résultats restent de nature semblable quel que soit le critère de performance évalué (C2M-RQ ou C2M-Q).

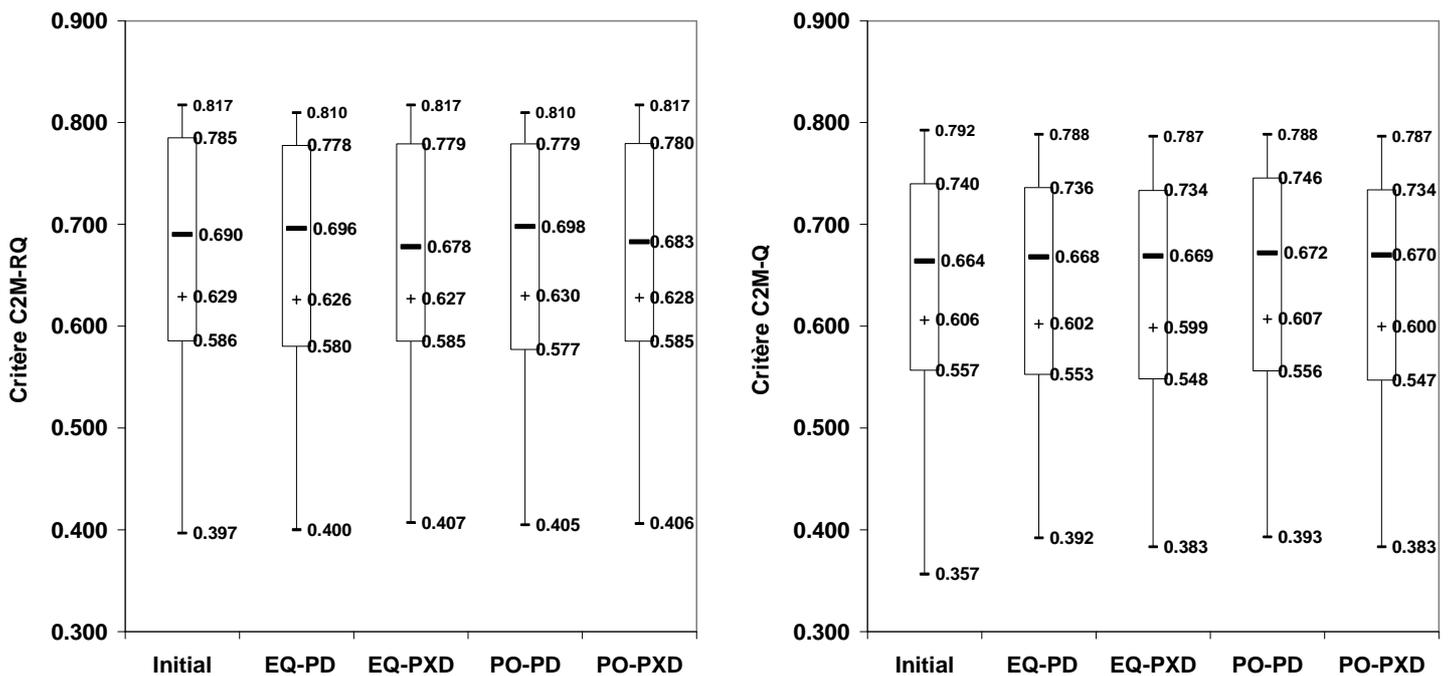


Figure 6.1 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-RQ (gauche) et C2M Q (droite) en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global (Initial) et les stratégies de distribution amont-aval des précipitations avec un Multi-Modèle à entrées, avec distribution des paramètres (PXD) ou sans distribution des paramètres (PD) pour les deux essais de pondérations des débits de sortie des sous-modèles (EQ et PO).

6.2.1.2 Etude des performances des méthodes par bassins-période³¹

La Figure 6.2 illustre les performances moyennes obtenues pour chaque bassin-période (188 points avec deux périodes par bassin) avec les deux stratégies de pondération (PO et EQ) pour les deux types de paramétrisation du Multi-Modèle en fonction des performances initiales sur GR4H³² pour les deux critères utilisés jusqu'ici. La variation des performances des deux méthodes de distribution, avec ou sans paramètres, est à peu près identique à l'intérieur de l'échantillon. Les bassins-périodes situés sous la bissectrice sont moins nombreux pour la version distribuée PD. En effet, les huit paramètres optimisés dans PXD

³¹ Un bassin-période décrit un bassin versant et la période de contrôle analysée (ici, chaque bassin versant est évalué sur deux périodes : 1995-2000 ou 1995-2005)

³² On ne présente ces résultats que sur des valeurs de critère entre 0 et 1 pour des raisons de lisibilité des figures. Les stratégies de distribution n'ont affecté aucunement les 7 bassin-période où les critères étaient initialement négatifs.

peuvent mener à une perte de robustesse (différence de performance entre calage et contrôle) plus conséquente qu'une version à 4 paramètres.

Au niveau de la comparaison des deux stratégies de pondération des débits de sortie, on ne remarque pas ou très peu de différences sur la méthode PXD (les points se superposent), alors que sur la méthode de distribution PD, les stratégies de pondérations par les critères initiaux peuvent amener à quelques différences plutôt avantageuses.

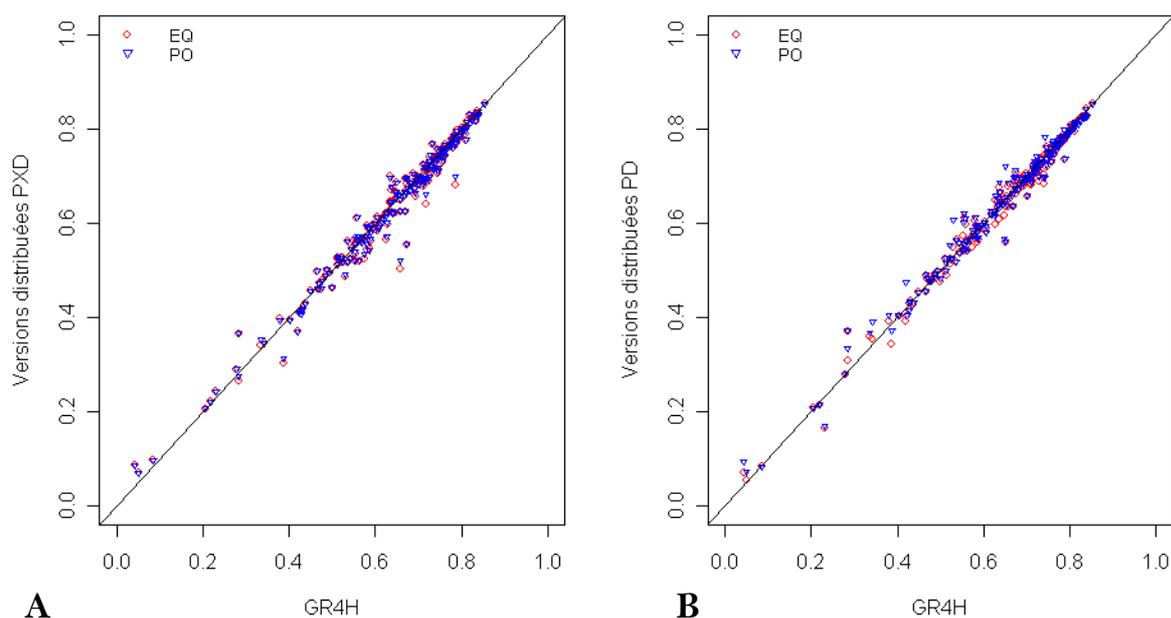


Figure 6.2 Performances moyennes obtenues en contrôle sur C2M-Q pour les deux versions distribuées du Multi-Modèle sur chacun des bassins-périodes en fonction de la valeur des performances initiales de la version globale de GR4H ; (A) représente la version distribuée de la pluie et des paramètres et (B) la version où la pluie seulement est distribuée.

Pour la version de pondération PO, on rappelle que les poids dépendent des performances individuelles des sous-modèles. Ces poids sont acquis via les performances individuelles en calage des sous-modèles sur le critère C2M-RQ (Figure 6.3). On remarque que ce sont globalement les sous-modèles alimentés par les pluies dites Amont qui obtiennent les meilleures performances. Ce résultat est obtenu avec des vecteurs optimisés

individuellement ou en commun avec le sous-modèle Aval³³. Ainsi, le poids du débit issu du sous-modèle dit Amont est plus important que le poids du sous-modèle Aval avec cette méthode, sans pour autant provoquer de forts écarts avec les résultats issus de l'équipondération.

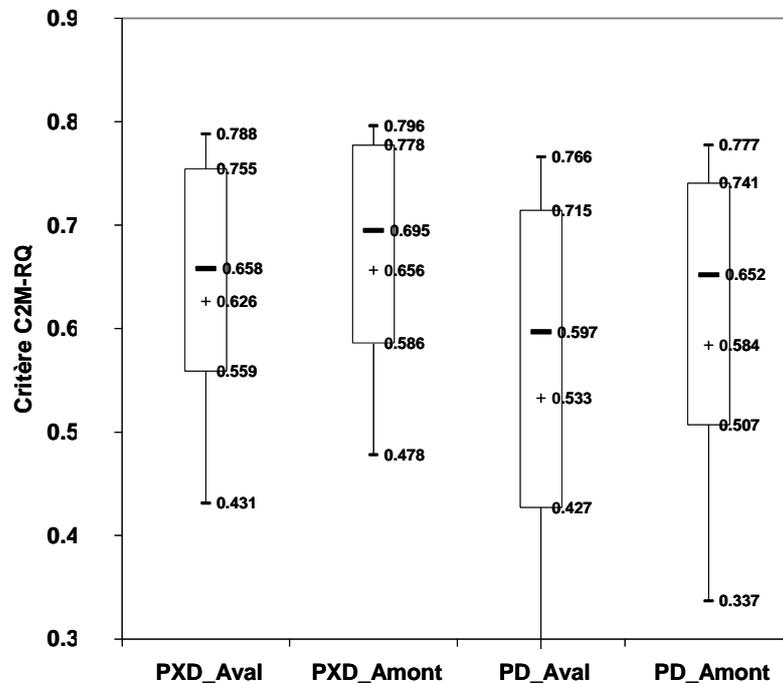


Figure 6.3 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-R en calage sur l'échantillon pour les sous-modèles alimentés par les pluies dites Amont et Aval selon les deux stratégies de distribution.

Il est important de noter que les performances moyennes obtenues en calage par le sous-modèle amont ne sont inférieures que d'environ 0,03 aux performances du modèle avec la pluie de bassin totale en entrée (0,656 contre 0,687) (voir **Annexe 9**).

La supériorité du sous-modèle dit Amont est plutôt logique au regard des différences observées dans les cumuls annuels moyens des pluies Amont et Aval (voir **Annexe 10**). Il a, en effet, été montré, que GR4H s'accommode plus facilement à un excès d'eau qu'un manque d'eau en entrée, sa fonction d'échange lui permettant plus facilement de perdre de l'eau (Oudin *et al.*, 2006b).

³³ On appellera par la suite sous-modèle Aval (resp. Amont), le sous-modèle alimenté par le groupe de pluviomètres Aval (resp. Amont).

On peut aussi remarquer que les performances individuelles sont plus faibles pour les deux sous-modèles si le vecteur calé est commun (PD). Mais, l'écart absolu entre les performances du sous-modèle Amont et Aval reste équivalent à celui de la stratégie PXD. Ceci indique que même sans vecteur de paramètre propre, la pluie Amont serait plus représentative que la pluie aval pour la simulation des débits par le modèle. En effet, dans les cas de la distribution PD, un seul jeu de paramètre est optimisé pour s'adapter aux deux entrées. Les deux sous-modèles ne peuvent adapter leurs paramètres à la différence du cumul entre les deux entrées.

6.2.1.3 Essai de modification des pondérations des débits de sortie des deux sous-modèles

Nous allons maintenant rechercher si une meilleure pondération fixe et systématique ne pourrait être obtenue pour les débits de sortie des sous-modèles.

En effet, l'absence d'amélioration des performances du Multi-Modèle pourrait venir du choix systématique de pondérations identiques pour les débits de sortie des deux sous-modèles. Nous avons donc testé quatre autres combinaisons très simples de ces débits de sortie, avec un poids donné au débit sortant du sous-modèle dit Aval de 0.0, 0.25, 0.50, 0.75 et 1.0. Le complémentaire par rapport à 1 donne le poids du débit du sous-modèle Amont. Ces combinaisons donnent en termes d'équations:

$$Q_{tot} = \alpha Q_{Aval} + (1 - \alpha) Q_{Amont} \quad \text{Eq. 34}$$

Q_{tot} : Débit total simulé

Q_{Aval} : Débit simulé par le sous-modèle alimenté pour le groupement de pluviomètres Aval

Q_{Amont} : Débit simulé par le sous-modèle alimenté pour le groupement de pluviomètres Amont

α Poids égal à 0.0; 0.25, 0.50, 0.75 et 1.0. Chaque solution sera désignée dans ce qui suit par la valeur de α

Les résultats ici en contrôle sur le C2M-Q montrent que sur cet échantillon l'optimum de pondération reste l'équipondération et que la plus mauvaise combinaison est celle où tout le

pois est pris sur le débit issu du sous-modèle Aval (Figure 6.4). Ce résultat est, de la même façon que les performances obtenues en calage, certainement dû à l'infériorité des précipitations annuelles moyennes introduites dans le sous-modèle Aval (voir **Annexe 10**). Nous pouvons cependant rappeler que les performances moyennes de la combinaison d'équ pondération demeurent en moyenne inférieures à celles du modèle global.

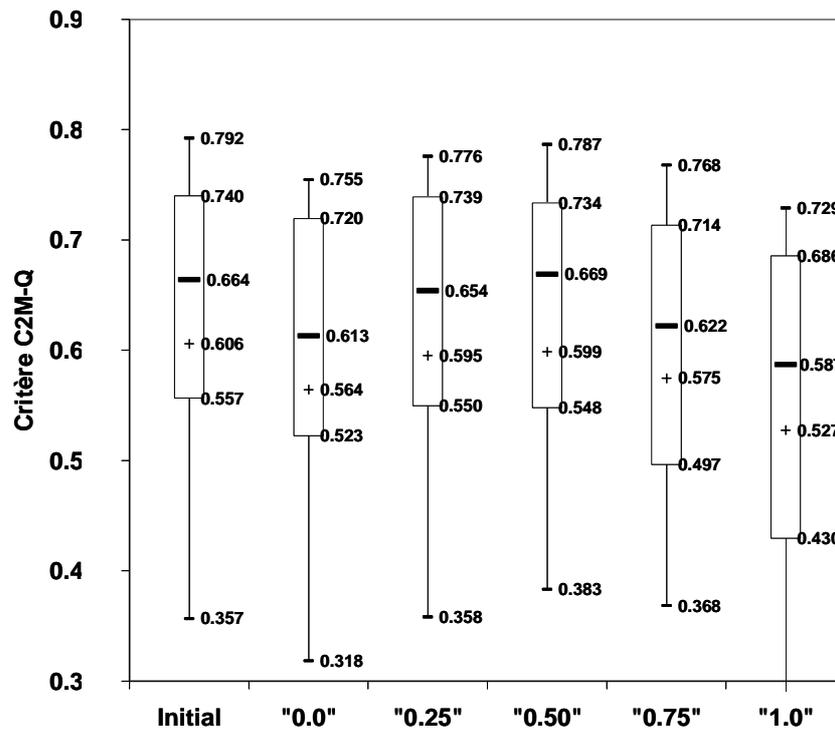


Figure 6.4 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global (Initial) et la stratégie de Multi-Modèle avec deux sous-modèles alimentés par deux entrées Amont-Aval de précipitations avec différentes valeurs du poids donné au débit simulé par le sous-modèle Aval

Nous avons ensuite recherché le meilleur poids pour chaque bassin versant. La Figure 6.5 présente les résultats obtenus et les compare avec l'approche initiale. Cette approche avec poids calé manuellement permet de gagner quelques points sur les critères moyens et médians (+0,01 et +0,02). Les bassins versants aux critères initiaux les plus mauvais (quantiles 0,1) profitent quant à eux plus généreusement de cette approche (+0,05).

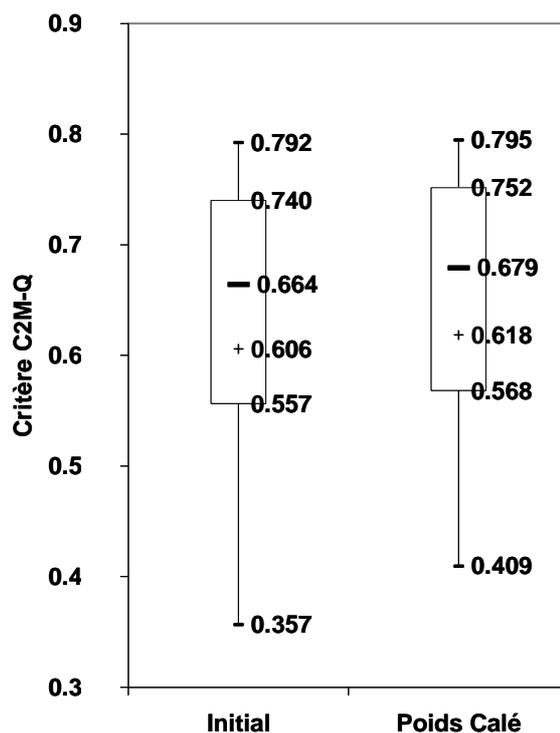


Figure 6.5 Box plot [- Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global initial et la stratégie de Multi-Modèle à deux sous-modèles avec entrées de pluie Amont-Aval où le poids des deux débits de sortie est calé manuellement parmi cinq valeurs

Si on observe les valeurs des poids obtenues (exclusivement en cas d'amélioration du critère par rapport au modèle global initial) en fonction du rapport des cumuls annuels moyens des pluies Amont sur les cumuls annuels moyens des pluies Aval, on peut voir que, même en cas de forts écarts sur les cumuls annuels moyens sur les pluies introduites dans les deux sous-modèles, l'approche globale reste le plus souvent la meilleure façon de modéliser le bassin (Figure 6.6 avec Initial en abscisse). Ce phénomène signifie que même en cas de différences élevées sur les cumuls annuels au sein du bassin versant, l'approche globale peut rester compétitive et ainsi que ces différences de cumuls pluviométriques sont pris en compte implicitement dans le modèle via son vecteur de paramètres. L'approche globale demeure supérieure à l'approche Multi-Modèle sur 68 des 99 bassins versants avec évaluation sur le critère C2M-RQ.

Pour la trentaine de cas restants où l'on obtient des meilleures performances pour un des Multi-Modèles, nous n'avons pas réussi à prédéterminer le poids optimal en fonction des

cumuls annuels moyens Amont et Aval, ou d'autres attributs du bassin versant (superficie, géographie, nombre de postes).

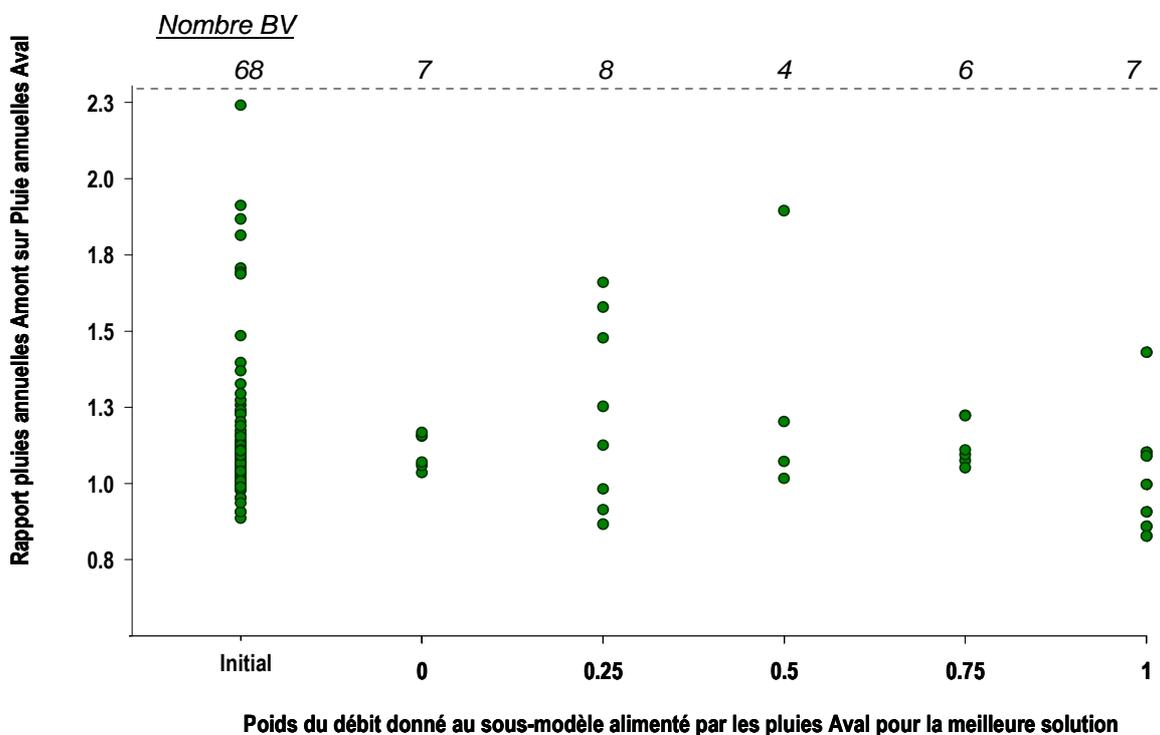


Figure 6.6 Rapport entre cumuls annuels moyens des pluies Amont et Aval en fonction de la meilleure approche en termes de critère C2M-Q pour chaque bassin versant pour cinq combinaisons de sortie du Multi-Modèle (le chiffre représente le poids du débit issu du sous-modèle aval) et le modèle initial global alimenté par la pluie de bassin.

La difficulté à prédéterminer la valeur du coefficient de pondération et l'amélioration des performances relativement limitée n'autorisent pas l'ajout d'un paramètre libre supplémentaire au modèle. On considérera par la suite une pondération fixe pour tous les bassins, c'est-à-dire l'approche EQ.

6.2.2 Relations entre les deux vecteurs de paramètres distribués par la stratégie PXD-EQ

Nous allons dans cette partie comparer les jeux de paramètres obtenus par chaque sous-modèle, pour l'équipondération des débits de sortie, avec ceux optimisés pour le modèle initial.

La Figure 6.7 présente les distributions des valeurs des paramètres optimisés de GR4H pour les sous-modèles Amont et Aval pour la stratégie PXD et celles des paramètres globaux obtenus avec GR4H. Premièrement, on peut remarquer que les distributions des quatre paramètres de la version globale se rangent systématiquement entre la distribution des paramètres des sous-modèles Amont et Aval³⁴, ce qui est assez logique. Le paramètre X1 optimisé pour le sous-modèle Amont est fréquemment supérieur à celui optimisé par le sous-modèle aval (capacité du réservoir plus forte en lien avec des quantités de précipitations plus élevées). De même, au niveau du paramètre régissant les échanges (X3), la courbe de distribution du paramètre du sous-modèle Amont est très inférieure à celle du paramètre Aval, ceci correspond à une évacuation d'eau excédentaire pour le sous-modèle Amont. C'est d'ailleurs ce paramètre qui présente les plus grosses variations entre sous-modèle Amont et sous-modèle Aval et donc qui s'adapte le plus fortement aux quantités d'eau tombées sur les bassins versants.

Le paramètre le moins sensible à la distribution des pluies Amont et Aval est le paramètre X4 (temps de base des hydrogrammes unitaires HU). Contrairement à ce que l'on aurait pu penser a priori, il n'y a pas d'allongement de l'hydrogramme unitaire avec l'éloignement des postes pluviométriques par rapport à l'exutoire (les pluies Amont étant par définition logiquement plus éloignées de l'exutoire que les pluies Aval). Ceci corrobore les résultats de régionalisation montrant la difficulté de relier ce paramètre à des indices morphométriques du bassin (Makhlouf, 1994). Ce résultat indique probablement le fait que le temps de transfert au sein du bassin versant est dominant par rapport au temps de transfert dans le réseau hydrographique.

³⁴ On appellera paramètre Amont (Aval), les paramètres du sous-modèle Amont (Aval)

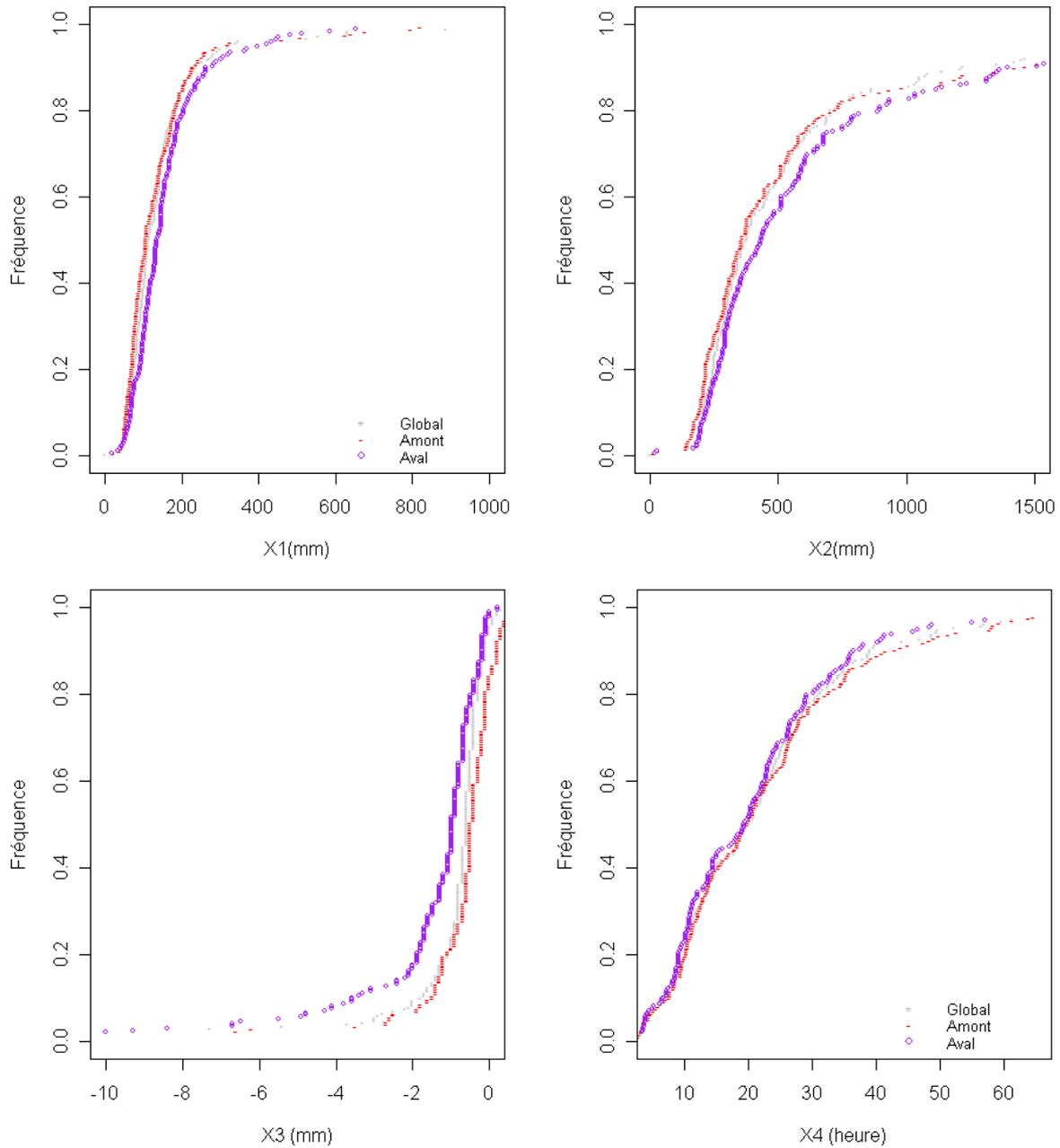


Figure 6.7 Distribution des quatre paramètres de GR4H global et des sous-modèles amont et aval dans le cas de la stratégie PXD (X1 capacité du réservoir de routage, X2 capacité du réservoir de production, X3 paramètre d'échange X4 temps de réponse des hydrogrammes unitaires).

Par ailleurs, il n'y a aucun lien entre les rares améliorations des critères de performances par la version PXD et la distance entre vecteur de paramètres Amont ou Aval³⁵. La distribution des vecteurs ne permet donc pas de prendre en compte efficacement la variabilité Amont Aval des précipitations de GR4H (Figure 6.8).

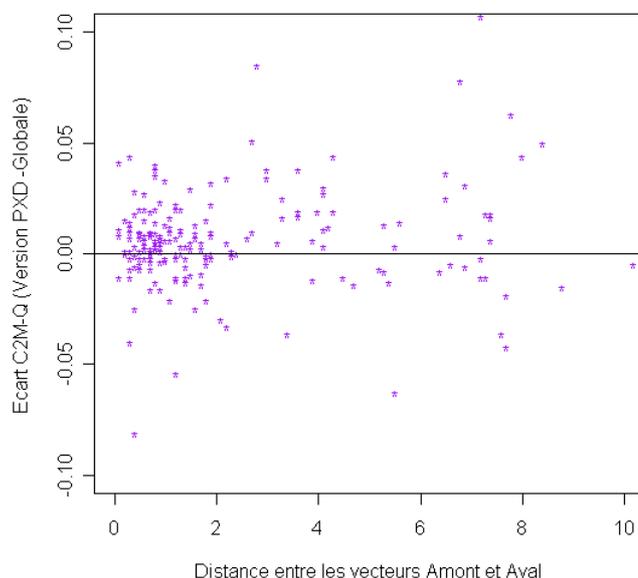


Figure 6.8 Gains obtenus en contrôle pour chaque bassin période de l'échantillon sur le critère C2M-Q par la méthode PXD et la version globale en fonction de la distance euclidienne des vecteurs dits Amonts et Aval optimisés

6.2.3 Rapport entre les améliorations, les dégradations de critères et les attributs de bassins de l'échantillon pour PXD

Nous avons tenté de relier les améliorations et dégradations des critères de performances apportées par la version distribuée PXD à quatre attributs de bassins : (1) le rapport des totaux annuels moyens des pluies Amont et des pluies Aval, (2) les coefficients de corrélation³⁶ entre les pluies Amont et les pluies Aval, (3) la superficie du bassin et (4) l'écart

³⁵ Rappel : Distance de deux vecteurs X et Y à 4 dimensions est $\sqrt{\frac{1}{4} \sum_i^4 (Y_i - X_i)^2}$, X_i et Y_i étant des valeurs normées.

³⁶ Le coefficient de corrélation est le coefficient obtenu en construisant la droite de régression entre les pluies horaires amont et les pluies horaires aval sur la période 1995-2005

à la densité théorique minimale des postes pluviométriques (voir chapitre 2). La Figure 6.9 démontre qu'aucune relation significative ne peut être établie.

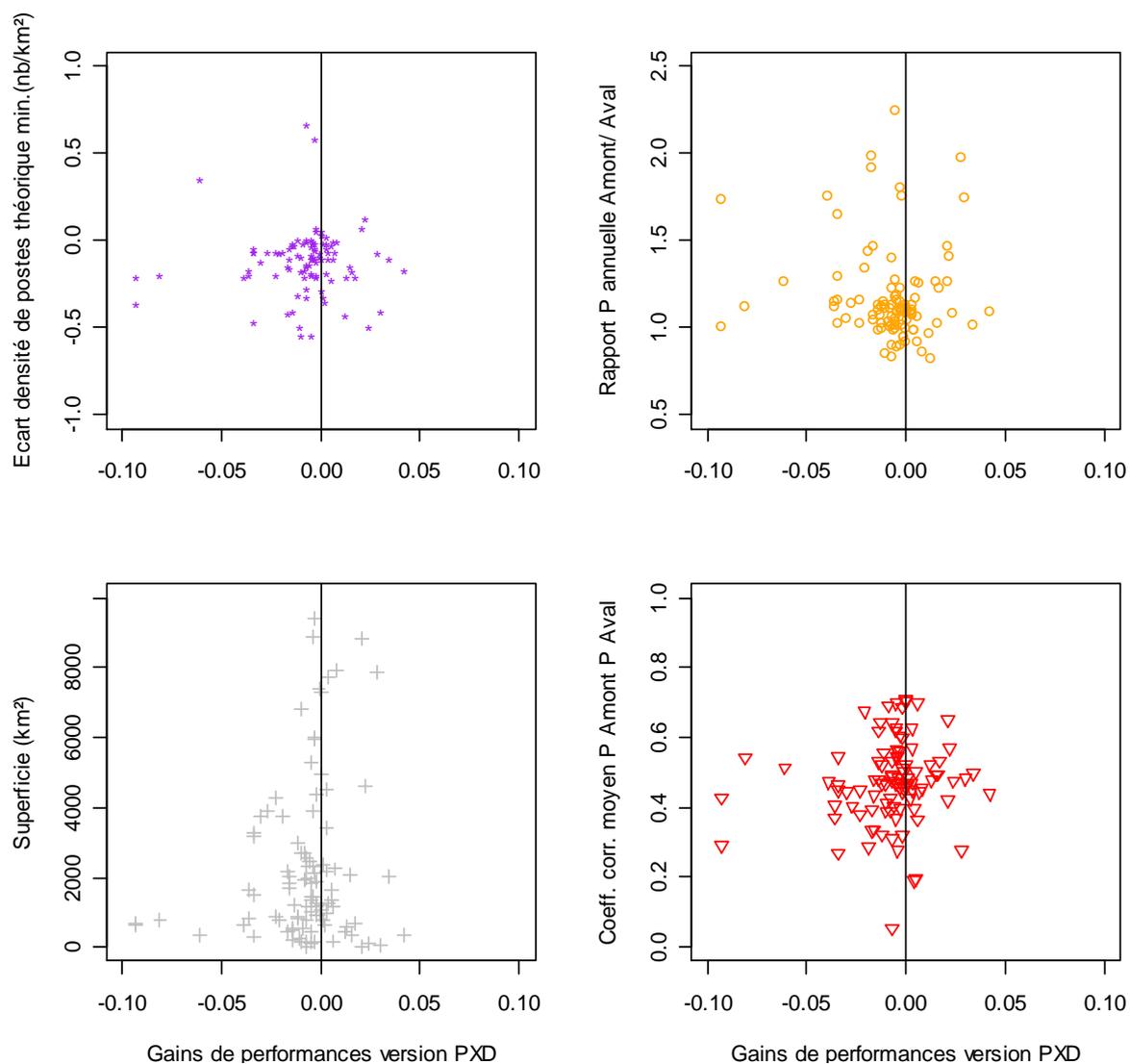


Figure 6.9 Relations entre quatre attributs représentant les bassins versants et les gains de performance obtenus sur C2M-Q en contrôle avec la méthode PXD appliquée sur le modèle GR4H.

6.2.4 Etude des méthodes PD et PXD par pondération EQ et PO sur le modèle IHACRES

Comme GR4H, la structure IHACRES est plutôt insensible à la distribution des pluies et/ou de ses paramètres en deux entrées des précipitations dites Amont et Aval (Figure 6.10). En effet, on peut voir que globalement aucune des deux stratégies de distribution et/ou de pondération ne surpasse significativement toutes les autres sur le critère C2M-Q.

Les résultats trouvés en utilisant le critère C2M-RQ sont orientés dans la même direction.

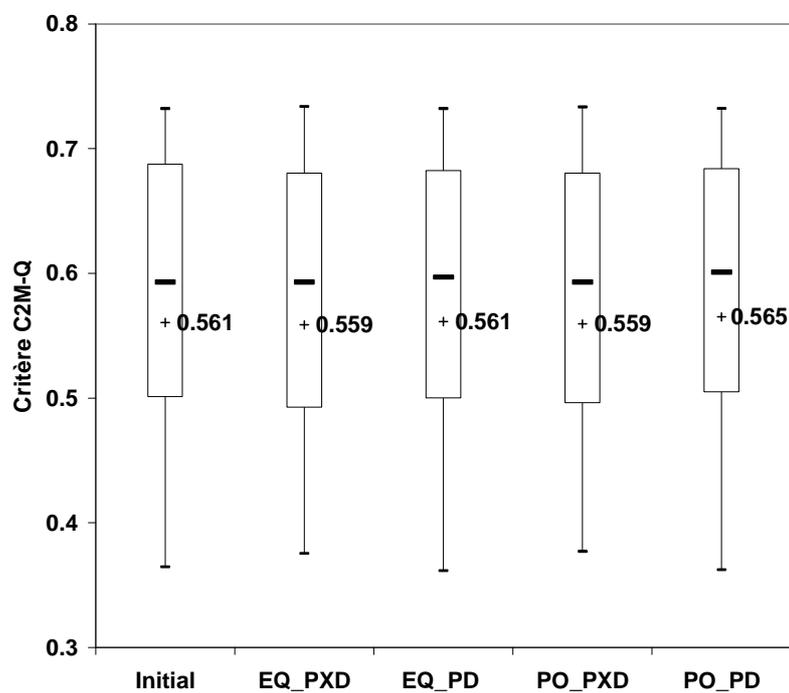


Figure 6.10 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q en contrôle sur l'échantillon pour IHACRES global et les quatre stratégies possibles pour le Multi-Modèle à deux sous-modèles Amont/Aval

6.2.5 Résultats sur MORDOR 5 et MORDOR6

Les résultats des Multi-Modèles réalisés à partir du modèle global MORDOR6 vont dans le même sens que ceux obtenus pour GR4H ou IHACRES, c'est-à-dire qu'aucune des stratégies de distribution n'a permis de supplanter le modèle initial utilisé globalement.

Les résultats obtenus sur MORDOR5 sont avant tout intéressants du point de vue de l'utilité du paramètre servant de coefficient correcteur des pluies³⁷, absent dans cette version simplifiée de la structure MORDOR. En effet, en phase de contrôle, un gain d'environ 0.055 est observé en moyenne sur le modèle MORDOR5 avec la version PXD, pondérée ou non par les critères des sous-modèles en calage (Figure 6.11). Mais, en même temps, aucun gain n'est observé pour la version PD de la même structure à cinq paramètres. Le modèle MORDOR6 est resté, quant à lui, insensible à la distribution des précipitations et/ou des paramètres de la même façon que GR4H et IHACRES.

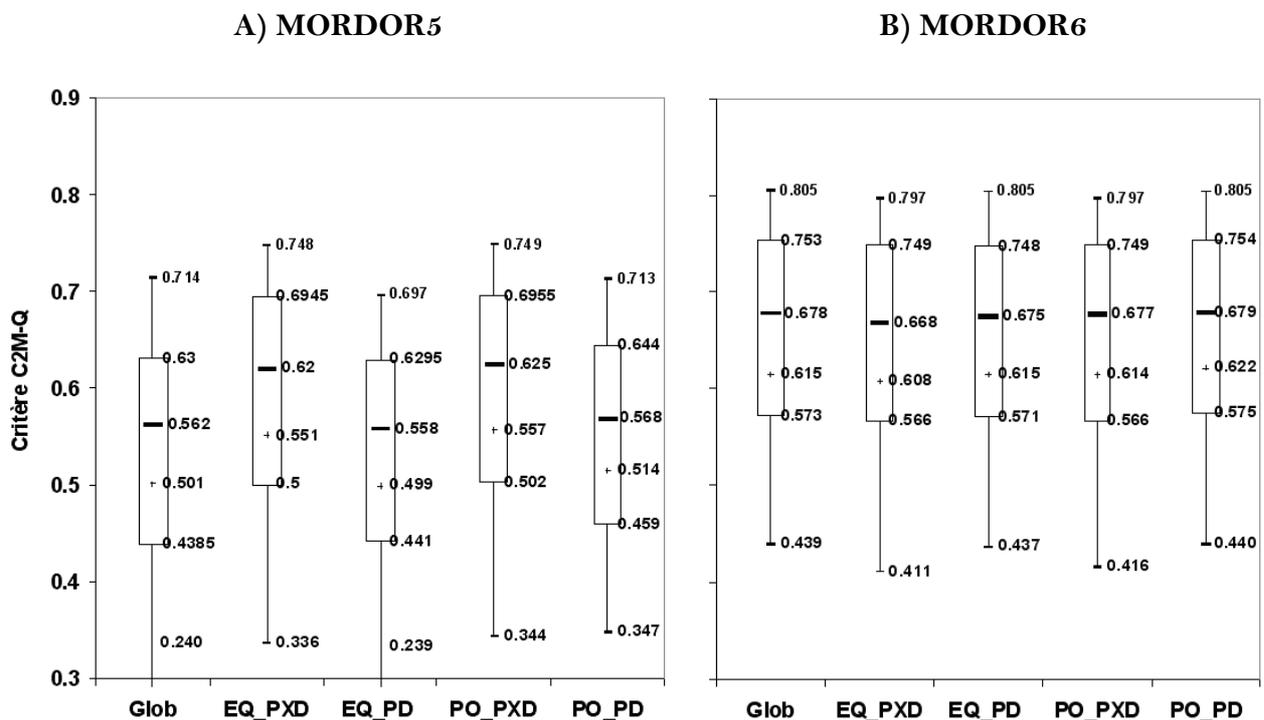


Figure 6.11 Distribution des critères moyens de performances C2M-Q en contrôle par bassin versant de MORDOR5 (A) et MORDOR6 (B) et des quatre stratégies de Multi-Modèle à deux sous-modèles Amont-Aval

Ce résultat indique rôle un prépondérant du coefficient correcteur des pluies dans l'ajustement des volumes d'eau, dont l'erreur peut être liée à la variabilité spatiale de précipitations. On retrouve en fait ici le rôle joué par le coefficient d'échange de GR4H ou du coefficient correcteur des pluies d'IHACRES dans l'ajustement des volumes d'eau. F, le

³⁷ Ce coefficient correcteur des pluies est, dans la version MORDOR6, tout simplement un paramètre libre servant de coefficient multiplicateur des pluies d'entrée.

critère de performance moyen obtenu en contrôle par la version PXD de MORDOR5 est encore bien loin de celui de la version à six paramètres (0.64 contre 0.59).

Enfin, il demeure difficile de faire un lien entre cette progression obtenue avec PXD pour MORDOR et les quatre attributs de bassins relatifs aux pluies et à la superficie, comme c'était le cas pour le modèle GR4H.

6.3. Autre calcul de deux entrées pluviométriques des sous-modèles

Suite à l'échec relatif de la distribution au sens strict des pluies de bassin dite Amont-Aval, nous allons tenter quelques variantes autour de la définition de ces deux "sous"-pluies de bassins qui alimentent les entrées de précipitations des deux sous-modèles composant le Multi-Modèle.

Deux tests ont été effectués : l'un où l'on remplace partiellement les pluies Amont et Aval par la pluie de bassin totale, l'autre où l'on scinde aléatoirement les pluviomètres en deux sous-échantillons pour calculer deux nouvelles sous-pluies de bassin pour alimenter les deux entrées. Ces deux tests sont réalisés sur le modèle GR4H pour la version EQ-PXD. La méthode utilisée et les résultats de la première série de tests réalisés dans le but de remédier à l'instabilité du Multi-Modèle liée à l'écart entre les pluies amont et aval sont présentés en **Annexe 11**. Cette méthode n'a pas permis d'améliorations significatives en termes de performances du Multi-Modèle.

6.3.1 Combinaisons aléatoires pour constituer les deux entrées pluviométriques du Multi-Modèle

6.3.1.1 Méthodologie

Le regroupement des postes pluviométriques en deux sous-groupes Amont et Aval bien qu'intuitif d'un point de vue hydrologique, n'est peut-être pas le mode de regroupement optimal pour améliorer les performances du modèle pluie-débit. Nous allons donc générer de manière aléatoire les couples de sous-pluies de bassin via l'élaboration de combinaisons de sous-groupes complémentaires de pluviomètres en conservant des nombres de postes similaires dans chacun des deux groupes. Ces deux sous-pluies de bassin vont servir à alimenter les deux entrées du Multi-Modèle en version PXD, la structure GR4H comme

modèle initial. Le nombre de combinaisons possibles pour constituer les deux groupes va dépendre du nombre de postes présents sur le bassin³⁸. Le nombre de combinaisons augmente avec le nombre de poste sur le bassin (voir Tableau 6.1).

Les bassins versants comportant seulement deux postes pluviométriques sont (logiquement) exclus de l'étude, et, les tests sont réalisés sur les 73 bassins versants de l'échantillon dont le nombre de pluviomètres est supérieur ou égal à 3. A l'exception des bassins comportant 14 et 16 postes pour lesquels nous nous sommes limités à 500 combinaisons, toutes les combinaisons possibles ont été testées afin de rechercher celle qui conduit aux meilleures performances du Multi-Modèle. L'objectif est de voir ensuite si cette combinaison fait ressortir une structure spatiale particulière du positionnement des pluviomètres par rapport au bassin.

Tableau 6.1 Nombre combinaisons de postes pluviométriques en deux sous-groupes en fonction du nombre de pluviomètres initial de chaque bassin.

Nombre total de postes	Nombre de combinaisons (nombre de postes par sous-groupe)
3	3 (2 et 1)
4	3 (2 et 2)
5	10 (3 et 2)
6	10 (3 et 3)
7	35 (3 et 4)
8	35 (4 et 4)
9	126 (5 et 4)
10	126 (5 et 5)
11	462 (6 et 5)
12	462 (6 et 6)
14	1716 (7 et 7)
16	6435(8 et 8)

Un objectif secondaire est de rechercher s'il n'existe pas des sous-combinaisons de postes qui, considérées comme pluie de bassin globale, permettraient au modèle d'atteindre de

³⁸ $C_n^p = \frac{n!}{p!(n-p)!}$ décrit le nombre de combinaisons de p éléments parmi n . Pour les nombres de postes pairs, comme il faut que les deux combinaisons soient différentes deux à deux, on divise le résultat par deux.

meilleures performances que la pluie de bassin calculée avec la totalité des pluviomètres disponibles.

6.3.1.2 Evaluation les performances d'un Multi-Modèle à deux entrées de pluies calculées aléatoirement

La distribution des résultats sur l'échantillon (C2M-Q) ne montre pas de différences spectaculaires entre la méthode globale initiale, la méthode avec deux entrées pluviométriques définie au sens hydrologique Amont et Aval et la méthode de combinaisons aléatoires de postes pour constituer ces deux entrées pluviométriques (Figure 6.12). L'approche par combinaison aléatoire donne même (!) des résultats améliorés par rapport à ceux de l'approche Amont-Aval, indiquant que cette dernière n'est probablement pas la meilleure façon d'optimiser l'information sur la variabilité spatiale des précipitations.

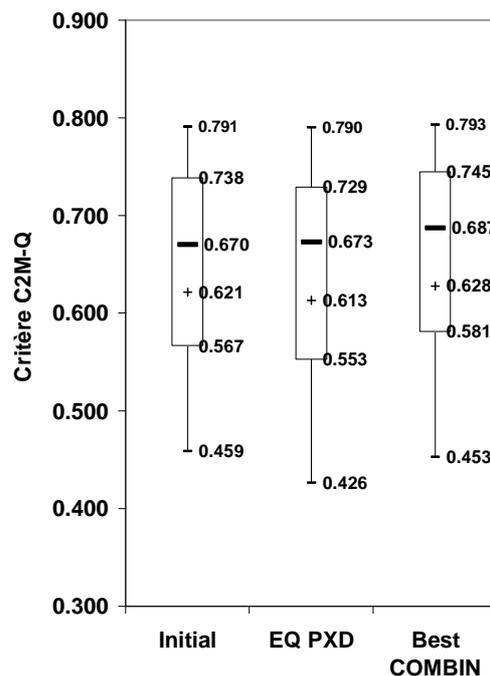


Figure 6.12 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en contrôle sur l'échantillon de 73 bassins versants pour la version globale initiale (Initial), pour la version Multi-Modèle avec des entrées pluviométriques Amont-Aval (EQ-PXD) et la version Multi-Modèle version EQ-PXD avec deux sous-modèles dont les entrées sont établies en sélectionnant la meilleure combinaison (best COMBIN)

La Figure 6.13 montre que l'écart entre le meilleur et le plus mauvais critère de performance obtenu avec toutes les combinaisons d'entrées pluviométriques pour chaque bassin versant est en moyenne assez limité. Ce résultat est d'autant plus vrai que le nombre de combinaisons est élevé, ce qui est logique. En effet, les précipitations moyennes issues des sous-échantillons de postes provenant de bassins possédant un nombre élevé de pluviomètres sont souvent très corrélées d'une combinaison à l'autre, d'où le faible écart en termes de critère de performances.

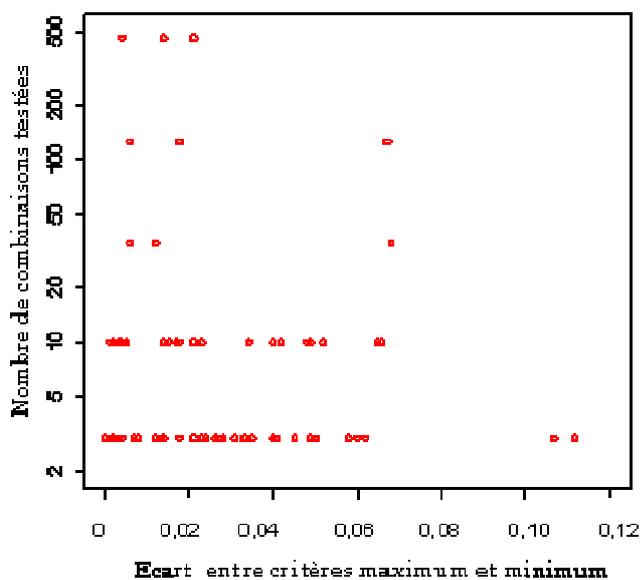


Figure 6.13 Écart entre les performances obtenues sur le critère C2M Q par bassin versant entre par l'approche Multi-Modèle à deux entrées générées aléatoirement en fonction du nombre total de combinaisons testées pour ce bassin.

Ainsi, pour les trois bassins versants où un peu plus de 500 combinaisons ont été testées, l'écart maximum de performance entre les Multi-Modèles issus de ces combinaisons reste limité. Pour ces bassins, le poids relatif d'un poste donné est moins important que pour les bassins à trois et quatre postes. En effet, pour les tests comportant trois et dix combinaisons de pluviomètres, cet écart sur les critères de performance entre les combinaisons peut aller jusqu'à 0,12.

Afin de synthétiser les résultats sur le Multi-Modèle à deux entrées, nous avons comparé les écarts par bassin entre le meilleur critère de performance obtenu avec les combinaisons aléatoires et le critère de la version initiale, et les écarts sur ce même critère de performance avec deux entrées Amont-Aval et le critère de la version initiale.

La Figure 6.14 synthétise ces résultats. On peut voir qu'il est souvent possible (pour environ la moitié des bassins versants) de trouver une combinaison de postes qui sera meilleure que celle définie géographiquement par l'éloignement des postes à l'exutoire, plus spécialement quand le Multi-Modèle Amont-Aval dégrade les performances du modèles initial (ordonnées négatives sur le graphique et abscisses positives; environ un tiers des bassins versants sont concernés). Pour l'autre moitié des cas, les performances moyennes de deux Multi-Modèles sont équivalentes (même écart de performances avec la version globale).

Pour la majeure partie de l'échantillon et malgré toutes les combinaisons testées, les gains de performances obtenues sur le Multi-Modèle résultant dépassent rarement +0,02 sur le critère moyen C2M-Q par rapport au modèle global initial. Pour les bassins versants où le gain en termes de critère de performances dépasse +0,02, seuls deux bassins versants semblent réellement bénéficier d'une combinaison différente. Un des deux bassins concernés est celui de la Moselle à Metz d'une superficie de 7880 km² où quatre combinaisons ont été testées dont la meilleure a apporté un gain de +0,05 par rapport aux performances du modèle global initial et +0,025 par rapport à la version Multi-Modèle Amont/Aval. Le second bassin versant est celui du Loir à Durtal, où 126 combinaisons ont été testées dont la meilleure a apporté un gain de +0,05 par rapport aux performances du modèle global initial et +0,04 par rapport à la version Multi-Modèle Amont/Aval.

