

Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud,
Ecole des Mines de Paris
& Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie
Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives

**Prise en compte des barrages-réservoirs
dans un modèle pluie-débit global**

Auteur : Lætitia Moulin

Directeurs de recherche :

M. Charles Perrin

M. Claude Michel



Groupement d'Antony
U.R. Qualité et Fonctionnement
Hydrologique des Systèmes Aquatiques
Parc de Tourvoie, BP 44
92 163 Antony cedex

Septembre 2003



Résumé

Les modèles hydrologiques globaux permettent de simuler la transformation de la pluie en débit sur des bassins naturels, avec de nombreuses applications pratiques dans le domaine de la gestion de la ressource en eau. Cependant, lorsqu'un barrage est construit sur un bassin, constituant une réserve d'eau dont l'évolution n'est pas commandée par des processus naturels, cette transformation est affectée et les modèles ne sont plus adaptés pour la représenter de façon fiable. Notre étude propose, de façon novatrice, de partir d'un modèle pluie-débit simple et d'y insérer, sans le modifier, des éléments permettant de prendre en compte de manière explicite l'action de barrages sur le comportement hydrologique du bassin versant.

Cette étude a été réalisée à l'aide du modèle global GR4J sur le bassin de la Seine en amont de Paris où se trouvent quatre barrages-réservoirs (ou lacs-réservoirs) de régulation des débits (écrêtement des crues, soutien d'étiages). Après la mise en place d'un cadre de modélisation, les effets des barrages ont été examinés au travers de la modélisation (détection d'impacts) et les possibilités du modèle actuel ont été évaluées. Des propositions de prise en compte des données de remplissage des barrages ont été testées.

Ces données ont été prises en compte de manière globale, au sein d'un unique réservoir ajouté à la structure du modèle. Le lieu d'action de ce réservoir a fait l'objet de tests dont les résultats indiquent qu'une solution pour laquelle le réservoir supplémentaire est alimenté à l'aide de l'eau contenue dans le réservoir de routage et effectue ses rejets en plusieurs points de la partie de routage du modèle permet d'obtenir des performances satisfaisantes sur l'ensemble des bassins étudiés, en nette amélioration par rapport au modèle initial qui n'exploite pas les données de barrages.

Abstract

Existing lumped hydrological models simulate the rainfall-runoff transformation for natural catchments, with many operational applications for water resources management. However, when a dam is built on a catchment, constituting a water storage whose evolution does not depend on natural processes, this transformation is modified and the initial models become less suitable for simulating it with good reliability. Our study adopted an innovative approach by examining solutions to add a new component to a simple rainfall-runoff to take into account water storage data from dams without modifying the initial structure of the model.

The study was carried out with the simple lumped GR4J model on the Seine River basin in France, upstream of Paris, where four large reservoirs were built for flow control (flood alleviation and low flow augmentation). After defining a modelling framework, the effects of dams were examined through a modelling point of view (impact detection) and the capabilities of the original model were studied. Propositions for taking into account water storage data were made, tested and evaluated.

These data were introduced into the model in a lumped way, by considering a single reservoir added to the model structure. Tests results indicate that satisfactory performances on all study catchments can be obtained by a solution in which water from the routing store is used to fill the additional model reservoir and water depleted from this reservoir is re-introduced into the routing part of the model. Clear improvements were shown in comparison with the initial model that does not consider water storage data.

Remerciements

J'adresse ma plus sincère reconnaissance à Gérard Sachon, responsable du groupement d'Antony (Cemagref), et à Jean-Luc Pujol et Cécile Loumagne, successivement chefs de l'unité QHAN, pour m'avoir accueillie, m'avoir offert un cadre propice au déroulement de ce stage et avoir su toléré quelques « absences sportives ».

Jean-Louis Rizzoli, Gérard Villion et Stéphane Demerliac, de l'Institution des Grands Lacs de Seine, ont mis à ma disposition des données de gestion de barrages et ont eu une action déterminante pour m'aider à mieux cerner la problématique du sujet. Leurs commentaires sur ce travail ont également permis d'améliorer la qualité de ce mémoire. Pierre Javelle (Unité réseau de mesures), Denis Etienne et Marc Valente (Unité de valorisation des données hydrologiques) de la DIREN Ile-de-France m'ont transmis des renseignements sur l'organisation et la qualité des mesures des stations hydrométriques du bassin. Je les en remercie tous vivement.

Tout mon respect et mes plus sincères remerciements vont à Charles Perrin et Claude Michel qui, par leurs idées, conseils et critiques, ont fait de ce stage de DEA une expérience passionnante et vraiment très enrichissante. Merci en particulier à Charles pour la disponibilité et la patience dont il a toujours su faire preuve à mon égard.

Un grand merci à l'ensemble des membres permanents ou stagiaires du Cemagref – et en particulier à l'équipe hydrologie (Vazken, Marine, Ludovic, Thibault, Claudia, Mamoutou et Marc) – pour m'avoir fait partager un peu, leurs diverses connaissances et expériences, et à ceux qui m'ont aidée d'une façon plus pratique : les documentalistes du Cemagref, Jean-Louis et Sophie. Toutes ces personnes ont fait de ce stage un moment agréable, sans difficulté et plein de bonne humeur.

Table des matières

INTRODUCTION	2
I. CONTEXTE ET OBJECTIFS	3
I.1 LE CONSTAT D'UN BESOIN.....	3
I.2 LE CONSTAT D'UNE DIFFICULTE	4
I.2.1. <i>Difficultés associées à la représentation des barrages</i>	4
I.2.2. <i>Revue bibliographique des solutions de modélisation existantes</i>	5
I.3 DEFINITION DU SUJET	7
II. DONNEES ET MODELES MIS EN ŒUVRE	8
II.1 BASSINS D'ETUDE : ENVIRONNEMENT ET DONNEES	8
II.1.1. <i>Présentation du bassin d'étude</i>	8
II.1.2. <i>Les lacs-réservoirs du bassin de la Seine</i>	11
II.1.3. <i>Inventaires des données disponibles</i>	14
II.2 CONTEXTE DE MODELISATION	17
II.2.1. <i>Présentation du modèle</i>	17
II.2.2. <i>Mise en œuvre générale d'un modèle</i>	18
II.2.3. <i>Choix des critères d'évaluation en contrôle</i>	19
III. ETUDE A L'AIDE DU MODELE INITIAL	20
III.1 FONCTIONNEMENT DU MODELE INITIAL.....	20
III.1.1. <i>Résultats en calage</i>	20
III.1.2. <i>Résultats en contrôle</i>	21
III.1.3. <i>Caractéristiques et résultats du modèle de l'amont vers l'aval</i>	22
III.2 PERTURBATIONS ENGENDREES PAR LA PRESENCE D'UN BARRAGE.....	23
III.2.1. <i>Immédiatement à l'aval du barrage</i>	23
III.2.2. <i>Propagation des perturbations</i>	25
IV. ÉVALUATION DU MODELE INITIAL AVANT L'UTILISATION DES DONNEES DE BARRAGES	28
IV.1 COMPARAISON AVEC D'AUTRES MODELES EXISTANTS	28
IV.2 MODIFICATIONS DANS LES EQUATIONS DU MODELE GR4J	29
IV.2.1. <i>Propositions de modifications du modèle initial</i>	30
IV.2.2. <i>Analyse des résultats</i>	31
IV.2.3. <i>Conclusions</i>	32
V. PRISE EN COMPTE DES DONNEES DE BARRAGES	32
V.1 PRESENTATION DE LA PRISE EN COMPTE DES DONNEES DE BARRAGES.	32
V.2 RECHERCHE D'UNE SOLUTION PERFORMANTE POUR L'ENSEMBLE DES BASSINS.....	33
V.2.1. <i>Un point d'alimentation et un point de rejet</i>	33
V.2.2. <i>Deux points d'alimentation et un point de rejet</i>	35
V.2.3. <i>Un point d'alimentation et deux points de rejet</i>	37
V.2.4. <i>Un point d'alimentation et trois points de rejet</i>	39
V.2.5. <i>Conclusion</i>	41
V.3 ANALYSE DES RESULTATS	42
V.3.1. <i>Analyse bassin par bassin des résultats obtenus</i>	42
V.3.2. <i>Critique de la solution retenue</i>	45
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	47
REFERENCES	48
ANNEXES	50

INTRODUCTION

La volonté de « gestion de l'eau » n'est pas une notion sans conséquence. Le cycle de l'eau, processus naturel, n'a aucune raison a priori de nécessiter de modifications. Cependant, la vie ou la survie des êtres vivants, et a fortiori de l'homme, est très fortement liée à la présence ou non de cette eau. Très vite, l'être humain a donc voulu pouvoir profiter au maximum des avantages de cette présence et en réduire les inconvénients. De façon logique, deux problématiques sont progressivement apparues : se protéger contre les événements extrêmes (crues, étiages) pouvant être dommageables, et gérer la « ressource eau » de manière à pouvoir disposer de ses avantages à volonté, à la fois quantitativement, temporellement et géographiquement.

L'utilisation de l'eau d'un bassin et les aménagements que cela nécessite ont contribué, pour une large part, au développement de quelques-unes des plus grandes civilisations anciennes. A l'heure actuelle, nos sociétés modernes tendent également à faire intervenir l'eau dans des secteurs d'activité de plus en plus variés et nombreux sous forme d'une ressource utilisable ou d'un moyen de production. En même temps, elles imposent un contrôle plus strict des nuisances provenant des crues ou des étiages. Ce contrôle nécessite couramment la construction de réservoirs de stockage qui représentent un moyen efficace de redistribuer de l'eau dans le temps, en accord avec les nécessités socio-économiques, tout en permettant, le cas échéant, de prélever une partie de l'eau constituant un danger pour les aménagements humains. Cependant, les projets de barrages sont parfois vigoureusement dénoncés aujourd'hui. Loin de résoudre toujours les difficultés, ils peuvent les accroître. Ainsi, ils peuvent par exemple induire une sensation de sécurité non justifiée qui augmenterait fortement la vulnérabilité à l'aléa. C'est le cas notamment lors de la saturation d'un ouvrage qui peut entraîner de façon brutale le passage d'une situation de débit écrêté à une situation de retour au débit naturel.

Les barrages sont des outils physiques de gestion de l'eau. Cependant, la gestion de ces ouvrages faisant fréquemment intervenir un mode prévisionnel ou l'utilisation de scénarii, le recours à un modèle devient généralement nécessaire. De nombreux modèles existent et parmi eux les modèles pluie-débit. Ces derniers sont des outils couramment utilisés dans le cadre de la maîtrise humaine de l'eau, notamment pour la prévision des crues et des étiages, ou pour le dimensionnement d'ouvrages.

Les barrages-réservoirs et les modèles pluie-débit forment donc deux outils pour la gestion de l'eau, complémentaires et de nature différente : d'un côté des outils physiques pour agir, de l'autre des outils mathématiques pour calculer, prévoir et optimiser. Il est intéressant de ne pas considérer ces outils de façon indépendante et de les faire interagir : des études ont déjà tenté d'estimer les impacts hydrologiques des réservoirs au moyen d'un modèle pluie-débit. Cette étude propose de façon novatrice, d'intégrer au sein d'un modèle pluie-débit global la présence de retenues d'eau sur le bassin versant. Elle portera sur le bassin versant de la Seine, où existent de forts enjeux en matière d'inondations et de gestion de la ressource en eau. Ce bassin compte quatre barrages-réservoirs gérés par l'Institution « Les Grands Lacs de Seine », ou Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine (IIBRBS).

La première partie de ce mémoire est consacrée à la définition du contexte et de la problématique de notre étude. La seconde partie présente les bassins étudiés puis le cadre de modélisation. Dans une troisième partie, nous analysons les résultats obtenus à l'aide du modèle initial, ce qui permet une compréhension plus précise du fonctionnement d'un bassin influencé et des difficultés posées en terme de modélisation. La partie suivante évalue ce modèle initial comparativement à d'autres modèles et présente les limites de la modélisation

sans prise en compte des données de barrages. Enfin, dans la dernière partie, des propositions permettant de prendre en compte explicitement les données de barrages sont mises en œuvre, testées et évaluées.

I. CONTEXTE ET OBJECTIFS

I.1 Le constat d'un besoin

On peut dire, de façon générale, que l'objet des études de gestion des ressources en eau dans le cadre d'un bassin fluvial est de préparer les décisions du planificateur sur la meilleure utilisation des ressources en eau, de lui fournir les éléments de choix rationnel entre certains usages concurrents et de définir les stratégies de l'exploitant pour la meilleure gestion de ces ressources [Méchin *et al.*, 1970]. L'élaboration de plans d'aménagement d'un bassin versant incluant la création d'un ou plusieurs réservoir(s) à buts multiples demeure très complexe, et l'importance des coûts liés à la réalisation de ces aménagements requiert des méthodes d'étude efficaces et capables de fournir une solution optimale.

De plus, la gestion des barrages-réservoirs par rapport à des objectifs à l'aval, géographiquement éloignés, ne peut être envisagée sans une bonne connaissance du devenir des lâchures et des temps de propagation différents à partir de chaque ouvrage. Si le gestionnaire de l'ouvrage peut savoir quels impacts aura une lâchure donnée, dans un contexte donné, et à un instant donné et, compte tenu des délais de propagation, associer à cela l'effet des précipitations sur le bassin aval au barrage et non contrôlé, alors il lui sera plus facile de prendre sa décision de manœuvre et d'optimiser les lâchures provenant d'un ou plusieurs réservoirs de façon simultanée.

Un modèle est alors utile tant à l'élaboration qu'à l'application et l'amélioration des règles d'exploitation des réservoirs. Lorsque les ouvrages sont déjà construits et les règles de gestion définies, les simulations permettent l'analyse, avec plus de précision, de leurs effets sur le bassin. Le recours à un modèle peut également être le moyen le plus efficace de reconstituer le régime naturel d'un bassin aménagé, si le besoin s'en fait sentir.

On peut alors être tenté de recourir à un modèle mathématique très sophistiqué, afin de simuler toutes les options possibles de manière à effectuer un choix. Dorfman (1965) considérait à l'époque une telle attitude comme irréaliste compte tenu du grand nombre de simulations nécessaires. Aujourd'hui grâce aux progrès informatiques, les difficultés sont moindres. Cependant, la solution semble plutôt passer par l'emploi conjugué de méthodes de simulation et d'optimisation.

Ainsi :

- Il semble intéressant de disposer d'un outil performant et simple d'emploi pour **comprendre** et pour **tester l'impact de scénarios d'aménagements** dans le cas d'un contexte hydrologique donné.
- Prendre en compte dans le modèle, la présence ou le rôle des retenues d'eau pourrait sensiblement **améliorer les performances du modèle** sur un bassin comportant un ou plusieurs réservoirs.
- La **multiplication des retenues** pose un problème plus global d'évaluation des effets cumulés et des impacts, positifs ou négatifs, à l'échelle des bassins et sous-bassins.

Ce besoin est d'autant plus important que le nombre de barrages dans le monde est très élevé aujourd'hui : on dénombre aujourd'hui plus de 45 000 « grands barrages » (c'est-à-dire d'une hauteur supérieure à 15 m), chiffre auquel il convient d'ajouter le nombre total mondial de

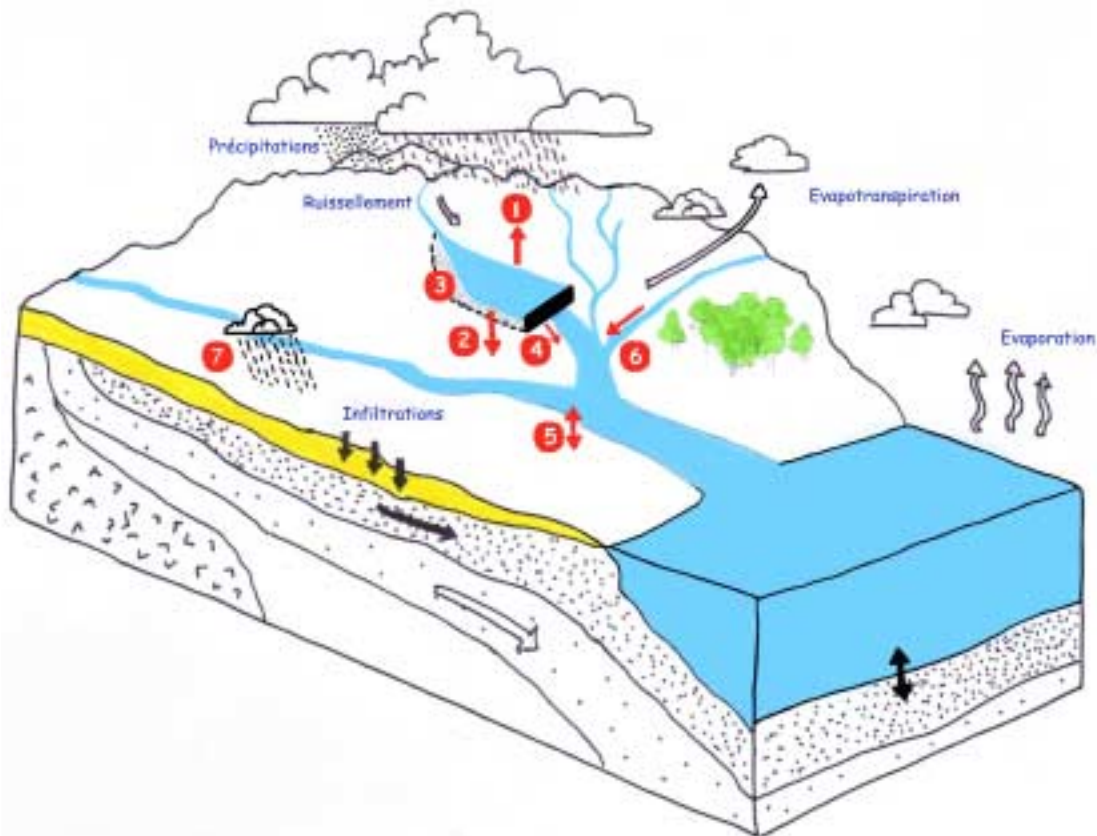
petits barrages ! Il existe actuellement plus de 633 réservoirs d'une capacité supérieure à 500 millions de m³ dans le monde. Rien qu'en France, il y a plus de 500 barrages, dont les deux tiers font moins de 30 m de haut [Degoutte et Fry, 2002].

Bien que les barrages soient des outils de gestion de l'eau très anciens (l'art de réguler les débits par la construction de barrages remonte aux civilisations chinoise et babylonienne, bien avant notre ère (Fahlsbursch (2001), Biswas (1979) in [Meybeck *et al.*, 1998]), l'expansion du nombre de barrages a explosé au cours du dernier siècle, notamment pour le développement de l'énergie hydroélectrique.

I.2 Le constat d'une difficulté

I.2.1. Difficultés associées à la représentation des barrages

Les difficultés associées à la prise en compte des barrages dans des modèles ont principalement l'origine suivante : les barrages introduisent dans un processus cyclique naturel, des modifications artificielles et fortement discontinues. Ainsi, des modèles qui ont été construits pour représenter des phénomènes naturels et continus ne sont pas bien adaptés à ce cas particulier, ce qui explique leur difficulté à représenter sans modification de leur structure, des régimes influencés.



<u>Les modifications locales dues au barrage :</u>	<u>Éléments à prendre en compte dans le modèle pour simuler les impacts à l'aval :</u>
1 : Évaporation supplémentaire	5 : Échanges avec la nappe
2 : Infiltration supplémentaire	6 : Action des affluents
3 : Rétention artificielle	7 : Précipitations sur la totalité du bassin
4 : Modification des transferts	

Figure 1 : Modifications dans le cycle hydrologique engendrées par un barrage

La présence d'un barrage-réservoir sur la bassin versant introduit un nombre important de modifications dans le cycle hydrologique naturel et en particulier dans la relation entre la pluie et les débits (**Figure 1**) :

- Une augmentation de la superficie de la surface libre du cours d'eau (lac) peut augmenter l'évaporation du bassin.
- De même, l'accroissement de la surface de contact entre l'eau et le sol peut augmenter les infiltrations et l'approvisionnement des nappes.
- Le fait de retenir artificiellement une partie de l'eau du bassin peut perturber la partie « transfert » de la transformation de la pluie en débit
- Les manœuvres de barrages vont perturber les transferts naturels des écoulements de l'amont vers l'aval.

I.2.2. Revue bibliographique des solutions de modélisation existantes

Il existe une grande quantité de modèles différents permettant de simuler des débits en rivière. Cependant, il est possible de classer la plupart d'entre eux dans un des trois groupes suivants : les modèles hydrauliques, les modèles hydrologiques et les modèles alliant hydraulique et hydrologie.

Les **modèles hydrauliques** utilisent les équations de l'hydraulique (Barré de Saint-Venant, ...) et des outils mathématiques ou empiriques pour réaliser la propagation de débits le long d'un cours d'eau : on mesure le débit en un point A et on en déduit au sein du modèle, le débit en un point B, situé à l'aval. Ce sont donc des modèles de type débit-débit. Ils sont extrêmement utilisés dans le cas de ruptures de barrage. Ces modèles sont aussi très utilisés pour quantifier les impacts de la présence de réservoirs ou de systèmes de réservoirs dans l'atténuation de la propagation d'une onde de crue [Garcia-Navarro et Zorraquino, 1993] ainsi que pour visualiser le trajet d'une lâchure de barrage importante [Garcia-Navarro *et al.*, 1999].

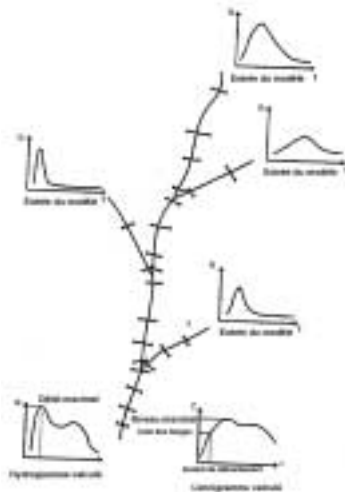


Figure 2 : Propagation hydraulique des débits (d'après le cours d'hydraulique de J.Dunqlas)

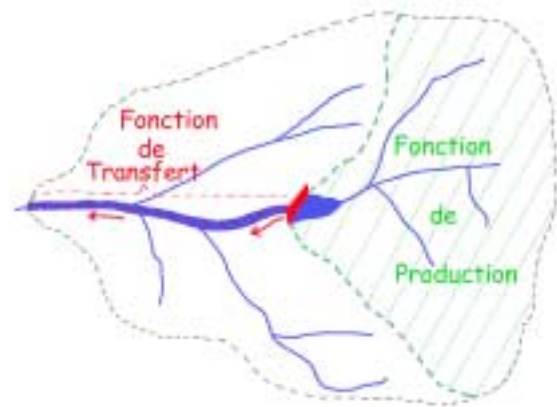


Figure 3 : Schéma d'un bassin versant dont les fonctions de production et de transfert sont isolées.

Même s'ils conviennent assez bien pour réaliser des scénarii de gestion, ces modèles sont toutefois limités. Les méthodes de propagation-atténuation (**Figure 2**) des ondes hydrauliques (modèles débit-débit) présentent deux inconvénients principaux. Le premier est *qu'on ne peut obtenir un temps de prévision en un point donné, supérieur à celui de la propagation de l'onde dans le(s) cours d'eau*. Le second est que ces méthodes *négligent totalement les interactions de la rivière avec la nappe ou les apports latéraux* (ce qui revient à complètement dissocier les fonctions de production et de transfert (**Figure 3**)). Le problème est que ces deux derniers points peuvent être importants : les premiers en période de crue, les seconds en étiage. Par

exemple, la propagation d'une lâchure en période d'étiage peut être largement modifiée voire même, à une certaine distance, aller jusqu'à disparaître en raison des échanges avec la nappe. Ces méthodes débit-débit nécessitent également des *points de mesure à l'amont*, parfois difficiles à mettre en place, avec des jaugeages, des échelles et des tarages...

Les **modèles hydrologiques** sont des modèles plus adaptés à ces diverses contraintes.

La sortie d'un modèle hydrologique pluie-débit est le débit dans le cours d'eau considéré. En entrée, le modèle peut comporter plus ou moins de données différentes. Le minimum est d'avoir des données de précipitations et des données permettant de tenir compte de la demande évaporatoire de l'atmosphère (généralement l'évapotranspiration potentielle ou la température), mais on peut suivant le cas y ajouter d'autres types de données telles que des données géologiques, climatiques, écologiques ou topographiques. Ces modèles prennent ainsi en compte tous les échanges participant au cycle hydrologique : interactions avec l'atmosphère, avec les nappes souterraines, phénomènes de stockage, etc.

Les modèles hydrologiques permettent donc de résoudre la plupart des difficultés rencontrées lors de l'utilisation de modèles hydrauliques : par rapport à ces derniers, les modèles pluie-débit présentent l'avantage de permettre un délai de prévision plus long puisqu'ils remontent jusqu'aux pluies, et de ne nécessiter qu'un unique jaugeage à l'aval [Yang, 1993; Yang et Michel, 2000].

Parmi les modèles hydrologiques, on peut distinguer les modèles globaux et les modèles distribués spatialement. Lors de l'utilisation de modèles distribués, il est très facile de prendre en compte de manière complètement explicite la présence d'un ou plusieurs barrages et de simuler leur fonctionnement. C'est le cas du modèle pluie-débit conceptuel à réservoir CEQUEAU développé par l'INRS au Canada [Morin *et al.*, 1975], et pour lequel il est extrêmement aisé d'inclure au sein même du modèle, toute modification physique du bassin. Les résultats montrent que (1) l'exploitation d'un système de réservoirs modifie le régime « naturel », (2) et que cette influence décroît à mesure que le bassin s'agrandit. Cependant, l'évolution des volumes d'emmagasinement des réservoirs est très dépendante de la précision de la connaissance des précipitations : une variation de 51 mm sur la hauteur des précipitations conduit à une erreur de 1,2 à 1,8 m sur la simulation du réservoir ! Plusieurs études [Desconnets *et al.*, 1998] ont été réalisées à l'aide de CEQUEAU pour prendre en compte les effets d'un réservoir. Ayadi et Bargaoui (1998) utilisent ce modèle dans le cas d'un bassin versant fortement hétérogène et comportant un barrage. Les résultats obtenus avec ce modèle paraissent satisfaisants. Les auteurs rappellent que lors de l'utilisation de ce modèle, la bonne description des processus hydrologiques dépend inévitablement de la qualité mais aussi de la densité et du nombre d'années d'observations de terrain.

Les modèles hydrologiques globaux spatialement ne prennent pas si facilement en compte la présence de barrages sur le bassin versant, et, à notre connaissance, il n'existe actuellement aucune étude ayant tenté d'effectuer cette prise en compte sur de tels modèles.

Les modèles alliant hydraulique et hydrologie sont assez nombreux dans la littérature. Ils permettent d'allier les avantages des modèles hydrauliques et des modèles hydrologiques. Avec ce type de modèle, il est possible de calculer le volume nécessaire pour écrêter une crue donnée [Michel et Legras, 1986], ou d'estimer l'impact d'un système de réservoirs sur l'écrêtement de crue [Michel, 1987]. Ces modèles peuvent également être utilisés pour réaliser des études hydrologiques de bassins comportant un ou plusieurs barrages [Stewart *et al.*, 1999]. Cependant, la réalisation et l'utilisation de tels modèles sont très souvent extrêmement compliquées, car elles nécessitent à la fois :

- une très bonne connaissance du bassin (le modèle est en général distribué sur des tronçons de rivière),
- un nombre de calculs complexes importants, même s'il est également possible d'utiliser des outils de propagation simplifiée (réglette de Bachet, ...).

Ces modèles couplés ne sont donc pas utilisables facilement de façon courante.

De plus, l'association de deux types de modèles différents pose le problème de la propagation des erreurs qui sont en général d'ordres de grandeurs très différents, un modèle hydraulique étant bien plus précis qu'un modèle hydrologique.

Ainsi, dans le cas particulier de la gestion courante des barrages-réservoirs et afin de faciliter l'optimisation des décisions, le modèle pluie-débit semble constituer un outil particulièrement approprié :

- il résout de façon couplée la production et le transfert,
- il prend en compte les diverses interactions hydrologiques que l'hydraulique néglige,
- il permet de commencer les prévisions/simulation à partir des précipitations plutôt qu'à partir des débits déjà présents en rivière, ce qui permet d'améliorer les délais,
- son utilisation semble plus aisée que celle d'un modèle alliant hydraulique et hydrologie en ne nécessitant pas une connaissance très fine des caractéristiques du bassin étudié,
- il permet de travailler avec un ordre de grandeur d'erreur appréhendable.

Cette étude portera sur l'utilisation d'un **modèle pluie-débit global**.

I.3 Définition du sujet

Le principal problème dans la plupart des modèles hydrologiques globaux existant actuellement, est qu'il n'est pas tenu compte de la présence de réservoirs supplémentaires par rapport à l'état du cours d'eau naturel. Ainsi, des modèles hydrologiques sont utilisés de la même façon sur des bassins comportant ou non des réservoirs. Même si ces modèles permettent de prendre en compte de nombreux phénomènes « naturels », tels qu'une géologie particulière ou une forte densité forestière, ils ne sont pas forcément adaptés aux phénomènes artificiels et fortement discontinus qu'induisent la présence de réservoirs créés par l'homme et les manœuvres de barrages. Le niveau de complexité actuel des modèles ne semble pas être suffisant pour prendre en compte, sans modification, ce type d'événements.

Le but de cette étude est de parvenir à intégrer de façon fiable et explicite, au sein de la structure d'un modèle pluie-débit simple et efficace, les impacts de la présence des lacs-réservoirs et de leurs manipulations sur le régime hydrologique du bassin versant concerné.

Cela apporterait une réponse à des besoins différents :

- améliorer un modèle pluie-débit opérationnel, dans le cas où des barrages se trouvent sur le bassin versant concerné ;
- fournir un outil de gestion performant pour les barrages (simulation, prévision, prise en compte des précipitations, ...) ;
- prévoir les impacts d'aménagements futurs.

On s'attardera donc à essayer de caractériser plus particulièrement les points suivants :

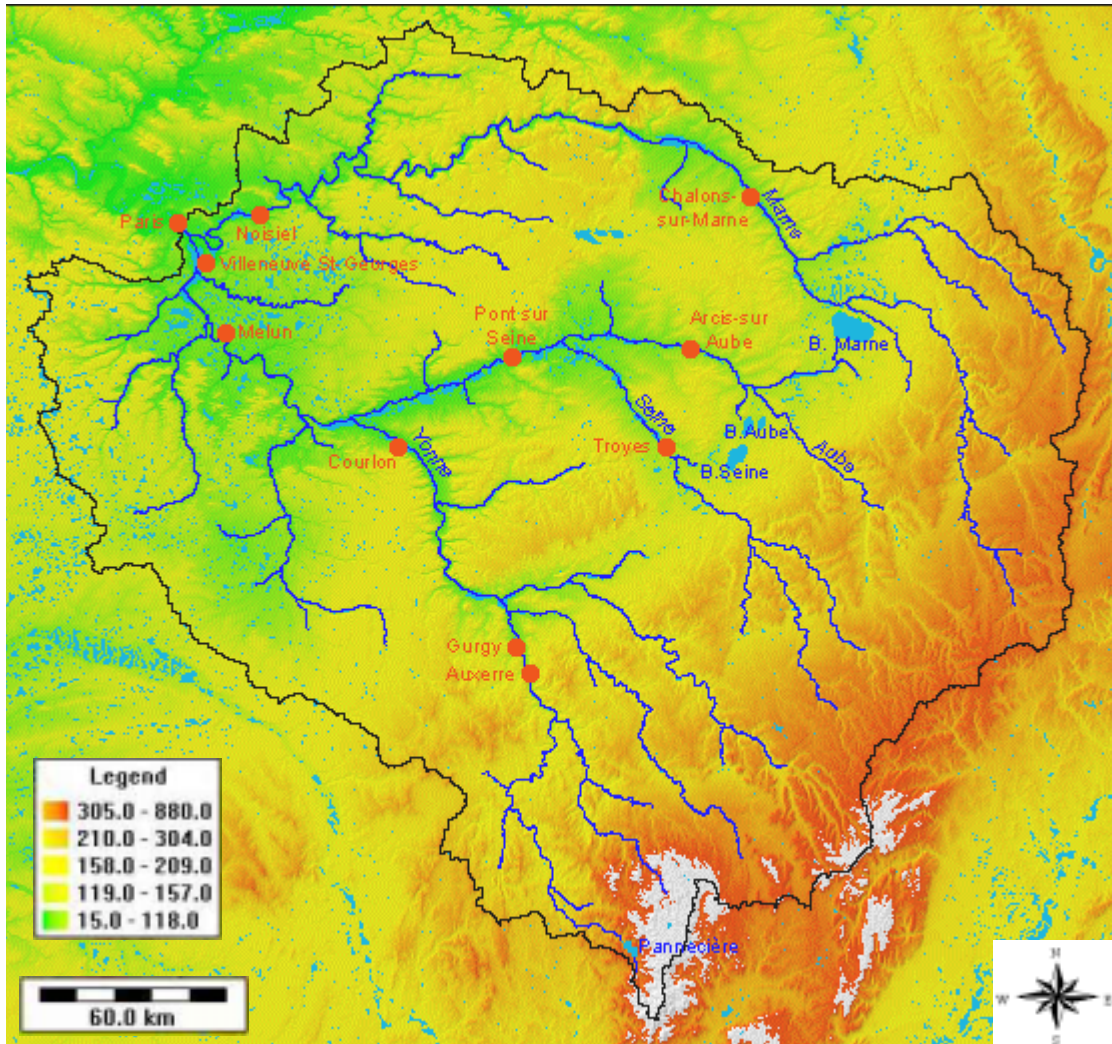
- comment prendre en compte les ouvrages pour une meilleure simulation des débits ; comment l'influence des ouvrages se transmet de l'amont vers l'aval (bassins emboîtés) ;
- comment cette influence peut être prise en compte lorsqu'il y a interaction de plusieurs ouvrages (confluence de bassins influencés).

