

**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**

**Prévision des crues sur le bassin de la Seine à Paris-Austerlitz**

**Timothée Ollivier**

**Directeurs de recherche : Charles Perrin, Pierre Javelle**

**Septembre 2004**



CEMAGREF Antony  
DIREN Ile-de-France



## ***Résumé***

Le Centre d'Annonce de Crue du bassin de la Seine donne aujourd'hui une prévision à 24 heures au niveau de la station de Paris-Austerlitz. Les autorités publiques souhaitent augmenter le délai de prévision pour arriver à 3 jours afin de mieux préparer les secours (une crue type 1910 entraînerait environ 12 milliards d'euros de dégâts). Dans ce contexte, l'objectif de cette étude était d'évaluer l'intérêt de la modélisation pluie-débit pour réaliser des prévisions de crues sur le bassin de la Seine à Paris (43 800 km<sup>2</sup>), un peu à contre courant de la modélisation hydraulique qui est ordinairement réalisée sur ces grands bassins. Nous avons testé quatre modèles globaux sur le bassin de la Seine : GR4J, TOPMODEL ainsi que deux versions simplifiées de GR4J. Nous avons aussi testé des réseaux de neurones. Nous avons testé ces modèles en contexte de prévision en utilisant diverses méthodes de mise à jour, certaines étant très simples (un report de l'erreur en simulation, ou la correction directe d'un niveau d'un réservoir à partir du débit de l'instant de prévision), et d'autres plus complexes comme la méthode développée par Yang et Michel (2000). Les résultats sont intéressants et plutôt encourageants. D'une part, TOPMODEL ainsi que les versions simplifiées de GR4J se sont montrés les plus efficaces en simulation. Mais en prévision, la surprise est venue des réseaux de neurones qui se sont avérés être les plus performants. Pour ce qui est des modèles à réservoirs, on peut remarquer qu'une mise à jour aussi sophistiquée que la méthode de Yang n'est finalement pas toujours plus efficace pour des horizons de prévision relativement courts que des méthodes de mise à jour beaucoup plus simples sur ce bassin. Par ailleurs, pour un horizon de prévision de 1 jour, les modèles testés restent moins efficaces que ce que réalise la DIREN actuellement avec des modèles de propagation simples et une expertise basée sur l'expérience des prévisionnistes. Mais la modélisation pluie-débit reste un outil très intéressant pour des horizons de prévision plus grands, actuellement non couverts quantitativement par la DIREN.

## ***Abstract***

Today, the Seine flood warning service forecasts flood events 24 hours ahead at the Paris-Austerlitz station. Public authorities wish to increase this delay up to 3 days to better prepare public protection services (a 1910 type flood could cost about 12 billions euros). In this context, the aim of the studies is to evaluate the value of the rainfall-runoff models for flood forecasting on the Seine river basin at Paris (43 800 km<sup>2</sup>), contrasting with the usual approach based on hydraulic models. We tested four models: GR4J, TOPMODEL and two simplified versions of GR4J. We also tested an artificial neural network (ANN). We calibrated them on the Seine river basin. Then, we tested them for flood forecasting, using various updating methods. Some were very simple (a translation of the error in simulation, a direct correction of the level of the routing reservoir using the observed runoff), and some others more complex such as the method developed by Yang and Michel (2000). Results are interesting and encouraging. In simulation mode, TOPMODEL and the modified versions of GR4J seem to be the most efficient. But in forecasting mode, the ANN surprisingly showed the best performances. When the conceptual models are concerned, an updating method as sophisticated as the Yang method is not able to be as efficient as more simple methods on this catchment for short term forecast. For 1 day ahead forecast, all models remain less efficient than the forecasts issued by the DIREN flood warning service that uses simple propagation methods and the expertise based on staff experience. Rainfall-runoff modelling remains a very interesting tool for longer term forecasting, presently not quantitatively covered by the flood warning service.

## Sommaire

Introduction .....	4
1 Caractéristiques de la zone d'étude .....	5
1.1 Description du bassin de la Seine .....	5
1.2 Crues de références sur la Seine à Paris .....	6
1.3 Etat des lieux de l'annonce de crue .....	7
2 Critique des données .....	9
2.1 Données hydrométriques .....	9
2.2 Données météorologiques .....	18
3 Méthodologie et outils utilisés .....	20
3.1 Rappels bibliographiques sur les modèles pluie-débit .....	20
3.2 Outils et méthodes utilisés plus particulièrement dans cette étude .....	22
4 Evaluation des modèles en simulation .....	26
4.1 Introduction et démarche de la phase de simulation .....	26
4.2 Méthode d'évaluation des modèles utilisée : un 'calage - contrôle systématique' ....	26
4.3 Résultats obtenus en simulation sur le bassin entier .....	27
4.4 Impact de la pluviométrie .....	29
4.5 Passage d'un modèle global à un modèle semi-distribué .....	30
4.6 Tentative de prise en compte de l'influence des barrages .....	30
4.7 Conclusion des résultats en simulation .....	31
5 Résultats obtenus en prévision .....	32
5.1 Introduction et démarche de la phase de prévision .....	32
5.2 Constat des résultats obtenus par la DIREN Ile de France .....	32
5.3 Résultats obtenus par les différentes méthodes de mise à jour utilisant des modèles pluie-débit .....	33
5.4 Résultats obtenus en utilisant des réseaux de neurones .....	36
5.5 Conclusion des résultats en prévision .....	38
6 Illustration des différents résultats obtenus .....	38
Conclusions et perspectives .....	44
Remerciements .....	44
Références .....	45
Annexe 1 : Inventaires des méthodes dans le reste de la France (en opérationnel) (Atelier SCHAPI, 2004) .....	46
Annexe 2 : architecture des différents modèles pluie-débit utilisés .....	48
Annexe 3: prévisions à 1 jour (hauteurs en m) issues du modèle hydraulique de la DIREN .	50

## Table des illustrations

Figure 1 : la crue de 1910 à Paris (source : photothèque de la DIREN Ile-de-France).....	4
Figure 2 : géologie du Bassin de la Seine.....	5
Figure 3 : conséquences d'une crue type 1910.....	6
Figure 4 : stations utilisées pour la comparaison.....	10
Figure 5 : chroniques de débits de chaque station.....	11
Figure 6 : 'erreur' relative en fonction du débit à Austerlitz.....	11
Figure 7 : évolution de « l'erreur » au fil du temps.....	12
Figure 8 : hydrogrammes des différentes stations pour la crue de février 1980.....	12
Figure 9 : volumes annuels écoulés sur la période 1975-2003.....	13
Figure 10 : Volumes mensuels écoulés.....	14
Figure 11 : résultats des jaugeages réalisés à Austerlitz.....	14
Figure 12 : courbe de tarage utilisée actuellement à Paris-Austerlitz.....	15
Figure 13 : Différence relative $Q_{hydro} - Q_{jaugeage}$ en fonction du débit jaugé.....	16
Figure 14 : « Erreur » en fonction du temps.....	16
Figure 15 : courbe de tarage pour les forts débits.....	17
Figure 16 : comparaison des débits calculés avec formule et débits de la banque HYDRO.....	17
Figure 17 : position des pluviomètres utilisés dans cette étude.....	18
Figure 18 : champ des cumuls annuels de précipitation sur le bassin de la Seine.....	19
Figure 19 : pluviométries sur les sous-bassins de la Seine et de la Marne (pas de temps journalier ; période 1988-2001).....	20
Figure 20 : comparaison des pluies cumulées de la Seine et de la Marne sur la période 1988-2001.....	20
Figure 21 : graphique montrant une phase du « calage-contrôle systématique ».....	26
Figure 22 : chronique de débit à Paris-Austerlitz (droite rouge : débit moyen ; droite verte : seuil de crue).....	27
Figure 23 : comparaison des débits simulés (TOMODEL) et observés à Paris Austerlitz.....	28
Figure 24 : corrélation entre les réservoirs de routage et production des modèles GR4J et TOPMODEL.....	29
Figure 25 : comparaison des débits simulés par GR4J avec et sans module de barrage.....	31
Figure 26 : persistances obtenues pour différents délais de prévision pour les deux méthodes de mise à jour.....	34
Figure 27 : comparaison des différentes méthodes de mise à jour en <i>pluie nulle</i> .....	37
Figure 28 : comparaison entre les résultats de la DIREN et ceux des modèles testés (P futures nulles).....	38
Figure 29 : prévisions obtenues par la modélisation avec les réseaux de neurones (P futures nulles).....	39
Figure 30 : prévisions obtenues avec TOPMODEL et un report de l'erreur entre le débit observé et le débit simulé (P futures nulles).....	40
Figure 31 : distribution des erreurs sur les hauteurs pour les réseaux de neurones.....	41
Figure 32 : distribution des erreurs pour la version simplifiée 2 de GR4J et la mise à jour directe.....	42
Figure 33 : corrélation entre les variations des débits observés et l'écart entre le débit prévu et le débit observé pour la version simplifiée 2 de GR4J et un délai de prévision de 1 jour.....	43
Tableau 1 : récapitulatif des divers modèles utilisés sur le bassin de la Seine.....	8
Tableau 2 : stations utilisées afin de réaliser la semi-distribution.....	10
Tableau 3 : cumul des volumes écoulés sur la période 1975-2001.....	13
Tableau 4 : résultats obtenus sur le bassin entier en simulation (moyenne des critères de Nash obtenus en calage-contrôle systématique).....	27
Tableau 5 : paramètres obtenus en calant le modèle sur la période 1975-2001.....	28
Tableau 6 : performances des versions simplifiées de GR4J en simulation.....	29
Tableau 7 : moyenne des critères de Nash (calage-contrôle systématique sur 1975-2001) obtenus en modifiant l'information pluviométrique.....	29
Tableau 8 : moyenne de critères de Nash obtenus en contrôle sur différentes périodes en semi-distribué.....	30
Tableau 9 : comparaison des performances de GR4J avec et sans module barrage.....	31
Tableau 10 : méthodes de mise à jour et modèles testés dans cette étude en contexte de prévision.....	32
Tableau 11 : Prévisions réalisées avec un délai de 3 jours avec une <i>pluie future supposée connue</i> .....	33
Tableau 12 : Prévisions réalisées avec un délai de 3 jours avec une <i>pluie future supposée nulle</i> .....	33
Tableau 13 : comparaison des performances de TOPMODEL avec une mise à jour sur les paramètres ou une mise à jour sur les états.....	33
Tableau 14 : modalités optimales déterminées pour la prévision.....	34
Tableau 15 : critères de persistance obtenus par la méthode (a).....	35
Tableau 16 : critères de persistance obtenus par la méthode (b) en optimisant le pourcentage d'erreur reporté.....	35
Tableau 17 : critères de persistance (%) obtenus avec les versions simplifiées de GR4J.....	36
Tableau 18 : performances obtenues avec les méthodes de mise à jour associées aux modèles pluie-débit (P futures nulles).....	36
Tableau 19 : performances obtenues par les réseaux de neurones ( <i>pluie nulle</i> ).....	37
Tableau 20 : performances en prévision obtenues par les différents modèles à 1 jour (P futures nulles).....	37
Tableau 21 : pourcentages de débits compris dans la fourchette d'écart de hauteur entre la valeur prévue et la valeur réelle pour les réseaux de neurones.....	41
Tableau 22 : pourcentages de débits compris dans la fourchette d'écart de hauteur souhaitée pour la version simplifiée 2 de GR4J et la mise à jour directe.....	42

## Introduction

Les Services d'Annonce de Crue (SAC) du bassin de la Seine vivent dans la crainte d'une crue semblable à celle de 1910 (voir [Figure 1](#)), qui était centennale et dont les dégâts seraient estimés aujourd'hui à près de 12 milliards d'euros. Afin de mieux préparer et organiser les secours, et de limiter ainsi les conséquences socio-économiques et humaines d'un tel événement, la préfecture a demandé de porter les délais de prévisions à trois jours, alors qu'ils sont actuellement de un jour. Le SAC du bassin de la Seine cherche donc à améliorer ses outils de prévision des crues, notamment afin d'augmenter ses délais de prévision.

