



Mémoire pour l'obtention :
du diplôme d'ingénieur de l'ENGEES
et du DEA Mécanique et Ingénierie (option « Sciences de
l'eau »)

présenté par

Audrey ODDOS

**INTERET D'UNE APPROCHE SEMI-
DISTRIBUEE PAR RAPPORT A UNE
APPROCHE GLOBALE EN
MODELISATION PLUIE-DEBIT**

Maîtres de stage :

Vazken ANDREASSIAN

Claude MICHEL

Département Gestion des milieux aquatiques
Unité de recherche Qualité et fonctionnement hydrologique
des systèmes aquatiques
Groupement d'Antony
BP 44
92163 ANTONY cedex
Tél. 01.40.96.61.21 - Fax 01.40.96.61.99

Septembre 2002

Remerciements

Je remercie chaleureusement toute l'équipe hydrologie de m'avoir accueillie. Toute ma gratitude va à Vazken Andréassian et Claude Michel pour leur disponibilité, leur gentillesse et leurs précieux conseils. Deux mercis tous particuliers à Mamoutou Tangara et Jean-Louis Rosique qui ont toujours pris le temps de répondre à mes questions.

Résumé

INTERET DE L'APPROCHE SEMI-DISTRIBUEE PAR RAPPORT A L'APPROCHE GLOBALE EN MODELISATION PLUIE-DEBIT.

La disponibilité des données spatialisées permet d'appliquer les modèles pluie-débit conceptuels de manière semi-distribuée ce qui n'était pas le cas jusqu'à récemment, période durant laquelle l'approche globale a par défaut dominé. L'approche semi-distribuée est séduisante parce qu'elle se rapproche, beaucoup plus que l'approche globale, de notre vision du bassin versant c'est-à-dire un espace marqué par une forte hétérogénéité spatiale tant du point de vue de la topographie, de la végétation... Cependant toute complexification des modèles devrait être encore confirmée par les résultats ce qui n'est pas le cas, les publications hydrologiques se contredisant régulièrement. Une comparaison à une large échelle s'avère donc nécessaire pour définir les cas adaptés à chaque approche.

Les deux approches sont testées sur un large échantillon de 4500 bassins aux caractéristiques variées et obtenus en associant deux par deux des bassins appartenant à un échantillon de 307 bassins. Nous travaillons donc avec des bassins virtuels. Deux méthodes complémentaires sont ensuite utilisées pour expliquer les résultats :

- Des critères calculés sur la base des débits et des pluies, que l'on suppose expliquer les hétérogénéités entre sous bassins, sont reliés aux écarts de performances des deux approches.
- Les résultats de versions intermédiaires des modèles, pour lesquelles sont distribués soit les débits, soit les pluies, sont comparés aux résultats des approches globale et semi-distribuée.

Cette approche est testée sur un échantillon de quatre modèles conceptuels, ce qui confère aux conclusions de cette étude une certaine généralité. L'approche semi-distribuée s'avère bien capable d'améliorer les résultats de certains modèles conceptuels. Cependant l'approche globale demeure satisfaisante pour de nombreux bassins. Les écarts de performance peuvent être en partie reliés au coefficient de corrélation des pluies des sous bassins : proche de 1, les deux approches sont équivalentes, pour de plus faibles valeurs, l'approche semi-distribuée est supérieure mais le gain obtenu est variable. Les versions intermédiaires indiquent que c'est la distribution des pluies, plus que celle des paramètres du modèle, qui permet d'améliorer les résultats.

Abstract

COMPARISON OF SEMI-DISTRIBUTED VERSUS LUMPED APPROACH IN RAINFALL-RUNOFF MODELING

Because of the increased availability of data, conceptual models can be more and more used in a semi-distributed configuration, whereas to this day they were only used in a lumped way. Semi-distributed approach is attractive because it seems closer to the physics of runoff generation (characterized by a large heterogeneity in terms of topography, vegetation...) than the lumped approach. However using more complex models should be justified by an improvement of results which hasn't been confirmed yet by the conflicting results found in hydrological publications. So it has appeared necessary to compare the two approaches.

Lumped and semi-distributed approaches were compared over a wide sample of 4500 catchments which are described as virtual because they are obtained by grouping together two real basins among 307 ones. Two complementary methods were established to explain the results of the semi-distributed and lumped approach.

- Descriptive criteria were calculated on the basis of rainfall and runoff in order to characterize heterogeneity between sub basins and be linked to the gap between the results of the two approaches
- We compared the results of intermediate versions of models for which either the parameters or rainfall are distributed to those ones obtained with the lumped and semi-distributed approach.

We applied these methods with a sample of four conceptual models to obtain general conclusions. The semi-distributed approach obtains better results on the average than the global one, but there is a large variability within results. The differences between the two approaches could be linked to sub basins rainfall correlation coefficient : close to 1, the two approaches are equivalent whereas, for values inferior to 1, semi-distributed approach provides better flow reconstitution but with a variable gain. Intermediate approaches underline the fact that taking spatial variability of rainfall into account explains the bulk of the improved results of semi-distributed approach.

Table des matières

Résumé.....	4
Abstract.....	5
1. Introduction.....	10
2. Synthèse bibliographique.....	13
2.1 Des résultats variés	13
2.2 Différentes façons d'envisager l'approche semi-distribuée.....	20
2.3 Conclusion de la revue de la littérature	22
3. Régression pour une modélisation débit-débit.....	23
3.1 Présentation des bassins versants.....	23
3.2 Simulation du débit du bassin mixte des Avenelles	24
3.3 Simulation des débits du bassin mixte de Choqueuse.....	26
3.4 Conclusion et remarques	29
4. Présentation des données.....	31
5. Méthode	32
5.1 Choix des modèles	32
5.2 Bilan des travaux antérieurs au Cemagref.....	34
5.3 Constitution d'un large échantillon de bassins versants dits 'virtuels'	35
5.4 Des versions « intermédiaires » pour isoler les effets de la distribution des pluies et des paramètres du modèle	36
5.5 Conclusion.....	40
6. Des critères pour caractériser les hétérogénéités entre deux sous bassins.....	41
6.1 Critères caractérisant la pluviométrie	42
6.2 Critères caractérisant le comportement du bassin	48
6.3 Conclusion.....	52
7. Résultats	54
7.1 La (relative) supériorité de l'approche semi-distribuée.....	54
7.2 Recherche de critères explicatifs des différences entre les approches globale et semi-distribuée.....	57
7.3 Impacts respectifs de la spatialisation des pluies et des comportements hydrologiques	65
7.4 Ré-interprétation des résultats de Baudez (1997).....	68
8. Conclusion.....	71

Bibliographie	73
Annexe 1 : Description des modèles	76
Annexe 2 : Présentation des graphiques pour l'ensemble des critères	86
Annexe 3 : Impact de la spatialisation des pluies	91
Annexe 4 : Présentation des bassins versants.....	95

Table des figures

Figure 3.1 : Localisation et carte du bassin versant de recherche de l'Orgeval.....	24
Figure 3.2 : Dates des chroniques de débits disponibles pour les 4 bassins.....	24
Figure 3.3 : Hydrogramme (Avenelles) – Comparaison bassins purs/ bassin mixte.....	26
Figure 3.5 : Hydrogramme (Choqueuse) – Comparaison ‘agricole et forestier’/ ‘agricole’ en période d’étéages.....	28
Figure 3.6 : Hydrogramme (Choqueuse) – Comparaison ‘agricole’/ ‘forestier’.....	29
Figure 4.1 : Localisation des 307 stations hydrométriques	30
Figure 5.1 : Configuration des trois stations de jaugeage sur les bassins utilisés par Baudez.....	35
Figure 5.2 : Construction d’un bassin virtuel (C) à partir de deux bassins réels (A et B).....	36
Figure 5.3: Version globale	37
Figure 5.4 : Approche semi-distribuée vraie	37
Figure 5.5 : Version semi-distribuée limitée aux pluies	38
Figure 5.6 : Version semi-distribuée limitée aux comportements	39
Figure 5.7 : Version semi-distribuée résultant d’une dégradation de l’information.....	39
Figure 5.8 : Version semi-distribuée résultant d’un supplément d’information	40
Figure 7.2 : Comparaison des distributions des valeurs du critère de Nash obtenues avec les approches globale et semi-distribuée.....	55
Figure 7.3: Comparaison des distributions du critère de Nash pour les quatre modèles utilisé avec l’approche globale.....	56
Figure 7.4 : Modèle GR4J - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi- distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.....	58
Figure 7.5 : Modèle HBV - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi- distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.....	59
Figure 7.6 : Modèle IHAC - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi- distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.....	60
Figure 7.7 : Modèle TOPMO - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi- distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.....	61
Figure 7.8 : Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi-distribuée en fonction de la surface des sous bassins.....	65
Figure 7.9 : GR4J - Comparaison des contributions des pluies et des comportements à l’amélioration des résultats observée pour l’approche semi-distribuée.....	67
Figure 7.10 : GR4J - Evolution des résultats d’un modèle existant utilisé avec des données de pluies dégradées ou enrichies	68

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Résultats des régressions pour le bassin des Avenelles du 29/01/2000 au 04/11/2001	25
Tableau 3.2 : Résultats des régressions pour le bassin Choqueuse du 29/01/2000 au 28/12/2001	27
Tableau 6.1 : Liste des critères caractérisant les hétérogénéités entre deux sous bassins	42
Tableau 7.1 : Liste des critères caractérisant les hétérogénéités entre deux sous bassins	57
Tableau 7.2 : Récapitulatif des différentes versions du modèle	66
Tableau 7.3 : Comparaison des résultats pour quinze bassins versants considérés soit comme réels (Baudez), soit comme virtuels	69

1. Introduction

Objet d'une forte demande (consommation domestique, industrielle, agricole...) et soumise à des pollutions de toute sorte, l'eau est une ressource dont la gestion est complexe, les enjeux (politiques, économiques, environnementaux...) étant souvent conflictuels. Parmi les outils disponibles pour tenter d'utiliser au mieux cette ressource, les modèles pluie-débit, ont pour objectif de reproduire à l'échelle du bassin versant les débits des fleuves et rivières (dont la connaissance peut être nécessaire pour la construction d'un ouvrage hydraulique, l'approvisionnement en eau potable d'une ville...) à partir de la mesure ou de la simulation des pluies.

Se placer à l'échelle du bassin versant pose le problème de l'hétérogénéité spatiale, toujours présente au sein d'un tel système, cette hétérogénéité pouvant aussi bien caractériser les sols que la végétation, les pluies ou la topographie ... Un bassin versant n'est donc jamais homogène et les causes peuvent être multiples et même difficiles à appréhender : si elles se répètent d'un bassin à un autre, ce n'est jamais dans des conditions identiques notamment du point de vue des mécanismes de formation des débits. S'il est aisé de constater qu'un bassin versant est hétérogène, établir précisément l'impact de cette hétérogénéité sur son fonctionnement hydrologique l'est beaucoup moins.

Comment intégrer ces contraintes naturelles aux modèles qui sont censés être capables de reproduire l'ensemble de ces phénomènes ? Si pendant longtemps on n'a pas eu d'autres choix que de se contenter de travailler avec des valeurs moyennes considérées comme représentatives de la totalité du bassin versant (c'est la philosophie de l'approche globale), les moyens étant encore trop limités pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale, ce n'est plus le cas aujourd'hui du fait de la puissance des outils informatiques et de la disponibilité des données spatialisées (Système d'Information Géographique, Modèle Numérique de Terrain...). Il est donc en principe possible d'intégrer la notion d'hétérogénéité spatiale d'un bassin versant dans le cadre de la modélisation pluie débit. Il existe d'ailleurs différents modes d'agrégation de tels modèles que nous allons définir.

Commençons par l'approche globale. Elle consiste à envisager le bassin versant de façon globale c'est-à-dire que l'on considère qu'il est suffisamment bien décrit par des valeurs moyennes et qu'on ne désire pas prendre explicitement en compte la variabilité spatiale des variables d'entrée du modèle. Dans notre cas, cela se traduit de cette manière : même si l'on dispose de plusieurs mesures de pluie au même instant (pour le même jour en fait) sur notre bassin versant, on ne fournit au modèle qu'une valeur moyenne de pluie calculée à partir de l'ensemble de ces mesures. Ainsi, la totalité de l'information est prise en compte mais elle n'est exploitée que de façon globale. On applique donc le modèle une seule fois à la totalité du bassin versant et on obtient une unique chronique de débits pour ce même bassin.

Cette méthode peut sembler insuffisante lorsque le bassin versant présente une certaine hétérogénéité spatiale (au sein du bassin versant, selon la zone considérée, ce ne sont pas les mêmes mécanismes qui prédominent dans la formation des débits). Il peut alors sembler préférable découper le bassin versant en différents morceaux et d'appliquer à chacune de ces nouvelles unités

le modèle puis de reconstituer le débit du bassin à partir des débits obtenus pour chaque nouvelle zone. Il existe deux manières d'effectuer ce découpage. L'une d'elle est l'approche semi-distribuée qui consiste à subdiviser le bassin versant en zones ou sous bassins versants homogènes : dans ce cas on tient compte des divisions naturelles du bassin. La deuxième que l'on qualifie d'approche distribuée, et à laquelle nous ne nous intéresserons pas, ne s'appuie plus sur ces divisions naturelles et applique un maillage rectangulaire systématique à l'ensemble du bassin.

Ces nouvelles approches ne sont intéressantes d'un point de vue opérationnel que si elles se traduisent effectivement par une amélioration des résultats et pas seulement par la satisfaction de disposer d'un modèle soi-disant plus « conforme » à notre conceptualisation du bassin versant. Disposer de données supplémentaires ne peut être considérée comme étant une condition suffisante à l'amélioration des résultats, les résultats (ici les débits) étant le produit des interactions entre des données ET un modèle. Il faut donc s'assurer que l'ensemble de ces éléments parvient à répercuter l'augmentation de la quantité de données au niveau des résultats.

Le fait de choisir une approche semi-distribuée pose un autre problème : la grosse différence concernant les approches globale et semi-distribuée n'est plus vraiment le temps de calcul, qui est un peu supérieur pour l'approche semi-distribuée mais n'est plus rédhibitoire du fait de la puissance actuelle des ordinateurs, mais le coût des données de débits à acquérir afin de caler le modèle (paragraphe 5.1) ¹. En effet pour une approche globale on a seulement besoin de chroniques de débits à l'exutoire du bassin versant principal alors que pour une approche semi-distribuée on doit disposer de chroniques de débits à l'exutoire de chaque sous bassin ce qui, selon le nombre de sous bassins, peut considérablement augmenter la quantité de données à acquérir. Devoir disposer de plus de données implique que ce sont principalement les contraintes de l'hydrologie en contexte opérationnel qui motivent ce sujet, c'est-à-dire le cas où l'on a absolument besoin de résultats dans un temps et avec un budget donnés et que l'on ne travaille pas sur un bassin de recherche croulant sous les stations de jaugeage, les stations météorologiques, les pluviomètres... Notons qu'en conditions opérationnelles, le coût s'accroît encore très souvent en raison de la nécessité de transmission des données en temps réel pour la mise à jour du modèle. Dans ce type d'études, il est donc primordial de savoir si le coût supplémentaire d'acquisition des données, entraîné par la mise en place d'une approche tenant compte de la variabilité spatiale du bassin (dite approche distribuée ou semi-distribuée), est justifié par une amélioration réelle des résultats dans l'état actuel de fiabilité des mesures et des modèles.

Au problème de la quantité des données s'ajoute l'absence de règles garantissant une modélisation (semi) distribuée satisfaisante. Car s'il existe de multiples façons de prendre en compte l'hétérogénéité spatiale d'un bassin avec un modèle, celles-ci sont-elles toutes équivalentes ? En pratique, de nombreuses questions apparaissent : quelle taille de maille choisir, sachant que plus la maille est petite plus la modélisation sera gourmande en temps de calcul mais surtout que sont rarement disponibles toutes les données pour des mailles très fines. Sur quels critères se baser pour effectuer le découpage du bassin : la pédologie, les pluies, la végétation... ? Comment valider le modèle à l'échelle de la maille ? Le plus souvent ces choix restent très intuitifs.

Nous nous proposons donc de comparer l'intérêt de l'approche semi-distribuée par rapport à l'approche globale dans le cadre de la modélisation pluie débit. Cette question ayant déjà été en partie abordée sous un angle différent par d'autres auteurs, il est indispensable de faire le bilan de

¹ En première approximation, on peut souligner que les deux approches ont besoin d'autant de données de pluie.

ces publications et ceci occupera tout notre chapitre 2. Par la suite, on se familiarisera avec ces notions d'approche globale et semi-distribuée à l'aide d'un exemple de modélisation débit-débit. Sans prétendre apporter une réponse, ce chapitre 3 permet déjà d'évaluer quels peuvent être les écarts entre ces deux approches. Ce n'est donc qu'avec les chapitres 4 et 5, présentation des données et de la méthode, que nous passerons à une vision plus large du problème. Notre souci est en effet d'apporter des éléments de réponse en se basant sur l'observation de nombreux bassins ce qui nous impose de construire une méthode adaptée. Le chapitre 6 concerne quant à lui la présentation d'une liste de critères construits avec l'objectif de pouvoir ensuite servir d'outils permettant d'expliquer les résultats obtenus et présentés au chapitre 7.

2. Synthèse bibliographique

Quelques travaux se sont attachés à comparer les approches (semi) distribuée et globale, que cela soit l'objectif principal de la publication ou simplement une étude complémentaire. Selon les articles les auteurs ne distribuent pas forcément de la même manière leurs bassins versants : rappelons que s'ils choisissent une approche semi-distribuée ils découpent le bassin versant en sous bassins versants ou en zones homogènes, alors que s'ils optent pour une approche distribuée cela signifie en fait qu'ils appliquent au bassin versant un maillage régulier.

En général on ne peut choisir l'approche (semi) distribuée que si l'on dispose au départ de données en quantité suffisante : parfois en dépit de l'hétérogénéité du bassin, les données ne laissent d'autres choix que de travailler avec un modèle global (Gárfias et al., 1996).

2.1 Des résultats variés

Il est frappant à la lecture des publications hydrologiques de constater que les avis divergent considérablement alors même qu'ils tentent de répondre à cette même question: évaluer si l'effort consenti pour mettre en place l'approche (semi) distribuée aboutit réellement à une amélioration des résultats du modèle. En fait cette divergence d'opinions ne semble due qu'à la méthode choisie par les auteurs. Mais voici d'abord un rapide passage en revue des résultats présentés par ces diverses publications.

2.1.1 Des résultats favorables à l'approche (semi) distribuée

Il existe un certain nombre de publications affirmant clairement le bénéfice que l'on peut avoir à utiliser l'approche (semi) distribuée.

➤ Michaud et Sorooshian (1994) :

Les auteurs comparent trois approches de modélisation pluie-débit dans le cas du bassin versant expérimental semi-aride de Walnut Gulch (150 km²) avec KINEROS qui est un modèle distribué complexe (développé pour les régions semi-arides) et le modèle du Soil Conservation Service (SCS), un modèle plus simple, utilisé à la fois dans ses versions globale et distribuée. Le modèle global SCS n'obtient que des résultats très médiocres face aux modèles distribués (donc face à la version distribuée de SCS), et ceci surtout en l'absence d'un calage préalable du modèle : pour des bassins versants non jaugés les paramètres du modèle ne sont pas déterminés par un calage mais seulement à partir de méthodes permettant de les évaluer. Pour expliquer ces très mauvais résultats les auteurs fournissent l'explication suivante : *« les piètres performances du modèle global ne sont pas surprenantes puisque l'approche globale ne tient pas compte des variations spatiales de la pluie et des débits qui sont considérables pour ce type d'environnement »*.

➤ Corral et al. (2000) :

Ce sont TOPMODEL et le modèle SCS qui sont choisis pour comparer les approches semi-distribuée et globale dans le cas d'un bassin versant méditerranéen de 48 km² caractérisé par la grande variabilité spatiale et temporelle de ses événements pluvieux. Trois versions sont testées : TOPMODEL global, TOPMODEL distribué et SCS global. La différence entre TOPMODEL «global» et TOPMODEL «distribué» concerne la prise en compte de variabilité spatiale de la pluie. Le modèle SCS est utilisé suivant une approche globale c'est-à-dire que, comme pour TOPMODEL «global», la pluie est considérée comme uniforme sur le bassin versant. C'est lors de la validation des trois modèles que la version distribuée de TOPMODEL se révèle être la plus satisfaisante.

➤ Kite et Kouwen (1992) :

Le modèle global, SLURP, utilisé dans une version semi-distribuée sur un bassin versant canadien de 7129 km², permet d'obtenir de meilleurs résultats qu'une simple approche globale avec le même modèle. Le bassin est semi-distribué en GRU (Grouped Response Unit) de la manière suivante : il est divisé en trois sous bassins versants, eux-mêmes divisés en trois classes d'occupation des sols. Lors de cette modélisation un jeu différent de paramètres est attribué à chaque classe d'occupation des sols.

➤ Krysanova et al. (1999) :

Les auteurs tentent de répondre aux deux problèmes suivants : vérifier si le modèle HBV est performant sur des bassins versants de très grande surface et comparer les résultats des différentes versions du modèle et la quantité de données nécessaire aux approches globale et semi-distribuée.

HBV-D appliqué à 44 sous bassins versants obtient un meilleur critère de Nash que Nordic HBV appliqué au même bassin versant (environ 96000 km²) mais en version globale. Les hydrogrammes calculés diffèrent notamment lors des périodes caractérisées par de faibles débits. Les auteurs concluent que « *les versions distribuées du modèle nécessitent plus de données mais fournissent de meilleurs résultats* » et indiquent qu'une explication pourrait être une meilleure représentation spatiale des sols, de la topographie, de la teneur en eau et des pluies... sans pour autant hiérarchiser ces informations.

➤ Boyle et al. (2001) :

Le Sacramento Soil Moisture Accounting Model n'échappe pas à la règle puisque que différentes versions de l'approche semi-distribuée sont évaluées en distribuant successivement les quatre variables suivantes pour un bassin versant de 1227 km² : les précipitations, l'humidité du sol et la fonction de routage, les paramètres du modèle relatifs aux propriétés des sols. La méthode consiste à comparer cinq cas :

- Cas1 : l'approche globale s'applique aux quatre variables ;
- Cas 2 : l'approche semi-distribuée s'applique aux précipitations et à l'humidité du sol tandis que l'approche globale s'applique à la fonction de

routage et aux 5 paramètres (parmi les 13 du modèle global) relatifs aux propriétés des sols.

- Cas 3 : l'approche semi-distribuée s'applique aux précipitations, à l'humidité du sol et à la fonction de routage tandis que l'approche globale s'applique aux 5 paramètres.
- Cas 4 : l'approche globale s'applique aux précipitations et aux paramètres tandis que l'approche semi-distribuée s'applique à l'humidité du sol et à la fonction de routage.
- Cas 5 : toutes les variables sont semi-distribuées.

Les conclusions sont les suivantes : l'approche semi-distribuée est supérieure à l'approche globale et les quatre variables précédentes ne sont pas toutes équivalentes. Mieux vaut s'attacher à la distribution spatiale des précipitations, de l'humidité du sol et la fonction de routage. Distribuer les paramètres censés représenter les propriétés de sols n'a que très peu d'intérêt. La topographie, qui est déterminante pour la fonction de routage, semble donc plus importante que les propriétés des sols pour ce modèle pluie débit.

2.1.2 Des résultats favorables à l'approche globale

Les articles suivants présentent des conclusions allant en sens inverse des articles précédents.

➤ Kokkonen et al. (2001) :

L'étude s'effectue sur un petit bassin versant forestier finlandais de 0,18 km² dont 30% des précipitations tombent sous forme de neige. Une modélisation des débits est effectuée avec une approche semi-distribuée essentiellement basée sur la topographie du bassin. Les résultats sont d'abord comparés à ceux obtenus avec le modèle global IHACRES et qui s'avèrent être légèrement moins bons. Puis les auteurs cherchent à évaluer la sensibilité du modèle face aux quatre profils, qui permettent de transformer les précipitations et la neige en débit avant la fonction de routage, utilisés pour l'approche distribuée : ils ne constatent pas de différences significatives pour les volumes cumulés, seule la variabilité temporelle des débits semble être affectée par la topographie.

Pour les auteurs, s'il ne s'agit que d'obtenir des valeurs de débits, l'approche globale est suffisante pour ce petit bassin versant, l'approche distribuée ne fournissant pas une véritable amélioration des résultats.

➤ Diermanse (1999) :

Dans le cas du bassin versant belge étudié (114 km²), tenir compte de la variabilité spatiale des pluies ou de la topographie n'améliore pas les résultats. La méthode choisie consiste à subdiviser le bassin en n sous bassins versants, n allant de 1 à 25. L'auteur observe qu'une augmentation de n ne se traduit pas par une diminution de l'erreur sur les débits et ceci à la fois pour les pluies et la topographie : « *Toutes les erreurs au carré moyennes (ECM) sont du même ordre de grandeur ce qui montre que les effets de l'hétérogénéité spatiale sont négligeables. En outre nous observons qu'il n'existe pas de décroissance nette des ECM quand n augmente ce*

qui signifie que, du fait des erreurs de mesures et de modélisation, il n'est pas certain que l'ajout de plus d'informations concernant les caractéristiques du système conduise automatiquement à une amélioration des résultats du modèle ».

2.1.3 Des résultats mixtes

Cette troisième partie regroupe des publications qui ne relèvent pas de différences significatives entre les deux approches.

➤ Robinson et Sivapalan (1995) :

Il s'agit d'obtenir, à partir d'un modèle distribué, un modèle global à base physique qui ne sera basé que sur la distribution de la topographie, trois paramètres de similarité, la profondeur moyenne de la nappe et le volume cumulé infiltré, c'est-à-dire moins d'informations que le modèle distribué. Les performances des modèles sont comparées à l'aide de deux événements pluvieux sur deux petits (0,38 et 0,41 km²) bassins versants agricoles à l'est de la wheat belt australienne : les performances du modèle global sont presque aussi bonnes que celles du modèle distribué plus complexe.

➤ Refsgaard et Knudsen (1996) :

L'objectif est d'évaluer les performances de trois modèles en se basant sur la procédure hiérarchique de Klemes et ceci pour trois bassins versants du Zimbabwe (1090 km², 254 km², 1040 km²). Les modèles concernés sont NAM, un modèle conceptuel global, MIKE SHE, un modèle distribué à base physique, et une approche intermédiaire WATBAL. WATBAL est qualifié d'intermédiaire car il est à la fois fondé sur «*une description distribuée à base physique des phénomènes de surface affectant la teneur en eau du sol (interception, infiltration, évapotranspiration, percolation) et sur une approche globale conceptuelle pour les écoulements hypodermiques* ».

Pour le test où les modèles sont calés et validés sur le même bassin les performances sont comparables pour les trois modèles. Tant que les données sont disponibles NAM est donc suffisant : mais si les modèles sont calés sur un bassin mais validés sur un autre les résultats de NAM sont moins fiables que pour les deux modèles distribués. Les performances de NAM s'améliorent significativement en autorisant une année de calage sur le second bassin versant. Les performances des modèles sont à nouveau similaires en calant et validant sur un même bassin versant mais dans des conditions météorologiques différentes.

Le bilan semblerait donc être le suivant : pour un bassin versant non jaugé un modèle distribué semble plus performant alors que sur un bassin versant jaugé (que les conditions météorologiques soient différentes ou non) un modèle global est suffisant.

➤ Moglen (2000) et Grove et al. (1998) :

Pour les modèles se basant sur la notion de curve number (CN), les différentes méthodes utilisées pour prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques du bassin (topographie, occupation du sol, type de sol) introduisent un biais systématique au niveau des résultats obtenus. Une distribution simple consistant à appliquer le modèle à chaque zone fournit des débits toujours supérieurs à ceux fournis par l'approche globale. Un autre modèle distribué, celui-ci tenant compte

en plus de l'organisation de cette variabilité spatiale, donne des débits inférieurs à ceux calculés avec l'approche globale. Rajouter à cette dernière méthode une contrainte sur les possibilités d'infiltration plus à l'aval de la pluie ne conduit qu'à obtenir des résultats similaires à ceux de l'approche globale initiale (Moglen, 2000).

Une étude similaire (en partie sur le bassin versant de Little Eagle Creek de 70,5 km² dans l'Indiana) montre que les débits fournis par l'approche distribuée s'écartent d'autant plus de ceux calculés par l'approche globale que la gamme de variation des CN est large et que les CN sont faibles, que les précipitations sont peu importantes, que l'urbanisation du bassin versant augmente et conclut donc qu'il est préférable d'utiliser l'approche distribuée pour éviter les erreurs dues à l'approche globale (Grove et al., 1998).

➤ Baudez (1997) :

Approches semi-distribuée et globale sont comparées en triant les bassins versants selon deux classements indépendants. Les bassins sont d'abord triés selon les performances des approches globale et semi-distribuée. Le deuxième classement, effectué indépendamment du premier, quantifie l'hétérogénéité qui peut exister entre les deux sous bassins versants constitutifs du bassin versant lorsque est appliquée l'approche semi-distribuée, en se basant sur la topographie, la densité de drainage, le couvert végétal, la pédologie et la géologie. La conclusion est qu'il n'existe pas de lien entre ces deux classements, le choix des caractéristiques physiques permettant d'opter pour l'une ou l'autre des approches semble donc être plus complexe que prévu. Nous reparlerons plus tard de cette étude car c'est à partir de ces résultats qu'a été déterminé notre sujet.

➤ Morvan (2000) :

Il s'agit de comparer l'approche distribuée, représentée ici par le modèle MODCOU, avec l'approche globale représentée par le modèle GR4J. La comparaison est effectuée sur 30 sous bassins versants du Rhône, à la fois pour des bassins versants jaugés et pour des bassins versants non jaugés. Pour les bassins versants jaugés, puisque des mesures de débits sont disponibles, il est possible de caler les paramètres de GR4J alors que pour les bassins versants non jaugés il faut simplement se contenter d'une estimation des paramètres. Ceci montre que, en réalité, trois modèles sont utilisés : MODCOU, GR4J avec calage et GR4J sans calage. Ceci affecte les conclusions de la manière suivante : les résultats obtenus sont nettement favorables à GR4J pour un bassin versant jaugé tandis qu'il vaut mieux privilégier MODCOU dans le cas d'un bassin versant non jaugé. La tentative de régionalisation des paramètres de GR4J, censée améliorer les performances du modèle utilisé sans calage, n'a pas fourni les résultats escomptés : il n'a pas été possible de mettre en évidence un lien entre les paramètres du modèle et la géologie, la pédologie, le couvert végétal ou le rapport pluie/ évapotranspiration potentielle.

Certains modèles nécessitent plus de données en entrée que les simples données de pluie d'où l'intérêt de savoir quelles données sont intéressantes à distribuer et quelles données sont suffisamment bien représentées par une valeur moyenne.

Les deux publications suivantes montrent que dans certains cas il peut exister des « seuils » à partir desquels une modélisation distribuée (ou semi-distribuée) n'est plus nécessaire. Ceci peut être

le cas par exemple pour la teneur en eau dans le cas de bassins versants majoritairement soumis à des phénomènes de ruissellement hortonien.

➤ Merz et Plate (1997) :

Pour un bassin versant allemand de 6,3 km² les auteurs tentent d'évaluer les effets de la variabilité spatiale de la teneur en eau et des propriétés hydrauliques des sols sur les débits et arrivent à la conclusion que prendre en compte ou non la variabilité spatiale de la teneur en eau initiale du sol, pour les modèles incluant cette notion en tant que variable explicite, ne dépend en fait que des caractéristiques de l'événement pluvieux pour un bassin versant où le ruissellement hortonien domine.

Sont comparées deux configurations du modèle : la première impose une version distribuée de la teneur en eau initiale, la seconde suppose que cette même teneur en eau est homogène sur l'ensemble du bassin versant. Les pluies utilisées sont des pluies artificielles générées de telle façon qu'elles aient toutes la même distribution temporelle mais des intensités croissantes. Pour le bassin versant étudié il est possible de différencier deux comportements du modèle. Pour des pluies de faible intensité et pour des pluies de forte intensité (l'ensemble du bassin est concerné par le ruissellement hortonien) les résultats sont similaires. La différence entre les deux approches ne devient visible qu'à partir du moment où la capacité d'infiltration du sol et l'intensité de pluie sont proches, le comportement du bassin étant beaucoup plus hétérogène.

Cette étude permet donc aux auteurs de conclure que, pour le bassin versant étudié et les événements dont la période de retour est supérieure à 10 ans, il n'est plus nécessaire d'envisager une distribution spatiale de cette variable.

➤ Brath et Montanari (2000) :

L'étude porte sur un bassin versant italien de 1294 km² pour lequel est vérifié l'impact de la variabilité spatiale des paramètres concernant l'infiltration du sol. La conclusion est similaire à celle de l'article précédent : quand il s'agit de simuler des crues sur un bassin où le ruissellement hortonien domine, le rôle de la variabilité spatiale de la capacité d'infiltration du sol diminue puisque, lors de ces événements, la capacité d'infiltration du sol est dépassée sur l'ensemble du bassin.

Ces deux publications indiquent que finalement aucune des deux approches ne prend réellement le pas sur l'autre mais que, selon les cas, il est plus judicieux d'utiliser l'une ou l'autre, le choix se faisant à partir des caractéristiques de l'événement pluvieux.

➤ Pauwels et al., (2001) :

Dans certains cas ce n'est pas tellement l'approche distribuée qui est intrinsèquement plus performante que l'approche globale mais c'est plutôt la construction même du modèle qui crée une différence entre les deux approches.

Le modèle utilisé est un peu particulier, il s'agit de TOPLATS (TOPMODEL based Land-Atmosphere Transfer Scheme), dont la version initiale fournit de meilleurs résultats pour l'approche distribuée que pour l'approche globale. Cette version est modifiée par l'ajout d'une mise à jour des données d'humidité du sol par une méthode de correction statistique et testée sur un bassin versant belge de 11,3 km². En comparant les résultats des deux approches, globale et distribuée, la conclusion est que, s'il ne s'agit que de prévoir les débits, l'approche globale est tout à fait

satisfaisante puisque, une fois cette méthode de mise à jour incorporée au modèle, les performances des deux approches sont tout à fait similaires.

2.1.4 Discussion

Ces résultats indiquent que l'approche distribuée n'est pas forcément toujours la solution la plus intéressante. Tout dépend des cas étudiés et des modèles choisis. En effet le problème dans ces différentes études est que les auteurs ne s'intéressent qu'à un voir deux bassins versants ou bien comparent les approches globale et (semi) distribuée à partir de modèles possédant des structures très différentes. Nous discutons à présent les limites identifiées pour chacune des méthodes.