Si on s'attarde sur la répartition géographique des postes de la combinaison conduisant aux meilleures performances, on peut voir que souvent, pour les cas des bassins à trois postes, les meilleures combinaisons peuvent se décrire aussi comme une distribution au sens hydrologique amont-aval mais différente (géométriquement parlant) de celle qui avait été construite initialement. Ces cas sont illustrés avec le bassin de la Bruche à Holtzheim et de la Drôme à Luc-en-Diois en **Annexe 12**. En effet, pour les bassins versants à trois postes, comme ce nombre est impair, le poste central en termes d'éloignement à l'exutoire peut être groupé soit avec l'Amont, soit avec l'Aval selon le choix de distribution. C'est ce changement qui va faire varier le plus le critère de performances car le poids d'une seul poste est assez élevé sur les trois que composent le total. De plus, sur ces bassins, on remarque généralement que les combinaisons induisent que les meilleurs performances du Multi-Modèle sont celles où les cumuls annuels moyens des deux sous-groupes sont les plus proches.

Pour les bassins ayant plus de trois postes, on retrouve des combinaisons particulières efficaces pour les simulations des débits qui séparent les postes centraux de ceux des

extrémités (les postes étant soit vers l'exutoire, soit tout en amont) comme pour le bassins de la Moselle à Metz ou, celui du Loir à Durtal ou celui de la Dore à Dorat tous trois cités en exemple dans l'**Annexe 12**. Nous retrouvons aussi fréquemment, une succession de combinaisons, plus ou moins équivalentes dont certaines dont certains ne sont pas dissociables géographiquement, comme nous pouvons le voir sur l'exemple du bassin de l'Oise à Condren en **Annexe 12**.

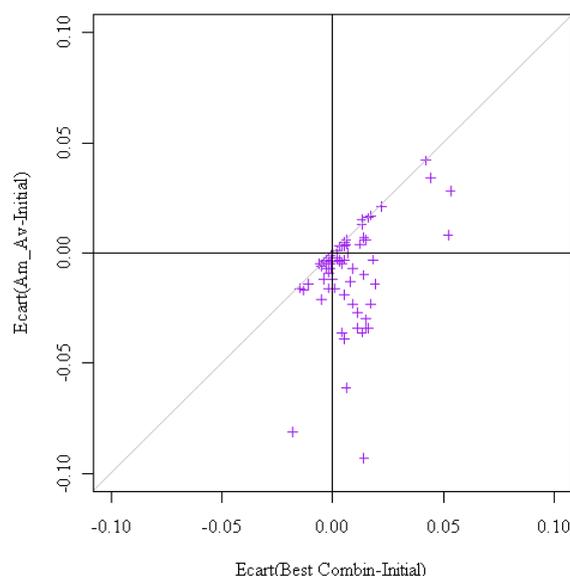


Figure 6.14 Ecarts sur les critères de performances C2M-Q par bassin versant entre la meilleure combinaison de pluviomètres introduite dans le Multi-Modèle et le modèle initial [Ecart(BestCombin - Initial)] en fonction des écarts obtenus entre le Multi-Modèle à deux entrées dit Amont-Aval et le modèle initial [Ecart(Am_Av - Initial)]. Les abscisses et ordonnées positives indiquent les bassins versants où le Multi-Modèle est meilleur que le modèle global pour ce critère.

6.3.2 Sous-échantillonnage de postes pluviométriques pour le calcul de la pluie de bassins en entrée d'un modèle global

Nous allons à présent rechercher si une combinaison optimale utilisée seule en tant que pluie de bassin pour l'alimentation d'un modèle global peut donner de meilleures performances du modèle par rapport à l'utilisation d'une pluie de bassin calculée avec la totalité des postes présents. Les résultats sont étudiés sur l'échantillon total de 99 bassins versants en incluant

les cas à deux postes pluviométriques, où le sous-groupe est alors constitué d'un unique poste avec le modèle GR4H.

La Figure 6.15 représente la distribution des critères de performances C2M-Q par bassin obtenus avec la pluie de bassin évaluée à partir de la moitié des postes en entrée du modèle global ayant conduit aux meilleures performances du modèle (parmi le nombre total de sous-échantillons testés), et la distribution des critères de performance du modèle initial alimenté par une pluie de bassin calculée avec la totalité des postes. Les résultats montrent que les performances sur l'échantillon (où une densité moitié moindre de postes pluviométriques a été utilisée, mais optimisée parmi toutes les combinaisons possibles) se maintiennent par rapport au modèle de référence, la médiane des performances moyennes est même significativement améliorée (0,681 contre 0,664).

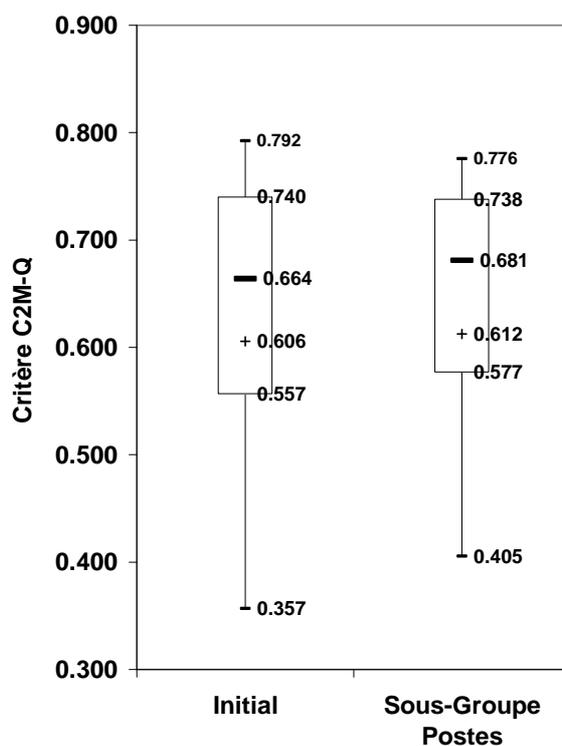


Figure 6.15 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassins versants en contrôle sur l'échantillon de 99 bassins versants avec GR4H en version globale avec une pluie de bassin calculée avec un sous-échantillon optimisé des postes pluviométriques disponibles (Sous-Groupe postes) et sa version de référence où la pluie de bassin est calculée avec la totalité des postes pluviométriques disponibles (Initial).

Les bassins versants qui atteignaient de médiocres performances avec la version initiale arrivent aussi à des améliorations significatives (+0,048 pour les quantiles 10 et +0,020 pour le quantile 0,25). En revanche, les bassins versants ayant de bonnes performances avec la pluie de bassin calculée avec toute l'information voient leurs performances chuter avec cette réduction de moitié du nombre de postes pluviométriques servant au calcul des pluies d'entrées.

Au sein de l'échantillon, il y a 45 bassins versants sur 99 qui bénéficient d'améliorations significatives de leur critère par rapport à la version utilisant la totalité des postes pluviométriques du bassin. Les bassins ayant initialement le plus grand nombre de postes pluviométriques semblent pouvoir bénéficier plus régulièrement de la réduction optimisée du nombre de postes (voir Figure 6.16). Mais, les écarts de performance les plus conséquents, tant positivement que négativement, ont été obtenus pour des bassins comportant deux et trois postes (ce qui signifie des sous-groupes composés de un ou deux postes pour le calcul de la pluie de bassin). Les cartes de disposition des sous-échantillons de postes, pour les bassins où les performances sont supérieures ou équivalentes à celles obtenues avec une pluie de bassin calculée sur tous les postes, sont illustrées en Annexe 12 (Conjointement aux exemples sur les meilleures combinaisons pour le Multi-Modèle à deux entrées).

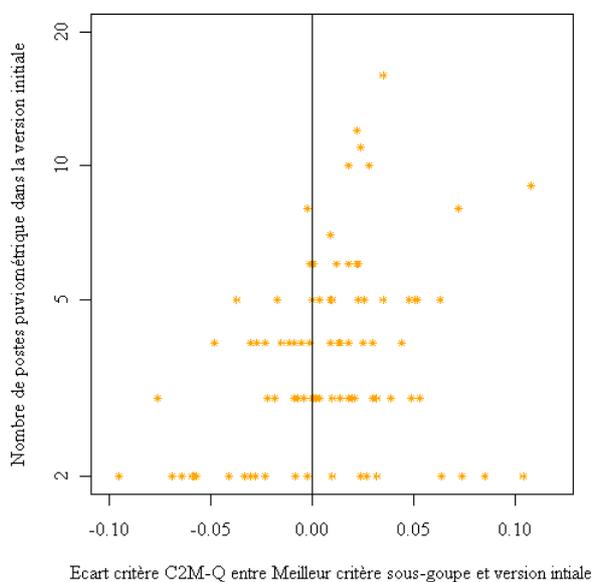


Figure 6.16 Ecarts sur les critères de performance C2M-Q par bassin versant entre le meilleur sous-échantillonnage de pluviomètres pour le calcul de la pluie de bassin et le modèle dont la pluie d'entrées est calculée avec la totalité des postes présents

Le fait qu'un modèle pluie-débit puisse avoir, dans certains cas, de meilleures performances en utilisant un nombre moitié moindre de postes conduirait à accepter que l'augmentation du nombre de postes pluviométriques (au nom de la variabilité spatiale des précipitations) n'est pas systématiquement synonyme de meilleures performances pour le modèle. Certes, la densité de pluviomètres est généralement extrêmement liée à une bonne estimation de la pluie de bassin (Duncan *et al.*, 1993), car une densité correcte de pluviomètres permet de minimiser les erreurs dans le calcul de cette pluie de bassin (St-Hilaire *et al.*, 2003). Cependant, il est nécessaire de rappeler qu'il est impossible de connaître la vraie pluie de bassin. Ainsi, les erreurs sur les calculs de la pluie de bassin sont donc difficilement quantifiables. Généralement, les outils d'analyse des erreurs sur la pluie de bassin testent les facultés de reconstitution de cette pluie en différents points de contrôle mesurés, c'est-à-dire les pluviomètres (voir Moulin, 2007) et/ou la comparent avec la pluie calculée avec la plus forte densité de pluviomètres (indices Gore et Balance d'Andréassian *et al.*, 2001).

Il est admis depuis longtemps que cette bonne estimation de la pluie de bassin est un élément clé pour obtenir de bonnes performances d'un modèle pluie-débit (Beven *et al.*, 1982).

Généralement, le parallèle entre une forte densité de postes et une bonne estimation de la pluie de bassin pour le modèle est vite établi. Paradoxalement, de nombreuses études indiquent qu'il existe un palier de la densité du réseau de postes pluviométriques nécessaire à cette bonne estimation de pluie de bassins permettant d'atteindre de bonnes performances avec un modèle pluie-débit (Andréassian *et al.*, 2001; Dong *et al.*, 2005; Das, 2006). Selon ces auteurs, ce palier est provoqué par la corrélation qui peut exister entre les cumuls des postes pluviométriques proches, ce qui provoquerait une redondance de l'information.

L'addition de postes supplémentaires pour le calcul de la pluie de bassin n'implique pas invariablement une amélioration ou une stagnation des performances mais peut provoquer une chute des performances du modèle. En effet, d'après les résultats présentés précédemment, l'addition de certains postes pluviométriques peut se révéler être un bruit dans le calcul de la pluie de bassin et pourrait ainsi provoquer une baisse significative des performances du modèle hydrologique par rapport à l'utilisation d'une pluie calculée seulement avec une partie du réseau disponible. Ce résultat rejoint celui d'Antil *et al.* (2006) qui avaient remarqué que les prévisions de débit de leur modèle étaient meilleures en prenant 12 postes plutôt que 23 lors d'une étude, assez similaire à celle-ci, de tirages

aléatoires de groupes de postes pluviométriques sur le bassin amont de la Loire à Bas-En Basset (3500 km²).

Ces résultats pourraient être liés à la qualité intrinsèque des postes, certains ayant une information peu représentative en raison de problèmes d'implantation.

Cependant, il est délicat de prédéterminer *a priori* la position géographique au sein du bassin de ces postes détériorant les performances. Les groupes de postes les plus informatifs pour le calcul de la pluie de bassin en vue d'une utilisation en tant qu'entrée d'un modèle pluie-débit sont le plus souvent situés vers le centre de gravité et plutôt vers l'amont des bassins versants où les cumuls sont considérés comme les plus représentatifs (Tsintikidis *et al.*, 2002; Anctil *et al.*, 2006). C'est d'ailleurs cette configuration qu'on retrouve généralement lors de l'analyse cartographique au cas par cas des meilleurs sous-échantillons obtenus (voir **Annexe 12** où sept cas sont représentés). En effet, les sous-échantillons du réseau les plus performants par rapport au réseau total sont avant tout composés des postes pluviométriques avec une situation centrale et/ou vers l'amont (ou proche de crêtes) des limites du bassin versant topographique. Ces endroits les plus plébiscités sont aussi couramment les plus arrosés en termes de cumuls annuels (gradient topographique des précipitations) (voir en exemple en **Annexe 12**, les bassins versants de l'Oise à Condren, de la Bruche à Holtzheim, de la Borne Occidentale à Espaly et dans une moindre mesure ceux de la Drôme à Luc en Diois et de la Dore à Dorat où ces postes sont couplés avec un poste situé vers l'exutoire). Toutefois, un contre-exemple est obtenu avec le bassin de la Moselle à Metz où le poste situé le plus à l'amont, qui est aussi le plus arrosé, est systématiquement rejeté des sous-combinaisons induisant les meilleures performances. L'inspection de ces représentations cartographiques, nous a permis de remarquer que l'ajout de postes à l'aval au niveau de l'exutoire peut se révéler certaines fois contre-productif, comme on peut le voir sur l'exemple du bassin versant de l'Oise à Condren ou bien du bassin de la Borne Occidentale à Espaly. Cet ajout peut aussi être neutre pour les performances du modèle, comme c'est le cas du bassin de la Bruche à Holtzheim.

Finalement, en guise de résumé, les configurations spatiales des meilleurs sous-échantillons pluviométriques sur les bassins étudiés ressemblent plutôt à une succession de géométries particulières difficilement pré-déterminables.

Notons pour finir, que l'amélioration d'un réseau de mesure pluviométrique pour la modélisation pluie-débit n'est pas seulement due à sa densité. En effet, l'optimisation de la localisation des stations pourrait jouer aussi un rôle majeur comme en témoigne les diverses publications sur le sujet tant assez anciennes que très récentes (Rodriguez-Iturbe, 1974; Morrissey *et al.*, 1995; St-Hilaire *et al.*, 2003; Yen-Chang Chen, 2008).

6.4. Passage d'un modèle global à un Multi-Modèle à n entrées

L'échec relatif du passage systématique de une à deux entrées pour tous les bassins versants de l'échantillon, nous indique éventuellement que le degré de discrétisation nécessaire pour les entrées pluviométriques du Multi-Modèle n'est pas suffisant.

L'idée de passer ce nombre d'entrées à n (le nombre de postes pluviométries des bassins) nous a paru intéressante. En effet, cela permet d'optimiser totalement l'information pluviométrique disponible.

Pour débiter, nous évaluerons les performances du Multi-Modèle avec équipondération (EQ) ou pondération spécifique (PO) des sorties des n sous-modèles pour le calcul du débit final. Ensuite, dans l'objectif d'optimiser la superficie d'influence de chaque entrée pluviométrique dans le poids de sorties, nous testerons l'effet de la distribution des poids des débits de sortie par le calcul des aires d'influence de chaque poste pluviométrique construite à partir de la méthode des polygones de Thiessen (voir chapitre 1). Pour finir d'autres méthodes de calcul du débit final de sortie, dites dynamiques, seront explorées.

6.4.1 Multi-Modèle à n entrée (un sous-modèle par poste pluviométrique)

6.4.1.1 Pondération classique EQ et PO

Nous avons comparé les performances de quatre Multi-Modèle à n entrées variant selon le choix d'optimisation des paramètres (PXD ou PD) et les choix de pondération des

sorties des sous-modèles (équipondération (EQ) ou pondérations spécifiques (PO)) sur le modèle GR4H et sur l'échantillon d'analyse de 73 bassins versants³⁹.

Au niveau des performances sur l'échantillon de ce Multi-Modèle à n entrées, on peut remarquer que quelle que soit la variante de la méthode choisie, il est impossible de dépasser significativement les performances du modèle global (voir Figure 6.17). En effet, la distribution des performances du Multi-Modèle à n entrées est très proche de celle du modèle à deux entrées. De la même façon, pour les autres modèles testés (IHACRES, MORDOR6 et MORDOR 5), la distribution en n entrées pluviométriques n'a apporté aucune information supplémentaire par rapport aux résultats précédents.

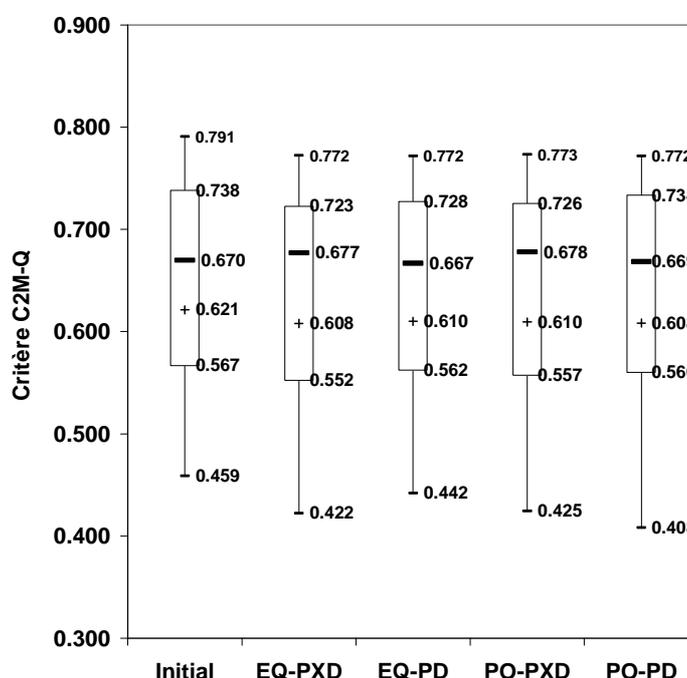


Figure 6.17 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en validation sur l'échantillon pour GR4H global (Initial) et les quatre stratégies possibles de distribution des entrées grâce au Multi-Modèle avec un sous-modèle par poste pluviométrique

³⁹ Les tests sont réalisés au pas de temps horaire sur les 73 bassins versants de l'échantillon au moins trois postes pluviométriques. En effet, pour les bassins versants ayant deux postes, le maximum d'exploitation de l'information pluviométrique était déjà atteint avec un Multi-Modèle à deux entrées.

La Figure 6.18 donne les écarts de performance qui existent entre le Multi-Modèle à un sous-modèle par poste pluviométrique et la version globale initiale en fonction de la superficie des bassins versants. Ce sont les grands bassins (+ de 5000 km²) qui profitent le plus de l'approche Multi-Modèle. Mais, pour cette catégorie de superficie, il y a également de nombreuses dégradations du critère de performance. Les bassins qui plébiscitent le plus le modèle global sont ceux dont les superficies se situent aux alentours de 1000 km². De plus, la distribution des écarts par rapport à la superficie reste quasiment identique à celle obtenue pour la version du Multi-Modèle à deux sous-modèles (Figure 6.9 en haut à gauche). Ainsi, la corrélation entre superficie du bassin versant ou le taux de discrétisation des entrées, avec les améliorations des performances par le Multi-Modèle, reste très floue.

De même, aucun déterminisme géographique sur la situation des bassins plébiscitant par leur performance le Multi-Modèle n'a été décelé, et aucun lien avec les indices de variabilité spatiale des précipitations par bassin définis dans le chapitre 3.

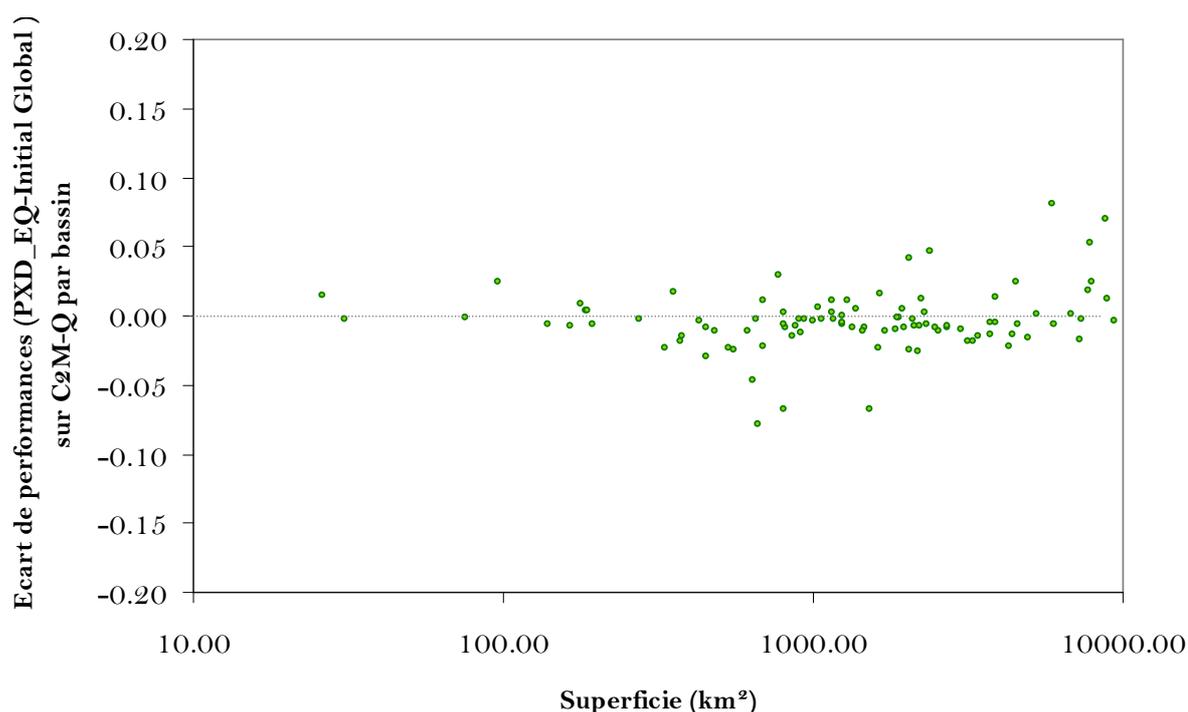


Figure 6.18 Ecart de performance entre un Multi-Modèle à n sous-modèles et le modèle global initial en fonction de la superficie de chaque bassin versant de l'échantillon

6.4.1.2 Un seul poste pour l'estimation de la pluie de bassin en entrée du modèle global GR4H

L'élaboration de cette méthode nous a permis d'analyser les performances de chaque sous-modèle dans leur version globale avec la pluie d'entrée équivalente à celle d'un seul poste pluviométrique pour chaque bassin versant.

Nous avons recherché si les cumuls horaires d'un poste pluviométrique, utilisé seul en tant que pluie de bassin pour alimenter le modèle global, pouvaient conduire à des performances supérieures ou égales du modèle par rapport à l'utilisation d'une pluie de bassin calculée sur la totalité des postes présents pour ce bassin. Les résultats sont étudiés sur l'échantillon total de 99 bassins versants avec le modèle GR4H.

La Figure 6.19 représente la distribution des critères de performance obtenus par bassin avec le poste pluviométrique ayant conduit aux meilleures performances du modèle parmi les n postes testés pour chaque bassin. Cette figure présente, de la même façon, la distribution des critères de performance du modèle initial alimenté par une pluie de bassin calculée avec la totalité des postes (soit la version initiale de référence). Les résultats montrent que les performances moyennes sur l'échantillon (où un seul poste pluviométrique a été utilisé, mais optimisé parmi tous les postes présents en fonction de ses performances individuelles) sont globalement inférieures par rapport au modèle de référence alimenté par la pluie de bassin classique. La moyenne des performances subit une chute de 0,036 (0,606 contre 0,570). Cependant, la différence entre les deux versions n'est pas démesurée au regard de la baisse du nombre de postes pluviométriques utilisés pour estimer la pluie de bassin. Au sein de la base de données utilisée, les bassins ayant des performances initiales faibles sont ceux qui bénéficient le plus d'une approche à un poste (quantiles 0,1 passant de 0,357 à 0,410). Parmi ceux-ci, les bassins dont les performances initiales sont négatives sont restés insensibles à l'utilisation d'un seul poste plutôt que les n présents (ceci indique que les précipitations ne sont probablement pas la cause première de ces faibles performances).

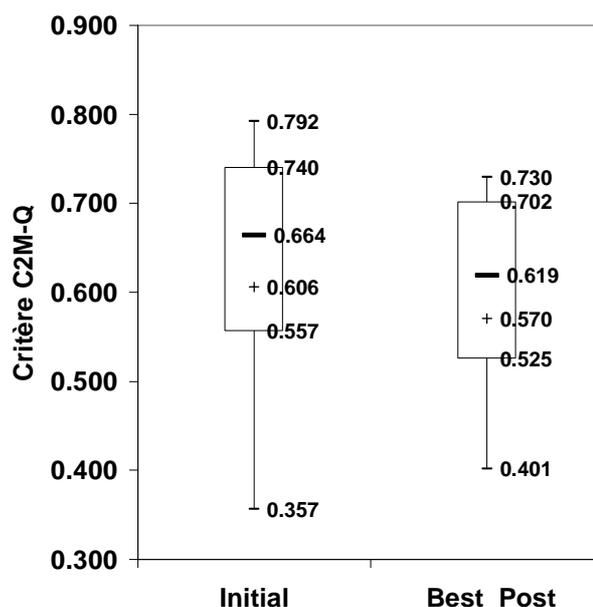


Figure 6.19 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en contrôle sur l'échantillon de 99 bassins versants avec GR4H en version globale avec une pluie de bassin calculée avec un seul des postes pluviométriques disponibles (le meilleur parmi les n présents=Best_Post) et sa version de référence où la pluie de bassin est calculée avec la totalité des postes pluviométriques disponibles (Initial).

La Figure 6.20 nous confirme que les performances d'une majorité de bassins versants (60 cas sur 99) sont significativement dégradées par l'utilisation d'un seul poste. Les améliorations les plus conséquentes de performance ont lieu pour trois bassins où les performances initiales étaient très faibles (passant de 0,063, 0,193 et 0,31 à respectivement 0,297, 0,294 et 0,415). Des bassins versants ayant des performances « dans la moyenne » arrivent aussi à bénéficier de la réduction « optimisée » à un seul poste (deux bassins passent de respectivement 0,563 et 0,598 à 0,648 et 0,672). Par contre, on ne retrouve plus aucune amélioration pour les bassins ayant les performances initiales les meilleures (supérieures à 0,75). Ce résultat reflète le fait que pour atteindre ce niveau de critère, de fortes densités de postes pluviométriques sont généralement indispensables.

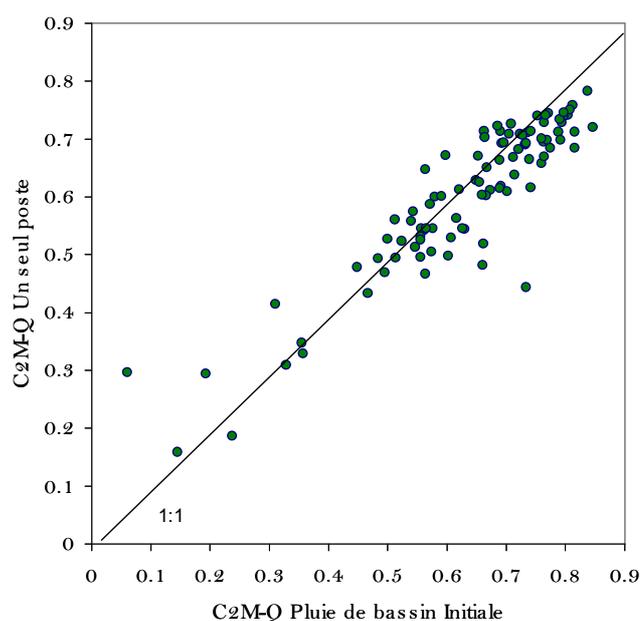


Figure 6.20 Comparaison de critère de performances ($C2M-Q$) par bassin obtenues avec pour une version où seul le meilleur des postes pluviométriques est utilisé en entrée de GR4H et avec la version initiale avec pluie de bassin calculée sur tous les postes. Les bassins où les meilleures performances sont atteintes avec un seul poste sont situés au-dessus de la bissectrice ; les performances négatives, restées identiques pour les deux approches, ne sont pas représentées.

Nous avons étudié les évolutions de performances en passant de 1 à n postes pluviométrique pour le calcul de la pluie de bassin en fonction du nombre de postes disponibles (Figure 6.21). L'écart entre les deux versions est beaucoup plus variable pour les bassins ayant initialement deux postes car le poids d'un seul poste est alors logiquement beaucoup plus important dans le calcul de la pluie de bassin. Pour les deux bassins versants où la pluie de bassin est calculée initialement avec 14 ou 16 postes (de superficie de 4600 à 8800 km²), il est possible de trouver un poste (pour 8000 km² au pas de temps horaire !) qui, utilisé seul en tant qu'entrée de pluie pour le modèle GR4H, va fournir des simulations légèrement meilleures des débits qu'une entrée de type pluie de bassin calculée avec 16 fois plus de postes pluviométriques.

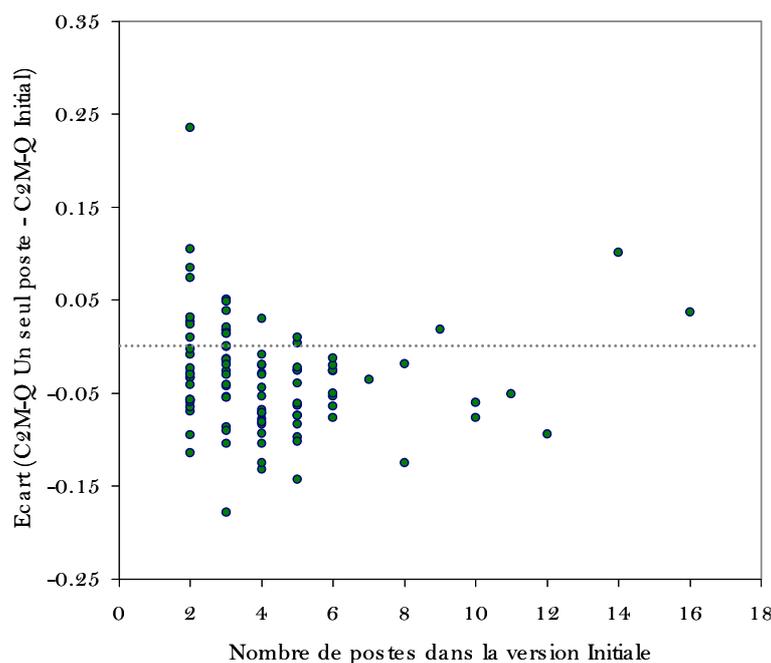


Figure 6.21 Ecart des critères (C2M-Q) pour un seul poste et avec la version Initiale, par bassin versant en fonction du nombre de postes disponibles. Les ordonnées positives signifient que la version utilisant un seul poste est meilleure.

Les postes dont les cumuls décrivent à eux seuls le mieux le débit à l'exutoire sont généralement situés dans une zone centrale et plutôt vers l'amont des bassins versants topographiques (zone qui reçoit en règle générale le plus d'eau) (voir les sept exemples illustrées en **Annexe 12**). Toutefois, il peut arriver que ces postes soient situés à l'extérieur du bassin comme en témoigne le cas de la Bruche à Holtzeim (670 km²) où le poste est situé dans un vallon de l'autre côté d'une crête (toujours visible en **Annexe 12**). Nous pouvons également citer un autre exemple, celui du bassin de la Marne à la Ferté-sous-Jouarre (8800 km²), où le poste pluviométrique optimal est situé sur une crête montagneuse des Vosges en amont du bassin.

En règle générale, ce poste "optimal" fait partie du sous-échantillon de la totalité des postes identifiés précédemment, dont la pluie moyenne associée conduit aux meilleures performances du modèle (voir 6.3.2). Ainsi, les critères de performance du modèle entre ces meilleurs sous-échantillons issus de la moitié des postes totaux et le meilleur poste utilisé seul ne sont pas très éloignés. Ce résultat doit signifier que l'information de la pluie de bassin est, sur certains bassins, avant tout portée par un poste pluviométrique décrit comme

capital pour la simulation des débits, le reste des postes apportant une information complémentaire, quelques fois négligeable, parfois une information nuisible.

Il y a donc certaines fois un intérêt à repérer ce poste pour une meilleure simulation des débits. Pour ce repérage, un autre facteur désignant les postes conduisant à la meilleure représentativité de la pluie pour les débits simulés pourrait être la qualité intrinsèque de l'information fournie par ce poste (niveau d'entretien, positionnement local, proximité des bâtiments...). Il serait donc intéressant de caractériser ces postes par des critères de fiabilité. Ce genre de critères, en cours d'élaboration pour les postes du réseau de Météo-France sous forme d'indices de qualité de 1 à 5, sera normalement disponible pour la fin 2008 (Bruno Rambadelli, Météo France, communication personnelle).

Il est aussi important de rajouter que des tests équivalents ont été réalisés sur les autres structures de modèles (MORDOR6 et IHACRES) sur le même échantillon au pas de temps horaire. Les résultats indiquent que généralement les postes, dont les cumuls sont utilisés seuls pour alimenter le modèle, et qui conduisent à de meilleures performances sont similaires à ceux identifiés avec le modèle GR4H. Ainsi, ces postes les plus informatifs pour la simulation des débits ne sont pas dépendants de la manière qu'a le modèle d'appréhender les précipitations en entrée.

6.4.2 Pondération des débits de sortie des sous-modèles pour les polygones de Thiessen

Nous allons comparer les performances d'un modèle global initial et sa version Multi-Modèle à un modèle par poste dont le poids sera fonction de l'aire d'influence de chaque poste évaluée à partir des polygones de Thiessen. Afin de rendre objective la comparaison, il a été nécessaire de calculer la pluie globale de bassin servant d'entrée au modèle Initial global de référence en pondérant chaque pluviomètre par la surface d'influence représentée par ces mêmes polygones. Les tests sont réalisés sur les 99 bassins de l'échantillon avec l'approche de distribution des paramètres PXD avec le modèle GR4H.

La Figure 6.22 présente les distributions des critères de performances C2M-Q pour ces deux méthodes utilisant l'information commune des aires d'influences de chaque poste. On remarque sur cette figure que les critères de performance obtenus par le Multi-Modèle sont moins élevés que pour la version globale initiale. Le fait de pondérer chaque débit de **sortie**

des sous-modèles par l'aire d'influence de chaque précipitation d'entrée n'apporte donc pas d'information significative sur l'échantillon de bassins versants testés.

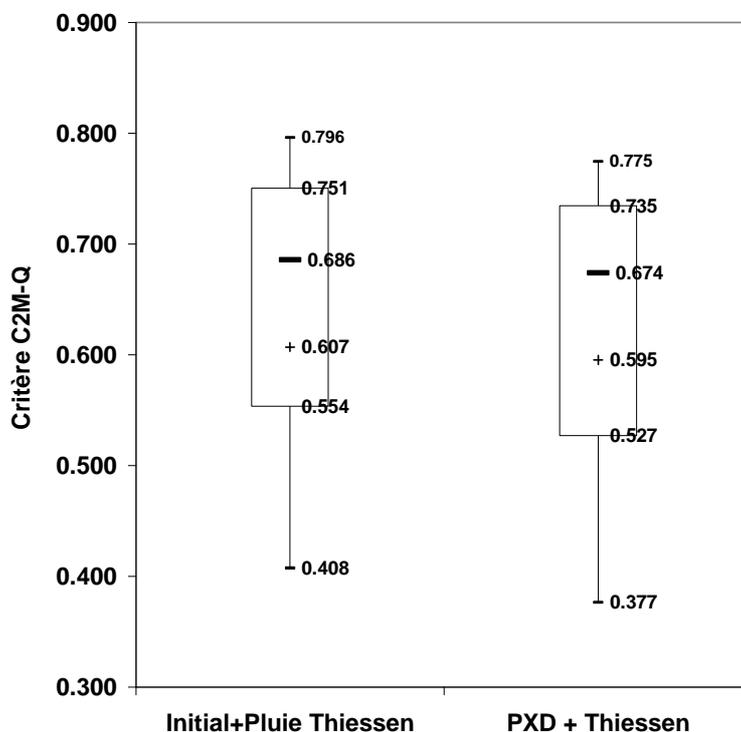


Figure 6.22 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères C2M-Q par bassin versant en contrôle sur l'échantillon pour GR4H global et le Multi-Modèle avec un sous-modèle par poste pluviométrique dont le poids est fonction de l'aire d'influence de chaque poste.

Par contre, ce résultat nous permet de comparer la distribution des performances moyennes pour le modèle global dont la pluie moyenne est calculée soit avec la moyenne arithmétique équipondérée des postes (Figure 6.1 (à droite Initial), soit avec la moyenne pondérée par l'aire d'influence des polygones de Thiessen. Des différences significatives apparaissent en faveur du modèle dont la pluie est issue du calcul de la pluie de bassin par les polygones de Thiessen notamment pour la médiane et les quantiles 0,75 et 0,9.

6.4.3 Sélection dynamique des débits de sorties

La définition du débit de sortie du Multi-Modèle par sélection dynamique produit à chaque pas de temps un débit de sortie final provenant d'un sous-modèle particulier répondant à des caractéristiques spécifiques. Un premier cas consiste à supposer que le débit qui représentera

le mieux la sortie est le débit central (la médiane) de la distribution des débits de sortie des n sous-modèles (noté par la suite MED). Nous avons défini d'autres représentations qui stipuleraient que le débit de sortie final correspond à la valeur du débit maximum (mode MAX) ou minimum (mode MIN) des sorties des n sous-modèles.

Les distributions des critères de performance sur l'échantillon des 99 bassins versants avec le modèle GR4H indiquent que ces trois modes (MED, MAX et MIN) de choix des débits de sortie du Multi-Modèle ne sont pas plus informatifs en termes de performances globales sur cet échantillon que GR4H dans sa version globale alimentée par la pluie de bassin. Afin d'éviter de charger inutilement la rédaction, nous ne présenterons pas ces résultats. Nous pouvons indiquer que les performances du mode MED sont du même ordre de grandeur que le Multi-Modèle utilisant la moyenne des sorties et que les modes MIN et MAX sont, quant à eux, très en-dessous.

Néanmoins, toutes ces variantes de calcul du débit de sortie peuvent se révéler très instructives lors de l'analyse du résultat du modèle en mode événementiel (par opposition à l'analyse en continu des chroniques à laquelle ont été consacrés les travaux de cette thèse). En effet, suite à l'inspection de divers événements de crue, on a pu identifier une multitude de cas. Ainsi, la version sélectionnant le débit MAX de sortie du Multi-Modèle arrive certaines fois à coller parfaitement à la crue quand le mode global la sous-estime fortement. Mais pour d'autres crues, ce mode MAX peut être complètement au-dessus de l'observé (alors que le global est bon). Ce même mode MAX peut aussi simuler des débits fortement sous-estimés par rapport à l'observé. De même, pour les autres modes de calcul des sorties du Multi-Modèle (MED, MIN ou voir EQ), ceux-ci sont tour à tour, soit les plus proches par rapport à l'observé, soit les plus éloignés. Finalement aucun critère de décision ne nous permet de définir le choix du meilleur débit de sortie du Multi-Modèle.

Toutefois, un résultat probablement intéressant pour les modèles pluie-débit en prévision, est que généralement la sortie selon un certain mode de sélection du Multi-Modèle la plus proche de l'observé pour un événement était déjà la meilleure en début d'événement. Ceci ouvre certaines perspectives pour l'amélioration des méthodes de gestion d'erreur pour les modèles de prévision des débits en temps réel (car en prévision, on dispose de l'information du débit observé au pas de temps précédent). En effet, cette méthodologie rejoint les méthodes classiques de Multi-Modèle utilisées en prévision (Voir 5.2.1). Le principe de ces

méthodes, utilisant un Multi-Modèle avec différentes structures de modèle (mais les mêmes entrées de précipitations) est de donner le plus de poids à chaque pas de temps à la meilleure structure au pas de temps précédent. Pour notre cas, on prendrait le modèle avec la meilleure entrée pluviométrique ou la meilleure combinaison de débit.

Une autre perspective intéressante serait d'analyser l'enveloppe que forment les débits de sortie du mode MAX et MIN (ou des quantiles caractérisant les deux extrémités de la distribution) autour du débit observé. Cette enveloppe permettrait en quelque sorte de définir un intervalle de confiance du débit simulé en relation avec les différentes mesures de précipitations sur le bassin versant. Cet encadrement des débits simulés pourrait être assimilé à l'erreur produite par le calcul de la pluie de bassin (par exemple, différence sur la pluie d'entrée si la pluie avait été évaluée avec le poste recevant le moins d'eau ou le plus d'eau). Un exemple de l'étendue de cette enveloppe est donné en Figure 6.23 pour le bassin versant de L'Ill à Ensisheim (1070 km²) où le Multi-Modèle est alimenté par trois sous-modèles dont les entrées proviennent de trois pluviomètres. Il s'agirait pour la suite de ces travaux d'élaborer ou d'adapter un critère qui évalue la qualité de cette enveloppe (étendue moyenne en crue ou/en étiage, nombre d'événements ou de pas de temps où l'observé est à l'extérieur de l'enveloppe) puis, de confronter ce critère de qualité à l'intensité de la variabilité spatiale des précipitations du bassin versant.

Il serait également intéressant de comparer les résultats obtenus à ceux de Moulin (2007) qui construisait une enveloppe avec divers débits simulés par l'introduction d'incertitudes dans le calcul de la pluie bassin.

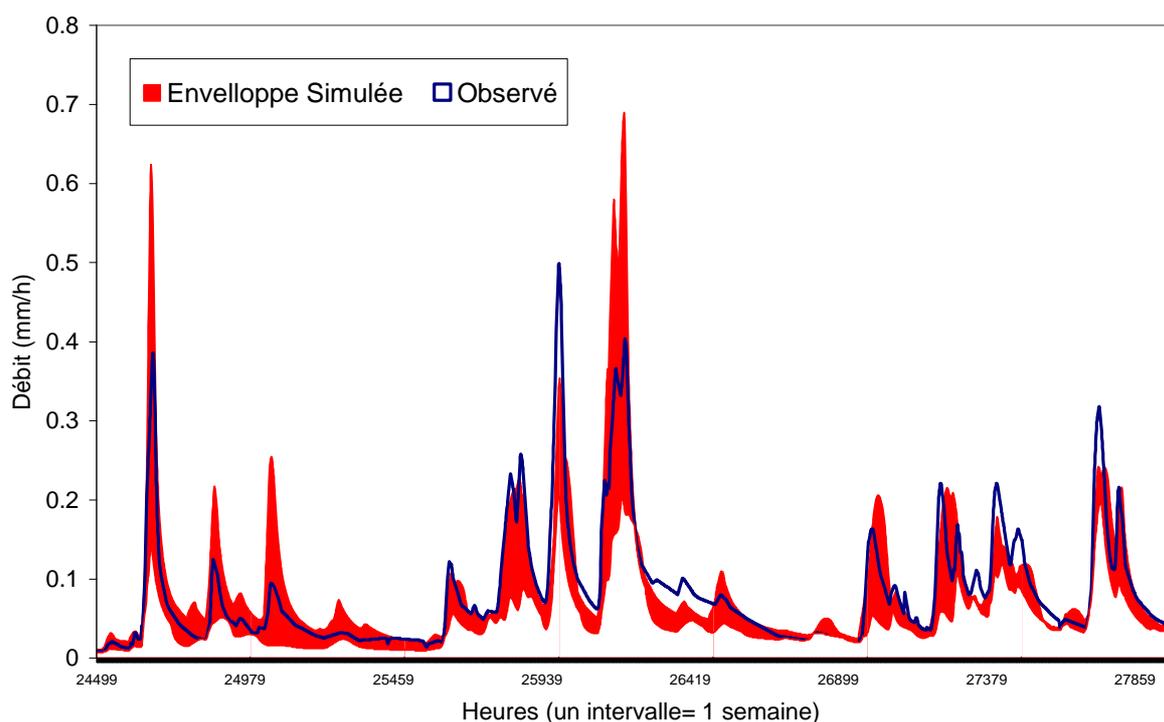


Figure 6.23 Chronique au pas de temps horaire de l'enveloppe produite par le débit Max et le débit Min de sortie de Multi-Modèle de GR4H (à partir de 16/10/1999)

6.5. Synthèse des tests effectués

Nous avons évalué dans ce chapitre les résultats d'une méthode Multi-Modèle permettant une distribution simple des entrées pluviométriques avec l'objectif de prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations sur un grand échantillon de bassins versants.

Les tests ont été divisés en deux étapes. Tout d'abord une division des précipitations en deux sous-modèles alimentés par deux entrées pluviométriques distinctes représentant les pluies amont et aval a été effectuée. Ensuite, une division en n sous-modèles alimentés chacun par les cumuls d'un unique poste pluviométrique (un modèle par pluviomètre) a été testée. Cette seconde division a été élaborée dans le but d'utiliser le potentiel maximum de l'information de pluie disponible. Pour chaque étape, plusieurs méthodes de pondération du débit de sortie et de distribution du vecteur de paramètres ont été évaluées, ainsi que différentes structures de modèles globaux.

Les résultats montrent **qu'aucune des structures de modèle ne semble bénéficier globalement d'une distribution des pluviomètres que ce soit, en deux ou en n sous-modèles**. En effet, les méthodes testées n'apportent aucune amélioration significative supplémentaire par rapport aux critères de performance obtenus avec les mêmes modèles pris dans leur version globale. De plus, même si sur certains bassins, le Multi-Modèle, censé prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations, peut produire des résultats significativement meilleurs, aucun critère ne permet d'expliquer ce résultat en fonction des caractéristiques (superficie ou variabilité spatiale globale des précipitations du bassin). Enfin, le fait que le Multi-Modèle dégrade les performances sur un nombre important de bassins n'en fait pas une solution durablement acceptable pour la modélisation hydrologique pluie-débit.

Ce résultat va à l'encontre de ceux obtenus dans la thèse de Mathevet (2005) qui avait obtenu des gains significatifs de performances (+0,035) sur le critère C2M-Q par rapport au modèle global avec l'utilisation d'une version Multi-Modèle du modèle GR4H de type POPD (pondération des débits de sortie par les critères en calage des sous-modèles et un vecteur de paramètres commun pour tous les sous-modèles). Cette différence de résultat pourrait venir de la base de données utilisée par Mathevet qui semble de moins bonne qualité que celle que nous avons utilisée (nombreuses lacunes dans les postes pluviométriques). La moyenne des performances de la version globale de son échantillon en contrôle était de 0,44 sur C2M-Q, contre à 0,621 pour le nôtre sur le même modèle. Par ailleurs, Mathevet avait réalisé un calage des paramètres du modèle sur une durée de seulement une année (contre quatre pour cette étude) ce qui pourrait avoir influencé les résultats.

Notre résultat va aussi à l'encontre de ceux obtenus par Fenicia *et al* (2008). Ces auteurs ont distribué les réservoirs d'interception et non-saturé du sol du modèle global Flex en huit sous-réservoirs alimentés par les précipitations correspondantes des huit polygones de Thiessen du bassin versant expérimental de l'Alzette au Luxembourg (1090 km²). Ils ont obtenu de meilleurs résultats que la version globale initiale de ce même modèle. Ces résultats, obtenus sur un seul bassin, ne sont, au vu de nos propres résultats, pas généralisables. Mais, ces auteurs avaient remarqué que l'ajout d'un paramètre de distance du polygone à l'exutoire n'apportait, quant à lui, pas d'amélioration de performance du modèle

testé. Cette faible influence de la distance à l'exutoire va dans le même sens que nos résultats. Il s'agirait de vérifier ce résultat sur un échantillon plus large de bassins.

Finalement, les résultats obtenus, dans le cadre des tests effectués ici, suggèrent deux interprétations :

- soit l'insensibilité des résultats à la multiplication des entrées dans le but de corriger les imperfections d'une pluie de bassin utilisée seule est causée par la faculté qu'a le modèle d'adapter son vecteur de paramètres aux imperfections de la pluie d'entrée (Andréassian *et al.*, 2001; Oudin *et al.*, 2006b)
- soit cette insensibilisé des résultats provient du fait que le bassin versant se comporte tel un filtre passe bas lissant les variations spatiales et temporelles des entrées de pluies (Oudin *et al.*, 2004).

Toutefois, d'un point vu fonctionnel, cette approche Multi-Modèle nous a permis d'évaluer le modèle global avec l'utilisation en entrée de différentes combinaisons de postes pluviométriques ou de postes utilisés seuls. Il est apparu que ces sous-échantillons ou ces postes seuls apportent certaines fois plus d'information pour la simulation des débits qu'une pluie de bassin calculée avec la totalité du réseau. Les postes les plus intéressants seraient en règle générale ceux situés dans la partie amont du bassin versant. Toutefois, d'un point de vue opérationnel, par exemple pour la prévision des débits en temps réel, l'utilisation d'un poste unique n'est absolument pas recommandable (ne serait-ce qu'en cas de panne de l'appareil !).

Par ailleurs, pour la prévision des débits en temps réel, la méthode du Multi-Modèle constituée d'un sous-modèle de structure identique alimenté par des entrées pluviométriques distinctes ouvre certaines perspectives avec la sélection possible du meilleur débit de sortie du sous-modèle alimenté par une de ces entrées.

Des perspectives pour le modèle en simulation sont également intéressantes pour la création d'intervalles de confiance du débit simulé à partir de la variabilité des cumuls entre les postes pluviométriques disponibles.

Chapitre 7

Synthèse des tests sur des modèles globaux et analyse de sensibilité sur un modèle distribué

7.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté de nombreux essais visant à exploiter l'information disponible sur la variabilité spatiale des précipitations tout en conservant des schémas de modélisation numériquement simples. Deux grandes catégories d'approches ont été testées, à savoir :

- l'utilisation d'indices synthétiques quantifiant la variabilité spatiale des précipitations, pour modifier temporellement le fonctionnement du modèle hydrologique ;
- la mise au point d'approches Multi-Modèle permettant d'exploiter plus explicitement la diversité de l'information pluviométrique telle qu'elle est fournie par un réseau de postes pluviométriques.

Ces approches n'ont pas permis globalement d'apporter des gains significatifs de performance pour la simulation des débits. Cependant, sur certains bassins, une ou plusieurs des approches testées ont permis des progrès significatifs par rapport à la modélisation globale n'utilisant que la pluie moyenne de bassin en entrée.

Nous allons, dans ce chapitre, dresser un bilan des tests présentés précédemment. Bien que les méthodes testées dans le cadre de cette thèse ne soient probablement pas exhaustives, nous allons essayer d'analyser ce que nous pouvons espérer tirer, au mieux, de la variabilité spatiale des pluies pour la modélisation hydrologique globale. L'idée est d'évaluer, parmi tous les tests effectués, la limite supérieure des gains qui semblent atteignables par le type d'approches utilisées au cours de cette thèse.

Dans un second temps, pour avoir une référence comparative externe aux approches explorées ici et pour évaluer ainsi plus objectivement nos résultats, nous présentons les résultats d'une analyse de sensibilité d'un modèle distribué à la variabilité spatiale de l'information pluviométrique. Les modèles distribués sont en effet structurellement conçus pour tenir compte explicitement de cette variabilité, ce qui n'était pas a priori le cas pour les modèles globaux testés jusqu'à présent. Ces modèles distribués sont donc aujourd'hui considérés, par la communauté hydrologique en général, comme les mieux armés pour rendre compte de l'impact de la variabilité spatiale des précipitations sur les débits.

7.2.Synthèse des différentes approches testées dans la thèse

7.2.1 Objectifs

Les différentes approches testées ont montré des résultats variables, et il semble nécessaire à ce stade d'établir un bilan plus général de nos résultats. Que peut-on gagner à prendre en compte la variabilité spatiale des précipitations pour la simulation des débits ? En moyenne, apparemment pas grand-chose sur un grand échantillon de bassins, comme nous l'avons vu tout au long des chapitres précédents. Lorsque des progrès sont obtenus par rapport à une approche globale au sens strict, ceux-ci sont généralement modestes et peu significatifs. Derrière ces résultats moyens se cache cependant une certaine variabilité, avec des bassins où l'on gagne et d'autres où l'on perd. Jusqu'à présent, pour une approche donnée, nous n'avons pas réussi à établir un lien de cause à effet entre les caractéristiques du bassin (ou de la variabilité de la pluie) et l'efficacité de la méthode. Et s'il existait une complémentarité entre les différentes approches que nous avons testées ? Autrement dit, existe-t-il, parmi les approches testées, certaines qui se prêtent mieux à certains types de bassins ?