Classiquement, la prévision des crues sur les grands bassins repose sur des modèles de propagation hydraulique, la modélisation pluie-débit étant utilisée plutôt sur de petits bassins versants amonts pour simuler des apports. Mais les modèles hydrauliques posent un certain nombre de problèmes, notamment la prise en compte des échanges avec la nappe, et la modélisation pluie-débit peut alors apparaître comme une alternative intéressante. Dans cette étude, nous allons donc tester la possibilité d'utiliser des modèles pluie-débit globaux sur le bassin de la Seine en amont de Paris, en testant essentiellement les modèles GR4J, TOPMODEL, ainsi que des réseaux de neurones.

L'étude de modélisation comportera donc deux grandes parties :

- une 1<sup>ère</sup> partie où l'on évaluera les modèles en simulation afin de sélectionner le modèle fonctionnant le mieux. Nous testerons d'une part une modélisation globale sur tout le bassin en amont de Paris, mais aussi une modélisation semi-distribuée en séparant les sous-bassins de la Marne et de la Seine
- une 2<sup>de</sup> partie qui consistera à tester les modèles en contexte de prévision. Il s'agira alors essentiellement de déterminer une méthode de mise à jour appropriée. Différents types de mises à jour seront utilisés, depuis des méthodes très simples de report de l'erreur entre le débit simulé et le débit observé à des méthodes plus complexes comme la méthode de Yang (Yang et Michel, 2000).

Nous comparerons ainsi les différentes méthodologies entre elles, en utilisant des approches à la fois globales et semi-distribuées, afin de déterminer le modèle et la mise à jour la plus efficace sur le bassin de la Seine avec un objectif de performance très concret et opérationnel, cette étude pouvant éventuellement déboucher sur le développement d'un outil opérationnel pour la DIREN Ile-de-France.



**Figure 1** : la crue de 1910 à Paris (source : photothèque de la DIREN Ile-de-France)

# 1 Caractéristiques de la zone d'étude

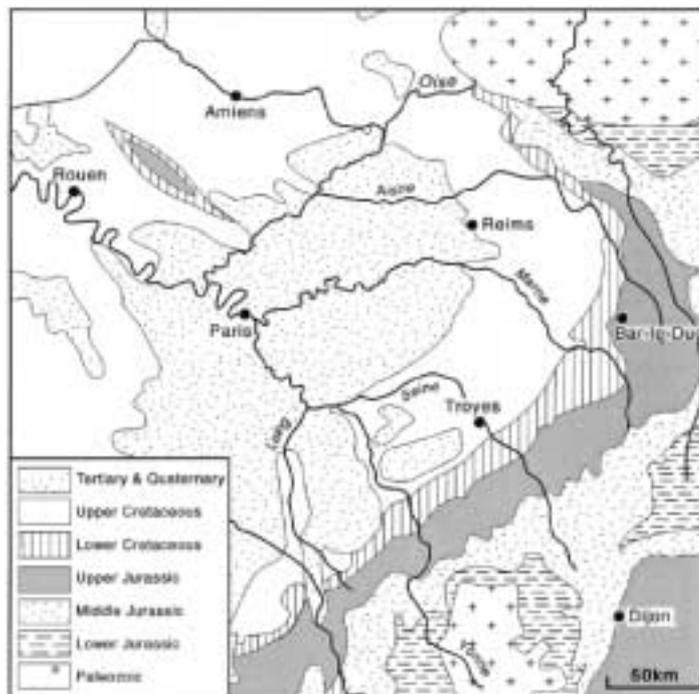
## 1.1 Description du bassin de la Seine

Le bassin de la Seine en amont de Paris s'étend sur 43800 km<sup>2</sup>. La Seine prend sa source sur le plateau de Langres en Côte d'Or à une altitude de 471 mètres. Elle arrose successivement la Champagne, reçoit l'Aube (rive droite) et l'Yonne (rive gauche) à Montereau, baigne Melun et traverse l'Île-de-France, grossie du Loing, de l'Essonne, de l'Orge (rive gauche) et de l'Yerres (rive droite), de la Marne et de l'Oise (rive droite), de part et d'autre de Paris. La Seine est un fleuve régulier avec un régime océanique de plaine (basses eaux d'été, assez fortes crues d'automne au printemps), avec un débit moyen annuel à Austerlitz de 250 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> et des débits variants de 25 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> à 2500 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Le relief général du bassin est très peu accidenté avec des altitudes relativement faibles.

On a un climat tempéré avec des précipitations moyennes annuelles de 700 mm/an avec des valeurs plus fortes vers les sommets du Morvan où l'on peut atteindre 1200 mm/an. L'évapotranspiration est quant à elle estimée à 500 mm/an.

La géologie du Bassin Parisien est organisée en cercles concentriques (**Figure 2**). Les terrains sont sédimentaires avec successivement, depuis l'extérieur de l'auréole vers l'intérieur :

- une auréole calcaire perméable
- des argiles et marnes imperméables
- une craie perméable des terrains tertiaires (argiles, calcaires et sables)

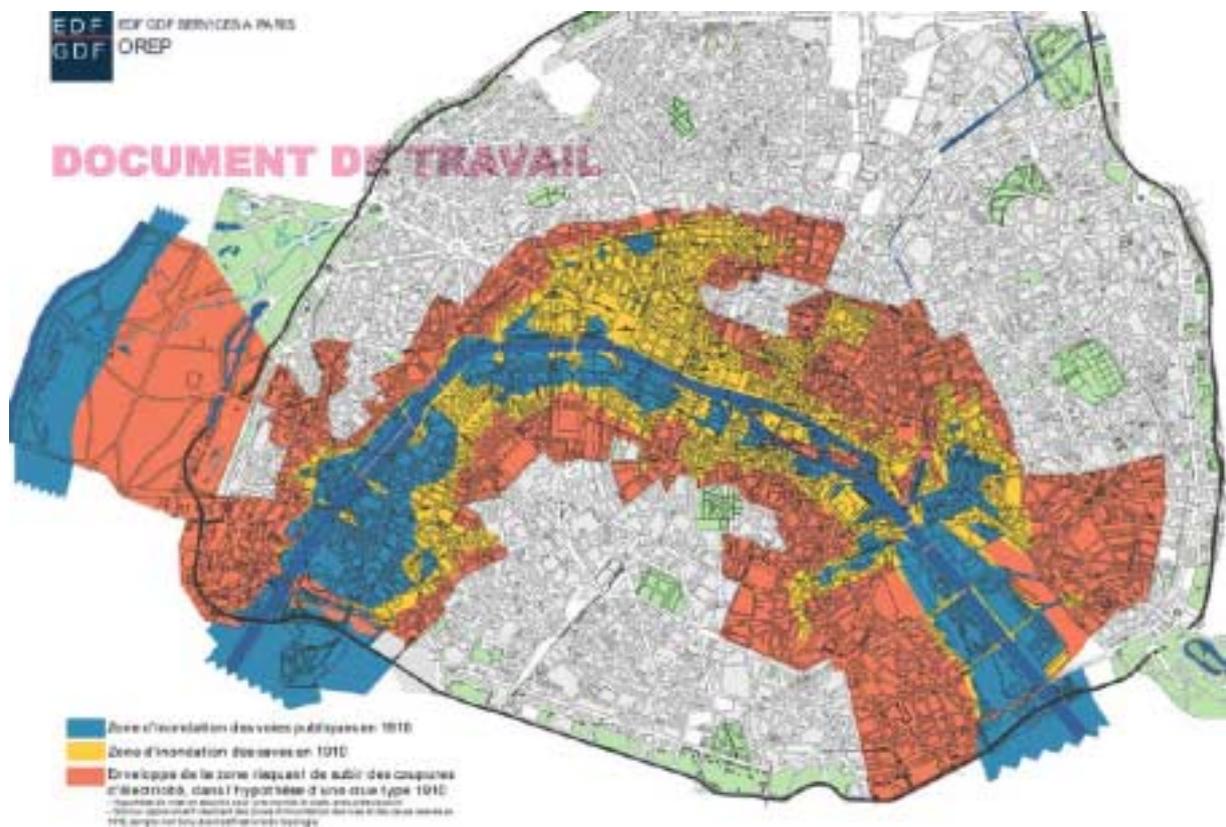


**Figure 2 : géologie du Bassin de la Seine**

## 1.2 Crues de références sur la Seine à Paris

Les crues majeures depuis 400 ans sont les suivantes (avec des valeurs qui correspondent à la hauteur au niveau de l'échelle d'Austerlitz) : 1658 : 8,96m ; 1740 : 8,05m, 1910 : 8,62m. Au 20<sup>e</sup> siècle, les crues majeures, mise à part celle de 1910, se sont produites en 1924 : 7,32m et 1955 : 7,22m (Goubet, 1997; Champion, 2001). La période de crue sur le bassin de la Seine va de novembre à Avril.

La crue de 1910 est une crue de référence aujourd'hui. Les différents plans de secours sont élaborés par rapport à celle-ci. Elle a été très longue avec une montée des eaux qui a eu lieu du 20/01/1910 au 28/01/1910, puis une décrue jusqu'au 15 mars. Les dégâts pour cette crue ont été évalués, à 1 milliard d'euros. On imagine aujourd'hui l'impact d'une crue similaire à Paris (Figure 3) que certains évaluent à plus de 12 milliards d'euros ! (Chéry, 2000)



**Figure 3 : conséquences d'une crue type 1910**

Les crues sont dues à la concomitance de différents événements. Il faut d'abord avoir de fortes précipitations sur les têtes de bassin. Celles-ci sont constituées de terrains imperméables à forte pente, ce qui entraîne une réaction rapide et forte. Il y a ensuite une propagation qui s'effectue avec une durée qui peut aller de 5-6 jours pour l'Yonne depuis le Morvan, à 7-10 jours pour l'Oise par exemple. La situation peut ensuite s'aggraver au niveau des zones de confluence lorsqu'il y a arrivée simultanée des différentes ondes de crue. L'état initial du système est enfin très important, à savoir l'état initial des sols et des nappes notamment. Des sols gorgés d'eau ou bien gelés auront tendance à augmenter le ruissellement et amplifieront la crue (Schneider, 1997). Notons cependant que les pluies peuvent être

généralisées, tout le bassin contribuant alors à l'écoulement, pas seulement les têtes de bassins.

Pour limiter les dégâts liés aux crues et réduire leur importance, différents ouvrages ont été construits, avec par exemple les grands lacs de Seine ou des digues de protection. Ceux-ci sont efficaces sur des crues moyennes mais pour les grandes crues, l'effet reste limité.