2.1.4.1 Le nombre de bassins versants étudiés

Il est impossible, en travaillant sur un unique bassin versant, de pouvoir affirmer que l'approche distribuée est invariablement supérieure à l'approche globale ou l'inverse sachant que les résultats peuvent aussi dépendre de la spécificité même des caractéristiques du bassin versant. On imagine assez bien que pour un bassin versant très hétérogène (pluies et sols) les besoins ne sont pas semblables à ceux d'un bassin versant dont les caractéristiques sont plutôt homogènes.

2.1.4.2 Les modèles

L'autre remarque concerne l'utilisation de modèles très différents, certains sensés représenter l'approche distribuée et d'autres l'approche globale. Là encore il est difficile de démêler les effets des approches distribuée et globale et ceux dus aux différentes structures proposées par les modèles. Car si les modèles cherchent tous à représenter de la manière la plus efficace possible le fonctionnement d'un bassin versant les hypothèses envisagées pour parvenir à ce résultat sont très variées et plus ou moins réussies. Les modèles n'étant donc pas équivalents, il est difficile de pouvoir comparer les résultats obtenus.

L'article de Corral et al (2000) fait d'ailleurs état de ce problème. TOPMODEL semblerait plus apte à reproduire les décrues alors que le point fort du modèle SCS serait plutôt la reproduction des débits de pointe, et ceci indépendamment des approches globale et distribuée qu'il est donc plus difficile de comparer.

2.1.5 Bilan de ces différentes publications

L'approche (semi) distribuée n'est donc pas systématiquement synonyme d'améliorations significatives des résultats, le bénéfice apportée par cette approche dépendant vraisemblablement beaucoup des caractéristiques propres aux bassins versants et aux événements pluvieux. De plus il est délicat de justifier la mise en œuvre d'une approche (semi) distribuée sans l'aide d'une comparaison avec une approche globale effectuée dans les mêmes conditions puisque les raisons pouvant permettre d'anticiper une amélioration des résultats sont encore mal connues. Ceci nous amène à la sélection des variables sur lesquelles s'effectue la distribution du bassin versant : certaines publications montrent que celles ci ne présentent pas toutes le même intérêt. Cependant il existe quelques variables récurrentes que nous allons essayer de détailler dans le paragraphe suivant.

2.2 Différentes façons d'envisager l'approche semi-distribuée

Voyons quelles sont les différentes variables pouvant justifier le plus fréquemment une modélisation semi-distribuée.

2.2.1 Caractéristiques physiques du bassin versant

Les bassins versants sont souvent subdivisés selon la topographie, la géologie, la végétation, les propriétés des sols comme semble l'indiquer l'ensemble des publications précédemment citées. Kite et Kouwen (1992) se basent sur l'occupation des sols et regroupent les zones similaires en GRU (Grouped Response Units) : les différents types d'occupation des sols pouvant être observés au sein de chaque sous bassin versant, il s'agit de regrouper ces zones discontinues en GRU et de calculer pour chacune d'entre elles un jeu de paramètres. Kokkonen et al. (2001) utilisent une approche semi-distribuée basée sur la topographie et suggèrent de prendre aussi en compte pour de plus grands versants l'occupation des sols ce qui pourrait permettre d'évaluer l'impact des activités humaines. Pour les différentes versions de HBV ce sont l'altitude et la végétation qui sont prises en compte (Krysanova et al., 1999). WATBAL est divisé en HRU (hydrological response units) selon des considérations de zones météorologiques et des catégories de sols et de végétation (Refsgaard et Knudsen, 1996).

2.2.2 Variabilité spatiale des pluies

Lors d'un événement pluvieux l'intensité de la pluie est rarement uniforme sur l'ensemble du bassin versant. Si la prise en compte de la distribution temporelle des pluies est depuis longtemps acquise au sein des modèles pluie débit, ce n'est pas le cas de la variabilité spatiale. C'est un point non négligeable les pluies étant les entrées principales d'un modèle conceptuel pluie-débit.

Deux questions méritent d'être posées. La première concerne le nombre de pluviomètres dont il faut disposer pour convenablement mesurer la variabilité spatiale de la pluie. Même pour des bassins versants de petite surface il n'est pas possible de se contenter d'un unique pluviomètre (Faurès et al., 1995; Goodrich et al., 1995; Wilson et al., 1979; Dawdy et Bergmann, 1969). Quelque soit l'approche envisagée, distribuée ou globale, il est primordial de prendre en compte (explicitement ou implicitement) la variabilité spatiale de la pluie. Bien évidemment si l'on dispose de peu de données il est normal de choisir une approche globale mais même en optant pour ce type d'approche, les résultats de la modélisation seront d'autant plus précis que l'on a une bonne connaissance de la pluie. Prenons l'exemple des trois modèles suivants utilisés avec une approche globale et avec des données de pluies de différente qualité : « IHACRES, GR3J et TOPMODEL ont la capacité de traduire une amélioration de la précision des données de pluies à la fois par un accroissement de leurs performances et par la réduction de la variabilité de ces performances » (Andréassian et al., 2001).

La seconde question, encore largement débattue, concerne la manière dont le modèle doit intégrer cette variabilité spatiale. Suffit-il de rentrer une valeur moyenne ou a-t-on intérêt à attribuer une valeur à chaque zone « homogène » du bassin versant ?

Beven et Hornberger (1982) montrent, que dans le cas d'un bassin versant relativement homogène, ne pas tenir compte de la répartition spatiale des pluies peut être satisfaisant. Toutefois

cette répartition spatiale a tout de même un impact sur la variabilité temporelle de l'hydrogramme et n'affecte que dans une moindre mesure pour le débit de pointe et les volumes écoulés.

Shah et al. (1996) comparent les résultats fournis par le modèle SHE pour une pluie générée artificiellement et pour les cas suivants :

- Le bassin versant est divisé en 169 cases et à chaque case est attribuée une valeur de pluie.
- Le bassin est divisé en quatre sous bassins versants et à chaque sous bassin est attribuée une valeur de pluie.
- Une unique valeur de pluie est attribuée à l'ensemble du bassin versant.

Pour le bassin étudié et dans le cas où peut être qualifiée « d'humide » la teneur en eau du sol, le deuxième et le troisième scénario fournissent des résultats similaires à ceux du premier pourvu que soit au moins disponible un pluviomètre pour une surface de 10,55 km². Les écarts augmentent en conditions « sèches ».

Ces résultats sont comparés à ceux obtenus pour une fonction de transfert c'est-à-dire un modèle global très simple, beaucoup plus simple que le très complexe modèle SHE. De la même façon les résultats sont relativement similaires pour un sol humide ce qui n'est plus le cas pour un sol sec : la réponse du bassin versant devient non-linéaire ce qui pénalise la fonction de transfert.

Arnaud et al. (2002) : pour quatre bassins versants (dont trois fictifs car homothétiques au premier) les auteurs comparent les résultats obtenus quand ils appliquent soit une pluie moyenne, soit un champ de pluie distribué. Les résultats indiquent entre autres une influence de la taille du bassin versant et de la période de retour de l'événement pluvieux : les écarts entre les deux approches sont plus importants pour de grands que de petits bassins mais diminuent pour des événements de fréquence rare.

De plus, pour ce cas particulier et ces hypothèses, il a été possible de trouver une relation entre l'erreur relative sur les volumes calculés par les deux méthodes et un coefficient de variation (il compare les écarts entre la pluie cumulée et les pluies mesurées à chaque pluviomètre) mais cette relation n'est valable que pour les pluies mesurées. En effet deux types de pluies sont utilisées : les pluies mesurées et une pluie générée artificiellement et caractérisée par une variabilité spatiale plus importante que les pluies réelles et pour laquelle il est nécessaire d'introduire dans la relation la valeur de la pluie cumulée.

Finalement, les auteurs concluent que pour simuler une crue il est suffisant d'utiliser une pluie moyenne au lieu de la totalité du champ de pluie : l'influence de la variabilité spatiale des pluies n'est que modérée pour les événements rares.

2.2.3 Finesse de la distribution

Après avoir choisi quels critères vont être distribués il est nécessaire de déterminer quelle sera la taille appropriée des sous bassins versants ou zones homogènes lors du découpage du bassin versant car diminuer la taille de ces nouvelles unités ne se traduit pas toujours par une amélioration des résultats.

➤ Becker et Braun (1999) :

Les auteurs modélisent les flux verticaux et latéraux en prenant en compte l'hétérogénéité présente au sein des bassins versants étudiés. Concernant les flux verticaux le bassin versant est tout d'abord découpé en 4540 unités supposées homogènes du point de vue de l'occupation du sol, de la végétation, du type de sol et de la pente. Elles sont ensuite regroupées en neuf nouvelles unités et le critère de Nash est d'abord calculé pour une modélisation semi-distribuée basée sur ces neuf unités. Puis une par une les unités se confondent avec une autre unité jusqu'à obtenir un modèle global. Alors que jusqu'à quatre unités le critère de Nash garde une valeur stable, à partir de trois il chute : si certaines unités étaient trop petites pour avoir un réel impact ce n'est plus le cas de la forêt, des zones cultivées et des zones urbanisées.

➤ Boyle et al. (2001) :

Sur un bassin versant de 1227 km² modélisé avec le Sacramento Soil Moisture Accounting Model. Les auteurs comparent les résultats obtenus selon que le bassin versant initial est subdivisé en huit ou trois sous bassins versants et constatent que cela ne modifie en rien les performances du modèle.

2.2.4 Bilan de ces différentes publications

Les modalités de mise en œuvre d'une approche (semi) distribuée sont donc très variées et leur efficacité peu remise en cause. Tous ces critères présentent un intérêt certain dans la description des phénomènes expliquant la formation des débits au sein d'un bassin, mais en est-il de même pour le fonctionnement des modèles pluie-débit ?

2.3 Conclusion de la revue de la littérature

L'ensemble des publications hydrologiques donne une image relativement complexe de la modélisation semi-distribuée : la comparaison des deux approches aboutit à des résultats différents et ceci pour des modèles différents, des bassins différents et de critères de découpage du bassin différents, ce qui rend d'autant plus incommode l'interprétation des résultats. Tous ces facteurs influent probablement sur les résultats sans qu'il soit possible de déterminer lesquels et de quelle manière ont permis l'amélioration des résultats. De plus il existe des cas où l'approche globale reste suffisante. Mais de nouveau il est ardu de prévoir ces résultats sans comparer les deux approches. Evaluer jusqu'à quel degré de détail doivent prétendre les modèles est une question qui concerne non seulement les modèles pluie débit mais aussi les modèles représentant le fonctionnement des écosystèmes. Là aussi se pose le problème du choix entre une approche globale ou une approche plus fractionnée des processus puisqu'il n'existe pas non plus une structure claire permettant d'apprécier les avantages et les inconvénients des deux approches : « *Bien que certains modélisateurs aient plutôt l'habitude de 'globaliser' ou de 'fractionner', il n'existe pas de critère largement accepté permettant de décider du niveau de détail à inclure dans tel modèle traitant de tel problème* ». (Muetzelfeldt et Yanai, 1996)

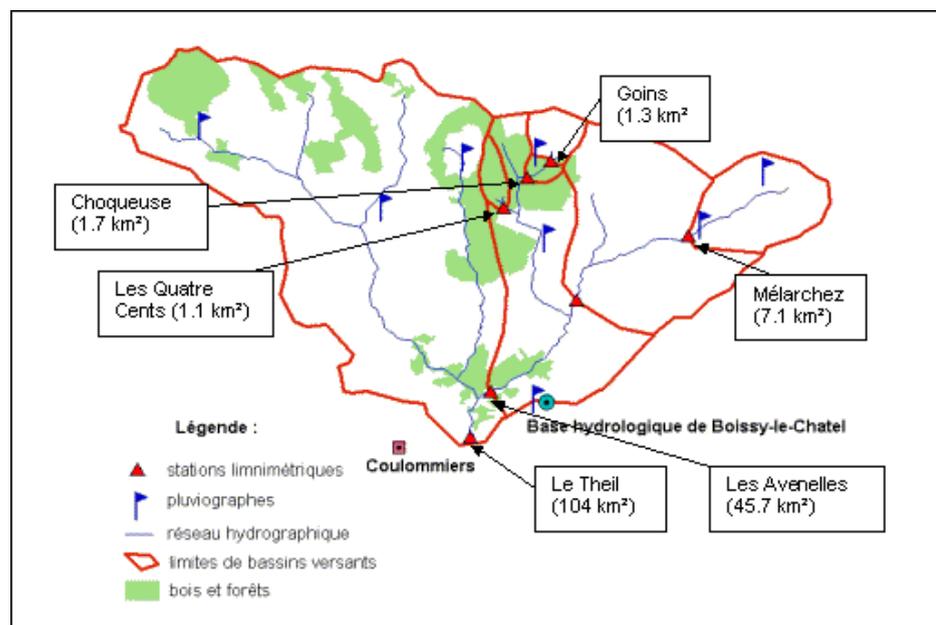
3. Régression pour une modélisation débit-débit

Avant de véritablement nous intéresser à la modélisation pluie-débit nous allons d'abord aborder le sujet sous l'angle de la modélisation débit-débit. Ce type de modélisation consiste à calculer les débits à l'exutoire d'un bassin versant donné à partir des débits mesurés aux exutoires d'autres bassins. Les entrées du modèle ne sont donc plus des pluies mais des débits. Nous nous contenterons ici d'un modèle très simple puisque les calculs seront effectués à l'aide d'une régression linéaire.

3.1 Présentation des bassins versants

Nous nous intéressons à quatre sous bassins du bassin versant de l'Orgeval. Le bassin versant de recherche de l'Orgeval est situé en région parisienne sur le plateau de Brie et est drainé par la rivière Orgeval, un affluent direct du Grand Morin. Le grand Morin est lui-même un affluent de la Marne. Voici une courte description de nos quatre sous bassins :

- Goins est un bassin agricole de 1,3 km², fortement anthropisé (drainé à 80% par des tuyaux enterrés). Le débit à son exutoire est noté Q_{agric} .
- Quatre cents est un bassin de 1.1 km², entièrement forestier et non drainé. (Q_{forest})
- Choqueuse, d'une surface de 1,7 km² comprend le sous-bassin de Goins plus un complément entièrement forestier (non drainé) de 0,4 km². ($Q_{\text{choq.}}$)
- les Avenelles : ce bassin versant de 45,7 km² englobe les trois bassins précédents et est lui-même inclus dans le bassin de l'Orgeval. ($Q_{\text{aven.}}$)



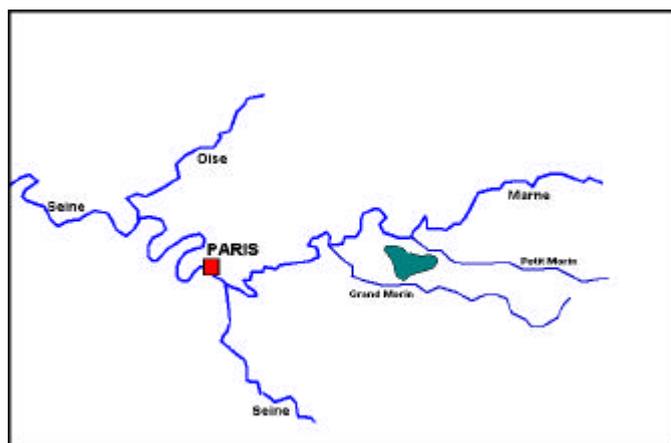


Figure 3.1 : Localisation et carte du bassin versant de recherche de l'Orgeval.

Goins et Quatre cents peuvent être qualifiés de sous bassins versants «purs», l'un étant agricole, l'autre forestier, et Choqueuse et les Avenelles de sous bassins versants «mixtes» parce qu'ils comprennent à la fois des zones agricoles et forestières.

Nous comparons différentes approches de modélisation débit-débit : pour reproduire les débits d'un bassin versant mixte, c'est-à-dire un bassin dont les débits sont le résultat de différents comportements, est-il préférable de le faire en revenant à des comportements «purs» (ce serait l'approche semi-distribuée) ou à partir du comportement déjà moyenné d'un autre bassin versant mixte (ce serait l'approche globale) ?

3.2 Simulation du débit du bassin mixte des Avenelles

Nous disposons des chroniques de débits suivantes : du 31/10/98 au 28/12/2001 pour Choqueuse, du 01/01/97 au 04/11/2001 pour les Avenelles, du 29/01/2001 au 28/12/2001 pour Quatre Cents et du 31/10/98 au 28/12/2002. Les stations n'ayant pas toutes été équipées au même moment nous ne pourrions utiliser que les années où les données sont disponibles et communes aux stations étudiées.

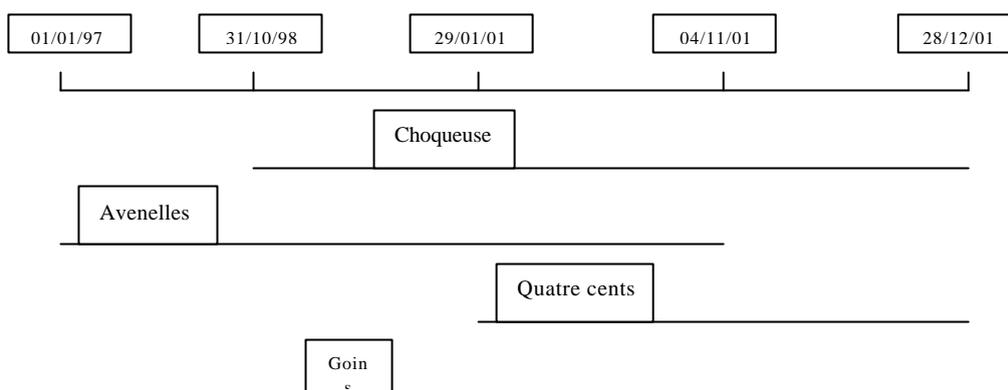


Figure 3.2 : Dates des chroniques de débits disponibles pour les 4 bassins

Dans un premier temps nous travaillons avec les débits du bassin versant mixte des Avenelles. Nous avons donc le choix de faire le calcul soit à partir des deux bassins versants dits purs de Goins et Quatre Cents ou à partir de Choqueuse, un autre bassin mixte.

Quatre relations sont testées pour des données couvrant la période du 29/01/2000 au 04/11/2001 :

$$Q_{\text{aven}} = a * Q_{\text{agric}} + b * Q_{\text{forest}} + c \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$Q_{\text{aven}} = a * Q_{\text{agric}} + c \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$Q_{\text{aven}} = b * Q_{\text{forest}} + c \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$Q_{\text{aven}} = a * Q_{\text{choq}} + b \quad \text{Eq. 3.4}$$

Tableau 3.1 : Résultats des régressions pour le bassin des Avenelles du 29/01/2000 au 04/11/2001

<i>relation</i>	<i>coefficients</i>	<i>Critère de Nash et Sutcliffe (Q)</i>	<i>Critère de Nash et Sutcliffe (v Q)</i>
<i>Mixte=f(agric,forest)</i> (1)	a=27.9, b=5.6 et c=201.0	0.91	0.90
<i>Mixte=f(agricole)</i> (2)	a=30.6 et c=210.9	0.91	0.89
<i>Mixte=f(forestier)</i> (3)	b=52.1 et c=174.4	0.77	0.80
<i>Mixte=f(mixte)</i> (4)	a=21.9 et b=180.5	0.87	0.88

Les premiers résultats présentés au Tableau 3.1 semblent indiquer que pour reproduire les débits d'un bassin versant mixte, dans le cas des Avenelles, il est aussi facile de le faire à partir de deux bassins versants purs, d'un bassin agricole ou d'un autre bassin versant mixte. Les valeurs des critères de Nash obtenues ne différant à chaque fois que de quelques centièmes cela ne nous autorise pas vraiment à choisir une méthode plutôt qu'une autre du fait de la courte période de mesures disponible. Il est possible de comparer les débits observés aux Avenelles avec les débits calculés à partir de l'autre bassin versant mixte Choqueuse sur une période un peu plus longue allant du 31/10/1998 au 04/11/2001 : les critères de Nash sont légèrement inférieurs mais restent stables puisque nous obtenons une valeur de 0.86 pour le critère de Nash construit sur les racines des débits et 0.85 pour le critère de Nash construit avec les débits.

De plus que si les résultats sont stables entre les relations (1) et (2) ils chutent pour la relation (3) : la partie forestière des Avenelles, par rapport à la zone agricole, ne semble jouer qu'un rôle négligeable dans la formation des débits. Elle n'est en tous cas pas suffisante pour reproduire la dynamique débits du bassin des Avenelles.

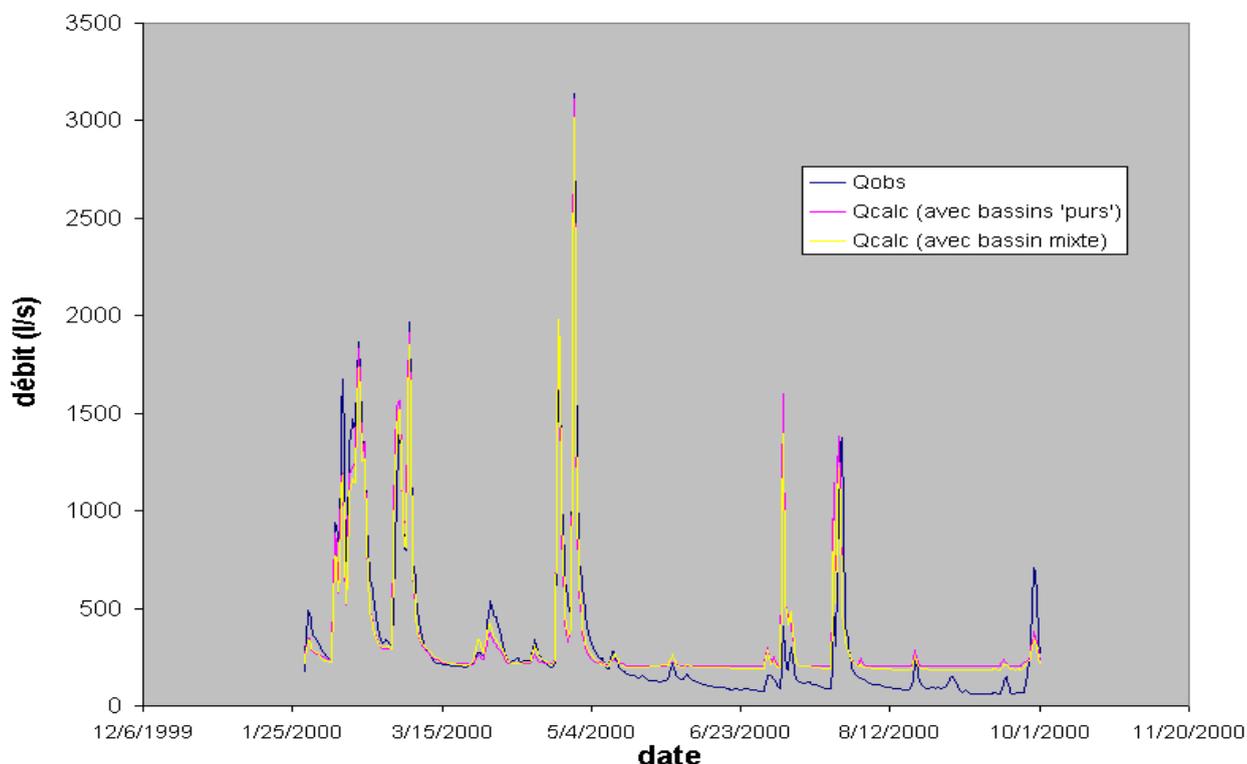


Figure 3.3: Hydrogramme (Avenelles) – Comparaison bassins purs/ bassin mixte

Les deux hydrogrammes restent proches et présentent les mêmes faiblesses : en dessous d'un certain niveau, les étiages sont mal représentés quelque soit la méthode. Il est ainsi difficile de choisir entre les deux expressions.

3.3 Simulation des débits du bassin mixte de Choqueuse

Les débits de Choqueuse sont reproduits en fonction des débits de Goins et de Quatre Cents, c'est-à-dire un bassin versant mixte en fonction de bassins versants purs pour vérifier si nous retrouvons les résultats observés avec le bassin versant des Avenelles. Notons que le bassin versant forestier de Quatre cents n'appartient pas au bassin versant de Choqueuse.

Différentes combinaisons sont comparées:

$$Q_{\text{choq}} = 1 * Q_{\text{agric}} + b * Q_{\text{forest}} + c \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$Q_{\text{choq}} = a * Q_{\text{agric}} + b * Q_{\text{forest}} + c \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$Q_{\text{choq}} = a * Q_{\text{agric}} + c \quad \text{Eq. 3.7}$$

$$Q_{\text{choq}} = b * Q_{\text{forest}} + c \quad \text{Eq. 3.8}$$

où a , b et c sont des constantes spécifiques à chaque relation.

Notons que le bassin « pur agricole » de Goins étant un sous bassin du bassin « mixte » de Choqueuse, nous avons testé une version en Eq. 3.5 où le facteur multiplicatif de Goins est 1.

Tableau 3.2 : Résultats des régressions pour le bassin Choqueuse du 29/01/2000 au 28/12/2001

<i>relation</i>	<i>coefficients</i>	<i>Critère de Nash et Sutcliffe pour Q</i>	<i>Critère de Nash et Sutcliffe pour vQ</i>
<i>Mixte=f(agric,forest,a=1)</i> (1)	b=0.47 et c=2.30	0.97	0.95
<i>Mixte=f(agric, forest)</i> (2)	a=1.19, b=0.24 et c=1.24	0.98	0.98
<i>Mixte=f(agricole)</i> (3)	a=1.36 et c=1.83	0.9998	0.96
<i>Mixte=(forestier)</i> (4)	b=2.33 et c=0.07	0.84	0.87

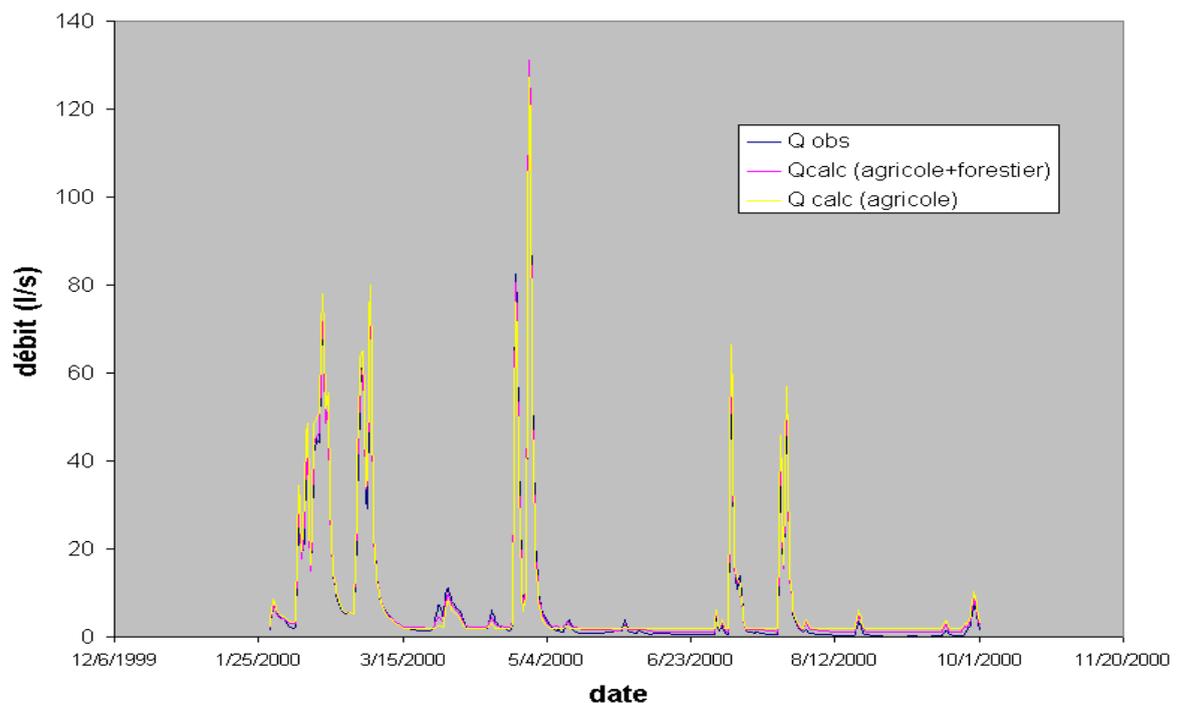


Figure 3.4 : Hydrogramme (Choqueuse) – Comparaison ‘agricole et forestier’/ ‘agricole’

Selon le critère choisi pour évaluer la qualité des hydrogrammes nous pouvons obtenir des résultats un peu différents. Dans le cas étudié si nous choisissons de travailler avec la racine du débit Q nous conservons plutôt l’expression suivante : $Q_{\text{choq}} = a * Q_{\text{agric}} + b * Q_{\text{forest}} + c$, alors que si nous utilisons les valeurs de débits nous gardons une autre relation qui est : $Q_{\text{choq}} = a * Q_{\text{agric}} + c$. Les meilleures relations sont donc les relations faisant intervenir soit le bassin agricole ET le bassin forestier, soit uniquement le bassin agricole. Nous comparons les deux hydrogrammes.

Les différences sont difficiles à apprécier, soit par les critères de Nash ou simplement par la comparaison des hydrogrammes. Les critères ne diffèrent parfois que de quelques centièmes ce qui

ne représente pas une différence significative, ceci étant confirmé par les hydrogrammes qui sont très similaires. Les résultats de ces deux approches sont donc très proches et laissent à penser que soit les zones forestières n'influent que très peu sur le comportement d'un bassin versant mixte, soit le comportement de la zone forestière est très proche de celui de la zone agricole.

Cependant en comparant de plus près les hydrogrammes réel et simulé, nous constatons que la relation (2) reproduit mieux les périodes d'étiage que la relation (3). Ceci permet d'expliquer pourquoi le critère calculé à partir des racines des débits privilégie la relation (2) : utiliser des racines permet de réduire les écarts notamment les plus grands qui apparaissent pour les pics de crue. Réduire le poids des pics de crue permet de donner plus d'importance aux étiages.

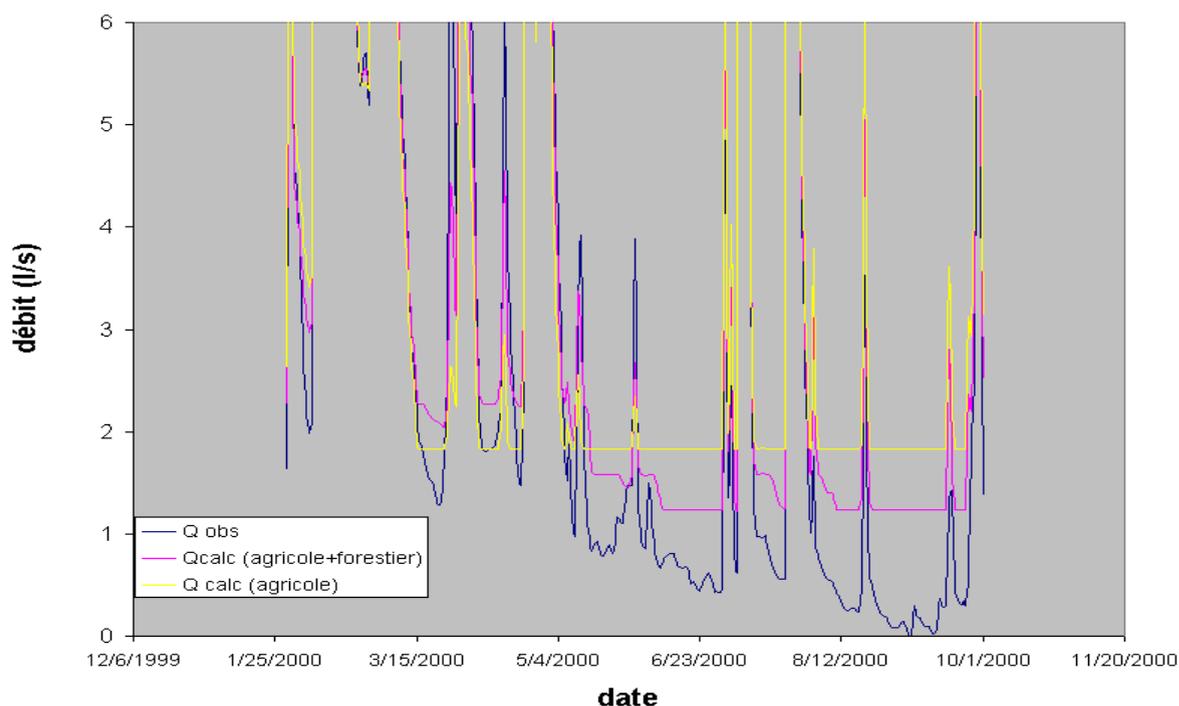


Figure 3.5: Hydrogramme (Choqueuse) – Comparaison 'agricole et forestier' / 'agricole' en période d'étiages

Le gain est faible entre la relation où l'on se contente du bassin versant agricole et la relation où l'on introduit à la fois le bassin forestier et le bassin agricole pour reproduire le bassin mixte pur. Cependant nous constatons une légère amélioration des débits simulés pour les périodes d'étiage en tenant compte du bassin versant forestier. Il est donc globalement satisfaisant de n'utiliser que le bassin versant agricole pour représenter un bassin versant mixte. Introduire un comportement forestier ne devient vraiment intéressant que dans le cas où l'on souhaite se concentrer sur les étiages car l'erreur est moindre pour cette catégorie de débits.

De plus se contenter du bassin forestier n'est toujours pas la meilleure solution : bien que les critères atteignent des valeurs tout à fait acceptables ils n'en demeurent pas moins médiocres comparés aux autres résultats. Le bassin versant agricole Goins semblerait donc suffisant pour représenter les débits des bassins versants mixtes.