C'est cette idée que nous allons explorer maintenant. L'objectif est d'identifier, bassin par bassin, les meilleurs gains que nous avons pu obtenir en exploitant l'information de variabilité spatiale des pluies. Cela permettra peut-être de mettre en évidence une certaine complémentarité entre les différentes approches que nous avons testées.

7.2.2 Analyse de la complémentarité des deux approches

Pour permettre des comparaisons simples, nous avons choisi l'échantillon des 99 bassins versants au pas de temps horaires sur lequel nous avons testé la majorité de nos méthodes. Nous ne retiendrons ici que le modèle GR4H, qui a servi à la plupart des tests. Pour simplifier les choses, nous n'avons gardé que les deux versions les plus performantes parmi toutes les options testées, à savoir :

- Une approche globale d'introduction de l'indice statistique au sein du modèle. Nous avons retenu une modification de la pluie efficace $k=0,6$ sous hypothèse Inverse. Cette approche sera désignée par la suite INDICES;
- l'approche Multi-Modèle avec deux sous-modèles Amont/Aval⁴⁰ avec équipondération des débits de sortie et une distribution des paramètres. Nous la désignerons par la suite MULTI-MODELE

Ces différentes approches offrent une bonne synthèse des options qui ont été testées dans les chapitres précédents.

7.2.3 Cohérence des résultats entre approches

Dans un premier temps, nous avons regardé s'il existe un lien entre les résultats des différentes approches testées bassin par bassin. Pour cela, nous avons comparé les évolutions des critères de performance obtenues par les différentes approches en contrôle par rapport à l'approche globale. La Figure 7.1 montre la relation entre ces évolutions de performance.

Nous pouvons remarquer que, pour 80% des bassins, les évolutions de performance vont dans le même sens pour les deux approches (dégradation par les deux approches ou améliorations pour les deux approches). Cette relative cohérence tendrait à indiquer que les deux approches, bien que très différentes réussissent à extraire une information comparable sur la variabilité des précipitations. Cependant, la dispersion autour de la première bissectrice indique que les niveaux d'évolution des performances obtenus par les deux approches vont être très différents d'un bassin à un autre. Ces différences incitent à regarder ce que l'on gagnerait en performances si l'on conservait pour chaque bassin la plus performante des deux approches (c'est-à-dire si l'on prenait l'approche avec indice pour les

⁴⁰ Cette approche est aussi performances que le Multi-Modèle à un sous-modèle par poste pluviométrique, mais nous avons préféré conserver la plus simple..

bassins situés sous la première bissectrice de la Figure 7.1 et l'approche Multi-Modèle pour les autres). C'est ce que nous décrivons dans la partie suivante

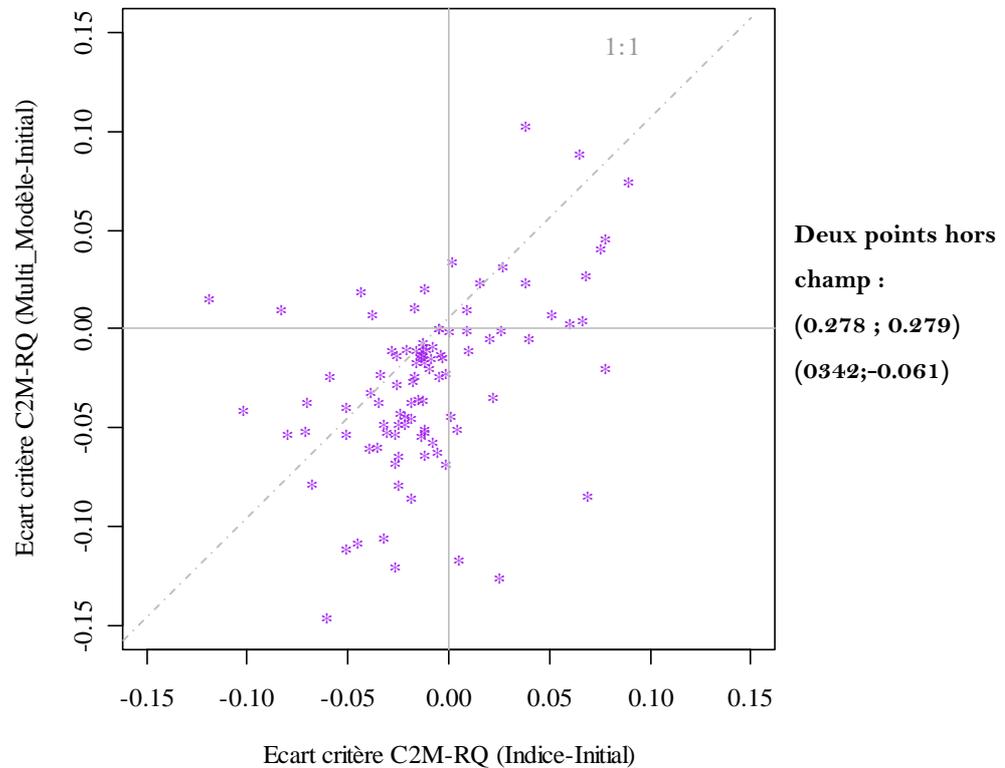


Figure 7.1 Comparaison des écarts de performances Ecart entre les deux versions sélectionnées (INDICE et MULTI-MODELE) et le modèle Initial (les abscisses et les ordonnées positives indiquent que c'est la version modifiée qui surpasse la version Initial globale)

7.2.4 Identification du modèle "idéal"

Dans un second temps, nous avons donc sélectionné, pour chaque bassin, l'approche qui donnait les meilleurs résultats. Deux sélections ont été effectuées :

- la première sur les résultats au calage, que nous appellerons dans la suite sélection *A priori* ;
- la seconde sur les résultats en contrôle, que nous appellerons dans la suite sélection *A posteriori*.

Dans les deux cas, nous avons regardé les résultats en contrôle, comme nous l'avons fait tout au long de cette thèse. Il est probable que le mode de sélection *A posteriori* conduise à de

meilleurs résultats que celui a priori. Cependant, l'idée est ici de voir la stabilité des approches sur chaque bassin lorsque l'on passe du calage au contrôle.

Cette sélection de la meilleure approche par bassin va conduire à ce que nous appellerons par la suite le modèle "idéal". Bien entendu, il n'est idéal que relativement aux différentes approches testées ici. Il n'a pas de prétention à représenter un modèle parfait !

La Figure 7.2 montre les distributions des performances obtenues en contrôle sur le critère C2M-RQ sur l'échantillon des 99 bassins par le modèle GR4H global, le modèle idéal *A priori* et le modèle idéal *A posteriori*, ainsi que pour les deux versions modifiées Indice et Multi-Modèle.

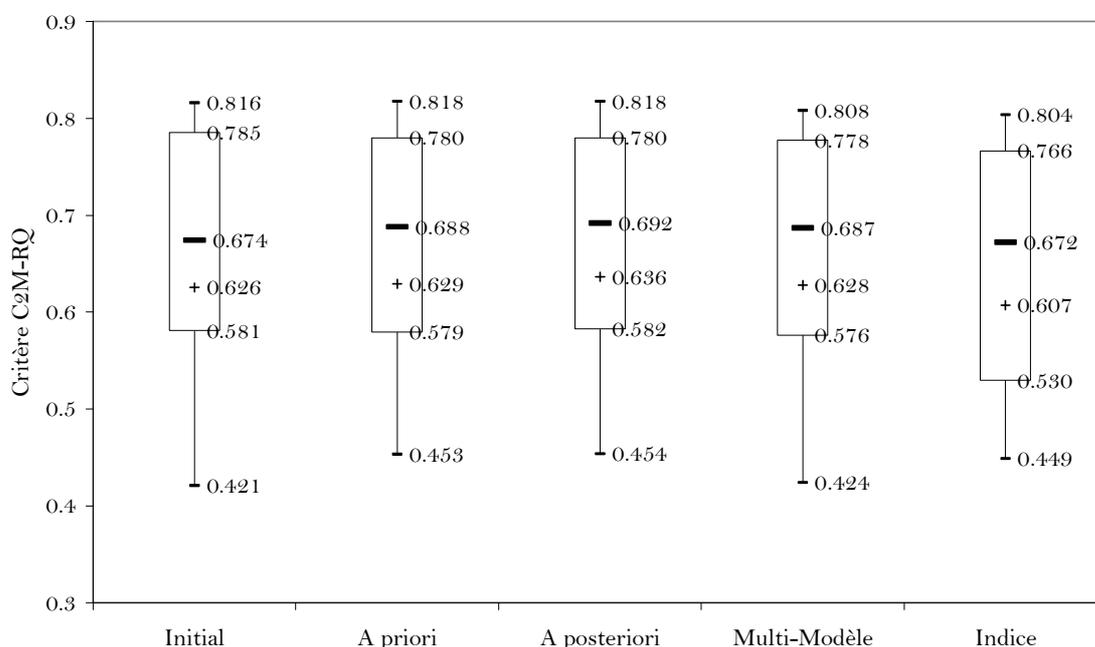


Figure 7.2 BoxPlot [(-) Médiane et (+) Moyenne] de la distribution de performances du critère C2M-RQ en contrôle obtenues pour le modèle Idéal version *A priori* et le modèle Idéal version *A posteriori*, le modèle initial GR4H et les approches Multi-Modèle et Indice sélectionnées sur les 99 bassins versants de l'échantillon

La version *A posteriori* (celle où l'on construit uniquement sur les meilleures performances en contrôle) obtient logiquement les meilleurs résultats en termes de moyenne et médiane sur l'échantillon (+0.010 sur la moyenne +0.018 sur la médiane) par rapport à la version initiale globale). La version *A priori* est cependant plus réaliste en termes de performance, même si les écarts sont faibles entre les deux versions.

Les gains obtenus par les approches "idéales" ont ceci d'intéressant qu'ils donnent une idée de la limite supérieure de performance que l'on peut atteindre avec les approches explorées au cours de cette thèse. Ce gain semble en moyenne être très inférieur à 0.01.

Le Tableau 7.1 montre par ailleurs la composition des deux modèles idéaux en indiquant le nombre de bassins versants sélectionnés pour chacune des deux approches retenues. Les modèles "idéaux" sont composés à 60% par l'approche Multi-Modèle que ce soit dans la version *A Posteriori* ou, dans une moindre mesure dans la version *A priori*. Le nombre de bassins préférant le Multi-Modèle étant plus important dans la version *A posteriori* indiquerait que l'approche Multi-Modèle est sensiblement plus robuste que l'approche avec Indice.

Néanmoins, les gains obtenus pour cette version idéale ne sont pas prodigieux car ce sont en règle générale les mêmes bassins qui profitent des deux versions. En effet, le gain apporté par la version Idéale par rapport aux approches prises séparément est minime (par exemple, on obtient seulement +0.8 en moyenne en mélangeant *A posteriori* les deux approches par rapport au Multi-Modèle utilisé seul)

Tableau 7.1 Composition (nombre de bassins pour chaque version) des deux modèles "idéaux" *A priori* et *A posteriori*

	INDICE	MULTI-MODELE
A priori	41	58
A posteriori	35	64

7.2.5 Quelles approches pour quels bassins ?

L'approche "idéale" évaluée précédemment, bien qu'assez peu encourageante, n'aurait d'intérêt pratique que si on pouvait prédéterminer sur un bassin donné, l'approche qui serait a priori la plus performante. Dans cette partie, nous avons donc tenté d'établir une correspondance entre le type d'approche et le type de bassin.

Pour cela, nous avons regardé, pour les sous-groupes de bassins où chacune des approches donnait les meilleurs résultats, si les caractéristiques des bassins (superficie, indice moyen d'hétérogénéité statistique, nombre de postes pluviométriques et rendement du bassin) avaient une influence sur les performances relatives des deux approches.

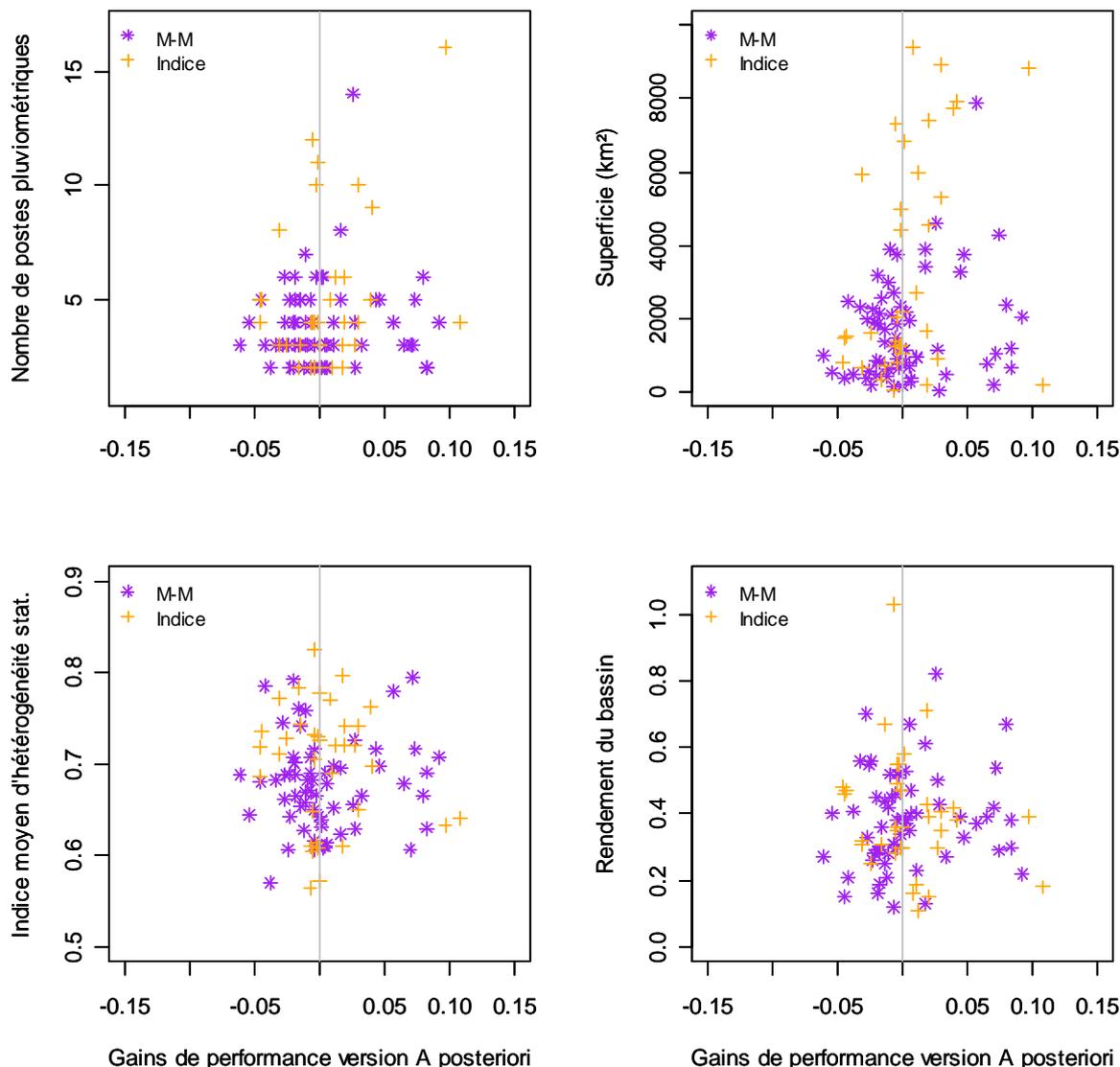


Figure 7.3 Ecart de performances entre modèle Idéal et la version Initial par rapport à de quatre caractéristique de bassins (on distingue les cas le modèle Idéal est issu de l'approche du Multi-Modèle (M-M) ou de l'approche avec Indice (Indices))

La Figure 7.3 montre qu'il n'y a en général aucun déterminisme entre les deux approches sauf peut-être pour les bassins de grandes superficies (et avec les plus grand nombre de postes) qui auraient tendance à préférer l'approche avec Indice.

Nous avons enfin cherché à établir un éventuel déterminisme régional de l'efficacité relative des différentes approches. La Figure 7.4 montre la position des 99 bassins versants, avec des symboliques différentes suivant l'approche la plus performante retenue sur le bassin.

Globalement, aucun déterminisme strict n'est remarqué. On peut cependant voir une légère tendance pour les bassins emboîtés à plébisciter une même approche.

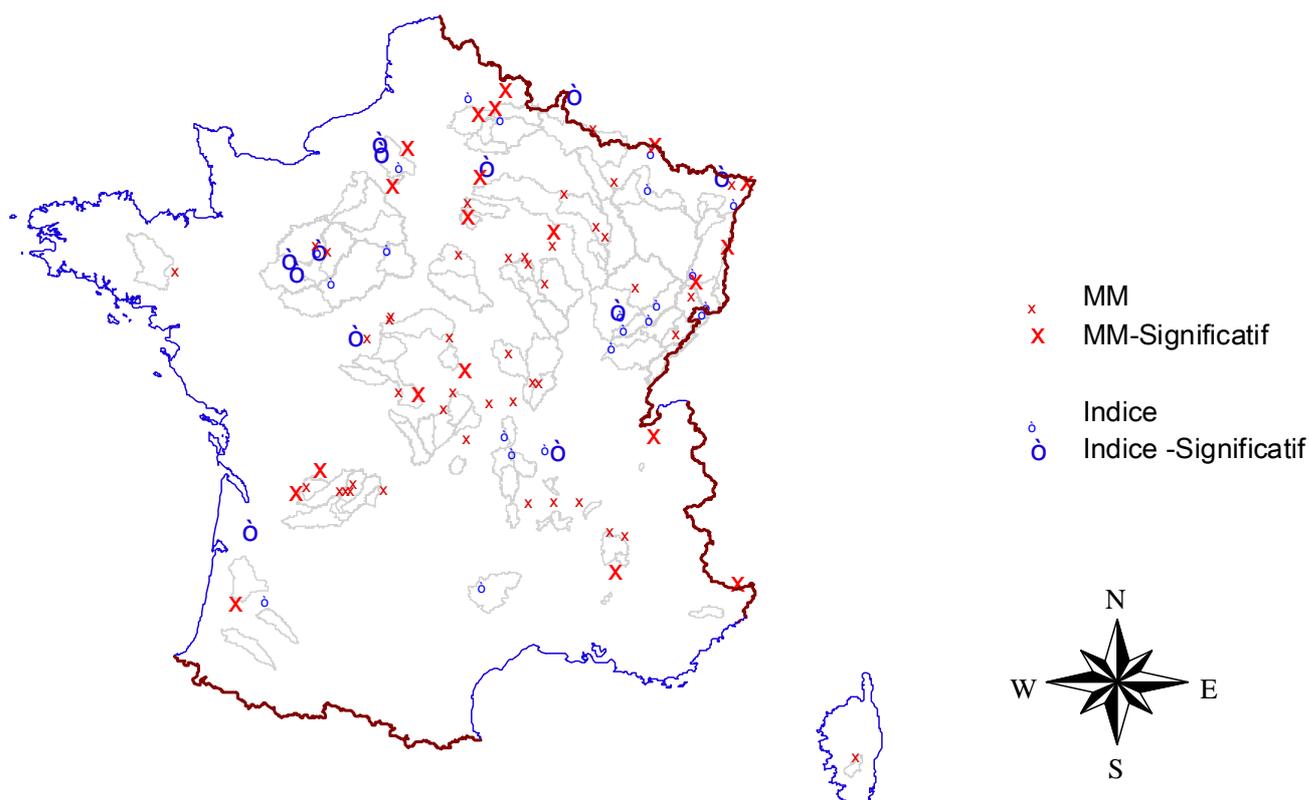


Figure 7.4 Emplacement des exutoires des bassins ayant plébiscité l'approche Multi-Modèle (MM) ou l'approche Indice pour le modèle Idéal (Significatif indique que l'écart sur le critère C2M-RQ est supérieur à 0.01 par rapport au modèle Initial global)

7.2.6 Conclusion sur la complémentarité des approches

L'analyse des deux approches d'exploitation de la variabilité spatiale des précipitations (avec Indices et Multi-Modèle) montre qu'elles ont des comportements relativement similaires. Les gains maximaux que nous avons pu obtenir sur GR4H sont somme toute assez limités après croisement des deux approches en version "idéale". De plus, ces gains ne sont vraiment significatifs par rapport au modèle initial global que pour une version "idéale" *A posteriori* qui est optimiste d'un point de vue pratique. De même aucun déterminisme géographique pour le choix de l'approche n'est apparu entre les bassins à l'exception des bassins de grande superficie plébiscitant l'approche avec Indice.

Nous pouvons donc conclure que la faible complémentarité entre les deux approches ne laisse pas espérer des gains significatifs de performances par une utilisation conjointe par rapport à une utilisation indépendante.

7.3. Information apportée par l'étude d'un modèle distribué

Toutes les méthodes élaborées précédemment dans l'objectif de mesurer l'intérêt de la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations dans les modèles hydrologiques ont été réalisées à partir de modèles dits globaux. Les résultats ont montré qu'il existe en règle générale une désespérante (!) insensibilité des modèles testés à la variabilité spatiale des précipitations. Cependant seules des structures de type global ont été testées.

Or une autre catégorie de modèles pluie-débit existe en termes d'échelle spatiale de modélisation. Il s'agit des modèles distribués maillés construits explicitement avec l'objectif de prendre en compte toutes les hétérogénéités spatiales existant à l'intérieur du bassin versant. Une entrée de précipitations par maille est utilisée pour faire fonctionner le modèle. L'idée directrice de cette partie est d'analyser la sensibilité d'un de ces modèles distribués à la variabilité spatiale des précipitations. Ceci permettrait d'avoir une référence comparative pour évaluer plus objectivement les résultats obtenus précédemment avec des modèles globaux.

L'objectif de ce chapitre est donc d'analyser la sensibilité de ce type de modèle à l'agrégation des entrées de précipitations. Agréger les précipitations signifie, ici, introduire la même entrée de précipitations pour chaque maille pour forcer une homogénéisation du champ pluviométrique (cette entrée est la pluie de bassin équivalente). Ceci va permettre d'évaluer la part d'information sur la simulation des débits apportée par la distribution des entrées de précipitations. Cette évaluation est faite en analysant la différence qui existe en termes de performances, sur un échantillon de bassins versants aussi large que possible, entre un modèle distribué classique alimenté avec une pluie distribuée et le même modèle alimenté par une pluie homogène équivalente.

7.4. Le modèle distribué testé

7.4.1 Description générale de la structure

Afin de mettre en œuvre cette étude, il était nécessaire de disposer d'un modèle distribué aisément applicable sur un grand nombre de bassins versants. La complexité de ce genre de

modèle rend délicate leur utilisation au vu du nombre conséquent de données exploitées pour les mettre en œuvre. Il fallait donc trouver un modèle existant déjà en place sur un grand nombre de bassins avec lequel il était facile de réaliser les tests prévus.

L'utilisation du modèle hydrométéorologique SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU) (Habets, 2008) a été possible grâce au concours de l'équipe hydrométéorologie GMME du CNRM⁴¹ qui développe ce système de modélisation hydrométéorologique distribuée applicable sur la France entière.

Le modèle SIM est constitué de trois composantes qui ont été à la base développées indépendamment :

- la première de ses composante située "en amont" du modèle est un système d'analyse de variables météorologiques de surface, dénommé SAFRAN (Le Moigne, 2002) qui fournit les forçages atmosphériques de l'ensemble de modélisation.
- la seconde est un modèle d'échanges d'eau et d'énergie entre le sol et la couche limite atmosphérique de surface, dénommé ISBA (Noilhan et Planton, 1989; Noilhan et Mahfouf, 1996) qui fournit des simulations d'évapotranspiration, d'infiltration et de ruissellement à l'ensemble de modélisation.
- la troisième est un modèle hydrogéologique de transfert des écoulements vers le cours d'eau, MODCOU (Ledoux *et al.*, 1984; Ledoux *et al.*, 1989) qui fournit le débit des rivières et le niveau des aquifères.

Le système SIM permet donc de simuler, à partir de la dizaine de variables de forçages hydrométéorologiques évaluées par SAFRAN, d'une part le débit des rivières (variable qui nous intéresse plus particulièrement en tant qu'hydrologues) mais aussi des bilans d'énergie, la teneur en eau du sol et l'évolution des nappes phréatiques.

SAFRAN a complété le couplage initial d'ISBA et de MODCOU (ce couplage ayant été élaboré et testé sur le Rhône par Habets *et al.* (1999) pour donner SIM. A ses débuts, SIM a été testé sur les grands bassins versants français du Rhône (Etchevers *et al.*, 2001), de la Seine (Rousset *et al.*, 2004), de l'Adour et de la Garonne (Caballero *et al.*, 2007), puis le système a été étendu sur environ 900 bassins versants français (Habets *et al.*, 2008).

Un schéma résumant les trois composantes du modèle SIM est disponible en Figure 7.5.

⁴¹ CNRM: Centre National de Recherches Météorologiques et GMME : Groupe de Météorologie de Moyenne Echelle

Le système SAFRAN-ISBA-MODCOU (SIM)

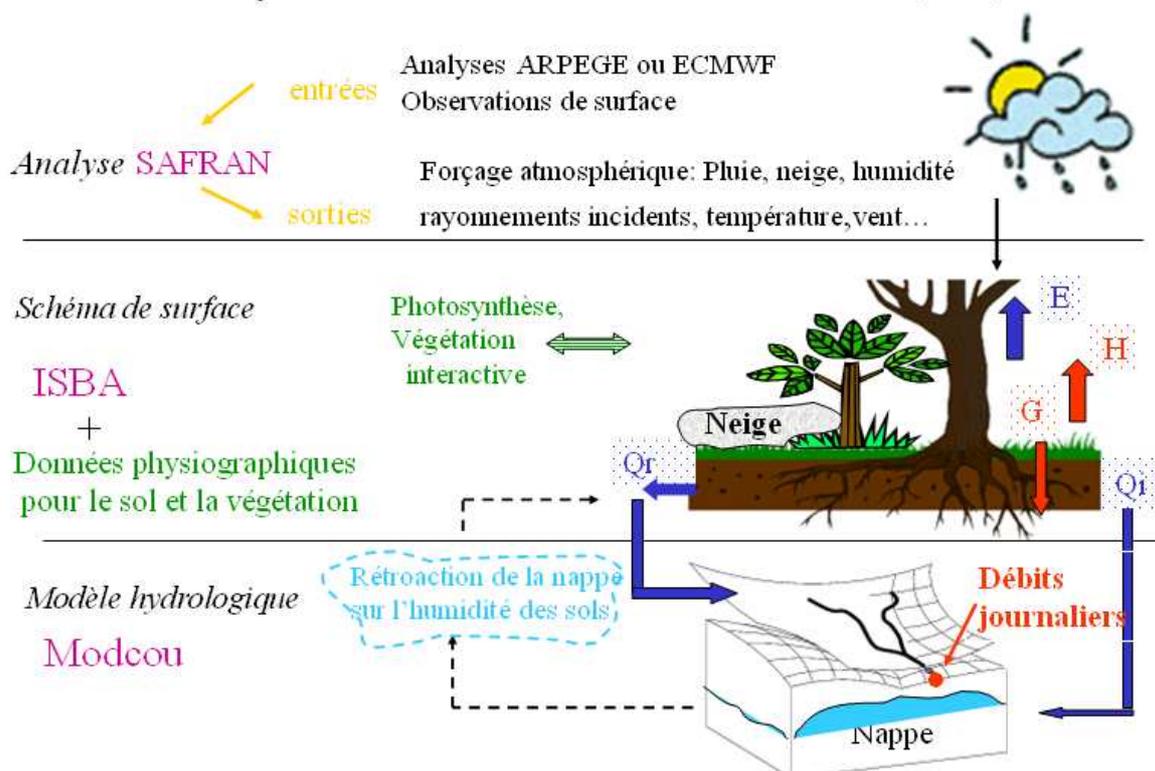


Figure 7.5 Schéma synthétique du système de modélisation SAFRAN-ISBA-MODCOU (d'après Aaron Boone, Météo France)

7.4.2 Spécificité des entrées de précipitations du modèle

Les entrées de précipitations, variable de forçage qui nous intéresse pour notre expérience, sont fournies au pas de temps horaire sur des mailles carrées d'une superficie de 64 km^2 . Ces cumuls ainsi que d'autres variables atmosphériques proviennent du système SAFRAN.

SAFRAN est un système d'analyse de l'atmosphère à moyenne échelle qui a pour objectif de produire des valeurs en surface de diverses variables climatiques et hydrométéorologique. Ce système a été à l'origine créé pour produire les forçages atmosphériques d'un modèle de fonte et d'évolution de la couverture neigeuse⁴² (voir (Durand *et al.*, 1993)). Utilisé initialement pour les zones de montagne, SAFRAN a été étendu sur la France entière en 2002 pour fournir des données de variables climatiques sur 8700 mailles de $8 \times 8 \text{ km}$ (Le Moigne, 2002).

⁴² SAFRAN est l'acronyme de Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques pour la Nivologie

Les données SAFRAN proviennent des ré-analyses des données atmosphériques fournies par le CEPMMT⁴³ à l'échelle spatiale de 1,5° (à nos latitudes, 1° représente environ 111 km) et/ou des données du modèle météorologique de moyenne échelle ARPEGE au pas de 0,25°. Ces données provenant de modèles sont complétées avec les nombreuses observations provenant du réseau sol de Météo France. Le tout est compilé et interpolé pour produire une première sortie au pas de temps 24 h d'une dizaine de variables climatiques et hydrométéorologiques de surface (température, précipitation, rayonnement, nébulosité, humidité relative...) sur 612 zones décrites comme climatologiquement homogènes en France.

Pour une utilisation en entrée de la chaîne SIM, toutes ces variables sont interpolées à partir des gradients topographiques de chaque zone sur une maille régulière de 8×8 km au pas de temps horaire. Ceci est aujourd'hui réalisé sur la France entière pour la période chronologique 1995-2005 (et est en cours d'extension depuis 1970). À l'intérieur des zones homogènes, l'interpolation des précipitations est réalisée en fonction des isohyètes du champ pluviométrique calculé à partir du gradient topographique.

Les sorties atmosphériques de surface reconstituées par SAFRAN ont été en partie validées sur la période 2004-2005 (Quintana-Seguí *et al.*, 2008) dans le but d'une utilisation opérationnelle en temps réel. Les cumuls de précipitation ont été comparés au réseau au sol composé d'environ 3675 stations et certains biais ont été constatés. Ces biais seraient dus à la variabilité spatiale non systématique des champs pluviométriques (qui correspond à la part non provoquée par l'orographie) à l'intérieur des zones climatologiques à partir desquelles est interpolée la valeur par maille.

7.4.3 Synthèse

Ainsi, nous avons à disposition pour réaliser notre expérience un modèle distribué applicable sur de nombreux bassins versants français dont les entrées pluviométriques sont spatialisées et disponibles par mailles carrées régulières de 64 km² au pas de temps horaire. Les entrées pluviométriques pour ce modèle existent actuellement à cette précision sur une période chronologique d'une durée de 10 ans allant de 1995 à 2005.

⁴³ CEPMMT=Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme. Pour les anglophones, c'est ECMWF = European Center for Medium-range Weather Forecasts

7.5. Deux modes d'introduction des précipitations dans un modèle distribué

Afin d'évaluer la sensibilité de ce modèle distribué à la variabilité spatiale de précipitations, nous allons comparer les résultats du modèle obtenus avec deux forçages pluviométriques différents :

- Une entrée de **Pluie distribuée** qui représente le mode classique d'utilisation de ce modèle : les forçages SAFRAN pour chaque maille.
- Une entrée de **Pluie globale** correspondant à la moyenne des pluies SAFRAN de toutes les mailles couvrant le bassin versant. Cette pluie moyenne P_M est calculée à chaque pas de temps de la façon suivante:

$$P_M = \sum_{i=1}^n \omega_i P_i \quad \text{Eq. 35}$$

avec P_i Pluie SAFRAN de la maille i

ω_i Surface de la maille i recouvrant le bassin sur la surface totale du bassin

de sorte que $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$

Toutes les autres variables de forçages atmosphériques conservent leur valeur par maille. Les deux versions de prise en compte des précipitations dans le modèle SIM sont illustrées en Figure 7.6.

Les paramètres du modèle SIM sont, pour chaque maille en majeure partie prédéterminés physiquement. Par exemple, pour le schéma de surface ISBA, ils proviennent de cartes de végétation et de texture des sols. Pour le modèle MODCOU, les paramètres sont tirés du réseau hydrographique (obtenu par MNT au pas de 1 km), des niveaux des aquifères et du socle géologique correspondant.

A la différence des approches testées dans les chapitres précédents (où le recalage des paramètres était systématique) pour chaque nouvelle option de prise en compte de la variabilité des pluies, la comparaison des deux méthodes de modélisation se fera selon une approche statique (voir Partie 3.6.2), c'est-à-dire sans nouvelle estimation des paramètres du modèle.

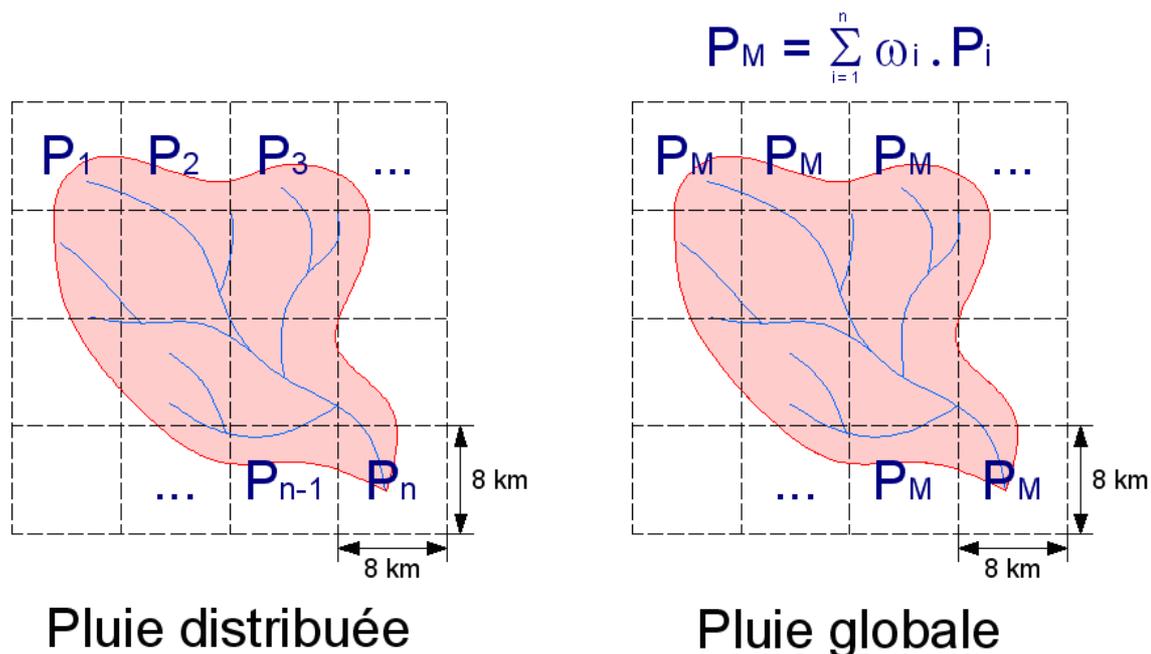


Figure 7.6 Méthodes d'introduction Pluie Globale et Pluie distribuée sur le modèle maillé SIM

La raison de ce choix est qu'il était impossible d'envisager, pour notre propre expérience, un recalage des paramètres de SIM pour chaque bassin versant. Le modèle sera donc testé en prenant comme référence les paramètres correspondant à l'entrée distribuée.

Les tests ont consisté en une simple simulation sur la période 1995-2005 sur un échantillon de 48 bassins versants, décrits succinctement dans le paragraphe suivant. Les forçages de précipitations (de même que les autres forçages atmosphériques) sont introduits au pas de temps horaire. Les sorties de débit sont, elles, analysées sur des pas de temps de 24 h. Les critères de performance seront évalués à ce pas de temps sur le critère C2M-Q par l'intermédiaire d'une valeur par bassin versant sur toute la chronique. On observera aussi les critères de bilan pour comparer les volumes d'eau simulés avec une pluie globale à ceux simulés avec une pluie distribuée. L'objectif est de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse sur l'effet de la variabilité spatiale des précipitations couramment formulée dans la littérature (Voir Partie 1.3).

Nous avons généré les forçages homogènes, et les simulations sur SIM ont été réalisées par Eric Martin au CNRM.

Les résultats obtenus seront aussi comparés à une version Multi-Modèle de GR4H à n entrées de précipitations en utilisant la même pluie SAFRAN horaire (n représentant le nombre de mailles) en calant un vecteur de paramètres pour chaque entrée (voir Partie 5.4

pour la description du Multi-Modèle). Deux versions différentes de ce Multi-Modèle seront évaluées en phase de contrôle :

- une version classique avec une pluie SAFRAN différente introduite pour chaque sous-modèle (identique en calage) ;
- une version avec la pluie globale de bassin calculée de façon identique à l'Eq. 35 pour chaque sous-modèle, en conservant cependant les paramètres des modèles calés avec des pluies distribuées, par analogie avec le test d'analyse de sensibilité statistique réalisé avec SIM.

Une version globale de GR4H sera aussi évaluée pour les mêmes bassins en utilisant toujours la même pluie globale.

7.6. Echantillon de bassins versants testés

Les forçages SAFRAN se présentent sous la forme d'une grille couvrant l'ensemble de la France à chaque pas de temps. Pour tester les forçages homogènes, on a remplacé dans la grille les pluies des mailles recouvrant le bassin versant par la pluie moyenne de bassin. Nous avons pris le parti de ne faire qu'une simulation sur toute la France, avec un seul forçage modifié. Cette contrainte nous a conduit à choisir des bassins sans recouvrement (ni limites communes) pour ne pas avoir de conflit sur la valeur de la pluie des mailles couvrant des bassins limitrophes. Un algorithme nous a permis de sélectionner un maximum de bassins, avec des superficies supérieures à 650 km², SIM étant plus performant pour les bassins de grande taille.

En tenant compte des contraintes de disponibilité des données de débits, nous avons obtenu un échantillon de 48 bassins versants français. Les superficies de ces bassins vont de 650 à 13200 km² avec une superficie médiane de 890 km² (voir distribution en Figure 7.7). Malgré leur nombre relativement limité, ces bassins sont bien répartis sur le territoire français. Une carte montre la répartition de ces 48 bassins versants en Figure 7.8. Pour des raisons de disponibilités de données de débits horaires au Cemagref, les tests sur GR4H se feront uniquement sur un sous-échantillon de 27 de ces 48 bassins.

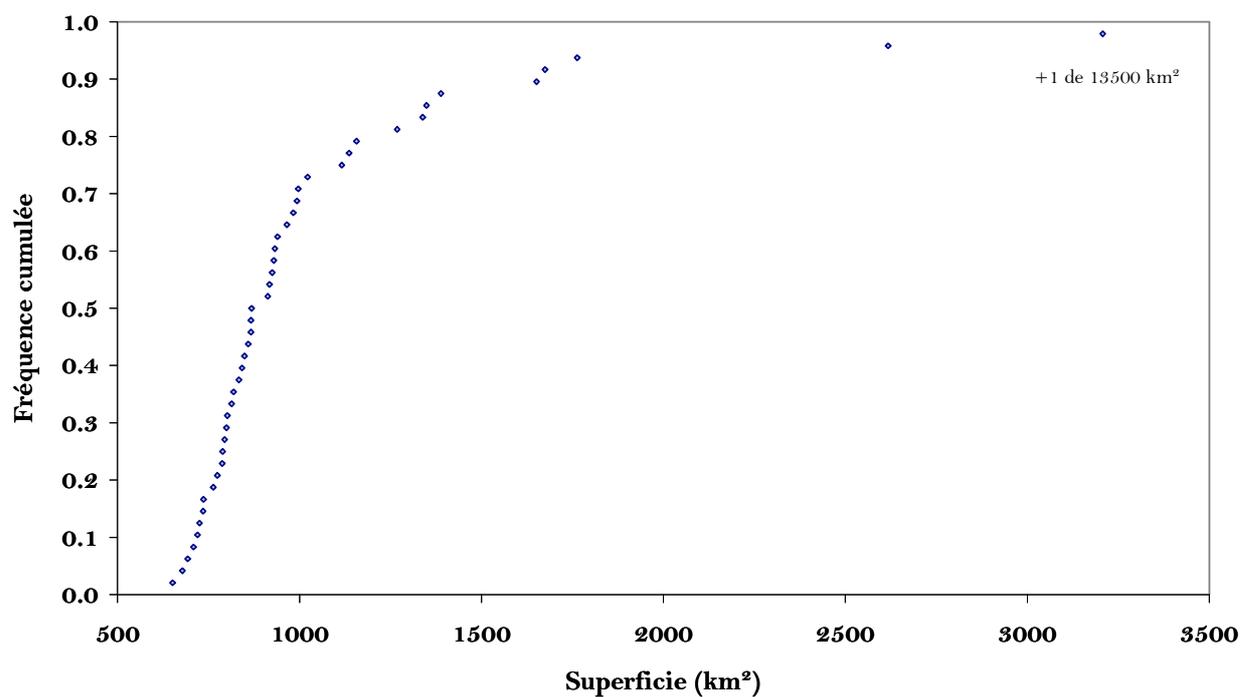


Figure 7.7 Distribution des superficies des 48 bassins versants de l'échantillon sélectionné

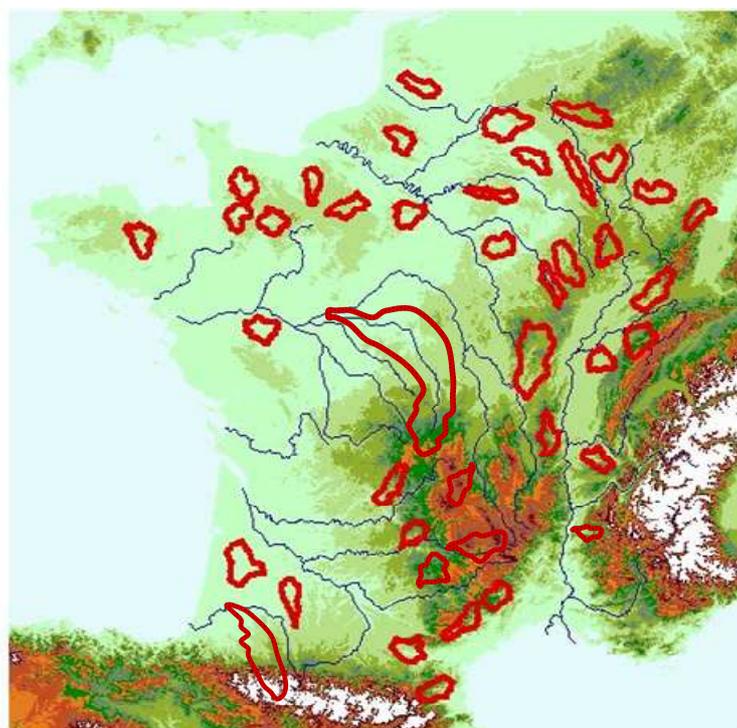


Figure 7.8 Répartition géographique des contours des 48 bassins versants de l'échantillon sélectionné pour cette expérience

7.7. Résultats obtenus

7.7.1 Comparaison SIM Pluie distribuée et SIM Pluie globale

Les distributions des performances par bassin obtenues par le modèle distribué avec les deux forçages (distribué et global) sont représentées en Figure 7.9. En moyenne et en médiane, les performances sont meilleures avec le forçage distribué, mais la différence est assez limitée (0,252 contre 0,235 pour la moyenne et 0,379 contre 0,358 pour la médiane).

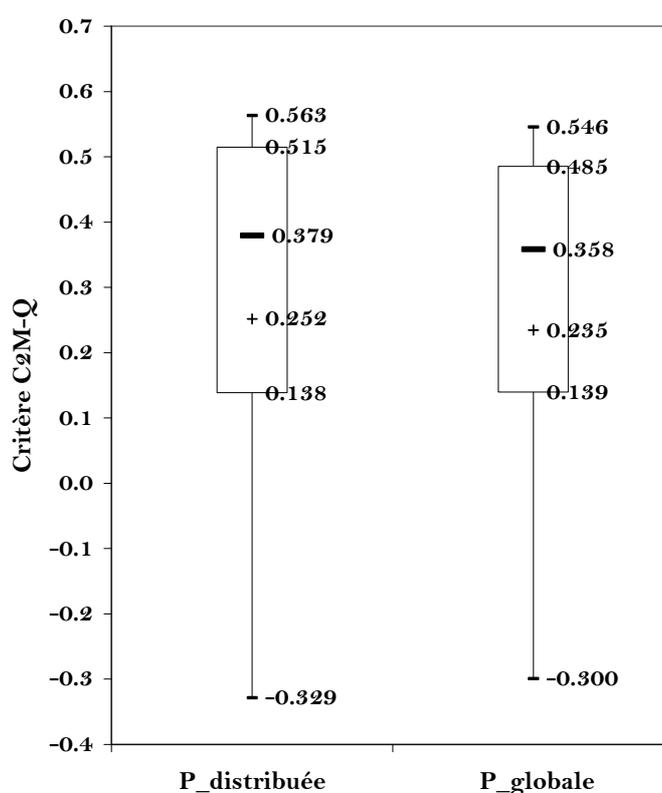


Figure 7.9 Box Plot de la distribution des performances par bassin sur le critère C2M-Q pour les deux forçages pluviométriques testés sur le modèle SIM

Si on compare les performances par bassin versant, on peut voir que la dégradation pour l'approche globale par rapport à l'approche distribuée n'est pas forcément systématique (voir Figure 7.10). En effet, pour 31 des 48 bassins versants, les forçages distribués donnent des meilleurs résultats (abscisses positives sur la figure). Mais pour 13 bassins, nous obtenons l'inverse (quatre bassins sont restés quasiment insensibles au changement de d'information de précipitation). Pour 19 bassins (parmi les 31 meilleurs avec la pluie distribuée), la

différence de performances en valeur absolue est inférieure à 0,02, confirmant la grande proximité des résultats.

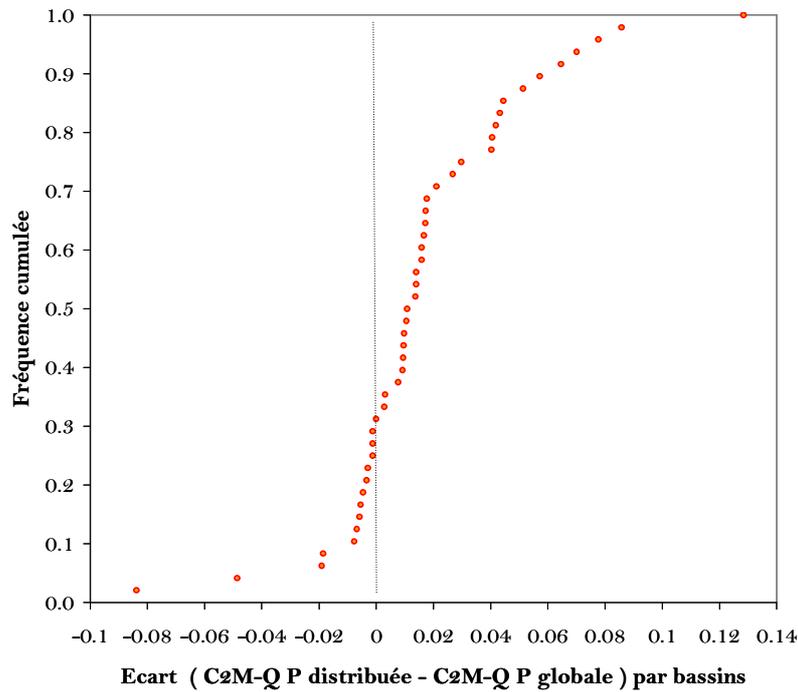


Figure 7.10 Distribution des écarts de critères moyens de performance sur le critère (C2M-Q) entre les deux versions de SIM pour les 48 bassins versants

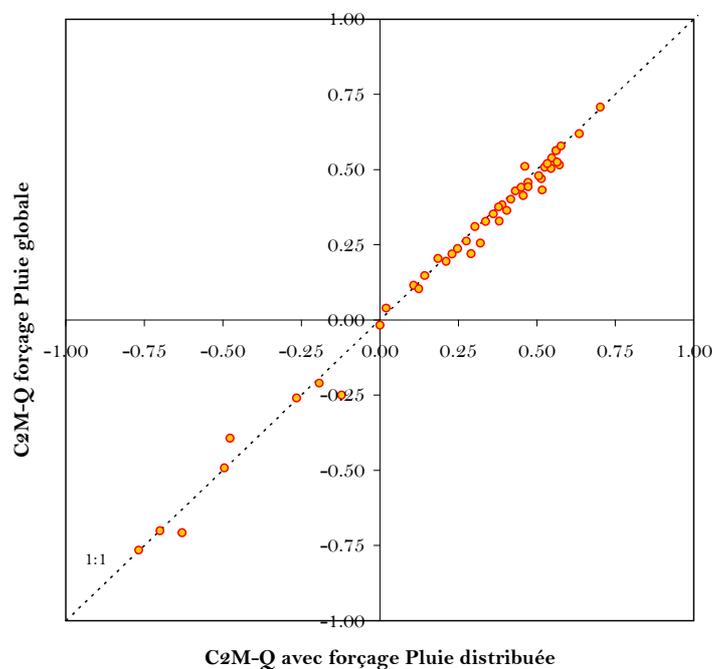


Figure 7.11 Performances par bassin versant pour la version de SIM avec forçage "Pluie globale" en fonction de la performance obtenue avec forçage "Pluie distribuée" (Les bassins les meilleurs pour la Pluie distribuée se situent sous la bissectrice)

La Figure 7.11 permet de comparer les critères de performances de bassins versants de l'échantillon entre les deux forçages des pluies testés en fonction de l'ordre de grandeur de ce critère.

Si on regarde les écarts obtenus en fonction de la superficie des bassins versants, on peut voir qu'aucune tendance générale ne se dessine même sur les bassins versants où le critère initial est jugé suffisant pour rendre significatives les améliorations sur ce critère (Figure 7.12).

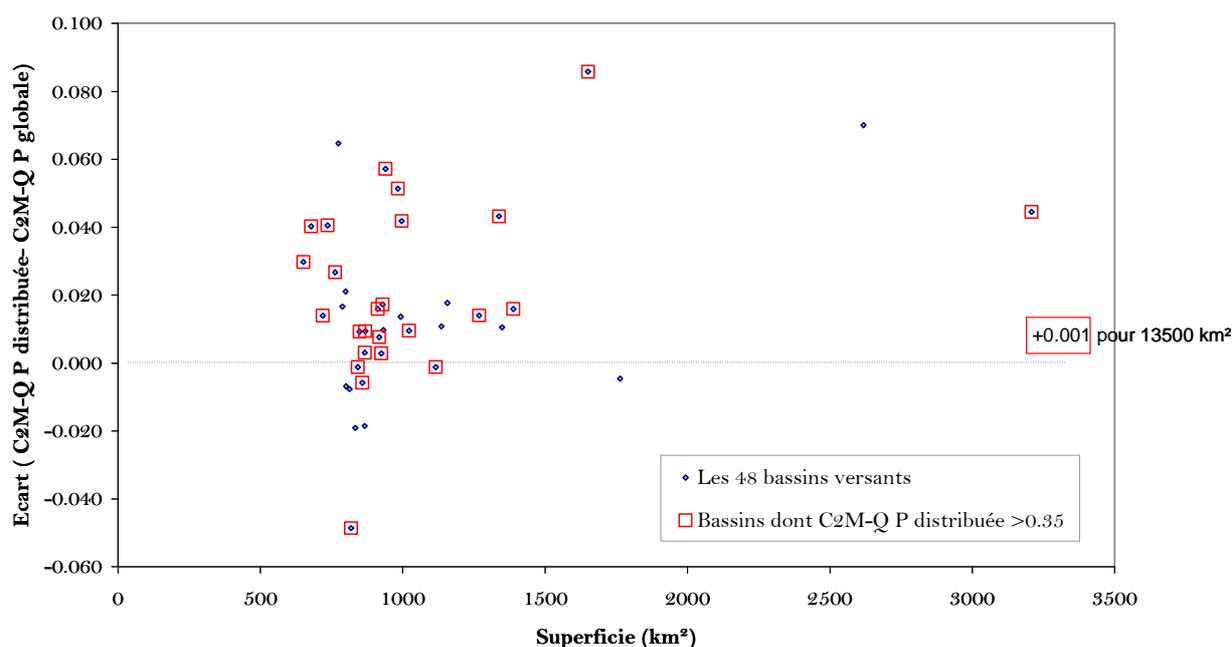


Figure 7.12 Ecart de critères de performances entre les deux versions de SIM (Pluie Globale-Pluie Distribuée) pour chaque bassin versant en fonction de sa superficie.