### **1.3 Etat des lieux de l'annonce de crue**

#### *1.3.1 La politique de prévision des crues en France, rôle des SAC*

➤ Mission et fonctionnement des SAC (Houdré, 2001)

Actuellement, la prévision des crues en France se fait au niveau des Services d'Annonce des Crues qui peuvent être rattachés à différents services déconcentrés de l'Etat tels que des Directions départementales de l'Equipement (DDE), des Directions régionales de l'Environnement (DIREN), Service de la navigation... Dans le cas du Service d'annonce de crue de la région Parisienne, celui-ci est rattaché à la DIREN Ile-de-France. La mission de ces SAC est de prévoir, annoncer et suivre l'évolution des crues et de diffuser l'information. Pour cela, en période de crue, un message d'annonce quotidien destiné aux préfetures est envoyé en précisant la cote du jour, de la veille et celle à 24 h, ainsi que la référence de la cote d'alerte et la tendance pour les jours à venir. L'information est aussi diffusée par le minitel, téléphone et internet.

➤ Evolutions futures

Les services d'annonce de crue vont bientôt être transformés en Service de prévision des crues (SPC), ce qui dénote une ambition totalement différente et une volonté d'améliorer les outils de prévision afin d'augmenter les délais de prévision des crues et d'augmenter en fiabilité. Ces nouveaux centres de prévision sont appuyés par le SCHAPI (service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations) créé en juin 2003 à Toulouse et dépendant de la Direction de l'eau du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

#### *1.3.2 Etat des lieux sur les méthodes de prévision actuellement utilisées en France*

➤ Méthodes utilisées à la DIREN Ile-de-France

Les outils de prévision du SAC pour Paris-Austerlitz sont les suivants :

- la méthode de Bachet (1934) : la réglette de Bachet a ici été automatisée. Elle prévoit des hauteurs d'eau et s'appuie sur les hauteurs mesurées en amont au niveau des stations de Melun sur la Seine, Chalifert sur la Marne et Pommeuse sur le Grand Morin, ce dernier étant nécessaire car très nerveux donc très influent malgré son faible débit. Cette méthode repose sur la propagation des ondes de crue.
- Une relation linéaire débit-débit : celle-ci repose sur les mêmes principes généraux de propagation que les réglettes de Bachet mais on raisonne ici sur les débits. Ici,

les stations utilisées sont : Episy sur le Loing, Courlon sur l'Yonne, Bazoches sur la Seine et Chalifert sur la Marne.

Ces deux méthodes sont utilisées en opérationnel et donnent des prévisions à 24h. La qualité des prévisions sera évaluée par la suite.

On peut noter que la prévision des débits se heurte à un problème important particulier du bassin de la Seine, à savoir le grand nombre de barrages pour la navigation. En effet, ceux-ci modifient les différentes valeurs de débit ou de hauteur et faussent donc les prévisions. Ceci est surtout valable en basses et moyennes eaux. En hautes eaux, les barrages de la navigation sont complètement effacés à partir d'une certaine cote, leur effet devenant nul.

➤ Autres méthodes utilisées sur le bassin de la Seine (Hydratec, 1997)

Sur le bassin de la Seine, de nombreux modèles ont été développés avec des objectifs divers (**Tableau 1**). Ce sont pour la plupart des modèles hydrauliques de propagation, essentiellement de deux types :

- des modèles filaires où seul un axe d'écoulement est considéré. Ces modèles permettent d'avoir une vision d'ensemble de l'écoulement. Dans ces modèles, la vallée est découpée en trois zones distinctes :
  - un lit mineur toujours en eau
  - un lit majeur avec un écoulement parallèle à l'axe longitudinal de la vallée après débordement
  - une zone d'expansion sans écoulement, reliée hydrauliquement au lit majeur actif par l'intermédiaire de lois hydrauliques d'échange latéral. Les équations de base utilisées sont les équations de Barré de Saint Venant
- des modèles de casiers qui permettent de modéliser plus finement les obstacles du lit majeur ainsi que les différents aménagements. La rivière est décomposée en différents casiers reliés entre eux de différentes façons : un seuil déversant à la surface libre, un écoulement poreux à travers une digue, une perte de charge par frottements sur le fond.

On a aussi des modèles couplant les deux approches avec un écoulement filaire dans un bief de rivière caractérisé par une direction d'écoulement privilégiée le long de l'axe longitudinal, et une zone d'accumulation dans le lit majeur décrite par l'intermédiaire de casiers.

Ces modèles sont à une dimension. Des modèles 2D existent aussi, mais calés uniquement sur des petites zones, pour des études précises (par exemple pour étudier l'impact d'un aménagement).

	LIDO SARA	CARIMA	HYDRA	SHERPA	MIKE11	STREAM
<b>Bureau d'études</b>	EDF	SOGREAH	Hydratec	BCEOM	Danish Hydraulic Institute	BCEOM
<b>Type de modèle</b>	filaire	mixte bief-casier	mixte bief-casier	filaire	filaire	casier

**Tableau 1 : récapitulatif des divers modèles utilisés sur le bassin de la Seine**

- Les modèles plus particulièrement de prévision de crue à Paris

D'un point de vue opérationnel, ce sont essentiellement deux modèles qui nous intéressent ici :

- Le modèle HYDRA développé par Hydratec qui est appliqué dans un contexte de prévision de crue à Paris-Austerlitz par l'Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine (IIRBS) (modèle Seine-Barrages-Réservoirs MSBR). C'est un modèle mixte bief-casiers dérivé du modèle Seine développé par Hydratec, à l'origine pour l'Agence de l'eau. Les principales rivières du bassin amont de la Seine ont été découpées en biefs de 2 km de long. Le modèle MSBR est en fait une simplification de ce modèle, avec en plus des modules 'barrages' permettant de prendre en compte l'influence des barrages. Ce modèle donne pour l'instant une prévision à 72 h.
- Le modèle de l'Assemblée Nationale développé aussi par Hydratec. Ce modèle apparaît comme le plus élaboré à l'heure actuelle. En effet, il repose sur un modèle de propagation hydraulique 1D de l'Ile-de-France sur lequel sont greffés différents modèles pluit-débit (SCS). De plus, on a une prise en compte des niveaux de nappe, l'Assemblée étant concernée par les inondations par remontée de nappe qui inonderaient ses archives.

Ces modèles sont en fait une petite partie des très nombreux modèles développés en France, dont l'Annexe 1 montre quelques exemples non limités au bassin de la Seine.

## **2 Critique des données**

Notre étude de modélisation fait appel à des données hydrométriques et météorologiques que nous avons, dans une première étape, analysées, avant de les utiliser dans nos tests.

### **2.1 Données hydrométriques**

#### *2.1.1 Inventaire*

Nous utiliserons essentiellement les stations d'Austerlitz (code de la station dans la banque nationale HYDRO : H5920010) pour la modélisation globale, puis nous utiliserons les stations de Gournay, Noisiel, Alfortville et Villeneuve Saint George pour la modélisation semi-distribuée. Toutes ces stations sont gérées par la DIREN Ile de France, les données étant stockées sur la banque HYDRO gérée par le ministère de l'écologie et du développement durable. Nous utilisons des données au pas de temps journalier.

#### *2.1.2 Critique des données hydrométriques*

Nous avons essayé d'aborder la critique sous deux aspects différents : d'une part en regardant la cohérence d'ensemble des données entre l'amont et l'aval, pour voir s'il y a des erreurs flagrantes de saisie de donnée ou autre ; et d'autre part, nous avons essayé d'évaluer la qualité des données fournies à la station Paris-Austerlitz, ce qui a consisté essentiellement en une critique de la courbe de tarage.

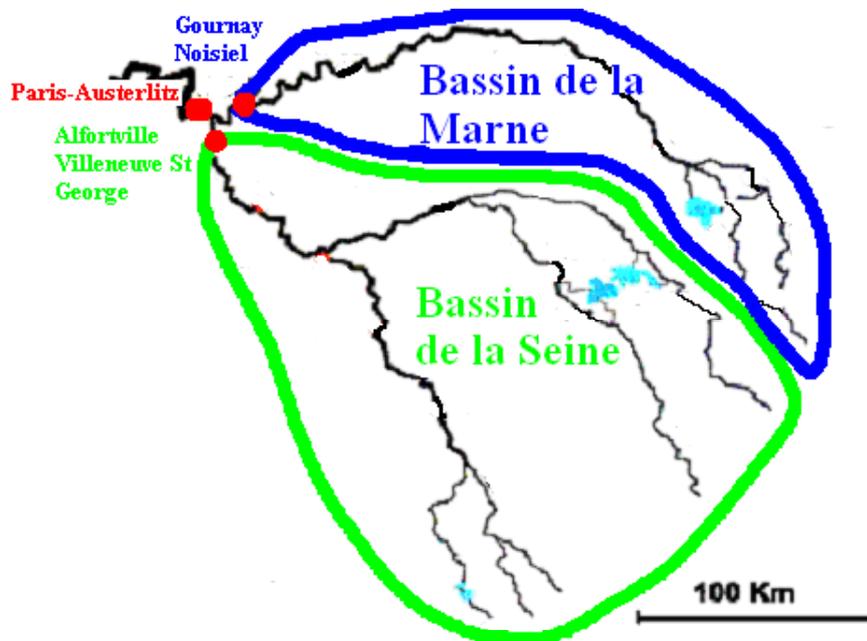
## ❖ Cohérence générale des données

- Méthode utilisée

Afin d'étudier la cohérence des débits observés à Austerlitz, nous avons comparé ce débit à la somme des débits de la Marne et de la Seine à l'amont immédiat de Paris sur les stations de Gournay et Noisiel pour la Marne et les stations de Villeneuve-Saint-George et Alfortville pour la Seine, comme l'indique le Tableau 2. Nous avons deux stations pour chaque sous-bassin amont afin d'avoir une valeur sur la totalité de la période 1975-2001, chacune de ces stations ne couvrant pas l'intégralité de cette période (Figure 4).

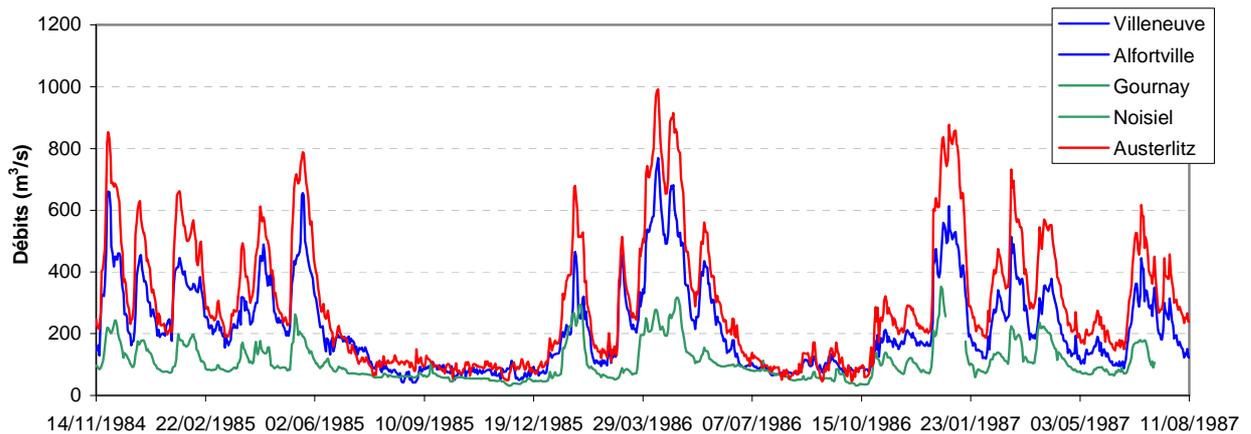
	Stations utilisées	Période
<i>Sous-bassin de la Marne</i>	Noisiel	Du 01/01/1975 au 22/06/1998
	Gournay	Du 23/06/1998 au 31/12/2001
<i>Sous-bassin de la Seine</i>	Villeneuve St George	Du 01/01/1975 au 31/12/1990
	Alfortville	Du 01/01/1991 au 31/12/2001