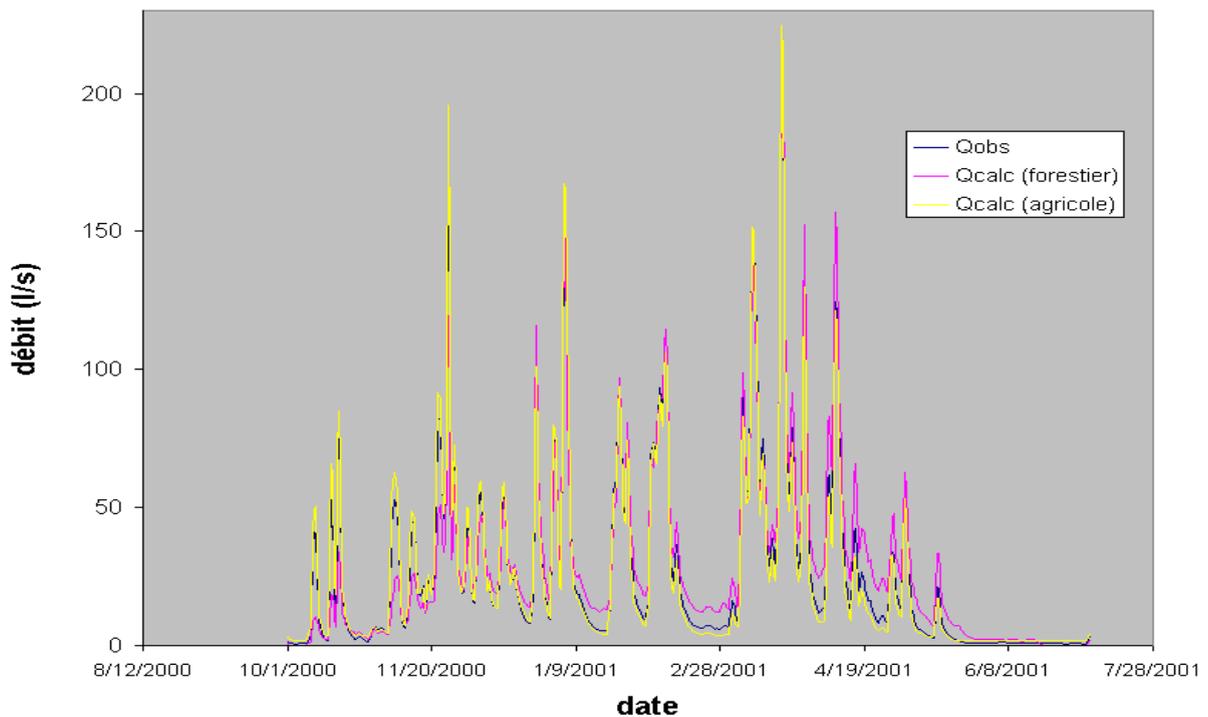


Figure 3.6: Hydrogramme (Choqueuse) – Comparaison ‘agricole’/ ‘forestier’

3.4 Conclusion et remarques

Une critique est à formuler à propos de cette modélisation. Les chroniques de débit utilisées ne représentent au mieux que trois années de mesures, ces années étant très humides. Le fait de travailler sur des années humides atténue les différences de comportement ce qui masque peut-être l’influence des bassins versants forestiers. D’autres séries de mesures seraient donc nécessaires pour infirmer ou confirmer ces conclusions.

Si nous effectuons la comparaison pour la période du 31/10/1998 au 29/01/2001 où nous disposons de mesures de débits pour Choqueuse (bassin versant mixte) et Goins (bassin versant agricole) mais où manquent celles de Quatre Cents (bassin versant forestier), les résultats restent satisfaisants puisque les critères de Nash et Sutcliffe sont égaux ou supérieurs à 0.98, ce qui est encourageant puisque cette série de données correspond à une période plus sèche. De même pour la période du 31/10/98 au 04/11/2001 nous pouvons à nouveau calculer les débits des Avenelles en fonction des débits du bassin versant agricole de Goins : les critères de Nash obtenus sont 0.89 pour Q et 0.87 pour vQ , les valeurs restent stables bien que la période est plus longue et restent supérieures à celles obtenues pour la relation (4) sur la même période.

Cependant, cet exercice nous montre que, pour ces bassins et sur la période étudiée, il est à peu près équivalent de choisir l’approche globale (à partir d’un bassin mixte) ou l’approche semi-distribuée (à partir de bassins purs) : pour les Avenelles la baisse n’est que de 2 à 4 % pour le critère de Nash avec l’approche globale. C’est donc en termes de données que les différences sont plus flagrantes : ces approches ne sont équivalentes que si l’on sait par avance que l’on peut négliger, sauf cas particuliers, la zone forestière. Sinon on se voit obligé de collecter deux fois plus

de données qui sont les débits du bassin versant agricole et les débits du bassin versant forestier au lieu des seuls débits du bassin versant mixte.

Mais cet exemple présente, comme la plupart des publications présentées, l'inconvénient de ne pouvoir être généralisé puisqu'il ne concerne qu'un bassin versant, celui des Avenelles.

4. Présentation des données

L'échantillon est constitué de 307 bassins versants répartis sur le territoire métropolitain français (Annexe 4 : Présentation des bassins versants).

Les données hydrométriques proviennent de la banque de données HYDRO du Ministère de l'Environnement, cette banque abritant les données d'environ 3300 stations en France. Les bassins peuvent être regroupés selon les six zones qui correspondent aux six agences de bassin. Nous disposons ainsi de :

- 31 stations sur le bassin Rhin-Meuse
- 3 stations sur le bassin Artois-Picardie
- 56 stations sur le bassin Seine-Normandie
- 65 stations sur le bassin Loire-Bretagne
- 61 stations sur le bassin Adour-Garonne
- 91 stations sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse.

Quant aux données de pluies, elles proviennent de la banque de données PLUVIO de Météo France qui regroupe des données sur environ 15000 stations pluviométriques. Nous disposons de données au pas de temps journalier pour 740 postes pluviométriques choisis pour leur localisation par rapport aux bassins concernés. Certains postes peuvent concerner plusieurs bassins versants (bassins emboîtés ou adjacents).

Les données d'ETP, calculées à partir de la formule de Penman (1948), sont également fournies par Météo France.

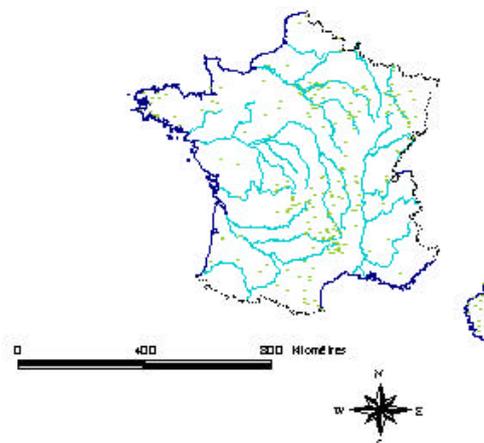


Figure 4.1 : Localisation des 307 stations hydrométriques

5. Méthode

Il s'agit de mettre en place une méthode permettant de comparer les approches globale et semi-distribuée en intégrant les résultats des différentes publications hydrologiques passées en revue lors de la synthèse bibliographique et les travaux antérieurs aux Cemagref ((Baudez, 1997) plus longuement développé dans ce chapitre et (Morvan, 2000)). Rappelons que l'ensemble des publications ne compare les deux approches que sur un ou deux voire trois bassins et que pour avoir des résultats assez généraux il nous a semblé impératif de travailler sur un large échantillon de bassins. De plus notre souci de nous inscrire dans un cadre qui pourra être ensuite transposé à un contexte opérationnel conditionne le choix de la catégorie de modèles avec laquelle les deux approches seront comparées. A la construction de l'échantillon de bassins versants et au choix des modèles s'ajoute aussi la présentation de versions intermédiaires des modèles (qui ne sont plus que partiellement distribués) destinées à nous permettre de différencier les rôles des différents éléments constitutifs d'une modélisation semi-distribuée.

5.1 Choix des modèles

Il existe de très nombreux modèles, beaucoup se ressemblent mais ils n'ont cependant pas tous les mêmes caractéristiques ni les mêmes domaines d'application et ne sont donc pas tous adaptés à un contexte opérationnel ce qui nous conduit à n'en sélectionner que certains.

Les modèles peuvent être classés en trois catégories :

- les modèles boîte noire :

Ils relient pluies et débits à l'aide d'une fonction mathématique. C'est le cas des réseaux de neurones, de l'hydrogramme unitaire... Certains modèles boîte noire, comme par exemple l'hydrogramme unitaire, sont des modèles linéaires et sont peu adaptés pour reproduire le fonctionnement non linéaire d'un bassin versant ce qui réduit leur domaine de validité.

- les modèles conceptuels :

La transformation des pluies en débits est décomposée à l'aide de réservoirs se vidangeant les uns dans les autres et dont le fonctionnement est réglé par un certain nombre de paramètres. Ces modèles présentent divers inconvénients : leurs paramètres n'ont pas une signification physique évidente, ils ne peuvent pas intégrer de façon immédiate les changements d'occupation des sols des bassins et ne fournissent pas de résultats concernant le fonctionnement interne du bassin. Cependant ils ont un avantage majeur : ils sont robustes, performants et leur mise en œuvre est facilitée par le fait qu'ils ne nécessitent que peu de données.

- les modèles distribués à base physique :

Ces modèles tentent de reproduire la réalité par une représentation dynamique faisant intervenir différentes équations de la physique et nécessitent une discrétisation spatiale fine. Ils ont l'avantage de pouvoir tenir compte des changements d'occupation du sol et devraient pouvoir en théorie être appliqués à des bassins versants non jaugés. Ils fournissent des résultats sur le fonctionnement interne du bassin. Cependant leur application est encore limitée : ils nécessitent de très nombreuses données et se basent sur des équations dont la représentativité peut poser problème (Beven, 1989).

Parmi ces trois catégories de modèles, les plus adaptés semblent être les modèles conceptuels. Les modèles distribués à base physique, difficiles à mettre en œuvre, sont ainsi peu adaptés à un contexte opérationnel et restent pour l'instant cantonnés à la recherche. Quant aux modèles boîte noire, leurs applications demeurent parfois un peu limitées. Ce sont les modèles conceptuels qui représentent le meilleur compromis entre données et résultats dans un contexte opérationnel d'où le choix des quatre modèles suivants : HBV, TOPMO, GR4J et IHAC (Annexe 1 : Description des modèles). Travailler simultanément avec quatre modèles conceptuels pluie-débit permet de s'assurer que les résultats observés ne sont pas qu'un effet du modèle : fondés sur le même principe, ces modèles possèdent cependant des structures différentes, notamment un nombre de paramètres assez variable, puisque HBV en possède 9, GR4J 4, TOPMO et IHAC 7. Chaque modèle a ses points forts et ses points faibles, nous verrons ainsi quelle est l'influence du modèle sur les résultats de l'approche semi-distribuée.

Les modèles fonctionnent à l'aide de paramètres attachés au fonctionnement des réservoirs. La détermination des valeurs de ces paramètres constitue l'étape de calage dont le but est d'adapter le modèle à chaque bassin versant auquel il est appliqué afin de transformer les données de pluie en un hydrogramme le plus ressemblant possible à l'hydrogramme mesuré sur le terrain. L'adaptation consiste à trouver le jeu optimum de paramètres qui permet d'obtenir les meilleurs hydrogrammes. Cette étape peut se faire manuellement en réglant par tâtonnement les paramètres tout en s'assurant visuellement que ces changements améliorent l'hydrogramme. Cependant ce calage reste très subjectif ce qui pourrait influencer les résultats et nécessiterait trop de temps pour être réalisé, le nombre de bassins sur lesquels nous travaillons étant important. Nous choisissons donc un calage automatique, la qualité des hydrogrammes étant évaluée à l'aide d'un critère numérique, le critère de Nash dont voici l'expression :

$$\text{critère} = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{Eq. 5.1}$$

Q_{obs} représente les débits observés, Q_{calc} les débits simulés et $\overline{Q_{obs}}$ la moyenne des débits observés. Quand le critère de Nash atteint une valeur de 1, la simulation est parfaite. Pour des valeurs inférieures à 1 et décroissantes la qualité des résultats se dégrade. Une valeur de 0 signifie que le modèle ne donne pas de meilleurs résultats que le modèle naïf qui consiste à dire que le débit est égal à la moyenne des débits observés ce qui n'a pas grand intérêt.

D'autres formulations de ce critère existent :

$$1 - \frac{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{calc}})^2}{\sum (\sqrt{Q_{obs}} - \sqrt{Q_{obs}})^2} \quad \text{Eq. 5.2}$$

En atténuant l'importance prise par les débits importants cette formulation permet de rééquilibrer le poids des débits en période d'étiage par rapport aux débits en période de crue. Nous avons utilisé ce critère (Eq. 5.2) pour évaluer la qualité des hydrogrammes car il paraît être un bon compromis entre ces deux types d'écoulements.

Il est aussi possible de remplacer vQ par $\ln Q$: dans ce cas l'importance des faibles débits est encore accentuée par rapport à celle des forts débits.

Mais l'étape de calage ne suffit pas pour évaluer le modèle et doit être suivie d'une étape de validation qui n'est réussie que si elle montre que le jeu de paramètres peut être transposé à d'autres chroniques de pluie, sur lesquelles le modèle n'a bien évidemment pas été calé, sans observer une trop grande détérioration de la qualité des hydrogrammes calculés.

Précisons qu'avec l'approche globale le modèle n'est calé qu'une seule fois : on a donc uniquement besoin des débits à l'exutoire du bassin versant. Ce n'est plus le cas avec l'approche semi-distribuée puisque le modèle doit être calé sur chacune des zones homogènes ou chacun des sous bassins versants ce qui oblige à disposer d'autant de chroniques de débits qu'il y a de zones homogènes ou de sous bassins versants (d'où l'augmentation de la quantité de données nécessaires pour une approche semi-distribuée).

5.2 Bilan des travaux antérieurs au Cemagref

Nous nous appuyons sur une précédente étude puisque ce sujet de DEA fait suite à un autre sujet de DEA (Baudez, 1997) qui se proposait déjà d'évaluer l'intérêt de l'approche semi-distribuée par rapport à l'approche globale.

Cette étude concluait qu'il n'existait pas de différence significative entre les approches globale et semi-distribuée, ni de lien entre les différents résultats observés pour chaque bassin selon l'approche choisie et des éléments comme la pédologie, la géologie, le couvert végétal, la densité de drainage et la topographie. Le choix des caractéristiques physiques est probablement plus complexe et la petite taille de l'échantillon de bassins dans l'étude de Baudez était clairement un handicap parce qu'elle ne permet pas de généraliser les résultats.

En effet, afin de pouvoir comparer approche globale et approche semi-distribuée, les bassins de Baudez devaient répondre aux conditions suivantes : posséder deux stations de jaugeage à l'amont et une station à l'aval d'une confluence. Les deux stations à l'amont correspondaient aux exutoires des deux sous bassins constitutifs du bassin global et permettaient de caler le modèle pour

l'approche semi-distribuée, la station à l'aval correspondait à l'exutoire du bassin global et permettait de caler le modèle pour l'approche globale.

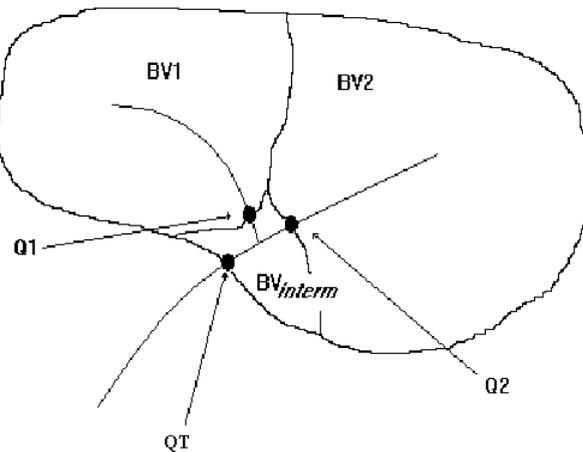


Figure 5.1 : Configuration des trois stations de jaugeage sur les bassins utilisés par Baudez

Les deux sous bassins ne recouvrant jamais la totalité du bassin initial, l'approche semi-distribuée devait tenir compte de ce troisième «bassin» intermédiaire : pour cela jusqu'à deux constantes multiplicatives (à ajuster à chaque bassin) étaient introduites. Il en résultait trois modélisations semi-distribuées (pas de constante, une constante, deux constantes).

Des bassins comme cela il n'en existe que très peu, 15 en France, ce qui explique la petite taille de l'échantillon. Le plus souvent, de telles stations ne résultent que d'un manque de communication entre les différents organismes responsables des mesures hydrométriques.

Pour comparer les deux approches la méthode était la suivante : d'abord classer les bassins selon les résultats des deux approches de modélisation (globale et semi-distribuée) puis de nouveau classer les bassins mais cette fois ci en fonction de l'hétérogénéité existant entre les deux sous bassins constitutifs du bassin initial. Ce deuxième classement se basait sur les critères précédemment cités (pédologie, géologie, couvert végétal, densité de drainage et topographie) et était réalisé indépendamment du premier. C'est la comparaison de ces deux classements qui n'a pas permis de conclure, puisque aucun lien n'a pu être mis en évidence.

Deux problèmes sont donc à résoudre : la taille de l'échantillon et la prise en compte des hétérogénéités entre deux bassins, le second étant abordé dans le chapitre suivant. Ne pas constater de différences significatives entre les deux approches peut suggérer que parmi ces quinze couples aucun ne présentait d'hétérogénéités assez fortes pour pouvoir réellement conclure sur la supériorité de l'une des deux approches.

5.3 Constitution d'un large échantillon de bassins versants dits 'virtuels'

Nous nous proposons de résoudre en même temps le problème de la probable trop grande homogénéité des bassins utilisés lors de l'étude de Baudez et celui du nombre minimum de bassins

nécessaire pour généraliser les résultats. La solution envisagée est d'abandonner les 15 bassins versants réels au profit de bassins versants virtuels !

Nous possédons des données pour 307 bassins versants répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain français. Ces bassins appartenant à diverses régions peuvent présenter entre eux de grandes différences de climats, de végétations... C'est ici qu'intervient la notion de bassins versants virtuels : rien ne fait obstacle à l'idée de regrouper deux par deux ces bassins pour former un bassin virtuel et tirer ainsi avantage de leurs différences. Chaque bassin versant virtuel sera donc composé de deux sous bassins.

Ceci règle à la fois le problème de la trop grande similitude des bassins versants mais aussi celui de la taille de l'échantillon. En effet en disposant de 307 bassins versants et même en imposant une contrainte sur le rapport des surfaces des deux bassins (aucun des 2 bassins n'excède une fois et demie la taille de l'autre) nous obtenons un échantillon de près de 4500 bassins sur lesquelles vont être testées les deux approches.

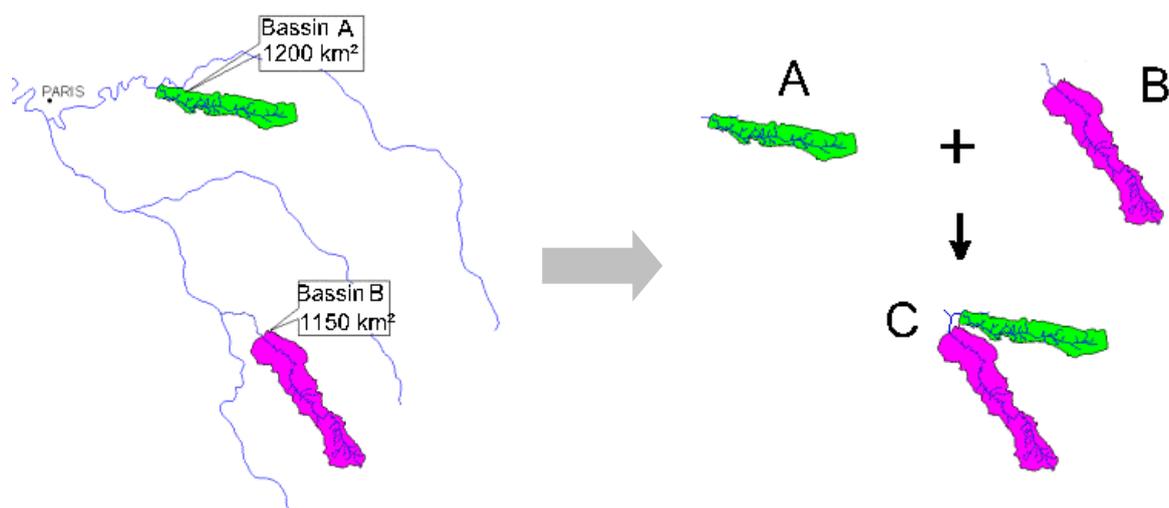


Figure 5.2 : Construction d'un bassin virtuel (C) à partir de deux bassins réels (A et B)

Le débit du bassin virtuel pour une journée donnée est la somme des débits pour cette même journée, la chronologie est respectée.

5.4 Des versions « intermédiaires » pour isoler les effets de la distribution des pluies et des paramètres du modèle

Ces versions intermédiaires ont pour but d'expliquer les écarts de résultats constatés entre les approches globale et semi-distribuée (qui sont d'ailleurs les premières à être présentées dans ce paragraphe). En passant de l'approche globale à l'approche semi-distribuée, ce sont à la fois les pluies et les paramètres du modèle qui sont distribués (P devient P_A et P_B , X devient X_A et X_B). C'est pourquoi nous décidons d'utiliser les modèles en distribuant soit les pluies, soit les paramètres afin d'en distinguer les effets.

5.4.1 les versions globale et semi-distribuée

Ce sont les deux versions que nous cherchons à comparer.

- version globale :

Le modèle est calé à partir des pluies et des débits globaux. Nous n'optimisons donc qu'un seul vecteur de paramètres X , fonction de P et Q globaux. La validation s'effectue avec une pluie globale sur la totalité du bassin. L'information est ainsi traitée à tous les niveaux de la même manière.

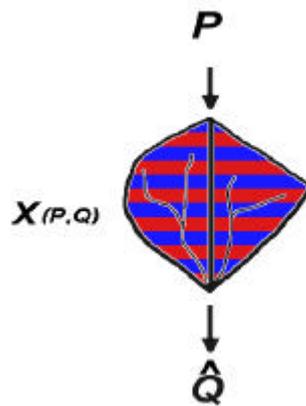


Figure 5.3: Version globale

- version semi-distribuée vraie :

Chacun des sous bassins est calé sur ses propres pluies et débits : il y a donc un jeu de paramètres $X_A=f(P_A, Q_A)$ et un jeu $X_B=f(P_B, Q_B)$. Lors de la validation on applique à chaque sous bassin sa propre pluie. On obtient donc deux débits que l'on somme pour constituer le débit global. De nouveau l'information est traitée de la même manière à tous les niveaux.

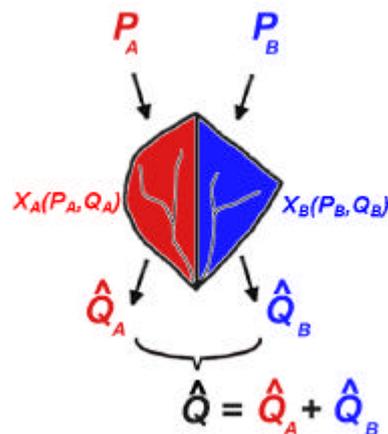


Figure 5.4 : Approche semi-distribuée vraie

5.4.2 les versions mixtes avec calage

Deux versions existent. Ces deux versions mixtes avec calage sont introduites dans l'intention de distinguer ce qui revient, si des écarts sont constatés entre les deux approches, à la distribution des comportements de ce qui revient à la distribution des pluies.

- version semi-distribuée limitée aux pluies

Cette première version consiste à caler chaque sous bassin avec sa propre pluie et son propre débit en imposant que les deux bassins aient le même jeu de paramètres. Il n'y a donc qu'un seul jeu de paramètres $X=f(P_A, Q_A, P_B, Q_B)$. Lors de la validation on applique à chaque sous bassin sa propre pluie puis on somme les débits.

Avec cette version nous nous attachons à mettre en évidence l'impact de l'information apportée par la distribution des pluies puisque nous travaillons avec des pluies semi-distribuées et un comportement global. En comparant les résultats obtenus avec cette version à ceux obtenus avec la version globale nous pourrions déterminer si la seule prise en compte de la variabilité spatiale des pluies, en négligeant celle des comportements, permet oui ou non d'améliorer les résultats.

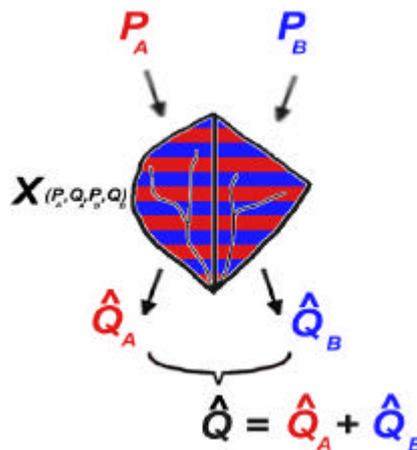


Figure 5.5 : Version semi-distribuée limitée aux pluies

- version semi-distribuée limitée aux comportements :

Cette deuxième version consiste à caler chaque sous bassin avec une pluie globale et son propre débit. Il y a donc deux jeux de paramètres : $X_A=f(P, Q_A)$ et $X_B=f(P, Q_B)$. Lors de la validation on applique à chaque sous bassin une pluie globale puis on somme les débits.

Avec cette version on néglige la variabilité spatiale des pluies pour privilégier celle des comportements. On comparera l'écart constaté (supposé du aux comportements) entre les résultats de cette version et ceux obtenus avec l'approche globale à l'écart constaté entre approche globale et approche semi-distribuée .

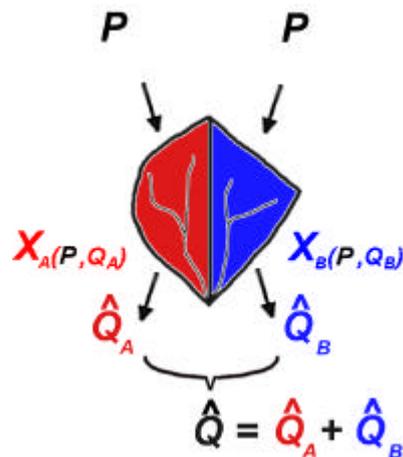


Figure 5.6 : Version semi-distribuée limitée aux comportements

5.4.3 les versions mixtes sans calage

De nouveau deux versions existent et servent à simuler le comportement du modèle lors de la modification de l'information disponible.

- version semi-distribuée résultant d'une dégradation de l'information :

Cette version consiste à appliquer à chaque sous bassin sa propre pluie avec les paramètres obtenus lors du calage de la version globale.

On simule ainsi ce qui se passerait en cas de dégradation de l'information disponible pour un modèle à l'origine calé pour être utilisé de façon semi-distribuée. Est-il valable de continuer à utiliser un modèle aux paramètres semi-distribués alors que l'on ne dispose plus que d'une pluie globale ? Ceci pourrait être la question posée par un gestionnaire.

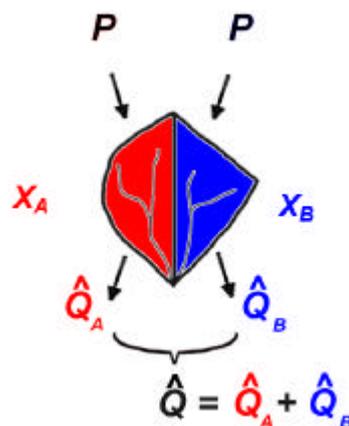


Figure 5.7 : Version semi-distribuée résultant d'une dégradation de l'information

- version semi-distribuée résultant d'un supplément d'information

Pour cette version on applique une pluie globale aux deux sous bassins et les paramètres sont ceux obtenus lors du calage de la version semi-distribuée. Puis on somme les deux débits obtenus.

On simule la situation inverse à la précédente : serait-il possible après un calage global d'utiliser une information pluviométrique plus riche que celle dont on disposait avant.

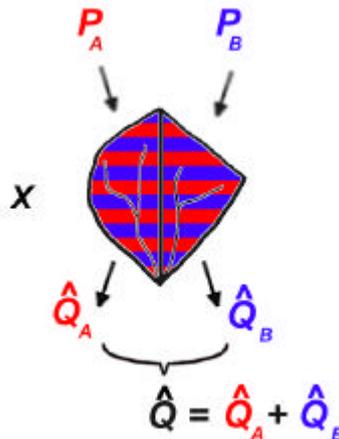


Figure 5.8 : Version semi-distribuée résultant d'un supplément d'information

5.5 Conclusion

Nous travaillons donc sur un large échantillon d'environ 4500 bassins virtuels pour lesquels nous testons les approches semi-distribuée et globale et ceci pour des modèles conceptuels. Puis pour comprendre plus en détail le fonctionnement des modèles, nous distribuons alternativement les pluies et les paramètres, ces deux éléments étant à la base du fonctionnement des modèles conceptuels.

Notons que ces versions mixtes, notamment celles faisant intervenir une étape de calage, n'ont pas vocation à être par la suite utilisées pour des bassins versants réels. Elles ne sont qu'un outil devant nous permettre de comprendre ce qui est le plus important à semi-distribuer, des pluies ou des paramètres, pour un modèle pluie-débit conceptuel.

Enfin rappelons que l'utilisation de bassins versants virtuels a pour objectif de permettre de simuler un large nombre de situations contrastées, afin de fournir des orientations pour la modélisation de bassins versants réels.

6. Des critères pour caractériser les hétérogénéités entre deux sous bassins

Les approches semi-distribuée et globale vont présenter des performances que l'on voudrait expliquer puis prévoir pour de nouveaux bassins, réels, ne faisant pas partie de notre échantillon. Pour cela nous calculons pour chaque bassin une série de valeurs, à définir, censées être représentatives de l'hétérogénéité caractérisant les couples de sous bassins. Le but est de confronter les valeurs obtenues aux écarts constatés entre les résultats des deux approches.

Nous faisons l'hypothèse qu'il existe deux catégories de facteurs prédominants pouvant influencer sur les hydrogrammes mesurés à l'exutoire : les pluies et les caractéristiques propres à chaque bassin (il s'agit de la végétation, de la topographie, de l'altitude...) qui conditionnent le « comportement » du bassin. En effet la pluviométrie, qui est l'entrée principale d'un modèle pluie-débit peut-être du point de vue spatial excessivement variable. Les valeurs caractérisant l'hétérogénéité spatiale des précipitations sont tout simplement calculées à partir des chroniques de pluies. Quant aux caractéristiques physiques des bassins, même si elles n'interviennent pas explicitement dans les modèles conceptuels, elles influencent forcément la détermination des paramètres lors du calage parce qu'elles interviennent dans la formation des hydrogrammes.

Le DEA de (Baudez, 1997) tenait explicitement compte des différences concernant la topographie, la végétation... S'il est vrai que pour tenter de comprendre les processus hydrologiques intervenant au sein d'un bassin versant il nécessaire de s'intéresser à l'ensemble de ces facteurs, il n'en demeure pas moins ardu d'évaluer le poids qu'ils représentent les uns par rapport aux autres. Ceci explique la difficulté que l'on peut avoir à quantifier la différence caractérisant un couple de bassins versants si on prend explicitement en compte les facteurs qui la génèrent. Nous choisissons donc plutôt de travailler sur les chroniques de débits qui sont la résultante des différentes caractéristiques du bassin.

La suite de cette partie est la présentation des critères, calculés pour chaque bassin, du Tableau 6.1

Tableau 6.1 : Liste des critères caractérisant les hétérogénéités entre deux sous bassins

<i>Critères caractérisant les pluies</i>	<i>Critères caractérisant les comportements/ débits</i>
<u>z</u> : rapport des jours de non pluie	<u>S_{moy}</u> : rapport des surfaces des 2 sous bassins
<u>pm</u> : rapport des pluies moyennes	<u>Q_m</u> : rapport des débits moyens
<u>ppm</u> : rapport des pluies moyennes mais uniquement pour les jours pluvieux	
<u>P_{max}</u> : rapport des pluies maximales	<u>Q_{max}</u> : rapport des débits maximums
<u>ECP</u> : rapport des écarts-types	<u>ECQ</u> : rapport des écarts-types
<u>Cor 1</u> : coefficient de corrélation n°1	<u>I_c</u> : indice de similarité des comportements
<u>Cor 2</u> : coefficient de corrélation n°2	
<u>I_{p1}</u> : indice de similarité des pluies	
	<u>Rend</u> : rapport des rendements

De nombreux indices sont symétriques pour les pluies et les comportements/débits. Seule la moyenne des surfaces n'est pas un rapport de deux valeurs. Le rapport de deux valeurs calculées pour chaque sous bassin nous a effé semblé être le moyen le plus simple pour comparer deux bassins

6.1 Critères caractérisant la pluviométrie

6.1.1 z : rapport des jours de non pluie

➤ Formule :

$$z = \frac{z_1}{z_2} \text{ avec } z_1 \text{ et } z_2 \text{ les nombres de jours de non-pluie respectivement sur les bassins 1 et 2.}$$

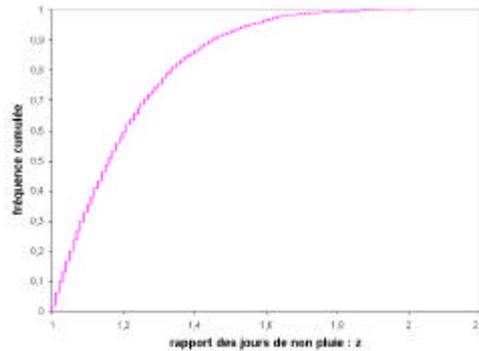
2. Comme ces numéros pour les bassins ne sont qu'arbitraires on calcule z de manière à ce qu'il soit toujours supérieur ou égal à 1.

➤ Interprétation :

Cet indice vise à comparer sur la période étudiée la répartition des pluies sans se soucier ni de la date à laquelle elles se produisent ni de la quantité afin d'évaluer si les nombres de jours de

pluie sont comparables ou très différents pour deux bassins au sein d'un même couple. Un indice proche de 1 indique que les nombres de jours de non-pluie sont très similaires pour les deux bassins alors qu'un indice très supérieur à 1 est le signe d'une pluviométrie répartie différemment pour les deux bassins sur la période étudiée.

➤ Distribution :



6.1.2 pm : rapport des pluies moyennes

➤ Formule :

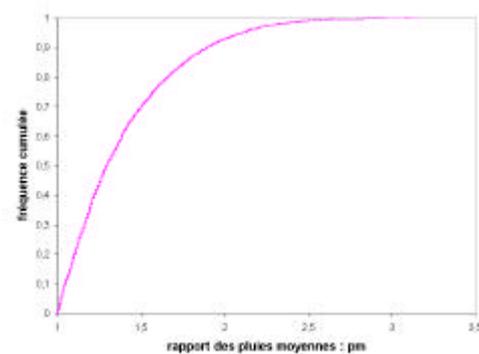
$$pm = \frac{PM_1}{PM_2}$$

avec PM_1 et PM_2 les moyennes respectives des lames d'eau tombées sur les bassins versants 1 et 2 sur la totalité de la période étudiée. De nouveau pm est supérieur ou égal à 1.

➤ Interprétation :

pm compare les lames d'eau reçues par les deux bassins sur la période étudiée. Une valeur de PM proche de 1 indique que les deux bassins versants ont reçu des quantités de précipitations très similaires tandis qu'une valeur très supérieure à 1 indique qu'un des deux bassins versants a reçu un volume d'eau beaucoup plus important.

➤ Distribution :



6.1.3 ppm : rapport des pluies moyennes calculées sur la base des jours pluvieux

➤ Formule :

$$\text{ppm} = \frac{PPM_1}{PPM_2}$$

avec PPM_1 et PPM_2 les moyennes des lames d'eau (seulement pour les

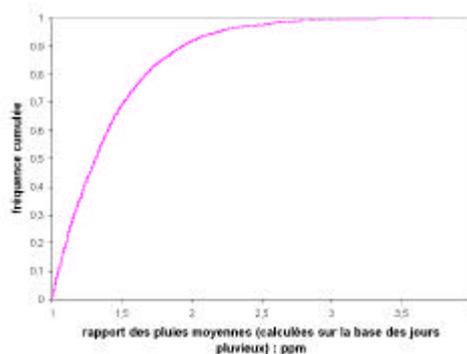
jours où la pluviométrie est non nulle) respectives pour les bassins versants 1 et 2 et telle que le rapport des deux valeurs soit supérieur ou égal à 1. Cet indice ne diffère de l'indice précédent que parce que PPM_1 et PPM_2 ne sont plus calculés sur le même nombre de jours ($z_1 \neq z_2$).