De plus, nous pouvons ajouter qu'aucun déterminisme géographique n'apparaît pour la situation des bassins versants dont les critères de performances sont significativement meilleurs avec l'utilisation d'une pluie distribuée. En effet, les plus forts écarts en faveur du modèle utilisant le forçage pluie distribué se retrouvent aussi bien dans des zones de plaines de la partie Nord de la France et dans les zones à plus forte topographie sous influence méditerranéenne du Sud où la variabilité spatiale de précipitation est plus forte. On retrouve le même schéma pour la situation inverse (c'est-à-dire les bassins versants plébiscitant le forçage pluie globale) avec certes, beaucoup moins de bassins concernés.

Remarquons que le critère de performance moyen sur l'échantillon (0,252) peut paraître relativement faible. L'utilisation d'une version SIM où certains paramètres sont calés donnerait des résultats meilleurs. D'ailleurs des expériences encourageantes sont en cours au

CNRM sur ce modèle pour le calage propre au bassin versant étudié de certains paramètres de sol (thèse en cours de Pere Quintana-Segui). De plus, la superficie des bassins versants sélectionnés est relativement faible et inhabituelle au regard des bassins sur lesquels le CNRM fait tourner le système SIM. Enfin, le modèle hydrogéologique MODCOU serait peu adapté à la simulation des débits de bassins versants de petite taille (Eric Martin, Météo-France, communication personnelle). Ceci expliquerait donc également une partie de ces faibles performances.

Pour finir, au niveau de l'évolution des critères de bilan (voir Figure 7.13), on peut voir que globalement des volumes plus importants sont générés par la version pluie distribuée (concerne 42 bassins versants sur 48). Ce phénomène est observé que ce soit dans le cas d'un bassin versant où le modèle SIM a tendance à sous-estimer les volumes par rapport à l'observé (Bilan < 1) ou bien dans les cas où le modèle a tendance à les surestimer (Bilan > 1). Cependant, les écarts en termes de critère de bilan par bassin entre les deux versions restent limités par rapport au degré des erreurs de bilan faites par le modèle.

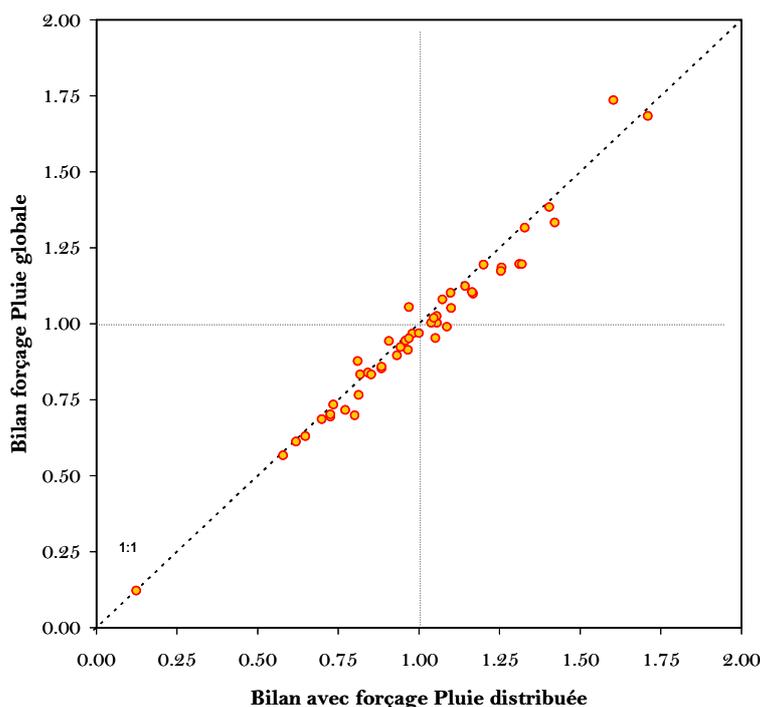


Figure 7.13 Critère de bilan par bassin versant sur toute la chronique pour la version de SIM avec forçage pluie globale en fonction du critère de la version avec forçage pluie distribuée (un bilan parfait correspond à la valeur 1)

Les différences au niveau des critères de bilan proviendraient essentiellement du schéma de surface ISBA pour lequel une lame d'eau uniforme provoquerait moins de ruissellement et

plus de drainage profond et d'évapotranspiration (Eric Martin, communication personnelle). Cette diminution du ruissellement aurait pour conséquence de faire diminuer le volume des débits de sortie. Cette interprétation avait déjà été faite par Habets(1998) qui analysait l'effet de la variabilité spatiale des précipitations sur le ruissellement sous maille fourni par ISBA.

7.7.2 Comparaison de GR4H avec un Multi-Modèle à n entrées de pluie SAFRAN pour alimenter les sous-modèles

Nous avons testé le modèle GR4H avec deux versions Multi-Modèle à n entrées de précipitations (n représentant le nombre de mailles SAFRAN) (voir Partie 5.3 pour la description du Multi-Modèle à un sous-modèle par postes pluviométrique). Une version calée et contrôlée avec les pluies SAFRAN en entrée de chaque sous-modèle a été testée. Parallèlement, nous avons testé, une version calée avec n pluies SAFRAN (n représentant le nombre de mailles recouvrant le bassin) en entrée et validée avec la pluie Globale en entrée de chaque sous-modèle (approche statique). Les performances des deux versions seront évaluées en phase de contrôle sur le critère C2M-Q.

Les superficies des 27 bassins versants testés vont de 678 à 3200 km². Le nombre de mailles par bassin versant (qui correspond au nombre de sous-modèles à caler) va de 18 à 69. Nous avons aussi évalué sur ces bassins versants la version initiale GR4H globale en utilisant toujours la même Pluie globale en entrée (toujours calculée avec l'Eq. 35).

Les résultats indiquent qu'en terme de distribution des critères de performance, quel que soit le forçage choisi pour le Multi-Modèle la version globale initiale reste supérieure (Moyenne des critères supérieurs de environ 0,03 par rapport aux deux versions Multi-Modèle). Les deux versions Multi-Modèle sont, quant à elles, quasiment équivalentes. Les différences sont en moyenne peu significatives au regard du nombre de bassins testés (Figure 7.14). Si on observe la variation des critères de performance par bassin versant entre ces deux versions Multi-Modèle, on peut constater que ces écarts sont faibles (Figure 7.15) avec un très léger avantage pour la version pluie distribuée. Ainsi, l'impact de l'utilisation d'une pluie globale de bassin sur un modèle calé avec de la pluie distribué, est quasi nul. De plus, excepté un cas particulier, les bassins où le Multi-Modèle est meilleur que la version globale initiale, sont restés insensibles à l'homogénéisation du champ de précipitations dans le Multi-Modèle. Des tests identiques réalisés sur l'échantillon utilisé dans les chapitres précédents de 99 bassins versants ont produit des résultats similaires.

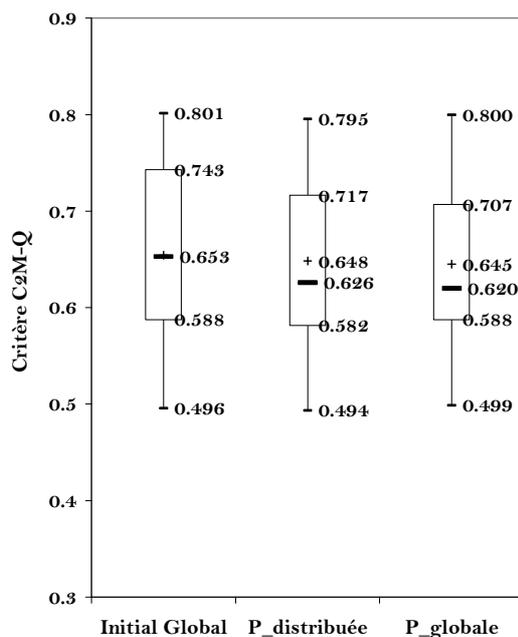


Figure 7.14 Box Plot de la distribution des performances des 27 bassins versants de l'échantillon pour la version globale initiale alimentée par la pluie de bassin et deux versions du Multi-Modèle calé sur pluie SAFRAN par sous-modèle et validé, soit avec les entrées pluviométriques distribuées (P_distribuée), soit avec la même pluie moyenne de bassin sur chaque sous-modèle (P_globale)

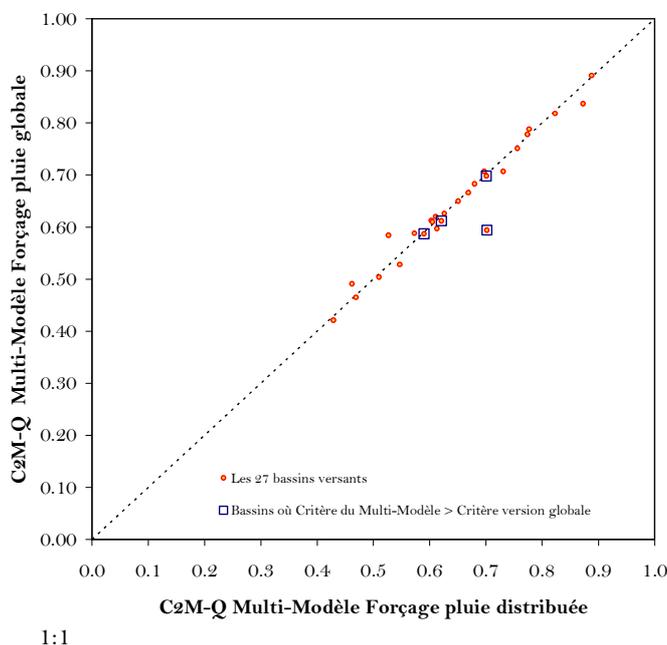


Figure 7.15 Performances par bassin versant pour la version du Multi-Modèle contrôlée avec forçage Pluie globale en fonction de la performance obtenue avec forçage Pluie distribuée (les bassins les meilleurs pour la Pluie distribué se situent sous la bissectrice). On a indiqué sur ce graphique les bassins significativement meilleurs avec GR4H en version Multi-Modèle par rapport à la pluie globale Initiale)

7.8. Synthèse de l'expérience effectuée

Ce chapitre a traité de l'information complémentaire que pourrait nous apporter l'étude de la sensibilité d'un modèle distribué à la variabilité spatiale des précipitations.

Les résultats observés dans leur version brute indiquent, pour le modèle distribué SIM, des performances légèrement meilleures avec le forçage pluie distribuée. Cependant, les écarts obtenus sur SIM sont relativement limités au regard des performances initiales du modèle. Par ailleurs, il est probable que l'approche statique (sans recalage) adoptée ici a tendance à amplifier les différences par rapport à une approche dynamique où l'on s'adapte aux nouvelles entrées (approche que nous avons adoptée dans tous les tests précédents).

Ainsi, on ne peut pas affirmer que ce modèle distribué soit nettement plus sensible à la distribution des entrées de précipitations que les modèles globaux utilisés dans cette thèse.

A titre de comparaison, nous avons également utilisé le Multi-Modèle de GR4H dans une version statique (sans recalage pour la pluie globale). Dans ce cas, l'utilisation d'une pluie distribuée présente un léger avantage sur l'utilisation d'une pluie globale, ce qui va dans le sens des résultats obtenues avec SIM. Cependant, les écarts sont extrêmement faibles et donc peu significatifs. Ainsi, la version GR4H qui prend en compte la distribution des précipitations n'est, en version statique, pas sensible à la distribution des précipitations. De plus, pour les bassins versant testés, la version globale du modèle GR4H donne des performances supérieures.

Ces tests mériteraient d'être étendus sur un plus grand nombre de bassins en utilisant la nouvelle version calée de SIM. Cependant, à ce stade, ils nous permettent de dire que la faible sensibilité des résultats des modèles pluie-débit globaux à la variabilité de l'information pluviométrique, que nous avons mis en évidence tout au long de cette thèse, ne semble pas être due de façon première au caractère global de ces modèles. L'approche distribuée intrinsèquement construite pour tenir compte de cette variabilité, ne semble pas non plus en bénéficier de manière systématique et très significative.

"La science consiste à passer d'un étonnement à un autre"

Aristote [--]

Conclusion générale

Nous voici arrivés au terme de notre recherche sur l'impact de la variabilité spatiale des pluies sur les simulations des modèles hydrologiques. Ces travaux ont été variés et se sont attachés, dans une démarche aussi rigoureuse que possible, à trouver des moyens de prendre en compte cette variabilité spatiale pour améliorer la simulation des débits par des modèles globaux. Nous avons proposé deux approches originales : la première visant à construire des indices synthétiques d'hétérogénéité de la pluie et à fournir cette information au modèle pour modifier son fonctionnement ; la seconde visant à faire fonctionner différents modèles en parallèle, chacun avec une information pluviométrique différente (approche multi-modèle). Nous avons appuyé notre démarche sur d'innombrables tests, plusieurs modèles, de très nombreux cas d'études et différents critères d'évaluation, de manière à tirer des conclusions aussi générales que possible sur la question posée.

Quels enseignements tirer de ces recherches ?

Nous proposons dans cette conclusion générale de revenir sur un certain nombre de questions soulevées dans cette thèse et de résumer les réponses que nous sommes parvenus à formuler. Nous donnons ensuite les perspectives qui nous semblent les plus intéressantes à ce travail.

Résultats marquants

Impact de la variabilité spatiale des pluies sur les débits à l'exutoire: y a-t-il le moindre consensus parmi les hydrologues ?

Nous avons mis en évidence dans notre revue de la littérature que le thème de la variabilité spatiale des pluies intéresse les hydrologues depuis longtemps... mais qu'après plus de quarante années d'investigations sur le sujet, aucun consensus ne semble se dégager sur l'effet de cette variabilité sur les débits. Si cette variabilité existe et semble avoir un impact, sa traduction dans le cadre d'un modèle hydrologique semble jusqu'ici assez peu convaincante. A cela au moins trois raisons :

- La première est que quasiment toutes les analyses de sensibilité faites sur la question ont été menées sur un seul bassin (ou un très petit nombre de bassins). Comme nous l'avons vu tout au long de cette thèse, il est facile de trouver deux bassins particuliers où l'on pourrait tirer des conclusions opposées sur l'intérêt de la variabilité spatiale des pluies pour la modélisation. Le résultat de ce morcellement est que les études existantes sont une juxtaposition de cas particuliers, avec des résultats contradictoires et non comparables en raison d'approches méthodologiques différentes. Il est donc difficile de se faire une idée générale sur la question ;
- La deuxième est que les analyses de sensibilité sont quasiment toujours faites sur des données synthétiques, ce qui réduit leur portée au modèle utilisé pour générer ces données. Le risque de ce genre d'étude est en fait de mettre davantage en évidence les hypothèses sous-jacentes au modèle que le fonctionnement du bassin en conditions réelles.
- La troisième est que la réponse quasiment exclusive à la question de la prise en compte de la variabilité spatiale des pluies a été l'utilisation de modèles distribués. Bien que ces modèles soient très attractifs pour le sujet que nous abordons, ils soulèvent encore d'énormes problèmes dans leur paramétrisation, ce qui rend souvent les études utilisant ces modèles très dépendantes des incertitudes associées à ces paramétrages.

Ces analyses nous ont conduit à travailler sur un large échantillon de bassins, avec des données réelles et sur la base de modèles globaux.

Par ailleurs, on peut dire que si l'impact de la variabilité d'une pluie à l'échelle d'une parcelle de quelques mètres carrés semble relativement "facile" à appréhender, il en va tout autrement à l'échelle d'un bassin versant. L'hypothèse généralement formulée est que cette variabilité va augmenter le ruissellement direct (et donc les volumes à l'exutoire), sans que cela ne soit clairement mis en évidence. Notons également que certaines études, mettant en évidence le rôle de filtre passe-bas du bassin versant sur les pluies, tendraient à indiquer que le rôle de la variabilité des pluies ne peut être que nécessairement faible, cette variabilité étant fortement atténuée par le rôle intégrateur du bassin. Nous avons donc essayé d'évaluer la validité de ces hypothèses dans nos travaux.

La variabilité des pluies, un élément facile à quantifier ?

Notre recherche s'est appuyée sur une importante base de données. L'objectif était d'avoir des conditions hydro-climatiques variées, pour évaluer la sensibilité de nos approches à ces conditions et s'assurer de la généralité de nos conclusions. Notre analyse de données et la construction d'indices de variabilité synthétiques ont mis en évidence certains points intéressants, qui ne sont pas forcément des découvertes mais qui méritent d'être rappelés ici :

- Notre approche se basant sur l'exploitation de réseaux pluviométriques au sol, la caractérisation de la variabilité des pluies va nécessairement dépendre des caractéristiques du réseau d'observation. Celui-ci est souvent très épars à l'échelle de petits bassins versants, rendant délicate la quantification statistique de la variabilité. Inversement, sur les grands bassins, cette caractérisation est plus facile. Dans le même temps, on s'aperçoit que la lame d'eau réellement tombée sur le bassin sera bien plus délicate à estimer sur les bassins peu pourvus en pluviomètres.
- Le pas de temps d'étude va logiquement avoir un impact significatif sur la quantification de la variabilité des pluies. Malgré cela, notons d'ores et déjà que les conclusions de nos tests réalisés à deux pas de temps (horaire et journalier) ont été globalement cohérentes.
- Tous les postes pluviométriques n'ont pas un intérêt équivalent pour la modélisation hydrologique. Même si nous n'avons pu disposer dans cette thèse d'indicateurs sur la fiabilité météorologique d'un poste (en liaison avec son environnement proche), il est clair que certains sont plus utiles, plus "représentatifs", que d'autres, les postes sur les parties centrales et amont des bassins favorisant souvent de meilleures performances du modèle.
- Les fortes pluies en moyenne sur le bassin correspondent généralement à des pluies homogènes, de forts cumuls nécessitant qu'il pleuve de manière simultanée quasiment partout sur le bassin. La variabilité spatiale des pluies sera donc généralement plus élevée pour des cumuls pluviométriques faibles à l'échelle du bassin que pour des cumuls élevés.

Les modèles globaux, des modèles incapables de s'adapter à la variabilité spatiale des pluies ?

La variabilité des pluies recouvre en fait deux niveaux : un niveau que l'on peut qualifier de variabilité "systématique", que l'on peut observer sur la diversité des moyennes interannuelles observées sur chaque poste, et un autre que l'on peut appeler variabilité "aléatoire" à une échelle événementielle, liée aux dynamiques des champs pluvieux. Le calage des modèles hydrologiques globaux va en fait directement s'adapter au premier niveau de variabilité, de manière à ce que le modèle s'accommode au mieux de la façon dont la pluie tombe sur le bassin en moyenne. On peut donc considérer que les modèles globaux s'adaptent intrinsèquement à cette variabilité du premier ordre. C'était l'objectif de notre travail que d'évaluer l'intérêt de prendre en compte le deuxième niveau de variabilité. Notons que les analyses de sensibilité dynamique (avec recalage des paramètres) opérées tout au long de ce travail confirment la capacité des modèles hydrologiques à s'adapter aux caractéristiques de l'information pluviométrique utilisée en entrée, et donc à lisser les différences de résultats entre approches.

La variabilité spatiale des pluies, chasse gardée des modèles distribués ?

Les modèles globaux sont souvent montrés du doigt comme étant incapables de prendre en compte explicitement la variabilité des pluies. On reproche également à leur caractère global d'être responsable d'une sous-estimation des débits en cas de pluie spatialement hétérogène. Les approches que nous avons proposées montrent qu'il est techniquement tout à fait faisable de prendre en compte cette variabilité des pluies tout en restant dans un contexte global (avec utilisation des indices synthétiques de variabilité) ou semi-global (avec mise en place du schéma multi-modèle). Sur certains bassins, les gains apportés ont pu être significatifs, au même titre que les gains rapportés dans la littérature dans certaines études utilisant des modèles distribués. Malheureusement, les résultats sur l'ensemble de notre échantillon de bassins tendent à faire penser que certaines conclusions favorables aux modèles distribués sont essentiellement dues à un défaut de généralisation lié à un trop faible nombre de bassins test. Les résultats du modèle distribué que nous avons évalué sur une trentaine de bassins tendent à aller dans ce sens.

La position de la pluie sur le bassin, déterminant majeur de sa réponse ?

La position de la pluie sur le bassin est souvent considérée comme un déterminant majeur de la réponse de bassin. Par nos approches, nous avons testé cette hypothèse à plusieurs reprises. Dans l'approche des indices, nous avons essayé de tenir compte des contrastes amont-aval sans réussir à mettre en évidence d'effet significatif sur la simulation des débits. Nous avons repris cette idée dans l'approche multi-modèles, en isolant les sous-modèles exploitant des postes pluviométriques plutôt à l'amont de ceux exploitant des postes plutôt à l'aval. Rien n'a permis de mettre en évidence l'intérêt d'une telle dissociation. Les meilleures combinaisons de postes par une approche multi-modèles n'ont d'ailleurs jamais pu être reliées de manière significative à des déterminants physiques. Par ailleurs, on considère souvent que cette position de la pluie sur le bassin va avoir un impact sur les fonctions de transfert. Or les fonctions de transfert du modèle hydrologique, dans les deux approches, se sont globalement révélées beaucoup moins sensibles à la variabilité des pluies que les fonctions de production. Une hypothèse permettant d'expliquer ce résultat est que la variabilité des pluies va pouvoir impacter localement le bilan en eau, mais qu'elle va être fortement lissée par les transferts en souterrain dans les versants (souvent prépondérants par rapport à ceux en rivière) de sorte qu'à l'exutoire, son effet est peu significatif sur le transfert global.

Les hypothèses formulées dans la littérature sur l'effet de la variabilité des pluies se vérifient-elles ?

L'hypothèse d'augmentation des volumes d'eau écoulés avec l'augmentation de la variabilité des pluies, couramment formulée dans la littérature, a été quasiment systématiquement rejetée par nos tests. Cette hypothèse a cependant été rejetée à travers le filtre d'un modèle global et de son calage dans des conditions opérationnelles moyennes. Même si les différences de performance sont faibles, c'est l'hypothèse inverse qui a permis d'obtenir les meilleurs résultats, indiquant que le modèle préfère une exacerbation des écoulements quand l'hétérogénéité des pluies est faible. Notons que ce résultat est en partie lié au fait que le modèle trouve un intérêt à exacerber les pluies de bassin élevées, qui sont généralement faiblement hétérogènes. Notons par ailleurs que les petits bassins, présentant des forts contrastes pluviométriques (typiquement des bassins du sud-est de la France), sont souvent considérés comme étant potentiellement ceux pouvant le plus bénéficier de la variabilité

spatiale des pluies. Or nos résultats tendent à indiquer que les bassins qui bénéficient le plus systématiquement des approches que nous avons testées sont plutôt de grands bassins, pour lesquels la variabilité spatiale des pluies n'a rien d'exceptionnel au regard de l'échantillon de bassins que nous avons utilisé. Sur ces bassins, la meilleure connaissance de la pluie (due à un nombre de postes plus élevé) est peut-être un atout pour l'efficacité des méthodes proposées.

Faire une moyenne des pluies pour servir d'entrée aux modèles globaux nuit-il à leurs performances ?

La réduction de l'information disponible sur les postes pluviométriques présents sur le bassin à une pluie moyenne de bassin fait disparaître une quantité importante de cette information (la distribution des pluies, entendue dans un sens statistique). Les tests avec les indices, qui visaient à exploiter le second moment de la variable pluie, ont tous conduit à dire qu'en moyenne, le modèle ne sait pas profiter de cette information. De même, dans l'approche multi-modèle (qui conservait l'information de chaque poste intacte, et n'opérait une moyenne que sur les sorties des sous-modèles), aucun gain significatif n'a pu être obtenu par rapport à une approche strictement globale. En fait, la moyenne opérée à chaque fois (en entrée ou en sortie) joue sûrement un rôle de lissage équivalent à celui opéré par le bassin qui, on l'a dit, joue un rôle de filtre passe-bas sur les pluies.

Au final, que peut-on attendre de la variabilité spatiale des pluies pour la modélisation pluie-débit ?

La synthèse présentée dans le dernier chapitre de la thèse sur les résultats que nous avons obtenus avec nos différentes approches et ceux obtenus avec le modèle distribué, convergent vers la conclusion qu'en moyenne, les gains de performance que l'on peut espérer en modélisation pluie-débit en prenant en compte la variabilité spatiale des pluies sont faibles voire inexistants. La relative concordance des résultats entre les différentes approches et différents modèles testés donne une certaine confiance dans ce résultat.

Bien entendu, localement, sur un bassin particulier, des gains significatifs ont pu être obtenus. Cependant, il n'a pas été possible de trouver des déterminants physiques ou climatiques permettant d'indiquer a priori la meilleure efficacité des approches proposées. Cette situation est liée à une multitude de facteurs, sans que des règles aient pu être établies sur

leur importance respective. Comparativement, les performances des modèles semblent beaucoup plus sensibles aux cumuls moyens précipités sur le bassin.

Perspectives

Est-ce à dire que la variabilité spatiale des pluies est une cause perdue de l'hydrologie, une voie sans issue ? Nos travaux laissent quelques espoirs d'amélioration. Nous proposons donc succinctement deux pistes de recherche qui nous semblent intéressantes à explorer dans la suite de ce travail.

- **Sur l'approche Multi-Modèle**

L'utilisation des méthodes Multi-Modèle a permis d'entrevoir des moyens de filtrer l'information pluviométrique par le biais d'un prisme hydrologique qu'est le modèle pluie-débit. On peut donc envisager une optimisation de l'information pluviométrique utilisée en entrée des modèles. Cette approche a déjà été proposée dans la littérature mais demanderait à être généralisée. Une telle approche aurait cependant surtout comme effet de mieux définir la pluie de bassin, plus que de donner une information stricte sur l'intérêt de la variabilité des pluies. D'un point de vue opérationnel, il n'en demeure pas moins qu'une telle approche permettrait de rationaliser les réseaux pluviométriques utilisés à des fins hydrologiques.

Dans un autre registre, bien que tous nos travaux aient été réalisés en simulation, l'approche multi-modèle ouvre des perspectives intéressantes dans un contexte de prévision de crues. C'est d'ailleurs dans ce contexte que de telles approches sont le plus couramment utilisées, mais elles sont basées généralement sur plusieurs modèles. Ici, l'utilisation d'un sous-modèle par poste permet d'entrevoir une prise en compte directe de l'effet de la variabilité des pluies pour la prévision des débits. Reste à mettre au point une méthode de sélection des modèles à l'instant de la prévision qui soit la plus efficace possible.

Cette approche multi-modèle ouvre enfin la voie à une quantification des incertitudes de modélisation liées à la variabilité des pluies. Des tests complémentaires doivent être réalisés à ce sujet.

- **Utilisation de données RADAR**

Nos méthodes de prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations ont été construites à partir de réseaux de pluviomètres au sol. Nous avons vu que la configuration de ces réseaux a un impact direct sur la caractérisation de la variabilité spatiale de la pluie. Or la

technologie RADAR fournit aujourd'hui une information spatialisée sur le déplacement des cellules pluvieuses et donc potentiellement sur l'hétérogénéité de la pluie au sein du bassin. Malgré les efforts pour améliorer les lames d'eau RADAR, celles-ci restent cependant fort incertaines. On peut donc imaginer utiliser l'information RADAR en complément d'une information au sol, l'information RADAR permettant par exemple de suivre le déplacement du centre de gravité des cellules pluvieuses.

Pour finir, notons que certaines de nos conclusions vont à contre-courant des idées que l'on voit couramment circuler dans la littérature sur l'effet de la variabilité spatiale des pluies. Nous espérons que ces travaux contribueront à alimenter positivement le débat sur le sujet. Nous sommes convaincus qu'il ne s'arrêtera pas avec cette thèse et que, malgré les limites que nous avons pu mettre en évidence, la variabilité spatiale des pluies a encore quelques beaux jours devant elle dans le petit monde de l'hydrologie !

Epilogue

"(Jean Genet) m'a donné un seul conseil: en écrivant pense au lecteur; soit simple. Il m'a appris que la simplicité était le signe de la maturité".

Tahar Ben Jelloun [Eloge de l'amitié (1996)]

Mince, alors...

Références bibliographiques

1. Abrahart, R. J., See, L. (2002). "Multi-model data fusion for river flow forecasting: an evaluation of six alternative methods based on two contrasting catchments." Hydrol. Earth Syst. Sci. **6**: 665-670.
2. Ajami, N., Q. Duan, X. Gao et S. Sorooshian (2006). "Multi-Model Combination Techniques for Hydrological Forecasting: Application to Distributed Model Intercomparison Project Results." Journal of Hydrometeorology **7**(4): 755-768.
3. Anctil, F., N. Lauzon, V. Andreassian, L. Oudin et C. Perrin (2006). "Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization." Journal of Hydrology **328**(3-4): 717-725.
4. Andréassian, V. (2002). Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de doctorat. Paris, Université Pierre et Marie Curie: 781p.
5. Andréassian, V., A. Hall, N. Chahinian et Schaake.J (2006). "Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization: Results of the Model Parameter." Experiment-MOPEX IAHS Publ. **307**: 1-5.
6. Andréassian, V., A. Oddos, C. Michel, F. Anctil, C. Perrin et C. Loumagne (2004). "Impact of spatial aggregation of inputs and parameters on the efficiency of rainfall-runoff models: a theoretical study using chimera watersheds." Water Resources Research **40** (5).
7. Andréassian, V., C. Perrin, C. Michel, I. Usart-Sanchez et J. Lavabre (2001). "Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models." Journal of Hydrology **250**(1-4): 206-223.
8. Arnaud, P., C. Bouvier, L. Cisneros et R. Dominguez (2002). "Influence of rainfall spatial variability on flood prediction." Journal of Hydrology **260**(1-4): 216-230.
9. Bell, V. A. et R. J. Moore (2000). "The sensitivity of catchment runoff models to rainfall data at different spatial scales." Hydrology and Earth System Sciences **4**(4): 653-667.
10. Bergström, S. (1991). "Principles and confidence in hydrological modelling." Nordic Hydrology **22**: 123-126.
11. Bergström, S. et A. Forsman (1973). "Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model." Nordic Hydrology **4**: 147-170.
12. Berne, A., G. Delrieu, J.-D. Creutin et C. Obled (2004). "Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology." Journal of Hydrology **299**(3-4): 166-179.
13. Beven, K. (1989). "Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models." Journal of Hydrology **105**: 157-172.

14. Beven, K. et J. Freer (2001). "Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology." Journal of Hydrology **249**(1-4): 11-29.
15. Beven, K. J. (2001). Rainfall – Runoff Modelling: The Primer. Chichester, John Wiley and Sons.
16. Beven, K. J. et G. M. Hornberger (1982). "Assessing the Effect of Spatial Pattern of Precipitation in Modeling Stream Flow Hydrographs." Water Resources Bulletin **18**(5): 823-829.
17. Beven, K. J. et M. J. Kirkby (1979). "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." Hydrological Sciences Bulletin **24**(1): 43-69.
18. Biswas, A. K. (1970). History of Hydrology. Amsterdam, North Hollan Publishing Company.
19. Booij, M. J. (2002). "Modelling the effects of spatial and temporal resolution of rainfall and basin model on extreme river discharge." Hydrological Sciences Journals **47**(2): 307-320.
20. Bourqui, M., C. Loumagne, N. Chahinian et M. Plantier (2006). "Accounting for spatial variability: a way to improve lumped modelling approaches? An assessment on 3300 chimera catchments." Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parameterization Red Book IASH Publication(307): 300-310.
21. Boyle, D. P., H. V. Gupta, S. Sorooshian, V. Koren, Z. Zhang et M. Smith (2001). "Toward improved streamflow forecasts: value of semidistributed modeling." Water Resources Research **37**(11): 2749-2759.
22. Bras, R. L., D. G. Tarboton et C. Puente (1988). "Hydrologic sampling – A characterization in terms of rainfall and basin properties." Journal of Hydrology **102**(1-4): 113-135.
23. Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff et A. Boone (2007). "Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change." Water Resources Research **43**(7): doi:10.1029/2005WR004192.
24. Chang, C. L., S. L. Lo et M. Y. Chen (2007). "Uncertainty in watershed response predictions induced by spatial variability of precipitation." Environmental Monitoring and Assessment **127**(1-3): 147-153.
25. Clemen, R. T. (1989). "Combining forecasts: A review and annotated bibliography." International Journal of Forecasting **5**(4): 559-583.
26. Corral, C., D. Sempere-Torres, M. Revilla et M. Berenguer (2000). "A semi-distributed hydrological model using rainfall estimates by radar. Application to Mediterranean basins." Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere **25**(10-12): 1133-1136.
27. Das, T. (2006). The Impact of Spatial Variability of Precipitation on the Predictive Uncertainty of Hydrological Models. Thèse de doctorat, Institut für Wasserbau-University Of Stuttgart.
28. Datin, R. (1998). Outils opérationnels pour la prévention des crues rapides : traitement des incertitudes et intégration des prévisions météorologiques. Développement de TOPMODEL pour la prise en compte de la variabilité spatiale de la pluie.

- Application au bassin versant de l'Ardèche. Thèse de doctorat, INPG Grenoble: 226 p.
29. Dawdy, D. R. et J. M. Bergman (1969). "Effect of spatial variability on streamflow simulation." Water Resources Research **5**: 958-966.
 30. Delhomme, J. P. (1978). "Kriging in hydrosciences." Advances Water Resources **1**: 251-266.
 31. Delrieu, G. (1986). Evaluation d'un radar météorologique pour la mesure des précipitations - validation et étalonnage par technique géostatistique - application au bassin parisien. Thèse de Docteur-Ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble: 200 p.
 32. DIREN Midi-Pyrénées (2004). Outil de prévision des crues, présentation des modèles et de la procédure multimodèles. Rapport technique. Paris, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable: 69 p.
 33. Dong, X. H., C. M. Dohmen-Janssen et M. J. Booij (2005). "Appropriate spatial sampling of rainfall for flow simulation." Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques **50**(2): 279-298.
 34. Duncan, M. R., B. Austin, F. Fabry et G. L. Austin (1993). "The effect of gauge sampling density on the accuracy of streamflow prediction for rural catchments." Journal of Hydrology **142**(1-4): 445-476.
 35. Dunne, T. B., R. (1970). "An Experimental Investigation of Runoff Production in Permeable Soils." Water Resources Research **6**(2): 478-490.
 36. Durand, Y., E. Brun, L. Merindol, G. Guyomarc'h, B. Lesare et E. Martin (1993). "A meteorological estimation of relevant parameters for snow model." Annales Geophysicae **18**: 65-71.
 37. Edijatno (1991). Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur/ENGEES/Cemagref: 242 p.
 38. Edijatno, N. O. Nascimento, X. Yang, Z. Makhlof et C. Michel (1999). "GR3J: a daily watershed model with three free parameters." Hydrological Sciences Journal **44**(2): 263-277.
 39. Etchevers, P., C. Golaz et F. Habets (2001). "Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994." Journal of Hydrology **244**(1-2): 60-85.
 40. Faures, J.-M., D. C. Goodrich, D. A. Woolhiser et S. Sorooshian (1995). "Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling." Journal of Hydrology **173**(1-4): 309-326.
 41. Fenicia, F., H. H. G. Savenije, P. Matgen et L. Pfister (2008). "Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement." Water Resources Research **44**(W01402): doi:10.1029/2006WR005563.
 42. Finnerty, B. D., M. Smith et D. J. Seo (1997). "Space-time scale sensitivity of the Sacramento model to radar-gage precipitation inputs " Journal of Hydrology **203** (1-4): 21-38

43. Garçon, R. (1999). "Modèle global Pluie-Débit pour la prévision et la prédétermination des crues (Lumped rainfall-runoff model for flood forecasting and design flood estimation, in French)." La Houille Blanche **7**(8): 88-98.
44. Georgakakos, K. P., D. H. Bae et D. R. Cayan (1995). "Hydroclimatology of Continental Watersheds .1. Temporal Analyses." Water Resources Research **31**(3): 655-675.
45. Georgakakos, K. P., D.-J. Seo, H. Gupta, J. Schaake et M. B. Butts (2004). "Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty through multimodel ensembles." Journal of Hydrology **298**(1-4): 222-241.
46. Habertland, U. et G. W. Kite (1998). "Estimation of daily space-time precipitation series for macroscale hydrological modelling." Hydrological Processes **12**(9): 1419-1432.
47. Habets, F. (1998). Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale : Application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône. Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3: 221 p.
48. Habets, F., A. Boone, J. L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. L. Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Q. Seguí, F. Rousset-Regimbeau et P. Viennot (2008). "The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France." Journal of Geophysical Research **In press**.
49. Habets, F., J. Noilhan, C. Golaz, J. P. Goutorbe, P. Lacarrere, E. Martin, C. Otle et D. Vidal-Madjar (1999). "The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area - Part I: Model and database." Journal of Hydrology **217**(1-2): 75-96.
50. Hamlin, M. J. (1983). "The significance of rainfall in the study of hydrological processes at basin scale. " Journal of Hydrology **65**: 73-94.
51. Hansen, D. P., W. Ye, A. J. Jakeman, R. Cooke et P. Sharma (1996). "Analysis of the effect of rainfall and streamflow data quality and catchment dynamics on streamflow prediction using the rainfall-runoff model IHACRES." Environmental Modelling and Software **11**(1-3): 193-202.
52. Horton, R. E. (1923). " Accuracy of areal rainfall estimates." Monthly Weather Review **51**(7): 348-353.
53. Jakeman, A. J., Littlewood, I.G. et Whitehead, P.G. (1990). "Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. ." Journal of Hydrology **117**: 275-300.
54. Kalinga, O. A. et T. Y. Gan (2006). "Semi-distributed modelling of basin hydrology with radar and gauged precipitation." Hydrological Processes **20**(17): 3725-3746.
55. Klemeš, V. (1983). "Conceptualization and scale in hydrology." Journal of Hydrology **65**: 1-23.
56. Klemeš, V. (1986). "Operational testing of hydrological simulation models." Hydrological Sciences Journal **31**(1): 13-24.

57. Koren, V. I., B. D. Finnerty, J. C. Schaake, M. B. Smith, D.-J. Seo et Q.-Y. Duan (1999). "Scale dependencies of hydrologic models to spatial variability of precipitation." Journal of Hydrology **217**(3-4): 285-302.
58. Krajewski, W. F., V. Lakshmi, K. P. Georgakakos et S. C. Jain (1991). "A Monte-Carlo Study of Rainfall Sampling Effect on a Distributed Catchment Model." Water Resources Research **27**(1): 119-128.
59. L'hôte, Y. (1990). "Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe." Hydrologie continentale **5**(1): 13-27.
60. Lauzon, N., F. Anctil et C. W. Baxter (2006). "Clustering of heterogeneous precipitation fields for the assessment and possible improvement of lumped neural network models for streamflow forecasts." Hydrology and Earth System Sciences **10**: 485-494
61. Le Moigne, P. (2002). Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN. Note du Groupe GMME n°77. Toulouse, Centre National de Recherche en Météorologie: 30 pp.
62. Le Moine, N., V. Andreassian, C. Perrin et C. Michel (2007). "How can rainfall-runoff models handle intercatchment groundwater flows? Theoretical study based on 1040 French catchments." Water Resources Research **43**(6): W06428, doi:10.1029/2006WR005608.
63. Leander, R., A. Buishand, P. Aaldres et M. De Wit (2005). "Estimation of extreme floods of the River Meuse using a stochastic weather generator and a rainfall-runoff model " Hydrological Sciences Journal - des Sciences Hydrologiques **50**(6): 1089-1103.
64. Lebel, T. (1984). Moyenne spatiale de la pluie sur un bassin versant : estimation optimale, génération stochastique et gradex des valeurs extrêmes. Thèse de doctorat, Grenoble 1 - I.N.P. Grenoble: 339 p.
65. Lebel, T., Bastin, G., Obled, C., Creutin, J.-D (1987). "On the accuracy of areal rainfall estimation: a case study." Water Resources Research **23**(11).
66. Ledoux, E., G. Girard et G. de Marsily (1989). Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. Unsaturated flow in hydrologic modeling: Theory and practice. K. A. Publishers: 435-454.
67. Ledoux, E., G. Girard et J. P. Villeneuve (1984). "Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique." La Houille Blanche **1**(2): 101-110.
68. Leviandier, T. (1988). " Mise en oeuvre et interprétation de la comparaison de modèles." La Houille Blanche **5/6**: 395-398.
69. Linsley, R. K. (1982). Rainfall-runoff models-an overview. Proc. Int. Symp. on Rainfall-Runoff Modelling, Littleton, Colorado, USA., Water Resources Publications.
70. Lopes, V. L. (1996). "On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modelling." CATENA **28**(1-2): 107-119.

71. Loumagne, C., Vidal, J. J., Feliu, C., Torterotot, J. P. et Roche, P. A. (1995). "Procédure de décision multimodèle pour une prévision des crues en temps réel application au bassin supérieur de la Garonne." Rev. Sci. Eau / J. Water Sci. **8**(4): 539-561.
72. Makhlouf, Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay: 426 p.
73. Marshall, L., A. Sharma, and D. Nott (2006). "Modeling the catchment via mixtures: Issues of model specification and validation." Water Resources Research **42**(11): doi:10.1029/2005WR004613.
74. Mathevet, T. (2005). Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire ? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un échantillon de 313 bassins versants. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris)/Cemagref (Antony): 440 p.
75. Michaud, J. et S. Sorooshian (1994a). "Comparison of Simple Versus Complex Distributed Runoff Models on a Midsized Semiarid Watershed." Water Resources Research **30**(3): 593-605.
76. Michaud, J. D. et S. Sorooshian (1994b). "Effect of rainfall-sampling errors on simulations of desert flash floods." Water Resources Research **30**(10): 2765-2775.
77. Michel, C. (1983). "Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle conceptuel à un seul paramètre?" La Houille Blanche **1**: 36-44.
78. Michel, C. (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux. Cemagref, Antony, 528 p.
79. Morrissey, M., J. A. Maliekal, J. S. Greene et J. Wang (1995). "The Uncertainty of Simple Spatial Averages Using Rain Gauge Networks." Water Resources Research **31**(8): 2011-2017.
80. Mouelhi, S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony): 323 p.
81. Moulin, L. (2007). Prévision des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux. Application aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris) / CERREVE: 653 p.
82. Nace, R. (1969). L'eau et l'homme ; aperçu mondial. La décennie hydrologique internationale, UNESCO: 49 p.
83. Naden, P. S. (1992). "Spatial Variability in Flood Estimation for Large Catchments - the Exploitation of Channel Network Structure." Hydrological Sciences Journal **37**(1): 53-71.
84. Nascimento, N. O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse de Doctorat. CERGRENE / ENPC: 550 p.
85. Nash, J. E., and Sutcliffe, V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, I. A discussion of principles." Journal of Hydrology **10**: 282-290.

86. Noilhan, J. et J. F. Mahfouf (1996). "The ISBA land surface parameterisation scheme." Global and Planetary Change **13**(1-4): 145-159.
87. Noilhan, J. et S. Planton (1989). "A simple parameterization of land surface processes for meteorological models." Mon. Wea. Rev **117**: 536-549.
88. O'Connel, P. E., J. E. Nash et J. P. Farel (1971). "River flow forecasting through conceptual models. Part II. The Bronsa catchment at Ferbane." Journal of Hydrology **10**: 317-329.
89. Obled, C., J. Wendling et K. Beven (1994). "The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation using observed data." Journal of Hydrology **159**(1-4): 305-333.
90. Ogden, F. L. et P. Y. Julien (1994). "Runoff model sensitivity to radar rainfall resolution." Journal of Hydrology **158**(1-2): 1-18.
91. Oudin, L. (2004). Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat, ENGREF (Paris) / Cemagref (Antony): 495 p.
92. Oudin, L., V. Andreassian, T. Mathevet, C. Perrin et C. Michel (2006a). "Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations." Water Resources Research **42**(7): W07410, doi:10.1029/2005WR004636.
93. Oudin, L., V. Andreassian, C. Perrin et F. Anctil (2004). "Locating the sources of low-pass behavior within rainfall-runoff models." Water Resources Research **40**(11): doi:10.1029/2004WR003291.
94. Oudin, L., C. Perrin, T. Mathevet, V. Andreassian et C. Michel (2006b). "Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models." Journal of Hydrology **320**(1-2): 62-83.
95. Payan, J. L., C. Perrin, C. Michel et A. V. (2007). "How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model?" Water Resources Research **In press**.
96. Perrault, P. (1674). De l'origine des fontaines. Traduction anglaise par A. Larocque, 1967 - On the Origin of Springs. New York, London, Hafner, Publishing CO.
97. Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat. INPGrenoble / Cemagref (Antony): 530 p.
98. Perrin, C., C. Michel et V. Andreassian (2001). "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments." Journal of Hydrology **242**(3-4): 275-301.
99. Perrin, C., C. Michel et V. Andréassian (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." Journal of Hydrology **279**(1-4): 275-289.
100. Quintana-Seguí, P., P. L. Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy et S. Morel (2008). "Analysis of Near Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN analysis over France." Journal of Applied Meteorology and Climatology **In press**.

101. Reed, S., V. Koren, M. Smith, Z. Zhang, F. Moreda, D.-J. Seo et DMIP-Participants (2004). "Overall distributed model intercomparison project results." Journal of Hydrology **298**(1-4): 27-60.
102. Reed, W. et J. Kincer (1917). "The preparation of precipitation charts." Monthly Weather Review **45**(5): 233-235.
103. Refsgaard, J. C. et J. Knudsen (1996). "Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models." Water Resources Research **32**(7): 2189-2202.
104. Robinson, M. (2005). Precipitation Measurement: Gauge Deployment. Encyclopedia of Hydrological Sciences. M. G. Anderson, Ed. John Wiley. **Vol 1**: DOI: 10.1002/0470848944.hsa039.
105. Roche, M. (1964). Point de vue sur le problème de l'abattement des pluies. Land Erosion, Precipitations, Hydrometry, Soil Moisture. Gentbrugge, IAHS Publ. 065: 266-278.
106. Roche, P. A. et J. P. Torterotot (1988). "Les procédures de décision en temps réel pour la prévision des crues." La Houille Blanche **5**(6).
107. Rodda, J. C. (1967). "The systematic error in rainfall measurement." J. Inst. Water Eng. **21**: 173-177.
108. Rodriguez-Iturbe, I. a. M., J.M. (1974). "The design of rainfall networks in time and space.." Water Resources Research **10**(4): 713-728.
109. Rojas Serna, C. (2005). Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit? PhD Thesis. **ENGREF, Paris**: 225.
110. Rousset, F., F. Habets, E. Gomez, P. Le Moigne, S. Morel, J. Noilhan et E. Ledoux (2004). "Hydrometeorological modeling of the Seine basin using the SAFRAN-ISBA-MODCOU system." Journal of Geophysical Research-Atmospheres **109**(D14105): doi:10.1029/2003JD004403.
111. Schaake, J., Q. Duan, V. Andreassian, S. Franks, A. Hall et G. Leavesley (2006). "The model parameter estimation experiment (MOPEX)." Journal of Hydrology **320**(1-2): 1-2.
112. Schaake, J. C., Duan, Q.-Y., Smith, M. et Koren, V.I. (2000). Criteria to select basins for hydrologic model development and testing. Conference on Hydrology AMS, Long Beach
113. See, L., Openshaw, Stan. (2000). "A hybrid multi-model approach to river level forecasting." Hydrological Sciences Journal - des Sciences Hydrologiques **45**(4): 523-536.
114. Sevruk, B. (2005). Rainfall measurement: Gauges. Encyclopedia of Hydrologic Sciences. M. G. Anderson. Hoboken, Ed. John Wiley. **Vol 1**: 529-535.
115. Shah, S. M. S., P. E. O'Connell et J. R. M. Hosking (1996). "Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 1. Formulation and calibration of a stochastic rainfall field model." Journal of Hydrology **175**(1-4): 67-88.
116. Shamseldin, A. Y., O'Connor, K.M. (1996). "Methods for combining the outputs of different rainfall-runoff models." Journal of Hydrology **197**(17): 189-202.

117. Shamseldin, A. Y., O'Connor, K.M. (1999). "A real-time combination method for the outputs of different rainfall-runoff models." Hydrological Sciences Journal - des Sciences Hydrologiques **44**(6): 895-912.
118. Sieck, L. C., S. J. Burges et M. Steiner (2007). "Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall (vol 43, art no W01420, 2007)." Water Resources Research **43**(6).
119. Singh, V. P. (1997). "Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph." Hydrological Processes **11**(12): 1649-1669.
120. Singh, V. P. et P. K. Chowdhury (1985). "Comparing Some Methods of Estimating Mean Areal Rainfall." Water Resources Bulletin **22**(2): 275-283.
121. Sivapalan, M., R. A. Woods et J. D. Kalma (1997). "Variable bucket representation of TOPMODEL and investigation of the effects of rainfall heterogeneity " Hydrological Processes **11** (9): 1307-1330
122. Smith, J. A. (1993). Precipitation. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill. Maidment, D.R. **Chapitre 3**: 3-20.
123. Smith, M. B., V. I. Koren, Z. Zhang, S. M. Reed, J.-J. Pan et F. Moreda (2004a). "Runoff response to spatial variability in precipitation: an analysis of observed data." Journal of Hydrology **298**(1-4): 267-286.
124. Smith, M. B., D.-J. Seo, V. I. Koren, S. M. Reed, Z. Zhang, Q. Duan, F. Moreda et S. Cong (2004b). "The distributed model intercomparison project (DMIP): motivation and experiment design." Journal of Hydrology **298**(1-4): 4-26.
125. St-Hilaire, A., T. Ouarda, M. Lachance, B. Bobee, J. Gaudet et C. Gignac (2003). "Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: a case study." Hydrological Processes **17**(18): 3561-3580.
126. Storm, B., K. Høgh Jensen et J. C. Refsgaard (1989). "Estimation of catchment rainfall uncertainty and its influence on runoff prediction." Nordic Hydrology **19**: 77-88.
127. Sugawara, M. (1993). On the weights of precipitation stations. Advances in Theoretical Hydrology. J. P. Ed. O'Kane. Amsterdam, Elsevier: 59-74.
128. Sun, X., R. G. Mein, T. D. Keenan et J. F. Elliott (2000). "Flood estimation using radar and raingauge data." Journal of Hydrology **239**(1-4): 4-18.
129. Sutcliffe, J. V. (1966). "The assessment of random errors in areal rainfall estimation," Bull.Intern. Ass. Sci. Hydr. **XI**(3): 35-42.
130. Tetzlaff, D. et S. Uhlenbrook (2005). "Significance of spatial variability in precipitation for process-oriented modelling: results from two nested catchments using radar and ground station data." Hydrology and Earth System Sciences **9**(1-2): 29-41.
131. Thiessen, A. H. (1911). "Precipitation for large areas." Monthly Weather Review **39**: 1082-1084.
132. Troutman, B. M. (1983). "Runoff prediction errors and bias in parameter-estimation induced by spatial variability of precipitation." Water Resources Research **19** 791-1983

133. Tsintikidis, D., K. P. Georgakakos et D. E. S. ASCE; Jason A. Sperflage, 4 and Theresa M. Carpenter (2002). "Precipitation Uncertainty and Raingauge Network Design within Folsom Lake Watershed." Journal of Hydrologic Engineering **7**(2): 175-184.
134. Tukey, J. W. (1997). Exploratory Data Analysis, Addison-Wesley.
135. Vischel, T. et T. Lebel (2007). "Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff. Part 2: Idealized modeling of runoff sensitivity." Journal of Hydrology **333**(2-4): 340-355.
136. Wendling, J. (1988). Modélisation pluie/débit en zone méditerranéenne: comparaison d'approches globales/distribuées, conceptuelles/physico-déterministes. Influence de la variabilité spatiale des pluies (application au bassin versant du real collobrier). Thèse de doctorat. Grenoble, INPG.
137. Wilson, C. B., Valdes, J.D., Rodriguez-Iturbe, I. (1979). "On the influence of the spatial distribution rainfall on storm runoff." Water Resources Research **15**(2): 321-328.
138. Winchell, M., H. V. Gupta et S. Sorooshian (1998). "On the simulation of infiltration- and saturation-excess runoff using radar-based rainfall estimates: Effects of algorithm uncertainty and pixel aggregation." Water Resources Research **34**(10): 2655-2670.
139. Wood, E. (1976). "An analysis of the effects of parameter uncertainty in deterministic hydrologic models." Water Resources Research **12**(5): 925-932.
140. Xu, C. Y. et G. L. Vandewiele (1994). "Sensitivity of monthly rainfall-runoff models to input errors and data length." Hydrological Sciences Journal **39**(2): 157-176.
141. Yen-Chang Chen, C. W. H.-C. Y. (2008). "Rainfall network design using kriging and entropy." Hydrological Processes **22**(3): 340-346.
142. Yilmaz, K. K., T. S. Hogue, K. L. Hsu, S. Sorooshian, H. V. Gupta et T. Wagener (2005). "Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting." Journal of Hydrometeorology **6**(4): 497-517.