La démarche proposée est de rechercher de manière empirique, la façon la plus efficace d'effectuer cette prise en compte. Le temps du stage étant limité, nous nous restreignons ici, au cas du bassin versant de la Seine en amont de Paris, bassin comportant quatre importants barrages-réservoirs.

II. DONNEES ET MODELES MIS EN ŒUVRE

II.1 Bassins d'étude : environnement et données

II.1.1. Présentation du bassin d'étude



Caractéristiques physiques

Cette étude va être menée sur le bassin de la Seine en amont de Paris (station d'Austerlitz). Cette zone a été choisie parce qu'elle comporte un réseau hydrographique régulé par au moins quatre importants barrages réservoirs situés sur la partie amont du bassin (**Figure 4, Figure 10**). De plus, étant donnée la forte vulnérabilité tant humaine que socio-économique de la région parisienne, le contrôle du débit est sur ce bassin une problématique particulièrement présente.

Le bassin de la Seine amont s'étend sur une vaste zone du nord de la France (8% du territoire national). Ce bassin couvre la vallée de la Seine en amont de Paris, ainsi que celles de l'ensemble de ses affluents sur ce tronçon, soit une superficie de 43 800 km² à Paris, ce qui représente à peu près les deux tiers de la superficie totale du bassin de la Seine (67 500 km²). Les bassins versants associés peuvent être découpés en trois catégories :

- les premiers sont des bassins peu perméables et/ou à forte pente situés sur la périphérie amont et comprenant principalement l'Yonne, l'Armançon, le Serein, la Haute Seine, l'Aube, la Haute Marne, la Saulx.
- les seconds occupent une zone perméable au centre du bassin: la vallée de la Marne entre Frignicourt et Epernay, la Petite Seine et l'Yonne à l'aval d'Auxerre.
- les derniers sont situés sur des bassins variés de la région Île-de-France avec des vallées à fort pouvoir de ruissellement (le petit et le grand Morin, l'Yerres, le Loing), des vallées peu productives (Essonne, Ourcq) et des zones péri-urbaines.

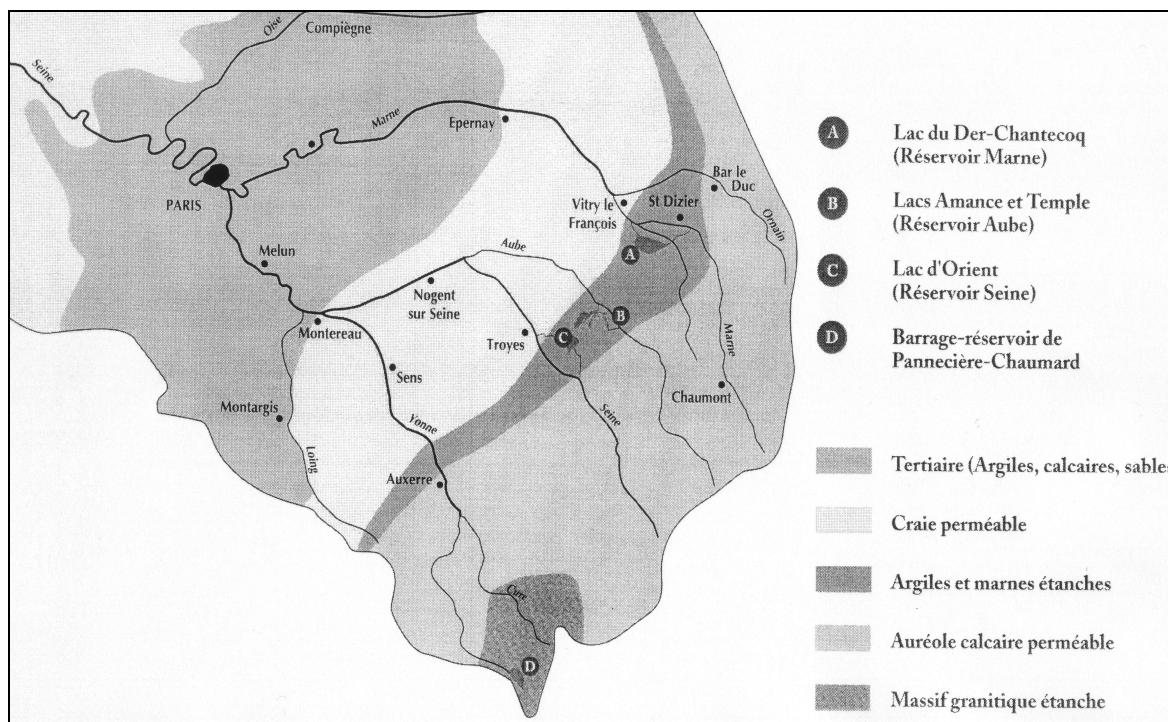


Figure 5 : Géologie du bassin (document IIBRBS)

Les reliefs de ce bassin sont modérés et peu contrastés (moins de 2% du bassin dépassent l'altitude de 550 m) ; son climat est tempéré ; la distribution concentrique (auréolée) de ses formations géologiques sédimentaires (**Figure 5**) est relativement homogène [Meybeck *et al.*, 1998]. Les précipitations moyennes sont de 700 mm/an, avec des valeurs plus fortes en altitude : sur les sommets les plus élevés du Morvan, on atteint 1200 mm/an.

Le déficit d'écoulement est estimé à 500 mm/an et attribué à l'évapotranspiration, soit un écoulement spécifique de 200 mm/an, ce qui est faible par rapport aux autres fleuves français. L'écoulement spécifique est maximal aux sources de l'Yonne.

La Seine prend sa source en Côte d'or à une altitude de 471 m, pour une altitude à Paris de 26,4 m. Les débits moyens annuels de la Seine à Paris sont estimés à $250 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La fourchette des débits « naturels » de la Seine à Paris varie de $25 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (minimum observé) à $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (maximum observé). Les cours d'eau du bassin de la Seine ont un régime pluvio-océanique avec un maximum de débit en hiver et un minimum en été.

Cours d'eau	Aube	Marne	Yonne	Loing	Essonne	Seine
Bassin (km ²)	4 500	12 679	10 887	4 150	1 850	43 800
Débit moyen (m ³ .s ⁻¹)	25	36	75	28	8	250
Débit max. (m ³ .s ⁻¹)	348	700	1 200	-	30	2 500

Tableau 1 : Caractéristiques des affluents de la Seine amont, d'après Meybeck *et al.* (1998)

Les conséquences hydrologiques

Les annales [Champion, 2001] relatent, à Paris, des inondations de forte importance telles que celles de 1175, 1466, 1562, 1607, 1649, 1651, 1658, 1740, 1784, 1910, 1924 montrant la régularité de tels événements. Les plus grandes crues de la Seine à Paris au cours des six derniers siècles semblent être celles de 1658 et 1910. Elles auraient eu des débits maximaux à peu près équivalents ($2\,500\text{ m}^3/\text{s}$). Au cours du siècle dernier, on recense trois crues exceptionnelles: celles de 1910 [Goubet, 1997 ; Schneider, 1997], de 1924, et de 1955. Des crues marquantes ont également été rencontrées plus récemment en 1970, 1983 et 1994 pour la Marne ; en 1978, 1982, 1995, 2000 et 2001 pour la Seine.

Lors de la génération des grandes crues, 90 % des apports proviennent de la zone périphérique amont qui couvre 40% du territoire concerné.

Les crues peuvent être caractérisées par leur ampleur (durée, volume et maximum atteint) et par la succession des épisodes pluvieux qui provoquent les ondes de crues des différents affluents. En fonction de leur concomitance, elles aggravent plus ou moins les inondations. Sur le bassin de la Seine amont, les **variations interannuelles** des écoulements sont considérables et **fortement conditionnées par la pluviométrie**.

Il est possible de retenir ces quelques grandes caractéristiques des crues du bassin de la Seine amont [Marti et Lepelletier, 1994] :

- la plupart du temps, elles sont **lentes, répétitives** et **relativement prévisibles** grâce à leur **décalage important** par rapport à l'événement pluviométrique qui en est à l'origine [Rizzoli, 1997] (temps de réponse du bassin : Yonne 3 à 5 jours, Seine et Aube 5 à 7 jours, Marne 7 à 9 jours);
- il n'y a **pas de relation univoque entre les crues à Paris et celles de ses affluents** : la crue de février 1784 constitue un record toujours inégalé pour l'Oise et la Marne alors qu'elle a été à peu près vingtennale à Paris. De même, les crues de 1836 et 1856 n'ont jamais été dépassées en certains points du bassin de l'Yonne alors qu'elles ont été insignifiantes pour Paris ;
- lors des **crues historiques**, la pointe de crue de la Seine à Paris correspond au passage de la pointe de crue du bassin de l'Yonne, pour les épisodes où cette rivière participe fortement à la crue. La **participation de l'Yonne** à la pointe de la crue à Paris est alors généralement **supérieure à 40%** (*Figure 8*);
- les différents affluents contribuent à la formation de crues **successivement** dans l'ordre chronologique suivant : Yonne, Seine, Marne ;
- les crues les plus fortes ont lieu **en hiver** (en général de décembre à Mars), les crues de printemps et d'automne étant moins fortes en général.

Les étiages naturels sont, comme les crues, fortement liés à la pluviométrie et à l'état hydrique du sol : en période d'étiage, le débit naturel de la Seine provient presque exclusivement du drainage naturel d'aquifères superficiels [Tajjar et Levassor, 1993]. Ils ont lieu de juillet à octobre en année moyenne, et de mai à novembre voire décembre en année très sèche. En période sèche, les débits de la Marne chutent fortement.

Le débit à Paris est de l'ordre de $51\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour une période d'étiage de retour de 10 ans, et de $34\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ pour une période de retour de 50 à 100 ans (*Figure 6*). Ces valeurs sont à comparer avec ces autres valeurs : les prélèvements totaux sur le bassin de la Seine approchent $85\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ et rien que pour l'adduction d'eau potable, la valeur des prélèvements avoisine les $30\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Pour un fonctionnement acceptable du système Seine, le soutien d'étiage s'avère ainsi indispensable : en l'absence de réservoirs, les besoins ne seraient pas satisfaits pendant 30 jours par an en moyenne.

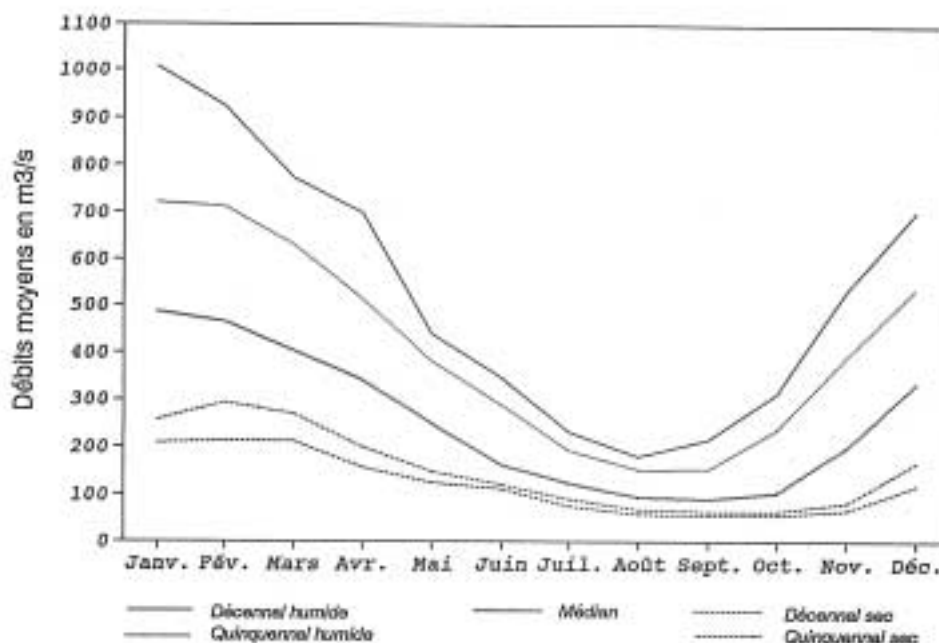


Figure 6 : Débits moyens naturels à Paris Austerlitz, période de 1900 à 1997 (d'après Miquel et Levassor, 1993)

II.1.2. Les lacs-réservoirs du bassin de la Seine

Les crues catastrophiques de 1910 et 1924 à Paris, ainsi que l'étiage sévère de 1921 et le développement de l'activité économique de la région parisienne au cours du dernier siècle, ont rendu nécessaire la régularisation du bassin de la Seine en vue d'un double objectif de protection de cette région contre les crues et de soutien des étiages [Villion, 1997 ; Meybeck *et al.*, 1998].

Quatre barrages réservoirs (**Tableau 2**) ont donc été réalisés à environ 300 km à l'amont de Paris. Les barrages « Seine », « Marne » et « Aube » sont situés en dérivation par rapport au cours d'eau, alors que le barrage de Pannecière vient en travers de l'Yonne. Ces quatre ouvrages sont localisés sur des terrains très peu perméables : soit sur des massifs granitiques du Morvan, soit sur des argiles du Gault de la Champagne humide.

	Année de mise en service	Bassin versant intercepté (km ²)	Volume (10 ⁶ m ³)	Volume / surface interceptée (mm)	Volume/ aire du b.v. Seine Amont (mm)	Débit maximum de prise (m ³ /s)	Débit maximum de restitution (m ³ /s)	Lâchures moyennes d'étiage (m ³ /s)
Yonne	1950	220	80	363.6	1.8	Débit total	14	6
Seine	1966	2400	205	85.4	4.7	180	35	17
Marne	1974	2950	350	118.6	8.0	408	50	30
Aube	1990	1700	170	100.0	3.9	135	35	14
Total		7250	805				135	67

Tableau 2 : Caractéristiques des réservoirs, d'après Meybeck *et al.* (1998)

L'Institution Interdépartementale des Barrages Réservoirs du Bassin de la Seine (IIBRBS) a la charge d'exploiter les lacs-réservoirs existants et de poursuivre le programme de construction de nouveaux aménagements, en vue d'assurer la protection contre les inondations et la régularisation des débits des rivières à l'étiage. Cette institution, également appelée « Les Grands Lacs de Seine » est un établissement public à caractère administratif qui a été créé en 1969. Elle souhaite améliorer ses outils (les modèles) afin de permettre de calculer les débits, d'optimiser les lâchures et les prélèvements, notamment en fin de pointe de crue pour réserver

des possibilités d'actions sur la suivante ou lorsque le niveau maximal des ouvrages est près d'être atteint. Nos travaux intéressent donc Les Grands Lacs de Seine.

Chacun des quatre grands lacs est géré suivant un règlement d'eau qui détermine des débits réservés à laisser en rivière, des débits de référence maxima à ne pas dépasser, les différentes tranches d'eau dans les retenues (**Figure 7**). L'exploitation journalière des réservoirs est conduite localement en respectant au mieux une consigne d'évolution des volumes du réservoir. Cette courbe est inscrite au règlement d'eau.

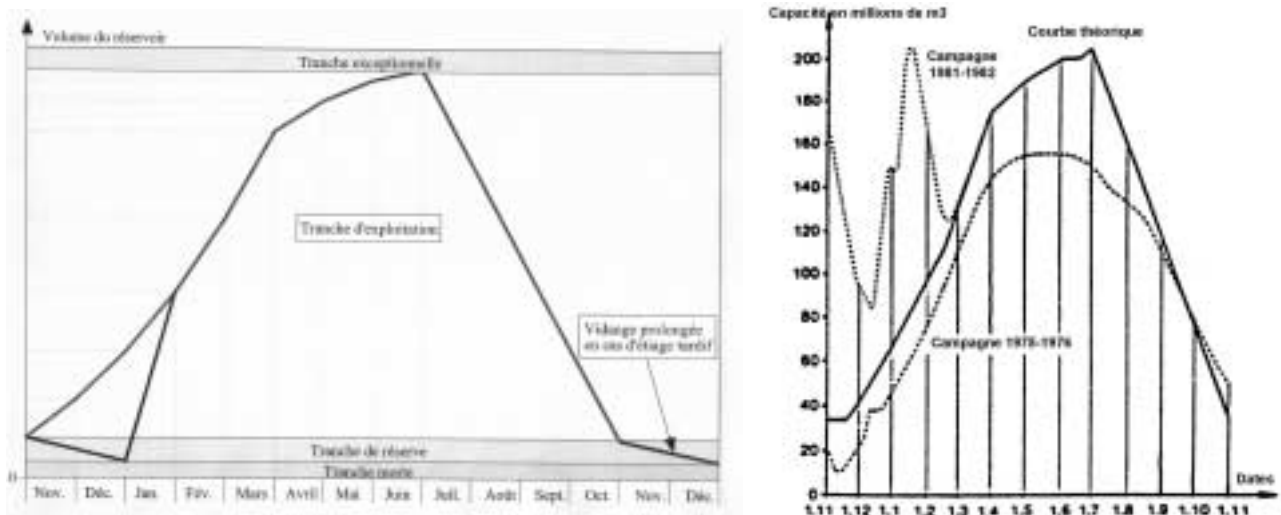


Figure 7 : Courbes de remplissage-vidange pour le réservoir Seine (d'après J.L.Rizzoli (1991))

Pour permettre une meilleure gestion des ouvrages, Les Grands Lacs de Seine utilisent actuellement le modèle MSBR (Modèle Seine Barrages-Réservoirs). C'est un modèle de propagation de débits, dans lequel on fait intervenir en plus, un « apport » du bassin (positif ou négatif suivant le cas) permettant d'intégrer les échanges nappe-rivière. Les données de pluie ne sont pas utilisées directement par le modèle mais permettent à l'utilisateur d'estimer la valeur approximative des « apports du bassin ». Cette estimation est essentiellement basée sur l'expérience de l'utilisateur ainsi que sur sa connaissance du fonctionnement du bassin. Enfin, ce logiciel peut être utilisé selon trois modes principaux : l'« **actualisation** » permettant d'intégrer quotidiennement (voire plusieurs fois par jour) des valeurs télé-transmises d'une trentaine de stations de débit, la « **prévision** » qui consiste essentiellement à propager les débits existants et à faire des estimations sur les débits futurs à l'aval, enfin la « **simulation** » pour toutes les études qui nécessitent des débits ou manœuvres simulés (impact des ouvrages sur le régime hydrologique, impact des crues historiques sous des conditions différentes, évaluation a posteriori de la gestion des barrages, simulation de lâchers différentes, test et amélioration des règlements d'eau, etc.).

Impacts sur les crues

Les prélèvements opérés par les réservoirs se traduisent par une limitation des débits, donc des hauteurs d'eau à l'aval des ouvrages et plus particulièrement à leur proximité. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne des ouvrages, les apports des différents affluents grossissent progressivement le flot principal et tendent à masquer partiellement l'effet des prélèvements effectués. Le bassin de l'Yonne, affluent rapide et fougueux, qui apporte un effet important sur les pointes de crues est sous-équipé, le barrage de Pannecière ne contrôlant que 2% du bassin amont de cet affluent. Le bassin intermédiaire, constitué des affluents de la Seine et de la Marne (Loing, Essonne, Yerres, Grand Morin, Petit Morin, ...) représente 35% du bassin de la Seine en amont de Paris et ne peut être équipé d'ouvrages compte tenu de sa géologie et de son urbanisation.

L'action des réservoirs diffère selon le type de crue. Même si le gain obtenu par l'action des réservoirs est relativement modéré au maximum de la crue, la réduction des hauteurs et des durées d'inondation à la décrue est souvent plus importante (**Figure 8**). L'influence des réservoirs dépend donc de la nature de la crue et de l'importance respective de l'apport des bassins entre eux, et notamment de l'importance des apports du bassin intermédiaire, non contrôlé.

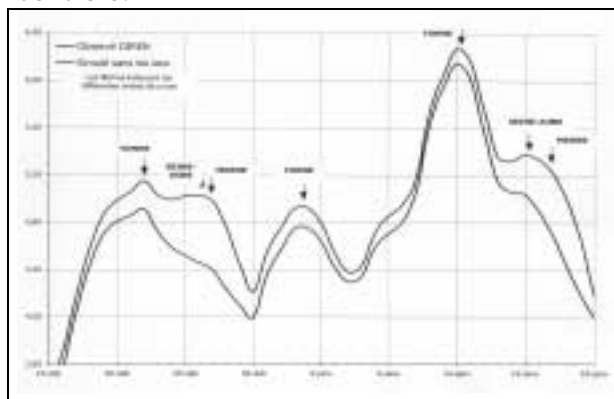


Figure 8 : La Seine à Austerlitz. Crue de janvier 1982
(d'après documents IIBRBS)

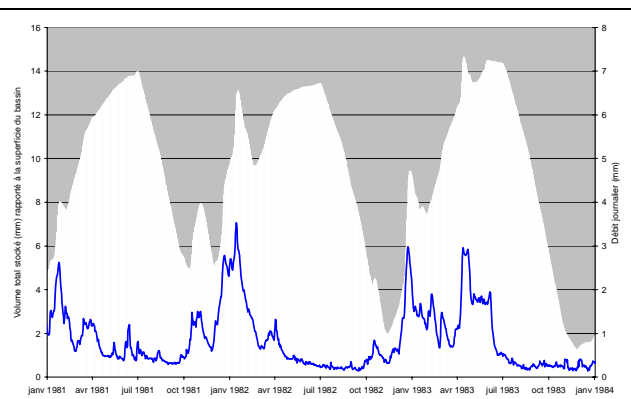


Figure 9 : Relation entre les débits écoulés et les volumes stockés dans les barrages (Paris)

Impacts sur les étiages

Le soutien d'étiage, exprimé en volume, est déterminant : le volume écoulé à Paris de juillet à octobre compris, s'élève à environ 1100 M de m³ en année moyenne, et seulement 625 M de m³ en année décennale sèche (les réservoirs peuvent contenir jusqu'à 800 M de m³). Le rendement des lâchures le long des cours d'eau est moins bien connu que celui des crues. On ignore dans quelle mesure les prélèvements, les échanges nappe-rivière, les conditions de propagation, les manœuvres des barrages de navigation influencent les débits provenant de l'amont.

Une étude expérimentale [Tajjar et Levassor, 1993] montre que l'effet de **la distance** est simple : plus la distance parcourue par le front d'onde est grande, plus la part des échanges nappes-rivières dans le bilan hydraulique est grande.

Les **échanges nappe-rivière** ne sont importants que dans les secteurs non navigués, où il n'existe aucune régulation artificielle du niveau de la rivière et dans les dix à vingt premiers jours qui suivent une variation brusque des débits. Ils sont proportionnels à cette variation.

Ainsi lors d'une lâchure de barrage, le premier effet est de remplir les nappes. Mais sur une période assez longue (une campagne de soutien d'étiage), quasiment toute l'eau infiltrée dans les échanges nappes-rivières est restituée après l'arrêt des lâchures, du fait de la réversibilité de ces échanges. Une étude [Levassor *et al.*, 1993] montre également que les **barrages de navigation** auraient une influence modérée sur la propagation des lâchures.

Une efficacité relative

Pour évaluer l'efficacité des réservoirs, il est nécessaire de rappeler quelques chiffres :

- lors de la crue de 1982 (décennale), volume écoulé au-dessus des voies sur berges : 1640 M de m³
- surface du bassin versant à Paris : 43 800 km², contre 7 270 km² contrôlés ;
- volume maximal stockable dans les barrages rapporté à la superficie totale de bassin à Paris : $805 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / 43\,800 \text{ km}^2 = 18,4 \text{ mm}$ (**Tableau 2**).

L'action d'écêtement des crues par les lacs-réservoirs existants est limitée car, pour maîtriser totalement les crues, il faudrait pouvoir contrôler l'écoulement sur une grande partie des sous-bassins et donc disposer de réservoirs de capacité suffisante, répartis sur l'ensemble du bassin ce qui ne paraît pas réalisable : actuellement les barrages ne contrôlent que 17% du bassin de

la Seine amont et le volume total stocké par les ouvrages ne peut s'élever qu'à 805 M de m³, alors que par exemple lors de la crue de 1910, 1000 M de m³ se sont accumulés dans les vallées en amont de Paris. Plusieurs villes sensibles situées à l'aval proche des barrages (Troyes, St-Dizier,...) en sont cependant très bénéficiaires. Toutefois, l'efficacité économique est beaucoup plus importante que l'efficacité hydraulique (**Tableau 3**) compte tenu des caractéristiques topographiques et urbanistiques du bassin. Il faut avoir à l'esprit l'effet exponentiel du coût des inondations valorisant chaque centimètre gagné pour les grandes crues. En effet, ces quelques centimètres vont conditionner le champ d'inondation en synergie avec les protections locales.

Crue référence	Estimation des dommages (en milliards d'€)	Réduction du coût des dommages par les barrages (en milliards d'€)
Débit 1910	8.8	- 4.6
Débit 1955	3	- 2
Débit 1982 ou 1970	1	- 0.6

Tableau 3 : Évaluation du rôle des réservoirs lors des crues historiques (d'après données IIBRBS)

II.1.3. Inventaires des données disponibles

Choix de la période d'étude

La période d'étude a été choisie de manière à travailler sur une série de données continue et suffisamment longue pour pouvoir avoir une grande variabilité d'événements, notamment prendre en compte ces deux événements extrêmes : la période d'étiage de 1976 et les crues du début d'année 2001. De plus, il a été jugé intéressant de pouvoir comparer le comportement du modèle avant et après la création d'un des barrages : le barrage Aube mis en service en 1990. La période d'étude va donc **du 1^{er} janvier 1975 au 31 décembre 2001**.



Figure 10 : Le bassin de la Seine et ses quatre lacs-réservoirs

sur la Seine :

Troyes,
Pont sur Seine,
Villeneuve Saint-Georges (VSG)
Paris au Pont d'Austerlitz.

sur la Marne :

Chalons sur Marne
Noisiel

sur l'Yonne :

Gurgy
Courlon

sur l'Aube :

Arcis sur Aube

Données hydrométriques

Les stations hydrométriques sont issues de la banque HYDRO gérée par le ministère de l'Environnement. Le débit est mesuré en m³.s⁻¹ mais il est ici converti en débit spécifique en divisant le débit par la superficie du bassin versant. On travaille alors en m.s⁻¹, soit en [L].[T]⁻¹. On obtient fréquemment le débit par l'intermédiaire d'un limnigraphe, donnant la hauteur d'eau, et de la courbe de tarage de la station.

Sur la Seine et ses trois principaux affluents (Marne, Aube, Yonne), nous disposons d'une quinzaine de stations limnimétriques possibles. Cependant sur la période choisie pour notre étude, le choix de ces stations est limité, et parmi celles-ci ont été conservées uniquement

celles qui ne sont pas situées directement à l'aval des ouvrages du fait du moindre intérêt qu'elles présentent pour notre étude. Parmi elles, nous avons retenu celles pour lesquelles les chroniques de données sont assez longues pour pouvoir être utilisées sur la période d'étude. Le choix des stations (**Figure 10**) a été réalisé de manière à voir comment se propagent les effets des barrages (et par conséquent les capacités du modèle) quand on se dirige vers l'aval ou lors de la confluence de cours d'eau influencés.

Données météorologiques

En ce qui concerne les **données pluviométriques**, un effort a été réalisé afin d'utiliser des stations réparties le mieux possible sur les bassins : la densité moyenne de couverture est de 1 station pour 470 km², soit un total de 96 stations sur 43 800 km². Ces mesures sont issues de la base de données PLUVIO constituée par Météo France : elles ont été obtenues à l'aide de pluviomètres manuels ou automatiques, ou de pluviographes. Elles s'expriment en lame d'eau formulée en hauteur (mm). Les stations ont été choisies dans la mesure du possible afin d'avoir des données sur l'ensemble de la période. Cependant pour plusieurs de ces stations pluviométriques cela n'a pas été possible et les longues périodes de lacunes de données ont été complétées par les données de stations voisines, généralement situées dans la même commune. Le modèle que nous utilisons est un modèle global qui n'utilise en entrée qu'une unique donnée de précipitation moyenne. Pour calculer cette moyenne, il est possible d'affecter à chacune des stations un poids différent et/ou d'avoir recours à différents types de moyennes, de combinaisons linéaires, d'interpolations. Ici, nous avons retenu la solution la plus simple en affectant à chacune des mesures le même poids, ce qui revient à réaliser une moyenne arithmétique.

L'Évapotranspiration Potentielle ou **ETP** est la quantité d'eau susceptible d'être prélevée d'une surface par l'atmosphère (si cette eau est disponible): elle dépend de la température, de l'ensoleillement, de la vitesse du vent, de l'humidité, etc.

Il existe de multiples manières de calculer les valeurs de l'ETP : ici, elles sont calculées par la formule de Penman, mais seules des valeurs moyennes interannuelles sont utilisées. Elles sont fournies par Météo France (valeurs décennales dont on déduit les valeurs journalières par ajustement de courbes du second degré). De même que pour les stations pluviométriques, il est possible d'affecter un poids à chacune des données, ce qui a été réalisé afin de tenir compte de la distance au bassin concerné.

Données de gestion des barrages

Les **données des manœuvres de barrages** sont fournies par l'Institution des Grands Lacs de Seine. Elles consistent en des relevés quotidiens de la cote du niveau de la retenue, des volumes contenus, des débits en prise et en restitution (**Figure 11**). Dans les données de barrages, seuls seront utilisés par le modèle les relevés quotidiens des volumes stockés. Ces volumes sont calculés à partir des hauteurs d'eau mesurées et d'une courbe de correspondance entre les hauteurs et les volumes, pour chaque barrage. Un important travail de vérification et de correction des données a été réalisé à partir de cette courbe. Les données ayant été saisies manuellement par les gestionnaires de barrages, nous avons pu constater divers types d'erreurs, par exemple : oubli du « . », inversion de chiffres, etc.

	volume (M de m3)	BASSIN STATIONS Débit (m3/s)			Aval Troyes	Débit prise (m3/s)	BASSIN		Restitution	
		cote NGF (m)	Bar/Seine	Amont Courtenot +prise			cote NGF (m)	volume (M de m3)	Total (m3/s)	
12/12/1979	29.350	128.840	23.900	23.610	13.860	16.000	128.840	29.350	0.300	
13/12/1979	30.920	129.040	25.800	24.550	9.620	19.000	129.040	30.920	0.300	
14/12/1979	32.840	129.280	32.300	28.300	10.640	21.000	129.280	32.840	0.300	
15/12/1979	34.960	129.540	42.900	36.000	16.460	24.000	129.540	34.960	0.300	
16/12/1979	37.400	129.790	59.800	53.400	25.380	24.500	129.790	37.400	0.300	
17/12/1979	39.700	130.020	71.600	64.100	35.780	23.000	130.020	39.700	0.300	
18/12/1979	42.000	130.250	88.200	77.200	60.100	23.000	130.250	42.000	0.000	

Figure 11 : Exemple de données de gestion de barrages mises en forme (Seine)

Bilan

On dispose sur le bassin de la Seine Amont de neuf stations hydrométriques réparties régulièrement le long des cours d'eau : pour chacune de ces stations sont rappelées dans le **Tableau 4**, les données qui sont utilisées.