**Tableau 2** : stations utilisées afin de réaliser la semi-distribution



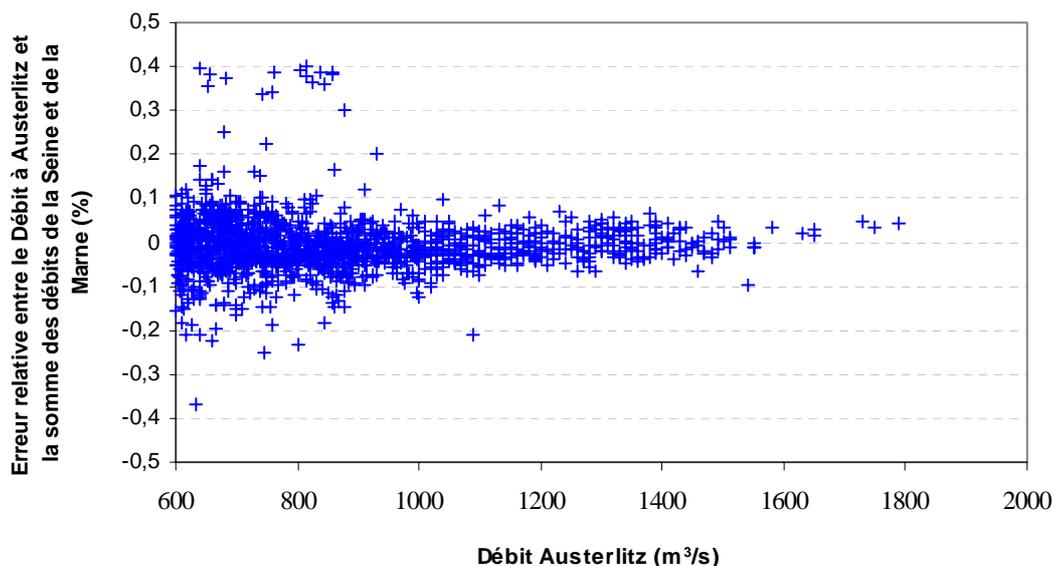
**Figure 4** : stations utilisées pour la comparaison

Cette méthode ne nous indique pas directement si l'erreur est sur le débit à Austerlitz ou sur la Marne ou la Seine, mais nous signale au moins la possibilité d'erreurs.



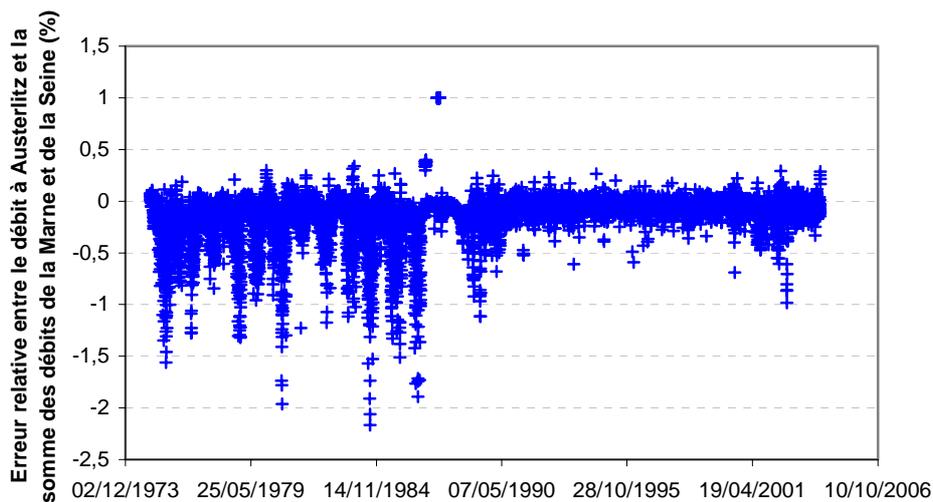
**Figure 5 : chroniques de débits de chaque station**

Nous allons maintenant étudier la cohérence entre le débit à Austerlitz et la somme des débits de la Marne et de la Seine en amont (nous appellerons cette différence ‘erreur’). En principe, si les données sont justes et en négligeant les apports entre les stations amont et la station de Paris-Austerlitz, on devrait avoir des valeurs très proches entre la somme des débits de la Marne et de la Seine en amont de Paris et le débit à Austerlitz.



**Figure 6 : ‘erreur’ relative en fonction du débit à Austerlitz**

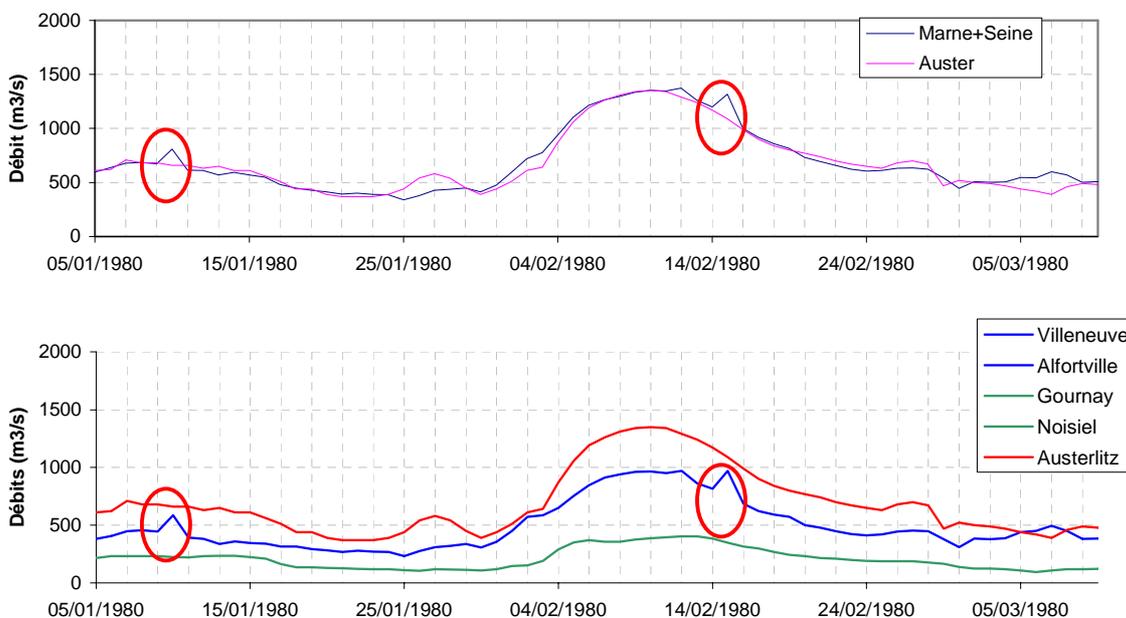
On peut voir ici que les grosses erreurs relatives concernent les faibles débits, toujours très certainement à cause des problèmes d’écluses et de barrages de navigation qui peuvent stocker temporairement des volumes d’eau. L’erreur se resserre en allant vers les hauts débits, les crues étant moins dépendantes des barrages qui sont alors a priori rabaissés. On peut ainsi voir que l’on n’a que très rarement pour des débits supérieurs à  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  une différence supérieure à 10%.



**Figure 7** : évolution de « l'erreur » au fil du temps

Il est intéressant aussi de voir l'évolution de cette différence en fonction du temps (**Figure 7**), avec une différence qui semble s'amenuiser au fil du temps, ce qui semble aller dans le sens de l'idée d'une meilleure précision des mesures, sans doute due à des progrès des techniques de mesure.

Nous allons maintenant essayer de comprendre l'origine des principales 'erreurs' observées. La crue de février 1980 par exemple (**Figure 8**) présente une anomalie importante, la somme des débits de la Marne et de la Seine devient en effet beaucoup plus importante que le débit à la station de Paris-Austerlitz autour du 10 janvier et du 15 février. Il est difficile de penser que cette soudaine augmentation soit naturelle, on penserait plutôt à un lâcher de barrage. Les pics sur la courbe d'Alfortville sont par ailleurs très visibles.



**Figure 8** : hydrogrammes des différentes stations pour la crue de février 1980

Il serait possible de montrer d'autres événements comme ceux-ci, mais ils restent tout de même, pour des débits relativement élevés, assez ponctuels, et la cohérence générale de l'ensemble semble tout de même être tout à fait correcte. Les graphiques suivants présentant

les cumuls des débits confirment cette cohérence générale de l'ensemble. On ne voit en effet pas de changement significatif de pente.

- Etude des volumes écoulés

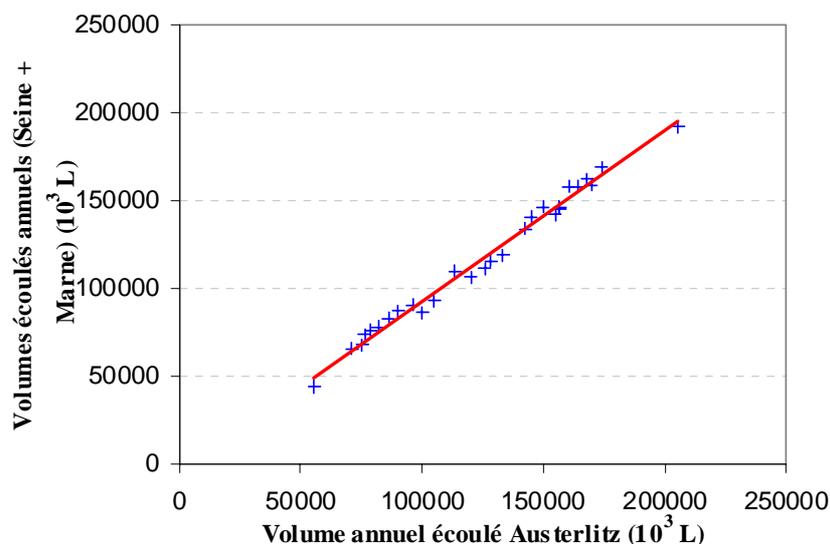
Nous allons regarder ici s'il y a bien conservation des débits. En effet, à l'échelle journalière, on peut ne pas avoir le même débit entre la Seine à Austerlitz et ce qui s'est écoulé au niveau de la Marne et de la Seine en amont de Paris, à cause des différentes manœuvres qui bloquent ou relâchent différentes masses d'eau.

A l'échelle de la période 1975-2004 (Tableau 3), on peut noter une différence de 6%, ce qui n'est pas réellement négligeable, et ce que l'on peut attribuer aux problèmes de calibrage des mesures pour des faibles tirants d'eau.