Annexe 1 Liste des bassins versants utilisés

1. Au pas de temps journalier

Liste des 182 stations hydrométriques utilisées pour le pas de temps journalier, avec pour chaque bassin versant le nombre de postes pluviométriques, l'indice statistique médian d'hétérogénéité des pluies, les caractéristiques moyennes annuelles des débits (Q) de l'ETP (E) et des précipitations (P)

CODE	NOM COURS D'EAU+ STATION	Nombre Postes	Indice Stat Med (-)	Superficie (km ²)	Qannuel (mm)	Eannu (mm)	Pannuelle (mm)
A2702010	La Bruche à Saulxures	3	0.304	39	773	704	1421
A4152010	La Moselotte à Vagny [Zainvillers]	2	0.293	183	1358	704	1658
A4173010	La Cleurie à Cleurie	2	0.204	66	1001	704	1494
A4200630	La Moselle à Saint-Nabord [Noir Gueux]	3	0.333	621	1170	670	1646
A4250640	La Moselle à Epinal	6	0.204	1219	958	704	1437
A4362010	La Vologne à Jarménil	2	0.333	369	767	704	1322
A4632010	L'Avière à Frizon [Basse Frizon]	3	0.197	104	347	636	930
A5842010	Le Terrouin à Villey-Saint-Étienne	2	0.556	169	122	652	756
A6941010	La Meurthe à Malzville	9	0.294	2914	382	678	1051
A7010610	La Moselle à Custines	21	0.5	6830	530	664	1024
A7930610	La Moselle à Hauconcourt	27	0.494	9387	400	664	960
A8712010	La Canner à Bettelainville	2	0.25	30	232	654	769
A8853010	Le ruisseau de Montenach à Sierck-les-Bains	2	0.143	47	291	654	859
A9001050	La Sarre Blanche à Laneuveville-les-Lorquin	2	0.164	64	629	704	943
A9013050	La Sarre Rouge à Vasperviller	2	0.23	90	547	704	1245
A9021050	La Sarre à Hermelange	4	0.395	193	358	704	1092
E4035710	L'Aa à Wizernes	4	0.289	392	388	650	941
E4905710	L'Yser à Bambecque [Engelshof]	4	0.383	236	196	658	692
H0100020	La Seine à Plaines-Saint-Lange	4	0.227	704	519	675	923
H0203010	La Laignes à Chaume-lés-Baigneux	2	0.187	87	129	675	963
H0203020	La Laignes à Molesmes	4	0.357	614	179	698	849
H0210010	La Seine à Polisy	8	0.289	1450	343	675	874
H0321030	L'Ource à Autricourt	5	0.217	548	368	698	878
H0321040	L'Ource à Celles-sur-Ource	5	0.272	730	390	698	876
H0400010	La Seine à Bar-sur-Seine	13	0.357	2340	349	675	884
H1051020	L'Aube à Longchamp-sur-Aujon	5	0.177	657	366	675	931
H1700010	La Seine à Pont-sur-Seine	21	0.418	9760	260	691	875
H1932010	La Traconne à Saint-Brice [Moulin de L'étang]	2	0.235	112	174	707	707
H2221010	L'Yonne à Gurgy	12	0.538	3820	356	729	906
H2342010	Le Serein à Chablis	7	0.205	1120	261	747	902
H2721010	L'Yonne à Courlon-sur-Yonne	29	0.583	10700	304	711	851
H3102010	L'Ouanne à Toucy	3	0.25	160	192	747	768
H3201010	Le Loing à Chalette-sur-Loing	13	0.143	2300	159	753	726

H3613010	Le Lunain à Paley	3	0.311	163	100	737	686
H3613020	Le Lunain à Episy	6	0.376	252	75	737	697
H3621010	Le Loing à Episy	31	0.429	3900	148	749	707
H3623010	L'Orvanne à Blennes	3	0.172	108	108	757	724
H3923010	Le ru d'Ancoeur à Blandy	4	0.462	181	84	704	730
H4232040	L'Orge à Epinay-sur-Orge [le Breuil]	7	0.319	632	114	702	640
H4243010	L'Yvette à Villebon-sur-Yvette	7	0.293	224	200	702	640
H4252010	L'Orge à Morsang-sur-Orge	7	0.293	922	121	702	640
H4322010	L'Yerres à Courtomer	7	0.5	427	118	704	731
H4340010	La Seine à Villeneuve-Saint-Georges	70	0.623	30800	238	708	813
H5062010	Le Rognon à Doulaincourt-Saucourt	9	0.312	614	471	697	1027
H5102010	La Saulx à Pancey	2	0.333	40	512	697	1074
H5102020	La Saulx à Couvonges	9	0.44	475	505	697	1086
H5122310	L'Ornain à Fains-Véel	9	0.378	820	419	697	1054
H5123210	Le ruisseau de Malval à Nantois-sur-Ornain	2	0.2	32	528	697	959
H5142610	La Ch.e à Villotte-devant-Louppy	3	0.231	113	443	697	992
H5153010	La Vière à Val-de-Vière	7	0.293	166	257	697	878
H5172010	La Saulx à Vitry-en-Perthois	24	0.187	2100	394	697	978
H5201010	La Marne à Chalons-sur-Marne [depuis 02/89]	20	0.662	6280	397	706	988
H5213310	La Soude à Soudron	3	0.201	105	189	682	727
H5302010	Le Surmelin à Saint-Eugène	4	0.5	454	217	712	808
H5412010	Le Petit Morin à Montmirail	5	0.225	354	188	737	751
H5412020	Le Petit Morin à Jouarre [Vanry]	7	0.5	605	172	737	749
H5723010	L'Orgeval à Boissy-le-Chatel [Le Theil]	6	0.215	104	220	737	714
H5752020	Le Grand Morin à Montry	14	0.233	1190	218	737	736
H5813010	La Beuvronne à Compans	6	0.193	98	136	737	721
H5841010	La Marne à Noisiel	41	0.757	12500	271	709	873
H5920010	La Seine à Paris [Austerlitz]	105	0.577	43800	231	712	837
H6021010	L'Aisne à Passavant-en-Argonne	15	0.423	223	324	688	921
H6102010	L'Aire à Beausite [Amblaincourt]	11	0.296	282	405	688	1034
H6122010	L'Aire à Varennes-en-Argonne	15	0.296	627	466	688	1020
H6201010	L'Aisne à Mouron	36	0.412	2280	309	680	951
H6221010	L'Aisne à Givry	8	0.378	2940	354	662	927
H6531011	L'Aisne à Trosly-Breuil	15	0.385	7940	276	661	907
H7041010	L'Oise à Monceau-sur-Oise	6	0.333	852	455	644	958
H7061010	L'Oise à Origny-Sainte-Benoite	7	0.295	1170	350	644	947
H7201010	L'Oise à Condren	12	0.455	3280	337	659	886
H7401010	L'Oise à Sempigny	13	0.531	4290	260	659	881
H7611012	L'Oise à Pont-Sainte-Maxence [Sarron]	29	1	14200	258	666	901
H9923010	L'Austreberthe à Duclair [Bas Aulnay]	3	0.447	208	295	633	892
J0014010	Le Nançon à L.cousse [Pont aux Anes]	2	0.252	67	328	728	873
J0144010	La Loysance à Saint-Ouen-la-Rouërie	2	0.225	82	303	732	874
J2614010	Le Queffleuth à Plourin-lès-Morlaix [Lesquifiou]	2	0.25	88	491	673	994
J3601810	L'Aulne à Scignac [Le Goask]	3	0.216	117	599	673	1204
J4014010	Le Goyen à Pont-Croix [Kermaria]	5	0.201	89	466	673	1086
J4224010	Le Jet à Ergué-Gabéric	3	0.28	108	625	706	1205
J4614010	Le Ster Goz à Bannalec	2	0.204	70	691	752	1258
J4623010	L'Aven à Pont-Aven [Bois d'Amour]	3	0.333	184	678	706	1244
J5613010	L'Evel à Guénin	2	0.263	316	316	752	775
J5704810	Le Coët Organ à Quistinic [Kerdec]	2	0.36	48	526	752	1018
J7060620	La Vilaine à Chateaubourg	3	0.415	604	280	728	785
J7373110	La Vaunoise à Saint-Gilles	3	0.184	61	207	728	747

K0550010	La Loire à Bas-en-Basset	26	0.529	3234	361	759	957
K0733220	Le Lignon de Chalmazel à Chalmazel [Chevelières]	2	0.256	61	930	737	904
K0763310	Le Vizezy à Essertines-en-Chatelneuf [La Guillanche]	3	0.158	43	507	737	827
K1321810	L'Arroux à Etang-sur-Arroux [pont du Tacot]	6	0.2	1798	419	718	892
K1341810	L'Arroux à Rigny-sur-Arroux	9	0.318	2277	421	718	905
K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charollais	4	0.357	819	337	718	956
K1391810	L'Arroux à Digoïn	13	0.451	3166	394	718	920
K2064010	Le Langouyrou à Langogne	5	0.286	65	766	759	1096
K2173010	Le Chapeauroux à Saint-Bonnet-de-Montauroux	5	0.333	398	509	806	914
K2210810	L'Allier à Monistrol-d'Allier	6	0.192	988	547	806	1025
K2316210	La Crouce à Aubazat	5	0.2	130	387	759	874
K2330810	L'Allier à Vieille-Brioude	18	0.164	2269	428	806	1010
K2365510	Le Lidenne à Couteuges	4	0.304	46	200	741	743
K2714010	Le Joron à Beauregard-l'Evêque	2	0.25	124	245	812	780
K2951910	La Dore à Peschadoires [Pont de Dore]	5	0.286	1280	433	737	1062
K3374710	Le Boulblon Lag.es à Fourilles	5	0.149	71	132	722	771
K4856020	La Ramberge à Pocé-sur-Cisse	4	0.263	63	137	782	704
L0010610	La Vienne à Peyrelevade [Servières]	3	0.212	61	942	748	1404
L0244510	La Leyrenne à Saint-Dizier-Leyrenne	4	0.289	62	490	720	1095
L0614010	L'Aurence à Limoges [Moulin Pinard]	3	0.241	35	521	720	1041
M0114910	Le Merdereau à Saint-Paul-le-Gaultier [Chiantin]	2	0.333	118	407	699	883
M0243010	L'Orne Saosnoise à Montbizot [Moulin Neuf Cidrerie]	6	0.243	510	207	699	832
M0250610	La Sarthe à Neuville-sur-Sarthe [Montreuil]	13	0.468	2716	320	699	869
M0421510	L'Huisne à Montfort-le-Gesnois [la Pécardière]	13	0.208	1890	260	699	821
M1024810	La vallée de la Malorne à Bouville	3	0.333	122	27	718	636
M1214010	Le Coutron à Souday [Glatigny]	2	0.141	85	222	716	746
N3001610	Le Grand Lay à Saint-Prouant [Monsireigne]	3	0.28	131	316	864	825
O2304020	Le Girou à Maurens-Scopont	2	0.264	108	192	912	773
O2725010	La Lauze à S.m.zies-Cachan [Faget-Abbatial]	2	0.25	36	191	845	773
O3011010	Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchalettes]	2	0.252	67	1656	806	1736
O3165010	La Brèze à Meyrueis	3	0.26	36	888	829	1653
O3314010	La Dourbie à Dourbies [Le Mazet-r.cent]	3	0.333	43	1713	829	1816
O3584610	La Sorgues à Saint-Affrique [aval]	2	0.2	332	744	898	1096
O3594010	Le Dourdou à Vabres-l'Abbaye [Bedos]	5	0.264	658	596	898	977
O4102510	L'Agout à Fraisse-sur-Agout	3	0.282	48	1059	885	1515
O4704030	Le Dadou à Paulinet [St-Jean-de-Jeanne]	2	0.172	72	716	885	1282
O5344010	Le Vioulou à Salles-Curan [Trébons-Bas]	2	0.231	57	615	837	1111
O7021530	Le Lot à Mende [aval]	2	0.4	250	581	829	984
O7041510	Le Lot à Balsièges [Bramonas]	4	0.562	465	581	829	1038
O7054010	La Colagne à Saint-Bonnet-de-Montauroux [Ganivet]	3	0.236	89	590	829	888
O7101510	Le Lot à Banassac [La Mothe]	8	0.25	1164	458	829	993
O7145220	La Boralde de St-Chély à Castelnau-de-Mandailles	7	0.25	53	959	829	1256
O7155010	La Boralde de Bonneval au Cayrol	2	0.167	100	937	829	1216
O7191510	Le Lot à Entraygues-sur-Truyère [amont]	11	0.154	2180	458	768	1054
O7202510	La Truyère à Serverette	3	0.2	72	1017	829	954
O7265010	La Limagnole à Fontans [St-Alban]	3	0.205	76	439	759	904
O7625210	L'Ondes à Saint-Symphorien-de-Thénières	3	0.429	37	763	768	1274
O7692510	La Truyère à Entraygues-sur-Truyère	17	0.461	3280	631	768	1290
O7701510	Le Lot à Entraygues-sur-Truyère [aval]	28	1	5460	596	768	1239
P0212510	La Rhue à Egliseneuve-d'Entraigues	5	0.235	39	1335	769	1528
P0804010	La Sumène à Saint-Etienne-de-Chomeil	3	0.226	53	1009	720	1489
P0874020	La Sumène à Méallet [Vendes]	3	0.2	284	469	720	1303

P0885010	Le Mars à Bassignac [Pont de Vendes]	2	0.289	117	1073	720	1658
P0894010	La Sumène à Bassignac [Pont de Vendes]	5	0.333	401	638	720	1445
P0924010	La Triouzoune à Saint-Angel	5	0.186	76	759	769	1244
P1114010	La Luzège à Maussac [Pont de Maussac]	5	0.154	85	712	769	1313
P3245010	Le Mayne à Saint-Cyr-la-Roche	4	0.261	49	447	748	1052
P3464010	La Vimbelle à Bar	3	0.333	147	778	662	1387
P3522510	La Corrèze à Tulle	6	0.241	356	948	739	1375
P3614010	La Montane à Eyrein [Pont du Jay]	4	0.335	43	929	748	1450
Q2094310	L'Izaute à Monlezun-d'Armagnac	3	0.231	111	265	752	913
S2224610	Le Grand Arriou à Moustey [Biganon]	3	0.24	108	305	805	984
S2235610	Le Bouron à Belin-Bliet [Moulin du Moine]	3	0.391	36	249	805	942
S4214010	Le Magescq à Magescq	2	0.295	60	586	754	1300
U2022010	Le Doubs à la Cluse-et-Mijoux	6	0.264	350	714	671	1538
U2035020	Le Drugeon à Vuillecin	2	0.247	191	554	671	1461
U2142010	Le Doubs à Glère [Courclavon]	8	0.289	1240	863	671	1481
U2215020	Le Dessoubre à Saint-Hippolyte	6	0.429	560	780	671	1316
U2222010	Le Doubs à Mathay	13	0.304	2200	749	671	1424
U2345030	La Savoureuse à Belfort	5	0.262	141	1045	636	1416
U2402010	Le Doubs à Voujaucourt	13	0.356	3420	751	671	1424
V1015040	La Valserine à Lancrans [Moulin de Métral]	4	0.333	395	1301	723	1564
V1015810	La Semine à Chatillon-en-Michaille [Coz]	2	0.289	183	1544	723	1309
V1525410	L'Ainan à Saint-Geoire-en-Valdaine	2	0.176	41	805	737	1185
V3315010	La Valencize à Chavanay	3	0.328	36	338	837	858
V4174010	L'Eyrieux à Saint-Fortunat-sur-Eyrieux	6	0.429	644	574	1120	1212
V4264021	La Drôme à Loriol sur Drôme	9	0.182	1640	527	1120	1088
V5425210	La Gagnière à Banne	3	0.182	55	936	1000	1407
V6155610	Le Brégoux à Aubignan	3	0.231	39	122	1024	655
V7135020	Le Gardon de St-Jean à l' Estréchure	3	0.264	263	607	1039	1827
V7144010	Le Gardon d'Anduze à Anduze	6	0.25	546	916	1039	1703
V7184010	Le Gard à Sanilhac-Sagriès [La Baume]	6	0.333	1600	577	1120	1128
Y1514010	L'Orbieu à Montjoi [Le Moulin]	5	0.234	76	371	1163	989
Y2002010	L'H,rault à Valleraugue	2	0.315	46	1656	898	1944
Y5105010	Le Caramy à Vins-sur-Caramy	4	0.365	215	437	1225	970
Y7002020	Le Golo à Albertacce	3	0.204	93	1154	1026	1077
Y7114010	L'Asco à Canavaggia [Ponte Leccia]	3	0.241	366	479	1026	697
Y7315010	Le Bevinco à Olmeta-di-Tuda [Lancone]	3	0.198	54	376	1026	653
Y7615010	Le Regino à Speloncato [Regino]	2	0.298	45	306	1026	674
Y7804010	Le Fango à Galéria	2	0.368	129	562	1009	804
Y8614010	Le Taravo à Corrano [Bains de Guitera]	5	0.2	157	1004	991	1072
Y8624010	Le Taravo à Zigliara [pont d'Abra]	4	0.333	335	673	991	1112
Y8814010	Le Rizzanese à Zoza	4	0.277	130	923	991	892
Y9215010	La Bravone à Tallone [pont de Bravone]	4	0.252	67	476	1026	992
Y9605220	La Solenzara à Sari-Solenzara [Tafonato]	2	0.187	97	610	991	868
Y9605230	La Solenzara à Sari-Solenzara [Canniciu]	3	0.134	100	582	991	917
Y9806210	Le Petroso à Porto-Vecchio [pont de Bala]	3	0.279	53	506	991	784

2. Au pas de temps HORAIRE

Liste des 99 stations hydrométriques utilisées pour le pas de temps horaire, avec pour chaque bassin versant, le nombre de postes pluviométriques, l'indice statistique moyen d'hétérogénéité des pluies au pas de temps horaire et les caractéristiques moyennes annuelles des débits (Q) de l'ETP (E) et des précipitations (P)

CODE	NOM COURS D'EAU+ STATION	Nombre Postes	Indice Stat Moy (-)	Superficie (km ²)	Qannuel (mm)	Eannuelle (mm)	Pannuelle (mm)
A1310310	L'Ill à Ensisheim	3	0.795	1040	483	938	1404
A2280350	L'Ill à Strasbourg [Chasseur Froid]	14	0.655	4600	627	927	948
A2860110	La Bruche à Holtzheim	3	0.743	688	467	886	962
A3422010	La Zorn à Saverne [Schinderthal]	3	0.61	185	504	891	1023
A3472010	La Zorn à Waltenheim-sur-Zorn	3	0.61	688	414	930	1023
A7010610	La Moselle à Custines	3	0.727	6830	774	892	840
A7430610	La Moselle à Metz [Pont des Morts]	4	0.78	7880	1286	894	1217
A7930610	La Moselle à Hauconcourt	5	0.771	9390	664	900	1121
B2220010	La Meuse à Saint-Mihiel	3	0.76	2540	554	897	915
B3150020	La Meuse à Stenay	4	0.759	3900	572	897	914
B5600010	La Meuse à Montcy-Notre-Dame	5	0.762	7720	844	891	920
E6351410	La Somme à Péronne	4	0.731	1290	202	910	709
H0400010	La Seine à Bar-sur-Seine	6	0.666	2340	514	937	889
H0400020	La Seine à Courtenot	6	0.666	2380	309	937	889
H2452020	L'Armançon à Aisy-sur-Armançon [aval]	5	0.654	1350	392	931	870
H2462020	L'Armançon à Tronchoy	6	0.661	1970	450	940	870
H2473010	L'Armançe à Chessy-les-Prés	2	0.57	480	357	959	791
H2482010	L'Armançon à Briennon-sur-Armançon	7	0.669	2990	430	951	828
H3201010	Le Loing à Châlette-sur-Loing	3	0.682	2300	258	977	832
H3621010	Le Loing à Épisy	5	0.695	3900	250	978	759
H4322030	L'Yerres à Courtomer [Paradis]	2	0.628	429	178	954	737
H5042010	Le Rognon à Bourdons-sur-Rognon [Lacrète]	2	0.643	164	539	907	928
H5062010	Le Rognon à Doulaincourt-Saucourt	3	0.658	614	724	915	993
H5172010	La Saulx à Vitry-en-Perthois	3	0.683	2100	637	913	944
H5321010	La Marne à la Ferté-sous-Jouarre	16	0.633	8820	468	931	838
H5732010	Le Grand Morin à Pommeuse	3	0.679	770	345	943	696
H7061010	L'Oise à Origny-Sainte-Benoite	2	0.63	1170	411	878	852
H7162010	La Serre à Novion-et-Catillon	3	0.729	1630	433	904	741
H7201010	L'Oise à Condren	5	0.716	3280	496	896	764
H7401010	L'Oise à Sempigny	5	0.716	4290	376	901	764
H8042010	L'Epte à Fourges	4	0.649	1370	369	902	717
H8043310	L'Aubette de Magny à Ambleville	2	0.626	96	228	924	704
H9121010	L'Eure à Charpont	4	0.708	2050	163	946	632
H9331010	L'Eure à Cailly-sur-Eure	6	0.72	4530	209	938	622
H9501010	L'Eure à Louviers	6	0.72	5990	216	935	622
J8502310	L'Oust à Saint-Gravé [Echuse Le Guélin]	3	0.785	2470	462	943	868
K0253020	La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel	5	0.681	375	343	841	752
K0403010	Le Lignon du Velay au Chambon-sur-Lignon	2	0.707	139	1000	811	1086
K0614010	Le Furan à Andrézieux-Bouthéon	4	0.641	178	573	964	833
K0783220	Le Lignon de Chalmazel à Poncins	3	0.772	664	527	901	982

K1383010	La Bourbince à Vitry-en-Charollais	3	0.665	819	389	977	866
K1391810	L'Arroux à Digoïn	5	0.701	3170	402	951	867
K1533020	La Besbre à Lalpallise [Moulin Marin]	2	0.792	452	574	952	1033
K1773010	L'Aron à Verneuil	4	0.682	1470	517	1007	1019
K2871910	La Dore à Tours-sur-Meymont [Giroux]	4	0.719	800	572	842	1001
K2981910	La Dore à Dorat	5	0.736	1520	633	873	950
K3222010	La Sioule à Pontgibaud	3	0.679	353	761	843	1065
K3373010	La Bouble à Chareil-Cintrat	4	0.688	555	355	982	796
K5183010	La Tardes à Évaux-les-Bains	4	0.707	854	430	930	850
K5220910	Le Cher à Saint-Victor	6	0.701	1840	445	943	803
K5383020	L'Aumance à Hérisson	3	0.698	920	278	986	796
K5552300	L'Yèvre à Savigny-en-Septaine	4	0.644	531	275	1002	821
K6492510	La Sauldre à Selles-sur-Cher	5	0.689	2250	313	983	869
K6593010	Le Fouzon à Meusnes [Le gué de Meusnes]	3	0.688	1000	249	1017	722
K7312610	L'Indre à Saint-Cyran-du-Jambot	5	0.741	1710	336	1004	788
L4210710	La Creuse à Glénic	4	0.652	944	595	917	1005
L4220710	La Grande Creuse à Fresselines	5	0.671	1240	571	930	982
L6202030	La Claise au Grand-Pressigny [Étableau 2]	3	0.72	897	228	1027	773
M0250610	La Sarthe à Neuville-sur-Sarthe [Montreuil]	2	0.691	2720	497	953	791
M0250620	La Sarthe à Souillé	2	0.691	2700	392	953	791
M0421510	L'Huisne à Montfort-le-Gesnois	2	0.642	1890	337	953	741
M0500610	La Sarthe à Spay	4	0.742	5290	345	961	759
M0680610	La Sarthe à Saint-Denis-d'Anjou [Beffès]	4	0.742	7380	333	971	759
M1073001	La Conie à Conie-Molitarde [Pont de Bleuet]	5	0.686	1450	59	970	619
M1341610	Le Loir à Flée [Port-Gautier]	8	0.711	5940	201	974	654
M1531610	Le Loir à Durtal	9	0.697	7920	225	982	663
O3401010	Le Tarn à Millau	3	0.777	2170	1083	904	1245
P3274010	La Loyre à Saint-Viance [Pont de Burg]	2	0.613	274	606	1038	1082
P6161510	L'Isle à Mayac	2	0.639	800	596	1037	1137
P6382510	L'Auvézère au Change [Aubarède]	2	0.616	884	473	1041	1159
P7001510	L'Isle à Bassilac [Charrieras]	3	0.65	1860	601	1043	1144
P7041510	L'Isle à Périgueux	4	0.688	2120	568	1048	1084
P7261510	L'Isle à Abzac	5	0.698	3750	472	1067	1005
P8284010	La Lizonne à Saint-Séverin [Le Marchais]	2	0.691	640	298	1076	840
P8312520	La Dronne à Bonnes	2	0.691	1940	422	1069	840
Q2192510	Le Midou à Mont-de-Marsan	2	0.825	800	300	1139	827
Q3464010	Le Luy à Saint-Pandelon	4	0.726	1150	596	1146	1057
S2242510	L'Eyre à Salles	2	0.796	1650	439	1112	984
U0610010	La Saône à Ray-sur-Saône	3	0.716	3740	702	930	980
U1054010	L'Ognon à Beaumotte-Aubertans	2	0.706	1250	788	927	1457
U1084010	L'Ognon à Pesmes	4	0.732	2040	746	950	1227
U1120010	La Saône à Auxonne	10	0.651	8900	701	947	1065
U2102010	Le Doubs à Ville-du-Pont	2	0.607	658	722	776	1500
U2122010	Le Doubs à Goumois	2	0.572	1060	1197	763	1498
U2142010	Le Doubs à Glère [Courclavon]	4	0.611	1240	1194	772	1504
U2222010	Le Doubs à Mathay	6	0.609	2200	1127	800	1412
U2345020	La Savoureuse à Giromagny	2	0.564	31	2085	847	2014
U2402010	Le Doubs à Voujeaucourt	8	0.624	3420	1038	845	1406
U2512010	Le Doubs à Besançon	10	0.613	4400	1056	865	1477
U2542010	Le Doubs à Rochefort-sur-Nenon	10	0.609	4970	982	877	1443
U2722010	Le Doubs à Neublans-Abergement	11	0.605	7290	1185	891	1426
V1305210	Le Tillet à Aix-les-Bains	2	0.629	26	757	871	1449

V3724010	Le Doux à Colombier-le-Vieux	3	0.745	378	528	955	1011
V4214010	La Drôme à Luc-en-Diois	3	0.607	194	534	869	1033
V4264010	La Drôme à Saillans	6	0.632	1150	629	886	1037
V6125010	L'Auzon à Mormoiron	2	0.711	75	52	967	958
W3534020	L'Herbasse à Clérieux [Pont de l'Herbasse]	3	0.607	187	348	1039	934
Y6434010	L'Estéron au Broc [La Clave]	3	0.665	451	521	993	1037
Y8624010	Le Taravo à Zigliara [pont d'Abra]	2	0.783	331	785	1001	1110

3. Pour le test du modèle distribué SIM

Liste des 48 stations hydrométriques utilisées pour l'expérience avec le modèle distribué SIM (les bassins soulignés sont ceux qui ont été comparés avec le modèle GR4H)

CODE	NOM COURS D'EAU+ STATION	Superficie (km ²)
<u>A2860110</u>	<u>LA BRUCHE A HOLTZHEIM</u>	<u>678</u>
<u>A7821010</u>	<u>LA SEILLE A NOMENY</u>	<u>993</u>
<u>A8431010</u>	<u>L' ORNE A ROSSELANGE</u>	<u>1348</u>
<u>B1150010</u>	<u>LA MEUSE A CHALAINES</u>	<u>1763</u>
<u>B6111010</u>	<u>LA SEMOY A HAULME</u>	<u>1268</u>
<u>E5505720</u>	<u>L' AUTHIE A DOMPIERRE-SUR-AUTH</u>	<u>787</u>
<u>H0100020</u>	<u>LA SEINE A PLAINES-ST-LANGE</u>	<u>763</u>
<u>H1201010</u>	<u>L' AUBE A BAR-SUR-AUBE</u>	<u>1389</u>
<u>H2622010</u>	<u>LA VANNE A PONT-SUR-VANNE</u>	<u>794</u>
<u>H4252010</u>	<u>L' ORGE A MORSANG-SUR-ORGE</u>	<u>932</u>
<u>H5412020</u>	<u>LE PETIT MORIN A JOUARRE</u>	<u>651</u>
H6162010	L' AIRE A CHEVIERES	1022
<u>H6313020</u>	<u>LA SUIPPE A ORAINVILLE</u>	<u>799</u>
<u>H7162010</u>	<u>LA SERRE A PONT-A-BUCY</u>	<u>1651</u>
<u>H7742010</u>	<u>LE THERAIN A BEAUVAIS</u>	<u>708</u>
<u>H9222010</u>	<u>L' AVRE A MUZY</u>	<u>801</u>
I1111010	LA TOUQUES A LISIEUX	692
I5221010	LA VIRE A ST-LO (MOULIN	859
I9221010	LA SELUNE A DUCEY (VEZINS)	774
<u>J8202310</u>	<u>L' OUST A PLEUGRIFFET</u>	<u>925</u>
<u>K1391810</u>	<u>L' ARROUX AU VERDIER</u>	<u>3208</u>
K1563010	LA BESBRE A DOMPIERRE-SUR-BESBE	736
K2783010	LA MORGE A MARINGUES	725
K6710910	LE CHER A JOUE-LES-TOURS	13557
<u>M3060910</u>	<u>LA MAYENNE A AMBRIERES-LES-VAL</u>	<u>842</u>
<u>M5222010</u>	<u>LE LAYON A ST-LAMBERT-DU-LATTA</u>	<u>913</u>
O2552910	LA SAVE A LARRA	1156
O5192510	L' AVEYRON A VILLEFRANCHE-DE-R	1116
O6793310	LA GELISE A MEZIN (COURBIAN)	833
<u>O8113510</u>	<u>LE CELE A FIGEAC (MERLANCON)</u>	<u>719</u>
P0190010	LA DORDOGNE A BORT-LES-ORGUES	996
P1592510	LA MARONNE A ARGENTAT	788
<u>P3922510</u>	<u>LA CORREZE A BRIVE-LA-GAILLARD</u>	<u>929</u>
Q5501010	LE GAVE DE PAU A BERENX	2618
Q9302510	LA NIVE A ITXASSOU	849
R5123310	LA SEUGNE A PONS	867
<u>S2242510</u>	<u>L' EYRE A SALLES</u>	<u>1675</u>
<u>U2624010</u>	<u>LA LOUE A CHENECEY-BUILLON</u>	<u>1136</u>
<u>U3424010</u>	<u>LA SEILLE A ST-USUGE</u>	<u>868</u>
<u>U4644010</u>	<u>L' AZERGUES A LOZANNE</u>	<u>867</u>
<u>V1774010</u>	<u>LA BOURBRE A TIGNIEU-JAMEYZIEU</u>	<u>735</u>
W3344010	LA BOURNE A ST-JUST-DE-CLAIX	813

Y0664040	L' AGLY A ESTAGEL	917
U1054010	L' OGNON A BEAUMOTTE-AUBERTANS	1338
Y1364010	LE FRESQUEL A CARCASSONNE	983
<u>Y2102010</u>	<u>L' HERAULT A LAROQUE</u>	<u>819</u>
Y2554010	L' ORB A VIEUSSAN	940
Y7212020	LE GOLO A VOLPAJOLA (BARCETTA)	965

ANNEXE 2 Article publié dans le Red Book de l'AISH

Accounting for spatial variability: a way to improve lumped modelling approaches?

An assessment on 3300 chimera catchments

Large Sample Basin Experiments for Hydrological Model Parametization: Results of the Model Parameter Experiment—MOPEX (Proceedings of the Paris (2004) and Foz de Iguacu (2005) workshops). IAHS Publ. 307, 2006.

M. BOURQUI, C. LOUMAGNE, N. CHAHINIAN & M. PLANTIER

CEMAGREF, Parc de Tourvoie BP 44, F-92163 Antony cedex, France

marie.bourqui@cemagref.fr

Abstract Recent progress in collecting spatialized data with remote sensing techniques should allow the accounting for: (i) the spatial variability of rainfall and (ii) the basins' physical characteristics in rainfall–runoff models. To benefit from this spatial information, lumped approaches can quite easily be replaced by semi-distributed approaches. However, two questions need to be investigated. Does integrating additional information into a semi-distributed approach successfully improve the performance of flow simulations at the basin outlet? Which type of heterogeneity should first be taken into account to yield the most significant improvements? This paper presents a method to account for basin heterogeneity in lumped and semi-distributed models through the use of indices. Given the requirement for a large database to produce statistically significant results, “chimera” basins (virtual aggregation of two real basins) were used. We characterized 212 French basins using approximately 50 indices of pedology, geology, morphology and land use. Lumped and semi-distributed versions of a rainfall–runoff were compared on 3300 chimera basins. Results indicate that integrating “useful” spatial data in a lumped model can improve its performance without altering its parsimonious structure. Some indices correlated with rainfall confirm that the semi-distributed approach is more advantageous than the lumped approach for basins with high spatial variability of precipitation. The possible relations between physical characteristics and model parameters are investigated to help regionalization attempts and hence improve modelling abilities in ungauged basins.

Key words [Rainfall runoff modeling , basins heterogeneities, disaggregation]

INTRODUCTION

For water resources management and flood forecasting lumped rainfall–runoff models are well adapted to the requirements of operational applications. Simple models can efficiently represent the rainfall–runoff transformation while using a limited number of parameters. (Perrin et al., 2001)

However, estimating even a small number of parameters remains a major problem in the case of ungauged basins. Estimating parameters based on the basin physical characteristics is even more difficult when these characteristics are variable in space and time (Beveen et al., 1988; Diermanse, 1998; McDonnell, 2004). In addition, the spatial and temporal variability of the rainfall distribution can affect the runoff distribution (Wilson, 1979; Arnaud et al., 2002). Taking this variability into account should be easier today, thanks to the high availability of spatialized data.

Many studies have attempted to take these variabilities into account through different lumped and distributed approaches. (Ambroise, 1995; Refsgaard & Knudsen, 1996; Krysanova et al., 1999). However, most results are based on a limited number of basins, which leaves several questions open on the advantages of taking variability into account in rainfall–runoff modelling:

- (a) Starting with a lumped approach, does taking spatial heterogeneities into account by dividing the basin into sub-basins effectively improve performance of flow simulations on a wide range of basins and climates?
- (b) To improve runoff simulation, do we need to take the spatial variability into account by treating it in a distributed way?

The objective of this paper is first to compare the efficiency of different lumped and semi-distributed modelling strategies. Then the relationships between the temporal and spatial variations observed within a basin are analysed to investigate how model efficiency can be improved by semi-distribution of the inputs and the basin characteristics.

To meet these objectives, a database of French basins was built. Physical attributes (morphology, geology, vegetation and pedology) were collected for all basins.

For semi-distributed approaches, we used a methodology that uses virtual basins called chimeras (Andreassian et al., 2004), which are the combination of two real, similarly sized basins that are located in different geographical areas. The exaggerated heterogeneity of these basins should allow us to understand which basin characteristics are interesting to use

for the semi-distribution. To evaluate the amount of heterogeneity of each virtual basin, we used some global indices computable on each basin.

MATERIAL AND METHODS

Database

The streamflow data was taken from a sample of 212 basins in France representing a wide range of area, geomorphology and climatic conditions. Mean daily rainfall, streamflow and mean potential evapotranspiration data were available at a daily time-step. The distribution of the basins is illustrated in Fig. 1 and the main hydrological characteristics are shown in Table 1. This database has a good geographical diversity to guarantee the generality of our results. For every basin we used a GIS database and a digital terrain model (DTM) to calculate a number of geological, pedological and geomorphological characteristics that could be potentially useful to explain the hydrological features of the basin. The databases and the distribution of each type of information are summarized in Table 2. For each basin, approximately 30 indices, representing a majority of the invariant physical characteristics that could influence runoff formation, were calculated.

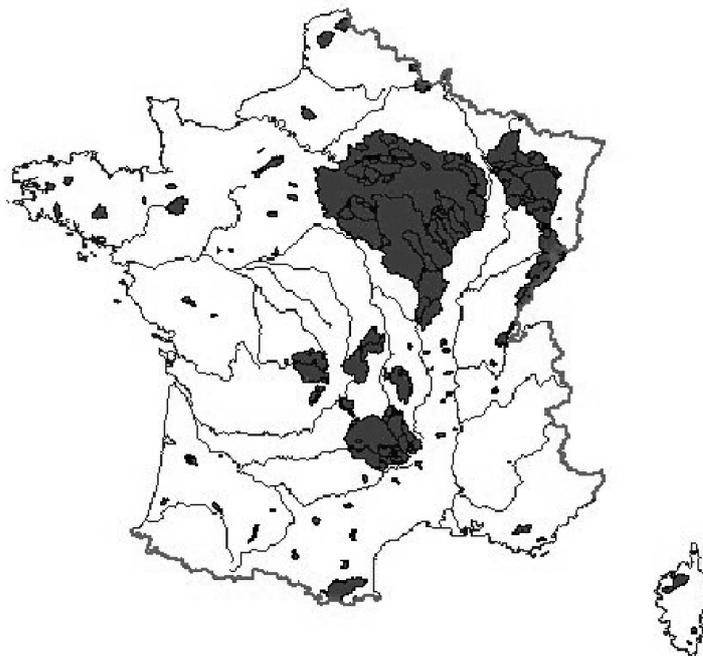


Fig. 1 Geographical distribution of the 212 French basins.

Table 1 Annual hydro-climatic characteristics of the real sample.

	Min	Median	Max
Mean annual rainfall (mm)	620	940	2300
Mean annual ETP (mm)	640	720	1250
Mean annual runoff (mm)	20	420	1960
Basin area (km ²)	7	136	43 800
Time series length (years)	5	13	36

Table 2 Type, origin and scale of data bases used to establish the physiographical characteristics of the basins and classes of attributes chosen for each type.

Genre	Origin of the data bases and scale	Defined types et represented classes	
Pedology	SGBDE The Soil Geographical Database of Europe at Scale 1:1000 000,1996	SOIL TYPE (5 CLASSES) [Cambisol], [Podzoluvisol], [Rendzina], [Lithosol], [Fluvisol]	TEXTURE (4 classes) [Coarse], [Medium], [Medium fine], [Fine]
Geology	BRGM Numerical geological map at 1:100 000 000 (6' edition,1996) + diversed geologicals maps	LITHOLOGY (6 CLASSES) [Alluvial deposits, Ice deposits and Sands], [Massives limestones], [Chalks, Molasses], [Marls], [Basaltic crystalline magmatic rocks], [Shists and metamorphous,détrital rocks]	BED ROCK PERMEABILITY (4 classes) [Impermeables], [Permeables with cracks], [Permeables with interstice], [Few permeables]
Land Use	Corine Land Cover (Source IFEN, 2000) at scale 1:500 000	7 CLASSES [Urban areas], [Arable and irrigated lands and permanent crops], [Heterogeneous agricultural zones], [Prairies], [Forests], [Végétation arbusive], [Natural areas without vegetation]	
Morphology	Logiciel River Tools couple with a DTM at mesh of 75 meters	5 CLASSES [saturability], [slope and form], [arborescence of hydrological network], [hydrological response]	

Model and methodology

The lumped model used for this study is the GR4J model (Perrin *et al.*, 2003). It is a daily four-parameter model. It was tested on more than 400 basins in several countries. The

methodology adopted here to create chimera basin was developed by Andréassian et al., (2004). The chimera construction and the model parameterization strategies are illustrated in Fig. 2. Based on 212 real basins, this technique provided nearly 3300 highly heterogeneous virtual basins with known intermediate flows.

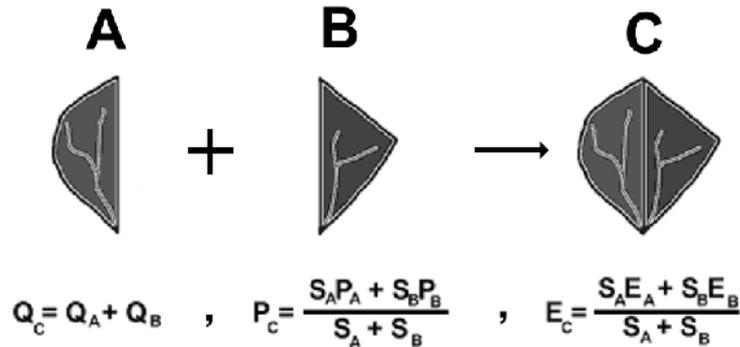


Fig. 2 Construction of the chimera basin C from sub-basins A and B with a surface area of S_A and S_B respectively. Computation of data input for the sub-basin C from P_A and P_B precipitations, Q_A, Q_B streamflows, and E_A, E_B potential evapotranspiration.

Our goal here was to evaluate the efficiency of three modelling approaches differentiated by their disaggregation level: a classical initial lumped approach (IL), an intermediate semi-distributed approach (rainfall SD) where only the mean rainfall of each sub-basin is distributed and finally a true semi-distributed approach (true or total SD).

For the lumped approach, a single parameter vector is optimized with a single rainfall P_c and a single evapotranspiration E_c variable as input data. For the intermediate approach, we used two sub-models for sub-basins A and B, each one having as input data P_a, E_a and P_b, E_b , respectively. However, the same parameter vector was used in calibration for the two sub-models. Consequently, this approach is also defined as semi-lumped. The simulated flow Q_c was obtained by the sum of two simulated intermediary flows Q_b and Q_a . For the last approach, called the true semi-distributed approach, we had two models running in parallel, each one fed by rainfall and the potential evapotranspiration of sub-basins A and B. Two parameter vectors, for each sub-basin, were optimized. This gave a semi-distribution of the input data and the parameters.

Optimization and performance evaluation The optimization algorithm is the step by step method (Edijatno et al., 1999). We used the split-sample test framework. (Klemeš, 1986) to assess models. The objective function chosen is the C2M criterion (Mathevet, 2005) defined by:

$$C2M(\%) = \frac{Nash}{(200 - Nash)} * 100 \quad (1)$$

in which Nash (%) is the Nash & Sutcliffe (1970) criterion. The C2M is bounded in the $[-100; 100]$ domain.

The performance of the three approaches was compared in validation mode on periods different from those used in calibration mode. The $C2M_2$ criterion used in validation mode, is a criterion based on the quadratic error between flows as the evaluation criterion, whereas in calibration mode we used this criterion based on the errors between the \sqrt{Q} . We will compare the average values of $C2M_2$ obtained for the three approaches in validation for the whole sample of chimera basins.

Quantifying the heterogeneities of the chimeras To evaluate the level of heterogeneity of the different physical characteristics observed within each chimera, we developed a simple heterogeneity index. We found it necessary to choose a heterogeneity index that can be calculated on each basin and for physical each characteristic. We used the following index, applied to each physical characteristic described and each chimera. We define the distance d_x between basins by:

$$d_x = \frac{|I_A - I_B|}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (2)$$

where I_A and I_B are the values of the physical descriptor X for sub-basins A and B, and I_{\max} and I_{\min} the maximum and minimum values, respectively, of descriptor X on the initial sample of 212 basins. This heterogeneity index varies between 0 for the homogeneous chimera basins and 1 for the most heterogeneous basins of the sample.

Relation between heterogeneities and improvement We originally hypothesized that the semi-distributed approach would benefit more to the basins with the highest variability indices. To test the validity of this hypothesis, we sought to relate the performance improvement from lumped to semi-distributed approaches to the level of heterogeneity for different physical characteristics. Exaggerating the natural heterogeneity of the basins using

the chimera method allowed us to highlight the physical characteristics that, in the case of high variability, made semi-distribution advantageous. Relations between the model performance considering only the semi-distribution of the parameters (parameter SD) called here $\Delta C2M$ (equation 3) and the heterogeneity index of the different physical characteristics evaluated have thus been established:

$$\Delta C2M = [C2M_Q(SD_{totally}) - C2M_Q(SD_{rain})] \quad (3)$$

RESULTS AND DISCUSSION

The difference in performance provided by the criterion $C2M_Q$ between the lumped approach and the totally semi-distributed (SD) approach on the 3300 chimera basins is presented in Fig. 3. The points above the (1:1) line represent the basins whose performance was improved by semi-distribution. It should be noted that approximately 70% of the basins had significantly improved (greater than 1% of $C2M_Q$) and approximately 14% were degraded (greater than -1%). However, there was enormous variability in the performance improvements. For the group of basins whose performance in lumped mode was already high (over 75%), no major improvement was observed. In fact a high criterion may indicate that the lumped approach is already well suited to these basins. Thus, it will be more difficult to improve results. For the group of basins whose criterion was lower, clear improvements due to semi-distribution were observed, as well as a greater number of degradations.

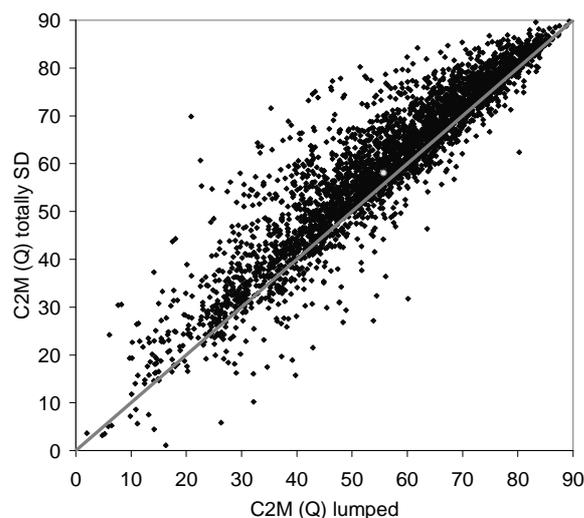


Fig. 3 Model mean efficiency ($C2M_Q$) in validation mode on the whole sample: IL vs totally SD approach.

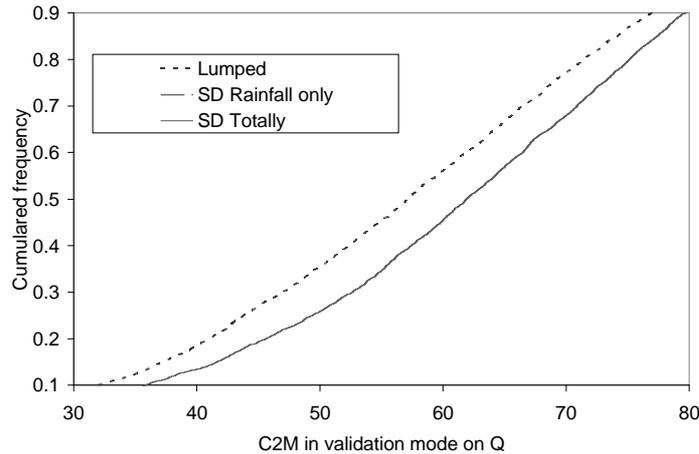


Fig. 4 Cumulative frequency curves of the mean efficiency ($C2MQ$) in validation mode for the 3300 chimera with IL and the two SD approaches.

In terms of cumulative frequency of the mean efficiency, both semi-distributed versions significantly overtouch the initial lumped version (Fig. 4). Table 3 indicates the average performances for the whole sample obtained by the three approaches. The true SD version was the best, with a mean difference of 4% in validation. The rainfall SD approach provided a mean gain over the lumped approach of approximately 2.4%. The improvement attributable only to the distribution of the parameters, independent from the improvement caused by the semi-distribution of rainfall, was $(4-2.4\%)$ thus 1.6%. Semi-distribution of rainfall alone was responsible in average of 60% of the improvement. Moreover, the greatest improvements can be explained by the non-correlation of rainfall.

Table 3 Average $C2M(Q)$ for the whole sample of chimera for the three different approaches.

$C2M(Q)$	Lumped Approach	SD Only	RainfallSD Totally
Average	55.8	58.1	59.8
Median	57.1	60.0	61.9
Per centile 10%	31.9	34.3	35.8
Per centile 90%	79.9	78.6	79.17

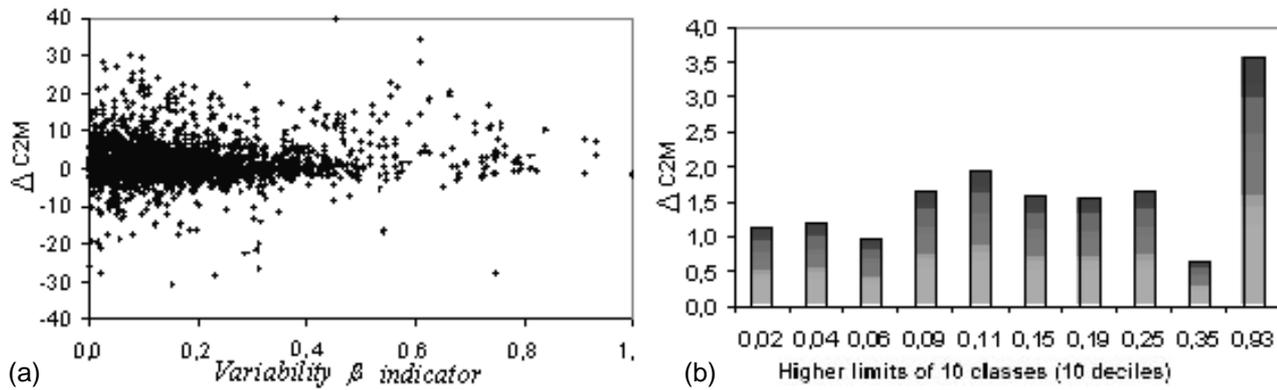


Fig. 5 Mean efficiency gain obtained with parameters SD approach in function of heterogeneity level of β indicator on the whole sample; (b): Same result but presented in function of increasing classes of the distribution of β heterogeneity indicator.

Then we compared the different types of heterogeneity and the gains obtained by the SD parameter approach ($\Delta C2M$). In some cases, “positive” trends were observed, i.e. the higher the heterogeneity, the higher the gain obtained by the SD parameter approach.

For the indexes on the geomorphology and the hydrographic network, the types of heterogeneity presenting a “positive” relation were β form factor (Moussa & Bocquillon, 1993), the drainage network density (DD) (Horton, 1945) and the hypsometric integral (HI) (Chow, 1964).

Figure 5(a) shows the relationship obtained for the heterogeneity indicator of the β form index for all the chimeras of the sample. It can be observed that even though virtual basins were used, the majority of these indicators had values lower than 0.5, and, although improvements for the criterion are present, substantial degradations also exist. On the other hand, the basins whose heterogeneity was greater than 0.5 were systematically improved. Figure 5(b) summarizes these results through the means of the gains obtained on a ten crescent classes of this index. These classes represent the ten crescent deciles of the index’s distribution. This leads to the conclusion that on average for this index, a “positive” relationship is obtained between the improvement using the SD parameter approach and the basin heterogeneity index. The same types of observation were made for the indexes representing the heterogeneity of the drainage network density (Fig. 6) and the hypsometric integral (Fig. 7). The other indicators involving the basin morphology showed no significant relationships.