Code Station	Commune	Superficie (km ²)	Cours d'eau	Nombre de stations pluvio	Station ETP concernée	Barrages concernés	Volume stockable amont (10 ⁶ m ³)
H0800010	Troyes	3 410	Seine	13	Chatillon, Langres, St-Dizier, Troyes	Seine	205
H1501010	Arcis	3 590	Aube	9	Chatillon, Langres, St-Dizier, Troyes	Aube	170
H1700010	Pont	9 760	Seine	19	Chatillon, Langres, St-Dizier, Troyes	Seine, Aube	375
H2221010	Gurgy	3 820	Yonne	11	Auxerre, Château-Chinon, Nevers	Pannecièrre	80
H2721010	Courlon	10 700	Yonne	26	Auxerre, Château-Chinon, Nevers, Troyes	Pannecièrre	80
H4340010	Villeneuve St-Georges	30 800	Seine	64	Auxerre, Château-Chinon, Chatillon, Langres, Nevers, Orléans, St-Dizier, Trappes, Troyes	Seine, Aube, Pannecièrre	455
H5201010	Chalons sur Marne	6 280	Marne	20	Langres, St-Dizier	Marne	350
H5841010	Noisiel	12 500	Marne	36	Saint-Dizier, Reims, Le Bourget, Langres	Marne	350
H5920010	Paris	43 800	Seine	96	Auxerre, Château-Chinon, Chatillon, Langres, Le Bourget, Nevers, Orléans, Reims, St-Dizier, Trappes, Troyes	Seine, Aube, annecièrre, Marne	805

Tableau 4 : Récapitulatif des données sur le bassin

Des lacunes sont à noter :

- au niveau des données de volumes stockés dans les barrages : pour le **barrage Seine** du 20/10/1977 au 05/12/1977, soit 47 jours. (vidange décennale du barrage entraînant un abaissement du plan d'eau en dessous de la plage de mesure de l'échelle)
- au niveau des données de débits :

Noisiel		Villeneuve Saint Georges		Pont sur Seine			
01/01/1987 au 17/01/1987	18 j	01/01/1991 au 31/12/2001	11 ans	01/01/1979 au 28/02/1979	29j	10/01/1981 au 12/02/1981	34j
11/07/1987 au 20/08/1987	41 j			17/03/1979 au 15/04/1979	29j	28/10/1981 au 13/11/1981	17j
23/06/1998 au 31/12/2001	3 ½ ans			23/12/1979 au 30/12/1979	8j	06/12/1981 au 19/02/1982	76j
				10/01/1980 au 15/01/1980	6j	15/12/1982 au 01/01/1983	18j
				06/02/1980 au 23/02/1980	18j		

Ceci va nous contraindre à ne pas tenir compte de certaines périodes : 1998-2001 pour Noisiel ; 1991-2001 pour Villeneuve Saint-Georges ; 1975-1982 pour Pont sur Seine.

Pour la suite de ce travail, il sera toujours (sauf cas contraire) fait usage du même découpage de la période d'étude totale en sous-périodes :

Station	Période 1	Période 2	Période 3	Période 4	Période 5	Période 6
Troyes	75-80	80-84	84-88	88-92	92-96	96-01
Pont	83-88	88-92	92-96	96-01		
Arcis	75-80	80-84	84-88	88-92	92-96	96-01
Gurgy	75-80	80-84	84-88	88-92	92-96	96-01
Courlon	75-80	80-84	84-88	88-92	92-96	96-01
VSG	75-79	79-83	83-87	87-90		
Chalons	75-80	80-84	84-88	88-92	92-96	96-01
Noisiel	75-80	80-84	84-89	89-93	93-98	
Paris	75-80	80-84	84-88	88-92	92-96	96-01

Tableau 5 : Découpage en sous-périodes d'étude

Sur ces différentes périodes d'environ 5 ans chacune, les cumuls de précipitations sont assez voisins comme le montre la **Figure 12**.

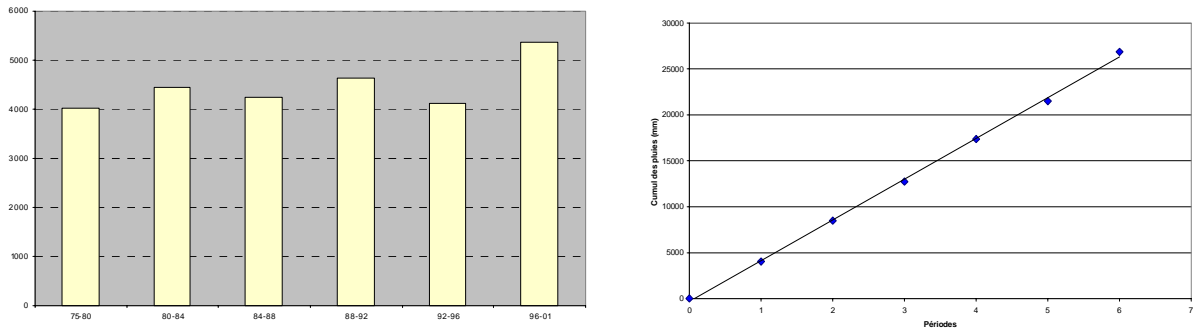


Figure 12 : Distribution des pluies sur l'ensemble du bassin par période (à gauche) et cumulée (à droite)

II.2 Contexte de modélisation

La démarche proposée ici est d'évaluer dans quelle mesure il est possible d'améliorer un modèle ne prenant pas initialement en compte de façon explicite les barrages et leurs manœuvres en lui apportant cette information supplémentaire.

Il existe en hydrologie une grande quantité et une variété importante de modèles. Bien souvent, le choix de ces modèles est directement lié aux objectifs d'utilisation, aux données disponibles, et aux contraintes de mise en œuvre.

II.2.1. Présentation du modèle

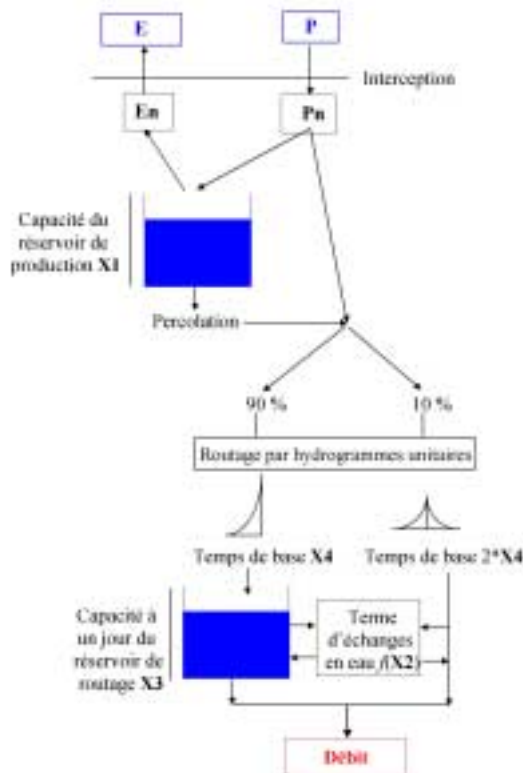


Figure 13 : Architecture du modèle GR4J (d'après Perrin, 2000)

L'architecture du modèle journalier (*Annexe 6*) qui sera utilisé ici, est la suivante :

- ◆ une fonction de production faisant intervenir :
 - une fonction de neutralisation entre la pluie et l'ETP,
 - une fonction de rendement dépendant d'un réservoir de suivi d'humidité (qui se vidange également par percolation)
 - une fonction d'échange en eau agissant sur les deux branches d'écoulement.

- ◆ une fonction de transfert présentant deux composantes d'écoulement :
 - l'une faisant intervenir un hydrogramme unitaire, avec une phase de montée, assure le transfert de 90% de la pluie efficace qui est ensuite routée par un réservoir non linéaire ;
 - l'autre faisant intervenir un hydrogramme unitaire avec une phase de croissance et une phase de décroissance, assure le transfert de 10% complémentaires de la pluie efficace.

Il convient tout d'abord de rappeler que notre objectif n'est pas de donner une représentation physique a priori au modèle. Le critère dominant est la **performance** de ce modèle, c'est-à-dire la qualité de restitution des débits à l'exutoire. C'est ce critère de performance qui illustre en fait l'adéquation du modèle proposé au système réel étudié.

Le problème à résoudre concerne essentiellement les **modèles hydrologiques globaux**. Plusieurs études comparatives [Michaud et Sorooshian, 1994] montrent que des **modèles conceptuels simples** parviennent à fournir des performances en terme de restitution de débit, analogues (sinon meilleures) à celles de modèles plus réalistes physiquement. Les modèles conceptuels ou empiriques présentent l'avantage de pouvoir être facilement utilisés dans des régions physiographiques très différentes. Ils constituent ainsi un outil de valeur pour l'hydrologie opérationnelle.

Un pas de temps de modélisation supérieur au jour pourrait probablement également être intéressant [André et Tiercelin, 1976]; cependant le **pas de temps journalier** semble être le plus pertinent, les lâchures étant généralement réalisées quotidiennement.

Nous avons donc choisi de travailler avec un **modèle pluie-débit à réservoirs, d'approche globale, et au pas de temps journalier**.

Plusieurs modèles correspondent à ces critères. Parmi ceux-ci, nous en choisissons un, qui par sa simplicité, se prête bien à l'introduction de complexifications : au sein de la famille des modèles à réservoirs, le modèle GR4J (*Figure 13*) est appréciable pour ses qualités d'utilisation, de robustesse, de simplicité, d'efficacité et de parcimonie. Il s'agit d'un modèle journalier à quatre paramètres ajustables [Perrin, 2002].

II.2.2. Mise en œuvre générale d'un modèle

La mise en œuvre d'un modèle commence par son **calage**, c'est-à-dire extraire à partir des données d'entrée et de sortie, les informations nécessaires pour attribuer aux paramètres du système des valeurs permettant la reproduction la plus performante du système naturel par le modèle. Cette étape nécessite donc :

- des séries de données d'entrées (précipitations et ETP) et de sorties (débits) sur le système considéré,
- le choix d'une variable cible pour l'optimisation des paramètres du modèle,
- et une méthode d'optimisation des paramètres.

Nous avons choisi ici le **critère de Nash et Sutcliffe** (1970), critère en moindres carrés que l'on calculera sur les **racines carrés des débits** (variable cible). La transformation préalable sur les débits permet d'avoir un critère intermédiaire, ne donnant ni trop d'importance aux crues, ni trop aux étiages. De nombreuses possibilités existent pour choisir la **méthode d'optimisation** des paramètres [Nascimento, 1995]. Notre choix se porte sur la méthode « pas à pas » développée au Cemagref qui a déjà montré son efficacité sur des études précédentes [Perrin, 2000].

Enfin, le **contrôle** (validation) du modèle consiste à tester ce modèle sur des données différentes de celles ayant servi au calage. Ces procédures de calage-contrôle des modèles peuvent prendre différentes formes selon l'utilisation que l'on veut en faire, selon la longueur des chroniques de données, selon que le modèle est transposable du point de vue de la géographie ou du climat [Klemeš, 1986]. C'est en phase de contrôle qu'on évalue les qualités de fiabilité et de robustesse d'un modèle, et c'est donc essentiellement sur ces résultats en contrôle que nous nous appuyerons pour évaluer les résultats. Dans la suite, la simple procédure d'**évaluation en calage-contrôle sur périodes indépendantes** sera utilisée sur l'ensemble des stations de notre échantillon test.

Pour chaque simulation, l'**initialisation** consiste à donner des valeurs initiales aux variables du système. Pour limiter l'effet du choix de ces conditions initiales dont l'influence a été étudiée par Perrin (2000), on décide de laisser tourner le modèle pendant une année. On ne tiendra donc pas compte des données qui sont restituées par le modèle durant cette période.

II.2.3. Choix des critères d'évaluation en contrôle

Pour pouvoir comparer et apprécier les performances relatives de différents modèles, il est nécessaire de définir des critères d'évaluation. Le principe est de comparer l'hydrogramme simulé et de l'hydrogramme observé. Deux types d'évaluations sont possibles : une évaluation qualitative d'une part et une évaluation numérique d'autre part. L'évaluation qualitative consiste essentiellement en des observations graphiques. La taille de l'échantillon est souvent un facteur limitant pour ce type d'analyse, ce qui n'est pas ici notre cas. Cependant, l'interprétation des courbes paraît tellement subjective qu'il semble plus pertinent de faire reposer sur des critères numériques, la comparaison des différentes solutions que nous testerons. De plus, pour l'optimisation des paramètres du modèle, un critère numérique est indispensable.

Pour rendre compte de la qualité de représentation globale du modèle en simulation, nous utilisons ici le **critère de Nash** sous deux formes différentes. La première forme, utilisant les valeurs des **débites** [Nash(Q)], permet de rendre compte préférentiellement de la représentation des débits élevés et par conséquent des crues, alors qu'une forme sur les **logarithmes népériens des débits** [Nash(lnQ)], permet quant à elle de donner des informations préférentiellement sur la représentation des débits plus faibles, et par conséquent des performances sur la simulation des étiages.

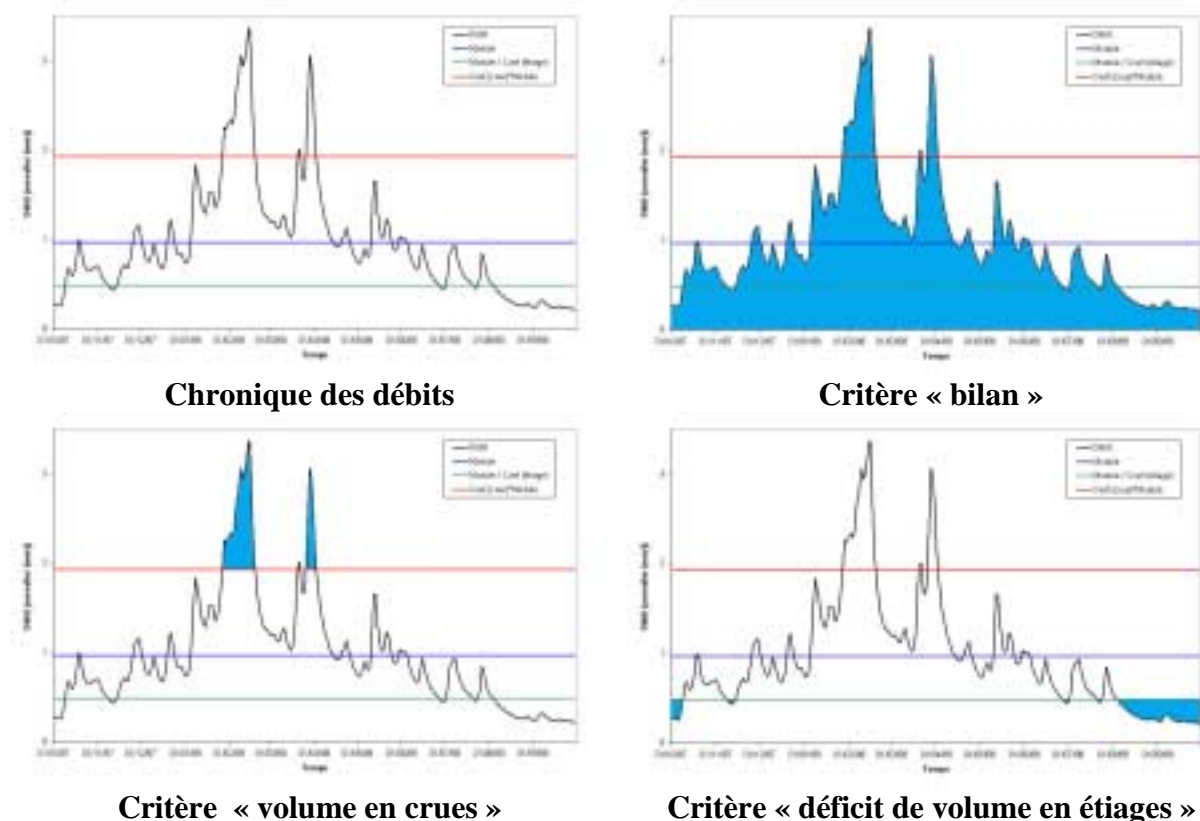


Figure 14 : Présentation de certains des critères de qualité

Nous avons ajouté à cela trois autres critères qui s'intéressent davantage aux volumes écoulés :

- le rapport du volume total écoulé estimé sur le volume total écoulé observé, que l'on nomme dans la suite de cette étude « **bilan** ». Ce critère permet de rendre compte de la capacité du modèle à rendre compte du volume écoulé au niveau de la station hydrométrique et de vérifier que le modèle conserve bien le volume total d'eau écoulée ce qui est plus particulièrement intéressant dans le cas de bassins avec retenues d'eau (*Figure 14*) ;

- le rapport du volume d'eau en crue (calculé/observé) que l'on nomme « **volume en crues** ». Pour estimer ce volume, nous définissons un seuil de débit (C) à partir duquel on considère que le cours d'eau est en crue : tout le volume écoulé au delà de ce débit limite est compté pour l'estimation du volume en crue selon la formule suivante : « $Q - C_{\text{crues}} * \text{Module}$ ». Ce seuil est défini indépendamment pour chaque cours d'eau suivant son débit moyen et les débits extrêmes relevés (**Figure 14**) ;
- le rapport des déficits de volumes écoulés en étiage (calculé/ observé) que l'on nomme « **déficit de volume en étiage** ». De même que pour les crues, ce volume est défini à partir d'un seuil caractéristique pour chaque station et est calculé selon la formule : « $\text{Module} / C_{\text{étiages}} - Q$ » (**Figure 14**).

Ces deux derniers critères semblent particulièrement intéressants à considérer dans le cas de barrages réservoirs de régulation du débit, destinés à lutter contre les crues et les étiages.

Pour estimer la qualité d'un modèle, on tiendra compte de l'ensemble de ces cinq critères : les critères de Nash pour juger de la qualité de représentation de l'ensemble des débits, le critère de bilan servira de vérification sur le fonctionnement du modèle et les deux derniers critères permettront de juger des capacités du modèle à simuler les périodes « extrêmes » ce qui est intéressant sur un bassin aussi vulnérable que le bassin parisien. Notons cependant que les trois derniers critères utilisent une erreur cumulée alors que le critère de Nash, calculant une erreur quadratique, ne permet pas de compensation des erreurs entre les pas de temps. Ces critères de bilan sont donc complémentaires des critères de Nash ; ils ne pourraient être utilisés seuls pour le calage du modèle. La forme des critères utilisés ici (variation entre $]-\infty ; 1]$) permet de faire des moyennes des critères sur l'ensemble des périodes et/ou des bassins pour avoir des critères de performance globaux afin de juger les modèles.

III. ETUDE A L'AIDE DU MODELE INITIAL

Le modèle GR4J, tel qu'il existe, ne compte pas de procédure de prise en compte de barrages mais peut être appliqué directement sur les bassins étudiés. Dans cette partie nous allons donc évaluer les performances du modèle GR4J initial sur les différents bassins étudiés pour voir ses capacités d'adaptation à ce régime influencé par des ouvrages de régulation de débit. Nous allons procéder à une étude en deux temps. Dans un premier temps, nous allons examiner les résultats obtenus avec le modèle initial : Quels sont-ils ? Sont-ils bons ou mauvais ? Comment se comportent-ils quand on s'éloigne des barrages ? Etc. Dans un second temps, nous allons étudier l'ordre de grandeur des perturbations engendrées, dans le modèle, par la présence de barrages et identifier quelles sont les difficultés posées au modèle.

III.1 Fonctionnement du modèle initial

III.1.1. Résultats en calage

Nous avons réalisé l'ensemble des calages-contrôles sur les sous-périodes définies précédemment. Les résultats obtenus en calage sont ensuite moyennés sur la totalité des simulations (**Tableau 6**).

Ces résultats apparaissent plutôt bons. Ils reflètent la faculté du modèle à représenter les débits observés dans des conditions « idéales » : on laisse les paramètres s'adapter aux spécificités de la période. Cependant, sur le bassin de la Seine à Troyes, les résultats sont de faible qualité. Ceci peut être expliqué par la proximité entre le canal de restitution du barrage-réservoir Seine et la station hydrométrique de Troyes : il est possible de supposer qu'à cette faible distance, l'impact des manœuvres de barrages est très important. Les modèles, construits pour

représenter une relation pluie-débit naturelle, ne parviennent pas à prendre en compte ces manœuvres, notamment dans le cas de l'estimation des volumes écoulés en crue : les lâchures étant complètement artificielles, un important volume s'écoule à la station sans que le modèle soit capable de le représenter (ce volume n'est pas forcément relié aux pluies précipitées !). Ainsi, le volume en crue estimé est de 464 mm contre 1202 mm réellement observés soit un écart de plus de 60%.

Station	Troyes	Pont	Arcis	Gurgy	Courlon	VSG	Chalons	Noisiel	Paris	Moyenne
Cours d'eau	Seine	Seine	Aube	Yonne	Yonne	Seine	Marne	Marne	Seine	
Nash(Q)	64.5	81.8	84.8	85.2	87.5	87.8	82.7	81.1	87.7	82.6
Nash(lnQ)	44.6	76.6	77.9	73.8	79.9	83.6	69.2	77.2	85.8	74.3
Bilan	92.6	97.9	97.4	98.1	99.4	99.1	97.1	98.1	98.5	97.6
Volume en crue	38.6	73.9	80.1	71.0	84.8	78.3	68.9	69.1	83.3	72.0
Volume en étiage	72.3	90.5	97.5	91.7	80.7	85.7	96.6	89.9	95.6	88.9

Tableau 6 : Moyenne des résultats obtenus avec le modèle initial (valeurs au calage)

D'autre part, les résultats obtenus sur les stations sur la Marne (Chalons et Noisiel) sont, dans l'ensemble, moins bons que ceux obtenus sur les autres cours d'eau : il est possible de poser l'hypothèse que cela est dû au nombre important des affluents de la Marne (la Saulx, la Somme, le Petit Morin et le Grand Morin) et à leur régime irrégulier. De plus, la station de Chalons semble peu représentative en étiage : des prélèvements importants étant réalisés en amont de la station et des rejets importants en aval.

III.1.2. Résultats en contrôle

Les résultats obtenus en calage sont donc, on l'a vu précédemment, plutôt bons. Quand on passe à la phase de contrôle, les résultats se dégradent de façon assez importante (*Tableau 7*). Cette dégradation est classiquement constatée dans ce type de test : en calage, les paramètres du modèle sont optimisés afin de représenter au mieux la chronique des débits sur une certaine période, alors qu'en contrôle, on utilise des paramètres optimisés sur une période différente. En moyenne, entre 5 à 10 points sont perdus lors du passage du calage aux contrôles, sur le critère de Nash sur les débits et le critère de bilan, une dizaine de points sur le critère de Nash (ln Q) et le critère sur les volumes en crue, enfin, une vingtaine de points sur le critère sur les étiages.

Station	Troyes	Pont	Arcis	Gurgy	Courlon	VSG	Chalons	Noisiel	Paris	Moyenne
Cours d'eau	Seine	Seine	Aube	Yonne	Yonne	Seine	Marne	Marne	Seine	
Nash(Q)	57.7	74.3	70.1	82.7	81.7	83.6	79.6	77.7	83.8	76.8
Nash(lnQ)	30.1	65.8	61.4	68.5	69.3	79.6	64.8	71.8	81.2	65.8
Bilan	88.5	91.7	88.9	89.4	87.2	90.1	90.1	91.2	93.4	90.1
Volume en crue	39.7	54.5	41.9	68.5	66.4	69.5	63.1	63.0	70.3	59.7
Volume en étiage	69.1	76.1	66.3	70.6	60.1	60.0	80.0	53.5	90.3	69.6

Tableau 7 : Résultats obtenus avec le modèle initial (valeurs au contrôle)

De même que pour les résultats obtenus au calage, on peut remarquer (*Tableau 7* et *Figure 15*) qu'à quelques exceptions près, les résultats s'améliorent globalement quand on va vers l'aval (ici, le nombre de bassins d'étude est trop restreint pour pouvoir être affirmatif à ce sujet, une étude statistique sur un grand nombre de bassins serait probablement nécessaire). Ceci traduit le fait que plus on s'éloigne des ouvrages, plus le modèle parvient à simuler correctement les évolutions de débits ce qui permet de poser l'hypothèse que les impacts des barrages sur le régime hydrologique diminuent avec la distance. Cette amélioration, si elle semble très logique, n'est pas triviale : en effet, les résultats pourraient également être dégradés du fait des confluences et de la superposition des perturbations, ce qui ne semble pas être le cas ici. Une autre explication possible de l'amélioration de ces performances est que

plus l'on va vers l'aval, plus la relation pluie-débit est facile à modéliser du fait du lissage effectué par le bassin.

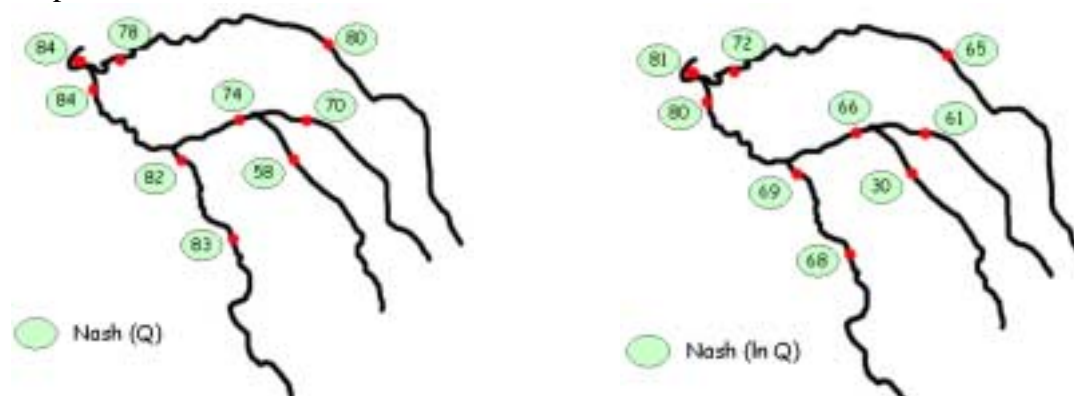


Figure 15 : Évolution des performances du modèle de l'amont vers l'aval

III.1.3. Caractéristiques et résultats du modèle de l'amont vers l'aval

Nous allons maintenant examiner de manière plus détaillée comment le modèle réagit quand on se déplace de l'amont vers l'aval. Pour pouvoir étudier cela, nous allons suivre chaque cours d'eau d'amont en aval, en considérant l'ensemble des stations présentes sur ce cours d'eau. La période d'étude est commune à l'ensemble de ces stations pour pouvoir les comparer entre elles. Sur notre bassin d'étude, on identifie trois cas de propagation pouvant être étudiés :

Cours d'eau	Stations	Périodes d'étude
Yonne	Gurgy → Courlon → VSG → Paris	1975 – 1990 → 3 sous périodes sur 1983-1990
Seine	Troyes → Pont → VSG → Paris	1980 – 1990 → 3 sous périodes sur 1983-1990
Mame	Chalons → Noisiel → Paris	1975 – 1997 → 3 sous périodes sur 1983-1990

Tableau 8 : Sélection des cas d'étude de propagation amont-aval des performances

Les résultats en contrôle (**Tableau 9**), notamment les critères de Nash, s'améliorent globalement quand on se rapproche de Paris. Des irrégularités apparaissent cependant, entre autres sur l'estimation des déficits de volumes écoulés en étiage.

Yonne	Nash(Q)	Nash(lnQ)	Bilan	Vol.crue	Vol.étiage	Seine	Nash (Q)	Nash (ln Q)	Bilan	Vol. crue	Vol. étiage
Gurgy	82.50	68.37	89.44	67.29	70.63	Troyes	73.15	64.15	89.08	51.52	79.98
Courlon	81.83	69.37	87.18	66.31	60.23	Pont	79.28	69.91	92.89	53.23	67.73
VSG	83.79	79.91	90.37	69.78	60.42	VSG	83.79	79.91	90.37	69.78	60.42
Paris	84.10	81.58	93.34	70.43	90.22	Paris	84.10	81.58	93.34	70.43	90.22
Marne	Nash(Q)	Nash(ln Q)	Bilan	Vol.crue	Vol.étiage	<i>Ces résultats sont les moyennes des valeurs en contrôle des différents critères pour l'ensemble des calages-contrôles.</i>					
Chalons	80.39	66.74	89.89	62.46	82.03						
Noisiel	77.88	71.90	91.24	63.91	52.08						
Paris	84.10	81.58	93.34	70.43	90.22						

Tableau 9 : Résultats en contrôle : évolution de l'amont vers l'aval

Il est difficile d'identifier une tendance nette dans l'évolution des valeurs des paramètres (**Tableau 10**). De plus, nous n'avons pas réussi à montrer de corrélation entre les caractéristiques physiques des bassins et les valeurs des paramètres.

Il est peut-être possible de relier les valeurs du paramètre X4 « temps de base », à la répartition dans le temps des actions respectives des différents cours d'eau (**Figure 8**) : dans le cas de l'Yonne, on observe une évolution linéaire en fonction de la distance de propagation. Dans le cas de la Seine, on observe la même évolution linéaire jusqu'à la confluence avec l'Yonne (Troyes et Pont) puis un raccourcissement des délais que l'on pourrait attribuer à la

participation de l'Yonne dans la formation du débit. De même dans le cas de la Marne : le temps augmente jusqu'à Noisiel et diminue à Paris. Il faut toutefois noter que lors des participations respectives des différents cours d'eau, la Seine agit avant la Marne, ce qui n'est pas le cas ici.

Yonne	Routage	Production	Échanges	Temps	Seine	Routage	Production	Échanges	Temps
Gurgy	66	674	0.76	3.1	Troyes	79	1475	-0.25	5.2
Courlon	77	614	0.80	3.7	Pont	98	796	-0.47	8.0
VSG	86	721	-0.11	4.6	VSG	86	721	-0.11	4.6
Paris	80	713	-0.52	4.6	Paris	80	713	-0.52	4.6

Marne	Routage	Production	Échanges	Temps
Chalons	73	947	-0.20	5.6
Noisiel	80	1399	-0.10	6.2
Paris	80	713	-0.52	4.6

Ces valeurs de paramètres sont les moyennes des valeurs réelles obtenues pour des calages sur chaque sous-période.

Tableau 10 : Valeurs réelles des paramètres de calage : évolution de l'amont vers l'aval

III.2 Perturbations engendrées par la présence d'un barrage

La prise en compte du (des) barrage(s) au sein du modèle n'a d'intérêt que si son influence est détectable. En effet, si cette influence est seulement de l'ordre de grandeur de l'erreur de la mesure, les apports d'une représentation du barrage au sein du modèle seront probablement très peu bénéfiques.

Il est donc nécessaire de vérifier que la construction d'un ouvrage a réellement un impact sur le régime hydrologique. C'est le cas, a priori, puisque les études des Grands Lacs de Seine ont montré l'impact significatif des ouvrages sur le comportement hydrologique des bassins.

Nous allons montrer, dans le cas particulier d'un des bassins, comment détecter par la modélisation, l'impact de la construction d'un ouvrage sur le régime hydrologique.