	<b>Austerlitz</b>	<b>Marne+Seine</b>
<b>Cumul des débits (m3)</b>	3 402 262	3 624 274

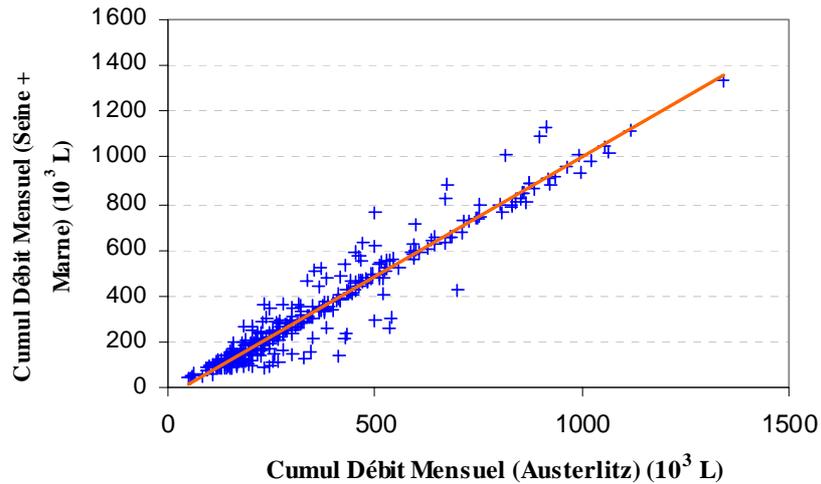
**Tableau 3 : cumul des volumes écoulés sur la période 1975-2001**

A l'échelle annuelle (Figure 9), les volumes écoulés semblent relativement concordants.



**Figure 9 : volumes annuels écoulés sur la période 1975-2003**

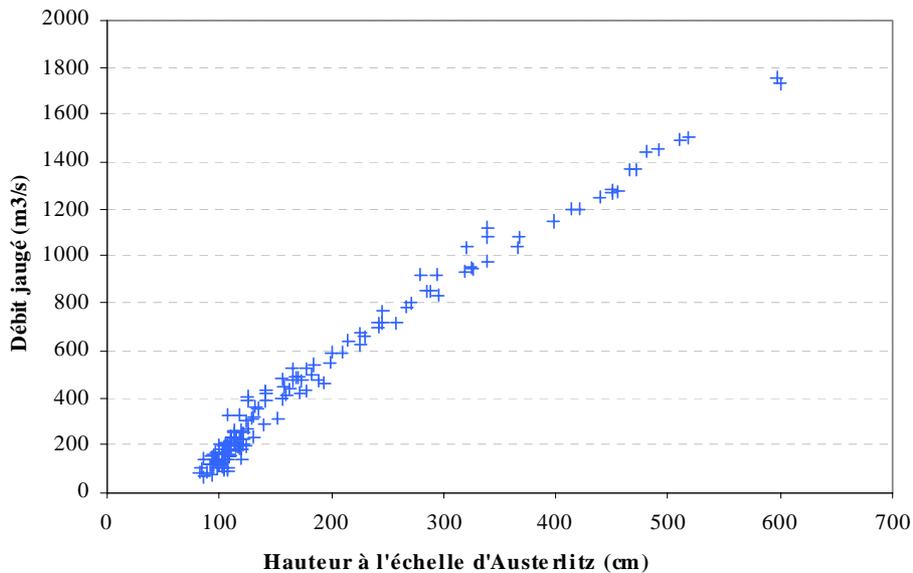
A l'échelle mensuelle (Figure 10), on se rend compte encore que les volumes mensuels écoulés importants sont moins affectés que les faibles volumes écoulés, ce qui confirme les problèmes que l'on peut avoir sur les mesures de débit relativement faibles.



**Figure 10** : Volumes mensuels écoulés

❖ **Critique de la courbe de tarage à la station Paris Austerlitz**

L'un des problèmes majeurs d'une mesure de débit sur une rivière aussi aménagée que la Seine est de s'affranchir de l'influence des ouvrages comme les écluses ou les barrages qui vont perturber la ligne d'eau. Ceux-ci n'ont que très peu d'influence lors des épisodes de crue où la plupart des ouvrages sont abattus et ne retiennent pas d'eau, mais sont particulièrement gênants en période d'étiage où les différentes écluses et barrages s'adaptent afin de maintenir une cote d'eau suffisante pour la navigation. On peut voir ceci sur le graphique de la **Figure 11** qui présente l'ensemble des jaugeages réalisés à la station d'Austerlitz. A partir d'une hauteur de 2 mètres à l'échelle d'Austerlitz, il existe une relation linéaire entre débit et hauteur et on peut caler une droite, mais pas pour des hauteurs plus faibles.



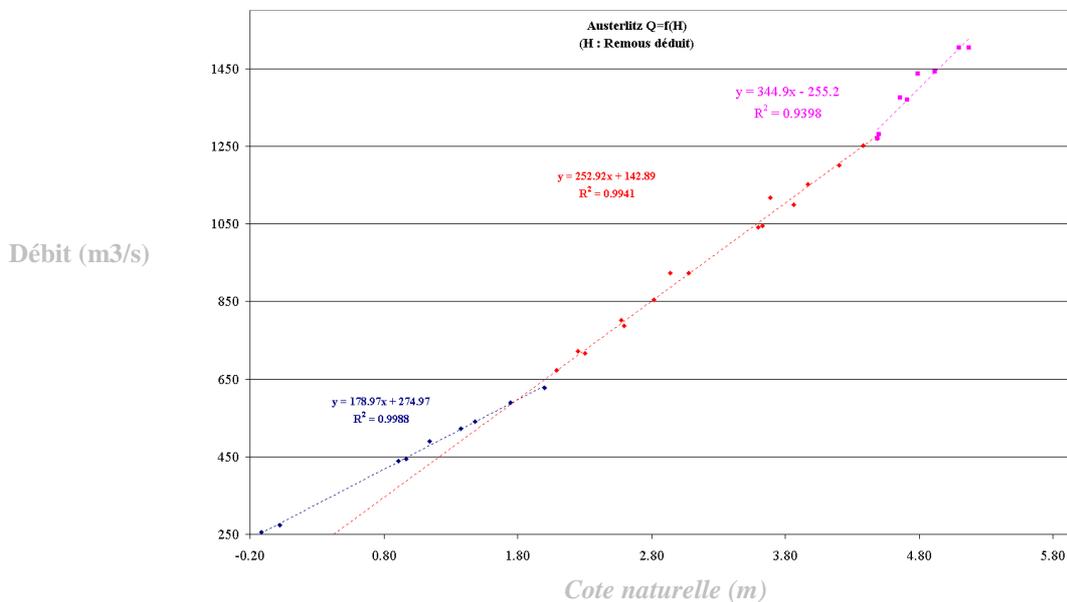
**Figure 11** : résultats des jaugeages réalisés à Austerlitz

Ceci est dû à cette présence des barrages et écluses. Afin de palier ces problèmes de barrage, une formule a été mise au point à la DIREN Ile de France prenant en compte l'influence du barrage de Suresnes en aval de Paris qui est le perturbateur essentiel de la cote de l'eau, permettant ainsi de corriger la hauteur lue sur l'échelle d'Austerlitz (dite formule des Remous déduits) :

$$H_{\text{Remous déduits}} = -42,15 + (h_{\text{Auster}} + 42,15) \left[ 1 - \exp \left[ \left( h_{\text{Suresnes}} + 45,87 \right) - \left( h_{\text{Auster}} + 42,15 \right) \right]^{-2,07} \cdot (-6,11) \cdot \left( h_{\text{Auster}} + 42,15 \right) \right]$$

$H_{\text{(remous déduits)}}$  est finalement la cote « naturelle » que l'on observerait en l'absence du barrage de Suresnes.

Cette formule résulte du calage d'une formule sur des abaques préexistants. Cette nouvelle cote est alors utilisée sur une courbe de tarage formée à partir de ces valeurs corrigées (**Figure 12**). Et c'est donc cette courbe qui est utilisée en mode opérationnel à la DIREN Ile de France.

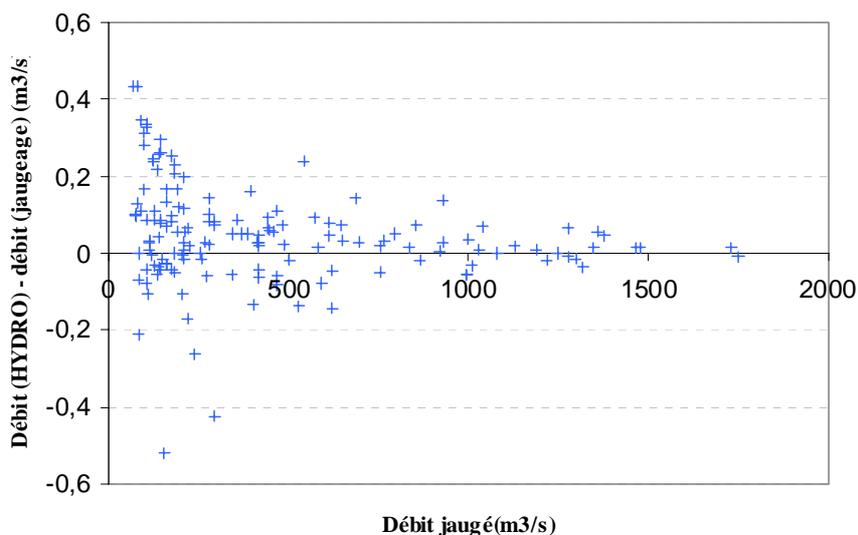


**Figure 12** : courbe de tarage utilisée actuellement à Paris-Austerlitz

- Critique des données de la banque HYDRO

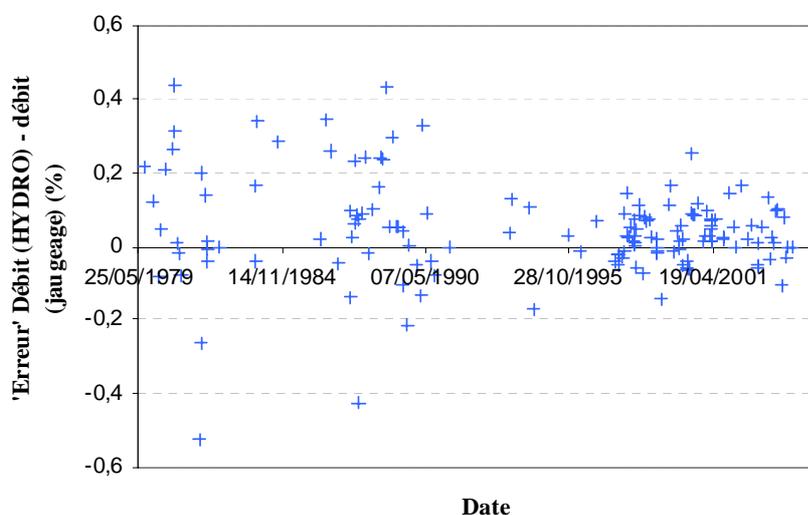
Nous avons ensuite étudié la validité des données de la banque HYDRO. Nous avons en effet comparé les valeurs fournies par les différents jaugeages effectués sur le terrain aux valeurs données dans la banque HYDRO sur la période 1975-2004. Il est en effet intéressant de voir la qualité de ces données sachant que les débits dans les années 75 étaient très probablement calculés de façon différente.

Nous avons ensuite étudié la différence entre le débit obtenu lors du jaugeage et le débit rentré dans la banque HYDRO (qui est appelé dans la suite 'erreur') (**Figure 13**).