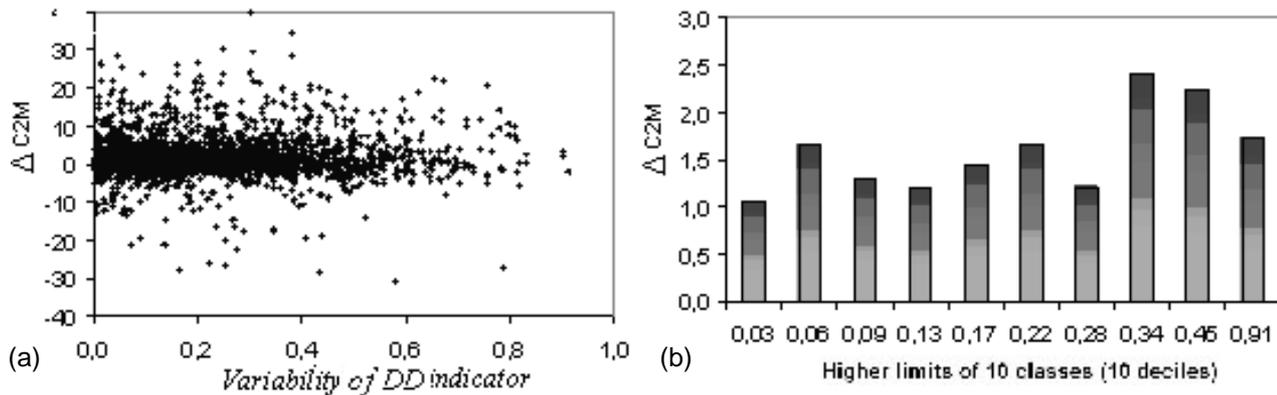


Fig. 6 (a) Mean efficiency improvement obtained with the SD parameters approach as a function of the heterogeneity level of the DD indicator on the whole sample; (b): Same result but presented as a function of increasing classes of the distribution of DD heterogeneity indicator.

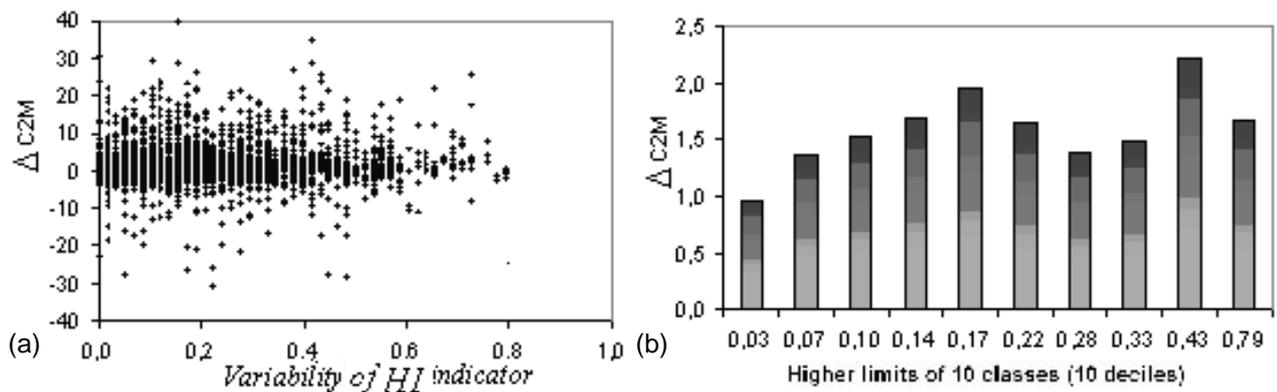


Fig. 7 (a) Mean efficiency improvement obtained with the SD approach as a function of the heterogeneity level of the HI indicator on the whole sample; (b) Same result but presented as a function of increasing classes of this indicator.

For the geological indexes, the limestone indexes show a positive trend between the mean gains obtained and their heterogeneity rate within the chimeras (Fig. 8(a)), as for the permeable rock indicator (Fig. 8(b)). For land use, only the combined indicator of arable land and heterogeneous agricultural land described the same type of relation (Fig. 8(c)). For pedology, a positive trend is observed only on the amount of heterogeneity of Cambisol (Fig. 8(d)) and Podzoluvisol (Fig. 6(e)) type soils.

The positive trends between the heterogeneity index of the basins and the gains obtained using the semi-distributed parameter approach only appeared for only a few types

of the descriptors tested.

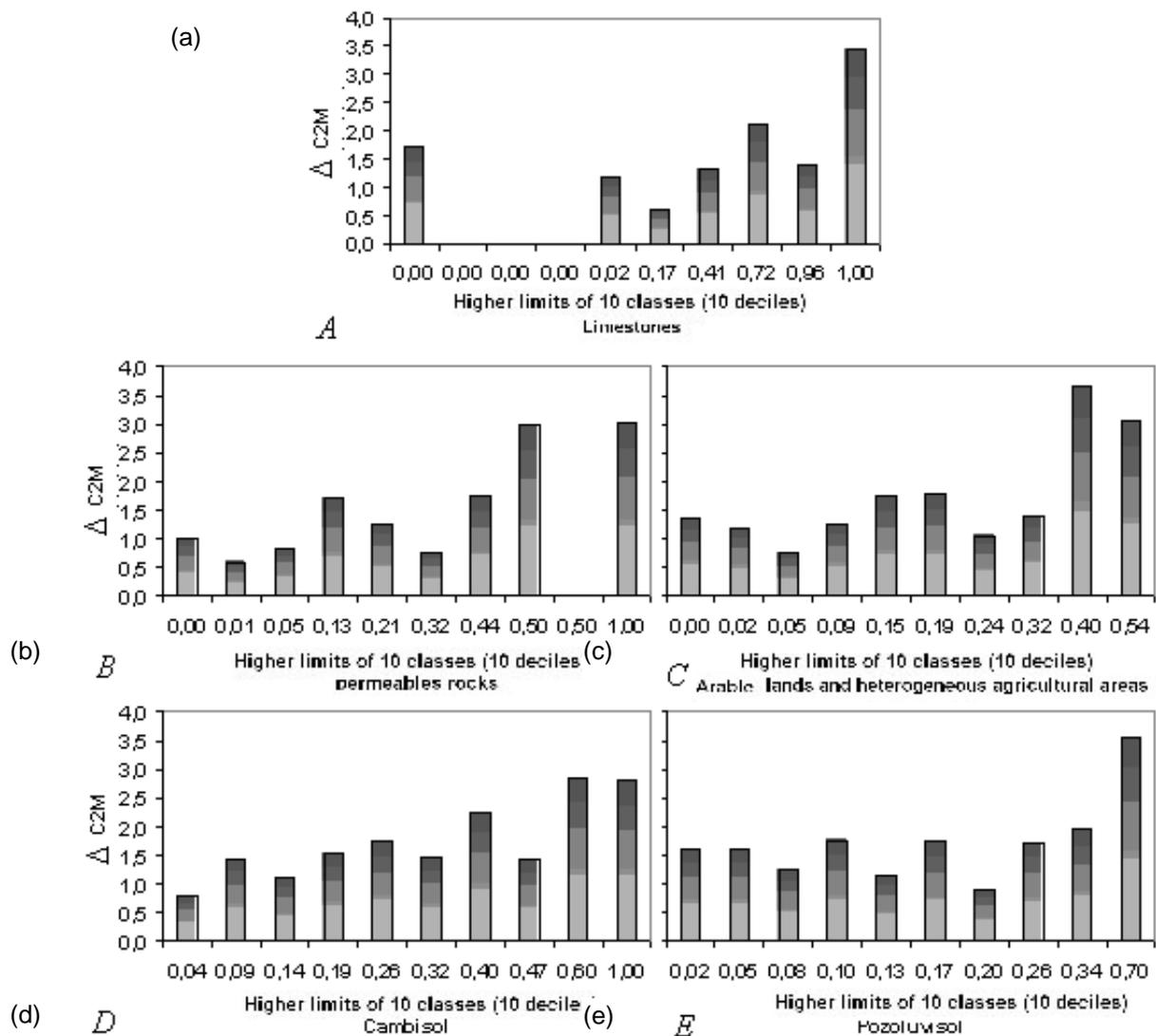


Fig 8 (a) Mean efficiency improvement obtained with the SD parameters approach as a function of increasing classes of the distribution obtained for the limestones indicator; (b) for permeable rocks; (c) for arable land added to heterogeneous agricultural area; (d) for Cambisol; (e) for Podzoluvisol.

Nevertheless, the significance of this heterogeneity index is complex. It is difficult to physically interpret its value. For example, a value of 0.5 for the forest indicator means that the basin is covered 50% by forest and 50% by another land use type. But, there is no information on the composition of this other part.

These results are in line with those obtained by Merz & Blöschl (2004) who tried to regionalize the parameters of the HBV model (Bergström & Forsman, 1973) from basin

attributes such as the percentage of various geological types, soil types, land uses and topographic indices on 308 Austrian catchments. This research shows the poor relationships between these attributes and the parameters, although the model parameters seem to represent the physics of the basins.

CONCLUSION

The objective of this study was to bring out the differences in performance between a lumped approach and semi-distributed approaches as well as to relate the basin variability to model performance improvements for artificially heterogeneous basins. This investigation has confirmed the relative superiority of the semi-distributed approaches. However, this result was not systematically observed on basins. The greater part of the improvement stems from taking the rainfall distribution into account. This is observed especially in the cases where the rainfall timeseries of each sub-basin are weakly correlated in time.

While analysing the impact of parameter semi-distribution for given indicators, relationships were found between the basin heterogeneities and the performance gains of the semi-distributed approach. This variation in performance is conditioned by the initial performance of the lumped approach: the basins with the weakest initial performance obtained the greatest gains. In fact it is easier to improve the modelling of the basins when a lumped approach is not suitable.

Similar tests at the hourly time-step should be interesting to study to continue this work. Indeed at this time step, the rainfall field is more decorrelated in time for a given distance. In addition, the relationships that emerged from the physical heterogeneities may be used in the definition of similar basins for the modelling of ungauged basins (Rojas Serna, 2005).

References:

- Ambroise, B.**, Perrin, J. L. & Reutenauer, D. (1995) Multicriterion validation of a semidistributed conceptual model of the water cycle in the Fecht Catchment (Vosges Massif, France). *Water Resour. Res.* 31(6), 1467–1481.
- Andreassian, V.** et al. , Oddos A. Michel C., Anctil F., Perrin C. and Loumagne, C.(2004) Impact of spatial aggregation of inputs and parameters on the efficiency of rainfall–

- runoff models: a theoretical study using chimera watersheds. *Water Resour. Res.* 40(5), W05209, doi: 10.1029/2003WR002854.
- Arnaud, P.**, Bouvier, C., Cisneros, L. & Dominguez, R. (2002) Influence of rainfall spatial variability on flood prediction. *J. Hydrol.* 260(1–4), 216–230.
- Bergström, S. & Forsman, A. (1973) Development of a conceptual deterministic rainfall–runoff model. *Nordic Hydrol.* 4, 147–170.
- Beven, K. J.**, Wood, E. F. & Sivapalan, M. (1988) On hydrological heterogeneity—catchment morphology and catchment response. *J. Hydrol.* 100(1–3), 353–375.
- Chow, V. T. (1964) *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co, New York, USA.
- Diermanse, F. L. M.** (1998) Representation of natural hétérogénéité in rainfall–runoff models. *Physics and chemistry of the Earth, Part B. Hydrol. Oceans Atmos.* 24(7), 787–792.
- Edijatno Nascimento**, N. O., Yang, X., Makhlof, Z. & Michel, C. (1999) GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrol. Sci. J.* 44(2), 263–277.
- Horton, R. E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.* 56, 275–370.
- Klemeš, V.** (1986) Diletantism in hydrology: transition or destiny? *Water Resour. Res.* 22(9), 177S–188S.
- Krysanova**, V., Bronstert, A. & Muller-Wohlfeil, D. (1999) Modelling river discharge for large drainage basins: from lumped to distributed approach. *Hydrol. Sci. J.* 44(2), 313–331.
- Mathevet, T.** (2005) *Quels modèles pluie-débit globaux pour le pas de temps horaire? Développements empiriques et intercomparaison de modèles sur un échantillon de 313 bassins versants*. PhD Thesis, ENGREF Paris, France.
- McDonnell, J.** & Ross, J. W. (2004) On the need of classement classification. *J. Hydrol.* 299, 2–4.
- Merz, R.** & Blöschl, G. (2004) Regionalisation of catchment model parameters. *J. Hydrol.* 287(1–4), 95–123.
- Moussa, R.** & Bocquillon, C. (1993) Morphologie fractale du réseau hydrographique. *Hydrol. Sci. J.* 38(3), 187–201.
- Nash, J. E.** & Sutcliffe, V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles.

J. Hydrol. 10, 282–290.

Perrin, C., Michel, C. & Andreassian, V. (2001) Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. J. Hydrol. 242(3–4), 275–301.

Perrin, C., Michel, C. & Andreassian, V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation.

J. Hydrol. 279(1–4), 275–289.

Refsgaard, J. C. & Knudsen, J. (1996) Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. Water Resour. Res. 32(7), 2189–2202.

Rojas Serna, C. (2005). Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit? PhD Thesis, ENGREF, Paris, France.

Wilson, C. B., Valdes, J. D. & Rodriguez-Iturbe, I. (1979) On the influence of the spatial distribution rainfall on storm runoff. Water Resour. Res. 15(2), 321–328.

Annexe 3 Etude de la variation des volumes simulés face à l'augmentation de la variance des précipitations.

Méthodologie

Afin d'analyser l'impact de l'hétérogénéité spatiale de précipitations sur les fonctions et les volumes de sortie d'un modèle global, nous avons réalisé une semi-distribution d'un modèle global alimenté par des précipitations d'hétérogénéité croissante (mais comportant à lame d'eau moyenne constante). Les données n'existant pas pour une telle analyse, nous avons eu recours à un schéma fictif avec des données synthétiques. Les résultats de cette analyse sont donc à considérer avec prudence. L'approche suivante a donc été appliquée :

1. pour chaque bassin, on cale le modèle global de référence en utilisant les pluies de bassin observées (P_0) et on obtient la chronique de débits simulés (**Qsim1**) et le vecteur de paramètres (**Xopt**). On va considérer que ces débits sont les débits réels observés (données synthétiques);
2. on considère ensuite que chaque bassin de superficie (**Stot**) est en fait la réunion de deux sous-bassins jumeaux de même superficie (**Stot/2**) ayant chacun le même jeu de paramètres que le bassin total (**Xopt**), et que chacun reçoit respectivement comme précipitation:

$$\bar{P}_1 = \bar{P}_0 * (1 + \beta) \text{ pour le sous-bassin numéro 1}$$

$$\bar{P}_2 = \bar{P}_0 * (1 - \beta) \text{ pour le sous-bassin numéro 2}$$

Avec \bar{P}_0 pluie moyenne sur le bassin total

Avec β coefficient fixe sur la chronique

\bar{P}_1 et \bar{P}_2 sont donc définies de sorte que $\bar{P}_1 + \bar{P}_2 = \bar{P}_0$

- On fait fonctionner deux modèles en parallèle tous deux avec le jeu de paramètres (**Xopt**) en prenant \bar{P}_1 comme pluie d'entrée pour l'un, et \bar{P}_2 pour l'autre. On suppose que le débit simulé par ce Multi-Modèle⁴⁴ (**Qsim2**) est la moyenne des débits simulés par les deux sous-modèles, les sous-bassins ayant des superficies supposées identiques.

L'objectif de ce test est d'observer si les volumes de sortie augmentent en même temps que la variance des précipitations. Ceci sera fait par l'intermédiaire de l'étude de l'évolution des critères de bilan en fonction de l'évolution du coefficient β . On rappelle que le bilan est calculée par :

$$CB = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i^{Sim2}}{\sum_{i=1}^N Q_i^{Sim1}}$$

CB représentant la faculté du modèle à reproduire les volumes écoulés (**Qsim2** représente le débit calculé et **Qsim1** le débit synthétique considéré comme observé).

Plus le bilan est supérieur à 1, plus les volumes simulés (**Qsim2**) sont supérieurs au débits de référence (**Qsim1**).

Nous avons testés cette méthode sur 300 bassins versants français (base de données de la thèse de Perrin (2000) et cinq structures de modèle global (GR4J, IHACRES (utilisés dans cette thèse), une version du modèle HBV (Bergström et Forsman, 1973), une version de TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979), une version de SMAR96 (O'Connel *et al.*, 1971) (voir Perrin (2000) pour les détails mathématiques).

La Figure 1 synthétise les résultats obtenus. On peut voir que plus la variance de pluies alimentant le modèle augmente, plus celui-ci a tendance à surestimer le débit de sortie de référence (produit, quant à lui, avec des pluies homogènes). Cette augmentation des volumes est variable selon les structures (IHACRES est le plus sensible), mais l'évolution des bilans par rapport à β ont la même forme pour les cinq structures.

⁴⁴ Voir Partie 5.3.2 pour la définition du Multi-Modèle

Ce résultat, obtenu à partir de données synthétiques, rejoint celui obtenu de la même façon par (Chang *et al.*, 2007) qui, avec une méthodologie similaire sur un modèle distribué à six mailles (winVAST), avait observé un accroissement et une anticipation des pic de crues en rapport avec l'augmentation de la variance des pluies d'entrées.

Toutefois, on rappelle que ces résultats sont obtenues sur des données synthétiques et que une des interprétations possibles est de retomber sur les hypothèses sur lesquelles les structures de modèles sont fondées. En effet, on joue sur la fonction de production des sous-modèles, qui est non linéaire. Ainsi, une même variation en valeur absolue (soit $\beta \cdot \bar{P}_x$) de la quantité de précipitation entrée, ne va pas créer la même variation de pluie efficace dans les cas où l'on a affaire à une diminution ou à une augmentation de la pluie d'entrée.

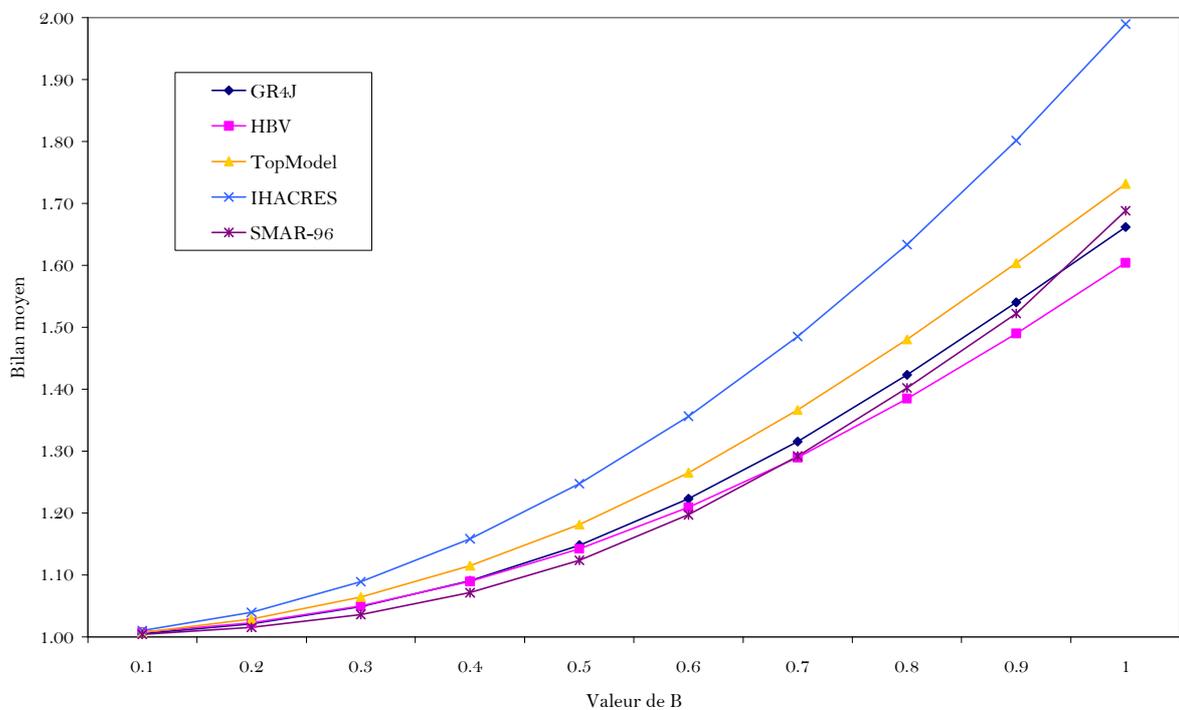


Figure 1 Valeurs du bilan moyen obtenu pour les 5 modèles évalués sur des débits synthétiques et alimentés par des pluies synthétiques dont la variance augmente avec le coefficient β

Annexe 4 Valeurs de l'indice d'hétérogénéité statistique sur les échantillons

Afin de décrire en termes de variabilité générale des précipitations les échantillons de bassins versants présentés dans le chapitre 2, et pour mettre en œuvre la méthode travail présentée dans le chapitre 3, il est nécessaire de caractériser chaque bassin versant par son indice d'hétérogénéité statistique médian sur toute la chronique d'observation (mais seulement en cas d'occurrence de précipitations).

La médiane est choisie plutôt que la moyenne comme indice global de représentativité du bassin car cet indicateur statistique est caractéristique de la valeur centrale de la série qui sera utilisée par la suite comme valeur pivot pour contrebalancer l'effet de cet indice lors de son introduction dans les modèles.

1 Echantillon de données au pas de temps journalier

1.1 Distribution générale

La distribution des différents indices d'hétérogénéité médians par bassin est représentée en Figure 0.1. 50 % des bassins ont des indices médians inférieurs à environ 0,3. Les valeurs médianes des indices obtenues sont de 0,13 au minimum pour le bassin versant de la Seine à Paris (43800 km² et 105 postes pluviométriques) allant vers un maximum de 1,0 pour les bassins versants corses de la Solenzara (97 km²- 2 postes) et de l'Asco (366 km²- 3 postes). Cette valeur signifie pour ces deux bassins que plus de 50% des précipitations journalières observées ont la configuration où seulement un seul poste reçoit de l'eau parmi les deux et trois présents. Il est difficile de dire si cette valeur est vraiment représentative de l'hétérogénéité spatiale des pluies du bassin versant ou si elle est liée à un manque de postes, les autres bassins ayant 2 ou 3 postes pouvant avoir toutes les valeurs d'indices médians (voir Figure 0.2)

En ce qui concerne le lien existant entre indice d'hétérogénéité médian des pluies et le nombre de postes pluviométriques ayant servi à le calculer, on peut noter que cet indice, malgré un adimensionnement effectué dans le but de neutraliser l'effet de la variation du

nombre de postes pluviométriques pour chaque bassin versant, reste très dépendant de celui-ci (Figure 0.2-a).

Le nombre de postes pluviométriques est logiquement très dépendant de la superficie du bassin (voir Chapitre 2). La Figure 0.2 (b) montre que l'hétérogénéité statistique des pluies au pas de temps journalier, définie avec cet indice, a tendance à diminuer avec l'augmentation de la superficie des bassins versants. En effet, les bassins de grande superficie (à partir d'environ 2000 km²) n'ont jamais d'indices médians très élevés. A l'inverse les bassins versants de taille relativement faible par rapport à l'échantillon peuvent aussi bien avoir une hétérogénéité spatiale des pluies décrite par l'indice comme plutôt faible ou très élevée. Dans ce cas, cette hétérogénéité pourrait plus fortement dépendre de l'allure topographique ou de la situation géographique des bassins.

Cependant, outre l'augmentation du nombre de postes avec la superficie du bassin, la valeur médiane des indices pourrait être aussi liée de l'éloignement moyen entre les postes. En effet, la corrélation entre les pluies diminue avec l'éloignement des postes pour un pas de temps d'observation donné (Lebel, 1984 partie sur le variogramme).

En termes de répartition géographique, nous pouvons voir sur la Figure 0.3, que les bassins versants dont la pluie est considérée comme très hétérogène spatialement au regard de l'indice décrit, sont pour la majorité situés dans une zone comprenant le Massif Central et les Cévennes et sur le département de la Corse. Cette observation est en concordance avec la réputation de ces régions à propos de la fréquence des événements de pluie de type convectifs⁴⁵ (décrits généralement avec des variations très fortes des intensités locales), qui affectent ces territoires au climat méditerranéen et à forte topographie (Lebel, 1984; Wendling, 1988; Datin, 1998).

Au contraire, la majorité des bassins situés sur le bassin versant de la Seine connaissent des valeurs d'indices relativement faibles quelles que soit leur superficie. Ceci est conforme avec le type de pluies dites stratiformes¹ décrites comme homogènes spatialement survenant généralement dans le type de climat (océanique et semi-océanique) affectant ces régions de très faible topographie (Delrieu, 1986).

⁴⁵ Voir chapitre 1 pour la définition de ce type de précipitation

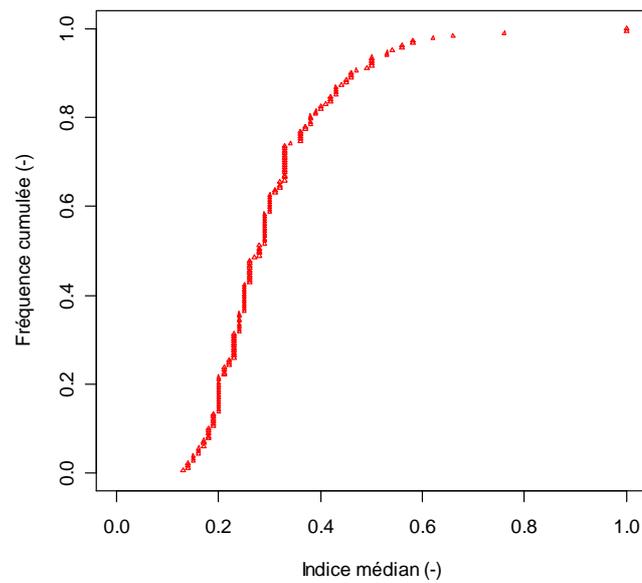


Figure 0.1 Distribution des valeurs d'indices médians d'hétérogénéité calculés sur toutes les chroniques d'observation pluviométrique disponibles de l'échantillon de 182 bassins versant.

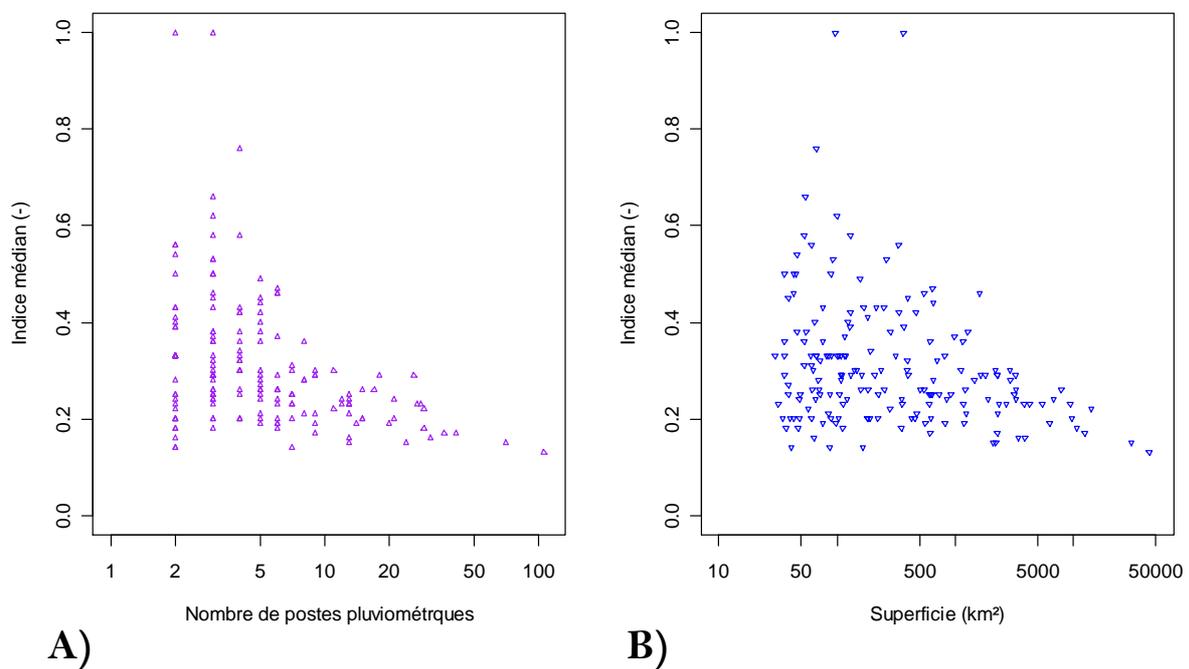


Figure 0.2 Indice d'hétérogénéité médian de la chronique pluviométrique de chaque bassin en fonction du nombre de postes pluviométriques utilisés pour ce calcul (a) et de la superficie du bassin (b)

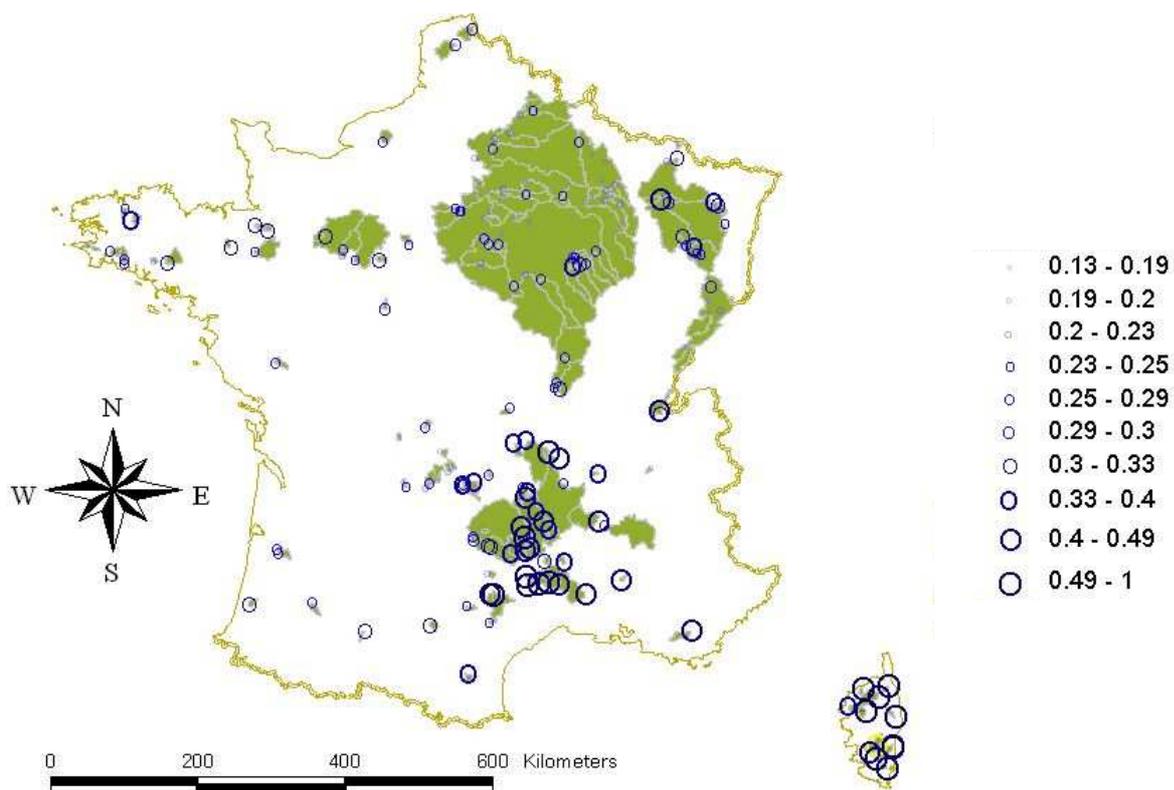


Figure 0.3 Répartition des classes représentant les 10 déciles croissants des indices d'hétérogénéité médians sur la chronique au pas de temps journalier (indice calculé uniquement en cas d'événement de pluie au jour considéré)

1.2 Analyse des chroniques d'indices sur deux cas particuliers

Pour l'analyse des chroniques des indices, nous allons prendre deux exemples assez contrastés en termes de situation de leur indice médian relativement à la distribution obtenue pour l'échantillon. Ces bassins sont quasi-semblables dans leur superficie et le nombre de postes utilisés pour évaluer leur hétérogénéité spatiale pluviométrique, mais différents au niveau de leur morphologie, et de leur situation géographique. Ces deux cas sont :

- le bassin versant de l'Eyrieux à Saint-Fortunat-sur-Eyrieux (644 km² et 6 postes pluviométriques; Code HYDRO V4174010) qui est un bassin versant de moyenne montagne situé dans le département de l'Ardèche. L'indice hétérogénéité médian calculé pour ce bassin [0,47] est situé parmi les 20 bassins décrits comme les plus hétérogènes dans l'échantillon des 182 bassins.

- Le bassin de L'Orne Saôsoise à Montbizot (520 km² et 6 postes également code HYDRO M0243010) situé dans une vaste plaine dans le département de la Sarthe qui, avec un indice médian de 0,26, fait partie des bassins où la pluie est décrite par l'indice comme faiblement hétérogène spatialement (toujours relativement à cet échantillon de travail).

La Figure 0.4 présente la distribution des valeurs d'indices journaliers sur toute la chronique de 1997 à 2002 pour le bassin de l'Orne (a) et de 1991 à 1998 pour l'Eyrieux (b). On comptabilise 1134 jours de pluie pour 2924 jours d'observation sur les 6 postes de l'Eyrieux (soit 38 % de jours de pluie, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 830 mm sur 8 ans). Sur l'Orne, on recense 1664 jours de pluies pour 3288 jours d'observation (soit 50,5 % de jours de pluie, avec une pluviométrie annuelle moyenne de 1250 mm calculée sur 7 ans).

Les distributions des valeurs d'indice journalier ont des valeurs similaires malgré des régimes pluviométriques très distincts (alternance de cumuls très contrastés de précipitations journalières pour le bassin de l'Eyrieux et beaucoup d'événements égaux de moyenne intensité pour l'Orne). La différence se fait surtout sur la longueur du palier d'indices égaux à 1 qui détermine les pluies d'hétérogénéité maximale (on rappelle que la valeur 1 représente l'hétérogénéité maximale possible du champ pluviométrique calculable par l'indice, qui est obtenue pour les jours où un seul des six postes reçoit de la pluie voir Chapitre 3).

De plus, les précipitations journalières moyennes de bassin associées à ce genre de valeurs élevées d'indices sont en général faibles. En effet, 90 % des lames d'eau moyennes concernées sont inférieures à 1 mm dans les deux cas étudiés. Ce type de résultat, qui se retrouve sur la majorité des bassins versants, est en fait logique, car lorsque qu'il pleut sur seulement un endroit du bassin, la lame d'eau moyenne calculée sur toute la superficie du bassin s'en retrouve fortement diminuée. On peut voir aussi que les plus forts événements en termes de cumuls sont rarement associés à des indices décrivant une forte hétérogénéité spatiale. Cette observation est aussi somme toute logique car pour avoir un fort événement en termes de pluie journalière de bassin, il est souvent nécessaire qu'il ait plu des hauteurs significatives à peu près partout sur ce bassin. Ainsi l'événement sera donc généralement considéré comme homogène relativement à cet indice.

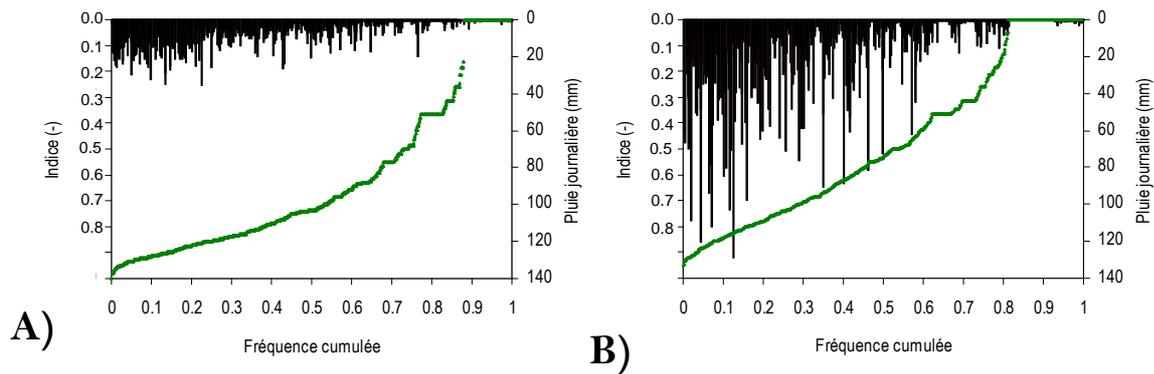


Figure 0.4 Distribution des indices journaliers d'hétérogénéité et des cumuls journaliers de précipitations associés, sur la période 1997-2002 pour le bassin versant de l'Orne (A) et sur la période 1991-1998 pour le bassin versant de l'Eyrieux (B) (Ordonnées en ordre inverse)

En guise d'illustration des valeurs prises par les indices au cours d'une année hydrologique, les graphiques de la Figure 0.5 présentent la chronique des indices journaliers pour l'année 1997-1998 avec en parallèle, le hyétogramme des précipitations pour les deux bassins pris en exemple précédemment.

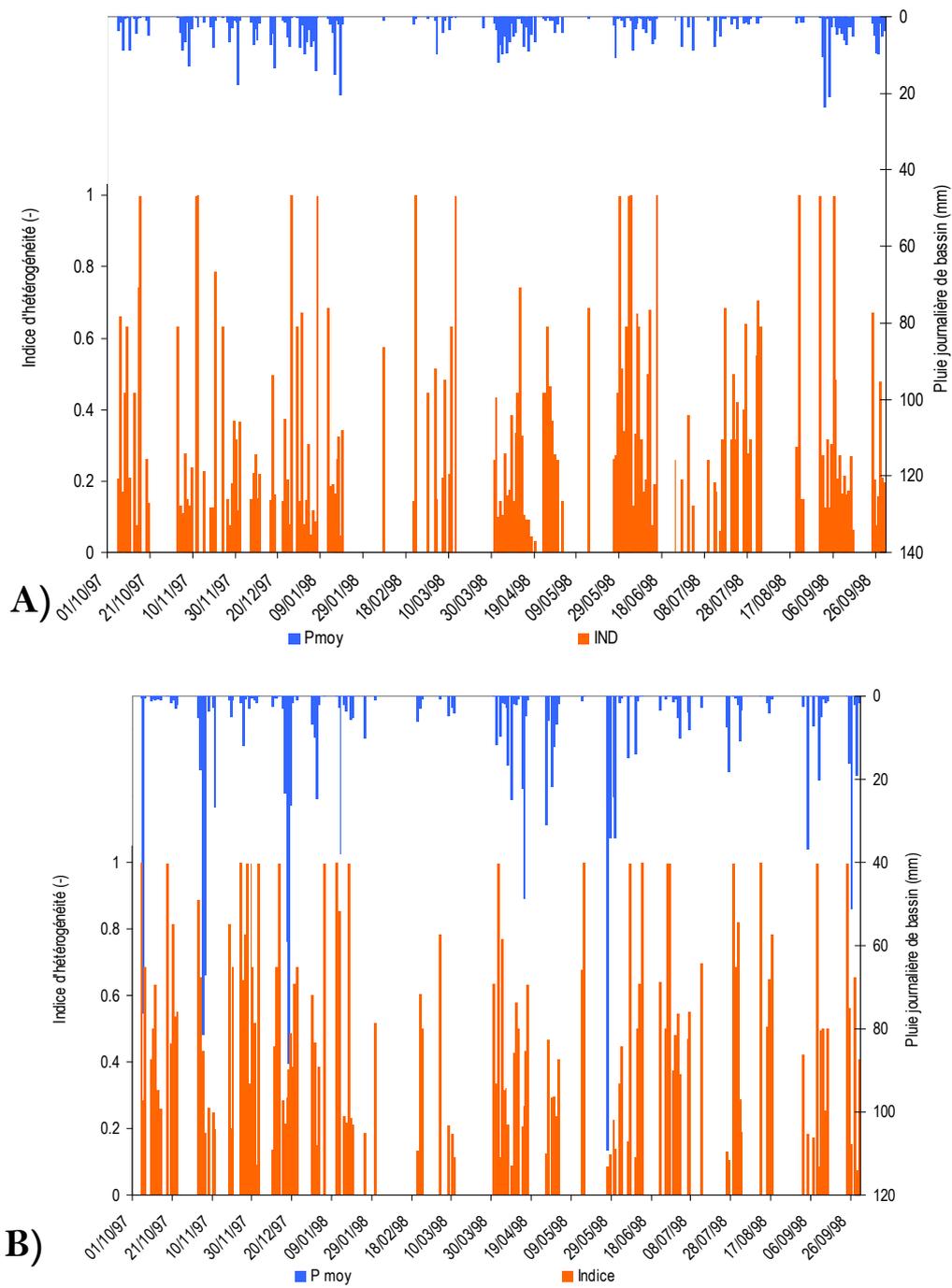


Figure 0.5 Chroniques des indices journaliers pour l'année hydrologique 1997-1998 et hétérogrammes journaliers associés pour le bassin de l'Orne (A) et de l'Eyrieux (B) et

2 Echantillon de données au pas de temps horaire

2.1 Distribution générale

La distribution des différents indices médians d'hétérogénéités obtenus au pas de temps horaire est représentée en Figure 0.6. Globalement, les valeurs sont plus élevées qu'au pas de temps journalier. Ceci vient en partie du fait qu'à ce pas de temps fin, il ya beaucoup plus de pas de temps où il ne pleut pas sur un seul postes, donnant donc de fortes valeurs d'hétérogénéités. Environ 25 % des bassins ont des valeurs médianes d'indice égales à 1, valeur correspondant à la borne supérieure de cet indice. Pour ces bassins, plus de 50% des pas de temps correspondent à la valeur maximale d'hétérogénéité possible qui signifie que les précipitations sont non nulles sur un seul des postes présents sur le bassin.

En observant la Figure 0.7 a), on peut voir que les bassins concernés par cette configuration sont des bassins ayant 2 à 4 postes pluviométriques et concernent toutes les classes de superficies représentées par l'échantillon de travail (Figure 0.7 b). On remarque aussi sur la même figure que la valeur de l'indice hétérogénéité médian au pas de temps horaire est très peu liée à la superficie des bassins versants contrairement au pas de temps journalier, les grand bassins versants (de superficie $> 2000\text{km}^2$) atteignant des valeurs d'indices d'hétérogénéité aussi élevées que celles plus faibles des bassins de plus faible superficie. Cela est en partie dû au fait que les valeurs médianes sont globalement beaucoup plus proches de 1 qu'au pas de temps journalier.

En termes de répartition géographique (Figure 0.8), on peut voir que, contrairement à l'observation qui avait été faite pour l'échantillon des 182 bassins versant au pas de temps journalier, les bassins ayant un indice médian décrivant une forte hétérogénéité globale sont répartis dans toutes les régions représentées par cette base de données de 99 bassins versants. La répartition spatiale de pluies au pas temps horaire aurait donc moins de déterminisme géographique que celle au pas de temps journalier (d'après l'outil d'observation utilisé).

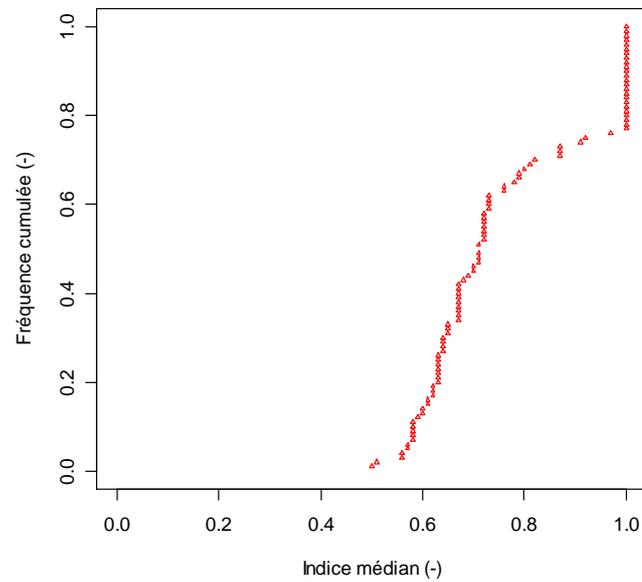


Figure 0.6 Distribution des valeurs d'indice d'hétérogénéité médian sur l'échantillon de 99 bassins versants sur toute la chronique d'observations (pour tous les bassins : 1995-2005)

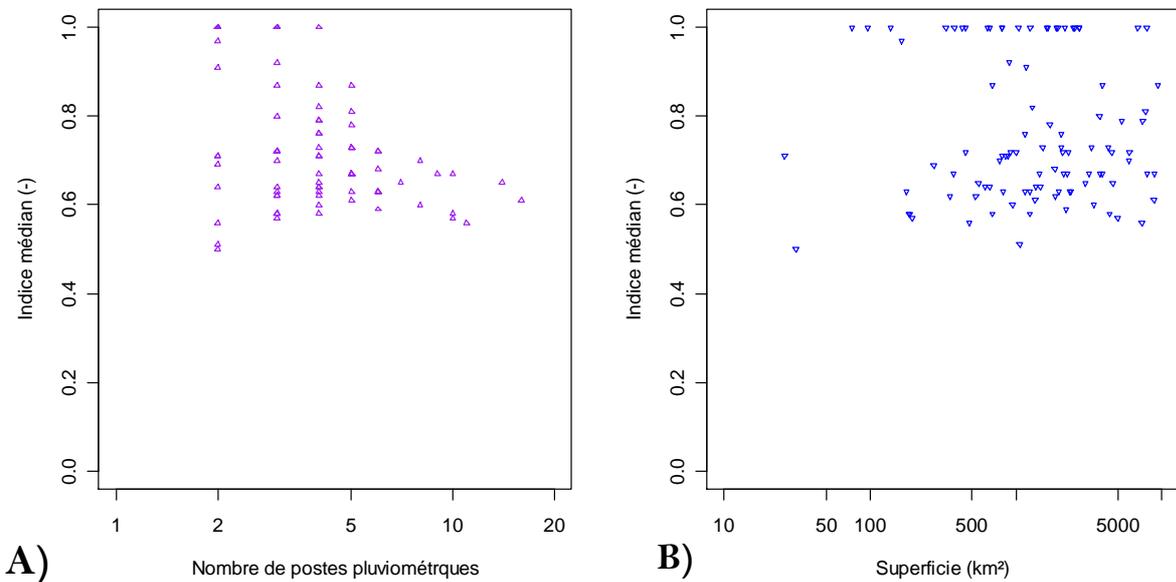


Figure 0.7 Indice d'hétérogénéité médian de la chronique pluviométrique de chaque bassin versant en fonction du nombre de postes pluviométriques utilisé pour les calculer (A) et de la superficie du bassin (B)

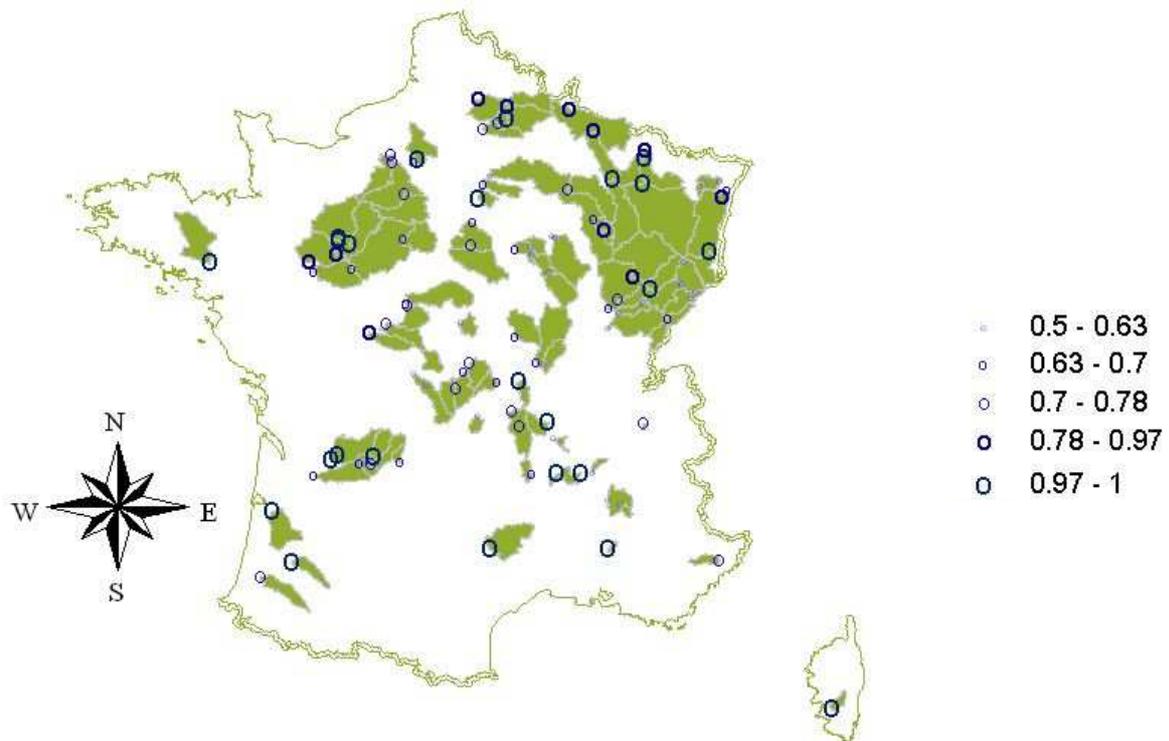


Figure 0.8 Répartition des 5 déciles (quantiles 0,2; 0,4 etc...) des indices d'hétérogénéité horaires médians sur toute la chronique d'observation de chaque bassin (indice calculé uniquement en cas d'événement de pluie à l'heure considérée)

La fréquence des indices médians ayant pour valeur 1, nous indique qu'il est donc très habituel, à ce pas de temps d'observation très court et pour des bassins ne comportant que peu de postes, de retrouver la configuration où un seul des postes reçoit de la pluie. Cette configuration semble très dépendante du nombre de postes car on peut remarquer pour les bassins ayant plus de 5 postes sur le Figure 0.7 (b), une chute des valeurs médianes d'indices vers des descriptions de pluie plus homogènes.

D'ailleurs, si on agrège la pluie de ces bassins versants en cumul journalier sur chaque poste et qu'on calcule l'indice journalier médian sur la même chronique, on peut voir sur la Figure 0.9 qu'un lien est faible entre les indices médians calculés sur des pluies horaires et sur les cumuls journaliers de ces pluies horaires.

On peut aussi remarquer que les valeurs médianes des indices calculés sur la chronique au pas de temps horaire sont systématiquement plus élevées que celles du pas de temps journalier. Ainsi, à cause de changement de référentiel temps, la pluie pour un même nombre de postes et un même bassin versant est décrite comme beaucoup plus hétérogène au pas de

temps horaire qu'au pas de temps journalier. Ceci vient du fait qu'au pas de temps journalier, il est plus rare qu'il ne pleuve que sur un seul poste. De plus, les corrélations de cumuls inter-postes diminuent avec la diminution du pas de temps, comme en témoigne par exemple la relation empirique de la portée⁴⁶ du variogramme⁴⁷ de champs de pluie utilisé pour le krigeage⁴⁸ des précipitations en zone Cévenole ((Lebel, 1987) d'après Berne *et al.* (2004).) Cette relation reliant l'échelle spatiale à l'échelle temporelle est définie de la sorte :

$$\beta(\Delta t) = 25 * (\Delta t)^{0.3}$$

où Δt est le pas de temps considéré en heure

β la portée du variogramme en km.

Cette relation indique donc que les pluies sont décorréelées au delà de 25 km pour le pas de temps horaire et de 70 km pour le pas de temps journalier.

Ainsi pour notre cas, cela reviendrait à dire que pour trouver les mêmes valeurs d'indices au deux pas de temps, il faudrait augmenter l'échantillonnage spatial de la pluie au pas de temps le plus fin (donc en gros multiplier par trois la densité de postes au pas de temps horaire).

⁴⁶ En géostatistique notamment pour le krigeage des champs de pluie à partir des postes pluviométriques, la portée du variogramme décrit la distance au delà de laquelle les données ne sont plus corrélées

⁴⁷ Graphe représentant la semi-variance en fonction de la distance entre les variables

⁴⁸ Nom donné (d'après D.G. Krige, statisticien sud-africain ayant développé des méthodes empiriques d'évaluation des stocks d'or dans les années 1950) à un ensemble de méthodes d'interpolation permettant d'estimer la valeur d'une propriété en un point de l'espace géographique à partir des observations voisines, en utilisant la théorie des variables régionalisées.