III.2.1. Immédiatement à l'aval du barrage

Nous nous proposons de travailler sur le bassin de l'Aube pour lequel nous disposons de données avant et après construction de l'ouvrage en 1989. Cette étape de notre étude, même si elle n'est pas directement liée à l'amélioration du modèle afin qu'il prenne en compte la gestion des barrages, est très intéressante, car elle permet de mieux comprendre quels sont les effets du barrage et surtout quelles sont les difficultés posées au modèle.

En calant le modèle sur les pluies et les débits « avant influence du barrage », un jeu de paramètres représentatifs du fonctionnement du bassin non influencé est obtenu. En utilisant, ensuite, ce jeu de paramètres avec la chronique des pluies « après influence du barrage », il est possible de reconstituer un écoulement de référence que l'on suppose proche de l'écoulement qui aurait eu lieu si le barrage n'avait pas été construit. Ceci est vrai si l'on peut considérer que le modèle est fiable en calage.

On compare ensuite le comportement observé du bassin à celui simulé par le modèle.

Il est possible de voir très nettement le soutien d'étiage et l'écêtement de crues réalisés à partir de 1990 (**Figure 16**).

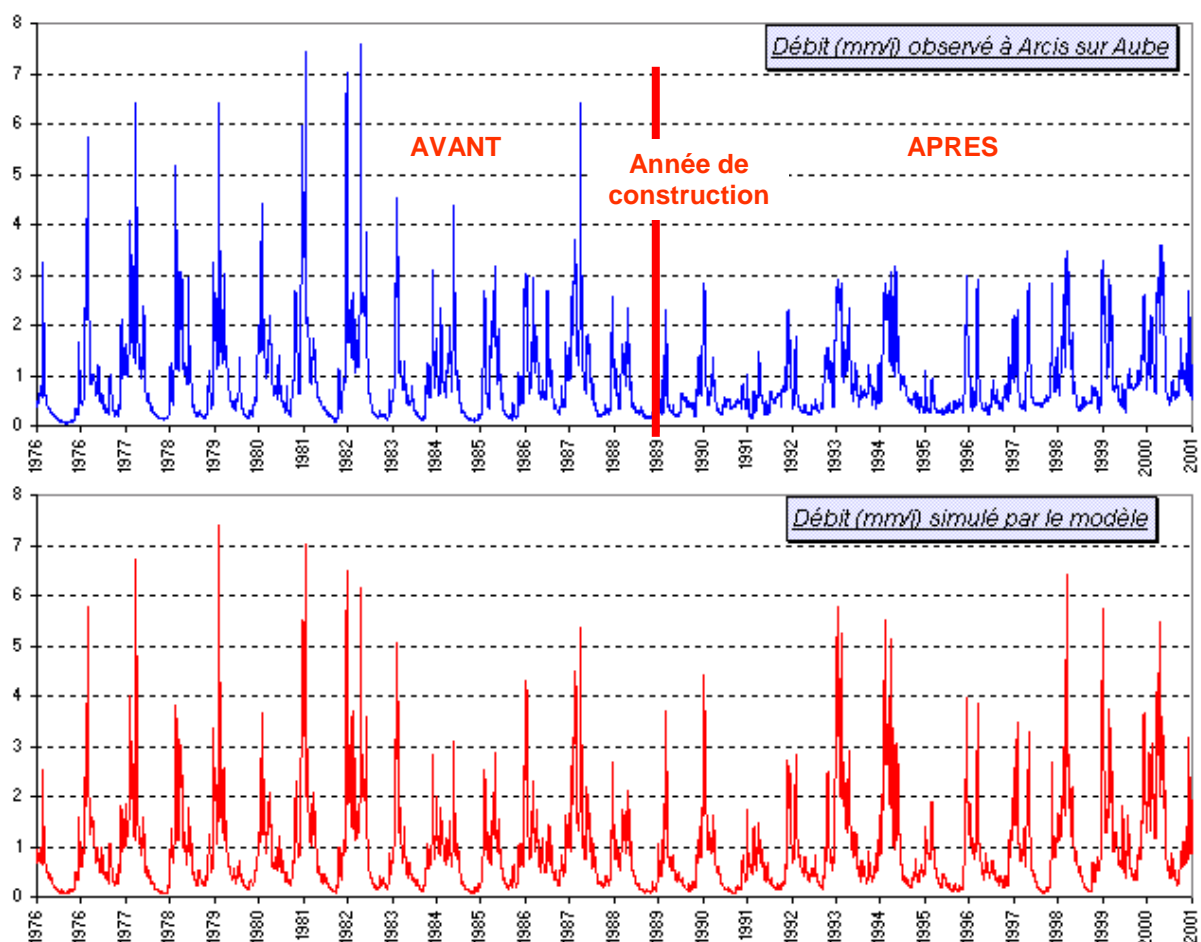


Figure 16 : Débit observé et débit simulé (après calage) à Arcis sur Aube de 1975 à 2001

Cette action du barrage, très bénéfique au niveau de la régulation des débits, engendre donc très logiquement des points de difficultés pour la qualité de représentation du modèle, ce qui peut-être observé numériquement (Figure 17), et qualitativement (Figure 18).

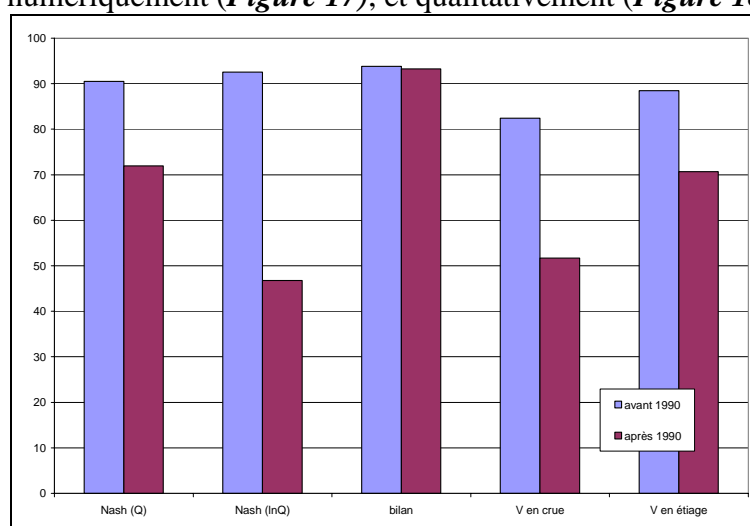


Figure 17 : Évolution des performances du modèle en contrôle (avant et après barrage)

Ci-dessus sont représentés les performances du modèle selon les critères que l'on a choisis:

- moyenne des résultats en contrôle sur une série de calages-contrôles sur la période précédant la construction du barrage,
- moyenne des résultats en contrôle sur une série de calages-contrôles sur la période consécutive à la construction du barrage.

On observe une nette différence pour tous les critères sauf le critère de bilan. Ce qui nous apporte deux informations importantes :

- l'introduction d'un barrage ne limite pas la capacité du modèle à assurer un bon bilan en eau. Ceci n'est pas vraiment surprenant car les modèles réussissent généralement bien à équilibrer les bilans. Par ailleurs, la lame d'eau écoulée sur le bassin passe de 355 mm/an à 301 mm/an, soit 15% en moins.
- par contre, quand le bassin est influencé par un barrage, le modèle a des difficultés à simuler la répartition de cette quantité totale d'eau, ce qui est indiqué par les mauvais résultats de l'ensemble des autres critères.

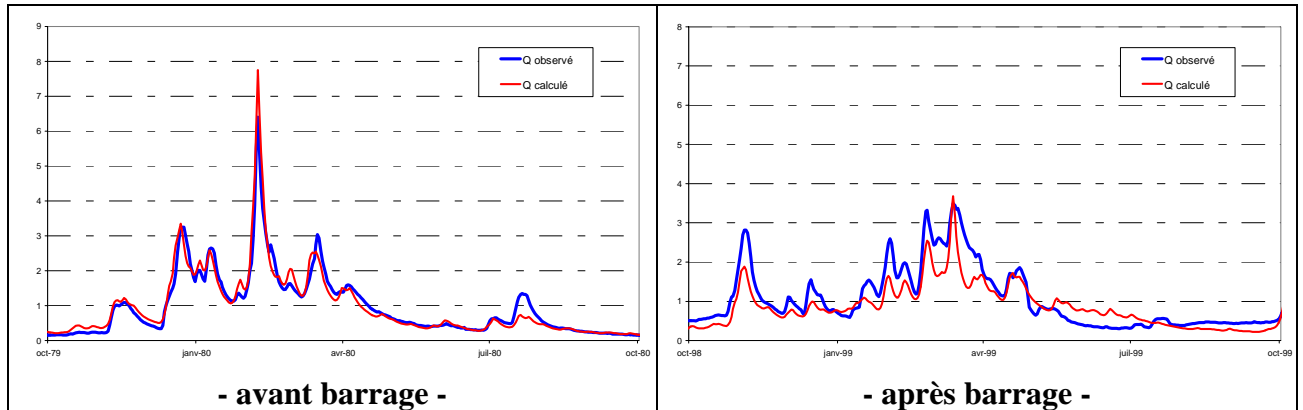


Figure 18 : Débit (mm/j) simulé en contrôle et débit observé, avant et après la construction du barrage

La **Figure 18** nous permet de visualiser les difficultés du modèle et d'apprécier qualitativement ce qu'annoncent les critères numériques. Pour la figure après barrage, nous notons :

- une mauvaise qualité globale de simulation, un fort écart étant quasiment tout le temps observé entre le débit réel et le débit simulé ;
- au niveau des crues : une mauvaise simulation de l'amplitude et surtout du volume de la crue ;
- au niveau des étiages, même s'il est difficile d'interpréter ces courbes, on peut simplement observer que ceux-ci sont assez mal évalués (la plupart du temps, ils sont surestimés).

Ainsi, le régime hydrologique est largement modifié à l'aval du barrage ce qui se ressent sur les performances du modèle. Il est maintenant intéressant de savoir si ces perturbations se prolongent quand on continue de s'éloigner du barrage et de son influence.

III.2.2. Propagation des perturbations

Pour étudier la propagation le long du cours d'eau, des perturbations dues à la construction du barrage Aube, nous proposons d'utiliser une méthode de détection de non-stationnarité sur la station la plus proche de l'ouvrage (Arcis sur Aube), sur la station qui lui succède après une confluence avec la Seine (Pont sur Seine), enfin sur la dernière station d'étude du bassin, Paris-Austerlitz (**Figure 10**). Il existe de nombreuses méthodes de détection : dans le cadre de cette étude, nous allons nous inspirer des méthodes proposées par Andréassian (2002) et Andréassian *et al.* (2003).

Nous divisons la période totale d'étude en huit sous-périodes P_i . Le modèle est calé sur chacune de ces périodes. Pour chaque calage, on obtient un jeu de paramètres X_{1i} , X_{2i} , X_{3i} , X_{4i} qui constituent un modèle du bassin pour une période donnée. Le modèle M_i , utilisant ces paramètres, est ensuite utilisé en contrôle sur la totalité de la période $P = \sum(P_j)$, $j=1..8$.

On obtient ainsi sur ces périodes ce qu'auraient été les débits si le comportement hydrologique du bassin était celui identifié sur la période i . Cette méthode permet notamment de s'affranchir

du problème de la variabilité climatique observée entre les périodes. Il est alors possible de fonder la détection d'une perturbation en étudiant l'évolution des paramètres de calage et celle des résultats du modèle.

Pour mener cette partie de l'étude (propagation des perturbations vers l'aval), plusieurs contraintes apparaissent sur le choix de la période d'étude :

- on veut des sous-périodes avant et après la mise en service du barrage
- on choisit de travailler sur des sous-périodes de longueurs constantes, afin d'éviter d'introduire des variations de résultats dues à la longueur des séries.

On choisit donc finalement de travailler sur les sous-périodes suivantes :

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1977-1979	1980-1982	1983-1985	1986-1988	1989-1991	1992-1994	1995-1997	1998-2000
Avant barrage	Avant barrage	Avant barrage	Avant barrage	Après barrage	Après barrage	Après barrage	Après barrage

Nous travaillerons ici sur les sorties du modèle, en prenant comme indicateurs le volume total écoulé sur la période, le volume écoulé en crue et le déficit d'écoulement en étiage.

Évolution des résultats du modèle

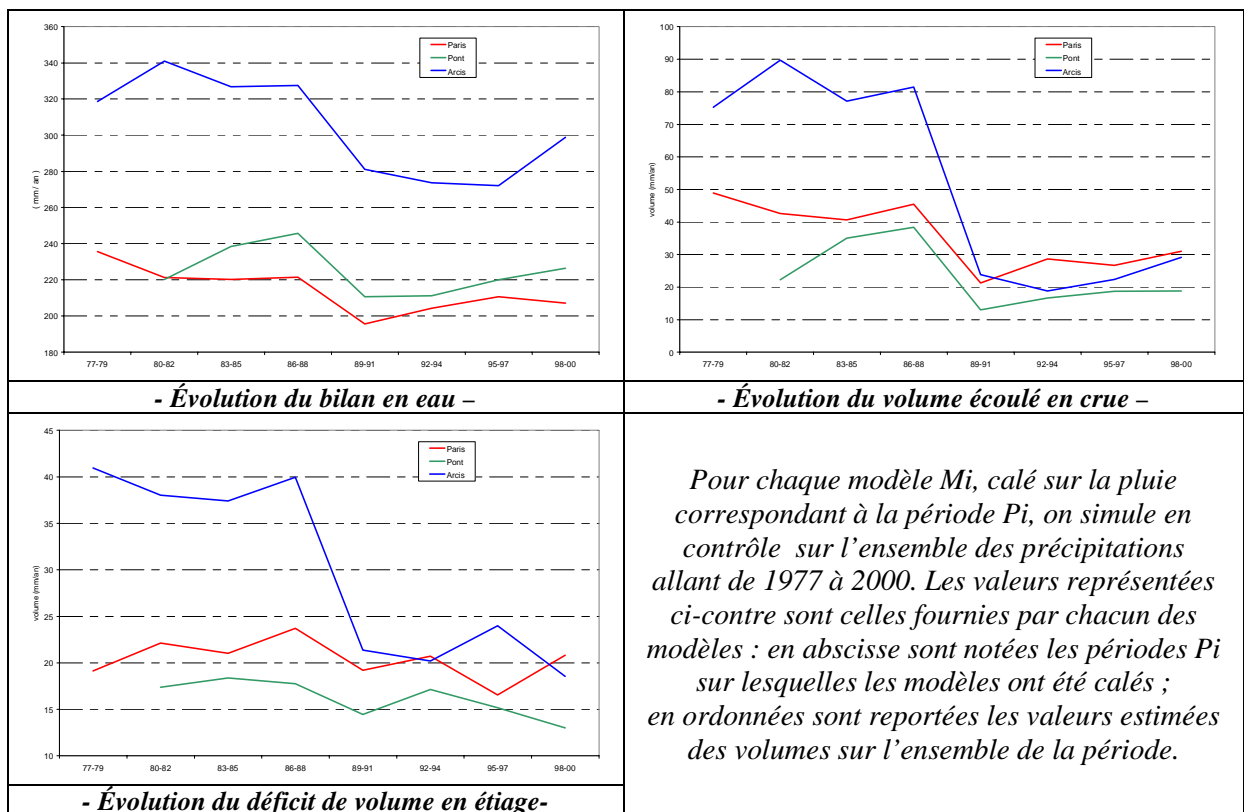


Tableau 11 : Évolution qualitative des résultats des simulations

Les résultats (**Tableau 11**) sur le bilan global montrent que la construction du barrage paraît diminuer le rendement des bassins. Cette évolution est constatée sur les trois bassins, même si elle est plus marquée sur le bassin directement à l'aval de l'ouvrage (Arcis). Une perte d'une dizaine de mm par an semble avoir lieu. Les raisons possibles peuvent être une augmentation des pertes par évaporation au niveau de la retenue, ou une augmentation des infiltrations vers les nappes profondes.

En ce qui concerne les volumes écoulés en crue, un impact correspondant à la période de mise en service du barrage, apparaît pour chacune des stations, de façon plus importante à l'amont qu'à l'aval. Les modèles calés avant la mise en service du barrage (sur les 4 premières

périodes) ont tendance à surévaluer les volumes écoulés en crues à partir des données des périodes influencées, et réciproquement les modèles calés sur les périodes influencées sous-estiment les débits réellement produits sur un bassin naturel. Ces résultats sont tout à fait cohérents avec le rôle d'écrêtement de crues des barrages. Cet impact se faisant sentir jusqu'à Paris, cela indique que la construction de ce nouveau barrage a bien complété les dispositifs existants déjà au niveau de l'écrêtement des crues.

L'impact sur les étiages est notable à Arcis. Le déficit de volume écoulé en étiage diminue, ce qui indique que les étiages sont moins forts qu'auparavant. Cet impact positif sur les étiages est cependant peu marqué à Pont et à Paris. Ceci incite à penser que les ouvrages existants déjà sur les autres bassins étaient probablement suffisants pour le soutien des étiages.

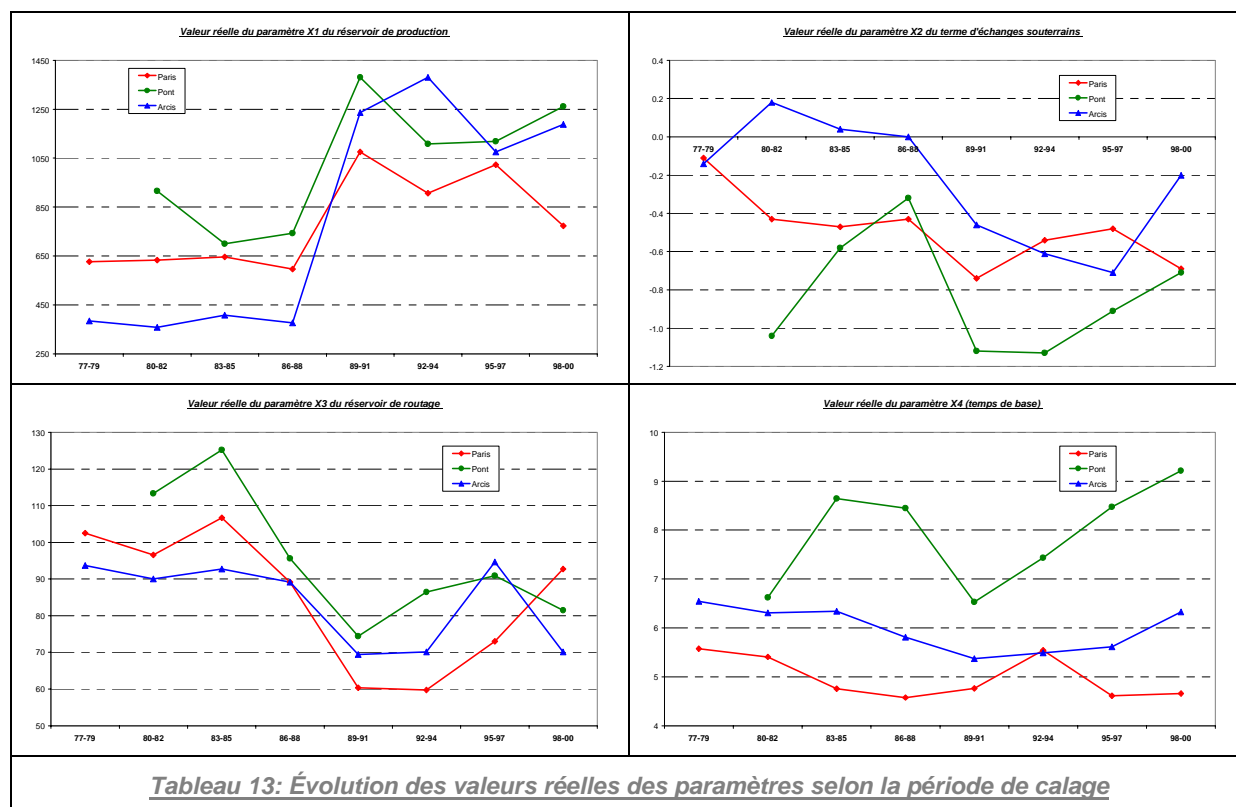
Cette interprétation qualitative est confirmée par la comparaison des valeurs moyennes des différents volumes avant et après barrage :

	<i>Bilan en eau</i>			<i>Volume écoulé en crue</i>			<i>Déficit de volume en étiage</i>		
	Valeur moyenne (mm/an)		Évolution	Valeur moyenne (mm/an)		Évolution	Valeur moyenne (mm/an)		Évolution
	Avant barrage	Après barrage		Avant barrage	Après barrage		Avant barrage	Après barrage	
Arcis	328	281	- 14 %	81	24	- 70 %	39	21	- 46 %
Pont	235	217	- 8 %	32	17	- 47 %	18	15	- 17 %
Paris	225	204	- 9 %	44	27	- 39 %	22	19	- 14 %

Tableau 12 : Évolution quantitative des résultats des simulations

Évolution des paramètres de calage

Une étude sur l'évolution des paramètres peut nous permettre de voir comment le modèle essaie de s'adapter pour rendre compte de l'effet des réservoirs. Ceci pourra éventuellement nous donner des informations sur les emplacements où il serait pertinent d'agir pour tenir compte des données de barrages.



L'évolution de ces paramètres est remarquable.

L'augmentation de la valeur du **paramètre X1 du réservoir de production** peut avoir deux origines différentes. La première est que, pour une même entrée de données météorologiques,

le modèle doit pouvoir contrôler une quantité d'eau plus importante, c'est à dire augmenter ou réduire le débit final de façon importante en cas de crue ou d'étiage. Ceci peut essentiellement être réalisé au sein du modèle au niveau du réservoir de production : avec une capacité plus importante le modèle dispose d'une marge de manœuvre supérieure pour contrôler la constitution de la pluie efficace allant alimenter le débit.

L'autre origine possible est qu'une augmentation de la capacité du réservoir de production (de même qu'une diminution du **coefficient d'échange X2**, également observée) permet de réduire le rendement du bassin (réduction relevée précédemment) par une augmentation des quantités prélevées sur la pluie brute, une augmentation des pertes par évaporation (réservoir de production), et une augmentation des pertes par infiltration vers des nappes profondes (échanges souterrains).

Les quantités d'eau disponibles pour l'écoulement sont donc réduites, ce qui a pour conséquence de diminuer la **capacité du réservoir de routage X3** qui simule des crues de moindre importance. Le **délai X4** paraît être le paramètre le moins affecté par la présence du barrage, probablement parce que, étant en dérivation, ce dernier ne change pas le temps moyen de réponse du bassin aux pluies, mais seulement la distribution de l'eau autour de ce temps de réponse moyen (les retards et avances se compensent).

Cette dernière modélisation a permis de confirmer ce que l'on pouvait déjà observer sur l'hydrogramme d'Arcis-sur-Aube (*Figure 16, p.24*) et de l'étendre aux deux stations se trouvant plus à l'aval et pour lesquelles il n'était pas possible de distinguer de nette discontinuité sur l'hydrogramme. Cela a également permis de quantifier des tendances simplement observées qualitativement.

IV. ÉVALUATION DU MODELE INITIAL AVANT L'UTILISATION DES DONNEES DE BARRAGES

Nous avons vu dans la partie précédente comment se comporte le modèle GR4J initial sur des bassins influencés. Avant de prendre en compte de façon explicite les données de barrages, nous proposons d'établir un état « référence » : référence par rapport aux autres modèles pluie-débits existants (*IV.1*) et référence par rapport à des versions du modèle ne prenant pas en compte des données de barrages (*IV.2*). En effet, si en modifiant de façon simple la structure du modèle – sans prendre en compte les données de barrages-, nous obtenons des performances de même ordre de grandeur que celles obtenues lors des modifications que nous allons proposer dans la *Partie V*, alors il sera possible d'estimer que ces informations supplémentaires n'apportent rien au modèle.

IV.1 Comparaison avec d'autres modèles existants

Cette comparaison rapide avec d'autres modèles pluie-débit existants a deux objectifs. Le premier est d'évaluer les performances initiales du modèle GR4J et de vérifier que ce modèle est bien adapté pour modéliser le bassin de la Seine. Le second objectif de cette comparaison est d'obtenir des indications sur la façon d'intégrer des barrages à GR4J, si d'autres modèles pluie-débit se révèlent nettement meilleurs sur des bassins influencés. Les quatre modèles testés sont des versions modifiées des modèles TOPMODEL, IHACRES, HBV et GRHUM. Nous ne détaillons pas ici leurs caractéristiques, mais une description est disponible dans les travaux de Perrin (2000).

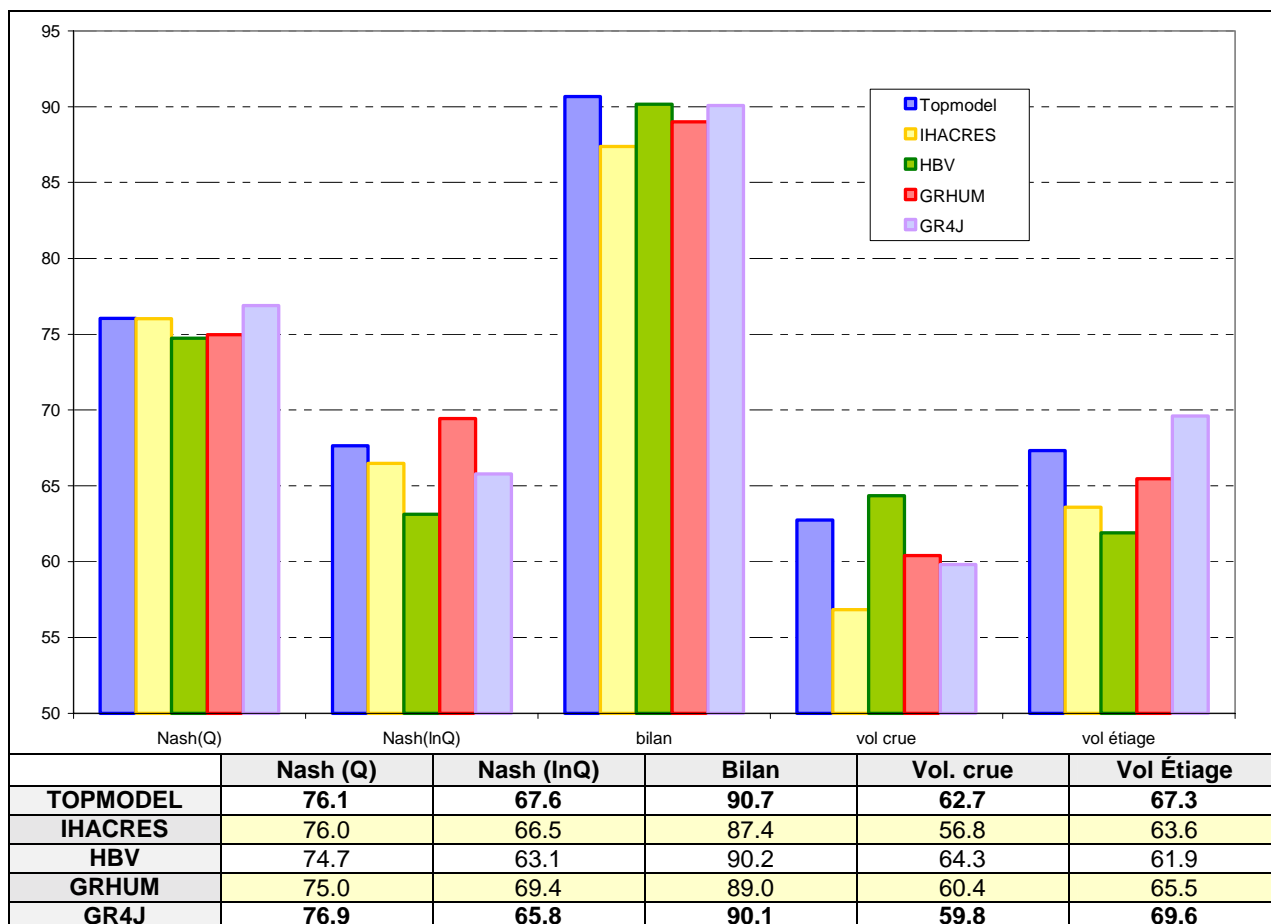


Figure 19 : Performances pour différents modèles pluie-débit existants

On observe ci-dessus, que les performances des différents modèles sont relativement similaires. Sur les cinq critères que l'on a choisis, GR4J est meilleur selon le critère de Nash sur les débits et l'estimation du déficit de volume écoulé en étiage, mais obtient un classement médian sur les trois autres critères. La différence de performances avec les autres modèles n'étant pas significative, il n'est pas possible d'en tirer d'indices sur la façon dont on va pouvoir prendre en compte les lacs-réservoirs dans le modèle. Cependant, cette comparaison nous rassure sur le bien fondé de travailler avec ce modèle qui, pour plus de simplicité, ne donne pas de performances moins élevées que d'autres modèles pluie-débit.

IV.2 Modifications dans les équations du modèle GR4J

Nous allons maintenant essayer d'apporter des modifications dans la structure du modèle -sans prendre en compte les données de barrages - pour voir s'il n'est pas possible d'obtenir une amélioration conséquente sur la simulation des débits influencés. Il faut rappeler que ce travail ne fait pas partie des objectifs de cette étude de DEA dont l'objet est de détecter des pistes permettant la prise en compte de données de barrages par le modèle GR4J. Cependant, il nous semble indispensable dans le cadre d'une démarche scientifique de justifier cette complexification par le fait que l'on ne puisse pas obtenir de résultats comparables d'une autre manière (i.e. sans tenir compte des données de barrages).

Pour l'ensemble des modifications suivantes, il a été choisi de ne pas bouleverser la structure globale du modèle, mais plutôt d'étudier la possibilité de représenter, de façon performante, un débit influencé par des barrages en ne modifiant que des coefficients fixes dans les équations qui régissent le modèle. Pour trouver les valeurs optimales de ces coefficients, il a été décidé

de ne pas avoir recours à des procédures automatisées d'optimisation, afin de ne pas donner place à une possible compensation entre paramètres. En effet, si dans l'équation permettant de

calculer les échanges en eau, $Ech = X2 \cdot \left(\frac{R}{X3}\right)^{7/2}$, on cherche à trouver la valeur optimale

pour l'exposant (7/2), alors il est très probable que lors de l'optimisation, les paramètres optimisables X2 et X3 soient également influencés.

D'autre part, les résultats présentés sont obtenus en réalisant la moyenne des résultats obtenus en phase de contrôle sur l'ensemble des bassins étudiés et sur l'ensemble des périodes définies dans la partie II.1.3.

IV.2.1. Propositions de modifications du modèle initial

<p>- Coefficient dans le terme de percolation -</p> <p>On modifie les valeurs du coefficient dans l'équation du terme de percolation : (valeur initiale $9/4 = 2.25$)</p> $Perc = S - \left[S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X1\right)^{-4} \right]^{-\frac{1}{4}}$	
<p>- Exposant dans le terme de percolation -</p> <p>On modifie les valeurs de l'exposant α dans l'équation du terme de percolation : (valeur initiale = 4)</p> $Perc = S - \left[S^{-\alpha} + \left(\frac{9}{4} \cdot X1\right)^{-\alpha} \right]^{-\frac{1}{\alpha}}$	
<p>- Séparation des écoulements -</p> <p>On modifie la valeur de la répartition des écoulements entre les 2 hydrogrammes unitaires. (valeur initiale 0.9 ; c'est à dire 90% allant dans la branche UH1 et 10% dans la branche UH2)</p>	
<p>- Exposant dans le terme d'échanges -</p> <p>On modifie les valeurs de l'exposant dans l'équation du terme d'échanges souterrains (valeur initiale : $7/2 = 3.5$)</p> $Ech = X2 \cdot \left(\frac{R}{X3}\right)^{7/2}$	

Tableau 14 : Modifications réalisées dans les équations du modèle

IV.2.2. Analyse des résultats

Coefficient dans le terme de percolation

Globalement, les meilleurs résultats (*Tableau 15*) semblent être obtenus avec des valeurs du coefficient comprises entre 3,5 et 4. On relève comme valeur optimale de ce coefficient : 3,9.