**Figure 13 :** Différence relative  $Q_{\text{hydro}} - Q_{\text{jaugeage}}$  en fonction du débit jaugé

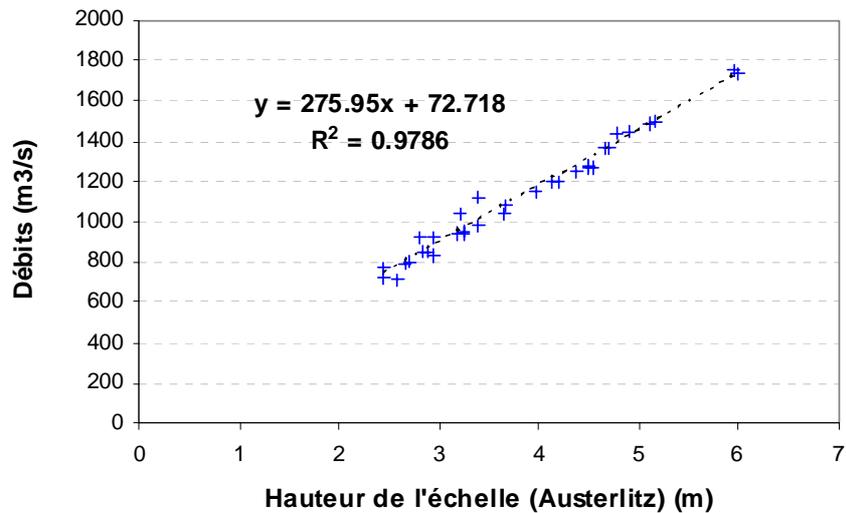
On retrouve ici le fait que l' 'erreur' relative est beaucoup plus faible pour les forts débits. L'étude de cette 'erreur' en fonction du temps est aussi très intéressante (**Figure 14**). On voit en effet que l'erreur diminue au fil du temps, ce qui est certainement dû à une amélioration des jaugeages, notamment grâce au passage des jaugeages réalisés au moulinet aux jaugeages ADCP.



**Figure 14 :** « Erreur » en fonction du temps

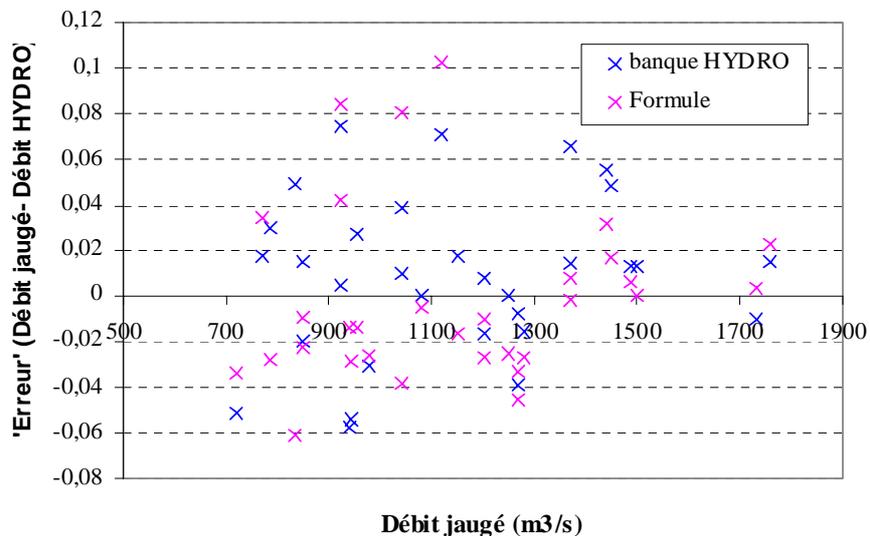
- Critique plus particulièrement des débits supérieurs à 600 m<sup>3</sup>/s

Nous sommes intéressés dans cette étude essentiellement par les forts débits. Nous allons donc nous pencher plus particulièrement sur ces débits. Nous avons vu précédemment qu'à partir d'une cote de 200 cm à l'échelle de Paris-Austerlitz, la courbe de tarage peut être assimilée à une droite (**Figure 15**).



**Figure 15** : courbe de tarage pour les forts débits

A partir des cotes observées en jaugeage, nous avons utilisé cette formule afin de recalculer un débit (uniquement pour des cotes supérieures à 250 cm) que nous avons comparé au débit de la banque HYDRO (Figure 16), l'idée étant éventuellement de corriger les débits de la banque HYDRO qui sont incertains par leur mode de calcul. Nous avons ensuite calculé l'erreur que nous obtenions par rapport au débit jaugé. Nous n'obtenons finalement pas de gain significatif en qualité de données, et nous garderons donc les débits de la banque HYDRO.



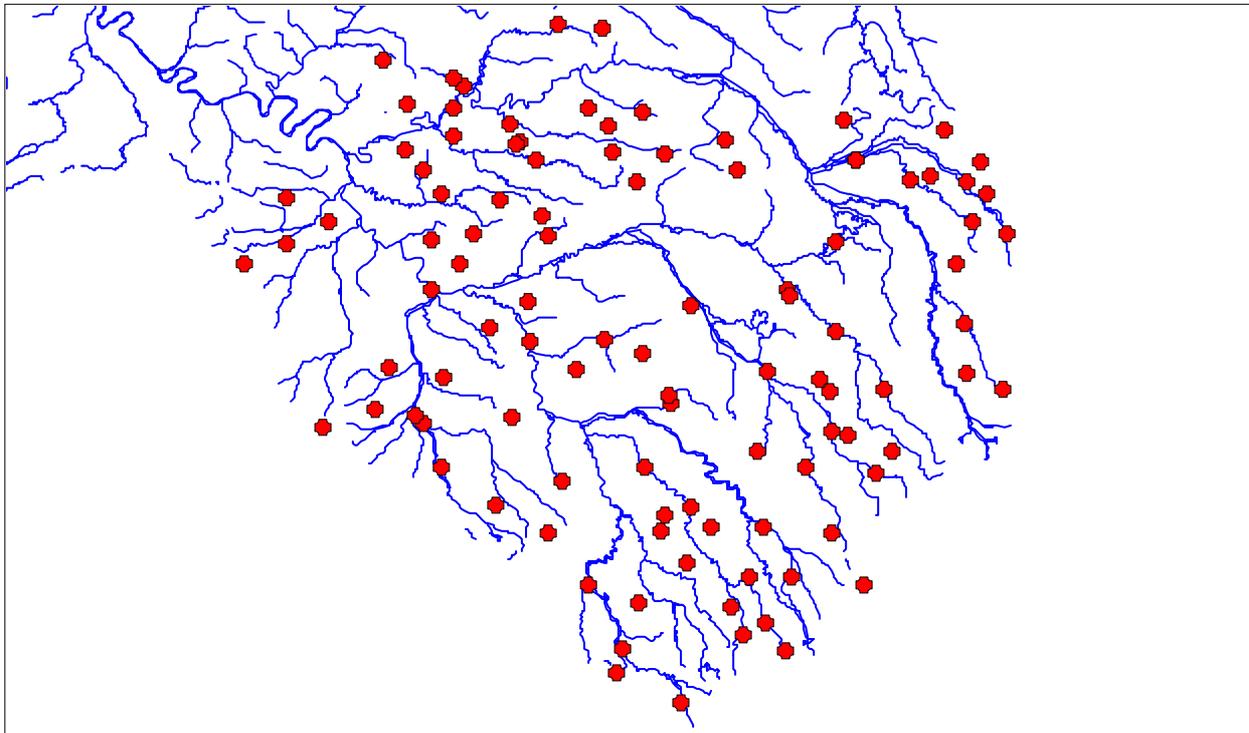
**Figure 16** : comparaison des débits calculés avec formule et débits de la banque HYDRO

Nous avons aussi par ailleurs utilisé cette formule pour repasser des hauteurs aux débits pour les cas de forts débits.

## 2.2 Données météorologiques

### 2.2.1 Inventaire : Pluie + Evapotranspiration potentielle

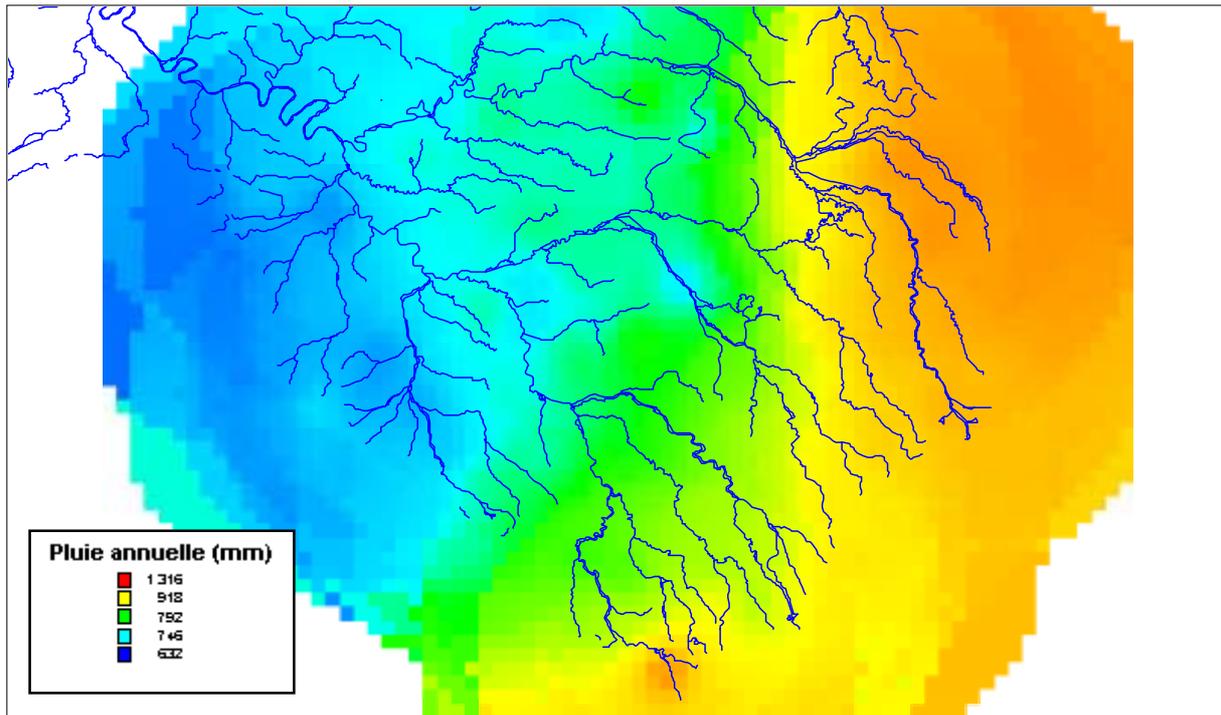
Nous avons utilisé 96 stations gérées par Météo France sur le bassin amont de la Seine, ce qui correspond à une densité d'une station pour 470 km<sup>2</sup>. Les mesures réalisées sont stockées dans la banque PLUVIO de Météo France. Nous avons ici aussi utilisé des données au pas de temps journalier. Nous nous servons des valeurs d'ETP (calculées par la formule de Penman) fournies par Météo France sur 10 sites. Par contre, ces données sont des moyennes décadales interannuelles, et à partir de ces valeurs décadales, un lissage polynomial a été effectué afin d'obtenir des valeurs journalières. Pour passer ensuite au pas de temps horaire, on répartit le cumul journalier d'ETP entre 8h et 20h suivant une clé de répartition calculée à partir d'un arc de parabole symétrique autour d'un maximum à 14h. Le reste de la journée ; l'ETP est considérée comme nulle. D'autre part, il est important de noter que, dans le modèle, on rentrera chaque année les mêmes valeurs d'ETP, ce qui peut se justifier par le fait que les modèles utilisés par la suite sont relativement peu sensible à l'entrée ETP (Andreassian et al, 2004). La position de ces postes est présentée [Figure 17](#).



**Figure 17** : position des pluviomètres utilisés dans cette étude

### 2.2.2 Analyse de la pluviométrie du bassin de la Seine

Nous ne pouvons pas tester la qualité des données de chaque poste étant donné la quantité de postes. Nous nous contenterons donc juste d'analyser les données utilisées. Nous avons réalisé des cartes des champs de précipitation grâce au logiciel 'Mapinfo' ([Figure 18](#)).