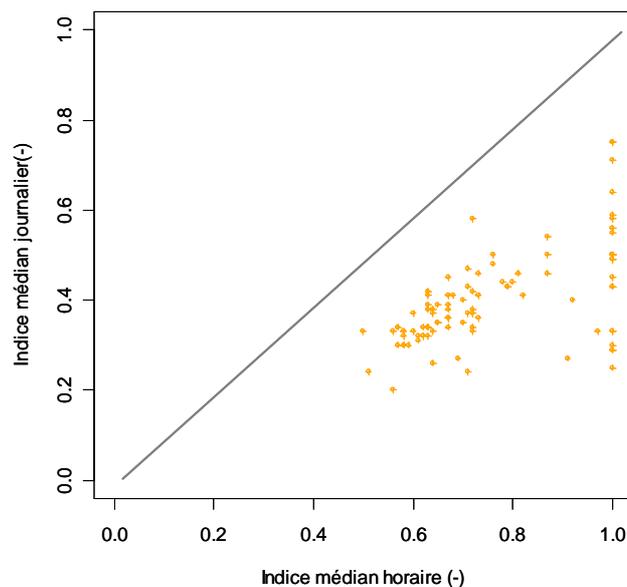


Figure 0.9 Indice médian calculé sur les cumuls journaliers en fonction des indice médians calculés sur les cumuls horaires correspondant sur la même période d'observation

2.2 Etudes des chroniques d'indices sur un cas particulier

En passant de cumuls pluviométriques au pas de temps horaire à des cumuls journaliers, la différence en termes de variabilité des cumuls de pluies inter-postes est forte. En effet, s'il est fréquent au pas de temps horaire que seulement un des postes présents sur le bassin reçoive de l'eau à chaque pas temps, la situation va être complètement différente si on tient compte des cumuls journaliers par poste. En guise d'exemple, nous nous intéresserons à l'observation d'une chronique horaire de 48 h et aux 2 jours de cumuls journaliers correspondants mesurés les 7 et 8 août 1995 du bassin de la Zorn à Waltenheim-sur-Zorn (668 km² code HYDRO A3472010) situé dans le Bas Rhin. Sur ce bassin où la pluie est mesurée par trois postes, on peut remarquer des cumuls horaires très disparates entre les trois postes conduisant régulièrement l'indice associé à des valeurs de 1 (notamment pour les précipitations de faible intensité) (voir Figure 0.10). Si on passe en cumuls journaliers, on peut voir que les trois postes, reçoivent tous systématiquement de la pluie et que les valeurs d'indices obtenues sont relativement faibles (0,19 pour le jour 1 et 0,43 pour le jour 2).

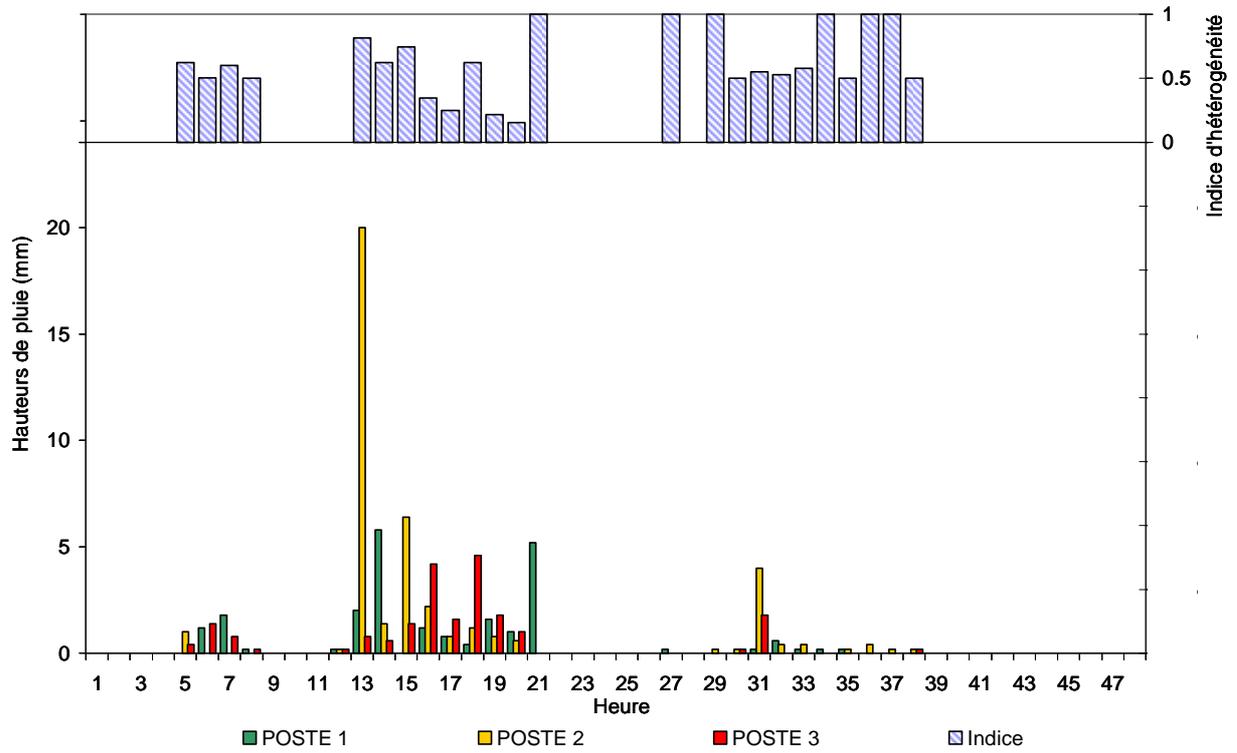


Figure 0.10 Hyétogrammes horaires des trois postes pluviométriques et indices d'hétérogénéité associés. (L'origine des heures est le 7 aout 1995 à 0 h)

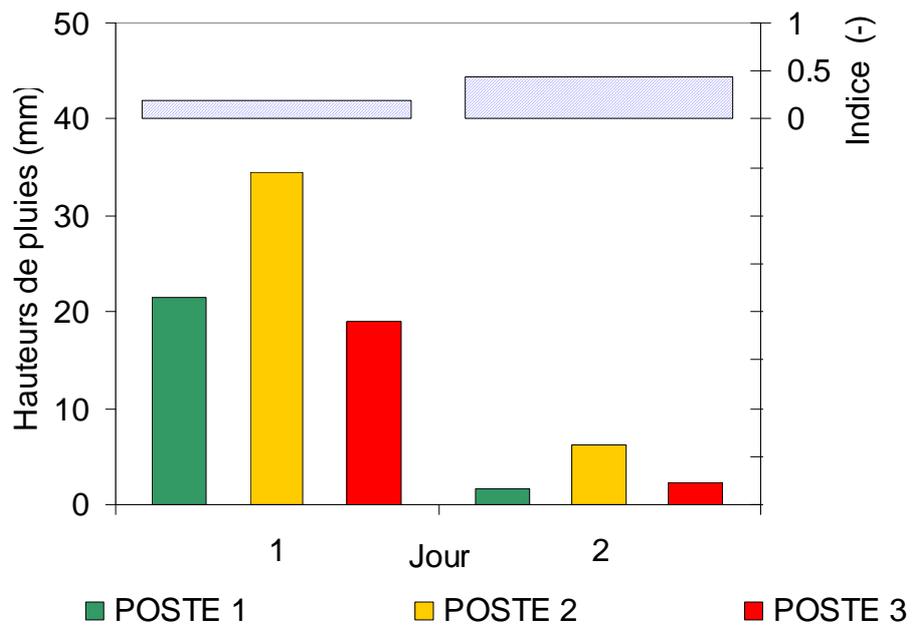


Figure 0.11 Hyétogrammes journaliers des trois postes pluviométriques et indices d'hétérogénéité associés. Jour 1 signifie le 7 aout 1995

Pour terminer, nous pouvons ajouter que la variabilité des valeurs d'indice autour de la médiane à l'intérieur de la chronique est beaucoup plus forte au pas de temps horaire qu'au pas de temps journalier comme en témoigne la Figure pour le cas du bassin versant de la Zorn (les autres bassins présentent la même configuration). Cette variation de répartition est très informative pour l'interprétation des résultats traitant de l'introduction d'indice d'hétérogénéité dans les modèles. En effet, les modifications se font par rapport à des écarts à la moyenne ou à la médiane et ceux-ci vont être plus importants au pas de temps horaire.

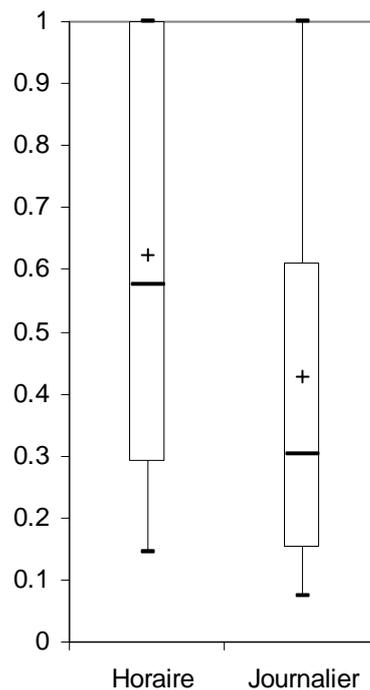


Figure 0.17 Box plot des valeurs d'indices d'hétérogénéités statistiques instantanées au pas de temps horaires et journalier sur les événements pluviométriques sur la chronique 1995-2005 du bassin de la Zorn (horaire : 12000 événements; journalier : 2400)

Annexe 5

Présentation des structure de modèles utilisés

Quatre modèles ont été ont servi de support aux travaux de cette thèse. Dans l'ordre d'apparition:

1. GR4J
2. GR4H
3. MORDOR6
4. IHACRESS

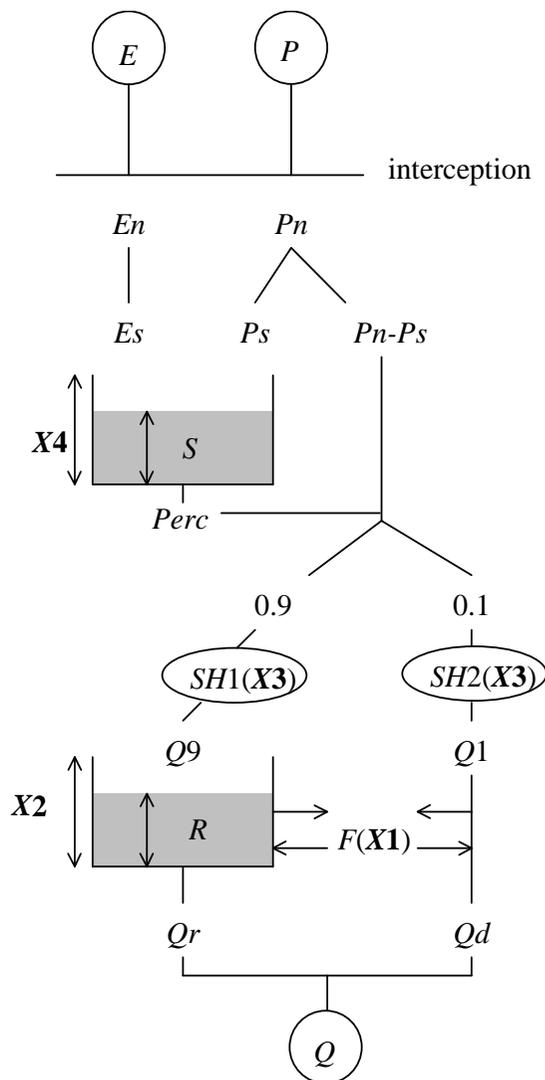
Les équations régissant ces structures sont décrites dans les pages suivantes.

P désigne la pluie d'entrée en mm

E désigne l'ETP en mm (PE pour MORDOR6)

Q désigne le débit de sortie en mm

Modèle GR4J (Perrin, 2000)



si $P \geq E$, $Pn = P - E$, $En = 0$, si $P < E$, $En = E - P$, $Pn = 0$

$$Ps = \frac{Pn \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X4}\right)^2\right)}{1 + \frac{Pn}{X4} \cdot \left(1 + \frac{S}{X4}\right)} \quad Es = \frac{En \cdot \frac{S}{X4} \left(2 - \frac{S}{X4}\right)}{1 + \frac{En}{X4} \cdot \left(2 - \frac{S}{X4}\right)}$$

$$Perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X4\right)^{-4}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad S = S - Perc$$

$$0 \leq j \leq X3, \quad SH1(j) = \left(\frac{j}{X3}\right)^{\frac{5}{2}} \quad j > X3, \quad SH1(j) = 1$$

$$0 \leq j \leq X3, \quad SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X3}\right)^{\frac{5}{2}}$$

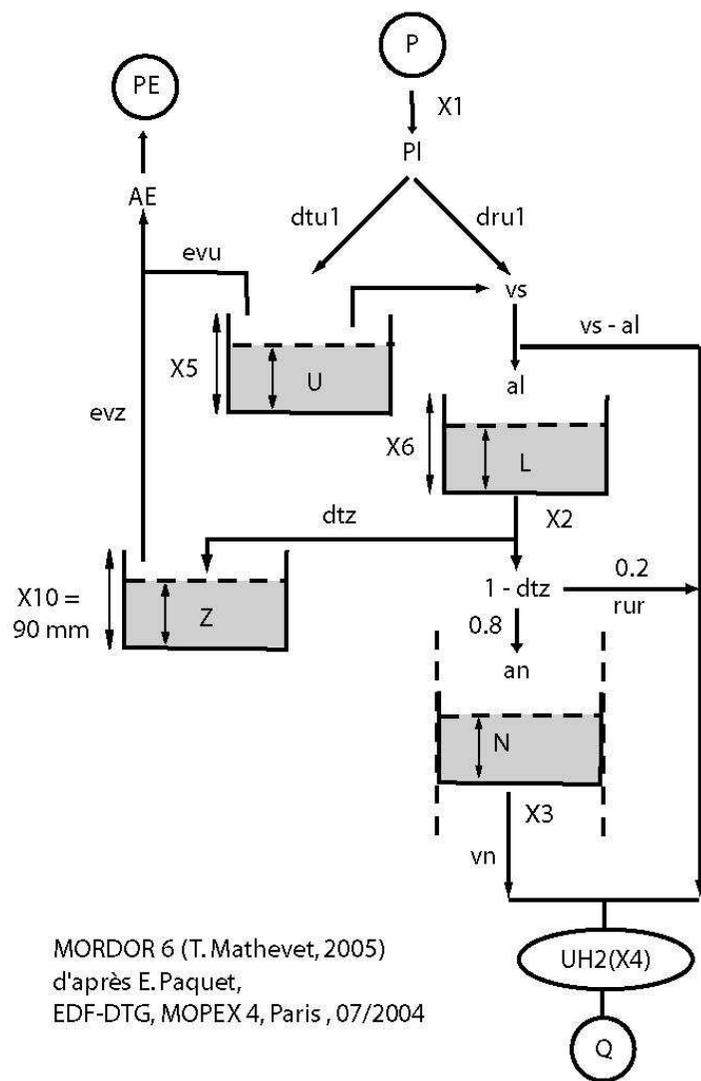
$$X3 < j \leq 2 \cdot X3, \quad SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X3}\right)^{\frac{5}{2}}$$

$$j > 2 \cdot X3, \quad SH2(j) = 1$$

$$F = X1 \cdot \left(\frac{R}{X2}\right)^{\frac{7}{2}} \quad R = \max(\varepsilon, R + Q9 + F)$$

$$Qr = R - \left(R^{-4} + X2^{-4}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad R = R - Qr \text{ puis } Q = Qr + Qd$$

Structure MORDOR6 (Mathevet, 2005)



MORDOR 6 (T. Mathevet, 2005)
d'après E. Paquet,
EDF-DTG, MOPEX 4, Paris, 07/2004

Correction sur la pluie

$$Pl = P * X1$$

Répartition de la pluie selon U

$$dtr1 = Pl.U / X5 \quad dtu1 = Pl - dtr1$$

Évolution du réservoir U

$$vs = dtr1 + \max(0, U - X5)$$

$$U = \min(U + dtu1, X5)$$

$$evu = \min(X5, E.U / X5) \text{ puis } U = U - evu$$

Évolution du réservoir L

$$al = \min(X6 - L, vs.(1 - L / X6))$$

$$L = L + al \quad vl = L / X2 \quad L = L - vl$$

Évolution du réservoir Z

$$dtz = vl.(1 - Z / 90) \quad rur = 0.2.vl.(Z / 90)$$

$$an = 0.8.vl.(1 - Z / 90) \text{ et } Z = Z + dtz$$

$$evz = \min(Z, (E - evu).Z / 90)$$

$$Z = \min(90, Z - evz)$$

Évolution du réservoir N

$$N = N + an$$

$$vn = \min(N, (N / X3)^3)$$

$$N = N - vn$$

Somme et routage des différentes contributions

$$Qt = vs - al + rur + an$$

Hydrogramme unitaire de GR4J (Perrin, 2000)

$$0 \leq j \leq X4,$$

$$SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X4} \right)^{\frac{5}{4}}$$

$$X4 < j \leq 2.X4,$$

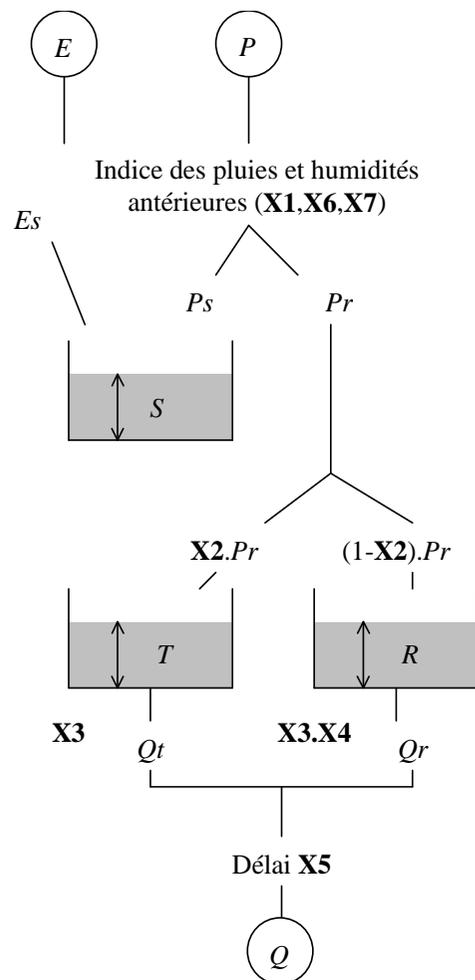
$$SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X4} \right)^{\frac{5}{4}}$$

$$j > 2.X4,$$

$$SH2(j) = 1$$

$$Q = SH2(X4, Qt)$$

Structure IHACRES (Perrin, 2000)



$$XS = S$$

$$E1 = \max(0., X7 - E / X6)$$

$$S = XS + \frac{P}{X1} - \frac{XS}{\exp(E1)}$$

$$Pr = \frac{1}{2}(XS + S).P$$

$$T = T + X2.Pr$$

$$R = R + (1 - X2).Pr$$

$$Qt = \frac{T}{X3}$$

$$Qr = \frac{R}{X3.X4}$$

$$T = T - Qt$$

$$R = R - Qr$$

$$Q = Qt + Qr$$

(avec translation dans le temps de $X5$ pas de temps)

Annexe 6

Analyses complémentaires résultats chapitre 4 : Introduction de l'indice statistique dans approche B et utilisation de l'hypothèse inverse au pas de temps journalier

Remarque: Les critères de performances type C2M sont, ici, exprimés en %

1. Comparaison $K=0,4$ (meilleurs critères de performances sur l'échantillon) et $K=1,0$ (valeur de K la plus fréquente en cas d'amélioration du critère C2M Q pour l'échantillon)

En observant les écarts sur les critères moyens de performances C2M Q⁴⁹ par bassin entre les approches modifiées et initiale en fonction de la superficie des bassins versants (Figure 0.1), nous pouvons premièrement voir que malgré un léger gain sur la statistique moyenne sur l'échantillon de ce critère de performances (voir Partie 4.2.1.3), la valeur de $K=0.4$ n'est pas celle qui provoque les améliorations les plus significatives. En effet, la valeur 1 produit les écarts positifs les plus élevés sur ce critère d'évaluation. Le problème est que cette situation s'observe aussi pour les écarts négatifs. La valeur $K=0.4$, apparaît, quant à elle, plus comme un bon compromis qui, en limitant les améliorations du critère de performances moyen par bassin par rapport à la structure initiale, limite aussi les dégradations

En comparant les écarts de performance en fonction de la superficie de chaque bassin pour ces deux valeurs, on remarque qu'en utilisant la valeur de $K=0.4$, on ne peut obtenir les meilleures améliorations du critère mais on limite aussi les dégradations au niveau des bassins qui rejettent ce type d'approche.

⁴⁹ Pour cette annexe les critères de performance sont exprimés en %

Pour la valeur $K=1$, on peut voir, comme nous l'avons indiqué précédemment, que les bassins dégradés par l'approche le sont d'autant plus. Néanmoins, les critères de performances moyens des bassins versants améliorés bénéficient encore plus de l'approche. On peut voir que les améliorations ou les dégradations ne dépendent pas de la superficie des bassins versants sauf pour les bassins versant dont l'aire d'alimentation est supérieure à 10000 km^2 qui sont tous systématiquement améliorés.

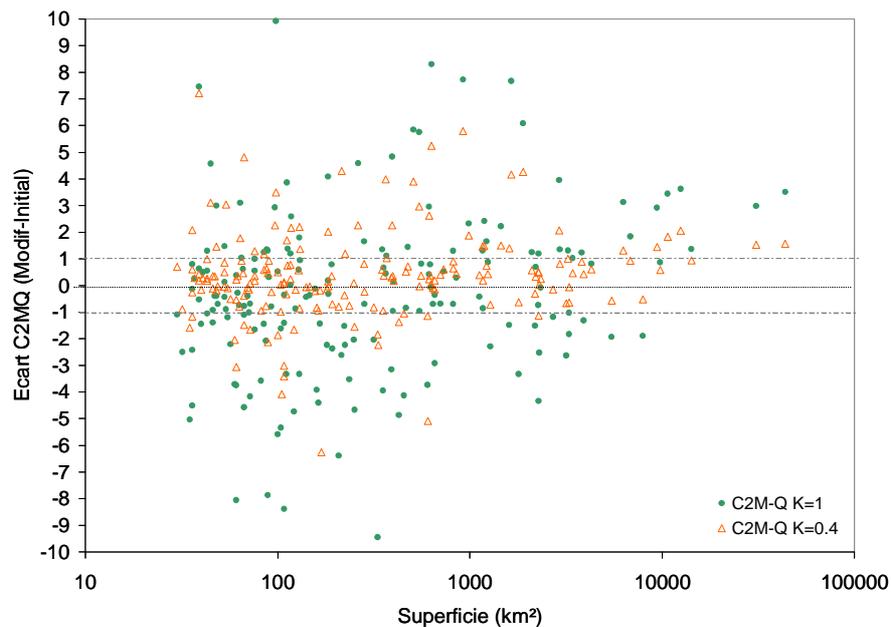


Figure 0.1 Ecart sur les critères moyens de performance C2M Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale du modèle GR4J pour les valeurs de $K=1$ et $K=0.4$ en fonction de leur superficie (échelle logarithmique). [En ligne pointillée, le seuil de significativité d'amélioration ou de dégradation des performances]

2. Analyse complémentaire de la solution $K=1$

La Figure 0.2 a) nous indique que l'écart de performance entre le modèle modifié et le modèle initial n'est que faiblement lié au nombre de postes pluviométriques disponibles par bassins sauf que plus ce nombre de postes augmente (au delà de 10), plus on aura de chances que le critère de performance correspondant soit amélioré par l'approche modifiée. Cependant on rappelle que les bassins incriminées sont aussi les bassins les plus grands de l'échantillon (voir chapitre 2 lors de la présentation de la base de données).

De la même façon (Figure 0.2 b), ce gain de performances n'est pas lié à la valeur de l'indice médian d'hétérogénéité des pluies. Les bassins dont les pluies sont considérées comme les

plus hétérogènes (indice médian supérieur à 0,5) sont généralement soit dégradés soit neutres par rapport à l'approche modifiée, alors que c'est logiquement sur ce genre de bassins qu'on s'attendait à des améliorations, l'approche leur étant *a priori* plus favorable.

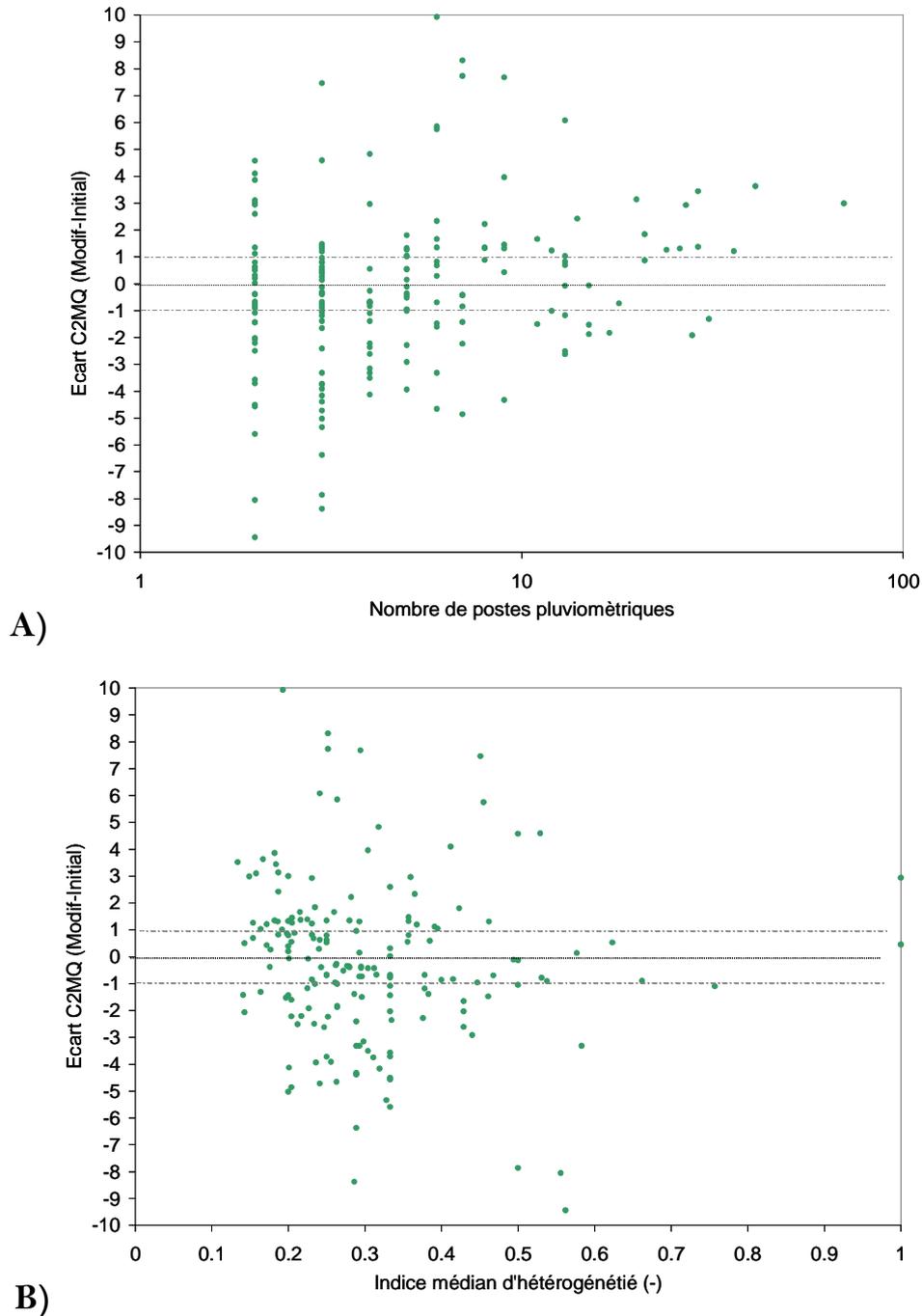


Figure 0.2 Ecart sur les critères de performance C2M Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4J pour la valeur de K=1 en fonction A) du nombre de postes pluviométriques ayant servi à calculer la pluie de bassin et l'indice associé B) de l'indice médian d'hétérogénéité du bassin versant

Cinq bassins bénéficient cependant d'améliorations plus fortes (écarts sur le critère de performances supérieurs à 7 points). Les noms des cours d'eau et de leur station de jaugeage sont indiqués dans le Tableau 0.1. Les critères initiaux de ces bassins et les écarts avec les autres critères de performance testés sont répertoriés dans le Tableau 0.2. Ces cinq bassins ont obtenus des critères de performance avec la version initiale du modèle GR4J assez faibles relativement à l'échantillon. Les améliorations obtenues avec les autres critères sont du même ordre de grandeur que celle obtenue sur C2M-Q pour deux d'entre eux (H4232040 et H5813010), ce qui signifie que la simulation de toutes les catégories de débits ont pu bénéficier de l'approche avec modifications. Pour deux autres (H4252010 et V4264021), les autres critères de performances ont été améliorés, mais moins significativement voire dégradés pour le critère C2M-LQ pour V4264010.

Aucun déterminisme géographique ne semble se dessiner sur leur position au sein de l'échantillon. En effet, il s'agit de deux bassins emboîtés de l'Orge, d'un petit bassin de Seine-et-Marne (tous trois situés dans le Bassin parisien), du bassin versant de la Drôme dans sa partie montagneuse amont montagneuse et d'un petit bassin de Provence. Ces cinq bassins, assez bien instrumentés en termes de densités de postes pluviométriques, sont en dehors de la Drôme (1640 km²), de bassins de faible superficie (relativement à l'échantillon). En termes d'hétérogénéité des précipitations, seul le plus petit de ces bassins (Le Bréagoux) possède un indice médian élevé relativement à l'échantillon. En effet, celui-ci appartient aux 10% les plus hétérogènes de l'échantillon (voir **Annexe 4** décrivant les indices d'hétérogénéités obtenus par bassins). Les autres bassins possèdent des valeurs intermédiaires relativement à l'échantillon, voire faibles, pour le bassin de la Breuvonne.

Tableau 0.1 Noms des stations, superficies, indices médians et nombre de postes pluviométriques

N° Station HYDRO	Station [Département]	Superficie (km ²)	Indice médian (-)	Nombre de postes
H4232040	L'Orge à Epinay-sur-Orge [Essone]	632	0.25	7
H4252010	L'Orge à Morsang-sur-Orge [Essonne]	922	0.25	7
H5813010	La Beuvronne à Compans [X]	98	0.19	6
V4264021	La Drôme à Loriol sur Drôme [Drôme]	1640	0.29	9
V6155610	Le Bréagoux à Aubignan [X]	39	0.45	3

Tableau 0.2 Valeurs par bassin des critères de performance en calage et en contrôle pour la structure initiale du modèle GR4J et écarts obtenus avec l'approche modifiée

N° Station	Période d'observation	Calage	C2M-Q	C2M-RQ	C2M-LQ	BILAN	Ecart Calage	Ecart C2M-Q	Ecart C2M-RQ	Ecart C2M-LQ	Ecart Bilan
H4232040	1982-1993	41.7	38.6	38.5	31.7	101.4	5.3	8.3	5.8	7.4	-2.1
H4252010	1982-1993	37.7	39.2	37.0	22.9	102.1	2.2	7.7	2.4	1.8	-2.8
H5813010	1976-1988	29.4	11.4	7.9	4.3	106.2	5.2	9.9	10.8	10.1	-2.3
V4264021	1995-2002	56.0	26.4	37.3	45.7	97.7	1.0	7.7	0.5	-7.3	1.0
V6155610	1969-1988	30.3	13.7	5.8	-8.0	100.0	-4.9	7.5	11.3	15.8	-2.7

Finally, the only group of basins that can be identified as benefiting systematically from the approach on the C2M-Q criterion is that of the large basins with a surface area greater than 10000 km². It consists, as we recall, of only five elements. The names of the water courses and their gauging station are indicated in Table 0.3. The initial performance criteria of these basins and the deviations obtained with the modified version on the other performance criteria are listed in Table 0.4. It is indicated that the initial criteria obtained with the GR4J model are much higher than for the five other basins where very strong improvements had been observed. In fact, the global models generally have good performances on large surface basins where the smoothing of inputs by the basin (notion of low-pass filter) becomes dominant. The deviations with the other criteria are of the same order of magnitude as those observed on the C2M-Q, which means that all categories of discharge have been improved in the same way. The criterion on the balance was relatively insensitive but on this type of basins, this criterion was already close to perfection (around 100 % +/- 2).

These five basins are all sub-basins or tributaries of the Seine upstream of Conflans Saint Honorine which, as its name indicates⁵⁰, is located at a confluence, that of the Seine and the Oise. They all have relatively weak median heterogeneity indices compared to the analysis sample (see **Annexe 4**) and a high number of posts.

⁵⁰ The name Conflans comes from the Latin *confluens*, confluence

Tableau 0.3 Noms des stations, superficies, indices médians et nombre de postes pluviométriques des bassins

N° Station HYDRO	Station [Département]	Superficie (km 2)	Indice médian (-)	Nombre de postes
H2721010	L'Yonne à Courlon-sur-Yonne	10700	0.18	29
H4340010	La Seine à Villeneuve-Saint-Georges	30800	0.15	70
H5841010	La Marne à Noisiel	12500	0.17	41
H5920010	La Seine à Paris	43800	0.13	105
H7611012	L'Oise à Pont-Sainte-Maxence	14200	0.22	29

Tableau 0.4 Valeurs moyennes par bassins des critères de performances en calage et en contrôle pour la structure initiale du modèle GR4J et écarts obtenus avec l'approche modifiée

N°_station	Période d'observation	Calage	C2M-Q	C2M-RQ	C2M-LQ	BILAN	Ecart Calage	Ecart C2M-Q	Ecart C2M-RQ	Ecart C2M-LQ	Ecart Bilan
H2721010	1975-2000	77.1	68.8	70.0	63.8	100.6	2.6	3.4	2.8	3.1	-0.2
H4340010	1975-1990	76.9	74.3	74.6	69.7	99.8	2.5	3.0	2.4	2.6	0.2
H5841010	1975-1990	67.8	64.7	66.0	61.7	98.0	3.0	3.6	3.6	3.7	0.2
H5920010	1975-1993	77.0	71.0	73.1	69.9	98.8	2.7	3.5	3.6	4.3	0.2
H7611012	1992-2001	84.6	82.4	83.5	80.9	99.5	1.9	1.4	1.3	2.0	0.0

Annexe 7

Compléments sur l'étude de l'introduction d'indice d'hétérogénéité statistique au sein du modèle GR4H (hypothèse Pic)

1. Analyse préliminaire⁵¹

L'étude au pas de temps horaire a rencontré sur un quart des cas (22 sur 99) quelques difficultés dans la définition de l'indice médian, dont la valeur était égale à la valeur maximale de 1 pour certains bassins ayant peu de postes (voir **Annexe 4**: Indice au pas de temps horaire). Or l'indice médian sert de valeur pivot pour inverser les modifications de fonctionnement du modèle suivant que l'indice sera en dessus ou en dessous de cette valeur médiane (stockage ou écoulement). Une médiane à la valeur maximale (l'indice étant borné) indique que cette valeur concerne plus de la moitié de la série pluviométrique et par conséquent, on a des modifications qui vont se faire uniquement dans un sens.

Afin de palier à ce problème, nous avons choisi une autre valeur statistique comme valeur pivot, la moyenne de l'indice sur la chronique plutôt que sa médiane.

Les tests d'introduction de l'indice d'hétérogénéité statistique dans le modèle ont été faits de la même manière que pour le pas de temps journalier, c'est-à-dire sur cinq lieux d'introduction et deux hypothèses sur l'échantillon de 99 bassins versants où des données sont disponibles à ce pas de temps.

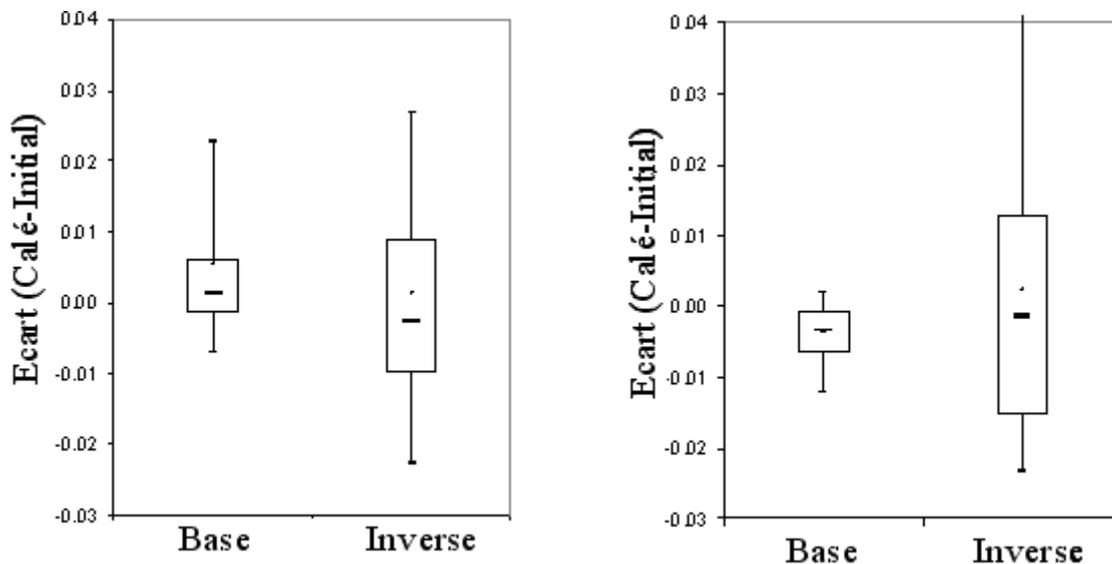
On rappelle que la structure initiale du modèle global est GR4H, qui est très similaire à celle de GR4J tout en étant adaptée pour le pas de temps horaire. Nous avons utilisé les mêmes lieux et procédures d'introduction des indices. Les augmentations de temps de calcul au pas de temps horaires, nous ont conduit à ne tester que trois valeurs de K ont été testées : 0,3, 0,6 et 1.

⁵¹ La méthodologie d'introduction est décrite au chapitre 3 et l'introduction de l'analyse des résultats au 1.2 du Chapitre 4

Similairement à l'étude au pas de temps journalier, l'évaluation des critères de performance des solutions a été initialement effectuée sur cinq lieux d'introduction et deux hypothèses dans la version calée manuellement (CALÉ) parmi les trois valeurs de K.

L'approche B avec l'hypothèse Inverse a obtenu des écarts en termes de critère de performance C2M-RQ les plus significatifs par rapport à la structure initiale GR4H (Figure 0.1 A). Mais à la différence du pas de temps journalier, pour le test de l'hypothèse Inverse, on constate de nombreux écarts négatifs donc des plus faibles performances de cette version CALÉ par rapport à la structure initiale. Ce résultat pourrait provenir du fait que le nombre de valeurs de K testées est plus faible pour l'approche, notamment la valeur 0,1 qui n'a pas été testée et qui permettait au modèle de davantage neutraliser l'approche et ainsi de limiter la dégradation des simulations.

Pour l'approche A (Figure 0.1 A), l'introduction de l'indice dans le modèle a été plus sensible à l'hypothèse de Base qu'au pas de temps journalier, notamment où la moyenne des écarts est de +0,005. Mais les écarts sont en réalité assez faibles (le quantile 0,75 des écarts théoriques est inférieur à +0,01)



A) MODIFICATION PLUIE NETTE

B) MODIFICATION PLUIE EFFICACE

Figure 0.1 BoxPlot de la distribution des différences de performance du critère C2M-RQ en contrôle entre le modèle modifié CALÉ et le modèle initial GR4J sur les 182 bassins versants de l'échantillon pour les deux hypothèses (de Base et Inverse) et deux lieux d'introduction : A) Modification pluie nette B) Modification pluie efficace

Les maxima des écarts du critère C2M-RQ de cette version théorique de l'approche A n'étant pas très élevés pour les deux hypothèses, l'intérêt d'interpréter et d'analyser plus en détails les résultats de cette solution sur les autres critères et de déterminer dans quelle "configuration" ont eu lieu les améliorations du critère n'est vraiment apparu que pour l'approche B avec l'hypothèse Inverse.

2. Analyse I : Introduction dans l'approche B : modification de la pluie nette en production et hypothèse Inverse au pas de temps horaire

La Figure 0.2 présente une synthèse des résultats en terme de moyennes et médianes des critères de performance en contrôle pour l'échantillon au pas de temps horaire en fonction des trois valeurs de K testées pour l'approche modifiée de type B et l'hypothèse Inverse. Les moyennes des différents critères sont toutes dégradées à partir de $K=0,6$ et sont stables pour $K=0,3$. Au niveau de la médiane, seul un gain légèrement significatif (0,669 contre 0,663) est obtenu pour le critère C2M-Q et $K=0,3$ (sans dégradation des autres critères pour cette même valeur).

Similairement à l'étude au pas de temps journalier, bien que seule la valeur $K=0,3$ semble apporter des améliorations sur le critère C2M-RQ, aussi minimales soient elles, sur tout l'échantillon, nous avons recherché quelles valeurs optimales de K étaient plébiscitées par les bassins versants en fonction de deux de leurs attributs dominants pour l'analyse (superficie et indice d'hétérogénéité).

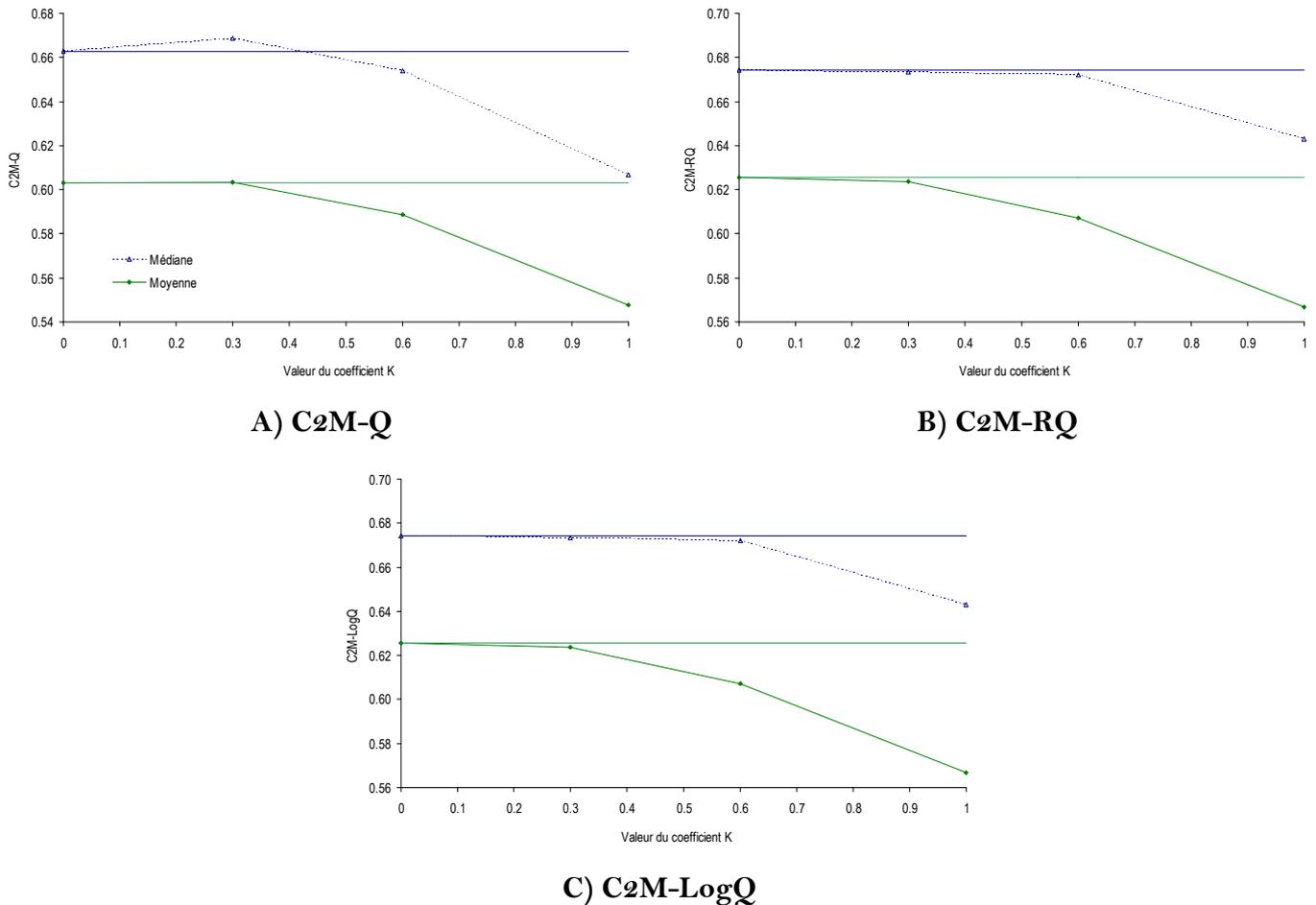


Figure 0.2 Moyenne et médiane pour l'échantillon HORAIRE de 99 bassins versants des trois critères de performances en contrôle de A) C2M Q, B) C2M RQ et C) C2M log Q du modèle initial GR4H et des versions modifiées avec l'approche B (modification pluie efficace de la fonction de production) et l'hypothèse de Base [0 représente le modèle initial, les traits continus la valeur de la médiane et de la moyenne des critère pour ce modèle]

La Figure 0.3 nous permet d'observer le lien entre la valeur optimale de K et la superficie des bassins versants de l'échantillon. Nous pouvons à nouveau voir, qu'il est délicat de relier la valeur optimale et la superficie du bassin versant correspondant. De la même façon qu'au pas de temps journalier, le choix majoritaire de la valeur minimale de K de 0,3 (81 sur 99 bassins versants concernés) permet uniquement de neutraliser l'effet de l'indice et non de dépasser les performances du modèle initial. Cependant, cette valeur est celle qui permet aussi d'obtenir pour le plus grand nombre de bassins des améliorations significatives du critère évalué par rapport au modèle initial (13 bassins versants sur les 93 sont concernés contre 8 pour K=0,6 et 5 pour K=1.0).

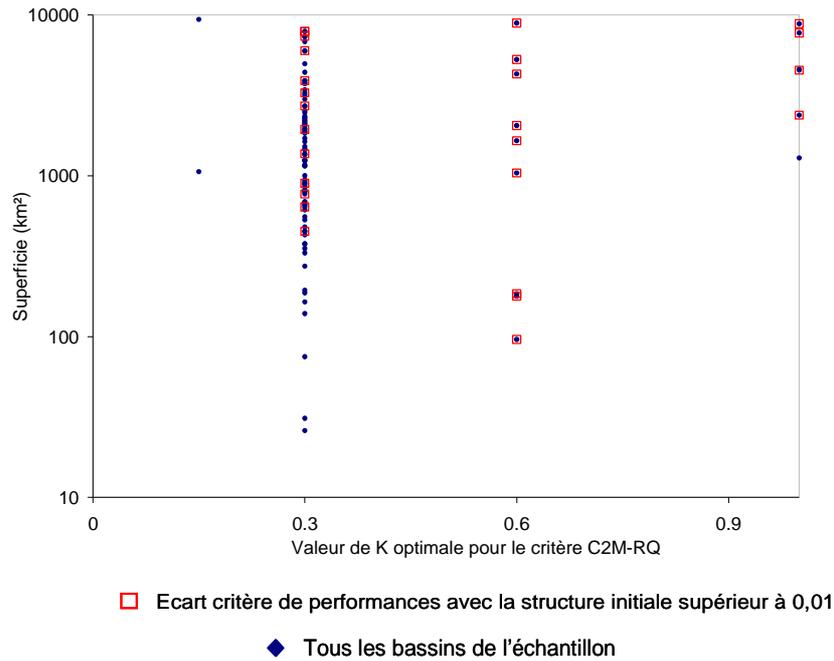


Figure 0.3 Valeurs de K optimales pour chaque bassin versant en fonction de sa superficie (carrés rouges : bassins versants où l'écart de performances sur le critère C2M-RQ entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H est supérieur à 0,01, soit 27 éléments sur 99)

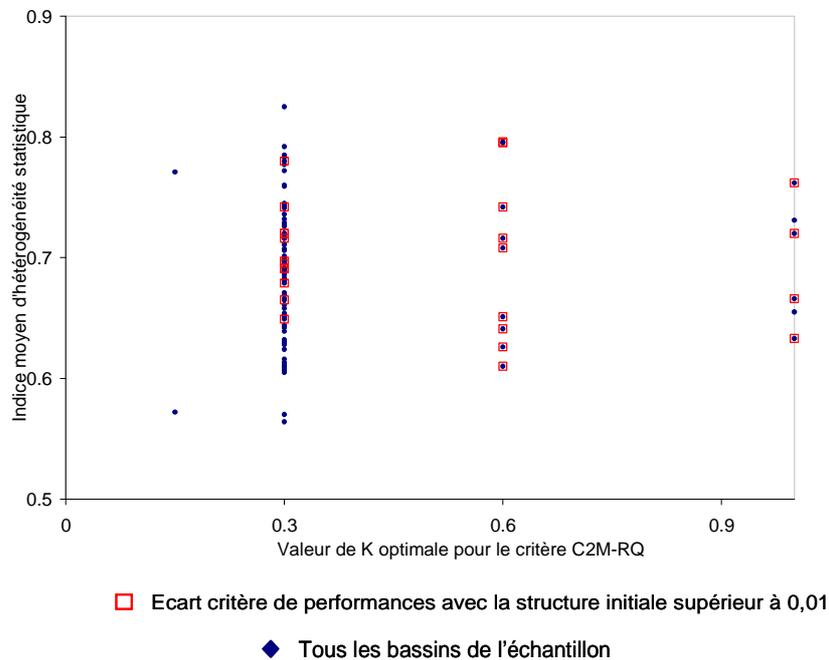


Figure 0.4 Valeur de K optimales pour chaque bassin versant en fonction de son indice d'hétérogénéité moyen (carrés rouges : bassins versants où l'écart de performances sur le critère C2M-RQ entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H est supérieur à 0,01, soit 27 éléments sur 99)

Si nous comparons les écarts moyens de performance entre la structure modifiée et la structure initiale de GR4H en fonction de ces deux valeurs de K et de la superficie des bassins versants, on arrive à peu près à la même situation qu'au pas de temps journalier mais avec des valeurs d'écarts entre la structure initiale et modifiée amplifiées dans le sens de la dégradation (jusqu'à -0,15 contre -0,09 pour le pas de temps journalier). Pour $K=0,6$, on a des dégradations nettement plus intenses des critères moyens qu'avec $K=0,3$. Les améliorations sont globalement équivalentes pour les deux coefficients et tendent à se systématiser si la superficie des bassins augmente.

En effet, similairement au pas de temps journalier, les plus grands bassins de l'échantillon sont soit légèrement améliorés, soit insensibles à l'introduction d'un indice d'hétérogénéité des pluies. A ce pas de temps, le seuil de superficie qui semble se dessiner est d'environ 5000 km^2 avec la présence cependant d'un bassin⁵² d'une superficie de 46000 km^2 particulièrement dégradé pour les deux valeurs de K. Ce seuil indique ainsi une différence avec le pas de temps journalier où les bassins entre 5000 km^2 et 10000 km^2 pouvaient connaître de fortes dégradations de leurs critères moyens de performance avec cette approche (voir **Annexe 6**).

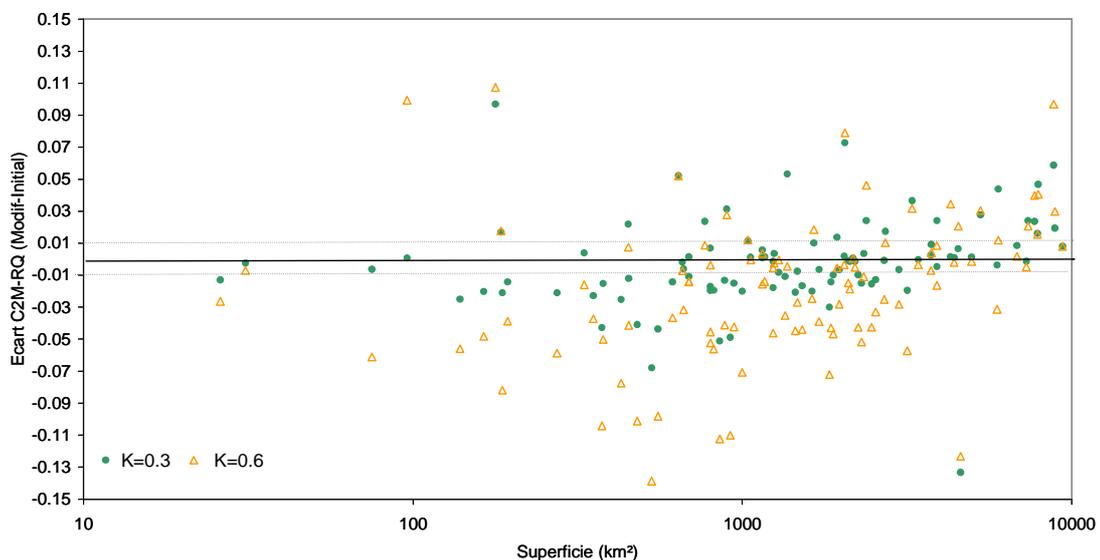


Figure 0.5 Ecart sur les critères moyens de performance C2M-Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H pour les valeurs de $K=0,3$ et $K=0,6$ en fonction de la superficie. [En ligne pointillée, le seuil arbitraire de significativité d'amélioration ou de dégradation des critères de performances].