	Nash(Q)	Nash(lnQ)	bilan	vol crue	vol étiage
1.0	70.7	56.1	89.5	50.5	65.1
2.0	75.9	63.5	90.1	58.1	68.6
2.25	76.8	65.8	90.1	59.7	69.6
3.0	78.1	71.6	90.2	63.5	71.6
3.5	78.3	71.6	90.2	63.5	71.6
3.75	78.3	72.0	90.2	63.7	71.8
3.9	78.3	72.2	90.3	63.8	71.9
4.0	78.2	72.2	90.2	63.7	71.9
5.0	77.9	72.6	90.1	63.7	72.2

Gain réalisé par la modification de ce coefficient : (3.9) – (2.25) :					
	Nash(Q)	Nash(lnQ)	bilan	vol crue	vol étiage
	+ 1.5	+ 6.4	+ 0.2	+ 4.1	+ 2.3

Tableau 15 : Résultats selon les valeurs du coeff. dans le terme de percolation (modèle initial)

Le gain réalisé par cette modification est assez important, en particulier sur Nash(lnQ). Ceci est logique étant donné que la percolation issue du réservoir de production se fait essentiellement ressentir sur les étiages.

Une corrélation entre les paramètres physiques du bassin (*Partie V.3.1*):

- Superficie du bassin : S_{bassin} ;
- Superficie interceptée par le barrage : S_{barrage} ;
- Rapport $S_{\text{barrage}}/S_{\text{bassin}}$;
- Volume maximal équivalent stockable sur le bassin : V_{max}
- Rapport : $V_{\text{max}}/S_{\text{bassin}}$

et les valeurs des coefficients de percolation a été recherchée, sans résultat. Une telle relation aurait pu être utilisée pour définir a priori les valeurs du coefficient de percolation.

Nous avons également testé si de grandes valeurs de la percolation jouent un rôle significatif. On peut constater qu'à partir d'une certaine valeur (4 environ) les résultats atteignent une valeur limite et ne varient pratiquement plus. Ceci peut s'interpréter ainsi :

si, dans $Perc = S - \left[S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X1 \right)^{-4} \right]^{-\frac{1}{4}}$, $9/4$ grandit alors $\left[S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X1 \right)^{-4} \right]^{-\frac{1}{4}}$ tend vers S et la valeur

de la percolation tend vers 0. A contrario, si on fait diminuer le rapport $9/4$, alors la percolation prend de plus en plus d'importance et on obtient des résultats plus mauvais que dans le cas précédent où la percolation s'annulait. Les meilleures performances enregistrées avec des coefficients de percolation plus élevés tendraient à indiquer que pour ces bassins, cette percolation n'est pas forcément très intéressante.

Exposant dans le terme de percolation

Ces premiers résultats montrent que les performances du modèle sont meilleures pour un α supérieur à 5 (la valeur initiale était 4). De la même façon (et pour les mêmes raisons) que précédemment, nous observons qu'une limite est atteinte à partir d'une certaine valeur de α .

Séparation des écoulements

Il est possible de constater sur la figure du *Tableau 14* que les performances varient presque linéairement avec la valeur de ce coefficient de partage. Les meilleurs résultats semblent être obtenus avec les valeurs les plus élevées (0,9 et 1) ce qui conforte le choix par défaut qui était de 0,9.

Exposant dans le terme d'échanges

Les performances apparaissent être très peu sensibles aux variations de la valeur de l'exposant dans la formule de calcul des échanges.

IV.2.3. Conclusions

A l'issue de ces essais de modifications non exhaustives dans les équations du modèle, nous arrivons aux conclusions suivantes :

- Les modifications sur le terme de percolation paraissent apporter un gain significatif sur les performances du modèle. Les valeurs ont été trouvées dans cette étude de façon empirique et sur un petit nombre de bassins. Les résultats que l'on a trouvés ne peuvent donc être généralisables et peuvent ne traduire que des caractéristiques particulières du bassin de la Seine. Pour pouvoir tirer des conclusions sur la possibilité de faire varier le coefficient de percolation pour pouvoir prendre en compte la présence de barrages, il faudrait renouveler l'étude qui vient d'être faite, sur un plus grand nombre de bassins.
- Les autres modifications ne semblent pas apporter d'amélioration significative quant aux performances du modèle.

En apportant des modifications au niveau du terme de percolation, il est possible d'améliorer légèrement les performances du modèle. Cependant des limites apparaissent dans les gains réalisés. Nous allons maintenant examiner si cette amélioration peut-être dépassée dans le cas d'une prise en compte explicite des données de barrages.

V. PRISE EN COMPTE DES DONNEES DE BARRAGES

V.1 Présentation de la prise en compte des données de barrages.

La difficulté de la prise en compte d'un barrage dans le modèle pluie-débit que nous avons choisi vient du caractère global du modèle (le bassin est vu comme une quantité indifférenciée) et de l'absence de correspondance physique a priori entre ses composants et les différents compartiments du bassin. Se pose alors la question de savoir comment introduire mathématiquement la présence d'un tel barrage au sein du modèle. En effet, contrairement à un modèle distribué à base physique où l'introduction d'un barrage revient à paramétrer différemment certaines mailles du modèle, nous ne savons pas ici sur quels composants du modèle initial il faut agir pour reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin influencé.

Dans cette partie, nous présentons les résultats de notre recherche de solutions simples pour l'introduction de barrage(s).

Dans les données de barrages, nous disposons de plusieurs informations différentes (*Figure 11*). Parmi elles, nous avons choisi de ne considérer que les volumes stockés dans les barrages. Ces volumes sont calculés quotidiennement à partir des hauteurs d'eau mesurées sur le site et d'une courbe de correspondance entre les hauteurs et les volumes, pour chaque barrage.

Nous considérons donc dans la suite que les différents barrages situés à l'amont d'une même station représentent un unique stockage en eau, dont les variations ne sont régies que par la somme des variations enregistrées sur les différents ouvrages.

Pour en avoir une vision globale comparable aux autres stockages d'eau dans le modèle, les données sont ramenées à la superficie du bassin versant concerné. Dans le cas de bassins influencés par plusieurs barrages, les volumes stockés sont sommés, puis divisés par la superficie du bassin. Ainsi, de même que les pluies sont moyennées sur le bassin pour constituer une entrée globale du modèle, la lame d'eau stockée équivalente va constituer une autre entrée du modèle.

Nous proposons, pour pouvoir tenir compte des variations quotidiennes des volumes stockés dans les barrages, de rajouter à la structure du modèle GR4J, un réservoir supplémentaire qui sera contrôlé par les variations de volumes réellement observées. Les différentes propositions vont simplement faire varier les points dans le modèle où le réservoir « barrage » prend de l'eau (dans le cas où la lame d'eau équivalente stockée augmente), et ceux où il la restitue (dans le cas contraire).

Dans le cadre de ce DEA, nous nous sommes restreints à des solutions simples, ne faisant pas intervenir de paramètres supplémentaires dans le modèle. Des coefficients seront cependant utilisés dans la suite pour chercher la structure la mieux adaptée.

Nous adoptons dans la suite une démarche pas à pas pour identifier les solutions apparaissant les plus fiables. Un modèle sera préféré à un autre s'il obtient les performances plus satisfaisantes en moyenne sur l'ensemble des bassins.

V.2 Recherche d'une solution performante pour l'ensemble des bassins

Dans cette partie nous recherchons une solution qui soit efficace sur l'ensemble des bassins. (Une étude bassin par bassin sera réalisée dans la partie suivante.)

La démarche proposée pour la recherche des points d'insertion du réservoir supplémentaire est de partir d'une solution très simple « un point d'alimentation et un point de rejet » et de la complexifier peu à peu, en vérifiant à chaque étape que cette sophistication supplémentaire est justifiée en terme de performances.

V.2.1. Un point d'alimentation et un point de rejet

D'après les indications fournies en *IV.2.3*, et afin de pouvoir toujours remplir le réservoir « barrage » (**B**), il semble plus pertinent de l'alimenter à partir des réservoirs existant déjà dans la structure du modèle, c'est-à-dire le réservoir de production (**S**) et le réservoir de routage (**R**). Il peut également être intéressant de l'alimenter directement à partir de la pluie nette (**Pn**) entrant dans le modèle. Dans ce dernier cas, si l'entrée de pluie est insuffisante pour alimenter **B**, on complétera en prélevant dans le réservoir **S**.

Ceci donne trois types d'alimentations possibles :

- alimentation à partir de P_n puis du réservoir **S** (en cas d'insuffisance de P_n) (1)
- alimentation à partir du réservoir **S** (2)
- alimentation à partir du réservoir **R** (3)

En ce qui concerne le rejet du réservoir barrage **B**, nous avons proposé les sept points suivants, notés sur la *Figure 20*.

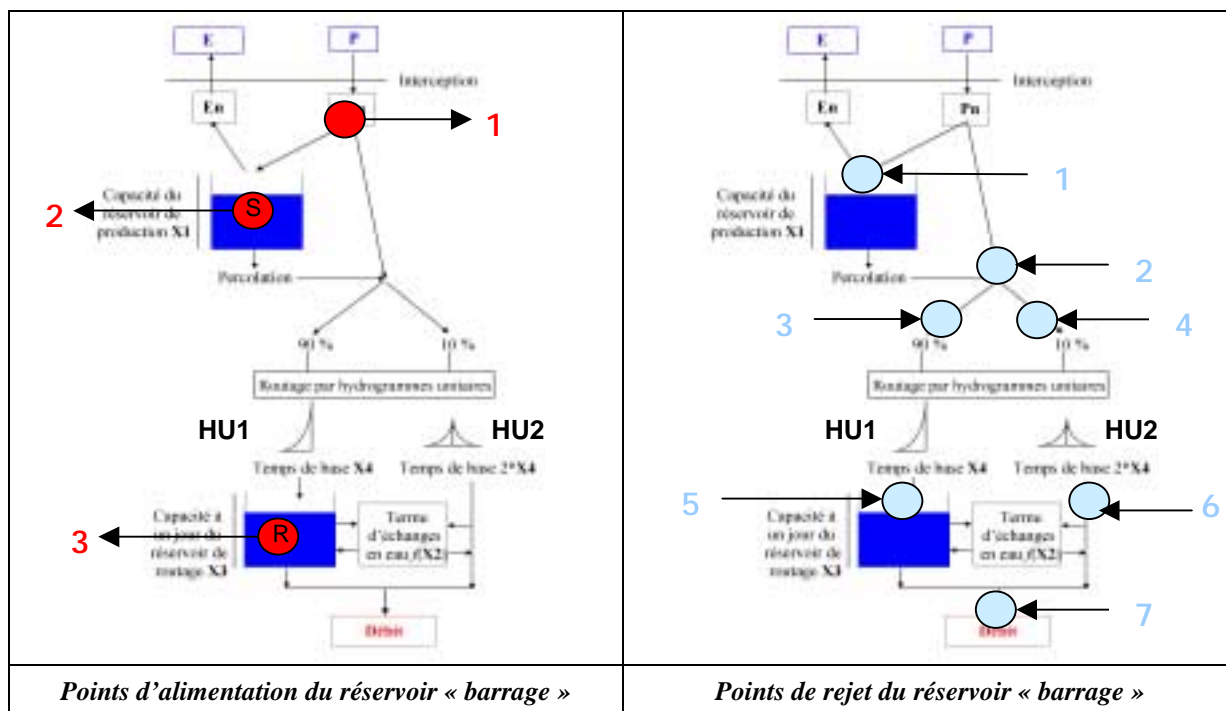


Figure 20 : Points d'insertion du réservoir barrage B

Les modalités d'introduction du réservoir « barrage » sont notées sous le format **i-j**, où **i=1..3** est le type d'alimentation du réservoir « barrage » et **j=1..7**, le lieu de rejet du réservoir « barrage ». La totalité des combinaisons « alimentation-rejet » proposées a été testée sur l'ensemble des bassins et les résultats sont présentés dans le **Tableau 16**.

Nash (Q)		Nash (lnQ)		Bilan		Volume en crue		Déficit en étiage	
classement	valeur	classement	valeur	classement	valeur	classement	valeur	classement	valeur
3-5	82.7	3-6	82.1	3-2	90.7	3-6	70.8	3-3	76.9
3-2	82.0	3-7	82.0	3-5	90.5	3-7	70.8	3-2	76.8
3-4	82.0	3-4	82.0	3-3	90.5	3-4	70.5	3-5	76.8
3-3	82.0	3-5	81.3	3-6	90.5	3-5	69.7	2-3	75.5
1-5	81.5	2-6	81.0	3-4	90.5	3-2	69.5	1-3	75.4
2-5	81.5	1-6	81.0	3-7	90.4	1-6	69.2	2-5	75.2
2-4	81.1	2-4	80.9	3-1	90.3	3-3	69.1	3-4	75.1
1-4	81.1	2-7	80.9	1-2	90.2	1-7	69.0	1-5	75.1
2-2	81.0	1-4	80.9	2-2	90.2	2-6	69.0	3-6	75.0
1-2	81.0	1-7	80.9	1-1	90.1	1-4	68.8	2-2	75.0
2-3	80.9	3-2	80.5	initial	90.1	2-7	68.7	1-2	75.0
3-6	80.8	3-3	80.3	1-5	90.1	2-4	68.6	3-7	74.7
1-3	80.8	2-5	80.0	1-6	90.1	1-5	67.5	1-6	72.9
3-7	80.7	1-5	79.9	2-1	90.1	2-5	67.2	2-6	72.8
1-6	79.7	2-2	79.0	2-6	90.0	1-2	67.1	1-4	72.8
2-6	79.7	2-3	79.0	2-5	90.0	2-2	66.8	2-4	72.8
1-7	79.6	1-2	78.9	1-3	90.0	1-3	66.7	2-7	72.4
2-7	79.5	1-3	78.9	2-4	90.0	2-3	66.5	1-7	72.4
3-1	78.9	3-1	67.3	1-4	90.0	3-1	63.7	2-1	70.0
2-1	77.4	2-1	66.6	1-7	89.8	initial	59.8	1-1	69.8
1-1	77.3	1-1	66.4	2-7	89.8	1-1	59.8	initial	69.6
initial	76.9	initial	65.8	2-3	89.7	2-1	59.6	3-1	69.3

Tableau 16 : Résultats sur l'ensemble des bassins avec un point d'alimentation et un point de rejet

On peut tout d'abord constater que quelle que soit la version proposée, celle-ci fournit globalement de meilleurs résultats que la version initiale sur les critères de Nash. De plus, l'ordre de grandeur du gain réalisé pour la plupart de ces intégrations de réservoir supplémentaire est largement supérieur à celui que l'on avait obtenu en faisant varier le terme

de percolation (IV.2.2, p.31) et supérieur au score maximum que l'on pouvait réaliser en utilisant d'autres modèles pluie-débit (IV.1, p.28).

Si l'on considère le classement des différents modèles testés selon les résultats moyens (obtenus en contrôle) sur les critères de Nash (Q) et de Nash (lnQ), l'option 3 (alimentation de B par R) donne, pour un même rejet, des résultats nettement meilleurs que les options 1 (alimentation par la pluie nette et par S) et 2 (alimentation par S). Ces deux dernières solutions fournissent des résultats très proches, même si l'option 2 est légèrement meilleure que la 1. Ceci nous amène à préférer une alimentation par le réservoir de routage R (option 3).

En ce qui concerne les rejets du réservoir (barrage) B, quel que soit le type d'alimentation de B, les résultats obtenus sont toujours classés dans le même ordre :

- avec un classement selon les Nash(Q) : 5 / 2 - 3 - 4 / 6 - 7 / 1
- avec un classement selon les Nash(lnQ) : 4 - 6 - 7 / 5 / 2 - 3 / 1

Ceci nous permet de mettre à jour plusieurs faits importants :

- il est possible d'éliminer l'hypothèse de rejet dans le réservoir de production (n°1) qui est toujours classée dernière et donne les plus mauvais résultats ;
- quel que soit le critère (Nash(Q) ou Nash(lnQ)), et quel que soit le lieu du rejet,
 - o l'option 5 donne toujours de meilleurs résultats que la 3,
 - o l'option 4 que la 2, elle-même toujours meilleure que la 3,
 - o et l'option 6 que la 7

Ces derniers résultats nous amènent à ne conserver que les types de rejet suivants :

- o 4 : avant l'hydrogramme unitaire de la branche d'écoulement direct
- o 5 : au niveau du réservoir de routage R
- o 6 : après l'hydrogramme unitaire de la branche d'écoulement direct

Nous obtenons donc des premiers résultats intéressants :

- une alimentation du réservoir « barrage » par R semble préférable à une alimentation par S
- a priori il est préférable d'insérer le réservoir « barrage » dans la fonction de routage plutôt que dans la fonction de production ;
- il n'apparaît pas nécessaire de court-circuiter (*ou de rallonger*) une partie du trajet de l'eau passant par le réservoir barrage, ce que l'on aurait par exemple en alimentant B avec le réservoir de production (*resp. avec le réservoir de routage*) et en rejetant dans la partie basse (*resp. la partie haute*) de la structure du modèle.

V.2.2. Deux points d'alimentation et un point de rejet

Dans le cas précédent, nous avons vu qu'il est préférable pour alimenter B de prendre l'eau dans le réservoir R, plutôt que dans le réservoir S. Nous proposons maintenant de tester s'il est possible d'améliorer ce choix d'alimentation de type tout ou rien en le nuancant et en partageant les origines de l'alimentation du réservoir B.

Cette nouvelle option d'alimentation sera appelée 4 par la suite.

On définit un coefficient de partage CPART. Si CPART vaut k, avec k compris entre 0 et 1, alors le réservoir est alimenté pour 100*k % par le réservoir S et pour 100*(1-k) % par le réservoir R. Choisir la valeur CPART=1 (*resp. 0*) revient à n'alimenter le réservoir « barrage » qu'avec le réservoir de production S (*resp. le réservoir de routage R*).

Dans un premier temps nous avons optimisé la valeur de CPART avec les autres paramètres du modèle :

→ pour l'ensemble des possibilités 4-i (i=1..7), la valeur issue de l'optimisation est proche de 0.52, ce qui revient à alimenter B pour moitié à partir de S, pour moitié à partir de R.

Nous avons fixé CPART à 0.5, et avons à nouveau réalisé l'ensemble des calages-contrôles, notre objectif étant toujours de travailler sur les modèles sans ajout de paramètres supplémentaires. Ensuite, nous avons comparé ces résultats aux cas où CPART vaut 1 ou 0.

Proposition	CPART	Nash (Q)	Proposition	CPART	Nash [ln(Q)]
4-1	0	78.9	4-1	0.5	67.5
	0.5	78.5		0	67.3
	1	77.4		1	66.6
4-2	0	82.0	4-2	0	80.5
	0.5	81.9		0.5	80.1
	1	77.9		1	77.0
4-3	0	82.0	4-3	0	80.3
	0.5	81.8		0.5	80.0
	1	80.9		1	79.0
4-4	0	82.0	4-4	0	82.0
	0.5	81.8		0.5	81.8
	1	81.1		1	80.9
4-5	0	82.7	4-5	0	81.3
	0.5	82.4		0.5	81.0
	1	81.5		1	80.0
4-6	0	80.8	4-6	0	82.1
	0.5	80.6		0.5	81.9
	1	79.7		1	81.0
4-7	0	80.7	4-7	0	82.0
	0.5	80.5		0.5	81.8
	1	79.5		1	80.9

Tableau 17 : Comparaison des résultats obtenus avec deux points d'alimentation de B

Quel que soit le choix du rejet, préférer utiliser le réservoir R plutôt que le réservoir S pour l'alimentation du réservoir B, permet de gagner plus d'un point tant sur Nash(Q) que sur Nash(lnQ). La solution CPART=0.5 issue de l'optimisation et correspondant à une alimentation à 50% par S et à 50% par R n'apporte rien par rapport au choix CPART=0, correspondant une alimentation par R uniquement.

→ Quel que soit le type de rejet, il est plus intéressant d'alimenter le réservoir barrage à partir de R uniquement.

V.2.3. Un point d'alimentation et deux points de rejet

De même que précédemment pour l'alimentation, nous allons nuancer le choix des points de rejet du réservoir « barrage » afin d'essayer d'améliorer le modèle. Nous n'utiliserons ici qu'une alimentation par R

Le nombre de points de rejet proposés au départ, est plus important que dans le cas précédent où on n'avait que deux points, et le nombre de combinaisons entre deux points est donc très élevé (pour les sept points possibles de la partie 0, il y a 21 combinaisons possibles).

Nous avons donc décidé de sélectionner parmi ces combinaisons, celles nous apportant le plus d'informations sur le fonctionnement de la prise en compte des données de barrages par le modèle.

Ainsi nous n'avons retenu pour le choix du lieu de rejet du réservoir B que les combinaisons suivantes :

- partage entre S et R [8]
- partage entre l'entrée et la sortie de la fonction de routage [9]
- partage entre les deux branches d'écoulement avant les hydrogrammes unitaires [10]
- partage entre les écoulements après les hydrogrammes unitaires [13]

Nous avons rajouté à ces propositions, deux combinaisons dissymétriques afin de rendre compte de l'effet des hydrogrammes unitaires :

- partage entre l'entrée de l'hydrogramme unitaire HU2 et la sortie de HU1 [11]
- partage entre l'entrée de l'hydrogramme unitaire HU1 et la sortie de HU2 [12]

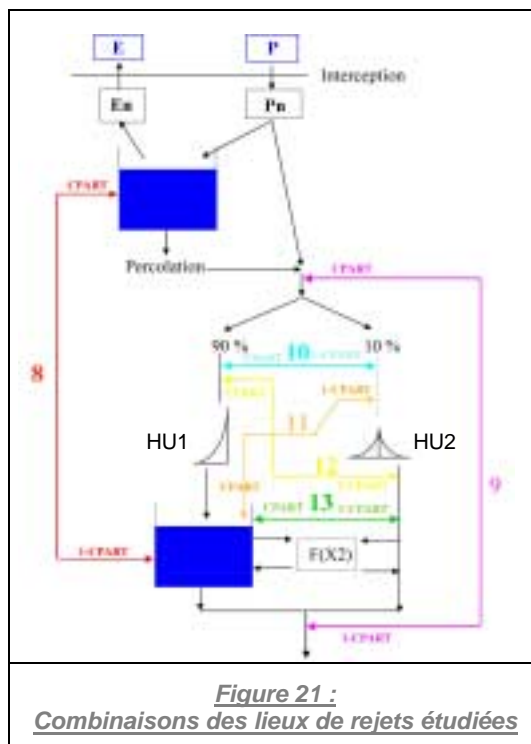


Figure 21 :
Combinaisons des lieux de rejets étudiées

Solution	Nash(Q)	Solution	Nash (lnQ)	Solution	bilan	Solution	Vol. crue	Solution	Vol. étiage
3-8-0	82.7	3-13-0.3	82.5	3-9-1	90.7	3-12-0	70.8	3-10-1	76.9
3-11-1	82.7	3-9-0.3	82.4	3-12-0.3	90.6	3-13-0	70.8	3-12-1	76.9
3-13-1	82.7	3-12-0.3	82.4	3-13-0.3	90.6	3-9-0	70.8	3-9-1	76.8
3-11-0.3	82.4	3-11-0.3	82.1	3-11-0.3	90.6	3-10-0	70.5	3-8-0	76.8
3-10-0.3	82.2	3-13-0	82.1	3-10-0.3	90.6	3-11-0	70.5	3-11-1	76.8
3-13-0.3	82.1	3-12-0	82.1	3-8-0	90.5	3-13-0.3	70.5	3-13-1	76.8
3-12-0.3	82.1	3-9-0	82.0	3-11-1	90.5	3-12-0.3	70.4	3-10-0.3	76.0
3-8-0.3	82.1	3-10-0	82.0	3-13-1	90.5	3-9-0.3	70.2	3-11-0.3	76.0
3-9-1	82.0	3-11-0	82.0	3-10-1	90.5	3-11-0.3	70.2	3-12-0.3	75.9
3-10-0	82.0	3-10-0.3	82.0	3-13-0	90.5	3-10-0.3	70.1	3-13-0.3	75.8
3-11-0	82.0	3-8-0	81.3	3-8-0.3	90.5	3-8-0	69.7	3-8-0.3	75.7
3-9-0.3	82.0	3-11-1	81.3	3-10-0	90.5	3-11-1	69.7	3-9-0.3	75.6
3-10-1	82.0	3-13-1	81.3	3-11-0	90.5	3-13-1	69.7	3-10-0	75.1
3-12-1	82.0	3-9-1	80.5	3-9-0.3	90.5	3-9-1	69.5	3-11-0	75.1
3-12-0	80.8	3-12-1	80.3	3-9-0	90.4	3-10-1	69.1	3-12-0	75.0
3-13-0	80.8	3-10-1	80.3	3-8-1	90.3	3-12-1	69.1	3-13-0	75.0
3-9-0	80.7	3-8-0.3	79.1	3-12-0	89.8	3-8-0.3	68.5	3-9-0	74.7
3-8-1	78.9	3-8-1	67.3	3-12-1	89.6	3-8-1	63.7	3-8-1	69.3

Tableau 18 : Classement relatif des différentes versions proposées selon nos 5 critères.

Dans le **Tableau 18** pour une même colonne, les versions de même couleurs sont équivalentes. Comme précédemment, nous avons utilisé un coefficient de partage CPART pour trouver les proportions d'écoulement les plus satisfaisantes en moyenne entre chaque point. Dans le

Tableau 18, on conserve la notation i-j et on y ajoute la valeur du coefficient de répartition CPART sous le format **i-j-k**, $k \in [0 ; 1]$.

Lors d'une procédure d'optimisation, nous avons trouvé, qu'en moyenne la valeur de CPART doit être proche de 0.3 pour les modèles 3-9, 3-10, 3-11, 3-12 et 3-13.

Nous avons donc fait tourner à nouveau tous les modèles en fixant CPART à cette valeur.

Dans ce qui suit, nous allons examiner en détail chacune des solutions proposées, en analysant, les résultats selon les critères de Nash, en fonction des valeurs du coefficient de partage. Les autres critères étant des bilans, ils seront également examinés à chaque fois, mais ne seront pas déterminants dans le choix des modèles.

Les variations de résultats des solutions 3-8 (rejets dans R et S):

- (a) il est préférable de rejeter dans R plutôt que dans S (comparaison 3-8-0 et 3-8-1)
- (b) une répartition entre les deux n'est pas forcément intéressante (3-8-0 est toujours meilleur que 3-8-0.3)

→ il n'est pas intéressant, du point de vue des critères de Nash, de rejeter dans S.

Les variations des résultats des solutions 3-9 (rejets avant HU et en sortie du modèle):

- (c) du point de vue des **crues** (Nash(Q)), il est plus intéressant de rejeter en haut de la fonction de transfert (3-9-1) ou une partie en haut et une partie en bas (3-9-0.3),
- (d) alors que du point de vue des **étiages** (Nash(lnQ)), il est plus pertinent de rejeter à la fois en haut et en bas (3-9-0.3) ou seulement en bas (3-9-0) ;
- (e) si cette solution devait être retenue, il faudrait envisager de prendre l'option intermédiaire permettant d'avoir de bons résultats tant sur les crues que les étiages.

→ selon le lieu de rejet du réservoir B, le modèle sera plus performant soit sur les crues, soit sur les étiages.

Les variations des résultats des solutions 3-10 (rejets avant HU1 et HU2):

- (f) Sur les **crues**, la solution 3-10-0.3 est meilleure que 3-10-0 et 3-10-1 qui fournissent des performances identiques. Ceci nous indique qu'il est préférable d'agir sur les deux branches d'écoulement.
- (g) Sur les **étiages**, la solution 3-10-1 (tout avant HU1) est nettement moins bonne que les deux autres. Ceci nous permet d'en déduire qu'il est important d'effectuer au moins une partie des rejets de B sur la branche d'écoulement direct afin d'améliorer les performances du modèle sur les étiages.
- (h) Par comparaison avec les résultats de la solution **3-9-1** dont le rejet a lieu juste avant la séparation des écoulements, nous arrivons aux mêmes conclusions : la séparation des écoulements n'a pas d'impact sur les crues (les résultats sont les mêmes pour 3-9-1, 3-10-1 et 3-10-0), par contre, au niveau des étiages, il est très intéressant de faire passer une partie de l'écoulement dans la branche d'écoulement direct (on gagne 1.5 points entre 3-9-1 et 3-10-0)
- (i) La comparaison entre **3-8-0** (ou 3-11-0 ou 3-13-0, → le rejet s'effectue dans R, i.e. après HU1) et **3-10-1** (rejet avant HU1) met en évidence le fait qu'il est plus bénéfique tant sur les crues que les étiages de rejeter après cet hydrogramme unitaire.
- (j) La comparaison entre **3-11-0.3** et 3-10-0.3 nous fournit la même indication : pour les 2 modèles, 70% des rejets ont lieu avant HU2, les 30% restants étant restitués pour l'un des modèles avant HU1 et pour l'autre après HU1. La solution 3-11-0.3 qui restitue après HU1 est meilleure tant en crues qu'en étiages.
- (k) De la même façon, la comparaison entre **3-12-0.3** et 3-10-0.3 nous montre qu'un rejet après HU2 nous permet d'obtenir une valeur moyenne de Nash(lnQ) bien meilleure qu'en rejetant avant HU2, alors que le critère de Nash(Q) n'est que très peu influencé

(mais il diminue légèrement, il va donc peut-être falloir envisager l'hypothèse où on rejette avant HU2 également).

→ *il est préférable d'agir sur les deux branches d'écoulement [f ; g ; h]*

→ *il est préférable de rejeter après HU1 plutôt qu'avant HU1 [i ; j]*

Les variations des résultats des solutions 3-13 (rejets après HU1 et HU2):

- (l) Il paraît plus profitable de rejeter au moins une partie du réservoir B dans R pour permettre de restituer des débits **en crues** de façon performante (à rapprocher du (c) où pour les crues, il était plus intéressant d'agir en haut de la fonction de transfert (et donc à 90% sur la branche de R) plutôt qu'en bas (i.e. en ne passant pas par R)).
- (m) Inversement, pour restituer des débits **en étiages** corrects, il est préférable de rejeter au moins une partie de B dans la branche d'écoulement direct (à rapprocher du (d), où un rejet dans le débit final fournit de bons résultats sur les étiages.
- (n) Les résultats de la solution 3-13-0.3 sont bons à la fois en Nash(Q) et en Nash(lnQ). Si on les compare à la solution **3-10-0.3** qui paraissait être la meilleure pour l'option 3-10, on observe que les résultats de 3-13-0.3 sont meilleurs que ceux en 3-10-0.3 selon les deux critères de Nash. Il est donc globalement préférable de rejeter après les hydrogrammes unitaires.
- (o) Les résultats obtenus avec l'option **3-12** sont systématiquement soit équivalents, soit moins bons qu'avec l'option 3-13, ce qui confirme les points précédents où on avait remarqué qu'il valait mieux agir après HU1
- (p) en comparant **3-11-0.3** et 3-13-0.3, on précise l'information donnée en (k) : rejeter avant HU2 est favorable pour les crues et rejeter après HU2 est favorable pour restituer des étiages.

→ *pour permettre une bonne restitution des débits élevés, il est préférable de rejeter soit en R, soit avant HU2 [l ; o ; p]*

→ *et pour permettre une bonne restitution des débits faibles, il est préférable de rejeter sur la branche d'écoulement direct, après HU2 [m ; p]*

A l'issue de ces dernières propositions, des solutions commencent à se dégager.

Trois points de rejet semblent intéressants :

- le réservoir R (pour les crues essentiellement)
- avant HU2 (pour les crues également et les étiages)
- après HU2 (pour les étiages essentiellement)

Ce qui nous permet de proposer une nouvelle version du modèle, avec trois points de rejet.

V.2.4. Un point d'alimentation et trois points de rejet

Nous proposons maintenant une solution supplémentaire qui pourrait permettre (1) de mieux comprendre quelles sont les influences de certaines modifications (notamment ici, sur la branche d'écoulement direct) ; (2) et de rechercher une relation entre le coefficient de partage et des caractères physiques des bassins. Ces nouvelles versions proposent d'utiliser les trois points de rejets identifiés précédemment.