**Figure 18** : champ des cumuls annuels de précipitation sur le bassin de la Seine

On peut voir que l'on a un gradient sud-est/nord-ouest, avec une pluviométrie plus importante vers l'est. Ce gradient peut être corrélé au gradient topographique que l'on a sur le bassin. Les variations annuelles sont relativement faibles et l'on retrouve les caractéristiques d'un 'climat océanique dégradé' avec des précipitations qui sont fréquentes mais généralement faibles. A la station de Paris-Montsouris, la moyenne annuelle des précipitations de situe aux environs de 650 mm avec un nombre moyen de jours de pluie (précipitation supérieure à 1mm) de 111. L'année la plus sèche a été 1921 avec 267 mm et la plus humide 2000 avec 900 mm.

Une étude de la pluviométrie sur chacun des sous-bassins de la Marne et de la Seine montre par ailleurs des pluviométries assez corrélées (Figure 19). Ceci est confirmé par la courbe de doubles cumuls présentée en Figure 20 : même si la pluie de la Marne est un peu supérieure à celle de la Seine, l'absence de rupture de pente dans la droite montre la cohérence des deux pluies de bassin. Les différences entre le bassin de la Marne et celui de la Seine se situent surtout au niveau de la forme du bassin, avec un bassin de la Marne qui est très étiré avec un temps de transfert relativement long par rapport à un bassin de la Seine qui est moins allongé et comporte plus d'affluents.

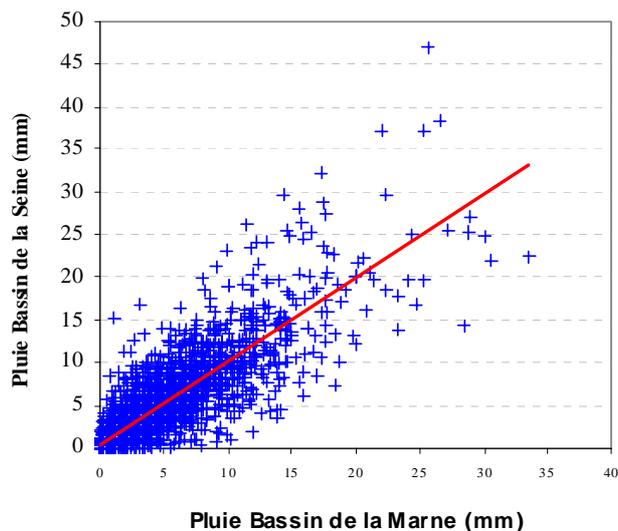


Figure 19 : pluviométries sur les sous-bassins de la Seine et de la Marne (pas de temps journalier ; période 1988-2001)

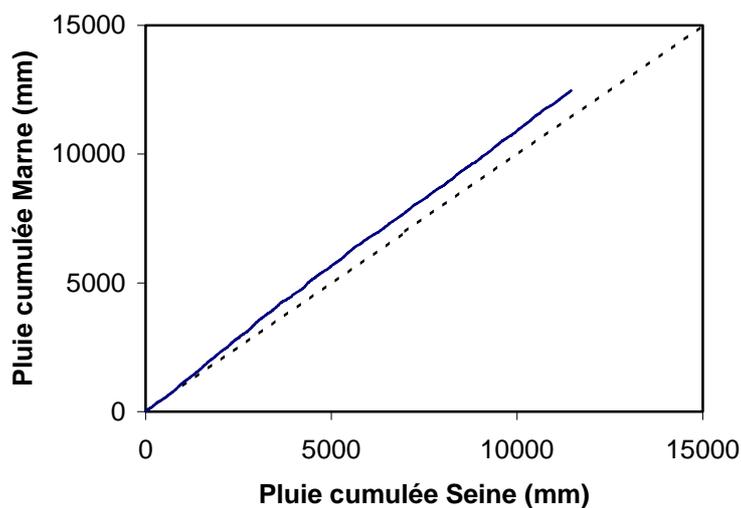


Figure 20 : comparaison des pluies cumulées de la Seine et de la Marne sur la période 1988-2001

### 3 Méthodologie et outils utilisés

#### 3.1 Rappels bibliographiques sur les modèles pluie-débit

##### 3.1.1 Définition générale

Les modèles pluie-débit sont un type particulier des modèles hydrologiques permettant de transformer les pluies en débit. Pour cela, on a des variables d'entrée que sont les précipitations, l'évapotranspiration potentielle, et éventuellement des descripteurs du bassin

tels que des données de topographie, de végétation, d'altitude..., la sortie étant le débit à l'exutoire.

Ces modèles ont l'avantage de remonter aux pluies, et sont donc censés gagner en délai de prévision par rapport à des modèles hydrauliques s'appuyant sur des propagations de débits.

Parmi les applications possibles des modèles pluie-débit, on trouve :

- la prédétermination des crues ou des étiages qui va permettre notamment une optimisation du dimensionnement de certains ouvrages hydrauliques
- La simulation qui va permettre de reconstituer des chroniques de débits manquantes à partir des informations pluviométriques
- la détection de la non-stationnarité du comportement hydrologique sous l'effet du changement climatique ou de l'évolution de l'occupation du sol
- la prévision des crues qui va être l'objet de cette étude ou bien encore des étiages

Il existe de nombreux modèles reliant donc la pluie au débit dont une classification sommaire est proposée ci-dessous.

### 3.1.2 Les différents types de modèles existants

#### ➤ les modèles « boîte noire »

Ils se caractérisent par un lien purement mathématique entre les variables d'entrées (précipitations, ETP...) et de sortie (débits). Box et Jenkins ont été les premiers à développer de tels modèles (Box et Jenkins, 1976). On a par exemple les modèles ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with exogenous inputs). Ils sont cependant limités par le fait qu'ils sont linéaires, et ne sont donc pas adaptés pour représenter la transformation pluie-débit qui est non linéaire. Parmi ces modèles « boîte noire », on a aussi les réseaux de neurones artificiels (RNA), qui ont été conçus initialement pour modéliser le fonctionnement des neurones du cerveau humain. Ceux-ci par contre sont bien non-linéaires mais ont l'inconvénient de comporter beaucoup de paramètres. Il existe bien d'autres modèles « boîte noire » : DPFT (différentielle 1<sup>ère</sup> de la fonction de transfert), Tsykin...

#### ➤ les modèles 'à réservoirs'

On trouve aussi bien des modèles conceptuels que des modèles empiriques. Ces modèles correspondent en fait à une décomposition des phénomènes en différents processus (qui correspondent à une réalité physique dans le cas des modèles conceptuels) qui sont souvent modélisés par des réservoirs qui se vident et se remplissent en fonction de paramètres caractéristiques d'un système hydrologique.

#### ➤ Modèles physiques

Ceux-ci tentent de modéliser les phénomènes par les équations réelles d'écoulement (Saint-Venant, Richards...) en discrétisant le bassin versant et en appliquant ces équations sur chaque maille. L'inconvénient est qu'une telle modélisation nécessite une quantité énorme de paramètres à mesurer sur le terrain.

Pour la suite, nous nous intéresserons essentiellement à des modèles ‘à réservoirs’ relativement simples. En effet, les modèles physiques sont trop lourds à mettre en œuvre, notamment en contexte de prévision temps réel, et le gain d’efficacité par rapport à des modèles à réservoirs est minime. Nous testerons également des réseaux de neurones pour avoir les résultats d’un autre type de modélisation pour servir de référence.

### 3.1.3 Mise en œuvre de ces modèles

#### ➤ En contexte de simulation

On a d’abord une première *phase de calage* (optimisation) des paramètres. Le calage correspond à la détermination de la valeur optimale des paramètres du modèle, en optimisant une fonction objectif qui peut être de différentes formes. Une fois le modèle calé, on a une phase dite de *contrôle*. Cette phase consiste à faire tourner et évaluer le modèle sur une autre période de temps que celle où a été calé le modèle. Afin d’évaluer le modèle, différents critères peuvent être utilisés comme par exemple:

- le critère de Nash défini par la suite
- le critère ‘bilan’ qui correspond au rapport du volume total écoulé estimé sur le volume total écoulé observé
- le critère ‘volume en crues’ qui correspond au volume d’eau en crue observé sur ce même volume calculé. Il faut auparavant définir un seuil de débit (C) à partir duquel on considère qu’il y a un épisode de crue

#### ➤ En contexte de prévision

La phase de calage décrite précédemment permet de déterminer les paramètres du modèle. On peut donc maintenant utiliser ces modèles afin de prévoir les crues, c’est-à-dire de prévoir le débit à l’instant  $t + \Delta t$  à partir de l’instant  $t$ . Pour cela, nous allons, à chaque pas de temps, *remettre à jour* le modèle à l’instant  $t$  par rapport aux valeurs de débit observées. Pour cela, il est possible d’agir à différents niveaux :

- on peut corriger les données pluviométriques
- on peut modifier l’état du modèle en jouant sur le niveau des réservoirs (états du modèle)
- on peut modifier les paramètres du modèle
- on peut corriger les données de sortie du modèle en prévoyant l’erreur du modèle

## 3.2 Outils et méthodes utilisés plus particulièrement dans cette étude

### 3.2.1 Modèles utilisés dans cette étude

Nous utiliserons quatre modèles dans cette étude. Ces modèles ont des principes similaires de fonctionnement :

- ils reçoivent en entrée des données de pluie et d’ETP
- ils ont une structure identique composée d’un module de production qui va répartir l’eau entre les différents réservoirs du modèle et un module de routage

qui assure la distribution de l'eau qui alimente le débit au cours du temps en faisant intervenir un décalage temporel entre pluie et débit

D'autre part, nous utiliserons ces modèles au *pas de temps journalier*, pas de temps acceptable sur la Seine qui présente une dynamique relativement lente.

Ci-dessous sont présentées les particularités de chaque modèle :

▪ **le modèle GR4J** :

Le modèle pluie-débit journalier du 'Génie Rural' a été développé au Cemagref au cours des années 90 (Edijatno et Michel, 1989; Edijatno, 1991; Perrin, 2000). Ce modèle se caractérise par son faible nombre de paramètres qui est de quatre :

- $X_1$  : capacité du réservoir de routage
- $X_2$  : Capacité du réservoir de production
- $X_3$  : Paramètre d'échanges en eau
- $X_4$  : Temps de base des hydrogrammes

Le modèle et les équations le régissant sont explicités plus en détail en Annexe 2.

▪ **Deux versions simplifiées de GR4J**

Nous avons testé deux versions à trois paramètres mises au point au Cemagref par Tangara en 2004. L'idée ici était d'utiliser des modèles simples qui peuvent être plus performants en contexte de prévision. L'architecture générale de ces deux versions est présentée ci-dessous.

Les spécificités de chacune des versions sont les suivantes :

➤ **1<sup>ère</sup> version :**

Les différences par rapport à la version classique de GR4J se situent au niveau de la branche rapide d'écoulement qui a été supprimée, ainsi qu'au niveau du terme d'échange qui a aussi été supprimé. L'intérêt de ce modèle est le fait qu'il n'y ait qu'une seule branche. En effet on peut alors utiliser une méthode de mise à jour très simple (décrite ci-dessous) qui ne serait pas possible avec deux branches. L'idée était d'essayer de répondre aux mauvaises performances obtenues par GR4J en prévision par une méthode de mise à jour très simple sur un modèle lui-même simple.