➤ Interprétation :

Les hauteurs d'eau reçues par les bassins versants sont comparées en faisant intervenir le nombre de jours où il pleut. A volumes égaux ppm peut prendre une valeur très supérieure à 1 si un bassin versant a reçu ce volume en très peu de jours par rapport à l'autre bassin. De même à nombres de jours de pluie égaux, selon les volumes tombés, ppm peut prendre des valeurs très variables.

Cet indice est donc un plus difficile à interpréter car il fait intervenir simultanément les deux critères précédents.

➤ Distribution :



6.1.4 Pmax : rapport des pluies maximales

➤ Formule :

$$P_{\max} = \frac{P_{\max_1}}{P_{\max_2}}$$

avec P_{\max_1} et P_{\max_2} les valeurs maximales journalières de pluie pour

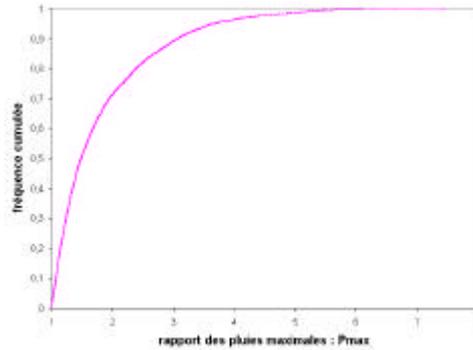
les bassins 1 et 2. Comme toujours le rapport des deux valeurs est supérieur ou égal à 1.

➤ Interprétation :

Une valeur proche de 1 indique que les valeurs maximales rencontrées sur les bassins sont proches pour les périodes étudiées ce qui n'est plus le cas si l'on obtient une valeur très supérieure à

1. Contrairement aux rapports des moyennes cet indice ne prend plus en compte l'ensemble des mesures de pluie utilisée puisqu'il n'en compare plus que deux.

➤ Distribution :



6.1.5 ECP : rapport des écarts-types pour les jours de pluies uniquement

➤ Formule :

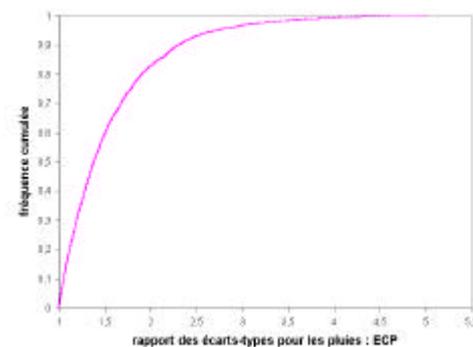
$$ECP = \frac{ECP_1}{ECP_2} \text{ avec } ECP_k = \sqrt{\frac{\sum_i^n (P_k^i - PPM_i)^2}{n}}$$

i indique les jours de pluies et P_k^i est la pluie non nulle du bassin versant k au pas de temps i et n le nombre de pas de temps considérés.

➤ Interprétation :

Cet indice compare les écarts des pluies par rapport aux pluies moyennes calculées sur la période étudiée. Lorsque l'indice s'écarte fortement de 1 cela montre qu'une des pluies fluctue de manière beaucoup plus importante du point de vue temporel autour de sa valeur moyenne.

➤ Distribution :



6.1.6 Cor1 : Coefficient de corrélation n°1

➤ Formule :

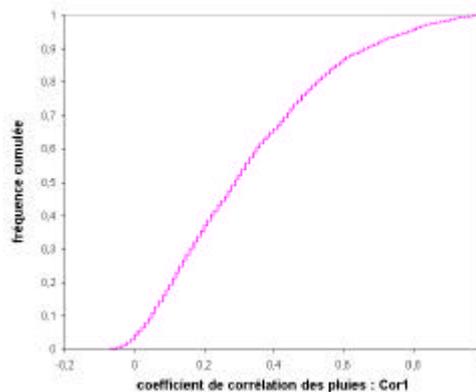
$$\text{Cor1} = \frac{\sum_{i=1}^n P_1^i * P_2^i - \frac{(\sum_{i=1}^n P_1^i) * (\sum_{i=1}^n P_2^i)}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (P_1^i - \bar{P}_1)\right) * \left(\sum_{i=1}^n (P_2^i - \bar{P}_2)\right)}}$$

avec P_k^i la pluie du bassin versant k au pas de temps i et n le nombre de pas de temps sur la période étudiée.

➤ Interprétation :

Le coefficient de corrélation est une manière de traduire le degré de ressemblance plus ou moins fort qui existe entre deux séries de données. Une valeur de +1 ou -1 indique une relation linéaire entre les deux variables. Par contre une valeur de 0 indique que les variables sont indépendantes.

➤ Distribution :



6.1.7 Cor2 : Coefficient de corrélation n°2

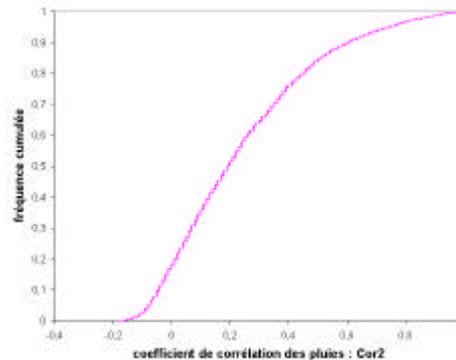
➤ Formule :

La formule est identique à celle du premier coefficient de corrélation mais ne s'applique qu'aux jours pluvieux des deux séries.

➤ Interprétation :

Les chroniques de pluie contiennent de nombreux 0 ce qui dans certains cas pourrait faire augmenter la valeur du premier coefficient de corrélation. C'est pour cela qu'est calculé un second coefficient de corrélation qui ne tient pas compte des valeurs nulles.

➤ Distribution :



6.1.8 Ip1 : Indice de similarité des pluies

➤ Formule :

$$Ip1 = 1 - \frac{2 * \sum_i (P_1^i - P_2^i)^2}{\sum_i \left((P_1^i - \overline{P}_1)^2 + (P_2^i - \overline{P}_2)^2 \right)}$$

où P_k^i est la pluie journalière le du bassin versant k au

pas de temps i et \overline{P}_k la pluie moyenne pour le bassin versant k sur la période étudiée.

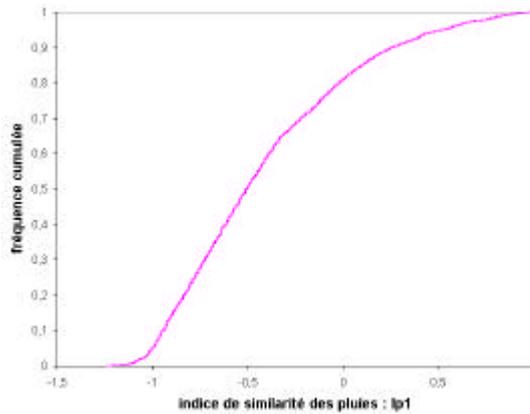
➤ Interprétation :

Le numérateur compare les pluies des deux sous bassins alors que le dénominateur fait la somme des fluctuations temporelles des pluies autour de leur moyenne pour chaque sous bassin versant. Cet indice ne peut prendre la valeur de 1 que si les pluies sont identiques c'est-à-dire $P_1^i = P_2^i$ à chaque pas de temps. Des valeurs très négatives indiquent une grande hétérogénéité des pluies entre les deux sous bassins.

Cet indice qui ressemble par sa construction au critère de Nash ne peut plus faire référence, quand on obtient la valeur 0, au modèle naïf comme le permettait le critère de Nash puisque ici on ne compare un type de modélisation à un autre mais seulement deux chroniques de pluie.

Le critère Ip1 atteint parfois la valeur de 1 alors qu'il est calculé sur un couple constitué de deux bassins différents. Il est peu probable qu'en réalité Ip atteigne réellement la valeur de 1 ce qui signifierait que les pluies sont très exactement identiques. Ceci est juste un effet de l'emplacement des postes pluviométriques : pour des basins emboîtés nous pouvons être amenés à utiliser les mêmes postes pluviométriques d'où la valeur de 1.

➤ Distribution:



6.2 Critères caractérisant le comportement du bassin

6.2.1 Qm : rapport des débits moyens

➤ Formule :

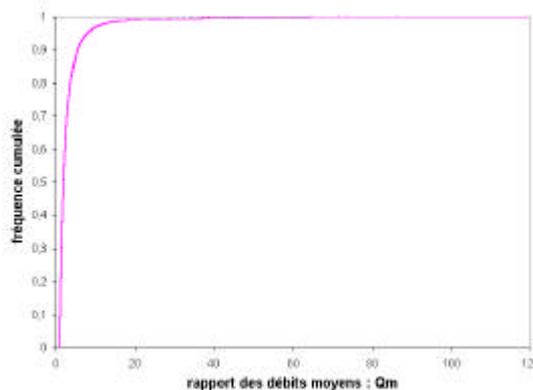
$$Q_m = \frac{QM_1}{QM_2} \text{ avec } QM_1 \text{ et } QM_2 \text{ les débits moyens respectifs sur les bassins versants 1 et 2}$$

(choisis de façon à obtenir un résultat supérieur ou égal à 1).

➤ Interprétation :

L'objectif est de comparer les volumes écoulés sur la période choisie. Une valeur proche de 1 montre qu'un même volume d'eau est passé à l'exutoire des bassins versants alors qu'une valeur très supérieure à cette valeur indique qu'un des bassins versants peut générer un débit beaucoup plus important que l'autre bassin versant.

➤ Distribution :



6.2.2 Qmax : rapport des débits maximums

➤ Formule :

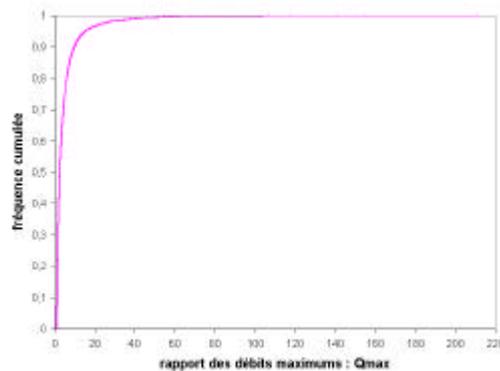
$$Q_{\max} = \frac{Q_{\max_1}}{Q_{\max_2}} \text{ avec } Q_{\max_1} \text{ et } Q_{\max_2} \text{ les valeurs maximales journalières de débit}$$

mesurées respectives aux bassins versants 1 et 2. De même le rapport des deux valeurs est supérieur ou égal à 1.

➤ Interprétation :

Là encore cet indice permet de comparer deux valeurs ponctuelles des régimes des deux bassins versants : une valeur proche de 1 indique que les maximums sont proches alors qu'une valeur très supérieure à 1 indique des bassins versants pouvant présenter des régimes très différents. Il est cependant difficile de conclure de multiples facteurs ayant pu provoqué ces débits.

➤ Distribution :



6.2.3 Moyenne des surfaces

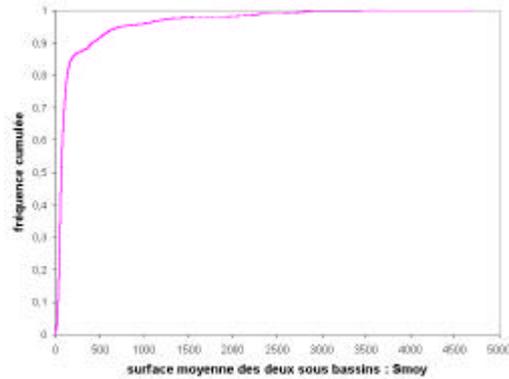
➤ Formule :

$$S_{\text{moy}} = \frac{S_1 + S_2}{2} \text{ avec } S_k \text{ la surface du bassin versant } k.$$

➤ Interprétation :

Nous calculons la moyenne plutôt que le rapport des surfaces du fait de la contrainte imposée sur les surfaces des bassins (aucun des 2 bassins n'excède une fois et demie la taille de l'autre) qui conduirait à n'obtenir que des rapports très proches de 1.

➤ Distribution :



6.2.4 Rend : rapport des rendements

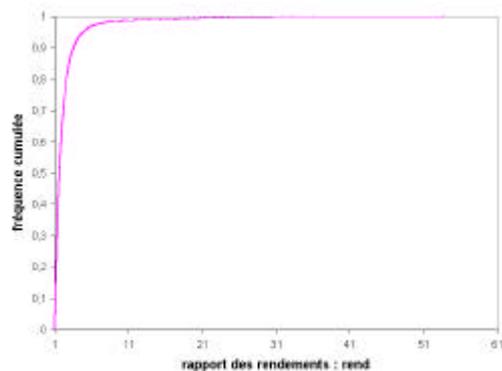
➤ Formule :

La formule (toujours utilisée de manière à obtenir une valeur supérieure ou égale à 1) est la suivante : $rend = \frac{P_{moy1}/Q_{moy1}}{P_{moy2}/Q_{moy2}}$ avec P_{moy_k} et Q_{moy_k} les pluies et débits moyens du bassin n°k.

➤ Interprétation :

Les lames d'eau entrantes et sortantes sont comparées en essayant d'évaluer si les bassins possèdent des comportements très différents.

➤ Distribution :



6.2.5 ECQ : rapport des écarts-types pour les débits

➤ Formule :

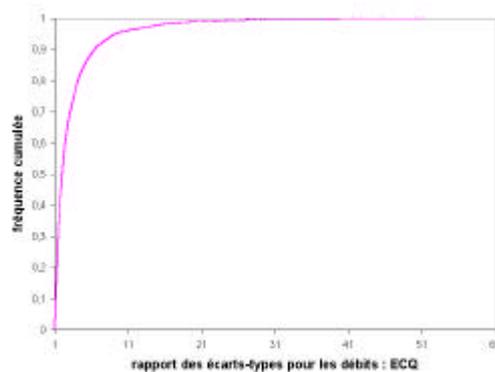
$$ECQ = \frac{ECQ_1}{ECQ_2} \text{ où } ECQ_k = \sqrt{\frac{\sum_i^n (Q_k^i - QM_k)^2}{n}}$$

Q_k^i est le débit du bassin versant k au pas de temps i, QM_k le débit moyen et n le nombre de pas de temps considérés.

➤ Interprétation :

Cet indice compare les écarts des débits par rapport aux débits moyens calculés sur la période étudiée. Lorsque l'indice s'écarte fortement de 1 cela montre que le débit de l'un des bassins fluctue de manière beaucoup plus importante et ceci du point de vue temporel autour de sa valeur moyenne.

➤ Distribution :



6.2.6 Ic : Indice de similarité des comportements

Nous construisons un indice un peu plus global tenant compte de toutes les caractéristiques des débits.

➤ Formule :

$$Ic = 1 - \frac{2 * \sum_i (Q_1^i - Q_2^i)^2}{\sum_i ((Q_1^i - \overline{Q_1})^2 + (Q_2^i - \overline{Q_2})^2)}$$

Q_k^i est le débit au pas de temps i du sous bassin versant k. $\overline{Q_1}$ et $\overline{Q_2}$ sont respectivement les moyennes de Q_1^i et Q_2^i pour la période étudiée.

➤ Interprétation :

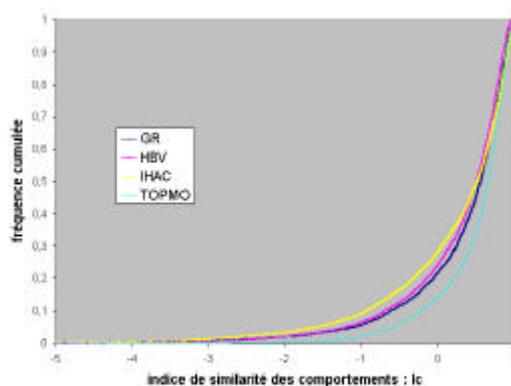
Pour calculer cet indice, censé représenter les différences de comportements des bassins versants, il est nécessaire de passer par l'artifice de la modélisation pluie débit. Cette expression ne permet réellement de comparer les bassins que si les deux bassins versants sont soumis à la même pluie, cas que l'on ne rencontre jamais dans la réalité. Ce n'est qu'avec le modèle pluie-débit qu'une solution peut être envisagée. En s'autorisant à utiliser un modèle pluie-débit il est possible d'appliquer une pluie identique aux deux bassins versants. L'indice est ensuite calculé à partir des débits fournis par le modèle et non de chroniques de mesures.

Si la pluie est identique les différences constatées entre les hydrogrammes viennent de la topographie, de la pédologie, de la végétation... Cet indice permet de chiffrer la différence due à ces facteurs : si $I_c=1$ les bassins versants sont identiques, de 1 à -8 les bassins présentent des différences de plus en plus importantes.

Il faut faire ici une remarque concernant la formulation des indices. Les indices calculés à partir de chroniques de mesures sont indépendants des modèles utilisés ce qui n'est pas le cas de ce dernier indice, son expression faisant intervenir les débits calculés par le modèle et pour lequel quatre séries de valeurs sont donc obtenues.

Notons aussi que dans le cas où le modèle ne s'adapte que très mal au bassin étudié c'est-à-dire que l'on n'obtiendrait que de faibles critères de Nash, il devient difficile de considérer I_c comme représentatif du comportement du bassin.

➤ Distribution :



De légères variations apparaissent bien dans la distribution de I_c selon le modèle utilisé.

6.3 Conclusion

On dispose donc maintenant de 14 indices (6 comparant les comportements des bassins et 8 la pluviométrie). Ces indices ne seront intéressants que s'ils nous permettent d'expliquer, par les pluies ou les comportements, les différences constatées entre les résultats des approches semi-distribuée et globale pour l'ensemble de nos bassins versants. L'objectif final pour ces indices, s'ils s'avèrent utilisables, est de pouvoir ensuite les transposer à d'autres bassins, ceux là réels, afin de

pouvoir évaluer l'intérêt d'une approche semi-distribuée pour de nouveaux bassins sans avoir obligatoirement à passer par une approche globale.

7. Résultats

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : dans le paragraphe 7.1 nous regardons comment, en termes de résultats, se placent les deux approches (globale et semi-distribuée) l'une par rapport à l'autre. Ce n'est qu'ensuite que nous relierons d'abord ces résultats, dans le paragraphe 7.2, aux indices présentés dans le chapitre 6 puis déterminons (paragraphe 7.3) quels sont les éléments (des précipitations et des paramètres) dont la variabilité spatiale est déterminante pour un modèle pluie-débit à l'aide des différentes versions présentées dans le paragraphe 5.4.

7.1 La (relative) supériorité de l'approche semi-distribuée

La première étape est de constater ce que deviennent les résultats des modèles en passant de l'approche globale à l'approche semi-distribuée. Les résultats sont présentés pour l'ensemble des bassins virtuels et les quatre modèles dans les graphiques de la Figure 7.1. L'axe des ordonnées correspond au critère de Nash obtenu avec l'approche semi-distribuée (ND) et l'axe des abscisses au critère obtenu avec l'approche globale (NG) : les points au dessus de la diagonale représentent ainsi les bassins virtuels pour lesquels il est plus intéressant d'utiliser l'approche semi-distribuée que l'approche globale et inversement pour les points en dessous de la diagonale.

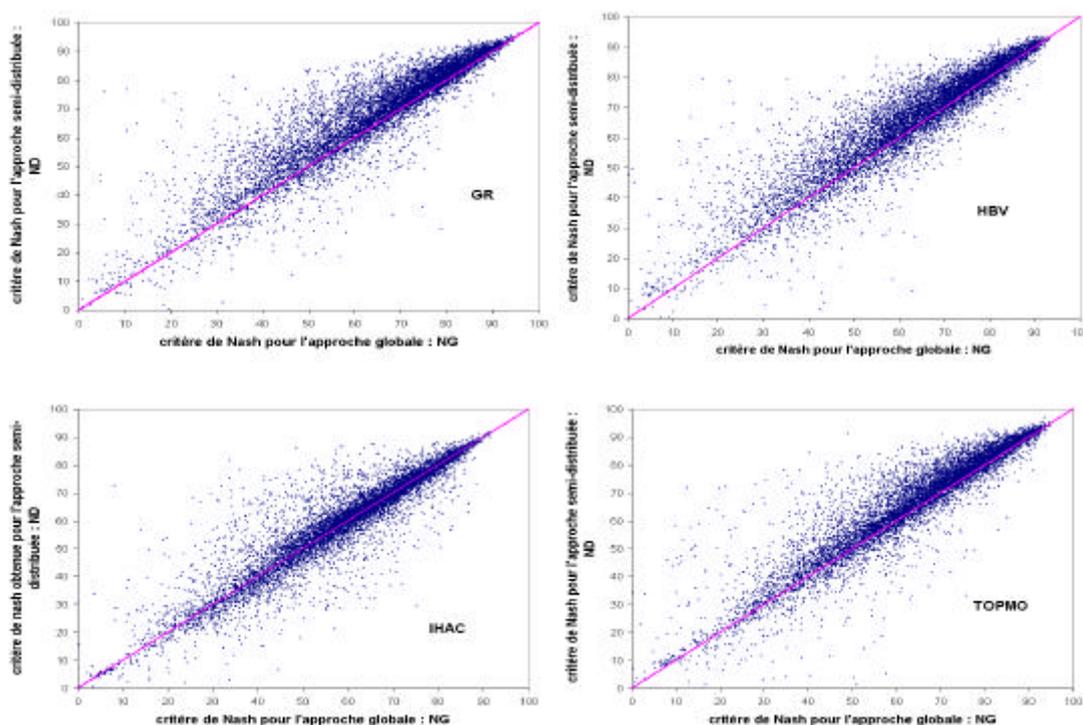


Figure 7.1 : Comparaison approche globale/ semi-distribuée (résultats obtenus en validation) pour les quatre modèles

Pour trois des modèles, HBV, TOPMO et GR4J, l'approche semi-distribuée permet manifestement d'améliorer les résultats. Cependant de nombreux points restent très proches de la

diagonale et pour certains bassins il est préférable d'utiliser l'approche globale. Les avantages de l'approche semi-distribuée ne sont donc pas si nets.

Comparons les distributions des critères de Nash pour les deux approches et les quatre modèles (Figure 7.2).

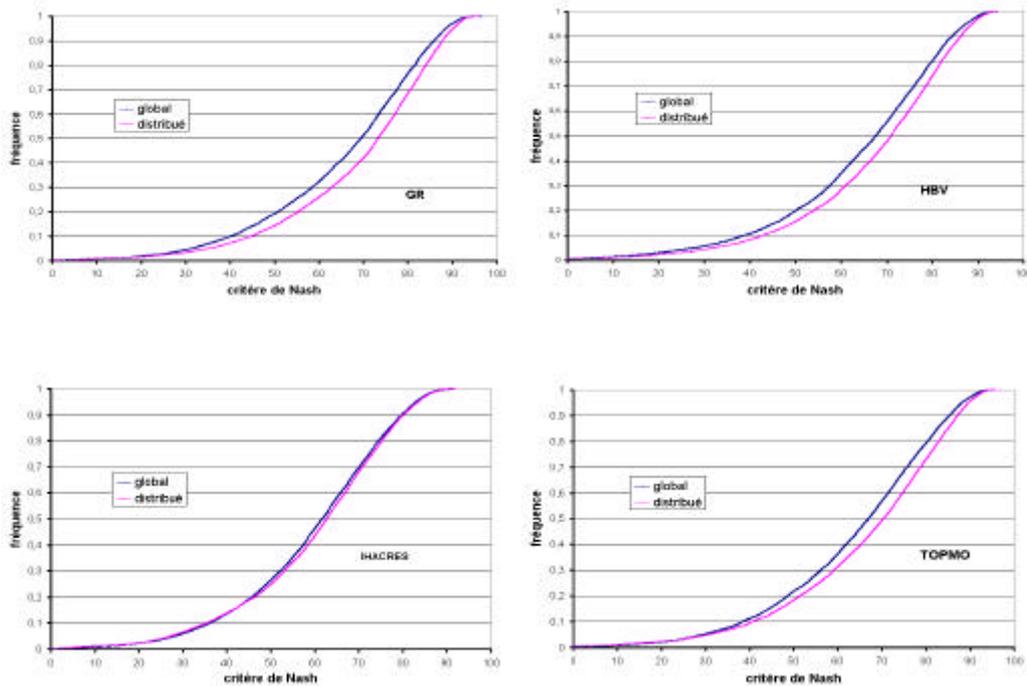


Figure 7.2 : Comparaison des distributions des valeurs du critère de Nash obtenues avec les approches globale et semi-distribuée

Transformer le graphique ne modifie bien évidemment pas les résultats : la courbe correspondant à l'approche semi-distribuée est à droite de celle correspondant à l'approche globale ce qui traduit bien une amélioration des résultats. L'écart entre les deux courbes varie approximativement entre 2 et 4 points. Il n'est quasiment nul que pour IHACRES qui est le seul des quatre modèles à ne pas tirer parti de l'approche semi-distribuée alors que les trois autres modèles présentent des résultats similaires. Notons que IHACRES est déjà le modèle qui obtient les plus mauvais résultats avec l'approche globale comme le montrent les courbes de la Figure 7.3.

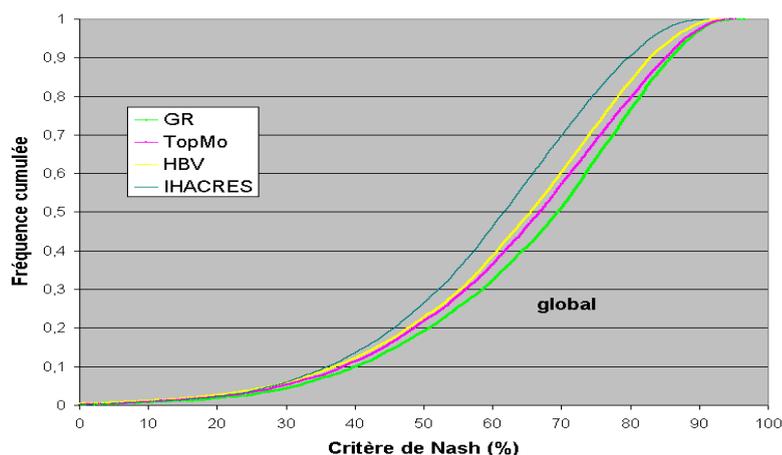


Figure 7.3: Comparaison des distributions du critère de Nash pour les quatre modèles utilisés avec l'approche globale.

L'écart entre les résultats de IHACRES et les résultats des trois autres modèles se creuse encore ensuite lorsque ceux-ci sont utilisés avec une approche semi-distribuée.

L'écart que l'on constate entre les résultats des deux approches dépend non seulement des caractéristiques du bassin mais aussi du modèle avec lequel on travaille. Pour un même bassin et des données identiques on peut obtenir selon le modèle utilisé des écarts assez différents entre approche globale et approche semi-distribuée.

En laissant de côté le problème du rôle des modèles, nous constatons que certains bassins bénéficient plus de l'approche semi-distribuée que d'autres. Il existe ainsi des cas où l'approche globale se révèle suffisante. L'inconvénient est que pour l'instant il n'est possible de faire cette remarque pour un bassin qu'après avoir testé les deux approches ce qui dans un contexte opérationnel peut être un handicap. Comment alors choisir l'une des deux approches sans avoir à systématiquement les tester ? En faisant l'hypothèse que les pluies et les comportements des bassins sont à l'origine de ces différences, nous allons dans la section suivante chercher à les relier aux critères définis au chapitre 6.

7.2 Recherche de critères explicatifs des différences entre les approches globale et semi-distribuée

Les critères sélectionnés au chapitre 6 pour décrire les hétérogénéités entre sous bassins sont rappelés dans le tableau Tableau 7.1.

Tableau 7.1 : Liste des critères caractérisant les hétérogénéités entre deux sous bassins

<i>Critères relatifs aux pluies</i>	<i>Critères relatifs aux comportements/ débits</i>
<u>z</u> : rapport des jours de non pluie	<u>S_{moy}</u> : rapport des surfaces des 2 sous bassins
<u>pm</u> : rapport des pluies moyennes	<u>Q_m</u> : rapport des débits moyens
<u>ppm</u> : rapport des pluies moyennes uniquement pour les jours pluvieux	
<u>P_{max}</u> : rapport des pluies maximales	<u>Q_{max}</u> : rapport des débits maximums
<u>ECP</u> : rapport des écarts-types	<u>ECQ</u> : rapport des écarts-types
<u>Cor 1</u> : coefficient de corrélation n°1	<u>I_c</u> : indice de similarité des comportements
<u>Cor 2</u> : coefficient de corrélation n°2	
<u>I_{p1}</u> : indice de similarité des pluies	
	<u>Rend</u> : rapport des rendements

Les écarts de résultats entre les deux approches sont évalués avec les deux variables suivantes :

$$ND-NG \text{ et } NOR = \frac{ND - NG}{100 - NG} \quad \text{Eq. 7.1}$$

Cette deuxième variable, NOR, est introduite parce qu'il n'est pas équivalent d'obtenir une valeur par exemple de 15 pour la première variable si au départ le critère de Nash de l'approche globale est de +5 ou +80. La première variable ND-NG est comparée au gain maximum, 100-NG, que l'on pourrait obtenir avec l'approche semi-distribuée, c'est-à-dire au gain obtenu si l'approche semi-distribuée avait correspondu à une modélisation parfaite. Cette variable est bornée par la valeur de 1 qui correspondrait à un critère de Nash en modélisation semi-distribuée de 100%. Plus les valeurs décroissent et s'éloignent de 1, moins l'approche semi-distribuée creuse l'écart avec l'approche globale.

Nous avons essayé de classer les critères explicatifs au moyen d'une Analyse en Composantes Principales. Les résultats de l'ACP sont décevants. En effet si certains indices sont parfois bien corrélés aux axes, ce n'est jamais le cas de nos deux variables à expliquer.

Il faut donc se contenter de tracer les graphiques qui présentent en ordonnée les variables précédentes et en abscisse les valeurs des critères : les seuls qui semblent intéressants sont ceux de cor2, cor1 et Ip1. Ces trois indices étant très corrélés nous ne présentons que les graphiques de cor2 (cor1 et Ip1 présentent des résultats similaires).

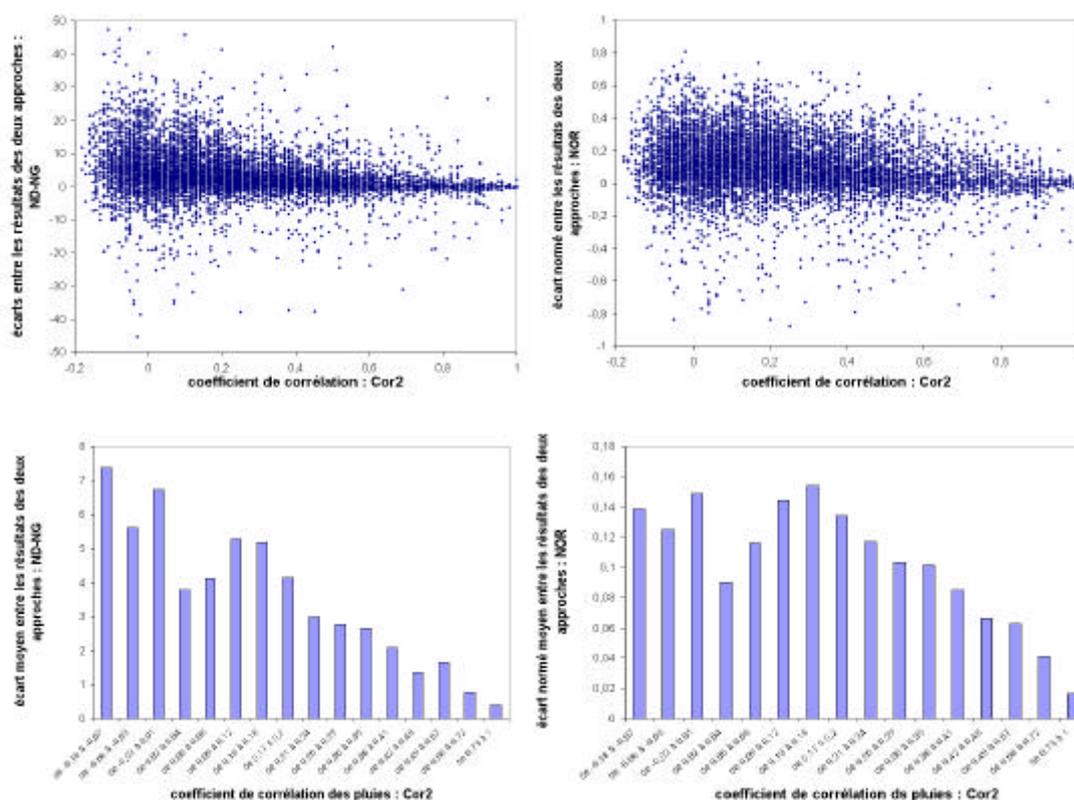


Figure 7.4 : Modèle GR4J - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi-distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.

L'évolution est relativement nette, beaucoup plus que pour les autres indices. Pour des valeurs du coefficient de corrélation proches de 1, le nuage de points est pratiquement confondu avec l'axe des abscisses ce qui montre que pour des pluies bien corrélées les approches globale et semi-distribuée sont équivalentes. Ce n'est plus le cas lorsque le coefficient de corrélation diminue : le nuage de points est beaucoup plus étalé. Comme le montre l'histogramme représentant l'écart non normé ND-NG entre les deux approches, l'approche semi-distribuée est en moyenne plus intéressante. Cependant comme l'indiquent les nuages de points, l'incertitude sur le gain que l'on peut espérer avec l'approche semi-distribuée augmente considérablement. De plus le gain normé NOR, pour des valeurs du coefficient de corrélation des pluies inférieures à approximativement 0,13, stagne voire même diminue. C'est donc pour les plus faibles valeurs du coefficient de corrélation que peuvent être obtenus les plus forts écarts entre les deux approches, jusqu'à 50 points (en dehors de cas très exceptionnels), cependant cela n'est pas la garantie d'obtenir de bons

critères de Nash puisque pour ces mêmes valeurs du coefficient de corrélation le gain normé NOR tend à diminuer. Or ce gain normé compare l'écart entre l'approche semi-distribuée et l'approche globale à l'écart qui existerait entre l'approche globale et une modélisation parfaite. Si le gain normé diminue cela montre donc que l'on s'éloigne de très bons résultats.