Nom du modèle	Dans R	Avant HU2	Après HU2
3-14-CPART	50 %	CPART	1-CPART
3-15-CPART	30 %	CPART	1-CPART
3-16-CPART	70 %	CPART	1-CPART

Comme maintenant, les influences attendues de nos propositions seront vraisemblablement plus petites que lors des propositions précédentes, nous avons décidé de ne plus avoir recours

à une procédure d'optimisation – pouvant buter sur un extremum secondaire - pour évaluer la valeur optimale de CPART, mais de faire varier cette valeur par essais successifs :
 $CPART = \{0 ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1\}$

Les résultats obtenus sont les suivants :

Solution	Nash(Q)	Solution	Nash(lnQ)	Solution	Bilan	Solution	Vol. crue	Solution	Vol. étiage
3-16-0	82.85	3-15-0.3	82.56	3-15-1	90.74	3--13-0	70.81	3--11-1	76.75
3-16-0.3	82.84	3-15-0	82.55	3-16-0	90.73	3--11-0	70.54	3--13-1	76.75
3-14-0.5	82.83	3-15-0.4	82.55	3-16-0.3	90.73	3-14-1	70.50	3-16-1	76.66
3-16-0.5	82.83	3-14-1	82.47	3-16-0.5	90.73	3-15-0.3	70.47	3-16-0.7	76.59
3-15-1	82.82	3-15-0.7	82.38	3-14-0.3	90.68	3-15-0	70.42	3-15-1	76.56
3-16-0.7	82.78	3-14-0.3	82.34	3-14-0.5	90.68	3-15-0.5	70.37	3-16-0	76.54
3-14-0.3	82.78	3-14-0	82.33	3-14-0	90.68	3-15-0.7	70.29	3-16-0.5	76.53
3-14-0.7	82.77	3-14-0.5	82.27	3-14-0.7	90.67	3-14-0	70.27	3-16-0.3	76.52
3-15-0.5	82.71	3-14-0.7	82.16	3-15-0	90.61	3-14-0.5	70.26	3-14-0.7	76.43
3-16-1	82.70	3--13-0	82.10	3-14-1	90.59	3-14-0.3	70.24	3-14-0	76.35
3-15-0	82.67	3--11-0	82.03	3--11-1	90.53	3-14-0.7	70.23	3-14-0.5	76.35
3--11-1	82.66	3-15-1	81.95	3--13-1	90.53	3-16-0.3	70.20	3-14-0.3	76.34
3--13-1	82.66	3-16-0	81.93	3--13-0	90.50	3-15-1	70.19	3-15-0.5	75.90
3-15-0.7	82.66	3-16-0.3	81.90	3--11-0	90.48	3-16-0	70.18	3-15-0	75.88
3-15-0.3	82.59	3-16-0.5	81.84	3-16-0.7	90.35	3-16-0.5	70.15	3-15-0.7	75.88
3-14-0	82.58	3-16-0.7	81.76	3-16-1	90.35	3-16-0.7	70.13	3-15-0.3	75.87
3-14-1	82.14	3-16-1	81.63	3-15-0.3	90.24	3-16-1	70.05	3-14-1	75.85
3--11-0	82.03	3--11-1	81.31	3-15-0.5	90.24	3--11-1	69.70	3--11-0	75.11
3--13-0	80.83	3--13-1	81.31	3-15-0.7	90.22	3--13-1	69.70	3--13-0	75.05

Tableau 19 : Classement selon les différents critères des versions à trois points de rejet

La **solution 3-16** où 70% du réservoir B est rejeté dans R est la mieux classée vis à vis des Nash(Q) et fournit des performances plutôt moins bonnes que les autres versions proposées, vis à vis de Nash(lnQ). Ceci confirme ce que l'on avait déjà vu précédemment en (l) et (m). Par contre, une comparaison avec les résultats fournis par 3-11-1 et 3-13-1 où la totalité des rejets ont lieu dans R, nous confirme que, tant vis à vis des crues que des étiages, il est plus intéressant d'avoir recours à un partage des rejets entre les deux branches de l'écoulement.

Les évolutions des performances des solutions 3-16 nous montrent que la proposition 3-16-0, restituant après HU2 les 30% restant des rejets, est la meilleure. Dans le cas d'une forte restitution dans le réservoir R (ici, 70%), il n'est donc pas utile d'avoir recours à un partage « avant/après HU2 ».

Cette solution 3-16 nous a fournit des informations sur le fonctionnement du modèle, mais ne va cependant pas être retenue du fait de ses moins bons résultats sur les Nash(lnQ).

Les **solutions 3-14 et 3-15** (respectivement 50 et 30% dans R) se détachent moins nettement que la solution 3-16.

Nous cherchons des propositions meilleures que lors de l'étape précédente (à deux points de rejet) : on élimine donc les options 3-15-0.7, 3-15-0.3, 3-14-0 et 3-14-1 (moins bonnes performances vis à vis de Nash(Q) que 3-13-1) et 3-15-1 (moins bon vis à vis de Nash(lnQ) que 3-13-0). Nous avons vérifié avant de les éliminer que ces solutions ne fournissent pas, par ailleurs, de performances bien meilleures que celles des autres modèles sur les critères de bilan. Restent les modèles 3-14-0.3, 3-14-0.5, 3-14-0.7, 3-15-0 et 3-15-0.5.

Nous n'avons pas trouvé de constante ou d'évolution susceptible d'être interprétable entre ces différentes propositions. Il n'est donc pas possible d'orienter notre choix par une compréhension du fonctionnement des rejets. Parmi les versions restant, le modèle 3-14-0.7 est moins bon que les modèles 3-14-0.3 et 3-14-0.5 tant sur les Nash(Q) que sur les Nash(lnQ).

Il convient de préciser ici que les variations de performance entre les différentes solutions restantes sont très réduites. Pour choisir parmi ces versions, nous les avons classées selon Nash(Q) et Nash(lnQ) par ordre de performance sur chacun des bassins, et nous avons attribué à chaque rang un nombre de points décroissants. La proposition 3-14-0.3 correspond à la somme minimale (c'est-à-dire qu'elle se classe souvent parmi les meilleurs sur les différents bassins) et paraît donc être la plus fiable sur l'ensemble des bassins pour les deux critères.

La solution retenue est donc caractérisée par les éléments suivants :

- une alimentation de B par le réservoir de routage
- un rejet de B
 - o à 50% dans R
 - o à 15% avant l'hydrogramme HU2
 - o à 35% après l'hydrogramme HU2

Un raffinement plus évolué de cette solution ne semble pas être pertinent, les résultats obtenus entre les dernières versions étant très proches.

V.2.5. Conclusion

Lors de notre démarche de sophistication de la solution, nous avons pu noter différents points :

- Dès que l'on insère un réservoir B supplémentaire, prenant en compte les données de barrages, les performances moyennes sur l'ensemble des bassins se voient améliorées.
- Une alimentation de ce réservoir B par R donne de meilleurs résultats moyens que les autres alimentations testées.
- Une solution où B prend et rejette l'eau dans le réservoir de routage fournit de très bons résultats moyens ;
- Cette solution peut-être améliorée, dans le cas de nos neuf bassins par une division des rejets en deux ou trois points :
 - o rejeter en R permet de mieux simuler les crues (NashQ) mais est une solution moins performante en étiage (Nash(lnQ)) ;
 - o rejeter dans la branche d'écoulement direct permet d'agir plus efficacement sur l'amélioration des étiages mais fournit des résultats moins bons en crues ;
 - o rejeter en partie dans R et en partie dans la branche d'écoulement direct permet de nuancer les effets précédents
 - o parmi les solutions trouvées, il semble également intéressant de diviser la restitution dans la branche d'écoulement direct en deux points de rejets avant et après l'hydrogramme unitaire : avant permet de conserver de très bons résultats sur les crues et après pour agir plus efficacement sur les étiages.

Cette dernière solution est assez complexe et les résultats doivent être justifiés en terme de performance. Les apports correspondant à chaque étape sont rappelés ici :

Proposition	Alimentation	Rejet			Nash(Q)	Nash(lnQ)	Bilan	Vol. crue	Vol. étiage
initial	/	/			76.9	65.8	90.1	59.8	69.6
15	Pn et S	R			81.5	79.9	90.1	67.5	75.1
25	S	R			81.5	80.0	90.0	67.2	75.2
3--13-1	R	R			82.7	81.3	90.5	69.7	76.8
3-13-0.5	R	50% dans R	50% après HU2		82.6	82.3	90.7	70.3	76.3
3-14-0.3	R	50%R	15%avant HU2	35% après HU2	82.8	82.3	90.7	70.2	76.3

Tableau 20 : Synthèse des apports fournis à chaque étape de notre recherche

Si les performances entre les modèles proposés sont assez proches, on peut noter que le seul fait de prendre en compte les données de barrages apporte une nette amélioration de la qualité

des modèles. Ce résultat justifie donc l'étude que nous menons sur la prise en compte des données de barrages.

Sur nos neuf bassins d'étude, la solution que nous avons isolée semble être une des meilleures. Cependant, il semble utile d'obtenir une compréhension plus précise du fonctionnement de nos solutions en recherchant une relation entre les solutions à privilégier et les caractéristiques physiques des bassins influencés.

V.3 Analyse des résultats

V.3.1. Analyse bassin par bassin des résultats obtenus

Jusqu'à présent, nous nous sommes efforcés de trouver quel modèle donne de meilleurs résultats sur l'ensemble des bassins étudiés, afin de pouvoir l'utiliser quel que soit le bassin. Cependant, il est possible que les caractéristiques des bassins et la proximité de la station hydrométrique à l'ouvrage aient une influence sur le choix d'un modèle le plus adapté. Une étude bassin par bassin avec le modèle « barrage » retenu peut nous permettre de mieux comprendre comment celui-ci fonctionne.

Performances de la solution retenue

Le modèle retenu (3-14-0.3) a tendance à homogénéiser les résultats, dans le sens où, les résultats qui étaient mauvais (Troyes, Pont, Arcis, ...) sont fortement tirés vers le haut, tandis que ceux qui étaient déjà bons, sont améliorés de façon plus modeste.

La prise en compte des données de barrages améliore les performances sur les deux critères de Nash sur chacun des bassins. Il n'y a donc pas à craindre de dégradation du modèle initial par l'introduction du réservoir supplémentaire.

	Troyes		Pont		Arcis		Gurgy		Courlon		VSG		Chalons		Noisiel		Paris	
	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)	Nash (Q)	Nash (lnQ)
initial	57.7	30.1	75.2	65.6	70.1	61.4	82.7	68.5	81.7	69.3	83.6	79.6	79.6	64.8	77.6	71.6	83.8	81.2
modifié	69.0	72.9	81.7	86.8	79.6	88.4	84.4	78.6	82.6	74.8	84.6	84.0	82.8	84.0	80.4	83.2	85.8	88.5
gain	11.3	42.8	6.5	21.2	9.5	27.0	1.8	10.1	0.9	5.5	1.0	4.3	3.2	19.2	2.7	11.5	2.1	7.3

Tableau 21: Performances sur chaque bassin du modèle retenu

Prise en compte des variations de l'amplitude des impacts des barrages par bassin

Il semble étonnant que l'on puisse prendre en compte de la même façon dans le modèle, les données de barrages pour une station à l'aval immédiat de l'ouvrage et pour une station bien plus éloignée. En étudiant bassin par bassin, les évolutions des performances des intégrations de B proposées, on note que les bassins ayant les plus mauvais résultats (et donc étant les plus fortement améliorés) se trouvent plutôt dans la partie amont du bassin.

- **CVIS**

Nous avons tenté de faire intervenir sur la prise en compte des données de barrages un coefficient permettant d'exprimer cette plus ou moins grande importance que l'on veut donner aux manœuvres de barrages. Ce coefficient a été nommé « coefficient de visibilité » et est noté CVIS. Ainsi, au sein du programme du modèle, les variations de volumes réels contrôlant les variations de hauteur du réservoir « barrage » seront multipliées par ce coefficient avant d'être données comme consignes. En théorie ce coefficient ne peut être supérieur à 1, car logiquement les barrages ne peuvent avoir plus d'effets que ceux entraînés par leurs manœuvres réelles. Cependant nous proposons de ne pas limiter cette valeur à 1 et de voir si dans certains cas (par exemple immédiatement à l'aval des barrages), il n'est pas possible d'obtenir de meilleurs résultats en donnant encore plus d'importance aux barrages.

Ce coefficient CVIS variera donc de façon arbitraire entre 0 et 4 (0, pour ne pas tenir compte des données de barrages ; 4, pour multiplier par 4 les effets des manœuvres de barrages).

Pour chaque version du modèle, nous avons réalisé à nouveau l'ensemble des calages-contrôles en ajoutant ce coefficient. Il a été optimisé de la même façon que les autres paramètres. Les valeurs optimales trouvées pour CVIS, sont en général proches de 1, avec quelques variations suivant les intégrations réalisées. Des valeurs supérieures à 1 ont été trouvées pour les bassins à Gurgy et à Villeneuve-St-Georges (environ 1.5) et pour le bassin de l'Yonne à Courlon (un peu plus de 2).

Ces résultats sont assez surprenants :

- le fait que CVIS prenne souvent une valeur proche de 1, indique que le modèle accepte les données telles qu'elles sont fournies, sans faire de distinction entre les stations fortement influencées par les barrages et les autres ;
- les autres valeurs sont des moyennes sur l'ensemble des périodes de calages assez hétérogènes : pour Courlon, les valeurs de CVIS vont parfois de 1 à 4, d'une période à l'autre, ce qui indique que le modèle a du mal à « voir », les effets des données de barrages. Cette remarque peut être rapprochée à la fois de la faible influence du réservoir de Pannecièrre sur le bassin de l'Yonne à Gurgy et à Courlon ; et également des faibles gains réalisés par la prise en compte des barrages sur ces bassins.

	Surface du bassin (km ²)	Surface interceptée par barrage (km ²)	S. barrage / S. bassin (-)	V max. du barrage équivalent (10 ⁶ m ³)	V max / Sbassin (mm)	CVIS (valeur moyenne pour les solutions 3-4, 3-5 et 3-6)	CPART (pour 3-14-0.3)
Troyes	3410	2400	0.704	205	60.1	1.0	0.00
Pont	8760	4100	0.468	375	42.8	1.0	0.13
Arcis	3590	1700	0.474	170	47.4	1.0	0.00
Gurgy	3820	220	0.058	80	20.9	1.4	0.35
Courlon	10700	220	0.021	80	7.5	2.2	0.45
VSG	30800	4320	0.140	455	14.8	1.2	0.45
Chalons	6280	2950	0.470	350	55.7	0.8	0.31
Noisiel	12500	2950	0.236	350	28.0	0.9	0.52
Paris	43800	7270	0.166	805	18.4	1.0	0.41

Tableau 22 : Comparaison des caractéristiques physiques des bassins aux valeurs de CVIS et CPART

• CPART

Comme il est difficile de trouver une relation entre le coefficient de visibilité et l'importance supposée des manœuvres de barrages, on oriente la recherche d'une relation de ce type sur les variations des valeurs trouvées lors de l'optimisation de CPART avec la solution que nous avons retenu, c'est-à-dire 50% des rejets dans R et une répartition du reste avant/après HU2.

Les valeurs de CPART trouvées (**Tableau 22**) offrent une corrélation (**Annexe 4**) assez importante ($r^2=0.68$) avec le rapport $S_{barrage}/S_{bassin}$

[$CPART = -0.702 * S_{barrage}/S_{bassin} + 0.504$, pour $S_{barrage}/S_{bassin} < 0.72$ ($CPART > 0$), c'est-à-dire que la station hydrométrique ne doit pas être trop proche du barrage].

Cette relation nous a permis de calculer pour chaque bassin, la valeur à donner au coefficient de partage et nous avons réalisé à nouveau des calages-contrôles avec cette valeur. Cette nouvelle solution est notée 3-14-SS dans la feuille de résultats (**Annexes 1, 2 et 3**). La plupart du temps, elle n'apporte pas de réelle amélioration sur les performances.

	Troyes	Pont	Arcis	Gurgy	Courlon	VSG	Chalons	Noisiel	Paris	Moyenne										
3-14-0.3	76.0	72.9	83.8	86.8	85.8	88.4	84.3	78.6	82.5	74.8	84.5	84.0	83.2	84.0	79.2	83.2	85.6	88.5	82.8	82.4
3-14-SS	76.5	76.3	83.8	86.8	85.8	88.4	84.3	78.6	82.5	74.9	84.5	84.0	82.7	84.0	79.3	83.2	85.7	88.5	82.8	82.4
3-14-opt	76.5	73.4	83.8	86.8	85.8	88.4	84.3	78.6	82.4	74.9	84.5	83.9	82.5	83.8	79.3	83.1	85.6	88.4	82.7	82.4

Tableau 23 : Comparaison des performances lors de l'utilisation d'un CPART relié aux caractéristiques physiques des bassins [Nash(Q) en coloré et Nash(lnQ) en blanc]

Cependant, on peut penser qu'il existe une relation de ce type entre des caractéristiques physiques et le choix d'insertion du réservoir barrage. Ce type d'étude de corrélation pourrait être exploité par la suite et reproduit à l'ensemble des modifications que nous avons proposées. Pour permettre d'intuiter une telle possibilité, nous allons maintenant voir quelle est, pour chaque bassin, la solution optimale parmi celles testées.

Analyse des variations des solutions optimales pour chaque bassin

En étudiant le classement des performances (*Annexes 2 et 3*) pour chaque bassin, il nous est possible d'identifier quelques tendances :

- sur tous les bassins, il existe un certain nombre de solutions dont les performances sont très proches (comme nous l'avons vu pour les performances moyennes) et pour lesquels les écarts ne sont pas forcément significatifs ni facilement interprétables. Ceci confirme l'intérêt de travailler sur plusieurs bassins pour avoir des résultats de portée plus générale ;
- sur les bassins les plus influencés (**Troyes et Arcis**), les solutions les plus performantes sont 3-12-0 et 3-13-0, c'est à dire que la totalité des rejets est effectuée dans la branche **d'écoulement direct après HU2** ;
- sur les bassins de l'Yonne (**Gurgy et Courlon**), de façon assez étrange, les meilleures solutions semblent être d'alimenter B à partir du **réservoir de production** et d'effectuer les rejets de façon importante (70 à 100%) dans la branche **d'écoulement direct avant HU2** (solutions 2-10-0, 2-10-0.3 et 2-11-0). Cette singularité est peut-être à relier au fait que le barrage de Pannecièrre soit un barrage au fil de l'eau, alors que les autres ont été construits en dérivation sans que nous puissions confirmer ici cette hypothèse.
- sur les autres bassins, où souvent les écarts de performance entre différentes solutions ne sont pas significatifs, il est plus difficile d'identifier de solutions à la fois performantes sur les crues et les étiages :
 - à **Pont sur Seine et à VSG** (et à Arcis sur Aube), il semble qu'une solution donnant plus d'importance aux données de barrages avec **CVIS > 1**, puisse être une solution adaptée (3-13-0.5-1.3 et 3-13-0.5-1.1). Sur ces deux bassins, on peut identifier d'autres solutions également performantes : 3-15-CPART, avec CPART allant de 0 à 0.5 ; i.e. 30% des rejets dans R, de 30 à 50% avant HU2 et le complément après HU2. A **VSG**, les solutions 2-10-0.3 et 2-11-0.3 (**alimentation en S** ; vidange : 30% avant/après HU1 et 70% avant HU2) semblent également satisfaisantes. Cela peut vraisemblablement être relié aux solutions trouvées pour l'Yonne : VSG se trouve sur la Seine, mais sur le bief suivant la confluence avec l'Yonne ;
 - à **Chalons, Noisiel**, il est difficile de trouver une solution qui se détacherait des autres à la fois sur les Nash(Q) et les Nash(lnQ). Pour Chalons et Noisiel, les solutions les plus régulières sont celles qui ont été introduites en dernier et réalisant les **rejets en trois points** du modèle (3-14, 3-15 et 3-16) ;
 - à **Paris**, aucune solution ne se détache des autres en terme de performance.

A l'issue de cette analyse, nous n'avons pas réussi à tirer de tendance générale : une étude sur un plus grand nombre de bassins aux caractéristiques variées sera nécessaire pour pouvoir annoncer avec certitude des règles d'insertion du réservoir B.

V.3.2. Critique de la solution retenue

Résultats globaux

Si l'on compare en terme de performances le modèle prenant en compte les barrages (3-14-0.3) au modèle initial, le premier est très intéressant, notamment au niveau des étiages (**Tableau 24**).

Sur la courbe de distribution des performances obtenues par les deux modèles sur l'ensemble des bassins (**Figure 22**), il est possible d'apprécier de façon très

nette les apports très positifs du modèle prenant en compte les données de barrages. On remarque en particulier qu'on limite de façon importante les forts échecs du modèle.

Modèle	Nash (Q)	Nash (lnQ)	bilan	Vol. crue	Vol. étiage
initial	76.9	65.8	90.1	59.8	69.6
3-14-0.3	82.8	82.3	90.7	70.2	76.3
Gain	+ 5.9	+ 16.5	+ 0.6	+ 10.4	+ 6.7

Tableau 24 : Comparaison du modèle retenu au modèle initial

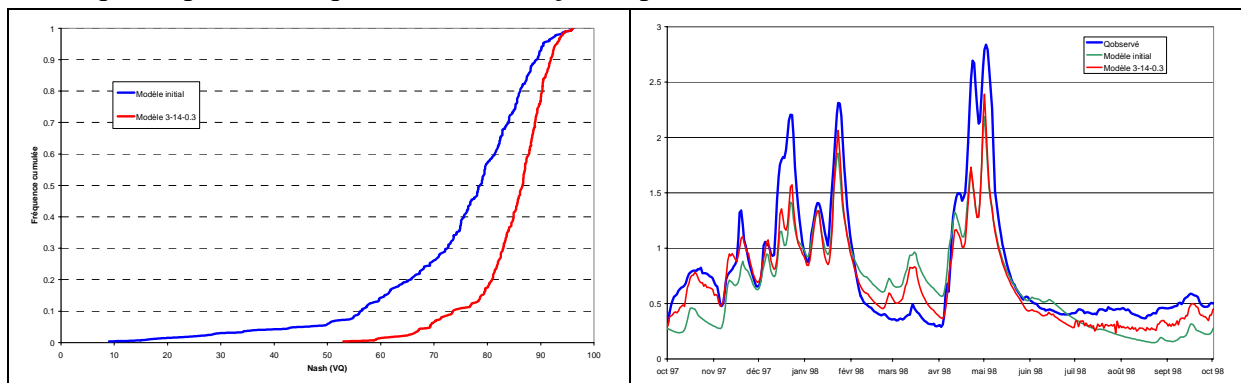


Figure 22 : Courbe de distribution des performances (modèle retenu comparé au modèle initial)

Figure 23 : Comparaison des hydrogrammes (Q en mm/j) fournis par le modèle initial et le modèle retenu (Arcis sur Aube)

L'évolution de ces performances se traduit concrètement par une simulation des débits (*calculés en contrôle*) plus proches des valeurs réellement observées que la simulation que réalisait le modèle initial [par exemple à Troyes (**Annexe 5**) ou à Arcis-sur-Aube (**Figure 23**)].

Utilisation d'une courbe objectif de remplissage des barrages

Les Grands Lacs de Seine nous ont fourni pour cette étude des données quotidiennes de remplissage des réservoirs. Cependant, il est probable que de telles données ne sont pas toujours disponibles pour d'autres ouvrages et que dans ce cas, on ne puisse disposer que des courbes objectifs de remplissage dont se servent généralement les gestionnaires pour avoir des indications sur la façon dont évoluent les stocks d'eau au cours du temps. Par ailleurs, nous avons vu à la **Figure 9** que les remplissages des ouvrages évoluent de façon relativement lissée au cours du temps, et que, sauf conditions climatiques exceptionnelles, les courbes sont assez similaires d'une année à l'autre. Nous avons donc voulu voir si l'utilisation de données moyennes interannuelles de remplissage dégradait beaucoup les résultats du modèle par rapport à l'utilisation de données datées, avec derrière cela, l'idée de voir la sensibilité du modèle à ces données.

Pour cela, nous avons calculé pour chacun des ouvrages une courbe moyenne correspondant à la courbe d'objectif de remplissage fournie par l'Institution des Grands Lacs de Seine. Rapportée au volume maximal stockable du barrage, on constate que ces courbes de gestion moyennes sont similaires d'un barrage à l'autre, c'est-à-dire qu'à une date donnée, le taux de remplissage de chacun des quatre barrages est en moyenne le même. Nous avons donc utilisé ces consignes de remplissage pour réaliser des simulations à partir des modèles retenus précédemment.

Lorsque l'on regarde les performances moyennes sur l'ensemble des bassins (**Annexe 1**), on constate tout d'abord que l'utilisation de données interannuelles dégrade les résultats obtenus

avec des données datées. Cependant, cette dégradation est limitée (de l'ordre de 1 point de Nash) et l'on reste dans les mêmes ordres de grandeur de performances que lors de l'utilisation de données datées. Ceci peut logiquement s'expliquer par le fait que les écarts entre les courbes mesurées de remplissage et la courbe moyenne sont relativement limités pour la plupart des années.

Lorsque l'on regarde les performances par bassin, on remarque que l'utilisation de données interannuelles donne sur la plupart des bassins des résultats légèrement meilleurs en Nash(Q) que l'utilisation de données datées; en revanche, en Nash(lnQ), l'utilisation de données interannuelles dégrade les performances dans la plupart des cas. On constate également que ce sont sur les stations les plus à l'amont que les différences de performances sont les plus marquées : sur ces stations, l'utilisation des données datées donne des résultats nettement meilleurs. Ceci confirme que l'effet des réservoirs s'atténue lorsque l'on va vers l'aval. C'est peut-être également l'indication que, vue très à l'aval, l'action des réservoirs s'apparente en moyenne (sans considérer un événement particulier) à des fluctuations saisonnières de stockage en eau.

	Troyes		Pont		Arcis		Gurgy		Courlon		VSG		Chalons		Noisiel		Paris		Moyenne	
Initiale	57.7	30.1	75.2	65.6	70.1	61.4	82.7	68.5	81.7	69.3	83.6	79.6	79.6	64.8	77.6	71.6	83.8	81.2	76.9	65.8
3-8-0	74.5	69.8	83.6	85.7	84.9	86.7	84.1	77.5	82.3	74.4	84.5	83.8	84.0	82.7	80.0	82.9	85.9	88.3	82.6	81.3
3-8-0-inter	71.3	66.3	81.3	83.3	80.8	81.7	85.1	77.9	82.5	73.9	84.9	83.9	84.4	81.6	79.9	82.6	86.3	88.9	81.8	80.0
3-14-0.3	76.0	72.9	83.8	86.8	85.8	88.4	84.3	78.6	82.5	74.8	84.5	84.0	83.2	84.0	79.2	83.2	85.6	88.5	82.8	82.4
3-14-0.3-inter	71.9	67.7	81.0	83.4	81.5	83.4	85.3	78.8	82.6	74.5	84.8	83.7	84.3	82.3	79.5	82.9	86.0	88.9	81.9	80.6

Tableau 25 : Comparaison des performances lors de l'utilisation de données inter-annuelles
[Nash(Q) en coloré et Nash(lnQ) en blanc]

Le cas d'Arcis-sur-Aube

On a vu en **III.2.2**, que lors du passage d'un bassin d'un état naturel à un état influencé (cas de l'Aube à Arcis sur Aube), les paramètres du modèle étaient largement affectés, notamment le paramètre de capacité du réservoir de production.

La meilleure méthode de prise en compte des données de barrages, serait un modèle dont les paramètres soient stables qu'il y ait ou non un barrage. Ceci indiquerait que la prise en compte explicite des données de barrages s'effectue de façon indépendante du fonctionnement du modèle et que celui-ci n'est plus obligé de compenser des lacunes d'information, en jouant sur ses paramètres.

Nous allons donc étudier maintenant comment les paramètres du modèle que nous avons obtenus varient avec l'introduction d'un barrage, dans le cas particulier du bassin d'Arcis-sur-Aube que nous avons étudié précédemment.

Sur la **Figure 24**, où est représentée l'évolution des paramètres il est possible de signaler plusieurs éléments remarquables :

- Le **paramètre du réservoir de production** est, avec notre modèle « barrage », devenu assez stable lors de l'introduction d'un barrage sur le bassin alors qu'il doublait quasiment sa valeur avec le modèle initial. Nous avons interprété cette augmentation comme une adaptation du modèle pour permettre de simuler les débits influencés: l'augmentation de la capacité du réservoir de production permet le stockage d'une quantité importante d'eau, correspondant à l'écrêtement des crues. L'introduction dans le modèle d'un réservoir supplémentaire apparaît donc tout à fait pertinente puisque dès lors, le paramètre de production ne subit plus que de faibles variations.
- Par contre, les **paramètres d'échanges souterrains et de délai** restent influencés même avec le modèle « barrage ». La diminution du paramètre d'échanges indique que le modèle est toujours obligé de s'adapter à une diminution réelle du bilan – *réellement observée à partir de la construction et la mise en service du barrage Aube*. Il est possible d'en conclure que notre prise en compte des données de barrages, pourrait probablement être améliorée en faisant, par exemple, agir le coefficient d'échanges sur

le réservoir B. On peut également proposer une solution introduisant au niveau du réservoir B, un délai différent de ceux utilisés dans la structure initiale du modèle.

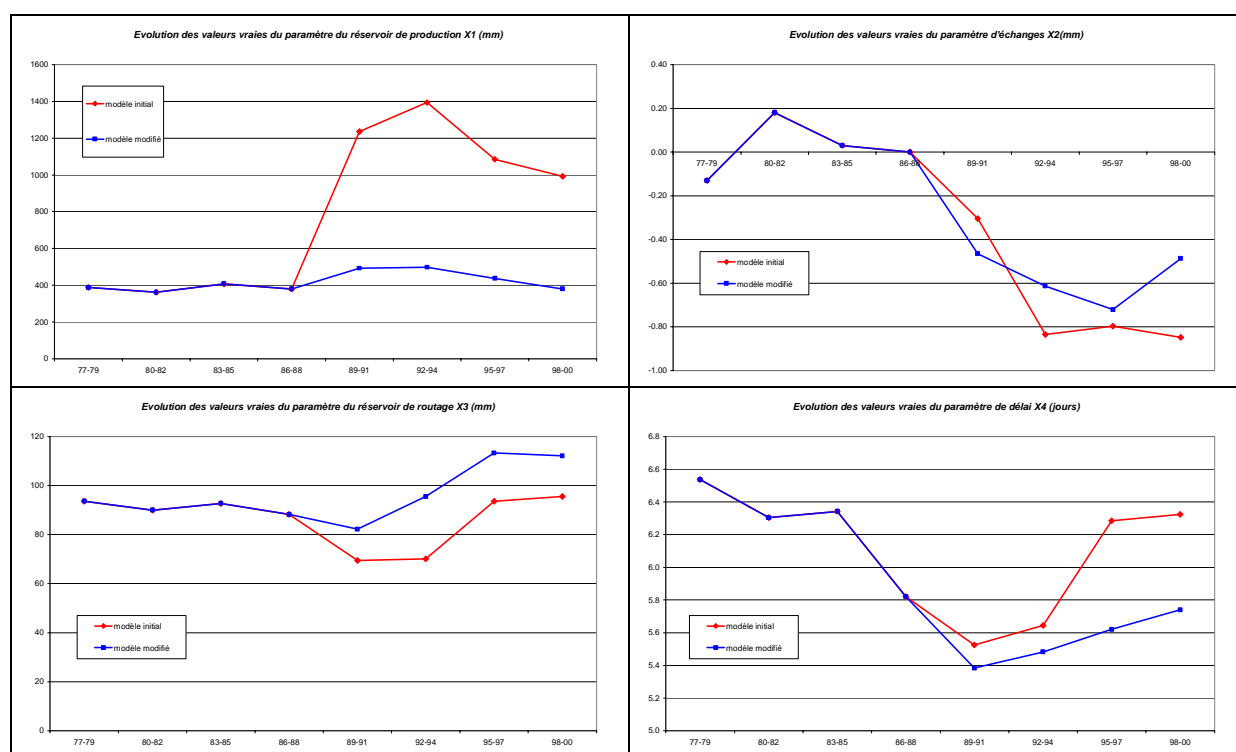


Figure 24: Évolution des valeurs vraies des paramètres au calage (modèle initial / modèle retenu)

A l'issue de cette étude critique sur le modèle que nous avons obtenu, il apparaît que la version d'intégration du réservoir « barrage » que nous proposons est performante sur de nombreux plans (hydrogramme plus proche de l'hydrogramme réellement observé, augmentation des performances, réduction du nombre de forts échecs). Cependant elle semble être encore perfectible, comme l'indiquent les évolutions des paramètres d'échanges et de délai.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Prendre en compte de manière explicite des données de barrages dans un modèle pluie-débit global est un sujet innovant. Par conséquent, au début de ce stage de DEA, toutes les possibilités restaient ouvertes.