⁵² Il s'agit du bassin versant de l'Ill à Strasbourg (Code Hydro A2280350)

En complément, si nous cherchons à lier les améliorations sur ce critère à l'indice moyen d'hétérogénéité des pluies des bassins, les bassins versants ayant les indices moyens d'hétérogénéité les plus élevés (donc ceux où les précipitations sont censées être les plus variables spatialement) sont insensibles à l'approche modifiée de GR4H qui leur était pourtant destinée (Figure 0.5).

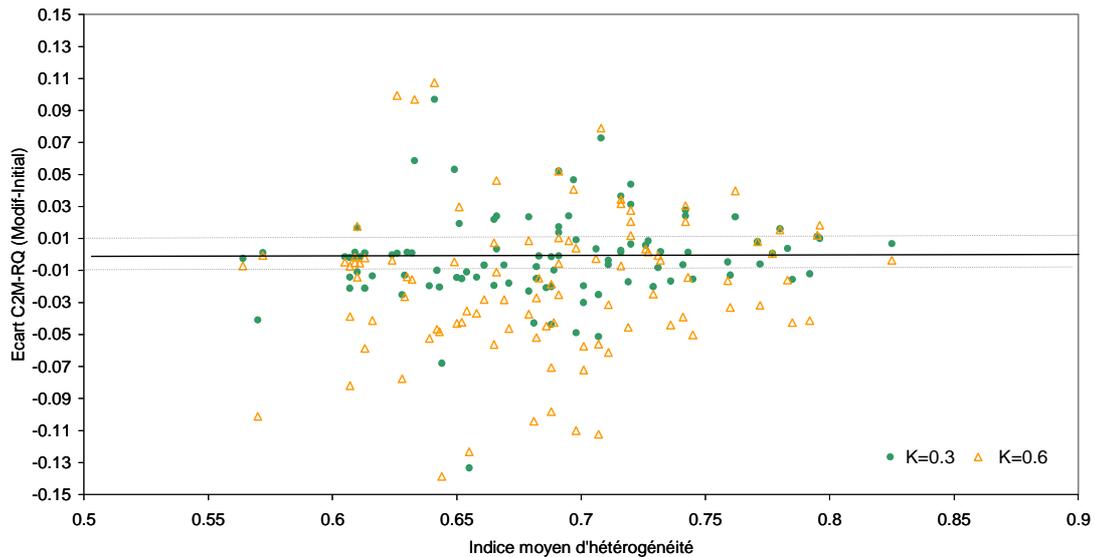


Figure 0.6 Ecart sur les critères moyens de performance C2M-Q pour chaque bassin entre l'approche modifiée et la structure initiale de GR4H pour les valeurs de $K=0,3$ en fonction de leur indice moyen d'hétérogénéité. [En ligne pointillée, les seuils arbitraires de significativité d'amélioration ou de dégradation des critères de performances].

Les bassins identifiés comme soit améliorés soit non dégradés par l'approche sont donc les grands bassins de plus de 5000 km², soit 12 bassins sur les 99 que compose l'échantillon ou les superficies varient entre 30 et 10000 km².

Le Tableau 0.1 indique les noms des cours d'eau, de leur station de jaugeage et leurs attributs principaux. Les critères initiaux de ces bassins et les écarts avec les autres critères de performances testés sont répertoriés dans le Tableau 0.2. Mis à part l'Eure à Louviers, ces bassins ont obtenus des critères de performance avec la version initiale du modèle GR4H assez bon relativement à l'échantillon. (Voir **Annexe 9**). Quatre d'entre eux ont un comportement jugé neutre avec l'approche modifiée en termes d'écart sur le critère C2M-Q. Ils ont cependant obtenu des gains significatifs sur le C2M-LogQ sauf un bassin : le Doubs. Lorsque des gains significatifs ont été observés sur le critère moyen C2M-Q (8 cas), dans 7 cas, les améliorations obtenues avec les autres critères sont du même ordre de grandeur; sur

deux cas, le C2M-LQ reste neutre (l'Eure et la Moselle à Metz). Ceci signifie que la simulation est améliorée sur toutes les catégories de débits. Pour le dernier cas, le Loir à Flée, la très forte amélioration du critère sur les débits est couplée avec une très forte dégradation du C2M-LogQ mais aussi par un très léger rééquilibrage du critère de bilan.

Tableau 0.1 Noms des cours d'eau et des stations, superficies (S), indices moyen d'hétérogénéité (Ind moyen) et nombre de postes pluviométriques (Nb postes) des bassins du tableau 1

	S (km ²)	Ind moyen	Nb postes	Cours d'eau + Nom station
A7010610	6830	0.727	3	La Moselle à Custines
A7430610	7880	0.780	4	La Moselle à Metz [Pont des Morts]
A7930610	9390	0.771	5	La Moselle à Hauconcourt
B5600010	7720	0.762	5	La Meuse à Montcy-Notre-Dame
H5321010	8820	0.633	16	La Marne à la Ferté-sous-Jouarre
H9501010	5990	0.720	6	L'Eure à Louviers
M0500610	5290	0.742	4	La Sarthe à Spay
M0680610	7380	0.742	4	La Sarthe à Saint-Denis-d'Anjou
M1341610	5940	0.711	8	Le Loir à Flée [Port-Gautier]
M1531610	7920	0.697	9	Le Loir à Durtal
U1120010	8900	0.651	10	La Saône à Auxonne
U2722010	7290	0.605	12	Le Doubs à Neublans-Abergement

Tableau 0.2 Valeurs moyennes des critères de performance en calage et en contrôle par bassin de plus de 5000 km² pour la structure initiale du modèle GR4H et écarts obtenus (EC) avec ceux de l'approche modifiée pour K=0,3 (soulignés : écarts significatifs sur les trois critères C2M en contrôle; italique : au moins un critère insensible ; en gras : effets contraires sur les critères) EC bilan est construit selon la formule décrite dans le chapitre 3 (Partie 3.6.3)

	Calage	C2M-Q	C2M-RQ	C2M-LQ	BILAN	EC Calage	EC C2M-Q	EC C2M-RQ	EC C2M-LQ	EC Bilan
A7010610	0.788	0.777	0.783	0.725	0.982	0.010	<i>0.001</i>	<i>0.008</i>	<i>0.026</i>	-0.007
A7430610	0.640	0.648	0.631	0.568	0.984	0.016	<i>0.026</i>	<i>0.037</i>	<i>0.007</i>	0.002
A7930610	0.813	0.800	0.793	0.709	0.982	0.004	<i>0.008</i>	<i>0.008</i>	<i>0.021</i>	-0.003
B5600010	0.694	0.654	0.650	0.567	0.987	0.021	<u>0.019</u>	<u>0.033</u>	<u>0.039</u>	-0.001
H5321010	0.715	0.643	0.625	0.520	0.957	-0.019	<u>0.081</u>	<u>0.110</u>	<u>0.036</u>	0.026
H9501010	0.494	0.339	0.292	0.210	0.943	0.015	<i>0.092</i>	<i>0.065</i>	<i>0.001</i>	0.049
M0500610	0.822	0.817	0.810	0.642	0.994	0.030	<u>0.028</u>	<u>0.032</u>	<u>0.067</u>	-0.005
M0680610	0.848	0.844	0.836	0.664	0.982	0.023	<u>0.016</u>	<u>0.010</u>	<u>0.081</u>	-0.005
M1341610	0.610	0.519	0.546	0.429	1.019	0.050	0.102	0.057	-0.165	0.017
M1531610	0.674	0.620	0.559	0.270	1.019	0.066	<i>0.018</i>	<i>0.005</i>	<i>0.153</i>	-0.003
U1120010	0.540	0.525	0.485	0.274	0.976	0.019	0.007	0.009	0.045	-0.001
U2722010	0.808	0.789	0.796	0.769	0.974	0.001	<i>0.001</i>	<i>0.002</i>	<i>-0.006</i>	-0.002

Annexe 8

Hétérogénéité antérieures des précipitations et débits supérieurs à un seuil

Nous avons cherché à relier l'hétérogénéité spatiale des cumuls journaliers moyens antérieurs (J , $J-1$ et $J-2$) aux pointes de crues journalières supérieures à un seuil sur le bassin de la Drôme à Loriol (1690 km² où la pluie est évaluée à partir de 9 postes). Nous avons choisi un seuil de crue à 125 m³/s pour environ 5 crues par an sur une chronique de 7 années (soit 35 événements analysés en tout). La Figure 0.1 présente la valeur maximale de l'indice statistique l'hétérogénéité des précipitations (voir Partie 3.3.1 pour la définition) antérieures (parmi j , $j-1$ et $j-2$) et la valeur moyenne de cet indice sur les trois jours en fonction du débit de la pointe de crue observées au jour j .

On peut y voir que les plus fortes crues ne sont que très rarement issues d'événements ou de séries d'événements décrits comme spatialement hétérogènes par l'indice statistique et donc le modèle aura tendance à les considérer comme des événements hétérogènes (voir Partie 3.5.2 pour le principe d'introduction de l'indice dans le modèle).

De plus, plus l'événement de crue est fort plus il est à l'origine de pluies considérées comme les plus homogènes. On rappelle que plus l'indice tend vers 0, plus la pluie est homogène spatialement sur le bassin.

En complément, la Figure 0.2 représente les cumuls moyens journaliers des événements de pluie en fonction des précipitations antérieures (moyenne et valeur maximale sur j , $j-1$ et $j-2$). On peut logiquement voir que les plus forts débits sont issus des plus forts cumuls pluviométriques. Cela induit donc que les plus forts cumuls pluviométriques ne sont généralement pas des événements très hétérogènes spatialement, du moins sur ce bassin.

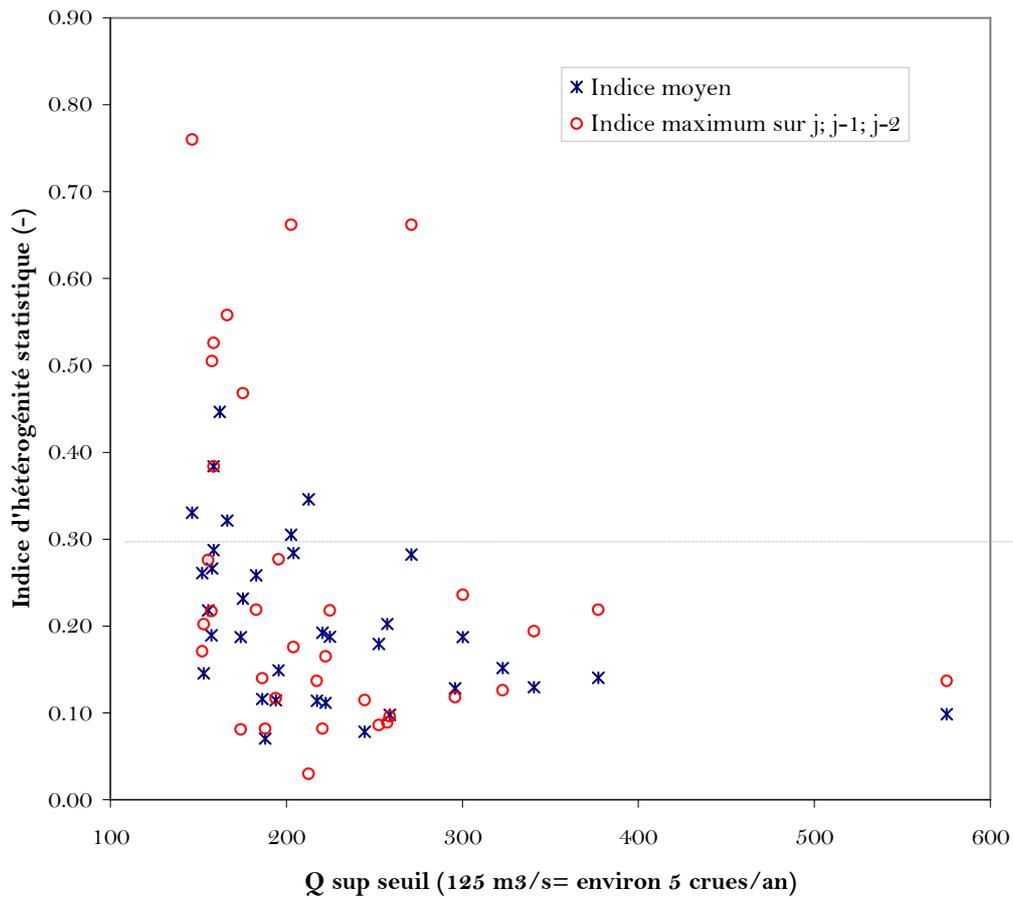


Figure 0.1 Relation entre l'indice d'hétérogénéité spatiale des pluies antérieures (valeur maximale et valeur moyenne) et la valeur du débit considéré (le trait gris représente la médiane des indices sur toutes les pluies non nulles de la chronique) pour le bassin versant de la Drôme à Loriol.

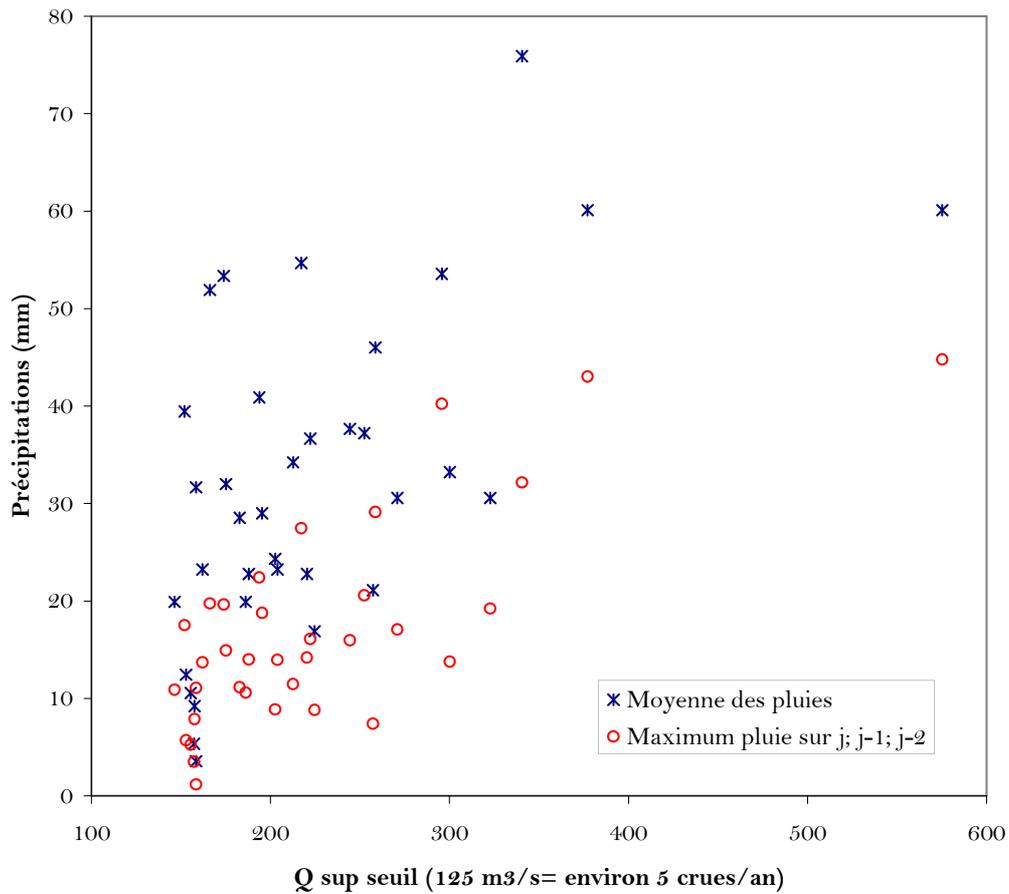


Figure 0.2 Relation entre les précipitations moyennes journalières (valeur maximale et valeur moyenne sur j, j-1 et j-2) et la valeur du débit considéré pour le bassin versant de la Drôme à Loriol.

Annexe 9

Performances initiales de trois structures de modèles au pas de temps horaire

Remarque: Les critères de performances type C2M sont, ici, exprimés en %

Afin de situer les modèles les uns par rapport aux autres et d'évaluer les performances générales sur les 99 bassins versants de notre échantillon, nous présentons les performances globales des modèles testés.

Les modèles ont été calés par split-sample-test sur deux périodes de quatre ans avec calage par la méthode pas-à-pas en utilisant pour fonction objectif le critère C2M \sqrt{Q} que nous appellerons par la suite C2M-RQ. Ce critère, tout comme le critère C2M-Q sur les débits, sera exprimé en %. Les résultats des performances moyennes au calage sur notre échantillon sont résumés dans la **Figure 0.1**.

En calage, les quatre modèles ont des performances globales moyennes situées environ entre 60 et 72%. MORDOR6 possède le meilleur critère moyen avec 71.5%. Les performances de GR4H et IHACRES sont équivalentes (68.5 et 68.7 en moyenne). MORDOR5 est à 58.9. Néanmoins, on rappelle que ce modèle a été amputé d'un paramètre par rapport à sa version à six paramètres. Ce paramètre manquant, qui est un coefficient correcteur des pluies a donc beaucoup d'influence sur les performances globales de MORDOR. Son ajout provoque un bon en avant d'environ 13 points dans les performances de la structure MORDOR.

En phase de contrôle, les quatre structures de modèles sont évaluées sur deux critères de performances C2M-R et C2M-Q. Les résultats moyens pour les quatre modèles sont représentés en **Figure 0.2**. Par rapport au calage, on observe en phase de contrôle une forte baisse générale des performances moyennes évaluées sur C2M-RQ (-8 points environ pour IHACRES, MORDOR6 et MORDOR5 et -6 pour GR4H). La robustesse des modèles semble moins importante au pas de temps horaire qu'au pas de temps journalier où par exemple GR4J ne perdait que 4 points.

GR4H et MORDOR6 ont donc finalement des performances à peu près équivalentes sur les deux critères avec un léger avantage à MORDOR6 pour le critère sur les débits (61.4 contre

60.6). IHACRES a des performances intermédiaires avec 55% en moyenne pour C2M-Q. Les performances moyennes de la version MORDOR5 sont bien inférieures (autour de 51 de moyenne pour les deux critères).

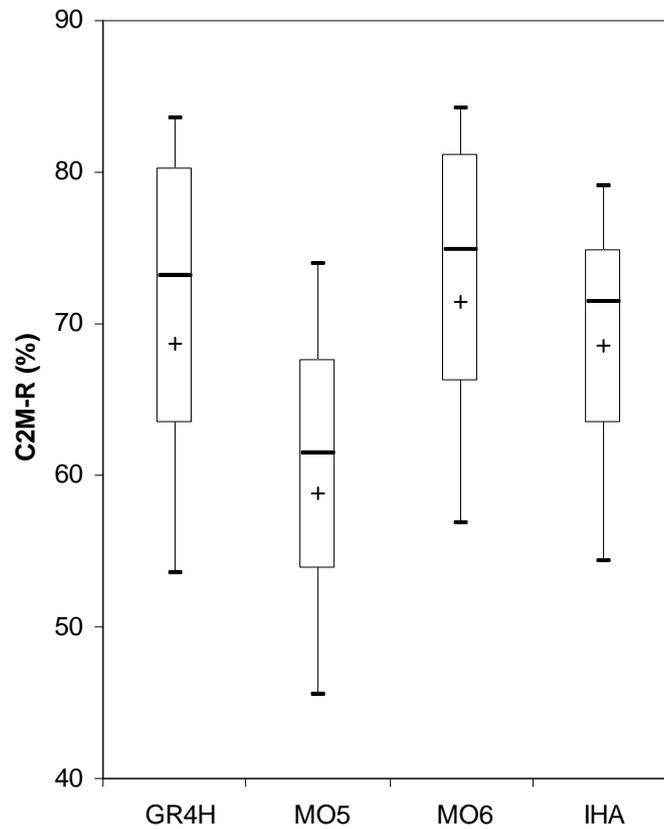


Figure 0.1 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères moyens C2M-RQ en calage sur l'échantillon pour les quatre modèles testés. MO=MORDOR, IHA=IHACRES

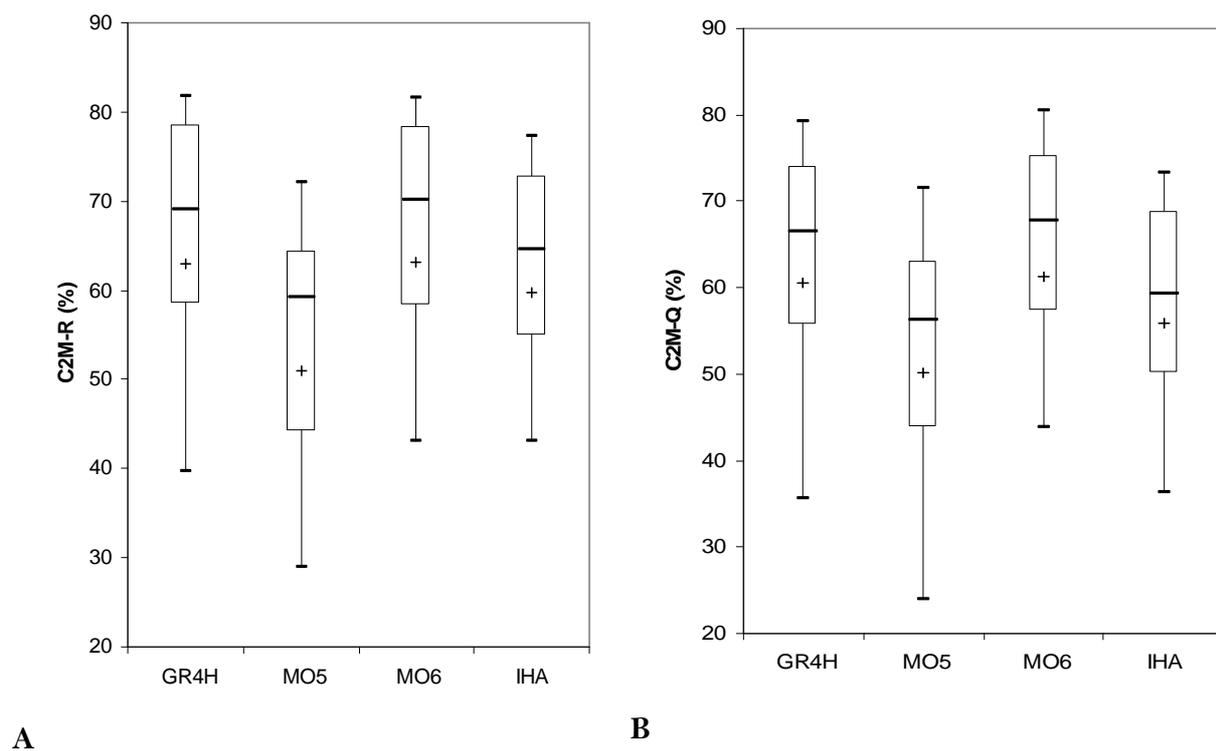


Figure 0.2 Box plot [(-) Médiane et (+) Moyenne] des critères moyens C2M-RQ(A) et C2M Q (B) en validation sur l'échantillon pour les quatre modèles testés.

Annexe 10

Comparaison des cumuls annuels de précipitation Amont/Aval des bassins

Dans le cas d'un Multi-Modèle à deux entrées pluviométriques amont et aval, il nous a paru intéressant de comparer les totaux moyens annuels estimés de ces deux entrées. Cette comparaison a été faite dans le but de chercher des inégalités dans les quantités d'eau totales introduites sur chaque sous-modèle. La Figure 0.1 nous présente des totaux annuels moyens de la pluie Amont en fonction de ceux de la pluie Aval pour chaque bassin sur la période 1995-2005. On peut remarquer, que pour la majorité des bassins, la pluie moyenne amont est supérieure ou légèrement supérieure à la pluie moyenne Aval. Pour une dizaine d'autres, le phénomène inverse est observé avec une pluie aval supérieure en quantité à la pluie moyenne annuelle amont.

La Figure 0.2 montre la répartition géographique des inégalités entre les pluies totales annuelles amont et aval avec l'illustration du rapport de la pluie moyenne annuelle Amont sur la pluie moyenne annuelle Aval. Un rapport inférieur à 1 signifie que c'est la pluie de bassin Aval qui est supérieure en moyenne annuelle à la pluie de bassin Amont et inversement.

Sept bassins possèdent un écart significatif entre les totaux Amont et Aval avec donc une quantité de pluie tombée supérieure en aval du bassin. Ces bassins se situent au niveau des bassins emboîtés amont de la Meuse, du Rognon et du Loir au nord-est de la France. Un autre bassin est situé dans le sud-ouest, il s'agit du Midou à Mont de Marsan.

Pour environ 40 bassins, il n'y a pas de différence significative entre les totaux Amont-Aval (rapport entre 0.9 et 1.1). Tous ces bassins sont situés dans des zones topographiques relativement planes où les effets orographiques ne peuvent être dominants.

Une trentaine de bassins présentent des pluies amont légèrement supérieures aux pluies Aval (rapport entre 1.2 et 1.5). Il s'agit pour la plupart de bassins de la Loire Amont et de la Marne.

Le reste (environ 15 bassins) présente une nette différence entre les totaux des deux entrées (rapport supérieur à 1.5). Ces bassins comportent systématiquement une partie montagneuse

à l'amont. Leurs zones d'alimentation sont principalement situées en Alsace (2), Lorraine (2), Franche Comté (2), Dordogne (1), Loire-Amont (2), Cévennes (1) Savoie (1) Vaucluse (1) et Corse(1). L'écart le plus fort est observé pour le bassin de l'Ill à Ensisheim. C'est un bassin versant d'environ 1000 km² situé dans le Haut-Rhin avec un total annuel moyen amont de 1720 mm mesuré par deux postes (l'un à 1200 m d'altitude, l'autre à 750 m) contre 768 mm en moyenne pour la pluie aval (mesurée par un seul poste à 200 m d'altitude).

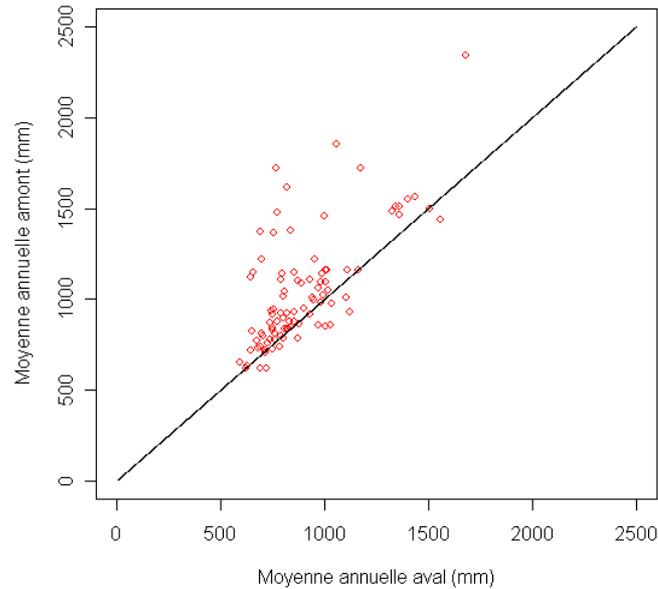


Figure 0.1 Pluie moyenne annuelle aval en fonction de la pluie moyenne annuelle amont sur la période 1995 -2005 pour les 99 bassins de l'échantillon

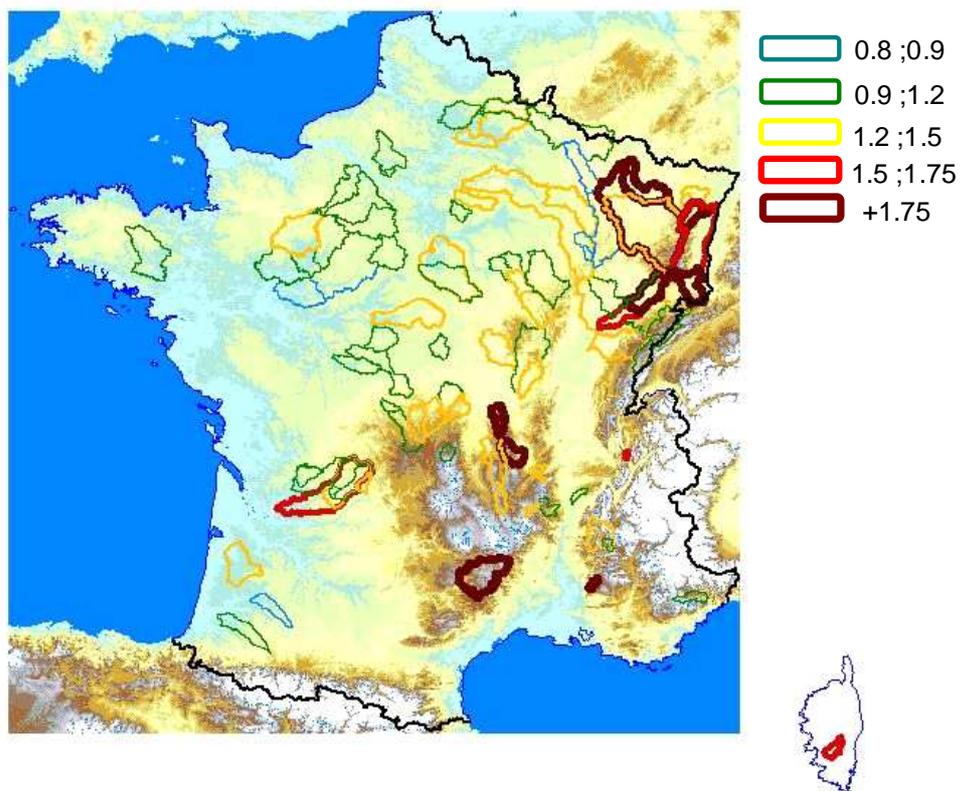


Figure 0.2 Répartition géographique du rapport (représenté en cinq classes) entre la pluie moyenne annuelle Amont et pluie moyenne annuelle Aval

Annexe 11

Introduction d'une information partielle de la pluie de bassin au Multi-Modèle

L'échec du Multi-Modèle alimenté par deux entrées construites comme pluies Amont et Aval pourrait avoir comme origine un manque d'information sur la pluie globale de bassins. Afin d'ajouter cette information partielle provenant de la pluie de bassins globaux, nous avons utilisé la méthodologie décrite ci-dessous.

On substitue aux deux entrées brutes de pluie Amont et pluie Aval, deux pluies lissées par la pluie de bassin.

Pour le calcul d'une pluie amont ou aval influencée par la pluie globale, on introduit la pluie de bassin totale à chaque pas de temps de modélisation grâce à un coefficient α :

$$P_{Am}^* = P_{Am} \times \alpha + P_G (1 - \alpha) \quad \text{Eq.}$$

36

$$P_{Av}^* = P_{Av} \times \alpha + P_G (1 - \alpha) \quad \text{Eq.}$$

37

Avec: P_{Am}^* Pluie Amont lissée

P_{Av}^* Pluie Aval lissée

P_{Av} Pluie Aval brute

P_{Am} Pluie Amont brute

P_G Pluie de bassin globale

α Coefficient fixe $\in [0;1]$

On rappelle que : $P_G = \frac{P_{Am} + P_{Av}}{2}$ et la nouvelle formulation permet de conserver la même pluie de bassin.

Plus α tend vers 1 plus on va vers un modèle avec les pluies Amont et Aval initiales. Plus α tend vers 0 plus on va vers un modèle avec les pluies Amont et Aval égales à la pluie globale. Il s'agit donc de trouver une valeur optimale pour ce coefficient sur tout l'échantillon. On testera différentes valeurs de α : 0,0 (Global); 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 et 1 (pluie amont et aval initiales)

Les tests sont réalisés avec GR4H. L'évolution des résultats moyens (critère de performance C2M-RQ en contrôle) du Multi-Modèle à deux entrées en fonction des valeurs de α est présentée sur la Figure 1. Aucune valeur du coefficient α ne permet de dépasser significativement le modèle global.

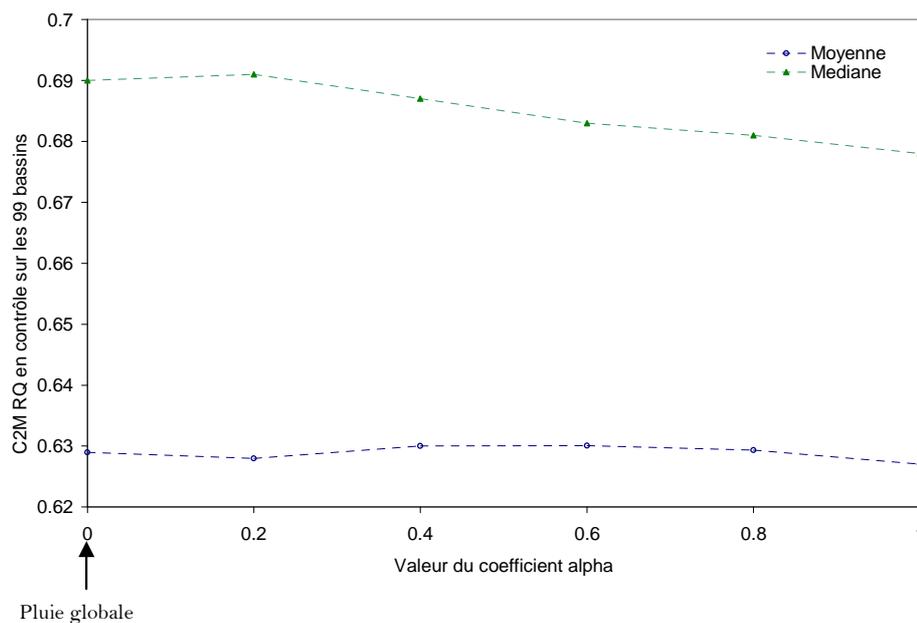


Figure 0.1 Evolution des C2M-RQ médian et moyen sur l'échantillon de 99 bassins versants selon la valeur de α en contrôle (0 représente une même pluie sur les deux sous-modèles).

Comme pour l'utilisation de deux sous-modèles alimentés par les pluies brutes amont et aval, on remarque ici aussi que les sous-modèles alimentés par une pluie amont ou aval lissée compensent l'influence de la pluie globale de bassin en corrigeant le paramètre X3 (échanges). Logiquement, plus α tend vers zéro, plus X3 amont et X3 aval tendent vers la

valeur de X_3 globale. On peut rajouter que c'est sur ce paramètre que ce comportement est le plus marqué (voir Partie 6.2.2).

La tentative de calage manuel du coefficient parmi les cinq valeurs testées n'a pas apporté d'information supplémentaire.

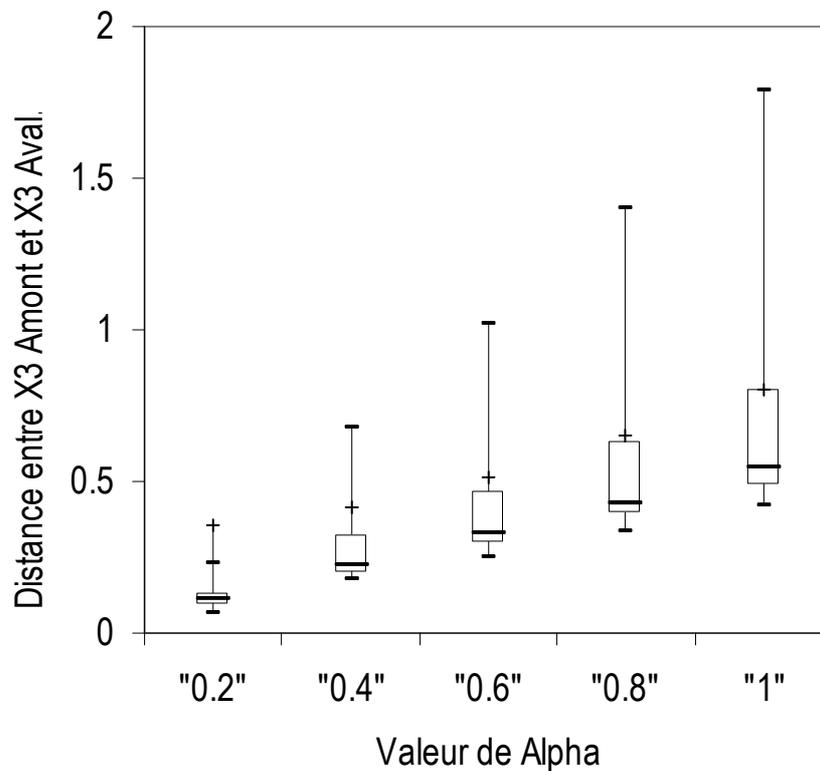


Figure 2 Box Plot sur les 198 bassins périodes de la distribution de la distance entre le paramètre X_3 Amont et X_3 Aval en fonction de la valeur de ($=$ Alpha sur la figure)

La méthode avait pour objectif de limiter une éventuelle instabilité de l'approche MultiModèle liée à l'écart des cumuls moyens des pluies Amont et Aval par rapport aux cumuls moyens globaux sur le bassin versant. La méthode n'a pas permis d'amélioration significative des résultats en termes de performances du Multi-Modèle, ce qui tend à infirmer l'hypothèse d'une instabilité de la méthode Multi-Modèle liée à ces divergences entre les deux pluies d'entrée.

Annexe 12

Illustration des meilleures combinaisons et sous-échantillonnage de postes pluviométriques

Légende:

Amont-Aval=Limite de répartition des postes pour les entrées Amont/Aval

Best-Combin=Limite de répartition de la combinaison ayant amené aux meilleurs performances du Multi-Modèles à deux entrées

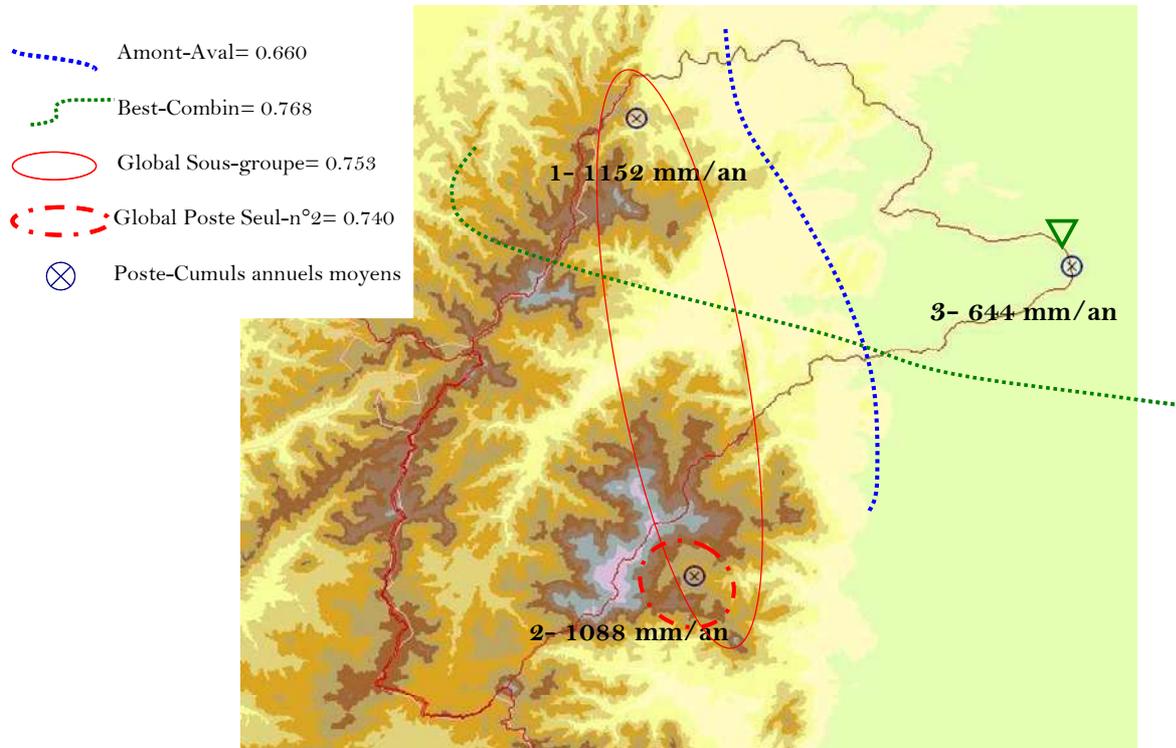
Global-Sous groupe=Sous-échantillonnage de postes ayant amené aux meilleurs performances du modèle global

Global Poste seul= Poste utilisé individuellement ayant amené aux meilleurs performances du modèle global

Les valeurs entre parenthèses indiquent le critère C2M-Q obtenu en contrôle pour chaque cas.

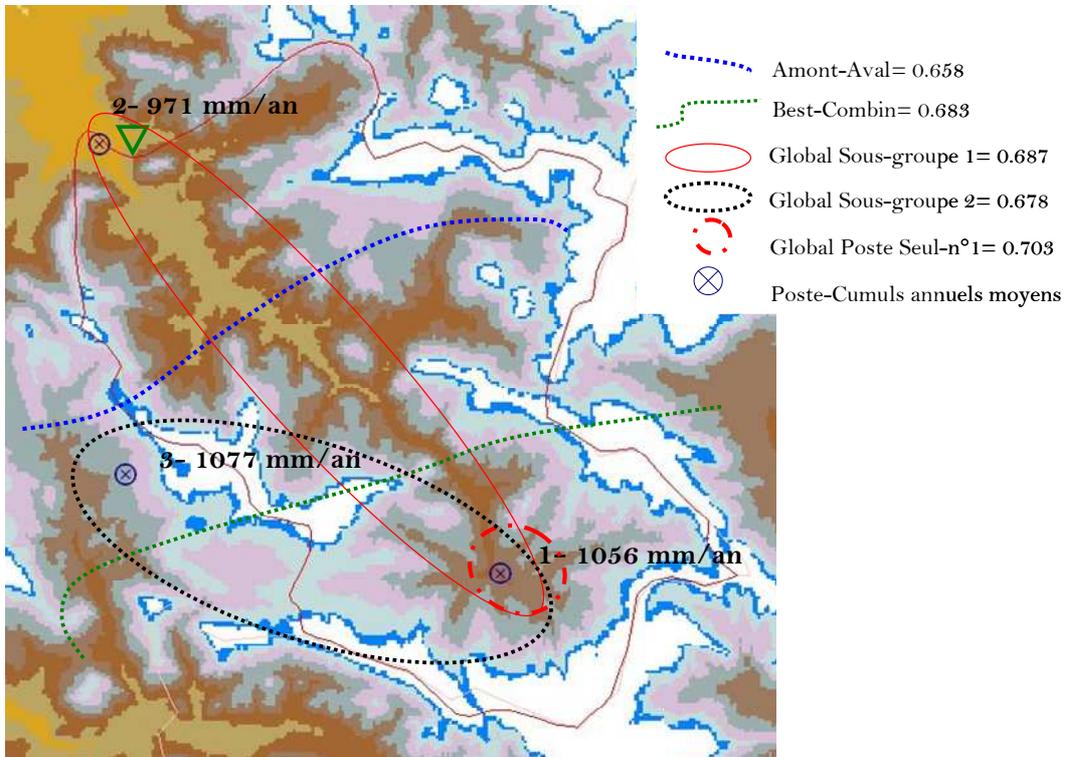
Exemple 1:

A2861010 La Bruche à Holtzheim [(Bas-Rhin) 670 Km² C2M-Q Initial=0.753



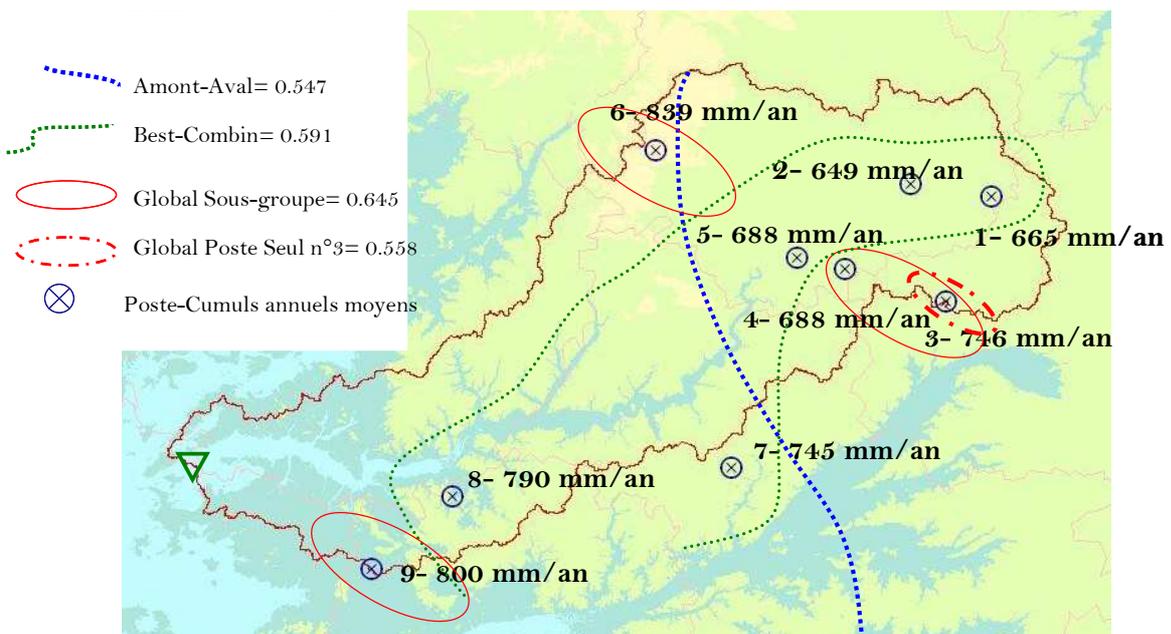
Exemple 2:

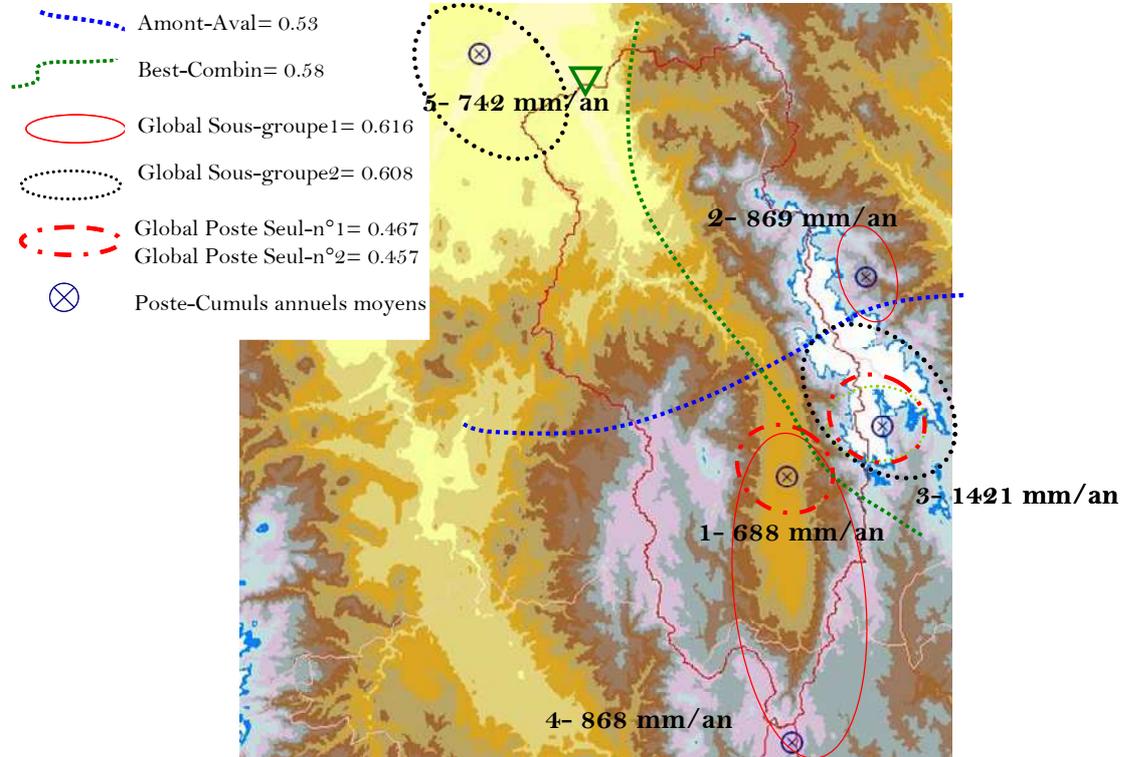
V4214010 La Drôme à Luc-en-Diois (Drôme) 190 Km² C2M-Q Initial=0.664



Exemple 3:

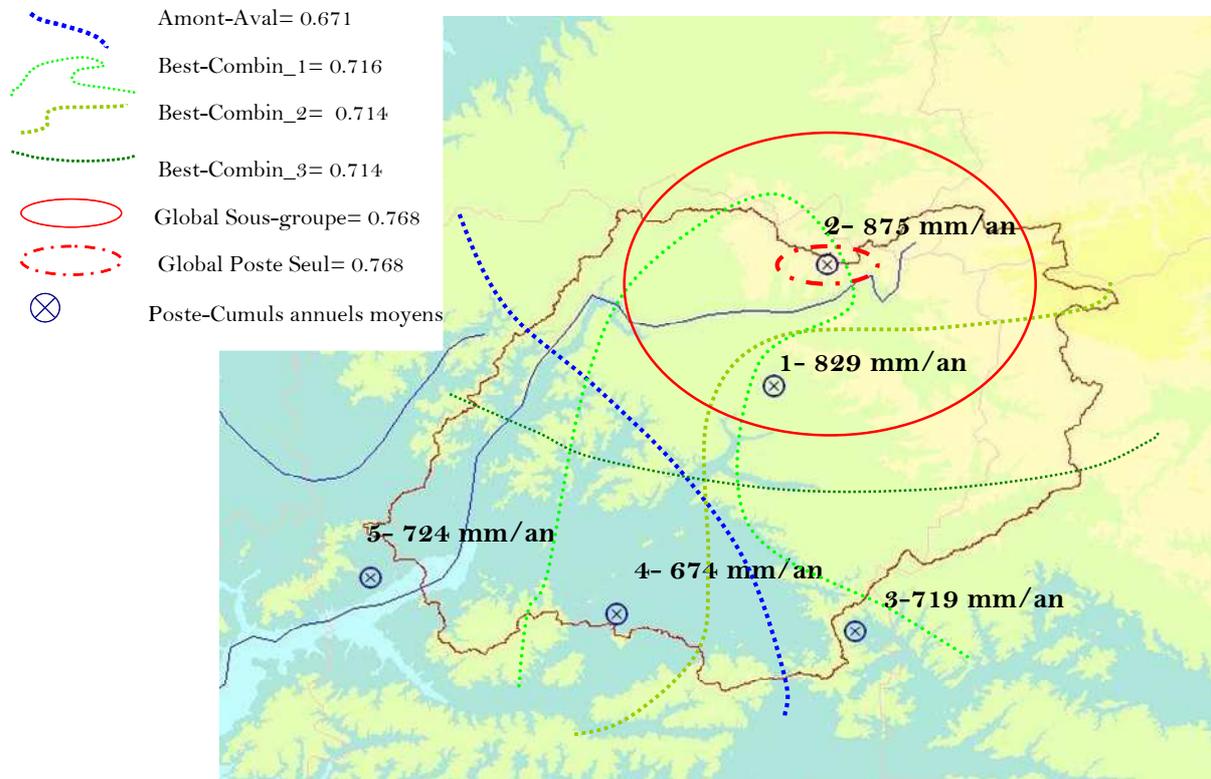
M1531610 Le Loir à à Durtal (Sarthe) 7900 Km² C2M-Q Initial=0.540



Exemple 4:**K2981910 Le Dore à Dorat (Puy-de-Dôme) 1500 Km²****C2M-Q Initial=0.564**

Exemple 5:

H7201010 L'Oise à Condren (Aisne) 3400 Km² C2M-Q Initial=0.705



Exemple 6:

K0253020 La Borne occidentale à Espaly-Saint-Marcel (Haute -Loire) 362 Km²

C2M-Q Initial=0.481