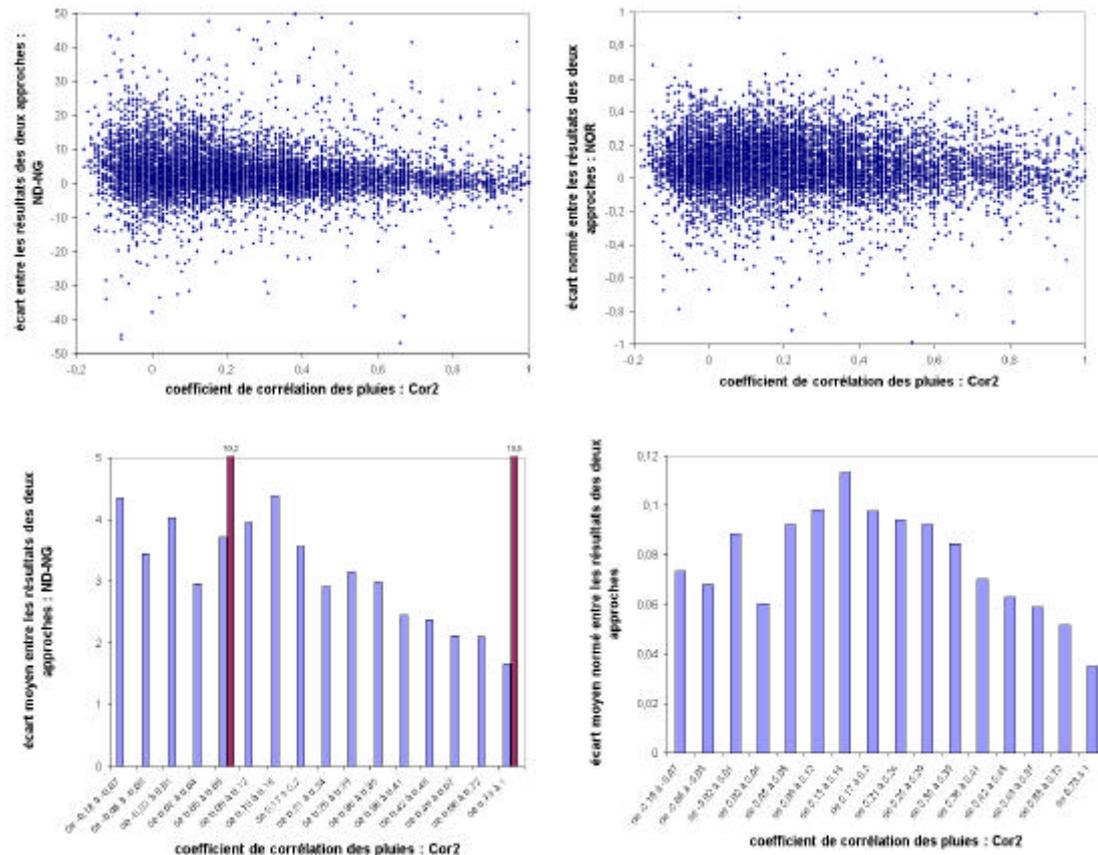


Figure 7.5 : Modèle HBV - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi-distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.

Les résultats sont similaires pour le modèle HBV. La décroissance de l'histogramme est cependant peut-être un peu moins nette que pour GR4J pour le gain non normé ND-NG et de faibles valeurs du coefficient de corrélation. Les barres rouges présentent les résultats que l'on obtient en conservant deux valeurs très fortes de la variable ND-NG qui sont d'environ 4000 et 6000 points et qui à elles seules modifient considérablement les moyennes bien que chaque classe de l'histogramme contienne au moins 500 points/ bassins chacune.

Les remarques sont les mêmes que pour GR4J :

- Des approches équivalentes pour de faibles valeurs du coefficient de corrélation
- Une approche semi-distribuée en moyenne plus intéressante pour une mauvaise corrélation mais associée à une variabilité très importante du gain.

- Un gain normé qui n'augmente plus à partir d'une certaine valeur du coefficient de corrélation.

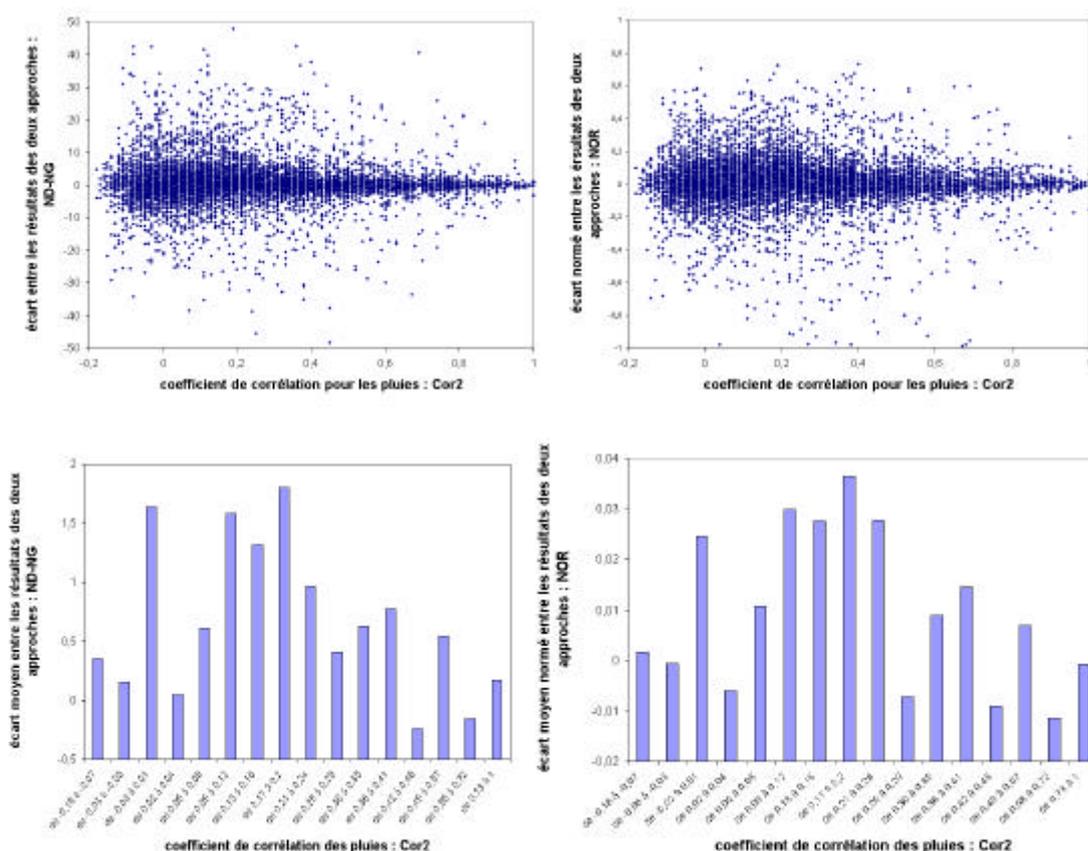


Figure 7.6 : Modèle IHAC - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi-distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.

IHAC est le seul des quatre modèles pour lequel les résultats ne s'améliorent pas avec l'approche semi-distribuée : les deux nuages de points sont symétriques par rapport à l'axe des abscisses et les histogrammes ne peuvent présenter aucune évolution claire, les valeurs ne s'écartant jamais réellement de 0. Pour le modèle IHAC les approches globale et semi-distribuée sont donc en moyenne équivalentes et le coefficient de corrélation des pluies n'apparaît plus comme étant un critère satisfaisant pour trier les bassins.

Ceci d'ailleurs modère l'intérêt de ces critères (Tableau 6.1) qui ne prennent en compte que les caractéristiques propres au bassin, à travers les chroniques de pluies et de débits, sans inclure les caractéristiques du modèle. Or pour un même bassin manifestement les résultats dépendent aussi du modèle.

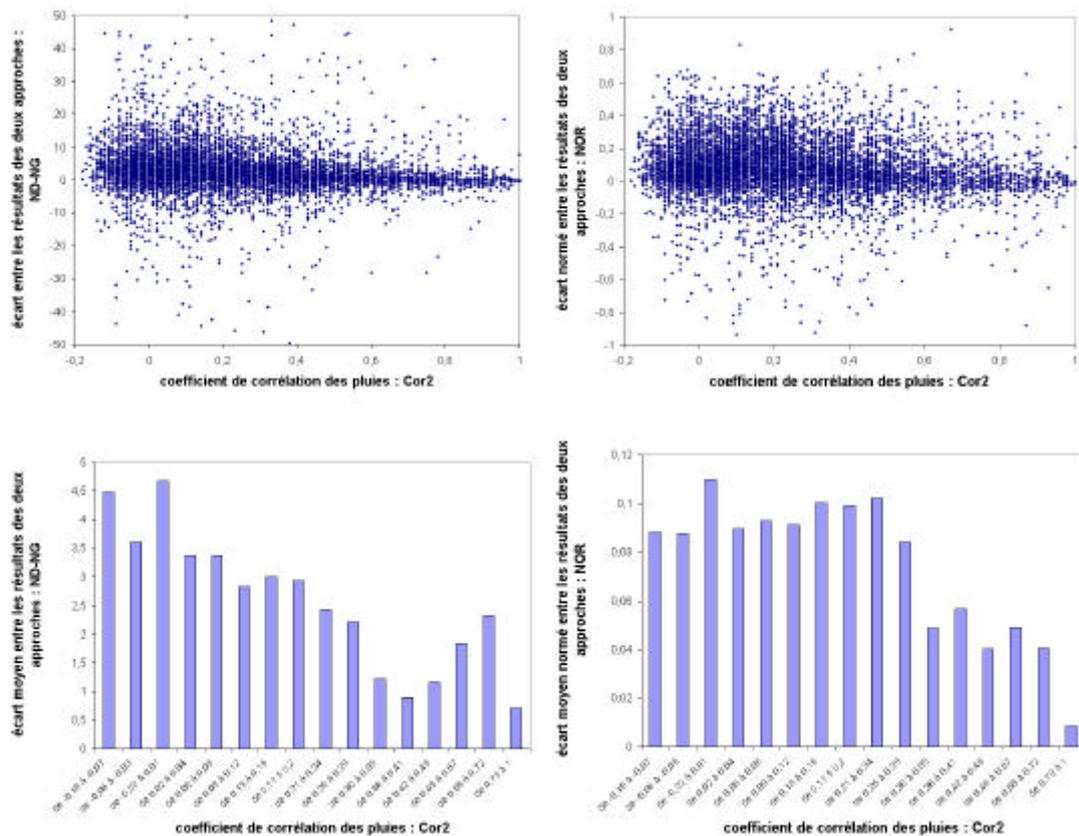


Figure 7.7 : Modèle TOPMO - Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi-distribuée en fonction de la corrélation des pluies entre sous bassins.

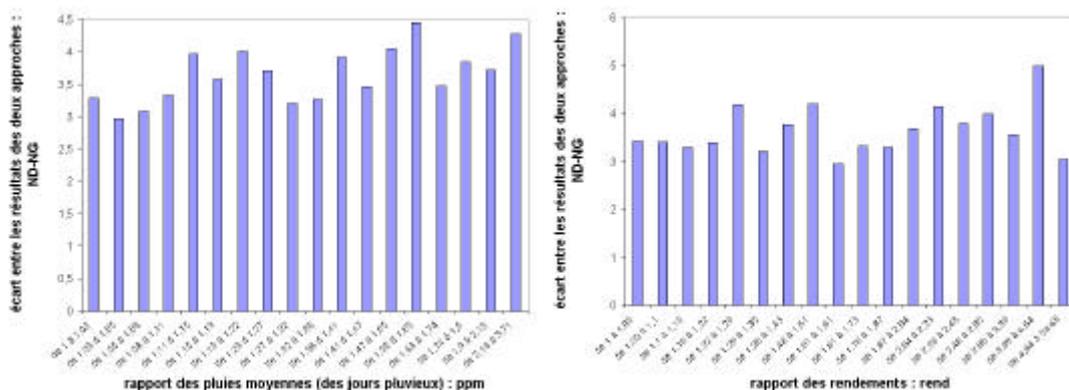
Le modèle TOPMO ne présente pas de nouvelle caractéristique et peut être classé dans la même catégorie de modèles que HBV et GR4J. Notons seulement que les amplitudes pour le gain non normé ND-NG ne sont pas identiques : GR4J possède la plus forte amplitude, elle va de 7,5 à 0,5, puis vient TOPMO avec des valeurs allant de 4,5 à 0,5 et HBV de 4,5 à 2. Pour IHAC l'amplitude est bien évidemment nulle.

Pour les autres critères il est difficile de tirer un quelconque enseignement des graphiques sous forme de nuages de points (Annexe 2 : Présentation des graphiques pour l'ensemble des critères) excepté pour cor2 (et donc cor1 et Ip1 qui présentent des résultats similaires) (Figure 7.4 à Figure 7.7). Cependant certains paraissent plus clairs sous forme d'histogrammes en dépit de la difficulté à tracer ces nouveaux graphiques : même si les nuages peuvent être très étalés, de nombreux points se concentrent souvent au même endroit. C'est pourquoi afin de pallier à cet inconvénient nous avons imposé à chaque classe de l'histogramme de contenir au moins 500 points.

Nous classons ces histogrammes, tracés pour le modèle GR4J, dans les trois catégories suivantes :

➤ Aucune information :

C'est le cas de ppm et du rendement : aucune évolution intéressante n'est visible

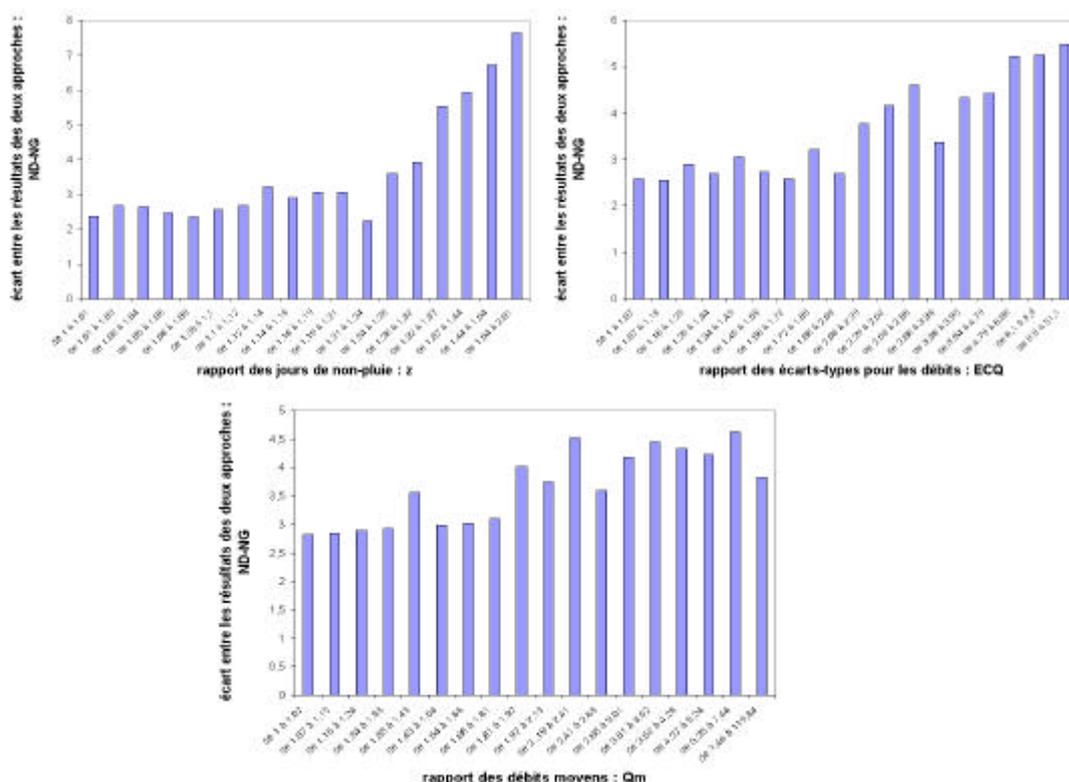


Ces deux indices n'apportent aucune information puisqu'ils restent quasi constants pour l'ensemble des bassins.

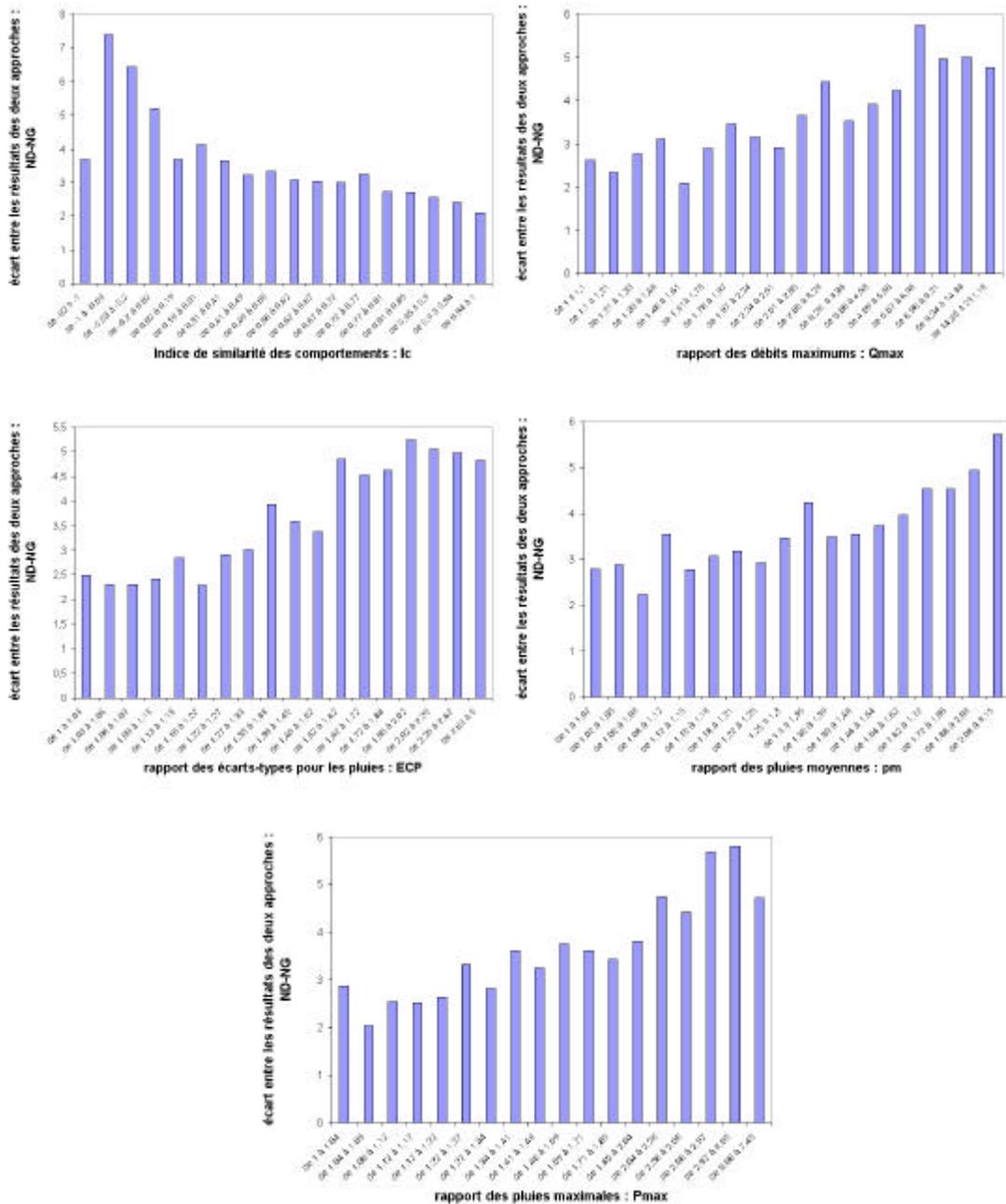
➤ Indices faiblement informatifs :

C'est le cas de Qm, ECQ, Ic, Qmax pour les débits et ECP, pm, Pmax, z pour les pluies. Certains présentent des histogrammes qui pourraient être découpés en deux zones : deux zones où l'indice prend des valeurs constantes mais différentes d'une zone à l'autre, une zone où l'indice stagne puis croît dans la deuxième. Les autres indices ont une (dé)croissance régulière.

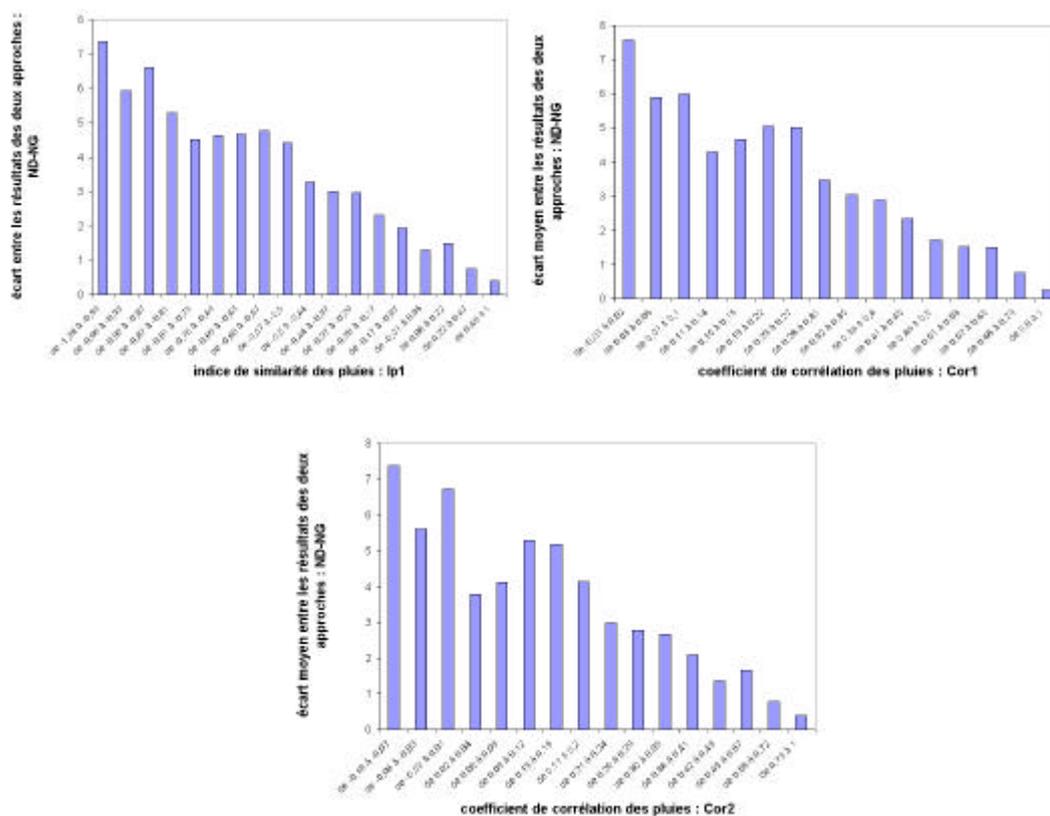
- Indices présentant 2 zones distinctes



- Indices présentant une (dé)croissance « régulière » :



➤ Indice(s) informatif(s) :



Le rapport des pluies moyennes (des jours pluvieux) *ppm* et le rapport des rendements *rend* ne sont donc pas des critères valables pour choisir entre une approche globale et une approche semi-distribuée. Les critères les plus pertinents sont les coefficients de corrélations des pluies *cor1*, *cor2* et l'indice de similarité des pluies *Ip1*, même si ces indices ont l'inconvénient d'être entachés par la grande variabilité du gain que présente l'approche semi-distribuée. Le reste des indices, sans trier aussi efficacement les bassins, permet cependant d'évaluer le «degré» d'hétérogénéité du bassin.

Notons que les critères les plus intéressants sont calculés à partir des pluies. Deux hypothèses peuvent être faites : soit les pluies sont réellement la variable la plus intéressante à distribuer et le comportement des bassins ne présente qu'un intérêt négligeable pour une approche semi-distribuée, soit les comportement des bassins sont beaucoup plus mal représentés par les critères utilisés que les pluies ce qui masque leur influence. Nous nous contentons de travailler avec les débits parce qu'il est difficile de déterminer quels sont les processus ou caractéristiques qui influent sur les résultats du modèle. D'ailleurs en supposant que les caractéristiques du bassin s'expriment à travers les paramètres du modèles, il n'est pas encore possible d'obtenir des paramètres fiables pour les modèles conceptuels à partir des seules mesures de terrain et en l'absence de calage, même si pour certains bassins et modèles les paramètres peuvent être en partie reliés à une classification hydrologique des sols (Dunn et Lilly, 2001).

Un peu à part, la surface joue aussi un rôle sur les performances des approches globale et semi-distribuée.

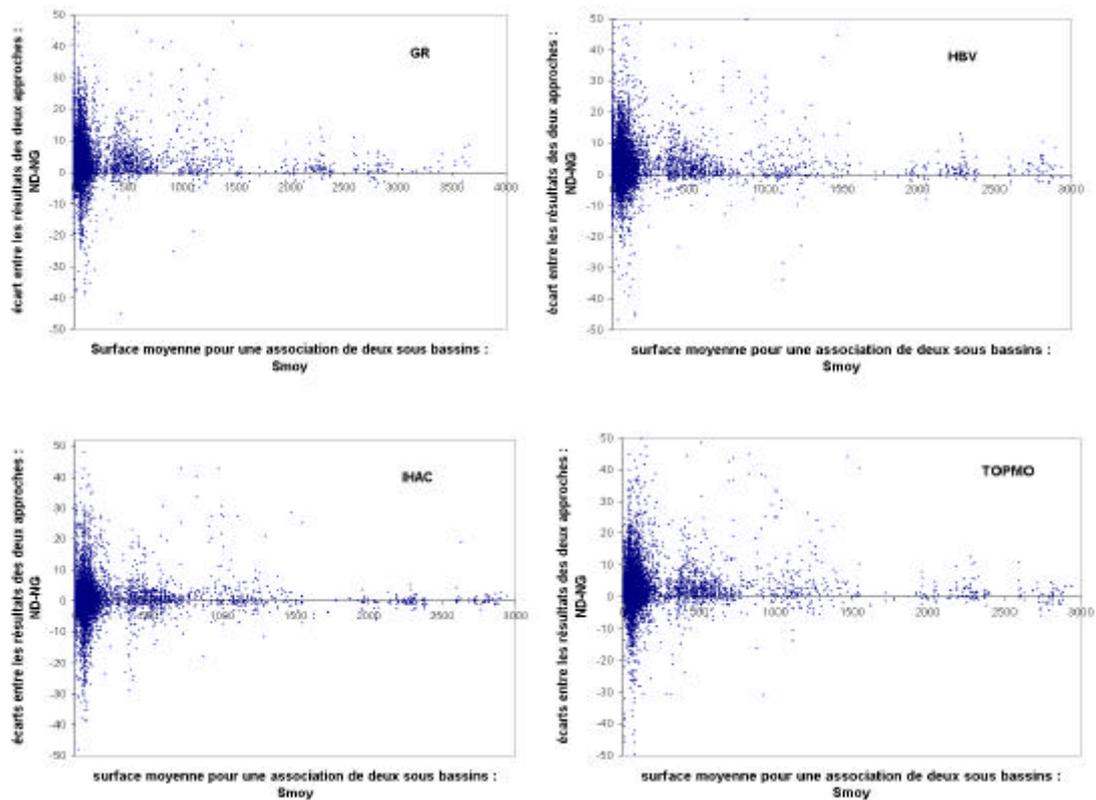


Figure 7.8 : Evolution des écarts de résultats entre les approches globale et semi-distribuée en fonction de la surface des sous bassins.

Pour les faibles surfaces l'écart entre les deux approches est très variable : les valeurs prises par la variable ND-NG peuvent être élevées qu'elles soient positives ou négatives. Ce n'est que pour des surfaces importantes que l'écart se stabilise vers de plus faibles valeurs, le plus souvent positives. Il peut donc être parfois beaucoup plus intéressant de découper un petit bassin versant qu'un grand qui, parce qu'il présente une grande variété de comportements, finit par ne plus présenter qu'un comportement moyen. Néanmoins l'inconvénient de ces graphiques est que la plupart des bassins se trouvent dans la zone des petites surfaces ce qui limite le nombre de points présentant des superficies plus importantes et donc notre interprétation.

7.3 Impacts respectifs de la spatialisation des pluies et des comportements hydrologiques

L'objectif de ce paragraphe est de démêler les effets dus au comportement du bassin et ceux dus à la variabilité spatiale des pluies. En passant de l'approche globale à l'approche semi-distribuée, on distribue à la fois les précipitations et les comportements (par l'intermédiaire des paramètres). Mais quelle est la part de la spatialisation des pluies et la part de la spatialisation des comportements dans l'amélioration des résultats ? Pour répondre à cette question quatre versions des modèles (présentées dans le paragraphe 5.4), en plus des versions globale et semi-distribuée, sont testées. Avec l'approche globale on ne distribue ni les pluies, ni les paramètres. Avec l'approche semi-distribuée on distribue les pluies et les paramètres. Dans ces quatre versions supplémentaires on distribue soit les pluies, soit les paramètres afin de différencier leurs effets. Le Tableau 7.2 présente l'ensemble des versions.

	Version semi-distribuée	Versions mixtes		Version globale
		Pluies distribuées	Comportements distribués	
<u>Calage + Validation</u>	<p>comportement</p>			<p>comportement</p>
<u>Validation seule</u>		<p>pluie</p>	<p>pluie</p>	

Tableau 7.2 : Récapitulatif des différentes versions du modèle

7.3.1 Nette prépondérance de la variabilité spatiale des pluies

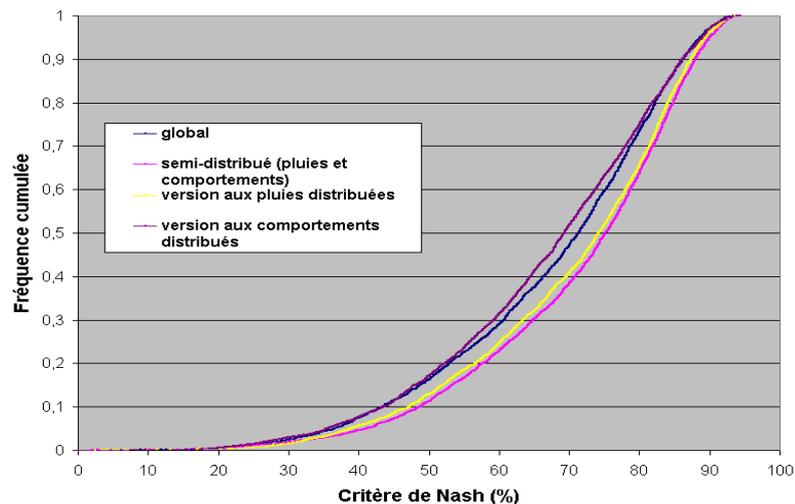


Figure 7.9 : GR4J - Comparaison des contributions des pluies et des comportements à l'amélioration des résultats observée pour l'approche semi-distribuée

On compare ici les résultats pour GR4J des deux versions mixtes faisant à la fois intervenir une phase de calage et une phase de validation à ceux obtenus avec les approches globale et semi-distribuée. Une des versions se caractérise par des pluies distribuées et un comportement global tandis que la seconde se caractérise par une pluie globale et des comportements distribués.

Assurément c'est la prise en compte de la variabilité spatiale des pluies qui peut faire le succès d'une approche semi-distribuée pour un modèle pluie-débit conceptuel. La courbe associée à la version utilisant une pluie distribuée et un comportement global (puisqu'elle impose aux deux sous bassins d'avoir le même jeu de paramètres) est très proche de celle associée à l'approche semi-distribuée. La quasi-totalité de l'écart entre l'approche globale et l'approche semi-distribuée est couvert par cette version qui néglige la variabilité spatiale des paramètres/ comportements.

La deuxième version (pluie globale et comportements distribués) présentent de très mauvais résultats puisqu'ils sont moins bons que ceux obtenus avec l'approche globale. Il est cependant difficile d'interpréter ces résultats : le calage des paramètres sur des pluies et des débits qui ne proviennent pas du même bassin ne peut produire qu'un modèle mal adapté aux bassins étudiés. Et si la calage n'est pas bon, de bons résultats ne peuvent être espérés en validation, étape pour laquelle les résultats se dégradent de façon plus ou moins importante. Néanmoins ces résultats indiquent qu'il est inutile de songer à distribuer des paramètres (ce qui revient à doubler le nombre de paramètres) si l'on ne dispose de données de pluies suffisantes pour pouvoir aussi distribuer les entrées du modèle.

La première étape d'une modélisation semi-distribuée est donc l'obtention de données de pluies suffisamment détaillées pour être distribuées. Ce n'est qu'ensuite que peut être envisagée la distribution des paramètres qui n'est que secondaire mais peut apporter une amélioration puisque les courbes de l'approche semi-distribuée et de la version mixte aux pluies distribuées ne sont pas

confondues. Par contre si l'on ne dispose que d'une pluie globale il est préférable de se contenter d'une approche globale.

7.3.2 Utilisation d'un modèle existant avec une information de pluies modifiée

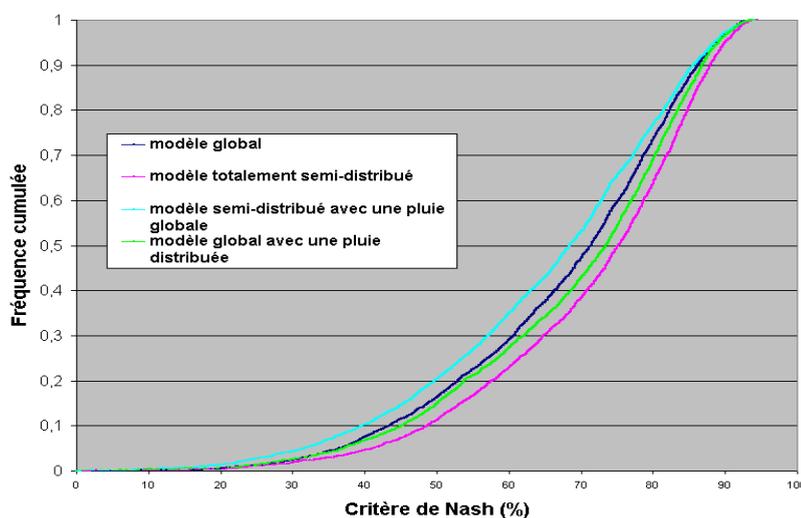


Figure 7.10 : GR4J - Evolution des résultats d'un modèle existant utilisé avec des données de pluies dégradées ou enrichies

L'objectif de ces versions est d'évaluer l'évolution des résultats d'un modèle calé pour être global et utilisé avec des pluies distribuées et celle des résultats d'un modèle calé pour être semi-distribué et utilisé avec une pluie globale.

On constate qu'un modèle global utilisé avec une pluie distribuée, sans être équivalent à une approche semi-distribuée, peut produire des résultats plus précis qu'une approche globale. Ce n'est pas le cas d'un modèle initialement semi-distribué et pour lequel on ne dispose plus que d'une pluie globale : on observe une détérioration des résultats par rapport à l'approche globale.