Notre travail a porté sur le bassin de la Seine en amont de Paris, avec les enjeux importants liés à l'agglomération parisienne. Ce bassin, dont la dynamique hydrologique est régulée par quatre ouvrages situés sur l'amont des principaux cours d'eau (Seine, Marne, Yonne, Aube), a un fonctionnement assez complexe en raison notamment de la variabilité des temps de propagation, des effets de concomitance et des volumes relatifs apportés par les différents affluents en période de crue ou d'étiage.

Nous avons tout d'abord montré, dans le cas du bassin versant de la Seine, les limites des modèles qui ne prennent pas en compte les barrages pour simuler le comportement hydrologique des bassins versants influencés. Nous nous sommes ensuite efforcés d'explorer, de manière non exhaustive, les possibilités d'introduire ces données au sein d'un modèle simple et performant (GR4J), sous la forme d'un réservoir supplémentaire dont le fonctionnement est contrôlé par celles-ci.

Nous avons retenu une solution pour laquelle le réservoir supplémentaire est alimenté à l'aide de l'eau contenue dans le réservoir de routage et effectue ses rejets en plusieurs points de la partie de routage du modèle. Cette solution permet d'obtenir sur l'ensemble des bassins étudiés, une nette amélioration des performances par rapport au modèle initial, en particulier pour les bassins les plus à l'amont dont la dynamique est la plus modifiée par les réservoirs. Cependant les nombreux tests d'insertion du réservoir supplémentaire dans le modèle GR4J ont permis de montrer qu'il existe des possibilités donnant, sur nos neuf bassins d'étude, des résultats très proches.

Ainsi, le nombre restreint de bassins d'étude a probablement été un facteur limitant pour permettre de tirer des conclusions plus générales et pour pouvoir observer des tendances claires sur la supériorité d'une solution de modélisation ou pour identifier des corrélations entre les caractéristiques physiques des bassins et les valeurs des paramètres des solutions proposées. Il sera donc intéressant, par la suite, de tester nos solutions sur un plus grand nombre de bassins, sur des régions aux contextes climatiques variés, et sur des bassins pour lesquels la gestion des barrages n'a pas pour but principal la régulation des débits (production hydroélectrique ou irrigation, par exemple).

Les résultats que nous avons obtenus au cours d'un délai d'exploration finalement assez court, sont très positifs et sont donc extrêmement encourageants quant à la poursuite d'études sur le même sujet. On pourra en particulier s'attacher à identifier plus clairement comment les ajouts proposés au sein modèle agissent sur les fonctions de routage et de production. Enfin, il sera particulièrement intéressant de comparer dans un contexte prévisionnel (par exemple sur le bassin de la Seine), les prévisions réalisées (par Les Grands Lacs de Seine ou la DIREN Ile-de-France) au moyen de méthodes hydrauliques - et de l'expérience des prévisionnistes - à celles produites par le modèle.

REFERENCES

- André, R. et Tiercelin, J.-R.**, 1976. Le choix entre les débits moyens mensuels, décennaires et journaliers pour les projets d'utilisation des ressources en eau. *La Houille Blanche*, **8**: 657-660.
- Andréassian, V.**, 2002. Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 781 pp.
- Andréassian, V., Parent, E. et Michel, C.**, 2003. A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. *Water Resources Research*, **39** (en cours de publication).
- Ayadi, M. et Bargaoui, Z.**, 1998. Modelling of flow of the Miliane River using the CEQUEAU model. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, **43** (5): 741-758.
- Champion, M.**, 2001. Les inondations en France du VI^e siècle à nos jours. Cemagref Editions, Antony, 3000 pp.
- Degoutte, G. et Fry, J.J.**, 2002. Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi., Comité français des grands barrages, ENGREF Paris, Cemagref Editions, Antony.
- Desconnets, J.C., Diallo, A., Traore, O., Chene, J.M. et Morin, G.**, 1998. Exemple d'application du modèle CEQUEAU-ONU : évaluation de l'impact des aménagements sur les écoulements de la rivière Nakambé, Burkina Faso. *IAHS Publication*, **252**: 375-385.
- Dorfman, R.**, 1965. Formal models in the design of water resource systems. *Water Resources Research*, **1** (n°3): 329-336.
- Fahlsbursch, H.** (Editor), 2001. Historical Dams. Foundation of the future rests on the achievements of the past. International Commission on Irrigation and Drainage (ICID-CIID), New Delhi, Inde.
- Garcia-Navarro, P., Fras, A. et Villanueva, I.**, 1999. Dam-break flow simulation : some results for one-dimensional models of real cases. *Journal of Hydrology*, **216**: 227-247.
- Garcia-Navarro, P. et Zorraquino, V.**, 1993. Numerical modeling of flood propagation through system of reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, **119** (n°3): 380-389.
- Goubet, A.**, 1997. Les crues historiques de la Seine à Paris, Le risque crue en région parisienne. Colloque d'hydraulique. 155^e session du comité scientifique et technique., (Paris, 17-18 septembre 1997), Société Hydrotechnique de France, pp. 7-15.

- Klemeš, V.**, 1986. Operational testing of hydrologic simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, **31** (1): 13-24.
- Levassor, A., Truchot, C., Lancelot, M., Jacq, M. et Garnier, J.**, 1993. Discussion suite aux présentations sur les barrages réservoirs. In: E. Fustec et G.d. Marsily (Editors), *La Seine et son bassin : de la recherche à la gestion*. Piren-Seine, Paris, pp. 55-56.
- Marti, R. et Lepelletier, T.**, 1994. L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine, XXIII^e Journées de l'Hydraulique, Nîmes, 14-15-16 septembre 1994, Société Hydrotechnique de France, pp. 27-39.
- Méchin, Y., Fleury, J.M. et Darnige, J.**, 1970. Recherche du programme optimum de construction d'un ensemble de barrages pour le soutien des étiages dans un bassin. In: S.H.F. (Editor), XI^{èmes} journées de l'hydraulique, (Paris, 22-24 septembre 1970).
- Meybeck, M., Marsily, G.d. et Fustec, E.**, 1998. La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Programme PIREN-Seine, Université Paris VI, 749 pp.
- Michaud, J. et Sorooshian, S.**, 1994. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. *Water Resources Research*, **30** (3): 593-605.
- Michel, C.**, 1987. Lutte contre les crues par implantation de réservoirs. *Informations techniques du Cemagref*, **68** (1): 1-7.
- Michel, C. et Legras, Y.**, 1986. L'impact des activités humaines sur les eaux continentales, XIX^e Journées de l'Hydraulique, Paris, 9-11 sept.1986, Société Hydrotechnique de France, pp. V.13.1-V.13.5.
- Miquel, J. et Levassor, A.**, 1993. Les barrages-réservoirs dans le contexte du bassin de la Seine. In: E. Fustec et G.d. Marsily (Editors), *La Seine et son bassin : de la recherche à la gestion*. Piren-Seine, (Paris), pp. 23-47.
- Morin, G., Fortin, J.P. et Charbonneau, R.**, 1975. Utilisation d'un modèle hydrophysiographique CEQUEAU pour l'exploitation des réservoirs artificiels. *IAHS Publication*, n°**115**: 176-184.
- Nascimento, N.d.O.**, 1995. Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropique sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, Thèse de doctorat, CERGRENE/ENPC, Paris, 550 pp.
- Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V.**, 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**: 282-290.
- Perrin, C.**, 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, 530 pp.
- Perrin, C.**, 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche* (6/7): 84-91.
- Rizzoli, J.-L.**, 1997. Le risque crue en région parisienne. Démarche et projets de l'institution., Le risque crue en région parisienne. Colloque d'hydrotechnique. 155^e session du comité scientifique et technique., (Paris, 17-18 septembre 1997), Société Hydrotechnique de France, pp. 91-100.
- Schneider, M.**, 1997. Caractérisation météorologique de la crue de 1910., Le risque crue en région parisienne. Colloque d'hydrotechnique. 155^e session du comité scientifique et technique., (Paris, 17-18 septembre 1997), Société Hydrotechnique de France, pp. 17-26.
- Stewart, M.D., Bates, P.D., Anderson, M.G., Price, D.A. et Burt, T.P.**, 1999. Modelling floods in hydrologically complex lowland river reaches. *Journal of Hydrology*, **223** (1-2): 85-106.
- Tajjar, M.H. et Levassor, A.**, 1993. Les lâchures des barrages-réservoirs. In: E. Fustec et G.d. Marsily (Editors), *La Seine et son bassin : de la recherche à la gestion*. Piren-Seine, (Paris), pp. 49-54.
- Villion, G.**, 1997. Rôle des lacs-réservoirs amont : les grands lacs de Seine, Le risque crue en région parisienne. Colloque d'hydrotechnique. 155^e session du comité scientifique et technique., (Paris, 17-18 septembre 1997), Société Hydrotechnique de France, pp. 57-66.
- Yang, X.**, 1993. Mise au point d'une méthode d'utilisation d'un modèle pluie-débit conceptuel pour la prévision des crues en temps réel. Thèse de Doctorat, ENPC, Paris, 350 pp.
- Yang, X.L. et Michel, C.**, 2000. Flood forecasting with a watershed model: a new method of parameter updating. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, **45** (4): 537-546.

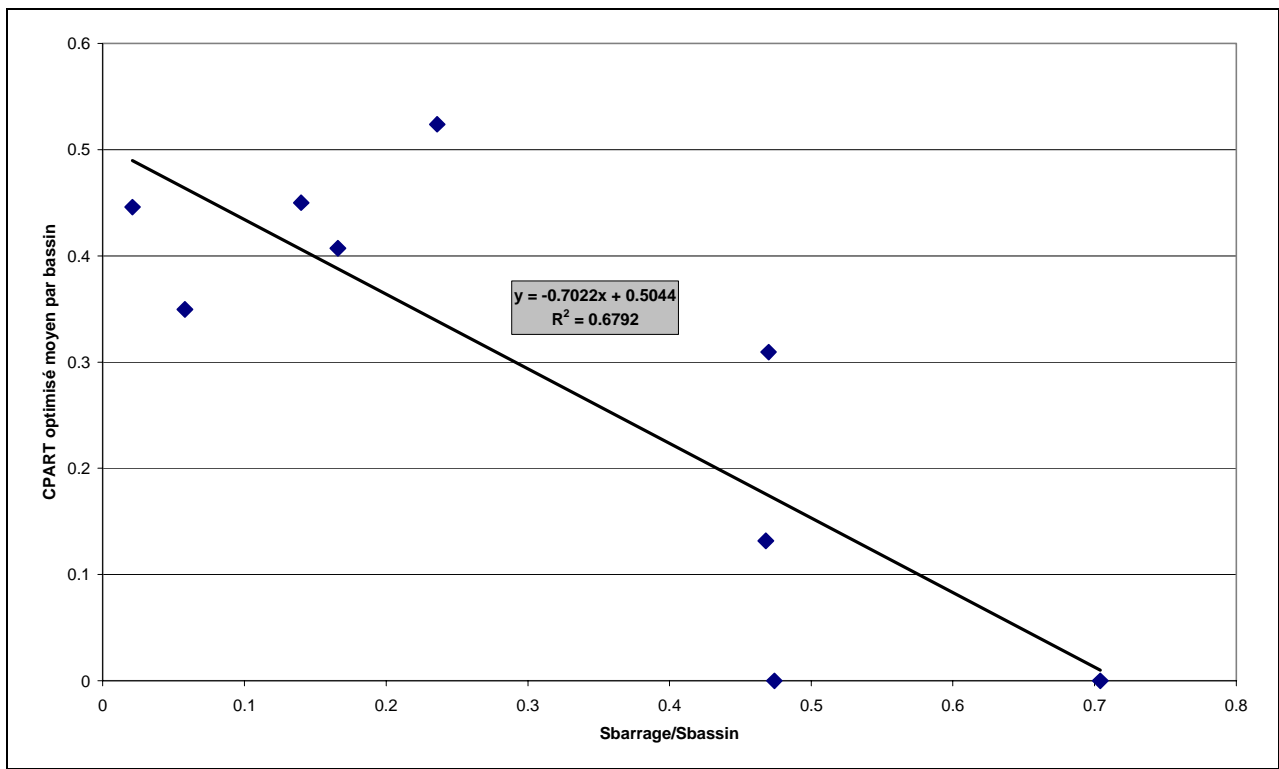
ANNEXES

Solution	Nash(Q)	Solution	Nash(lnQ)	Solution	Bilan	Solution	Vol. crue	Solution	Vol. étiage
3-16-opt	82.85	3-15-opt	82.60	3-16-opt	90.74	3-12-0	70.81	1--12-1	76.86
3-16-0.2	82.85	3-13-0.5-1.1	82.58	3-15-1	90.74	3--13-0	70.81	3--10-1	76.86
3-16-0	82.85	3-15-0.3	82.56	3-16-0.2	90.73	3--9-0	70.76	3--12-1	76.86
3-16-0.3	82.84	3-15-0.4	82.55	3-16-0	90.73	3-13-0.5-1.3	70.57	1--11-1	76.80
3-14-0.5	82.83	3-15-0	82.55	3-16-0.3	90.73	1--13-1	70.54	3--9-1	76.80
3-16-0.5	82.83	3-15-0.5	82.51	3-16-0.5	90.73	3--10-0	70.54	3--8-0	76.75
3-15-1	82.82	3-13-0.3	82.47	1--11-1	90.69	3--11-0	70.54	3--11-1	76.75
3-14-SS	82.79	3-14-1	82.47	3--9-1	90.69	3-13-0.5-1.1	70.52	3--13-1	76.75
3-16-0.7	82.78	3-13-0.5-1.3	82.45	3-14-0.3	90.68	3-13-0.3	70.50	3-14-0.3-1.3	76.73
3-14-0.3	82.77	3-9-0.3	82.45	3-14-SS	90.68	3-14-1	70.50	3-13-0.5-1.3	76.68
3-14-0.7	82.77	3-14-0.3-1.3	82.45	3-14-0.5	90.68	3-15-opt	70.50	3-16-1	76.66
3-14-opt	82.73	3-14-SS	82.41	3-13-0.5	90.67	3-14-0.3-1.3	70.47	3-16-opt	76.63
3-15-0.5	82.71	3-12-0.3	82.39	3-14-0	90.67	3-15-0.3	70.47	3-16-0.7	76.59
3-16-1	82.70	3-15-0.7	82.38	3-14-0.7	90.67	3-15-0.4	70.42	3-15-1	76.56
3-15-0.4	82.67	3-14-opt	82.35	3-14-opt	90.66	3-15-0	70.42	3-16-0.2	76.54
3-15-0	82.67	3-14-0.3	82.34	3-13-0.5-1.1	90.66	3-15-0.5	70.37	3-16-0	76.54
3--8-0	82.66	3-13-0.5	82.33	3-13-0.5-1.3	90.61	3-12-0.3	70.37	3-16-0.5	76.53
3--11-1	82.66	3-14-0	82.33	3-15-0.4	90.61	3-14-SS	70.31	3-16-0.3	76.52
3--13-1	82.66	3-14-0.5	82.27	3-15-0	90.61	3-15-0.7	70.29	3-13-0.5-1.1	76.44
3-15-0.7	82.66	3-14-0.7	82.16	3-12-0.3	90.61	3-13-0.5	70.26	3-14-0.7	76.43
3-15-opt	82.61	3-11-0.3	82.11	3-14-0.3-1.3	90.59	3-14-0	70.26	3-14-opt	76.40
3-15-0.3	82.59	3--13-0	82.10	3-13-0.3	90.59	3-14-0.5	70.26	3-13-0.5	76.35
3-13-0.5	82.58	3--12-0	82.06	3-14-1	90.59	3-14-0.3	70.24	3-14-0	76.35
3-14-0	82.58	3--9-0	82.04	3-11-0.3	90.59	3-14-0.7	70.23	3-14-0.5	76.35
3-13-0.5-1.1	82.45	1--13-1	82.03	3-10-0.3	90.58	3-14-opt	70.22	3-14-0.3	76.34
3-11-0.3	82.44	3--10-0	82.03	3--8-0	90.53	3-16-opt	70.22	3-14-SS	76.33
3-10-0.3	82.23	3--11-0	82.03	3--11-1	90.53	3-9-0.3	70.22	3-15-opt	75.96
3-13-0.3	82.14	3-10-0.3	81.98	3--13-1	90.53	3-16-0.3	70.20	3-10-0.3	75.96
3-14-1	82.14	3-15-1	81.95	1--12-1	90.53	3-11-0.3	70.19	3-11-0.3	75.96
3-14-0.3-1.3	82.12	3-16-opt	81.94	3--10-1	90.53	3-15-1	70.19	3-12-0.3	75.93
3-12-0.3	82.10	3-16-0.2	81.93	3--13-0	90.50	3-16-0.2	70.18	3-15-0.5	75.90
3-8-0.3	82.10	3-16-0	81.93	3-8-0.3	90.50	3-16-0	70.18	3-15-0.4	75.88
1--11-1	82.035	3-16-0.3	81.90	1--13-1	90.48	3-16-0.5	70.15	3-15-0	75.88
3--9-1	82.03	3-16-0.5	81.84	3--10-0	90.48	3-16-0.7	70.13	3-15-0.7	75.88
1--13-1	82.03	1--9-1	81.79	3--11-0	90.48	3-10-0.3	70.06	3-15-0.3	75.87
3--10-0	82.03	3-16-0.7	81.76	3-9-0.3	90.46	3-16-1	70.05	3-13-0.3	75.85
3--11-0	82.03	3-16-1	81.63	3--9-0	90.42	3-14-0.3-inter	69.85	3-14-1	75.85
3-9-0.3	82.02	3--8-0	81.31	3-16-0.7	90.35	1--9-1	69.81	3-8-0.3	75.68
1--12-1	81.97	3--11-1	81.31	3-16-1	90.34	3--8-0	69.69	3-9-0.3	75.59
3--10-1	81.97	3--13-1	81.31	1--10-1	90.34	3--11-1	69.69	2--10-1	75.46
3--12-1	81.97	2-9-0.3	81.29	3--8-1	90.34	3--13-1	69.69	2--12-1	75.456
3-14-0.3-inter	81.88	2-13-0.3	81.29	3-15-0.3	90.24	1--11-1	69.54	2--8-0	75.22
3-13-0.5-1.3	81.81	1-13-0.3	81.28	3-15-opt	90.24	3--9-1	69.54	2--11-1	75.22
1--8-0	81.47	1-9-0.3	81.27	3-15-0.5	90.24	1--12-0	69.24	2--13-1	75.22
2--8-0	81.47	2-12-0.3	81.23	3-15-0.7	90.22	1--13-0	69.24	1--13-1	75.11
2--11-1	81.47	1-12-0.3	81.21	1-13-0.3	90.21	1--12-1	69.14	3--10-0	75.11
2--13-1	81.47	2--12-0	81.00	1-12-0.3	90.21	3--10-1	69.14	3--11-0	75.11
1-11-0.3	81.46	2--13-0	81.00	2-12-0.3	90.20	3--12-1	69.14	1--8-0	75.08
2-11-0.3	81.44	1--12-0	80.99	2-13-0.3	90.19	1--9-0	69.00	3--12-0	75.04
1-10-0.3	81.37	1--13-0	80.99	1-10-0.3	90.18	2--12-0	68.97	3--13-0	75.04
2-10-0.3	81.36	2--10-0	80.94	2--9-1	90.17	2--13-0	68.97	2--9-1	75.04
2--10-0	81.06	2--11-0	80.94	1-11-0.3	90.17	1-13-0.3	68.81	2-8-0.3	74.94
2--11-0	81.06	2-11-0.3	80.93	3-14-0.3-inter	90.17	1--10-0	68.80	1-8-0.3	74.89
1--10-0	81.06	2--9-0	80.91	1-8-0.3	90.14	1--11-0	68.80	3--9-0	74.69
1--11-0	81.06	1-11-0.3	80.90	2-10-0.3	90.14	2--9-0	68.70	3-14-0.3-inter	74.08
2--9-1	81.04	1--10-0	80.89	1--9-1	90.13	2--10-0	68.65	1-11-0.3	73.68
1-13-0.3	81.02	1--11-0	80.89	2-11-0.3	90.13	2--11-0	68.65	1-10-0.3	73.66
1-12-0.3	81.00	1--9-0	80.89	2-8-0.3	90.10	1-12-0.3	68.63	2-10-0.3	73.63
2-13-0.3	80.98	2-10-0.3	80.82	1--8-1	90.09	3-8-0.3	68.55	1-13-0.3	73.63
2-12-0.3	80.96	1-10-0.3	80.78	initial	90.09	2-13-0.3	68.54	2-12-0.3	73.59
2--10-1	80.91	3-14-0.3-inter	80.61	1--8-0	90.08	2-12-0.3	68.42	2-11-0.3	73.59
2--12-1	80.91	1--11-1	80.46	1--12-0	90.06	1-11-0.3	68.42	1-12-0.3	73.59
1-8-0.3	80.88	3--9-1	80.46	1--13-0	90.06	1-10-0.3	68.30	1--9-1	73.48
1-9-0.3	80.86	3--12-1	80.32	2--8-1	90.06	1-9-0.3	68.26	2-13-0.3	73.46
2-8-0.3	80.85	1--12-1	80.32	2--12-0	90.05	2-11-0.3	68.17	2-9-0.3	73.46
3--12-0	80.83	3--10-1	80.32	2--13-0	90.05	2-10-0.3	68.08	1-9-0.3	73.40
3--13-0	80.83	2--8-0	79.95	2--8-0	90.04	2-9-0.3	68.07	1--12-0	72.85
2-9-0.3	80.80	2--11-1	79.95	2--11-1	90.04	1--8-0	67.47	1--13-0	72.85
3--9-0	80.75	2--13-1	79.95	2--13-1	90.04	2--8-0	67.21	2--12-0	72.85
1--9-1	80.49	1--8-0	79.88	2--10-0	89.98	2--11-1	67.21	2--13-0	72.85
1--12-0	79.73	3-8-0.3	79.09	2--11-0	89.98	2--13-1	67.21	1--10-0	72.84
1--13-0	79.73	2--9-1	79.01	1--10-0	89.98	2--9-1	66.83	1--11-0	72.84
2--12-0	79.66	2--10-1	78.97	1--11-0	89.98	2--10-1	66.48	2--10-0	72.83
2--13-0	79.66	2--12-1	78.97	2-9-0.3	89.89	2--12-1	66.48	2--11-0	72.83
1--9-0	79.58	2-8-0.3	77.65	1-9-0.3	89.88	1-8-0.3	65.95	2--9-0	72.44
2--9-0	79.48	1-8-0.3	77.55	1--9-0	89.81	2-8-0.3	65.60	1--9-0	72.37
1--10-1	78.91	1--10-1	67.28	2--9-0	89.78	1--10-1	63.715	2--8-1	69.99
3--8-1	78.91	3--8-1	67.28	3--12-0	89.76	3--8-1	63.72	1--8-1	69.79
2--8-1	77.36	2--8-1	66.65	2--10-1	89.67	initial	59.80	initial	69.61
1--8-1	77.34	1--8-1	66.42	2--12-1	89.67	1--8-1	59.78	1--10-1	69.28
initial	76.90	initial	65.79	3--12-1	89.60	2--8-1	59.58	3--8-1	69.28

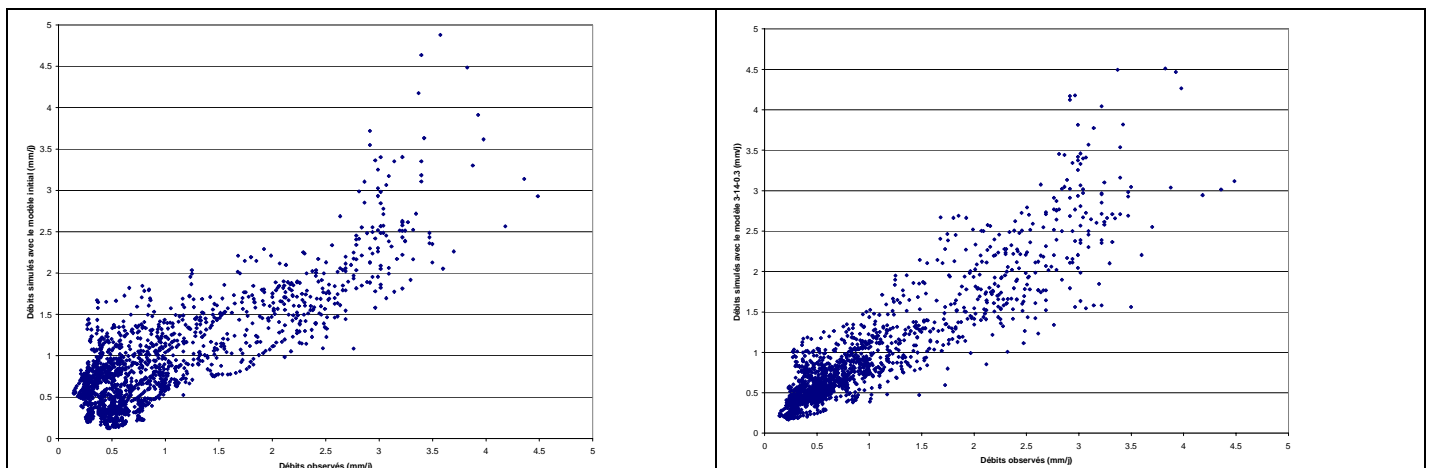
Annexe 1 : Résultats moyens obtenus en contrôle pour chacune des solutions testées