Dans le cas où l'on ne désire pas recalibrer le modèle, on ne peut en modifier l'utilisation que si ce changement fait intervenir des données de pluies plus précises.

7.4 Ré-interprétation des résultats de Baudez (1997)

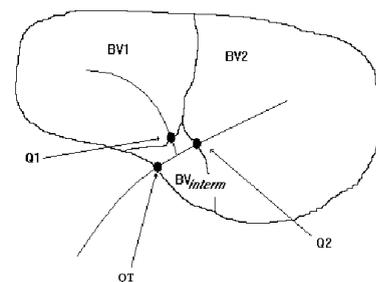
L'étude de Baudez avait conclu qu'il n'existait pas de différence significative entre les approches globale et semi-distribuée, ni de lien entre les différents résultats observés pour chaque bassin selon l'approche choisie et des éléments comme la pédologie, la géologie, le couvert végétal, la densité de drainage et la topographie.

Nous reprenons ces résultats en essayant de les relier à nos critères et notamment au coefficient de corrélation des pluies qui s'est avéré être le critère le plus intéressant.

Aube			90	89	Cantal			86	84	Gard			88	85						
0,89	0,78	0,86	87	92	86	91	0,94	0,8	0,93	80	78	79	78	0,96	0,91	0,96	86	77	86	78
Corrèze			92	91	Vienne			90	90	Côte d'or			92	91						
0,94	0,88	0,93	89	88	90	89	0,91	0,81	0,89	87	90	87	91	0,92	0,85	0,91	91	91	92	91
Lozère			86	86	Aveyron			67	64	Ain			59	62						
0,91	0,82	0,9	74	66	75	66	0,94	0,88	0,94	71	56	72	57	0,89	0,7	0,86	51	46	55	50
Lozère 2			83	84	Saône			93	93	Moselle			55	76						
0,91	0,82	0,9	72	77	71	78	0,94	0,88	0,93	91	89	92	90	0,91	0,79	0,89	76	73	75	74
Essonne			68	56	Aube 2			93	93	Vosges			89	88						
1	1	1	63	61	61	61	0,93	0,86	0,91	93	90	92	89	0,91	0,76	0,89	83	85	82	83
Bassin			<i>Meilleur critère de Nash parmi les modélisations semi-distribuées de Baudez (de 0 à 2 constantes supplémentaires)</i>										<i>Nash global NG (Baudez)</i>							
Cor1	Ip1	Cor2	Nash semi-distribué ND 1					ND 2					NG 1	NG 2						

Tableau 7.3 : Comparaison des résultats pour quinze bassins versants considérés soit comme réels (Baudez), soit comme virtuels

Il est nécessaire de comparer les résultats des modélisations parce qu'elles ne sont pas tout à fait identiques : l'étude de Baudez (1997) concernait des bassins versants réels et non pas des bassins virtuels ce qui l'obligeait à prendre en compte pour ses modélisations semi-distribuées un troisième bassin intermédiaire, qui disparaît lorsque l'on utilise des bassins virtuels, et à introduire jusqu'à deux paramètres supplémentaires.



Les résultats de Baudez sont des moyennes de modélisations sur différentes périodes pour les trois approches semi-distribuées et l'approche globale. Pour notre étude les résultats des modélisations sont présentés sur des périodes différentes, ce ne sont donc pas des moyennes. (Tableau 7.3)

Quelques bassins, «Cantal», «Lozère», «Ain», «Lozère 2», présentent des résultats un peu différents d'une étude à l'autre. Cependant pour l'ensemble des bassins les résultats sont similaires pour les deux approches (semi-distribuée et globale). Ces résultats étant associés à des coefficients de corrélation élevés, nous nous attendions à ne pas observer de grandes différences entre les deux approches.

Néanmoins les bassins «Moselle» et «Essonne» posent problème. Avec la méthode des bassins virtuels le bassin «Moselle» obtient de bons résultats à la fois avec un modèle global et un modèle semi-distribué. Ce n'est plus le cas en travaillant sur les bassins réels : les résultats chutent considérablement avec l'approche semi-distribuée. Il est possible que la manière d'intégrer le troisième bassin intermédiaire ne soit pas satisfaisante pour ce bassin ou que l'une des stations hydrométriques pose un problème. Le bassin «Essonne» pose un autre problème : si avec des bassins virtuels les deux approches sont équivalentes, ce n'est plus le cas avec des bassins réels qui sont plus adaptés à l'approche semi-distribuée, alors que les coefficients de corrélation obtenus sont de 1 ! Ce bassin présentait une variance relativement élevée par rapport aux autres bassins pour l'approche globale avec bassins réels ce qui indique qu'il est peut-être difficile de se contenter d'une simple moyenne pour les résultats de l'approche globale. Un intervalle de confiance aurait été nécessaire.

Cependant les résultats restent cohérents : Baudez ne relevait pas de différences significatives entre les deux approches, les coefficients de corrélation présentent tous des valeurs élevées ce qui est le signe de bassins pour lesquels l'approche semi-distribuée n'apporte pas de réelles améliorations. Notons juste cette remarque de Baudez : « (...) si l'approche semi-distribuée n'engendre pas des critères de Nash très supérieurs à ceux de l'approche globale, les variances sont souvent plus petites ce qui semble signifier que la partition d'un bassin versant entraîne une plus grande stabilité des résultats dans la modélisation pluie-débit. » (Baudez, 1997)

8. Conclusion

Nous avons testé pour 4500 bassins virtuels et quatre modèles conceptuels (GR4J, HBV, IHAC et TOPMO) les approches globale et semi-distribuée afin d'en comparer les résultats. Cette notion de bassins virtuels (car composés de deux bassins réels n'ayant pas forcément de proximité géographique) peut surprendre mais elle présentait la seule opportunité de constituer un échantillon de taille suffisante, permettant de pallier aux problèmes identifiés dans les études précédentes (Baudez (1997) et Morvan (2000)). Cela nous a en effet permis de travailler sur de nombreux bassins présentant des caractéristiques très variées ce qui est un atout pour comparer les approches globale et semi-distribuée et interpréter les différences. La volonté de se placer dans un contexte opérationnel a conditionné le choix des modèles. Les modèles conceptuels sont en effet les modèles les plus utilisés pour ce genre d'études car ils représentent un bon compromis entre données nécessaires et résultats. C'est un domaine où l'approche semi-distribuée pourrait beaucoup apporter si elle était bien maîtrisée d'où notre tentative d'explications des résultats : pour comprendre les écarts entre les deux approches, nous avons commencé par rechercher des critères explicatifs calculés sur la base des pluies et des débits. Nous avons ensuite utilisé des versions dégradées de l'approche semi-distribuée, en distribuant soit les pluies soit les débits, afin d'en différencier les effets.

Ces deux étapes ont permis de mettre en évidence les résultats suivants. Le critère explicatif le plus efficace pour prévoir l'avantage probable d'une approche distribuée pour un bassin donné se calcule à partir des précipitations : c'est le coefficient de corrélation des pluies des deux sous bassins. Pour des pluies bien corrélées, les approches globale et semi-distribuée sont équivalentes. L'approche semi-distribuée prend nettement le pas sur l'approche globale pour de plus faibles valeurs du coefficient de corrélation, le gain amené par l'approche semi-distribuée étant cependant caractérisé par une très grande variabilité. Ces résultats sont valables pour HBV, GR4J et TOPMO mais pas pour IHAC le seul des quatre modèles qui, en moyenne, ne parvient pas à tirer parti de l'approche semi-distribuée. Quant aux versions des modèles distribuant soit les pluies, soit les paramètres, elles indiquent clairement que c'est la prise en compte de la variabilité spatiale des précipitations qui permet d'expliquer l'amélioration des résultats constatée pour l'approche semi-distribuée. Une autre approche complétant ces résultats peut être consultée en Annexe 3.

Nous comprenons à présent pourquoi les publications hydrologiques comparant les deux approches présentent des résultats si variés : aucune des deux approches n'est invariablement supérieure à l'autre, les résultats dépendant du bassin et notamment des caractéristiques des précipitations sur ses sous bassins. Il est donc normal, en travaillant sur seulement quelques bassins, d'observer des résultats différents d'une étude à l'autre. Revenons aux publications concluant à la supériorité de l'approche (semi) distribuée : Corral et al. (2000) observent bien une amélioration des résultats en distribuant les pluies, et leur travail concerne un bassin versant caractérisé par la grande variabilité spatiale et temporelle de ses événements pluvieux. De même, Boyle et al. (2001), dont la méthode est en partie semblable à la nôtre, retrouvent ce résultat : en distribuant successivement les variables du modèle, les auteurs relèvent que les précipitations mais aussi la teneur en eau et la fonction de routage sont à l'origine de l'amélioration des résultats et non les paramètres associés aux propriétés des sols. Dans l'étude de Kite et Kouwen (1992) le bassin est divisé selon des

considérations d'occupation des sols. Cependant comme le modèle est appliqué à chaque nouvelle unité, ce sont à la fois les paramètres et les pluies qui sont distribués sans que l'on sache laquelle des variables a le plus d'importance. Quant à l'étude de Baudez (1997) le coefficient de corrélation des pluies indique que les bassins utilisés étaient trop homogènes pour pouvoir conclure.

D'autres pistes de recherche restent à explorer notamment les critères morphométriques et le nombre optimum de sous bassins. Les caractéristiques morphométriques des bassins n'ont pas été intégrées à cette étude parce que les seules données que nous possédions étaient les valeurs des surfaces. Il aurait cependant été intéressant de pouvoir déterminer plus précisément le rôle de la topographie du bassin à l'aide, par exemple, d'indices de pente ou de la dispersion des altitudes. Quant au nombre de sous bassins versants il n'a pas non plus été pris en compte, les bassins initiaux étant systématiquement divisés en deux sous bassins. Même si la division effectuée, du fait de la construction des bassins, est probablement la plus pertinente on peut se demander comment faire pour déterminer le nombre optimum de sous bassins pour un bassin réel, puisqu'un accroissement du nombre de sous bassins ne se traduit pas toujours par une amélioration des résultats (Becker et Braun, 1999; Boyle et al., 2001) et que certains modèles, selon leur fonction de production, sont plus ou moins sensibles à l'échelle à laquelle est découpé le bassin dans le cas de pluies distribuées (Koren et al., 1999).

Bibliographie

- Abbott, M.B. and Refsgaard, J.C. (Editors), 1996. Distributed hydrological modelling. Water Science and Technology Library, 22. Kluwer Academic Publishers, 323 p pp.
- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-sanchez, I. and Lavabre, J., 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 250: 206-223.
- Arnaud, P., Bouvier, C., Cisneros, L. and Dominguez, R., 2002. Influence of rainfall spatial variability on flood prediction. *Journal of Hydrology*, 260: 216-230.
- Baudez, J.C., 1997. Déterminants hydrologiques régionaux pour la gestion et la prévision des ressources en eau, Mémoire de troisième année ENGEES, 88 pp.
- Becker, A. and Braun, P., 1999. Disaggregation, aggregation and spatial scaling in hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 217: 239-252.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, 105: 157-172.
- Beven, K., 1997. TOPMODEL : a critique. *Hydrological processes*, 11: 1069-1085.
- Beven, K.J. and Hornberger, G.M., 1982. Assessing the effect of spatial pattern of precipitation in modeling stream flow hydrographs. *Water Resources Bulletin*, 18(5): 823-829.
- Boyle, D.P. et al., 2001. Toward improved streamflow forecasts : value of semidistributed modeling. *Water Resources Bulletin*, 37(11): 2749-2759.
- Brath, A. and Montanari, A., 2000. The effects of the spatial variability of soil infiltration capacity in distributed flood modelling. *Hydrological Processes*, 14: 2779-2794.
- Corral, C., Sempere-Torres, D., Revilla, M. and Berenguer, M., 2000. A semi-distributed hydrological model using rainfall estimates by radar. Application to mediterranean basins. *Phys. Chem. Earth (B)*, 25(10-12): 1133-1136.
- Dawdy, D.R. and Bergmann, J.M., 1969. Effect of rainfall variability on streamflow simulation. *Water Resources Research*, 5(5): 958-966.
- Diermanse, F.L.M., 1999. Representation of natural heterogeneity in rainfall-runoff models. *Phys. Chem. Earth (B)*, 24(7): 787-792.
- Dunn, S.M. and Lilly, A., 2001. Investigating the relationship between a soils classification and the spatial parameters of a conceptual catchment-scale hydrological model. *Journal of Hydrology*, 252: 157-173.
- Edijatno and Michel, C., 1989. Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, 2: 113-121.
- Faurès, J.M., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A. and Sorooshian, S., 1995. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 173: 309-326.
- Franchini, M., Wendling, J., Obled, C. and Todini, E., 1996. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, 175: 293-338.
- Gárfias, J., Verrette, J.-L., Antigüedad, I. and André, C., 1996. Choix d'un modèle pluie-ruissellement pour des conditions hydrologiques complexes. *Journal of Hydrology*, 176: 227-247.
- Goodrich, D.C., Faurès, J.M., Woolhiser, D.A., Lane, L.J. and Sorooshian, S., 1995. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability. *Journal of Hydrology*, 173: 283-308.
-

-
- Grove, M., Harbor, J. and Engel, B., 1998. Composite vs distributed curve numbers : effects on estimates of storm runoff depths. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(5): 1015-1023.
- Hinzman, L.D. and Kane, D.L., 1991. Snow hydrology of a headwater arctic basin. 2. Conceptual analysis and computer modeling. *Water Resources Research*, 27(6): 1111-1121.
- Kite, G.W. and Kouwen, N., 1992. Watershed modeling using land classifications. *Water Resources Research*, 28(12): 3193-3200.
- Kokkonen, T., Koivusalo, H. and Karvonen, T., 2001. A semi-distributed approach to rainfall-runoff modelling - a case study in a snow affected catchment. *Environmental Modelling & Software*, 16: 481-493.
- Krysanova, V., Bronstert, A. and Müller-Wohlfeil, D.-I., 1999. Modelling river discharge for large drainage basins : from lumped to distributed approach. *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*, 44(2): 313-331.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S., 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201: 272-288.
- Merz, B. and Plate, E.J., 1997. An analysis of the effects of spatial variability of soil and soil moisture on runoff. *Water Resources Research*, 33(12): 2909-2922.
- Michaud, J. and Sorooshian, S., 1994. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a mid-sized semiarid catchment. *Water Resources Bulletin*, 30(3): 593-605.
- Moglen, G.E., 2000. Effect of orientation of spatially distributed curve numbers in runoff calculations. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(6): 1391-1400.
- Morvan, X., 2000. Comparaison de deux approches de modélisation hydrologique : l'une globale, l'autre distribuée, en s'appuyant sur les données du bassin du Rhône., *Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie / Université Paris-Sud Orsay / ENSMP/ENGREF*, 77 pp.
- Muetzelfeldt, R.I. and Yanai, R.D., 1996. Model transformation rules and model disaggregation. *The Science of the Total Environment*, 183: 25-31.
- Pauwels, V.R.N., Hoeben, R., Verhoest, N.E.C. and De Troch, F.P., 2001. The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small-scale basins through data assimilation. *Journal of Hydrology*, 251: 88-102.
- Perrin, C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, *Thèse de doctorat, ENGEES / INPG / Cemagref*, 530 pp.
- Refsgaard, J.C. and Knudsen, J., 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Bulletin*, 32(7): 2189-2202.
- Robinson, J.S. and Sivapalan, M., 1995. Catchment-scale runoff generation model by aggregation and similarity analyses. *Hydrological processes*, 9: 555-574.
- Shah, S.M.S., O'Connell, P.E. and Hosking, J.R.M., 1996. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. 2. Experiments with distributed and lumped models. *Journal of Hydrology*, 175: 89-111.
- Singh, V.P. (Editor), 1995. *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, 1130 p. pp.
- Singh, V.P., 1997. Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. *Hydrological Processes*, 11: 1649-1669.
- Wilson, C.B., Valdes, J.B. and Rodriguez-Iturbe, I., 1979. On the influence of the spatial distribution of rainfall on storm runoff. *Water Resources Research*, 15(2): 321-328.
-

Annexes

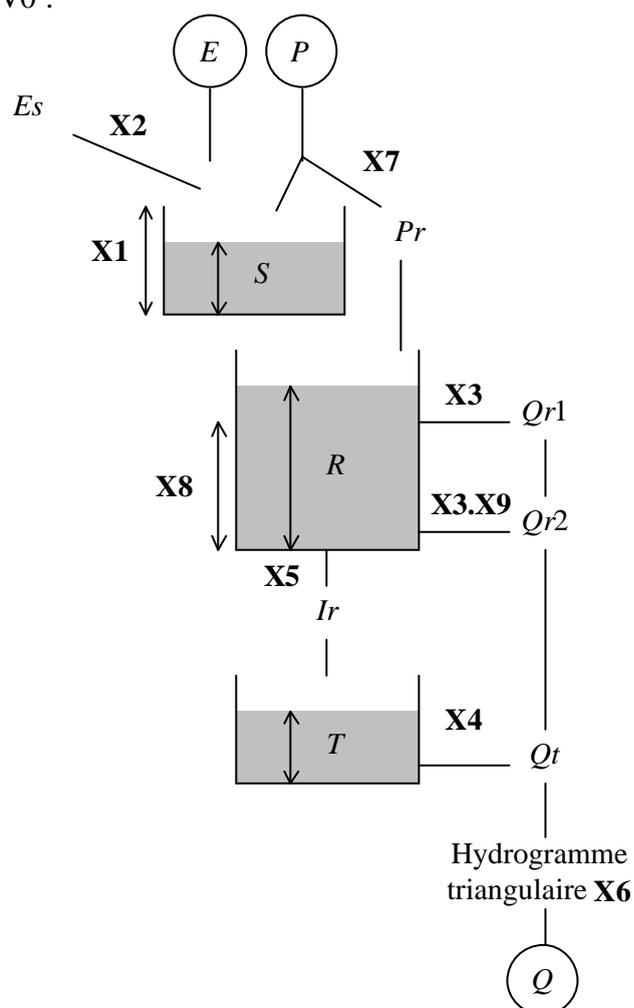
Annexe 1 : Description des modèles

Sont présentés les quatre modèles (HBV0, GR4J, TOPMO et IHAC) utilisés pour comparer les approches globale et semi-distribuée. HBV0, TOPMO et IHAC sont des versions adaptés des modèles initiaux HBV, TOPMODEL et IHACRES.

1. HBV0

Le modèle HBV a été mis au point et modifié depuis 1972 par le SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute). La version utilisée ici sans module neige est à 9 paramètres.

Architecture de HBV0 :



➤ Le réservoir sol :

Le pas de temps de temps est divisé en cinq sous pas de temps pour lesquels on considère un cinquième de la pluie et de l'ETP.

$$Pr = 0$$

$$P_5 = P/5 \text{ et } E_5 = E/5$$

$$Pr_i = P_5 \left(\min \left(1, \frac{S}{X_1} \right) \right)^{X_7} \quad Pr = Pr + Pr_i$$

$$S = S + (P_5 - Pr_i)$$

$$Es_i = \min \left(S, E \frac{S}{X_1} \right) \quad S = S - Es_i$$

➤ Le réservoir intermédiaire :

Ce réservoir recevant la fraction Pr des pluies, son niveau devient $R = R + Pr$. Il se vidange en trois composantes :

- un débit de surface Q_{r1} au dessus du seuil d'écoulement X_8 : $Q_{r1} = \max(0, (R - X_8)/X_3)$, $R = R - Q_{r1}$. X_3 est la constante de vidange supérieure du réservoir intermédiaire.
- un débit de subsurface Q_{r2} : $Q_{r2} = R/(X_3 \cdot X_9)$, $R = R - Q_{r2}$. X_9 est la constante de vidange supérieure du réservoir intermédiaire
- des percolations profondes : $Ir = \min(S, X_5)$ avec X_5 coefficient de percolation. $S = S - Ir$

➤ Le réservoir eau souterraine :

Comme il reçoit les percolations, son niveau devient $T = T + Ir$. Il se vidange avec un débit de base Q_t :

$$Q_t = T/X_4, \quad T = T - Q_t$$

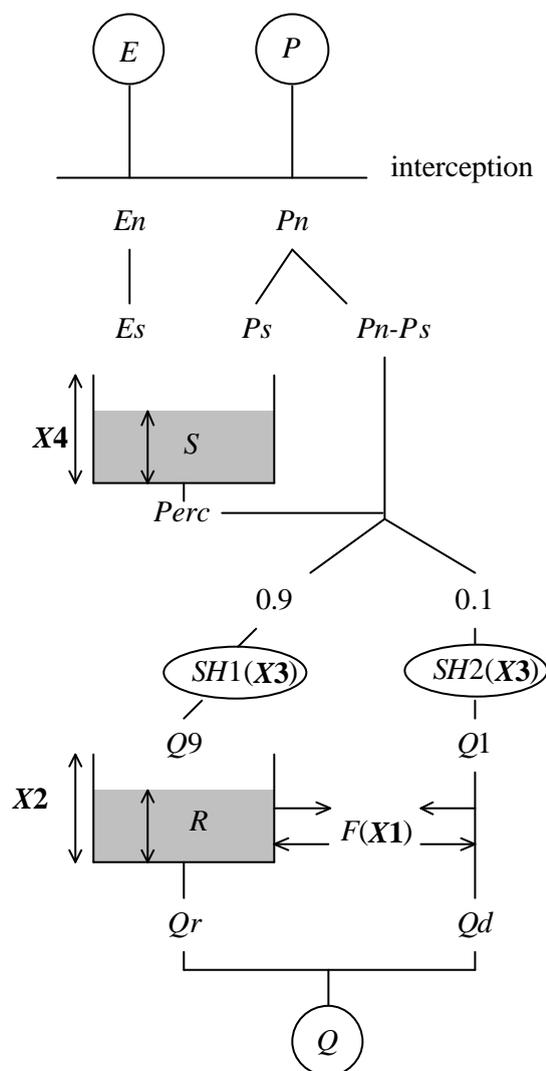
➤ Concentration des écoulements :

Les trois débits Q_{r1} , Q_{r2} et Q_t sont additionnés et la réponse est lissée par un hydrogramme triangulaire de temps de base X_6 .

2. GR4J

Le modèle GR4J fait partie des modèles GR conçus depuis 1983 au Cemagref d'Antony. La version présentée possède 4 paramètres.

Architecture du modèle :



➤ Interactions pluie-évapotranspiration :

La pluie brute P du jour j est soumise à l'évapotranspiration E du jour j . Si $P > E$ alors la pluie nette P_n est déterminée par $P_n = P - E$ et $E_n = 0$, sinon $P_n = 0$ et $E_n = E - P$.

➤ Réservoir sol :

Ce réservoir, caractérisé par sa capacité X_4 exprimé en mm, est alimenté par une partie de la pluie. Ses sorties sont la percolation vers l'hydrogramme unitaire et l'évapotranspiration.

Si à l'entrée du modèle une quantité de pluie dP_n arrive, il entrera alors dans le réservoir sol :

$$\left[1 - \left(\frac{S}{X_4} \right)^2 \right] dP_n.$$

Si $P_n > 0$, $E_n = 0$, la variation du niveau du réservoir sol est alors : $dS = \left[1 - \left(\frac{S}{X_4} \right)^2 \right] dP_n$

En intégrant cette expression on obtient P_s c'est-à-dire la quantité de pluie s'infiltrant le réservoir :

$$P_s = \frac{P_n \left(1 - \left(\frac{S}{X_4} \right)^2 \right)}{1 + \frac{P_n}{X_4} \left(1 + \frac{S}{X_4} \right)}$$

Cette situation correspond au cas où la pluie neutralise l'évapotranspiration ($P_n > 0$, $E_n = 0$)

Dans le cas où l'évapotranspiration neutralise la pluie, une évapotranspiration élémentaire dE_n correspond à une évapotranspiration réelle de

$$\frac{S}{X_4} \left[2 - \left(\frac{S}{X_4} \right) \right] dE_n$$

ce qui correspond à une variation négative du niveau dans le réservoir sol :

$$dS = - \frac{S}{X_4} \left[2 - \left(\frac{S}{X_4} \right) \right] dE_n$$

Après intégration : $E_s = \frac{E_n \frac{S}{X_4} \left(2 - \frac{S}{X_4} \right)}{1 + \frac{E_n}{X_4} \left(2 - \frac{S}{X_4} \right)}$

Si les précipitations et évapotranspiration sont égales, le niveau du réservoir sol ne varie pas. Cependant, quelles que soient les données précédentes, il se produit dans le réservoir une percolation qui rejoindra le terme $P_n - P_s$, le niveau du réservoir étant $S = S + P_s - E_s$:

$$perc = S - \left[S^{-4} + \left(\frac{9}{4} X_4 \right)^{-4} \right]^{-\frac{1}{4}}$$

Le niveau définitif du réservoir sol en fin de pas de temps est : $S = S - perc$.

➤ Les hydrogrammes unitaires :

L'eau est ensuite propagée par deux hydrogrammes unitaires dépendant d'un seul paramètre X_3 exprimé en jour.

La première partie qui représente 90 % de l'eau est traitée par l'hydrogramme SH1 et est ensuite introduite dans le réservoir eau gravitaire. Au jour j si :

- $0 \leq j \leq X_3, SH1(j) = \left(\frac{j}{X_3}\right)^{\frac{5}{2}}$
- $j > X_3, SH1(j) = 1$

Q_9 est le débit sortant de SH1.

La deuxième partie qui représente 10 % de l'eau est traitée par l'hydrogramme SH2. Le débit sortant de cet hydrogramme contribue directement au débit de l'exutoire. Au jour j , k étant la partie entière de X_3 et i la partie entière de $2X_3$, si :

- $0 \leq j \leq k, SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X_3}\right)^{\frac{5}{2}}$
- $k < j \leq i, SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X_3}\right)^{\frac{5}{2}}$
- $j > i, SH2(j) = 1$.

Q_1 est le débit issu de SH2.

➤ Le réservoir eau gravitaire :

Ce réservoir reçoit le débit Q_9 et est caractérisé par le paramètre X_2 , exprimé en mm, qui caractérise sa capacité. De plus, il existe un flux noté F échangé avec l'eau souterraine qui est calculé à partir du paramètre X_1 . Si X_1 est positif F est un apport sinon F est une sortie. Le flux F est égal à :

$$F = X_1 \left(\frac{R}{X_2}\right)^{\frac{7}{2}}$$

Cet échange concerne non seulement R mais aussi Q_1 qui deviennent :

$$Q_d = \max(0, Q_1 + F) \text{ et } R = \max(e, R + Q_9 + F)$$

Le réservoir se vidange ensuite selon son niveau avec un débit Q_r :

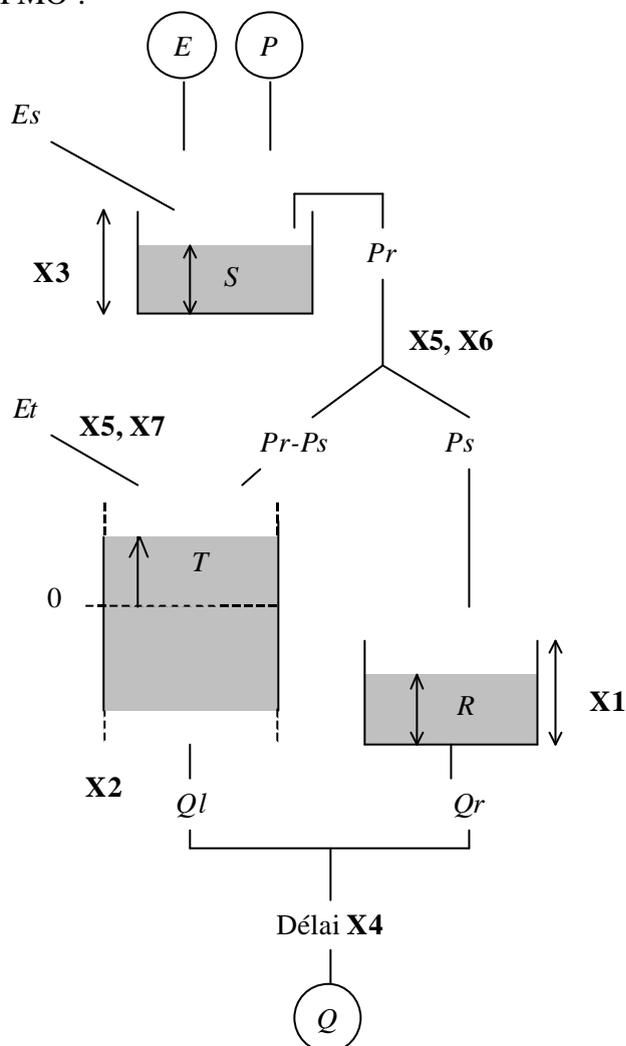
$$Q_r = R - (R^{-4} + X_2^{-4})^{-\frac{1}{4}}$$

Le niveau de ce réservoir en fin de pas de temps devient alors $R=R-Q_r$ et le débit à l'exutoire est donc $Q_{ex}=Q_r+Q_d$.

3. TOPMO

TOPMO est une version modifiée du modèle TOPMODEL de Beven et Kirkby. C'est un modèle à 7 paramètres.

Architecture de TOPMO :



➤ Le réservoir d'interception :

Ce réservoir de capacité X_3 est alimenté par une pluie P , d'où $S=S+P$, et est soumis à une évapotranspiration E_s :

$$E_s = \min(S, E) \text{ d'où } S = S - E_s \text{ et } E' = E - E_s$$

Le débordement Pr du réservoir est séparé en deux composantes, l'une allant dans le réservoir eau souterraine, l'autre dans le réservoir de routage quadratique.

➤ Le réservoir de routage quadratique :

Ce réservoir de capacité X_1 reçoit la pluie P_s :

$$P_s = \frac{P_r}{1 + \exp(X_6 - T / X_5)} \text{ d'où } R=R+P_s.$$

Le réservoir se vidange ensuite avec un débit Q_r :

$$Q_r = \frac{R^5}{R + X_1} \text{ d'où } R=R-Q_r$$

➤ Le réservoir eau souterraine :

C'est un réservoir sans fond de capacité infinie. Il reçoit la composante $P_r - P_s$ du réservoir d'interception : $T=T+P_r - P_s$. Il est aussi soumis à une évapotranspiration E_t :

$$E_s \text{ ou } E_t = \frac{E}{1 + \exp(X_7 - T / X_5)} \text{ d'où } T=T+E_s$$

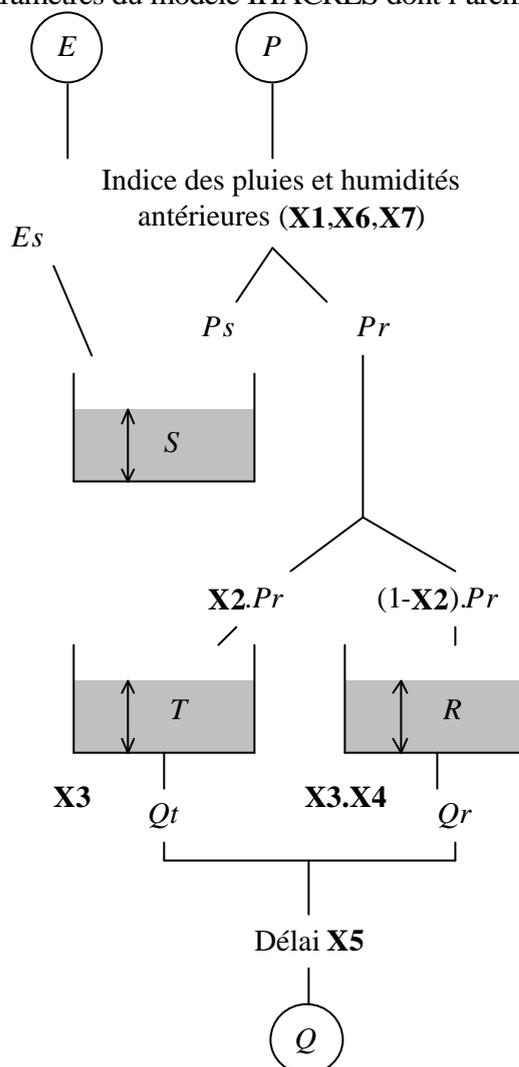
Le réservoir se vidange avec le débit Q_t :

$$Q_t = X_2 \exp\left(\frac{T}{X_2}\right)$$

Le débit à l'exutoire est donc $Q=Q_t+Q_r$ avec une translation dans le temps de X_4 pas de temps.

4. IHACRES

C'est une version à 7 paramètres du modèle IHACRES dont l'architecture est la suivante :



➤ Détermination de la pluie efficace :

La pluie efficace Pr est déterminée de la manière suivante :

On note X_S le niveau initial au début du pas de temps du réservoir S de suivi de l'humidité : $X_S = S$. Ce réservoir est soumis à une évapotranspiration E_s :

$$E_1 = \max(0, X_7 - E/X_6)$$

$$\text{Le niveau du réservoir devient : } S = X_S + \frac{P}{X_1} - \frac{X_S}{\exp(E_1)}$$

A partir des niveaux antérieur et actuel du réservoir il est possible de calculer la pluie efficace :

$$Pr = \frac{1}{2}(XS + S)P$$

➤ Réservoirs de routage :

La pluie efficace est ensuite divisée en deux composantes d'écoulement, l'une rapide, l'autre lente. Les paramètres qui interviennent sont : X_2 le paramètre de partage des écoulements, X_3 la constante de vidange du réservoir de routage rapide et X_4 a constante de vidange du réservoir de routage lent. On obtient les débits suivants en sortie des réservoirs :

$$Q_t = \frac{T}{X_3} \text{ et } Q_r = \frac{R}{X_3 \cdot X_4} \text{ d'où } T=T-Q_t \text{ et } R=R-Q_r.$$

Le débit à l'exutoire est : $Q=Q_t+Q_r$ avec translation dans le temps de X_5 pas de temps.

Annexe 2 : Présentation des graphiques pour l'ensemble des critères

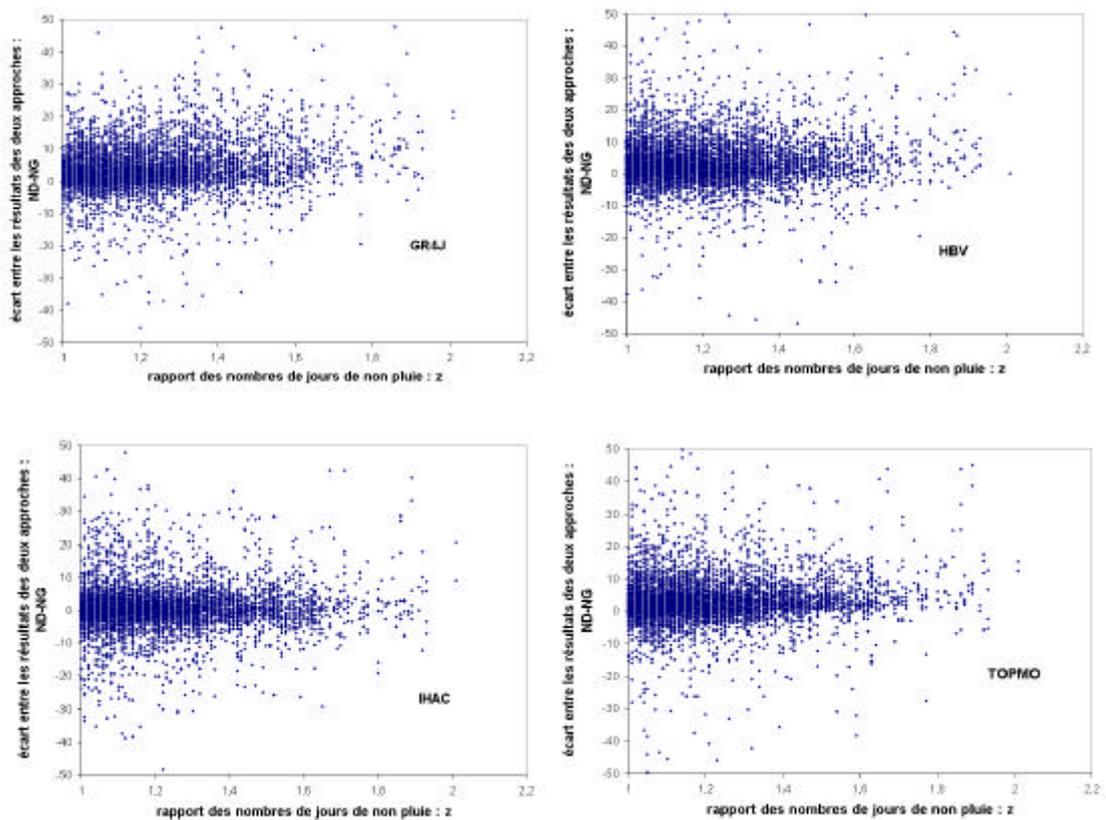


Fig. 1 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des nombres de jours de non pluie

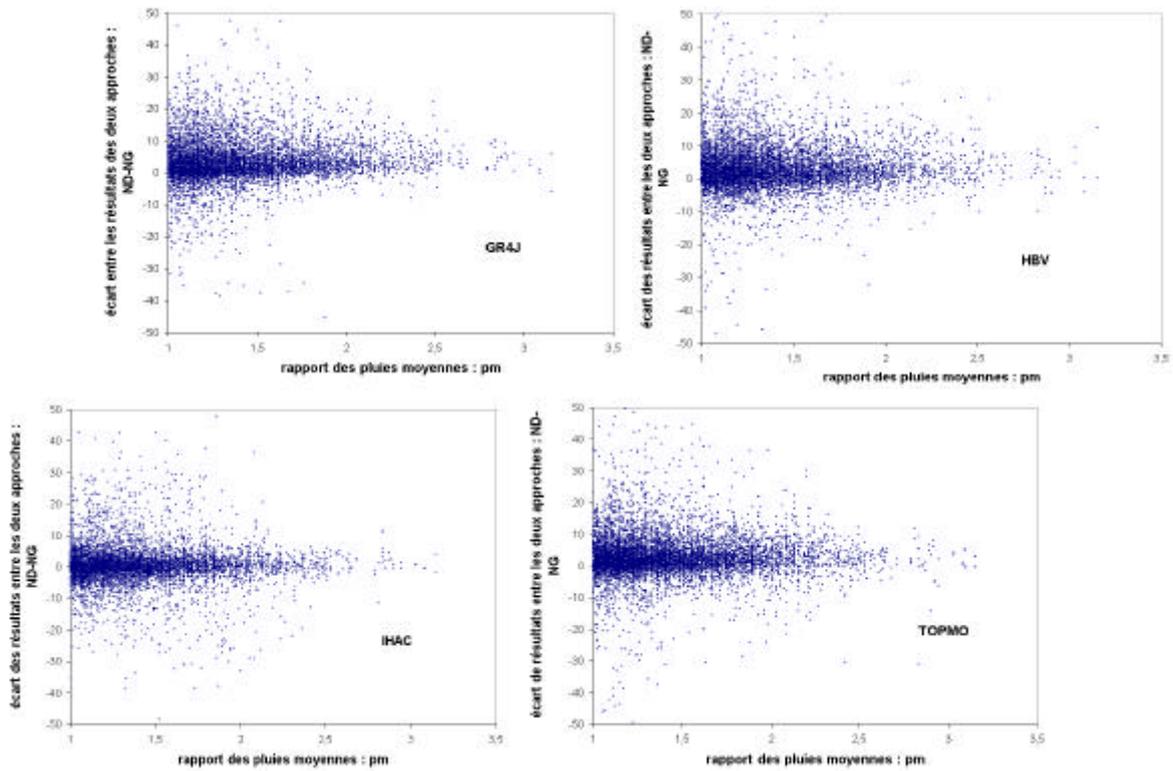


Fig. 2 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des pluies moyennes

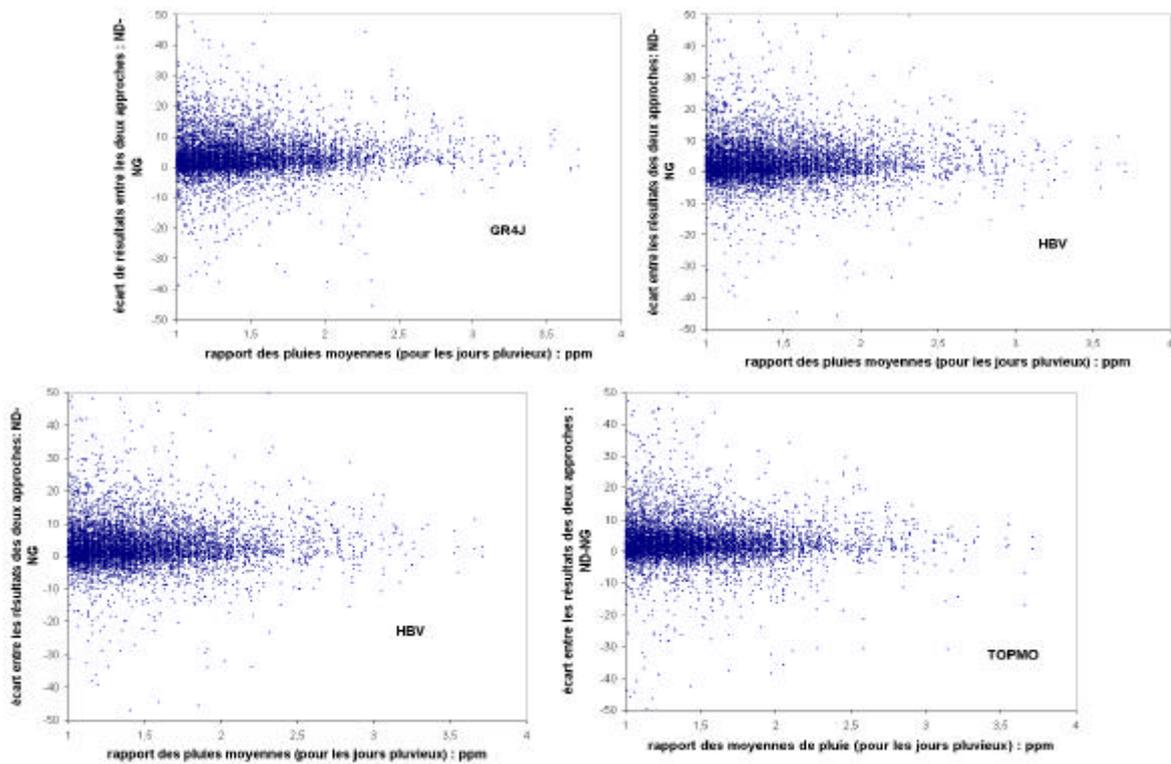


Fig. 3 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des pluies moyennes (pour les jours pluvieux)

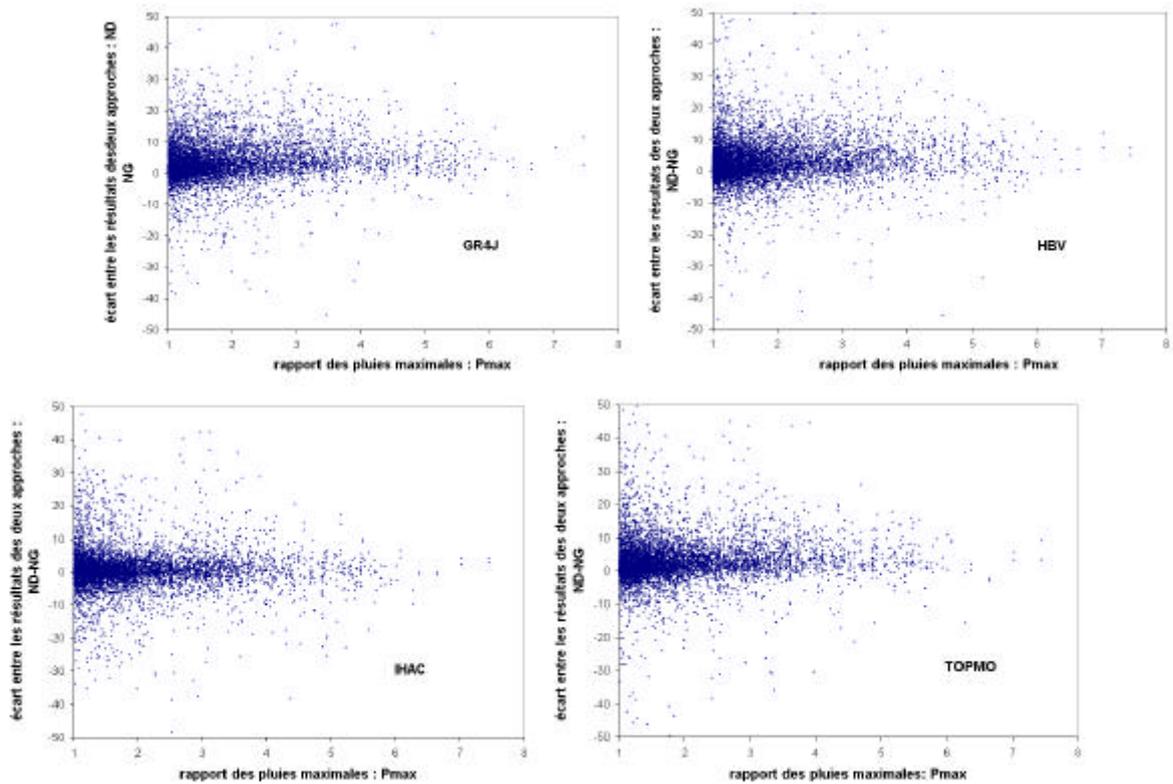


Fig. 4 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des pluies maximales

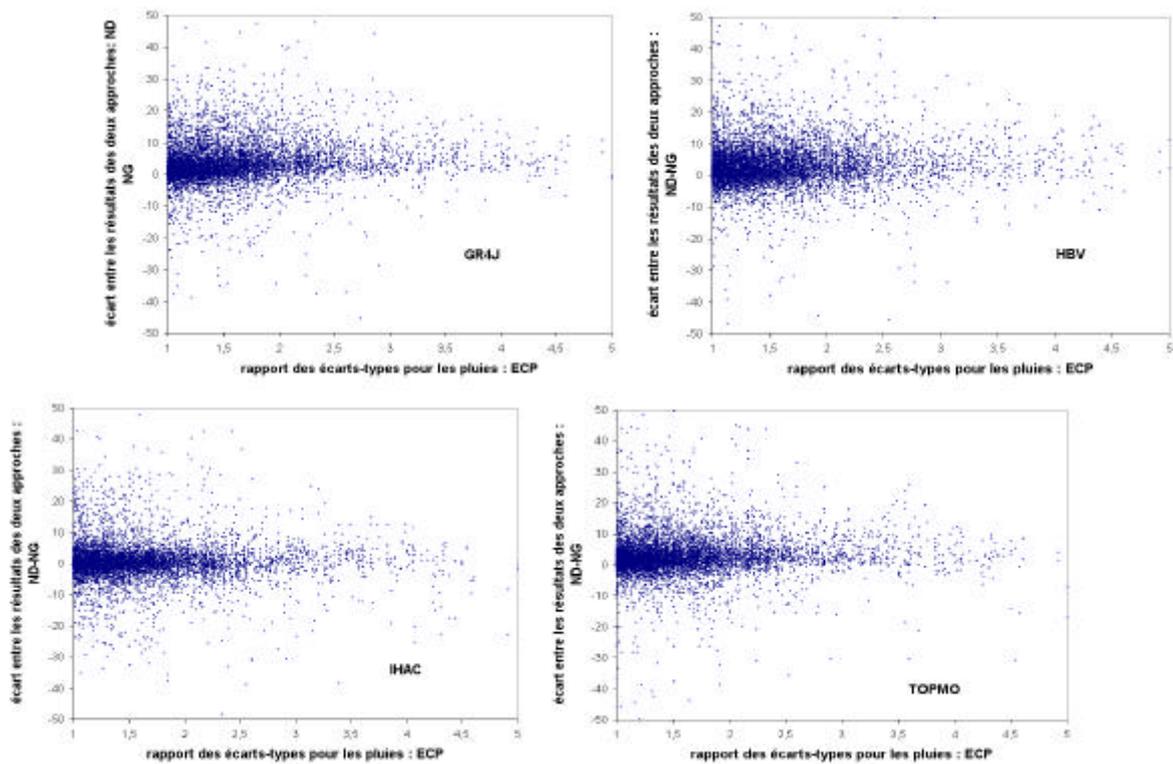


Fig. 5 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des écarts-types pour les pluies

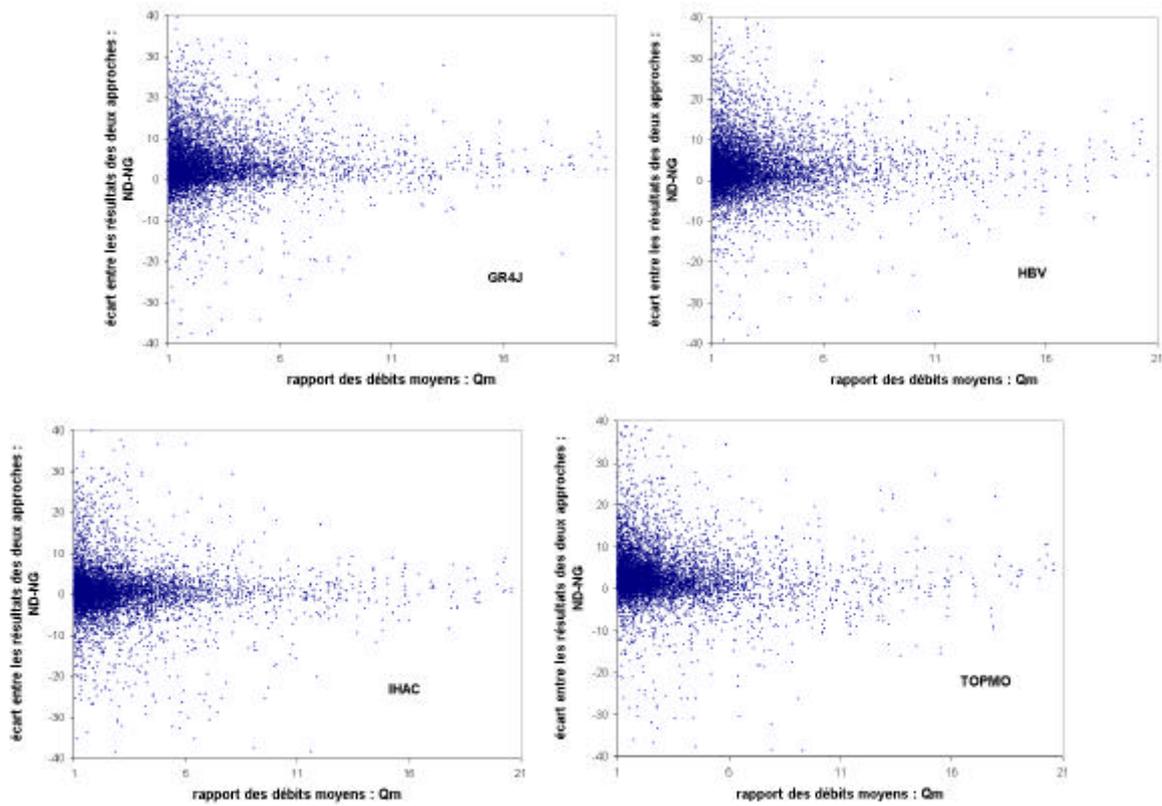


Fig. 6 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des débits moyens

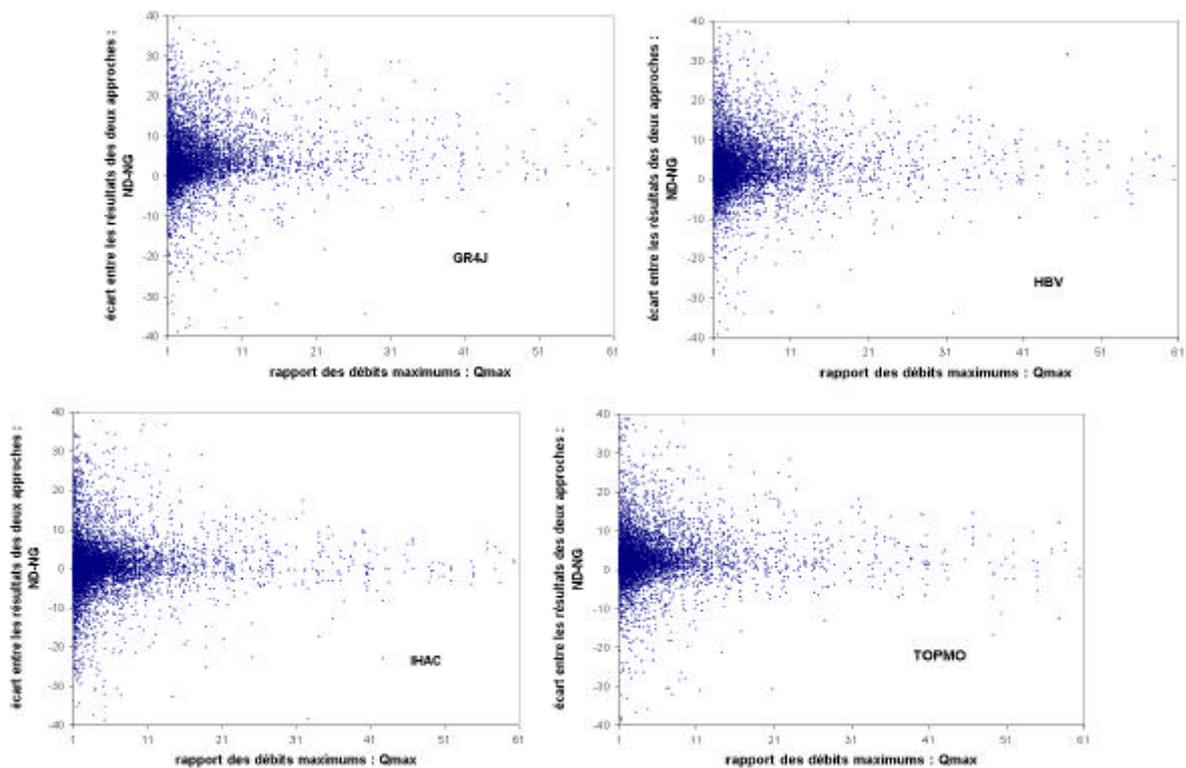


Fig. 7 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des débits maximums

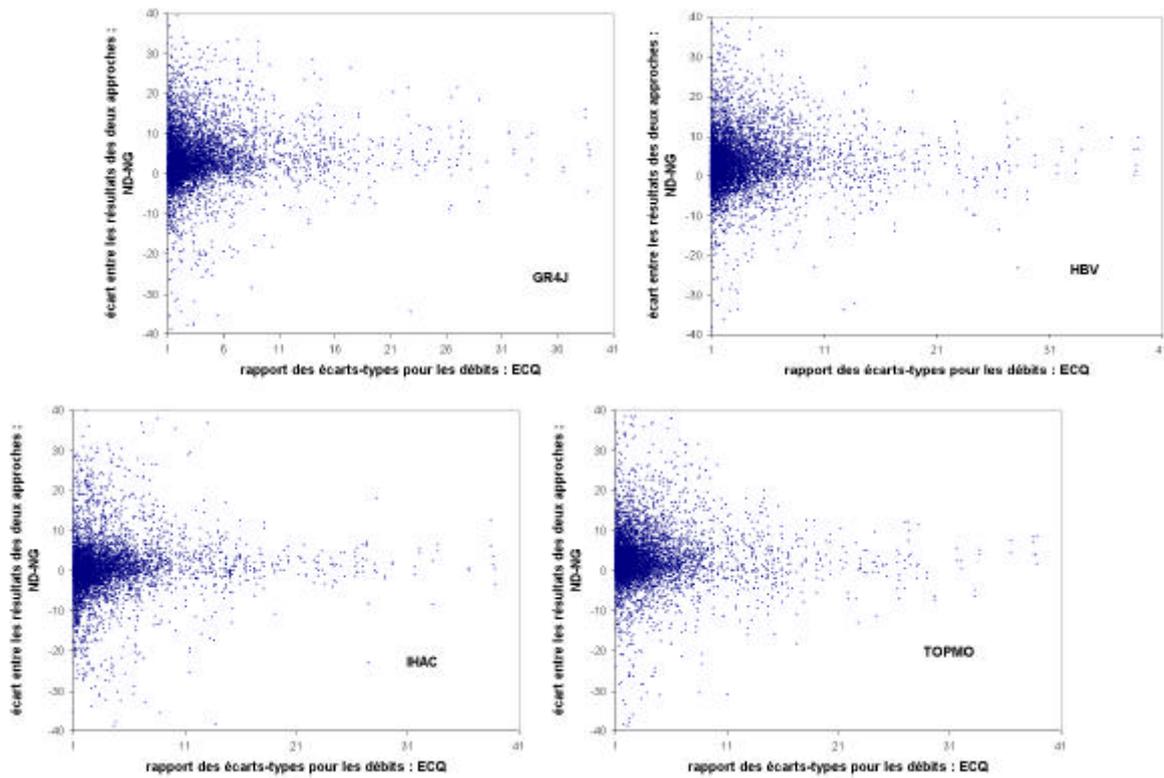


Fig. 8 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des écarts-types pour les débits

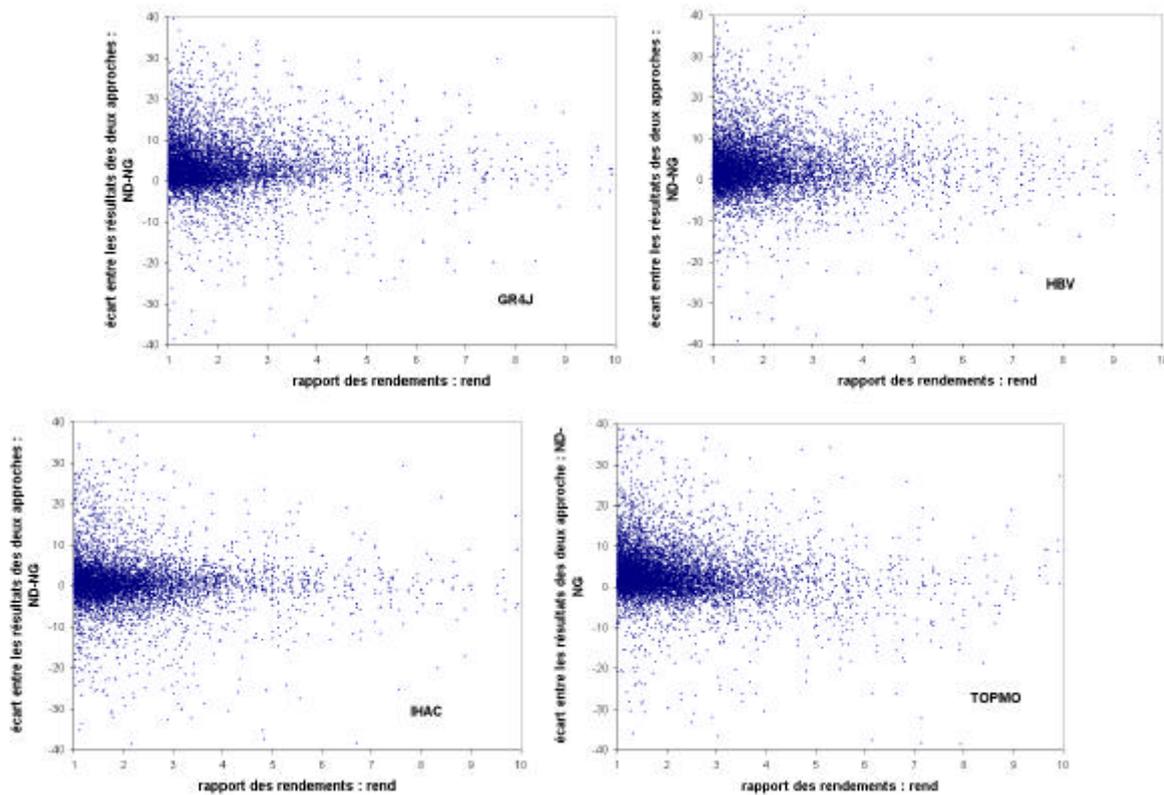


Fig. 9 : Evolution de la différence entre les approches globale et semi-distribuée en fonction du rapport des rendements

Annexe 3 : Impact de la spatialisation des pluies

Définition

Jusqu'à maintenant les bassins virtuels ont toujours été formés de deux bassins réels distincts d'où l'intervention simultanée des pluies et des comportements des bassins. Cela a d'ailleurs justifié l'utilisation de versions intermédiaires des modèles distribuant soit les pluies, soit les paramètres du modèle que l'on a associés aux comportements des bassins. La version choisie pour caractérisée le rôle des pluies était la suivante (Fig. 10) :

Le jeu de paramètres doit être identique pour les deux bassins afin d'obtenir deux comportements identiques. Rappelons que le fait d'imposer les mêmes paramètres à deux bassins différents entraîne une légère diminution des résultats du modèle par rapport à l'approche semi-distribuée (paragraphe 7.3).

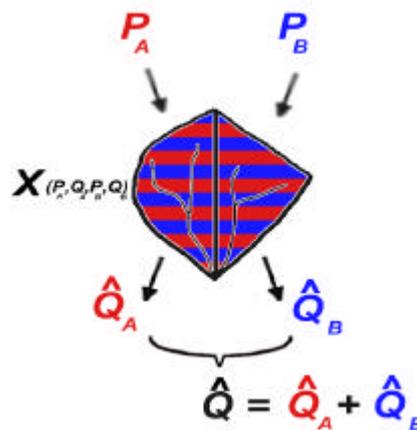


Fig. 10 :Version semi-distribuée limitée aux pluies

Une autre solution pour travailler avec des comportements identiques et des pluies différentes est d'associer à un bassin réel son double et de leur appliquer des chroniques de pluies mesurées sur ce même bassin mais à des dates différentes. Les comportements (matérialisés par les paramètres) sont ainsi quasiment identiques et les pluies différentes ce qui permet à nouveau de distinguer le rôle des précipitations de celui des comportements (Fig. 11).

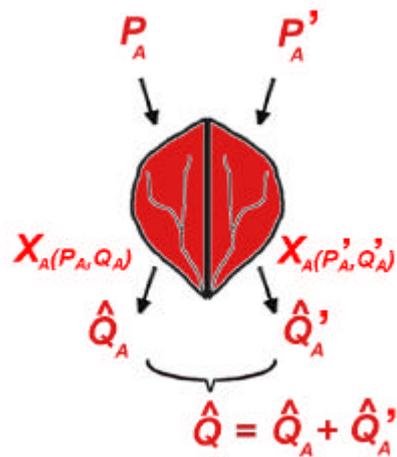


Fig. 11 : Approche semi-distribuée avec des bassins identiques aux pluies décalées dans le temps

La version globale de référence qui permet d'évaluer l'impact de la distribution des pluies sur les résultats (les débits) du modèle utilisé est construite de la manière suivante (Fig. 12):

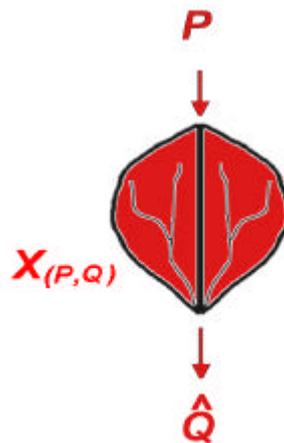


Fig. 12 : Approche globale pour deux bassins identiques

Comparaison des résultats pour les quatre modèles pluie

Les deux approches sont comparées (Fig. 13) en reportant en ordonnée les valeurs du critère de Nash ND pour l'approche semi-distribuée (Fig. 11) et en abscisse les valeurs du critère de Nash NG pour l'approche globale (Fig. 12). Pour un bassin virtuel dont le point se trouve au dessus de la diagonale la spatialisation des pluies permet d'améliorer les résultats ce qui n'est pas le cas des points se trouvant sous la diagonale.

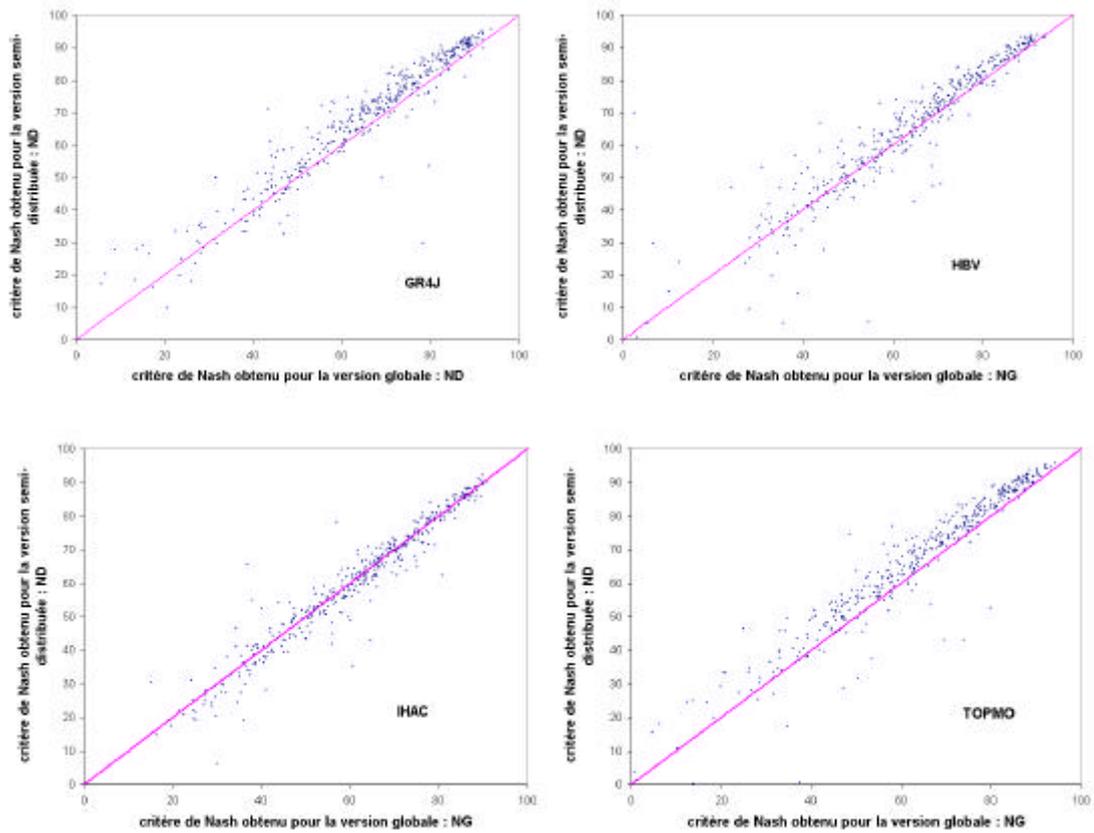


Fig. 13 : Comparaison des versions globale et semi-distribuée comprenant des bassins virtuels formés de deux bassins identiques

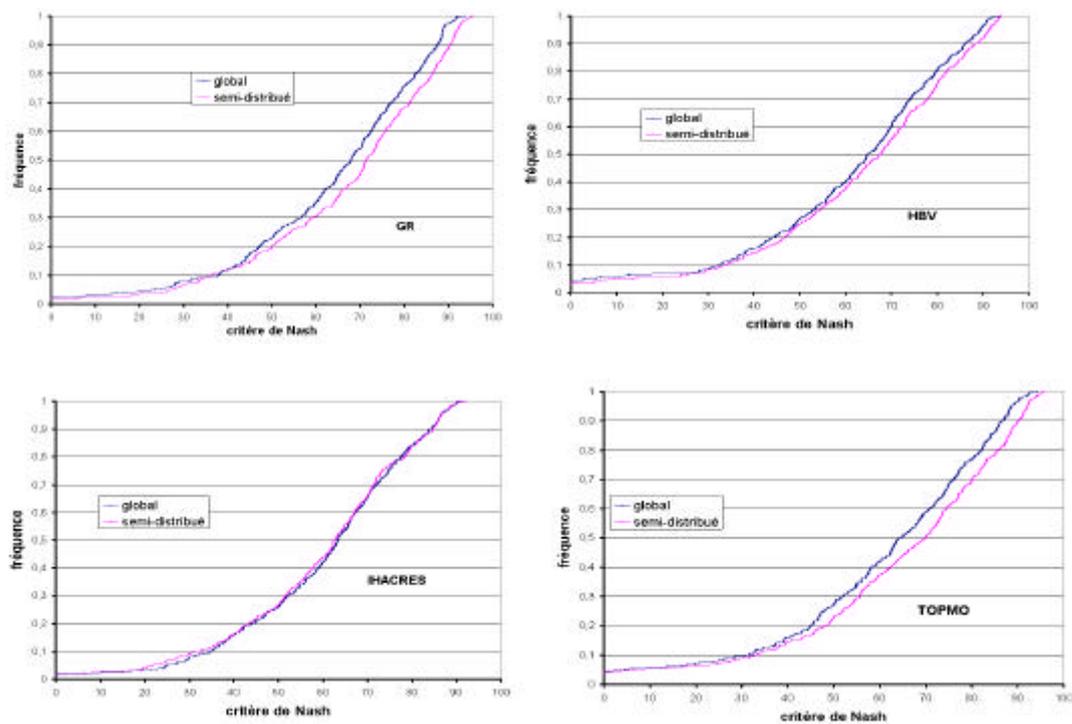


Fig. 14 : Comparaison des distributions du critère de Nash obtenus des versions globale et semi-distribuée comprenant des bassins virtuels formés de deux bassins identiques

Excepté pour IHACRES l'approche semi-distribuée se révèle être intéressante dans la plupart des cas et principalement pour TOPMO ET GR4J. En effet pour ces deux modèles la quasi-totalité des points se trouve être au dessus de la diagonale. Quant à l'évolution de la distribution du critère de Nash en passant de la version globale à la version semi-distribuée (Fig. 14), TOPMO et GR4J présentent le même écart variant approximativement de 2,5 à 4 points. Pour HBV l'écart n'est à peu près que de 2,5 points. Pour IHACRES il n'y a pas de surprise, l'écart est presque nul : il est indifférent en moyenne de choisir une approche globale ou une approche semi-distribuée.