TROYES				PONT SUR SEINE				ARCIS SUR AUBE				GURGY				COURLON			
Nash (Q)		Nash (lnQ)		Nash (Q)		Nash (lnQ)		Nash (Q)		Nash (lnQ)		Nash (Q)		Nash (lnQ)		Nash (Q)		Nash (lnQ)	
3--13-0	77.4	3--13-0	75.0	3-13-0.5-1.1	84.0	3-13-0.5-1.1	87.2	3-13-0.5-1.3	86.5	3--9-0	89.2	Interannuel	85.3	3-13-0.5-1.3	79.6	2--13-0	82.8	3-13-0.5-1.3	76.1
3--12-0	77.4	3--12-0	75.0	3-14-0	83.9	3-15-0	87.1	3--13-0	86.4	3--13-0	89.1	2--13-0	84.9	2--11-0	79.3	2--12-0	82.8	2--11-0	75.6
3--9-0	77.3	3--9-0	74.9	3-13-0.5	83.9	3-13-0.5-1.3	87.1	3--12-0	86.4	3--12-0	89.1	2--12-0	84.9	2--10-0	79.3	2--11-0	82.8	2--10-0	75.6
3-14-1	77.2	3-14-1	74.5	3-15-1	83.9	3-15-0.5	87.1	3--9-0	86.4	3-13-0.5-1.3	88.9	2-13-0.3	84.9	1--11-0	79.1	2--10-0	82.8	1--11-0	75.5
3-13-0.3	77.2	3-13-0.3	74.5	3-16-0	83.9	3-15-0.3	87.1	3-13-0.5-1.1	86.3	3--9-0.3	88.9	2-11-0.3	84.9	1--10-0	79.1	2-13-0.3	82.8	1--10-0	75.5
3-12-0.3	76.8	3-9-0.3	74.3	3-16-0.3	83.8	3-15-0.7	87.0	3-14-1	86.2	3-14-1	88.9	2-12-0.3	84.9	2-11-0.3	79.1	2-12-0.3	82.8	3--11-0	75.4
3-9-0.3	76.6	3-12-0.3	74.1	3-14-0.3	83.8	3--9-0.3	86.9	3-13-0.3	86.2	3-13-0.3	88.9	2--9-0	84.9	3--11-0	79.1	2-9-0.3	82.8	3--10-0	75.4
3-15-0.3	76.5	3-15-0.3	74.1	3-14-SS	83.8	3-14-1	86.9	3--9-0.3	86.1	3-13-0.5-1.1	88.9	2--11-0	84.9	3--10-0	79.1	2--9-0	82.8	1--13-1	75.4
3-14-0	76.5	3-15-0	73.8	3-14-0.5	83.8	3-13-0.3	86.9	3-12-0.3	86.1	3-15-0.3	88.9	2-10-0.3	84.9	1--13-1	79.1	2-10-0.3	82.8	2--9-0	75.4
3-13-0.5	76.5	3-13-0.5-1.1	73.7	3-16-0.5	83.8	3-12-0.3	86.9	3-15-0.3	86.1	3-15-0	88.9	2--10-0	84.9	2-10-0.3	79.0	2-11-0.3	82.8	2-10-0.3	75.3
3-14-SS	76.5	3-15-0.5	73.6	3-13-0.5-1.3	83.8	3-14-0	86.8	3-15-0	86.0	3-12-0.3	88.8	2-9-0.3	84.9	3-13-0.5-1.1	79.0	1--13-0	82.7	2--13-0	75.3
3-15-0	76.2	3-14-0	73.3	3-15-0.3	83.8	3-13-0.5	86.8	3-15-0.5	85.9	3-15-0.5	88.8	1--13-0	84.7	2-13-0.3	78.9	1--12-0	82.7	2--12-0	75.3
3-13-0.5-1.1	76.2	3-13-0.5	73.3	3-15-0	83.7	3-14-SS	86.8	3-14-0	85.9	3--11-0	88.8	1--12-0	84.7	2-9-0.3	78.9	1-12-0.3	82.7	2-11-0.3	75.3
3-15-1	76.0	3-14-SS	73.3	3-14-1	83.7	3-14-0.3	86.8	3-13-0.5	85.9	3--10-0	88.8	1--11-0	84.7	1-11-0.3	78.9	1-13-0.3	82.7	2-9-0.3	75.3
3-14-0.3	76.0	3-14-0.3	72.9	3-14-0.7	83.7	3-14-0.5	86.7	3-14-SS	85.8	1--13-1	88.8	1--10-0	84.7	2--13-0	78.9	1--9-0	82.7	1--9-0	75.3
3-15-0.5	75.9	3-15-0.7	72.8	3-13-0.3	83.7	3-11-0.3	86.7	3-14-0.3	85.8	3-15-0.7	88.7	1--9-1	84.7	2--12-0	78.9	1-10-0.3	82.7	1--13-0	75.3
3-16-0	75.7	1--9-1	72.6	3-12-0.3	83.7	3-14-0.7	86.6	3--11-0	85.8	3-14-0	88.5	1--9-0	84.7	2--9-0	78.9	1-11-0.3	82.7	1--12-0	75.3
3-14-0.5	75.6	3-14-0.5	72.4	3-15-0.5	83.7	3-10-0.3	86.5	3--10-0	85.8	3-13-0.5	88.5	1-13-0.3	84.7	3-15-0.7	78.9	1--11-0	82.7	1--9-1	75.3
3-16-0.3	75.4	3--11-0	72.2	3-16-0.7	83.7	3--11-0	86.4	1--13-1	85.8	3-14-SS	88.4	1-12-0.3	84.7	2-12-0.3	78.9	1--10-0	82.7	2-12-0.3	75.2
1--9-1	75.1	3--10-0	72.2	3--8-0	83.6	3--10-0	86.4	3-15-0.7	85.8	3-14-0.3	88.4	1-11-0.3	84.7	3-15-0.5	78.9	1-9-0.3	82.7	3-13-0.5-1.1	75.2
3-16-0.5	75.1	1--13-1	72.2	3-13-1	83.6	1--13-1	86.4	3-14-0.5	85.7	3-11-0.3	88.3	1-9-0.3	84.7	3-15-0	78.9	1--9-1	82.7	2-13-0.3	75.2
3-14-0.7	74.9	3-13-0.5-1.3	72.2	3--11-1	83.6	3-15-1	86.2	3-14-0.7	85.6	3-14-0.5	88.3	1-10-0.3	84.7	1-10-0.3	78.9	2--8-0	82.7	1-10-0.3	75.2
3-15-0.7	74.8	3-15-1	72.0	3-16-1	83.6	3-16-0	86.1	3-15-1	85.5	3-10-0.3	88.2	2--9-1	84.7	3-15-0.3	78.9	2--13-1	82.7	3--9-0	75.2
3-13-0.5-1.3	74.7	3-14-0.7	71.8	3-9-0.3	83.5	3-16-0.3	86.1	3-11-0.3	85.5	3-14-0.7	88.2	2--8-0	84.6	3-11-0.3	78.8	2--11-1	82.7	1-11-0.3	75.2
3-16-0.7	74.6	3-16-0	71.6	3-15-0.7	83.5	3--13-0	86.1	3-16-0	85.4	1--9-1	88.2	2--13-1	84.6	Interannuel	78.8	2--12-1	82.7	1-9-0.3	75.2
3--8-0	74.5	3-11-0.3	71.6	3-11-0.3	83.2	3--12-0	86.1	3-16-0.3	85.4	3-15-1	87.8	2--11-1	84.6	3-10-0.3	78.8	2--10-1	82.7	3--13-0	75.2
3--13-1	74.5	3-16-0.3	71.5	3-10-0.3	83.1	3-16-0.5	86.0	3-16-0.5	85.3	3-16-0	87.7	2--12-1	84.6	1--9-1	78.8	2--9-1	82.7	3--12-0	75.2
3--11-1	74.5	3-16-0.5	71.1	3-8-0.3	83.0	3-16-0.7	85.9	3-10-0.3	85.3	3-16-0.3	87.7	2--10-1	84.6	1-9-0.3	78.8	Interannuel	82.6	1-13-0.3	75.1
3-16-1	74.1	3-10-0.3	71.0	3--13-0	82.9	3--9-0	85.8	3-16-0.7	85.3	3-16-0.5	87.6	1--8-0	84.4	1--13-0	78.8	1--8-0	82.6	1-12-0.3	75.1
3-11-0.3	73.7	3-16-0.7	70.7	3--12-0	82.9	3-16-1	85.8	3-16-1	85.1	3-16-0.7	87.5	3-15-0.5	84.4	1--12-0	78.8	2-8-0.3	82.5	3-11-0.3	75.1
3--11-0	73.2	3-16-1	70.1	3--9-0	82.8	3--8-0	85.7	1--9-1	85.0	3-16-1	87.3	3-15-0	84.4	1-13-0.3	78.7	3--11-0	82.5	3--9-0.3	75.1
3--10-0	73.2	3--8-0	69.8	3--11-0	82.7	3--13-1	85.7	3--8-0	84.9	1--9-0	86.9	3-15-0.3	84.4	3-14-1	78.7	3--10-0	82.5	3-10-0.3	75.1
1--13-1	73.2	3--13-1	69.8	3--10-0	82.7	3--11-1	85.7	3--13-1	84.9	1--13-0	86.8	3-14-1	84.4	3-13-0.3	78.7	1--13-1	82.5	3-15-0.7	75.1
3-8-0.3	72.7	3--11-1	69.8	1--13-1	82.7	1--9-1	84.8	3--11-1	84.9	1--12-0	86.8	3-13-0.3	84.4	3-12-0.3	78.7	3-13-0.5-1.3	82.5	3-15-0.5	75.1
3-10-0.3	72.5	1--13-0	68.6	3--9-1	82.7	3--12-1	84.4	3--9-1	84.2	3--8-0	86.7	3-13-0.5-1.1	84.4	1-12-0.3	78.7	3--9-0	82.5	3-15-0	75.0
2-13-0.3	72.3	1--12-0	68.6	1--11-1	82.7	1-9-0.3	84.3	1--11-1	84.2	3--13-1	86.7	3-15-0.7	84.4	1--9-0	78.7	3-13-0.5-1.1	82.5	3-15-0.3	75.0
2--13-0	72.1	2--13-0	68.6	3--12-1	82.7	3--10-1	84.3	3--12-1	84.0	3--11-1	86.7	3-9-0.3	84.4	3-9-0.3	78.7	3--13-0	82.5	3-14-1	75.0
2--12-0	72.1	2--12-0	68.6	3--10-1	82.7	1--12-1	84.3	3--10-1	84.0	2--9-0	86.7	3-12-0.3	84.4	3--13-0	78.7	3--12-0	82.5	3-13-0.3	75.0
2-12-0.3	72.0	1--9-0	68.3	1--12-1	82.7	1-13-0.3	84.2	1--12-1	84.0	1-9-0.3	86.6	3--13-0	84.4	3--12-0	78.7	3-14-0.3	82.5	3-12-0.3	74.9
1-13-0.3	72.0	1-13-0.3	68.2	1--9-1	81.8	2-9-0.3	84.1	1--13-0	83.6	1-13-0.3	86.6	3--12-0	84.4	3-14-0.5	78.6	3-15-0.3	82.5	3-14-0.7	74.9
Interannuel	71.9	2--9-0	68.2	1-13-0.3	81.7	3--9-1	84.1	1--12-0	83.6	2--13-0	86.5	3--11-0	84.3	3-14-0.7	78.6	3-14-SS	82.5	3-14-0.5	74.9
1--13-0	71.9	2-13-0.3	68.2	1-12-0.3	81.6	1-12-0.3	84.1	1--9-0	83.5	2--12-0	86.5	3--10-0	84.3	3--9-0	78.6	3-14-0.5	82.5	3-14-SS	74.9
1--12-0	71.9	2-9-0.3	68.2	1--8-0	81.6	1--11-1	84.1	1-13-0.3	83.3	1--11-0	86.5	1--13-1	84.3	3-14-SS	78.6	3-14-0.7	82.5	3-14-0.3	74.8
1-12-0.3	71.7	1-9-0.3	68.1	1-9-0.3	81.5	2-13-0.3	84.0	1-12-0.3	83.2	1--10-0	86.5	3--9-0	84.3	3-14-0.3	78.6	3-11-0.3	82.5	3-14-0	74.8
2-9-0.3	71.5	1-12-0.3	67.9	2--8-0	81.4	1-11-0.3	84.0	3-8-0.3	83.2	1-12-0.3	86.4	3-14-0.3	84.3	3-14-0	78.5	3-15-0.5	82.4	3-13-0.5	74.8
2--9-0	71.4	2-12-0.3	67.9	2--13-1	81.4	2-12-0.3	84.0	1-9-0.3	83.2	2-9-0.3	86.4	3-15-1	84.3	3-13-0.5	78.5	3-15-0	82.4	3-16-1	74.6
1--9-0	71.3	Interannuel	67.7	2--11-1	81.4	2-11-0.3	83.8	1--11-0	83.0	2-13-0.3	86.3	3-14-SS	84.3	3-16-1	78.3	3-15-0.7	82.4	2--8-0	74.6
3--12-1	71.1	2--11-0	66.4	2-13-0.3	81.3	1--11-0	83.8	1--10-0	83.0	2--11-0	86.2	3-14-0	84.3	3-16-0.5	78.3	3-10-0.3	82.4	2--13-1	74.6
3--10-1	71.1	2--10-0	66.4	2-12-0.3	81.3	1--10-0	83.8	1-11-0.3	82.7	2--10-0	86.2	3-13-0.5	84.3	3-16-0.3	78.3	3-14-0	82.4	2--11-1	74.6
1--12-1	71.1	1--11-0	66.3	1-11-0.3	81.3	1-10-0.3	83.8	2--13-0	82.5	2-12-0.3	86.2	3-16-0	84.3	3-16-0	78.2	3-13-0.5	82.4	3-16-0.7	74.6
3--9-1	71.1	1--10-0	66.3	1-10-0.3	81.1	2--11-0	83.6	2--12-0	82.5	1-11-0.3	86.0	3-16-0.3	84.3	3-16-0.7	78.2	3-14-1	82.4	3-16-0.5	74.6
1--11-1	71.1	3--9-1	66.1	Interannuel	81.0	2-10-0.3	83.6	1-10-0.3	82.5	3--9-1	85.9	3-14-0.5	84.3	3-15-1	78.2	3-13-0.3	82.4	3-16-0.3	74.5
1-9-0.3	71.1	1--11-1	66.1	2-11-0.3	81.0	2--10-0	83.6	2--9-0	82.5	1--11-1	85.9	3-10-0.3	84.3	2--9-1	77.8	3-12-0.3	82.4	3-15-1	74.5
2-11-0.3	70.0	3--12-1	65.9	2-10-0.3	80.9	3-8-0.3	83.4	2-13-0.3	82.3	1-10-0.3	85.8	3-16-0.5	84.3	2--8-0	77.7	3-9-0.3	82.4	3-16-0	74.5
2-10-0.3	69.7	3--10-1	65.9	2-9-0.3	80.9	Interannuel	83.4	2-12-0.3	82.1	2-11-0.3	85.7	3-11-0.3	84.3	2--13-1	77.7	1-8-0.3	82.4	Interannuel	74.5
1-11-0.3	69.6	1--12-1	65.9	2--9-1	80.8	1--13-0	83.4	2-9-0.3	82.1	3--12-1	85.6	3-14-0.7	84.3	2--11-1	77.7	3-16-0.3	82.4	2--12-1	74.5
2--8-0	69.6	1-11-0.3	65.8	1-8-0.3	80.8	1--12-0	83.4	2--11-0	81.9	3--10-1	85.6	3-16-0.7	84.3	3--9-1	77.				

V.-ST-GEORGES			CHALONS SUR MARNE			NOISIEL			PARIS						
Nash (Q)		Nash (lnQ)	Nash (Q)		Nash (lnQ)	Nash (Q)		Nash (lnQ)	Nash (Q)		Nash (lnQ)				
3-14-0.3-inter	84.8	3-13-0.5-1.3	84.4	3-16-1	84.4	3-15-0.3	84.1	2-8-0	80.7	2-11-0.3	83.3	3-14-0.3-inter	86.0	3-13-0.5-1.3	88.9
2-11-0.3	84.6	3-10-0.3	84.0	3-16-0.7	84.3	3-14-SS	84.0	2-13-1	80.7	2-10-0.3	83.3	2-8-0	85.9	3-14-0.3-inter	88.9
2-8-0	84.6	3-13-0.5-1.1	84.0	3-14-0.3-inter	84.3	3-15-0	84.0	2-11-1	80.7	3-16-1	83.2	2-13-1	85.9	3-13-0.5-1.1	88.6
2-13-1	84.6	3-14-0.7	84.0	3-14-0.7	84.1	3-14-0.3	84.0	2-8-0.3	80.6	3-16-0.5	83.2	2-11-1	85.9	3-11-0.3	88.6
2-11-1	84.6	3-11-0.3	84.0	3-16-0.5	84.1	3-14-1	84.0	1-8-0	80.5	3-16-0.7	83.2	3-8-0	85.9	3-15-0	88.6
2-12-0.3	84.6	3-16-0.7	84.0	3-8-0.3	84.0	3-13-0.3	84.0	2-12-1	80.4	3-14-0.5	83.2	3-13-1	85.9	3-10-0.3	88.6
3-13-0.5-1.1	84.6	3-16-1	84.0	3-8-0	84.0	3-8-0	83.9	2-10-1	80.4	3-16-0.3	83.2	3-11-0	85.9	3-14-0.7	88.6
2-13-0.3	84.6	3-16-0.5	84.0	3-13-1	84.0	3-13-0.5	83.9	1-8-0.3	80.3	3-14-SS	83.2	3-16-0.5	85.8	3-15-0.7	88.5
2-9-1	84.6	3-16-0.3	84.0	3-11-1	84.0	3-15-0.5	83.9	2-9-1	80.3	3-14-0.3	83.2	3-12-1	85.8	3-14-0.5	88.5
2-10-0.3	84.6	3-16-0	84.0	3-16-0.3	83.9	3-12-0.3	83.9	3-16-1	80.2	3-16-0	83.2	3-10-1	85.8	3-15-0.5	88.5
2-9-0.3	84.6	3-14-SS	84.0	3-9-1	83.9	2-13-0.3	83.9	3-16-0.7	80.2	2-12-0.3	83.2	1-12-1	85.8	3-14-SS	88.5
2-12-1	84.6	3-14-0.3	84.0	1-11-1	83.9	3-9-0.3	83.9	3-16-0.5	80.1	2-13-0.3	83.1	2-12-1	85.8	3-14-0.3	88.5
2-10-1	84.6	3-14-0.5	83.9	3-14-0.5	83.8	3-14-0.5	83.8	3-8-0	80.1	3-14-0.7	83.1	2-10-1	85.8	2-10-0.3	88.5
3-15-0.3	84.6	3-15-1	83.9	3-16-0	83.7	2-12-0.3	83.8	3-13-1	80.1	1-11-0.3	83.1	3-16-0.7	85.8	3-15-0.3	88.5
1-8-0	84.6	3-15-0.7	83.9	3-12-1	83.7	1-13-0.3	83.8	3-11-1	80.1	3-13-0.5-1.3	83.1	3-16-0.3	85.8	2-11-0.3	88.5
3-16-0.5	84.6	2-10-0.3	83.9	3-10-1	83.7	1-12-0.3	83.7	2-11-0.3	80.1	2-9-0.3	83.1	1-8-0	85.8	1-11-0.3	88.4
3-16-0.3	84.6	2-11-0.3	83.9	1-12-1	83.7	2-9-0.3	83.7	2-10-0.3	80.0	1-12-0.3	83.0	3-16-0	85.8	1-10-0.3	88.4
3-16-0	84.6	3-14-0	83.9	3-15-0.7	83.7	3-16-0	83.7	3-8-0.3	80.0	1-10-0.3	83.0	3-16-1	85.8	3-14-0	88.4
3-15-1	84.6	3-13-0.5	83.9	3-11-0.3	83.6	3-15-0.7	83.7	3-16-0.3	80.0	3-15-1	83.0	3-15-1	85.8	3-13-0.5	88.4
3-15-0.5	84.6	3-15-0.3	83.9	3-10-0.3	83.5	3-16-0.3	83.6	3-16-0	79.9	1-13-0.3	83.0	3-9-1	85.8	3-11-0	88.4
3-15-0	84.6	3-15-0.5	83.9	3-15-1	83.4	3-15-1	83.6	3-9-1	79.7	3-13-0.5-1.1	83.0	1-11-1	85.8	3-10-0	88.4
3-14-1	84.5	1-10-0.3	83.9	2-8-0.3	83.3	3-13-0.5-1.1	83.6	1-11-1	79.7	2-11-0	83.0	2-9-1	85.7	1-13-1	88.4
3-14-0.3	84.5	3-15-0	83.8	1-8-0.3	83.3	3-14-0.7	83.6	1-10-0.3	79.7	2-10-0	83.0	3-14-0.7	85.7	3-14-1	88.3
3-13-0.3	84.5	1-11-0.3	83.8	3-14-0.3	83.2	3-16-0.5	83.6	1-11-0.3	79.6	1-9-0.3	83.0	3-14-0.5	85.7	3-13-0.3	88.3
3-16-0.7	84.5	3-9-1	83.8	3-15-0.5	83.0	1-9-0.3	83.5	3-15-1	79.6	3-8-0	82.9	3-14-SS	85.7	3-9-0.3	88.3
3-15-0.7	84.5	1-11-1	83.8	1-8-0	82.9	3-16-0.7	83.4	3-14-0.7	79.6	3-13-1	82.9	3-14-0.3	85.6	3-12-0.3	88.3
3-9-0.3	84.5	3-11-0	83.8	2-8-0	82.8	1-9-1	83.3	3-14-0.5	79.6	3-11-1	82.9	3-13-0.5-1.1	85.6	3-16-0.5	88.3
3-14-SS	84.5	3-10-0	83.8	2-13-1	82.8	3-16-1	83.2	3-12-1	79.6	3-12-1	82.9	3-8-0.3	85.6	2-12-0.3	88.3
3-14-0.7	84.5	1-13-1	83.8	2-11-1	82.8	2-13-0	83.2	3-10-1	79.6	3-15-0.7	82.8	3-13-0.5-1.3	85.6	3-8-0	88.3
3-12-0.3	84.5	3-9-0.3	83.8	2-9-1	82.8	2-12-0	83.2	1-12-1	79.6	3-15-0.5	82.8	3-14-0	85.6	3-16-0.3	88.3
1-11-0.3	84.5	3-8-0	83.8	3-14-SS	82.7	3-11-0.3	83.2	3-14-0.3-inter	79.5	3-14-0	82.8	3-13-0.5	85.6	3-13-1	88.3
3-14-0.5	84.5	3-13-1	83.8	1-11-0.3	82.6	1-13-0	83.1	3-15-0.7	79.3	3-13-0.5	82.8	3-15-0.7	85.5	3-11-1	88.3
1-12-0.3	84.5	3-11-1	83.8	2-11-0.3	82.6	1-12-0	83.1	3-14-SS	79.3	3-15-0	82.8	3-15-0.5	85.5	2-13-0.3	88.3
1-10-0.3	84.5	2-9-1	83.7	3-15-0	82.5	3-10-0.3	83.0	3-11-0.3	79.2	3-11-0.3	82.8	2-8-0.3	85.5	2-9-0.3	88.3
3-16-1	84.5	3-12-1	83.7	1-10-0.3	82.4	2-11-0.3	82.9	3-14-0.3	79.2	2-8-0	82.7	3-15-0	85.5	1-9-0.3	88.3
3-14-0	84.5	3-10-1	83.7	2-10-0.3	82.4	3-13-0	82.9	2-11-0	79.2	2-13-1	82.7	1-8-0.3	85.5	3-16-0	88.3
3-13-0.5	84.5	2-9-0.3	83.7	2-12-1	82.4	2-9-0	82.9	2-10-0	79.2	2-11-1	82.7	3-11-0.3	85.5	2-11-0	88.3
1-13-0.3	84.5	1-12-1	83.7	2-10-1	82.4	1-11-0.3	82.8	3-10-0.3	79.1	3-15-0.3	82.7	2-11-0.3	85.5	2-10-0	88.3
3-9-1	84.5	2-8-0	83.7	3-11-0	82.0	1-9-0	82.8	3-15-0.5	78.9	1-11-0	82.7	3-15-0.3	85.5	1-13-0.3	88.2
3-8-0	84.5	2-13-1	83.7	3-10-0	82.0	3-8-0	82.7	1-11-0	78.8	1-10-0	82.7	2-10-0.3	85.5	1-12-0.3	88.2
3-13-1	84.5	2-11-1	83.7	1-13-1	82.0	3-13-1	82.7	1-10-0	78.8	3-10-0.3	82.7	3-10-0.3	85.4	3-16-1	88.2
3-11-1	84.5	2-11-0	83.7	3-15-0.3	81.9	3-11-1	82.7	3-15-0	78.6	1-8-0	82.5	1-11-0.3	85.4	3-16-0.7	88.2
1-11-1	84.5	2-10-0	83.7	3-14-0	81.8	3-9-0	82.7	2-8-1	78.4	3-9-1	82.4	1-10-0.3	85.4	1-11-0	88.2
3-13-0.5-1.3	84.5	3-14-1	83.7	3-13-0.5	81.8	2-10-0.3	82.7	3-14-0	78.3	1-11-1	82.4	3-14-1	85.3	1-10-0	88.2
1-9-1	84.5	3-13-0.3	83.7	1-11-0	81.4	3-12-0	82.6	3-13-0.5	78.3	3-9-0.3	82.2	3-13-0.3	85.3	3-15-1	88.2
2-8-0.3	84.5	3-12-0.3	83.7	1-10-0	81.4	1-10-0.3	82.6	3-11-0	78.2	2-9-1	82.2	3-12-0.3	85.3	2-8-0	88.2
2-9-0	84.5	2-12-1	83.7	2-11-0	81.3	2-11-0	82.4	3-10-0	78.2	3-12-0.3	82.1	2-12-0.3	85.3	2-13-1	88.2
2-11-0	84.5	2-10-1	83.7	2-10-0	81.3	2-10-0	82.4	1-13-1	78.2	2-12-1	82.1	2-13-0.3	85.2	2-11-1	88.2
2-10-0	84.5	2-12-0.3	83.7	3-8-1	80.9	1-11-0	82.3	3-15-0.3	78.2	2-10-1	82.1	1-12-0.3	85.2	1-8-0	88.1
3-9-0	84.5	3-14-0.3-inter	83.7	1-10-1	80.9	1-10-0	82.3	3-8-1	77.9	3-14-1	82.1	3-9-0.3	85.2	3-12-1	88.1
3-11-0.3	84.5	1-11-0	83.7	3-13-0.5-1.1	80.8	3-11-0	82.3	1-10-1	77.9	3-13-0.3	82.1	1-13-0.3	85.2	3-10-1	88.1
2-13-0	84.5	1-10-0	83.7	2-8-1	80.7	3-10-0	82.3	1-8-1	77.9	2-9-0	82.1	2-9-0.3	85.1	1-12-1	88.1
2-12-0	84.5	1-9-0.3	83.7	1-8-1	80.4	1-13-1	82.3	initial	77.6	3-12-1	82.1	3-11-0	85.1	2-12-1	87.9
1-9-0.3	84.5	2-13-0.3	83.6	initial	79.6	3-14-0.3-inter	82.3	3-13-0.5-1.1	77.6	3-10-1	82.1	3-10-0	85.1	2-10-1	87.9
1-8-0.3	84.5	1-8-0	83.6	3-12-0.3	79.3	2-8-0	82.0	2-9-0.3	77.1	1-12-1	82.1	1-13-1	85.1	3-9-1	87.9
3-13-0	84.5	1-12-0.3	83.6	3-9-0.3	79.2	2-13-1	82.0	2-12-0.3	77.1	2-13-0	82.1	2-11-0	85.0	1-11-1	87.9
3-12-0	84.5	1-13-0.3	83.6	3-14-1	79.2	2-11-1	82.0	2-13-0.3	77.1	2-12-0	82.1	2-10-0	85.0	3-13-0	87.9
3-8-0.3	84.5	1-9-1	83.5	3-13-0.3	79.2	3-9-1	81.9	1-9-0.3	76.9	1-9-1	82.0	1-9-0.3	85.0	3-12-0	87.8
3-12-1	84.5	3-9-0	83.5	1-12-0.3	78.5	1-11-1	81.9	1-12-0.3	76.8	3-11-0	82.0	1-11-0	85.0	2-9-1	87.8
3-10-1	84.5	2-9-0	83.4	2-12-0.3	78.5	3-13-0.5-1.3	81.8	1-13-0.3	76.8	3-10-0	82.0	1-10-0	85.0	1-13-0	87.8
1-12-1	84.5	3-13-0	83.4	1-13-0.3	78.3	1-8-0	81.8	3-13-0.5-1.3	76.4	1-13-1	82.0	3-13-0	84.5	1-12-0	87.8
3-10-0.3	84.4	3-12-0	83.4	1-9-0.3	78.3	3-12-1	81.5	3-12-0.3	76.4	1-9-0	81.9	3-12-0	84.5	2-13-0	87.8
3-11-0	84.4	2-13-0	83.4	2-13-0.3	78.3	3-10-1	81.5	3-14-1	76.4	1-13-0	81.9	3-8-1	84.5	2-12-0	87.8
3-10-0	84.4	2-12-0	83.4	2-9-0.3	78.2	1-12-1	81.5	3-13-0.3	76.4	1-12-0	81.9	1-10-1	84.5	1-9-1	87.7
1-13-1	84.4	1-9-0	83.3	3-13-0.5-1.3	78.1	2-9-1	81.0	3-9-0.3	76.4	2-8-0.3	80.9	2-13-0	84.5	3-9-0	87.7
1-11-0	84.4	1-13-0	83.3	1-9-1	72.9	2-12-1	80.6	1-9-1	73.3	3-9-0	80.8	2-12-0	84.5	2-9-0	87.6
1-10-0	84.4	1-12-0	83.3	3-13-0	72.9	2-10-1	80.6	2-13-0	73.2	3-13-0	80.7	1-9-1	84.4	1-9-0	87.6
1-9-0	84.4	3-8-0.3	83.0	3-12-0	72.9	3-8-0.3	80.4	2-12-0	73.2	3-12-0	80.7	1-13-0	84.4	2-8-0.3	86.9
1-13-0	84.4	2-8-0.3	82.8	3-9-0	72.8	2-8-0.3	80.2	2-9-0	73.1	1-8-0.3	80.5	1-12-0	84.4	3-8-0.3	86.9
1-12-0	84.4	1-8-0.3	82.8	1-13-0	72.3	1-8-0.3	80.0	1-13-0	72.9	3-8-0.3	80.4	3-9-0	84.3	1-8-0.3	86.9
3-8-1	83.9	3-8-1	80.1	1-12-0	72.3	2-8-1	67.4	1-12-0	72.9	2-8-1	72.4	2-9-0	84.2	2-8-1	81.7
1-10-1	83.9	1-10-1	80												



Annexe 4 : Étude de corrélation entre CPART et une caractéristique physique des bassins



Annexe 5 : Comparaison des débits restitués par le modèle initial (à gauche) et par 3-14-0.3 (à droite) par rapport aux débits réellement observés à Troyes.

Annexe 6 : Description détaillée du fonctionnement du modèle (Pages suivantes)

<u>Étapes</u>	<u>Description</u>	<u>Équations</u>
Formation de la pluie nette	La pluie brute est neutralisée par l'ETP : i.e. les données de pluie et d'évaporation sont comparées. La différence en valeur absolue est affectée au phénomène de plus grande amplitude et constitue soit la pluie nette, soit l'évaporation nette.	<p><i>Si $P \geq E$, alors $P_n = P - E$ et $E_n = 0$</i></p> <p><i>Si $P < E$, alors $E_n = E - P$ et $P_n = 0$</i></p>
Réservoir de production	<p><u>Remplissage du réservoir</u> :</p> <p>Si $P > E$, une fraction P_s de la pluie nette P_n accède au réservoir de production. Cette fraction dépend du taux de remplissage S du réservoir.</p> <p><u>Évaporation réelle</u> :</p> <p>Si $P < E$, le niveau S du réservoir de production permet de définir l'évaporation réelle qu'il pourra délivrer. Cette évaporation réelle est une fraction E_s de $E_n = E - P$.</p> <p>Eau destinée au routage :</p> <p>Le complément $P_r = P_n - P_s$ est destiné au routage.</p> <p><u>Percolation</u> :</p> <p>En fonction de la hauteur d'eau S présente dans le réservoir de production, un phénomène de percolation se produit, et rejoint le volume d'eau qui va passer par le routage.</p> <p>Niveau du réservoir :</p> <p>Le niveau du réservoir de production est mis à jour en fonction de P_s et E_s, ainsi que de la percolation.</p>	$P_s = \frac{X1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)}{1 + \frac{S}{X1} \cdot \tanh\left(\frac{P_n}{X1}\right)}$ $E_s = \frac{S \cdot \left(2 - \frac{S}{X1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n}{X1}\right)}$ $Perc = S \cdot \left\{1 - \left[1 + \left(\frac{4 \cdot S}{9 \cdot X1}\right)^4\right]^{-\frac{1}{4}}\right\}$ $S = S + P_s - E_s - Perc$
Séparation des composantes de l'écoulement et hydrogrammes unitaires	<p>La composante de la pluie nette qui n'a pas rejoint le réservoir de production et la percolation issue de ce même réservoir forment la quantité d'eau P_r destinée à l'écoulement.</p> <p>Cette quantité est séparée en 2 composantes de façon fixe :</p> <p>10% est routé par un hydrogramme unitaire UH2 et va former un écoulement pseudo-direct,</p> <p>90% est routé par un hydrogramme unitaire UH1 et traverse un réservoir de routage.</p> <p>Ces deux composantes subissent un retard en traversant les hydrogrammes unitaires, ce qui permet de simuler le délai entre la pluie et le pic des débits (temps de réaction). Ces hydrogrammes sont caractérisés par le paramètre $X4$ qui correspond au temps de base de UH1 et à la moitié du temps de base de UH2.</p> <p>Les ordonnées $SH1(t)$ et $SH2(t)$ des hydrogrammes unitaires sont obtenues à partir de la courbe en S correspondante.</p>	$P_r = P_n - P_s + Perc$ <hr/> <p>$t \leq 0, \quad SH1(t) = 0$</p> <p>$0 < t < X4, \quad SH1(t) = \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$</p> <p>$t \geq X4, \quad SH1(t) = 1$</p> <hr/> <p>$t \leq 0, \quad SH2(t) = 0$</p> <p>$0 < t < X4, \quad SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$</p> <p>$X4 < t < 2 \cdot X4, \quad SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$</p> <p>$t \geq 2 \cdot X4, \quad SH2(t) = 1$</p> <hr/> <p>$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1)$</p> <p>$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1)$</p>

<u>Étapes</u>	<u>Description</u>	<u>Équations</u>
<i>Termes d'échanges souterrains</i>	Le terme F permet de tenir compte des échanges d'eau souterrains. Ce terme dépend d'un paramètre X2 qui est un coefficient d'échanges en eau. X2 peut être positif ou négatif : positif pour les imports en eau, négatif dans le cas de pertes en eau, nul si il n'y a pas d'échange.	$F = X2 \cdot \left(\frac{R}{X3} \right)^{7/2}$
<i>Écoulement pseudo-direct</i>	Après le retard induit par l'hydrogramme unitaire UH2, la sortie Q2 subit des échanges F avec le sous-sol et arrive à l'exutoire pour former Qd.	$Qd = \max(0; Q2 + F)$
<i>Réservoir de routage</i>	La composante principale de l'écoulement (celle à 90% de Pr) traverse le réservoir de routage R. Ce réservoir est non linéaire et est soumis à un flux entrant ou sortant, qui dépend de la puissance quatre de son taux de remplissage R (le paramètre X3 , capacité maximale à 1 jour, en est le coefficient multiplicatif). Le débit du réservoir est Qr et va former une partie du débit total à l'exutoire Q. Le niveau dans le réservoir de routage est contrôlé par les entrées (Q1 le débit à la sortie de UH1 et F le terme d'échanges souterrains) ainsi que par son niveau au pas de temps précédent. Le niveau est remis à jour à chaque pas de temps en soustrayant le débit de sortie Qr au niveau actuel R.	$R = \max(0; R + Q1 + F)$ $Qr = R \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\}$ $R = R - Qr$
<i>Débit total</i>	Ce flux est également additionné algébriquement à la deuxième composante et l'on ne retient le résultat de cette addition que s'il est positif.	$Q = Qr + Qd$

Définitions des abréviations utilisées :

X1 Capacité maximale du réservoir de production (mm)
X2 Coefficient d'échanges en eau (mm)
X3 Capacité maximale du réservoir de routage à 1 jour (mm)
X4 Temps de base de l'hydrogramme unitaire UH1 (jours)

P Pluie brute fournie en données (mm)
E ETP brute fournie en données (mm)
Pn Pluie nette
En Évaporation nette
Ps Hauteur de pluie destinée au réservoir de production
Es Évaporation à partir du réservoir de production

Q1 Sortie de l'hydrogramme unitaire UH1
Q2 Sortie de l'hydrogramme unitaire UH2
Qr Débit issu du réservoir de routage
Qd Débit issu de l'écoulement pseudo-direct
Q Débit total à l'exutoire (mm)

F Terme d'échanges souterrains en eau
Perc Terme de percolation issu du réservoir de production

S Niveau dans le réservoir de production
R Niveau dans le réservoir de routage