Conclusion

De nouveau la spatialisation des pluies permet d'améliorer les résultats. Cette progression des résultats ne peut pas être attribuée à la distribution des paramètres : même si il est possible que les paramètres soient légèrement différents selon la date des chroniques de pluies et de débits utilisés pour le calage, les jeux de paramètres sont équivalents, les bassins associés étant identiques.

Ces résultats confirment les résultats précédemment présentés qui soulignaient déjà l'importance de la distribution des pluies. De même IHACRES ne parvient toujours pas à répercuter, contrairement aux trois autres modèles, la distribution des pluies dans le calcul des débits ce que nous constatons aussi dans les précédents résultats.

Annexe 4 : Présentation des bassins versants

N°	Bassin	Cours d'eau	Code station	Nom station	Surface (km ²)	ETP (mm)	Pluie (mm)	Débit (mm)
1	Rhin-Meuse	Doller	A1202020	Sewen Lerchenmatt (aval)	8,9	636	2299	1619
2	Rhin-Meuse	Wagenstahlbach	A1204410	Sewen Lerchenmatt	3,3	636	2220	1406
3	Rhin-Meuse	Bourbach	A1226910	Bourbach-le-Bas	13,0	636	1223	759
4	Rhin-Meuse	Murbach	A1515810	Buhl	7,6	718	1347	582
5	Rhin-Meuse	Bruche	A2702010	Saint Blaise	39,0	703	1531	842
6	Rhin-Meuse	Chergoutte	A2713710	Belmont	3,3	703	1203	926
7	Rhin-Meuse	Moselle	A4020610	Fresse-sur-Moselle	69,0	703	1858	1417
8	Rhin-Meuse	Moselotte	A4152010	Zainvilliers	183,0	703	1617	1294
9	Rhin-Meuse	Cleurie	A4173010	Cleurie	66,0	703	1465	1003
10	Rhin-Meuse	Moselle	A4200630	Noir Gueux	621,0	669	1601	1112
11	Rhin-Meuse	Moselle	A4250640	Epinal	1219,0	703	1447	963
12	Rhin-Meuse	Voloqne	A4362010	Jarmenil	369,0	703	1294	722
13	Rhin-Meuse	Durbion	A4442010	Vaxoncourt	144,0	643	952	338
14	Rhin-Meuse	Avière	A4632010	Frizon-Basse	104,0	636	904	336
15	Rhin-Meuse	Madon	A5251010	Mirecourt	383,0	651	939	416
16	Rhin-Meuse	Brenon	A5422010	Autreysur-Madon	142,0	651	754	244
17	Rhin-Meuse	Moselle	A5730610	Toul	3340,0	663	1145	551
18	Rhin-Meuse	Terrouin	A5842010	Villev-Saint-Etienne	169,0	651	613	104
19	Rhin-Meuse	Meurthe	A6271010	Damelevières	2288,0	669	1023	399
20	Rhin-Meuse	Vezouze	A6561110	Lunéville	559,0	703	787	289
21	Rhin-Meuse	Mortagne	A6621210	Sainte-Hélène	98,0	703	864	423
22	Rhin-Meuse	Meurthe	A6941010	Malzeville	2914,0	677	1023	356
23	Rhin-Meuse	Moselle	A7010610	Custines	6830,0	663	1062	501
24	Rhin-Meuse	Seille	A7581010	Vic-sur-Seille	371,0	677	634	140
25	Rhin-Meuse	Seille	A7821010	Nomeny	923,0	677	714	195
26	Rhin-Meuse	Moselle	A7930610	Hauconcourt	9387,0	663	934	376
27	Rhin-Meuse	Canner	A8712010	Bettelainville	30,0	654	751	234
28	Rhin-Meuse	Ru de Montenach	A8853010	Sierckles-Bains	47,0	654	862	295
29	Rhin-Meuse	Sarre Blanche	A9001050	Laneuveville	64,0	703	949	629
30	Rhin-Meuse	Sarre Rouge	A9013050	Vaspeviller	90,0	703	1131	543
31	Rhin-Meuse	Sarre	A9021050	Hermelange	193,0	703	1083	363
32	Artois-Picardie	Solre	D0206010	Ferrière-la-Grande	115,0	670	898	394
33	Artois-Picardie	Aa	E4035710	Wizernes	392,0	649	969	402
34	Artois-Picardie	Yser	E4905710	Engelshof	236,0	657	731	217
35	Seine-Normandie	Seine	H0100020	Plaines Saint Langes	704,0	695	905	509
36	Seine-Normandie	Laignes	H0203010	Chaumes-les-Bains	87,3	674	1011	145
37	Seine-Normandie	Laignes	H0203020	Molesmes	614,0	705	843	179
38	Seine-Normandie	Seine	H0210010	Polisy	1450,0	695	860	328
39	Seine-Normandie	Ource	H0321030	Autricourt	548,0	705	888	396
40	Seine-Normandie	Ource	H0321040	Celle sur Ource	730,0	705	904	397
41	Seine-Normandie	Seine	H0400010	Bar sur Seine	2340,0	695	904	362
42	Seine-Normandie	Aube	H1051020	Outre-Aube	657,0	674	950	381
43	Seine-Normandie	Aujon	H1122010	Rennepont	481,0	674	956	446
44	Seine-Normandie	Aube	H1231010	Blaincourt	1640,0	674	931	395
45	Seine-Normandie	Traconne	H1932010	Moulin de l'Etang	112,0	707	725	185
46	Seine-Normandie	Serein	H2342010	Chablis	1120,0	706	915	264
47	Seine-Normandie	Yonne	H2721010	Courlon	10700,0	706	881	359
48	Seine-Normandie	Ouanne	H3102010	Toucy	160,0	746	761	190
49	Seine-Normandie	Loing	H3201010	Chalette sur Loing	2300,0	756	761	183
50	Seine-Normandie	Fusain	H3522010	Courtempierre	375,0	766	721	139
51	Seine-Normandie	Lunain	H3613010	Paley	163,0	737	695	101
52	Seine-Normandie	Lunain	H3613020	Episy	252,0	737	693	71
53	Seine-Normandie	Loing	H3621010	Episy	3900,0	750	723	161
54	Seine-Normandie	Orvanne	H3623010	Blennes	108,0	756	733	109
55	Seine-Normandie	Ru d'Ancoeur	H3923010	Blandy	181,0	703	720	93
56	Seine-Normandie	Orge	H4232040	Le Breuil	632,0	718	633	112
57	Seine-Normandie	Yvette	H4243010	Villebon	224,0	718	615	195
58	Seine-Normandie	Orge	H4252010	Morsang sur Orge	922,0	718	634	118
59	Seine-Normandie	Yerres	H4322010	Courtomer	427,0	703	720	118
60	Seine-Normandie	Yerres	H4332020	Pont Massat	889,0	703	759	198
61	Seine-Normandie	Reveillon	H4333410	La Jonchère	55,4	703	757	210
62	Seine-Normandie	Rognon	H5062010	Saucourt sur Rognon	614,0	697	1081	539
63	Seine-Normandie	Saulx	H5102010	Pancev	40,0	697	1070	517
64	Seine-Normandie	Saulx	H5102020	Couvonges	475,0	697	1052	526
65	Seine-Normandie	Ormain	H5122310	Fains-les-Sources	820,0	697	1044	435
66	Seine-Normandie	Ru de Malval	H5123210	Nancois-sur-Ormain	31,6	697	902	536
67	Seine-Normandie	Chee	H5142610	Villotte-Devant-Louppy	113,0	697	1002	481
68	Seine-Normandie	Viere	H5153010	Val de Viere	166,0	697	895	294
69	Seine-Normandie	Saulx	H5172010	Vitry-en-Perthois	2100,0	697	998	426
70	Seine-Normandie	Bruxenelle	H5173110	Brusson	136,0	697	946	275
71	Seine-Normandie	Soude	H5213310	Soudron	105,0	682	729	193

Annexe 4 : Présentation des bassins versants

72	Seine-Normandie	Surmelin	H5302010	Saint Eugène	454,0	712	817	225
73	Seine-Normandie	Petit Morin	H5412010	Montmirail	354,0	737	773	208
74	Seine-Normandie	Petit Morin	H5412020	Jouarre	605,0	737	760	186
75	Seine-Normandie	Ourcq	H5522010	Chouy	345,0	712	692	203
76	Seine-Normandie	Thérouanne	H5613020	Gué-à-Tresmes	167,0	737	717	122
77	Seine-Normandie	Orgeval	H5723010	Theil	104,0	737	773	272
78	Seine-Normandie	Le Fossé Rognon	H5723210	Mélarchez	7,1	737	767	255
79	Seine-Normandie	Grand Morin	H5752020	Montry	1190,0	737	785	267
80	Seine-Normandie	Beuvronne	H5813010	Compans	97,6	737	766	164
81	Seine-Normandie	Ru de la Gondoire	H5833010	Deuil	19,6	703	776	201
82	Seine-Normandie	Seine	H5920010	Paris (Pont d'Austerlitz)	43800,0	730	841	251
83	Seine-Normandie	Oise	H7021010	Hirson	315,0	682	1028	580
84	Seine-Normandie	Epte	H8012010	Gournayen-Bray	246,0	656	869	280
85	Seine-Normandie	Coïnon	H9033310	Mainvilliers	45,3	717	697	26
86	Seine-Normandie	Iton	H9402010	Manthelon	414,0	689	695	76
87	Seine-Normandie	Austreberthe	H9923010	Duclair	208,0	633	900	273
88	Seine-Normandie	Granchain	I0129910	Granchain	11,6	689	882	43
89	Seine-Normandie	Sienna	I7001010	La Guermanderie	19,2	693	1247	762
90	Seine-Normandie	Thar	I7913610	Lezeaux	72,0	734	847	476
91	Loire-Bretagne	Nançon	J0014010	Lecousse	67,0	728	862	346
92	Loire-Bretagne	Loysance	J0144010	Moulin Neuf St-Ouen-la-Rouerie	82,0	731	887	326
93	Loire-Bretagne	Lequer	J2233010	Belle-Isle-en-Terre	260,0	685	951	596
94	Loire-Bretagne	Queffleuth	J2614010	Lesquifiou-Plourin-les-Morlaix	88,0	673	1026	510
95	Loire-Bretagne	Aber Wrac'h Ouest	J3205710	Kernevez-Le Drennec	24,0	673	1175	623
96	Loire-Bretagne	Elorn	J3403020	Communa	9,7	673	1295	907
97	Loire-Bretagne	Aulne	J3601810	Le Goasc-en-Scrignac	117,0	673	1201	611
98	Loire-Bretagne	Douffine	J3834010	Kerbiant-en-Saint-Segal	138,0	673	1235	750
99	Loire-Bretagne	Goven	J4014010	Kermaria-en-Pont-Croix	89,0	673	1122	501
100	Loire-Bretagne	Jet	J4224010	Erque Gaberic	108,0	706	1259	671
101	Loire-Bretagne	Moros	J4514010	Concarneau	20,0	752	1101	489
102	Loire-Bretagne	Ster-Goz	J4614010	Stang Trebalay Bannalec	70,0	752	1241	682
103	Loire-Bretagne	Aven	J4623010	Pont Aven (Bois d'Amour)	184,0	706	1231	669
104	Loire-Bretagne	Evel	J5613010	Guénin	316,0	752	805	334
105	Loire-Bretagne	Coët-Organ	J5704810	Kerdec-en-Quistinic	48,0	752	956	445
106	Loire-Bretagne	Rohan inférieur	J6407120	Menimur-en-Vannes	22,0	749	1007	453
107	Loire-Bretagne	Vilaine	J7060620	Servon-sur-Vilaine	604,0	728	797	297
108	Loire-Bretagne	Vaunoise	J7373110	Villebrioux-Saint-Gilles	61,0	728	757	210
109	Loire-Bretagne	Ecotav	K0568310	Marlhes	5,2	759	964	637
110	Loire-Bretagne	Charnasson	K0724510	La Rivière	11,2	714	767	283
111	Loire-Bretagne	Lignon de Chamazel	K0733220	Chevelières	60,5	737	927	906
112	Loire-Bretagne	Vizezy	K0763310	la Guillanch	43,3	737	939	511
113	Loire-Bretagne	Rhodon	K1004510	Perreux	32,0	714	859	262
114	Loire-Bretagne	Teysonne	K1084010	La Noaillerie	23,0	721	944	517
115	Loire-Bretagne	Ternin	K1263110	Chamboux	16,4	727	1105	645
116	Loire-Bretagne	Arroux	K1321810	Tang-sur-Arroux (Pont du Tacot)	1798,0	718	916	460
117	Loire-Bretagne	Arroux	K1341810	Rignv	2277,0	718	912	420
118	Loire-Bretagne	Boubince	K1383010	Vitry en Charollais	819,0	718	958	337
119	Loire-Bretagne	Arroux	K1391810	Le Verdier	3166,0	718	925	403
120	Loire-Bretagne	Allier	K2010810	Rogleton	48,8	828	1285	1045
121	Loire-Bretagne	Lanqouvrou	K2064010	Lanqoane	65,0	759	1054	797
122	Loire-Bretagne	Clamouze	K2134010	Chastanier	50,5	759	949	463
123	Loire-Bretagne	Grandrieu	K2163110	Grandrieu	72,5	759	887	517
124	Loire-Bretagne	Chapeauroux	K2173010	Saint-Bonnet-de-Montauroux	398,0	828	953	562
125	Loire-Bretagne	Allier	K2210810	Monistrol d'Allier	988,0	828	1052	677
126	Loire-Bretagne	Cronce	K2316210	Aubazat	130,0	759	873	388
127	Loire-Bretagne	Allier	K2330810	Vieille Brioude	2269,0	828	930	458
128	Loire-Bretagne	Lidenne	K2365510	Couteuges	46,2	740	744	202
129	Loire-Bretagne	Laqnon	K2506010	Murat	20,7	765	1433	1163
130	Loire-Bretagne	Joron	K2714010	Beauregard l'Evêque	124,0	811	765	263
131	Loire-Bretagne	Dolore	K2834010	Moulin Neuf (Mayres)	70,0	737	1022	527
132	Loire-Bretagne	Fave	K2884010	Giroux (Augerolles)	72,0	737	1045	682
133	Loire-Bretagne	Couzon	K2944010	Salet (Courpières)	74,5	737	1086	478
134	Loire-Bretagne	Dore	K2951910	Peschadoires (Pont de Dore)	1280,0	737	1096	445
135	Loire-Bretagne	Source de chez Pierre	K3206010	Cevyssat	10,3	765	807	842
136	Loire-Bretagne	Sioule	K3292020	St-Priest-des-Champs (Fades-Besserve)	1300,0	721	819	497
137	Loire-Bretagne	Bouble	K3373010	Chareil-Cintrat	555,0	721	746	192
138	Loire-Bretagne	Boublon Laees	K3374710	Fourilles	71,4	721	750	95
139	Loire-Bretagne	Sioule	K3382010	St-Pourcain-sur-Sioule	2458,0	721	820	384
140	Loire-Bretagne	Ramberge	K4856020	Poce-sur-Cisse	62,8	782	711	137
141	Loire-Bretagne	Vienne	L0010610	Servières	60,9	748	1394	980
142	Loire-Bretagne	Vienne	L0140610	Saint Priest	1156,0	748	1246	700
143	Loire-Bretagne	Leyrenne	L0244510	Murat	61,6	719	1074	489
144	Loire-Bretagne	Taurion	L0321510	Saint Priest	1030,0	748	1113	618
145	Loire-Bretagne	Vienne	L0400610	Pevrelevade	2296,0	748	1179	661
146	Loire-Bretagne	Aurance	L0614010	Moulin Pinard	35,1	719	1029	508
147	Loire-Bretagne	Lande	L0615810	Couzeix	1,0	719	1041	115
148	Loire-Bretagne	Graulade	L5014110	Vilatte	18,5	719	1001	452
149	Loire-Bretagne	Couze	L5114010	Le Mazeaud	20,0	719	1084	709
150	Loire-Bretagne	Viette	L8114010	Pont de la Borde	33,0	717	957	405

151	Loire-Bretagne	Couasnon	L9203010	Pontigne	36,7	749	672	178
152	Loire-Bretagne	Taray	L9214510	Gruteau	27,7	749	619	106
153	Loire-Bretagne	Vallée de la Malorne	M1024810	Bouville	122,0	717	661	30
154	Loire-Bretagne	Couetron	M1214010	Glatigny	85,0	715	741	217
155	Loire-Bretagne	Grand Lay	N3001610	St Prouant Monsireigne	131,0	864	822	330
156	Adour-Garonne	Ruisseau des Gourds	O1576910	Limbrassac	5,8	900	818	247
157	Adour-Garonne	Leze	O1814040	Artigat	98,0	724	852	333
158	Adour-Garonne	Girou	O2304020	Scopont	107,6	974	764	198
159	Adour-Garonne	Gimone	O2703330	Boulogne-Lunax	40,5	818	951	550
160	Adour-Garonne	Lauze	O2725010	Faget-Abbatial	36,3	818	816	224
161	Adour-Garonne	Pest	O2825010	Cologne	19,7	818	683	136
162	Adour-Garonne	Marres	O2886210	Cordes-Tolosannes	1,3	818	711	134
163	Adour-Garonne	Goudech	O3006710	la Cépède	10,0	828	1795	1806
164	Adour-Garonne	Tarn	O3011010	Fontchalettes	67,0	828	1790	1690
165	Adour-Garonne	Rieumalet	O3015520	Pont de Montvert	20,0	828	1510	1500
166	Adour-Garonne	Mirals	O3026210	Rhunes	11,7	828	1290	940
167	Adour-Garonne	Briancon	O3035210	Cocures 2	25,0	828	1030	775
168	Adour-Garonne	Breze	O3165010	Meyrueis	36,1	828	1431	882
169	Adour-Garonne	Dourbie	O3314010	Mazet	42,9	828	1664	1681
170	Adour-Garonne	Sorques	O3584610	Saint Afrique	332,0	898	1262	826
171	Adour-Garonne	Dourdou	O3594010	Bedos	658,0	898	995	636
172	Adour-Garonne	Aqout	O4102510	Fraisse	48,0	884	1400	1006
173	Adour-Garonne	Dadou	O4704030	Saint Jean de Jeanne	72,0	884	1262	702
174	Adour-Garonne	Vioulou	O5344010	Trebon-bas	57,0	837	1028	507
175	Adour-Garonne	Lambronne	O6475910	Lamontioie	6,8	765	760	154
176	Adour-Garonne	Esclancide	O7015810	Salces	31,0	828	907	557
177	Adour-Garonne	Lot	O7021530	Mende	250,0	828	975	576
178	Adour-Garonne	Bramont	O7035010	Les Fonts	116,0	828	1026	499
179	Adour-Garonne	Lot	O7041510	Bramonas	465,0	828	1034	574
180	Adour-Garonne	Colaagne	O7054010	Ganivet	89,0	828	947	644
181	Adour-Garonne	Colaagne	O7094010	Le Monastier	456,0	828	938	424
182	Adour-Garonne	Lot	O7101510	La Mothe	1164,0	828	989	457
183	Adour-Garonne	Boralde de Saint Chély	O7145220	Castelnau de Mandouilles	53,0	828	1120	934
184	Adour-Garonne	Boralde de Bonneval	O7155010	Bonneval	100,0	828	1182	916
185	Adour-Garonne	Caussane	O7175010	Cabrespine	41,0	828	1293	733
186	Adour-Garonne	Lot	O7191510	Entravgues	2180,0	768	1062	489
187	Adour-Garonne	Truvère	O7202510	Serverette	72,0	828	971	1114
188	Adour-Garonne	Limagnole	O7265010	Saint Alban	76,0	759	922	461
189	Adour-Garonne	Bes	O7404010	Marchastel	30,5	759	1084	686
190	Adour-Garonne	Ondes	O7625210	Les Ondes	37,0	768	1286	800
191	Adour-Garonne	Truvère	O7692510	Entravgues	3280,0	768	1049	610
192	Adour-Garonne	Lot	O7701510	Entravgues	5460,0	768	1043	608
193	Adour-Garonne	Cadanne	O9196210	Pondaurat	9,7	785	782	124
194	Adour-Garonne	Dordogne	P0010010	Saint-Sauves	87,0	719	1339	1396
195	Adour-Garonne	Burande	P0115010	la Tour d'Auvergne	20,4	765	1530	1505
196	Adour-Garonne	Burande	P0115020	Singles	80,0	719	1530	1159
197	Adour-Garonne	Rhue	P0212510	Egliseneuve d'Entraigues	39,0	769	1476	1285
198	Adour-Garonne	Sumène	P0804010	Chevranes	53,0	719	1289	935
199	Adour-Garonne	Sumène	P0874020	Pont de Vendes 1	284,0	719	1329	483
200	Adour-Garonne	Mars	P0885010	Pont de Vendes 2	117,0	719	1704	1091
201	Adour-Garonne	Sumène	P0894010	Pont de Vendes	401,0	719	1472	652
202	Adour-Garonne	Triouzoune	P0924010	Saint Angel	79,0	769	1242	773
203	Adour-Garonne	Luzeqe	P1114010	Pont de Maussac	82,3	769	1324	769
204	Adour-Garonne	Cère	P1712910	Comblat le Pont	88,0	748	1742	1623
205	Adour-Garonne	Vézère	P3001010	Maisonnial	52,0	769	1498	904
206	Adour-Garonne	Ars	P3015410	Ars	33,0	769	1498	1031
207	Adour-Garonne	Mayne	P3245010	St Cyr	49,0	748	1037	479
208	Adour-Garonne	Corrèze	P3322510	Pont de Lanour	54,0	769	1469	1191
209	Adour-Garonne	Corrèze	P3352510	Corrèze	167,0	748	1351	1131
210	Adour-Garonne	Vimbelle	P3464010	Moulin de Bos	147,0	748	1398	799
211	Adour-Garonne	Corrèze	P3522510	Tulle	356,0	748	1375	955
212	Adour-Garonne	Montane	P3614010	Pont de Jay	42,4	748	1527	925
213	Adour-Garonne	Izaute	Q2094310	Montlezun	111,0	751	919	266
214	Adour-Garonne	Grand Arriou	S2224610	Biganon	108,0	805	976	307
215	Adour-Garonne	Bouron	S2235610	Moulin du Moine	36,0	805	951	248
216	Adour-Garonne	Magescq	S4214010	Magescq	60,0	753	1300	579
217	Rhône-Méditerranée-Corse	Ru des Thuilleries	U0005810	Relanques	17,8	675	1000	402
218	Rhône-Méditerranée-Corse	Ru des Ailles	U0025410	Bleurville	8,6	675	992	478
219	Rhône-Méditerranée-Corse	Oqnon	U1004010	Fouruenons	73,5	636	1757	1639
220	Rhône-Méditerranée-Corse	Rahin	U1025010	Plancher Bas	33,0	636	1951	1970
221	Rhône-Méditerranée-Corse	Doubs	U2022010	Pontarlier	350,0	671	1546	729
222	Rhône-Méditerranée-Corse	Drueon	U2035020	Vuillecin	191,0	671	1559	579
223	Rhône-Méditerranée-Corse	Doubs	U2142010	Courclavon	1240,0	671	1462	879
224	Rhône-Méditerranée-Corse	Dessoubre	U2215020	Saint Hippolyte	560,0	671	1328	804
225	Rhône-Méditerranée-Corse	Doubs	U2222010	Mathay	2200,0	671	1489	805
226	Rhône-Méditerranée-Corse	Saint Nicolas	U2305210	Rougement-le-Chateau	9,0	636	1524	1127
227	Rhône-Méditerranée-Corse	Savoireuse	U2345030	Belfort	141,0	636	1402	1028
228	Rhône-Méditerranée-Corse	Rosemontoise	U2345820	Chaux	25,4	636	1628	1279
229	Rhône-Méditerranée-Corse	Doubs	U2402010	Voujeaucourt	3420,0	671	1412	727

Annexe 4 : Présentation des bassins versants

230	Rhône-Méditerranée-Corse	Grosné	U3205210	Les Chambosses	31,0	761	913	529
231	Rhône-Méditerranée-Corse	Ardières	U4505010	Beaujeu	55,0	745	1276	596
232	Rhône-Méditerranée-Corse	Vauxonne	U4515420	St-Etienne des Oullières (Buyon)	49,3	714	905	329
233	Rhône-Méditerranée-Corse	Valserine	V1015030	Chezery	119,0	722	1832	1241
234	Rhône-Méditerranée-Corse	Valserine	V1015040	Moulin de Métral	395,0	722	1562	1307
235	Rhône-Méditerranée-Corse	Semine	V1015810	Coz	183,0	722	1305	1546
236	Rhône-Méditerranée-Corse	Furans	V1454310	Pont du Martinet	50,8	729	1385	1070
237	Rhône-Méditerranée-Corse	Ainan	V1525410	Saint Geoire en Valdaine	41,0	737	1197	828
238	Rhône-Méditerranée-Corse	Yzeron	V3015010	Craponne	48,0	837	823	240
239	Rhône-Méditerranée-Corse	Dorlay	V3115010	La Terrasse-sur-Dorlay	17,0	759	890	641
240	Rhône-Méditerranée-Corse	Valencize	V3315010	Chavanay	36,0	837	822	318
241	Rhône-Méditerranée-Corse	Ruisseau des Préaux	V3515610	Bourg-Argental	22,1	798	949	594
242	Rhône-Méditerranée-Corse	Embroye	V4025010	Toulaud	7,4	978	990	520
243	Rhône-Méditerranée-Corse	Glueyre	V4145210	Tisonèche	71,0	939	1279	926
244	Rhône-Méditerranée-Corse	Ceze	V5404020	Echelette	79,7	898	1621	1005
245	Rhône-Méditerranée-Corse	Homol	V5406010	Echelette	34,4	898	1708	1113
246	Rhône-Méditerranée-Corse	Homol	V5406020	Davaladou	31,2	950	1263	1152
247	Rhône-Méditerranée-Corse	Gagnière	V5425210	Banne-le-Ponteil	55,3	939	1414	961
248	Rhône-Méditerranée-Corse	Bregoux	V6155610	Aubiignan	39,0	1024	684	125
249	Rhône-Méditerranée-Corse	Gardon de Saint Martin	V7104010	Roquette	31,0	898	1378	579
250	Rhône-Méditerranée-Corse	Gardon de Saint Germain	V7105210	la Bastide	31,0	898	1452	711
251	Rhône-Méditerranée-Corse	Gardon de Sainte Croix	V7115010	Gabriac (Pont Ravagers)	33,0	898	1258	665
252	Rhône-Méditerranée-Corse	Gardon de Mialet	V7124010	Roucan	239,0	1039	1605	1152
253	Rhône-Méditerranée-Corse	Gardon Saint Jean	V7135020	Soucis	263,0	1039	1864	645
254	Rhône-Méditerranée-Corse	Coulègne	V7136610	Coloqnac	1,4	1020	1499	1135
255	Rhône-Méditerranée-Corse	Gardon d'Anduze	V7144010	Anduze	546,0	1039	1726	944
256	Rhône-Méditerranée-Corse	Gardon d'Alès	V7155020	la Farelle	30,0	898	1650	1080
257	Rhône-Méditerranée-Corse	Riou	X1045820	Saint Genis (milieu)	15,6	906	920	214
258	Rhône-Méditerranée-Corse	Baillaury	Y0105210	Banvuls	18,1	1249	691	323
259	Rhône-Méditerranée-Corse	Massane	Y0115410	Mas d'en Torrent	16,5	1249	753	513
260	Rhône-Méditerranée-Corse	Mondony	Y0245210	Amélie-les-Bains	32,3	986	875	415
261	Rhône-Méditerranée-Corse	Tet	Y0444010	Marquixanes	834,0	1249	695	313
262	Rhône-Méditerranée-Corse	Boules	Y0466010	Casefabre	59,5	1249	679	231
263	Rhône-Méditerranée-Corse	Tet (partielle)	Y0474030	Perpignan	1300,0	1249	679	230
264	Rhône-Méditerranée-Corse	Matassa	Y0626410	Albas	41,4	1077	662	147
265	Rhône-Méditerranée-Corse	Dure	Y1355410	Martys	12,8	974	1491	1004
266	Rhône-Méditerranée-Corse	Oqnon	Y1445010	Pépieux	47,1	1077	928	123
267	Rhône-Méditerranée-Corse	Orbieu	Y1514010	Montjoï le Moulin	75,8	1163	974	347
268	Rhône-Méditerranée-Corse	Cesse	Y1605020	Ferrals-les-Montagnes	6,0	974	1455	2043
269	Rhône-Méditerranée-Corse	Cesse	Y1605030	Cantinerques	47,0	974	1463	868
270	Rhône-Méditerranée-Corse	Herault	Y2002010	Vallerauque	46,0	898	1898	1741
271	Rhône-Méditerranée-Corse	Salaqou	Y2235010	Mas Audran	78,0	1077	1065	430
272	Rhône-Méditerranée-Corse	Malière	Y4616220	Gour de l'Astre	12,0	1225	939	550
273	Rhône-Méditerranée-Corse	Caramy	Y5105010	Vins sur Caramy	215,0	1225	967	434
274	Rhône-Méditerranée-Corse	Verne	Y5436210	Les Cabris	38,0	1084	939	323
275	Rhône-Méditerranée-Corse	Golo	Y7002020	Albertacce	92,6	1025	1017	1151
276	Rhône-Méditerranée-Corse	Erco	Y7006010	Cuccia	23,0	1025	867	1112
277	Rhône-Méditerranée-Corse	Asco	Y7114010	Ponte Leccia	366,0	1025	773	488
278	Rhône-Méditerranée-Corse	Golo	Y7212010	Volpaiola	930,0	1025	871	517
279	Rhône-Méditerranée-Corse	Bevinco	Y7315010	Lancone	53,6	1025	692	420
280	Rhône-Méditerranée-Corse	Luri	Y7415210	Campo	19,0	1025	663	352
281	Rhône-Méditerranée-Corse	Acqua Tignese	Y7416010	Ersa station AEP	4,9	1025	568	210
282	Rhône-Méditerranée-Corse	Aliso	Y7505010	Malpergo	68,6	1025	617	301
283	Rhône-Méditerranée-Corse	Regino	Y7615010	Regino amont	44,7	1025	683	307
284	Rhône-Méditerranée-Corse	Figarella	Y7715010	Bonifato	33,8	1025	613	937
285	Rhône-Méditerranée-Corse	Fango	Y7804010	Galeria	129,0	1008	810	553
286	Rhône-Méditerranée-Corse	Sagone	Y8005210	Pont de Ficaghia	56,0	990	1226	319
287	Rhône-Méditerranée-Corse	Liamone	Y8124010	Pont de Truggia	325,0	990	1210	774
288	Rhône-Méditerranée-Corse	Botoracci	Y8505010	Pont de Gradello	3,7	990	673	256
289	Rhône-Méditerranée-Corse	Taravo	Y8614010	Bains de Guitera	157,0	990	1070	1062
290	Rhône-Méditerranée-Corse	Taravo	Y8624010	Pont d'Abra	335,0	990	1077	531
291	Rhône-Méditerranée-Corse	Rizzanese	Y8814010	Pont de Zoza	130,0	990	879	712
292	Rhône-Méditerranée-Corse	Ortolo	Y8905010	Moulin de Curgia	70,3	990	738	338
293	Rhône-Méditerranée-Corse	Tavignano	Y9012010	Corte Gouffre	164,0	1008	1087	1118
294	Rhône-Méditerranée-Corse	Vecchio	Y9025010	Pont de Noceta	154,4	1008	1041	818
295	Rhône-Méditerranée-Corse	Tavignano	Y9102010	Antisanti (II)	566,0	1008	1056	894
296	Rhône-Méditerranée-Corse	Tavignano	Y9102020	Pont d'Altiani	489,0	1008	1140	718
297	Rhône-Méditerranée-Corse	Alesani	Y9205010	Pietra di Verde	44,2	1025	1155	795
298	Rhône-Méditerranée-Corse	Bravone	Y9215010	Pont de Bravone	66,7	1025	830	403
299	Rhône-Méditerranée-Corse	Bravone	Y9215020	Prise de Granaqui	65,8	1025	904	207
300	Rhône-Méditerranée-Corse	Fium' Alto	Y9315010	Acitaia	114,0	1025	883	317
301	Rhône-Méditerranée-Corse	Fium Orbo	Y9414010	Ghisoni	114,0	1008	921	807
302	Rhône-Méditerranée-Corse	Solenzara	Y9605220	Tafonato	97,0	990	854	603
303	Rhône-Méditerranée-Corse	Solenzara	Y9605230	Canniciu	99,7	990	877	604
304	Rhône-Méditerranée-Corse	Cavo	Y9705210	Sainte Lucie	57,5	990	833	765
305	Rhône-Méditerranée-Corse	Cavo	Y9705220	Tagliu Rossu	48,9	990	781	679
306	Rhône-Méditerranée-Corse	Stabiaccio	Y9805010	Moulin de Lastreto	24,2	990	687	462
307	Rhône-Méditerranée-Corse	Petroso	Y9806210	Pont de Bala	53,3	990	768	436

**ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG**

1, quai Koch
67070 STRASBOURG Cedex

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Auteur : Audrey ODDOS	Promotion 1999/2002 : Hautes-Pyrénées	
Titre : Intérêt d'une approche semi-distribuée par rapport à une approche globale en modélisation pluie-débit	Année de publication : 2002	
Nombre de volumes : 1	Nombre de pages : 96	Nombre de réf. biblio. : 40
Structure d'accueil : Cemagref – Groupement d'Antony – Division Qualité et Fonctionnement Hydrologique des Systèmes Aquatiques - Parc de Tourvoie- B.P.44 – 92123 ANTONY Cedex		
Résumé : Les approches globale et semi-distribuée sont comparées pour 4500 bassins, dits virtuels car formés de deux bassins réels ne présentant aucun lien, et quatre modèles conceptuels pluie-débit, GR4J, HBV, IHAC et TOPMO. L'approche semi-distribuée améliore les résultats de GR4J, TOPMO, HBV (mais non ceux de IHAC). Cependant pour de nombreux bassins l'approche globale demeure suffisante. Ces écarts de performances peuvent être reliés au coefficient de corrélation des pluies des sous bassins. Des résultats complémentaires révèlent la prépondérance de la distribution des pluies, par rapport à celle des paramètres du modèle, dans l'amélioration des résultats.		
Mots-clefs : modélisation pluie-débit, modèles conceptuels, intercomparaison de modèles, approche globale, approche semi-distribuée.		