➤ **2<sup>e</sup> version :**

Ce modèle se rapproche sensiblement de la première version. Les différences par rapport à celle-ci sont :

- le réservoir de production de GR4 a une capacité fixée à 650 mm
- on a toujours une seule branche d'écoulement mais on a un coefficient multiplicatif sur la pluie efficace qui remplace la fonction d'échange
- l'hydrogramme unitaire est symétrique
- le réservoir de routage est quadratique

▪ **TOPMODEL**

Ce modèle (Beven et Kirkby, 1979) est basé sur le principe des zones contributives à l'écoulement qui sont fixées à partir de la topographie : des zones à faibles pentes atteignent

plus facilement la saturation et contribuent donc au ruissellement plus rapidement par rapport aux zones de crêtes. La version utilisée ici comporte huit paramètres dont deux utilisés afin de remplacer l'indice de topographie calculé ordinairement à partir du modèle numérique de terrain :

- X<sub>1</sub> : Capacité du réservoir de routage
- X<sub>2</sub> : Paramètres de vidange
- X<sub>3</sub> : Capacité du réservoir d'interception
- X<sub>4</sub> : Délai
- X<sub>5</sub> : Paramètre d'indice topographique
- X<sub>6</sub> : Paramètre d'indice topographique
- X<sub>7</sub> : Paramètre d'évaporation
- X<sub>8</sub> : Paramètre d'évaporation

Le modèle et les équations le régissant sont explicités plus en détail en Annexe 2.

### ▪ Réseaux de neurones

Nous utiliserons ce modèle directement en contexte de prévision. L'idée était d'utiliser quelque chose de très différent des modèles pluie-débit précédents afin d'avoir un autre référentiel. Le réseau utilisé est un perceptron multi-couche. La calibration se fait par la méthode de Levenberg-Marquardt avec régulation Bayésienne (Anctil et al, 2003).

#### 3.2.2 Méthode d'optimisation des paramètres utilisée : la méthode 'pas à pas'

La méthode d'optimisation 'pas à pas' a été utilisée (Michel, 1989; Nascimento, 1995). C'est une méthode locale qui va optimiser une fonction objectif (qui va correspondre ici à une maximisation du critère de Nash présentée ci-dessous). On va ainsi trouver le jeu de paramètres tel que le critère de Nash soit maximal. Cette méthode fonctionne de manière itérative en partant d'un vecteur de paramètres de départ, et en augmentant ou en diminuant chaque paramètre de façon à avoir une valeur maximale pour le critère de Nash (Nash et Stueliffe, 1970).

Ce critère est de la forme :

$$T = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

où    Q<sub>j</sub> : débit mesuré  
        $\hat{Q}_i$  : débit calculé  
        $\bar{Q}$  : débit moyen mesuré  
       n : nombre de pas de temps

#### 3.2.3 Méthodes de mise à jour utilisées dans cette étude

Différentes méthodes de mise à jour ont été testées, certaines étant très simples et d'autres beaucoup plus complexes afin d'avoir un « panorama » des performances des différentes méthodes de mise à jour.

➤ **la méthode de Yang (1993)**

Cette méthode (Yang, 1993; Yang et Michel, 2000) a été développée dans sa thèse par Yang (1993) et améliorée par la suite. Dans un premier temps, étant donné qu'il peut exister un biais systématique, on corrige les débits calculés par une relation linéaire :

$$Q_j = \alpha + \beta \cdot C_j + \varepsilon \quad \text{où : } Q_j : \text{débit observé}$$
$$C_j = \alpha + \beta \cdot C_{aj} \quad C_j : \text{débit calculé par le modèle}$$
$$\varepsilon : \text{terme d'erreur}$$
$$\alpha \text{ et } \beta : \text{paramètres d'ajustement linéaire}$$

Ensuite, on a une mise à jour itérative des paramètres sur une période antérieure à l'instant de la mise à jour par rapport à l'instant de la prévision. A chaque itération, la valeur du paramètre est incrémentée de  $\Delta x$  (cette variation étant fonction de l'écart type du paramètre), le modèle est alors réévalué. Le nombre d'itérations est volontairement limité afin de limiter une éventuelle divergence des paramètres.

Deux variantes de cette méthode ont été testées :

- une mise à jour des *paramètres* des modèles
- une mise à jour des *états* des modèles

➤ **Mise à jour par report des dernières erreurs**

Cette mise à jour très simple consiste à reporter l'erreur obtenue à l'instant de la prévision. Cette méthode de mise à jour de report de l'erreur peut s'appliquer sous deux formes :

- (a) l'erreur est reportée intégralement, mais plus au-delà d'un certain seuil qui va correspondre à une erreur maximale
- (b) seulement un pourcentage de l'erreur est reporté

➤ **Mise à jour directe à partir de versions simplifiées de GR4J**

Ces modèles simplifiés ont la particularité de ne présenter qu'une seule branche d'écoulement. Ceci permet d'effectuer une mise à jour directe du réservoir de routage en fonction du débit observé à l'instant de prévision. On peut noter aussi que les paramètres sont optimisés en mode prévision, la fonction objectif utilisée est en effet le critère de persistance défini par la suite. Les paramètres sont donc dépendants de l'horizon de prévision.

On peut par ailleurs noter que les réseaux de neurones sont un modèle qui n'est pas mis à jour étant donné qu'il est utilisé et calé directement en contexte de prévision (il reçoit le débit aux pas de temps précédents comme entrée).

### 3.2.4 Critères d'évaluation des performances des modèles utilisés dans cette étude

En phase de simulation, nous utiliserons *le critère de Nash* défini précédemment afin d'évaluer la pertinence des différents modèles.

En phase de prévision, nous utiliserons *le critère de persistance G*, défini par Wallis et Todini (Wallis et Todini, 1975) qui compare la prévision faite à une prévision naïve qui considère une invariance du débit entre  $t$  et  $t + \Delta t$ .

$$G = 1 - \frac{\sum_t (Q(t + \Delta t) - C_B(t + \Delta t)_i)^2}{\sum_t (Q(t + \Delta t) - Q(t))^2} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} Q(t+\Delta t) : \text{débit observé à } t+\Delta t \\ C_B(t+\Delta t) : \text{débit prévu par le modèle pour} \\ \text{l'instant } t+\Delta t \end{array}$$

➤ **Conclusion partielle : démarche générale dans les tests pour la suite**

Dans un premier temps, nous allons évaluer les différents modèles en contexte de simulation (à l'aide du critère de Nash) afin d'essayer de déterminer lequel des modèles reproduit le mieux le comportement du bassin. Nous essaierons aussi par ailleurs de déterminer si la semi-distribution apporte un gain ou non

Dans un second temps, nous allons tester ces modèles en prévision en utilisant les différentes méthodes de mise à jour et les comparer d'une part aux résultats de la DIREN mais aussi aux résultats obtenus avec les réseaux de neurones

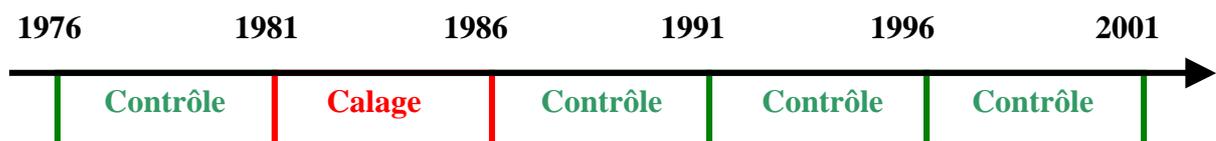
## 4 Evaluation des modèles en simulation

### 4.1 Introduction et démarche de la phase de simulation

Le bassin de la Seine en amont de Paris peut être divisé en deux sous-bassins principaux que sont la Marne et la Seine. Chacun a à priori un comportement particulier, notamment à cause de leur différence de forme des bassins versants, celui de la Marne étant particulièrement allongé. On pourrait donc supposer qu'une approche semi-distribuée serait plus judicieuse. Mais cela n'a pas été la démarche utilisée. En effet, nous avons cherché à aller depuis les méthodes les plus simples vers les plus compliquées. Nous avons donc testé d'abord une approche globale, ce qui est peu classique pour un aussi grand bassin, avant de s'orienter vers des approches plus distribuées.

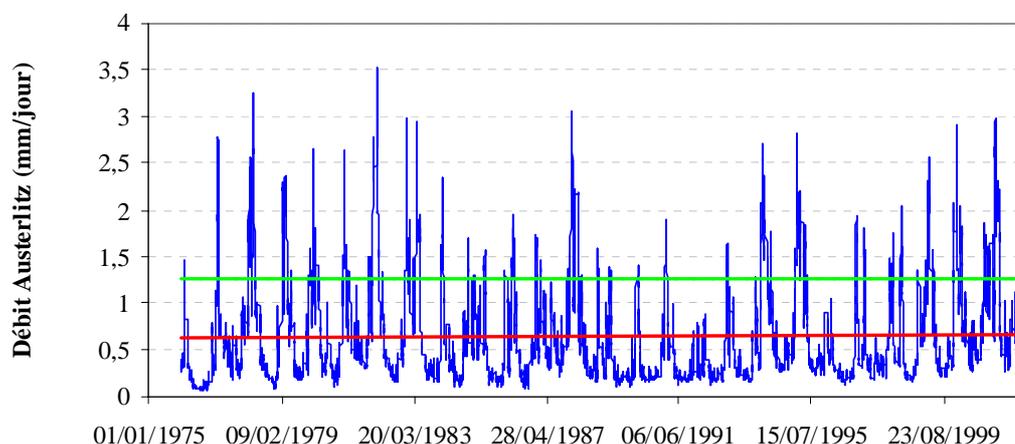
### 4.2 Méthode d'évaluation des modèles utilisée : un 'calage - contrôle systématique'

Nous avons d'abord essayé de déterminer le modèle reproduisant le mieux le comportement des bassins. Nous avons donc testé les différents modèles en simulation. Nous avons réalisé un '**calage-contrôle systématique**' (**Figure 21**) ici sur des périodes de 5 ans. Cette méthode consiste à séparer la période étudiée : 1975-2001 en cinq sous-périodes de 5 ans. On réalise le calage des paramètres sur l'une de ces sous-périodes et l'on contrôle sur les autres. On réalise ainsi un calage sur chacune des sous-périodes, puis on fait la moyenne des critères de Nash obtenus. Nous avons d'autre part choisi de réaliser l'optimisation sur les débits, ce qui donne plus de poids aux débits de crue qui nous intéressent ici.



**Figure 21** : graphique montrant une phase du « calage-contrôle systématique »

Nous avons par ailleurs décidé de caler les modèles au-dessus d'un certain seuil de débit que nous avons fixé à 0,633 mm/jour (321 m<sup>3</sup>/s), ce qui correspond au débit moyen sur la période 1975-2001 (indiqué par la droite rouge sur la **Figure 22**), afin de s'affranchir de l'effet néfaste des nombreuses écluses et barrages présents le long du cours de la Seine. Par contre, nous avons contrôlé le modèle sur l'ensemble des débits, souhaitant avoir un modèle performant dans son ensemble et non uniquement sur les débits élevés.



**Figure 22** : chronique de débit à Paris-Austerlitz (droite rouge : débit moyen ; droite verte : seuil de crue)

### 4.3 Résultats obtenus en simulation sur le bassin entier

#### 4.3.1 Performances des modèles classiques GR4J et TOPMODEL

Nous avons d'abord testé les modèles sur le bassin entier de la Seine en amont de Paris. Nous avons obtenu les résultats suivants (en terme de critère de Nash) :

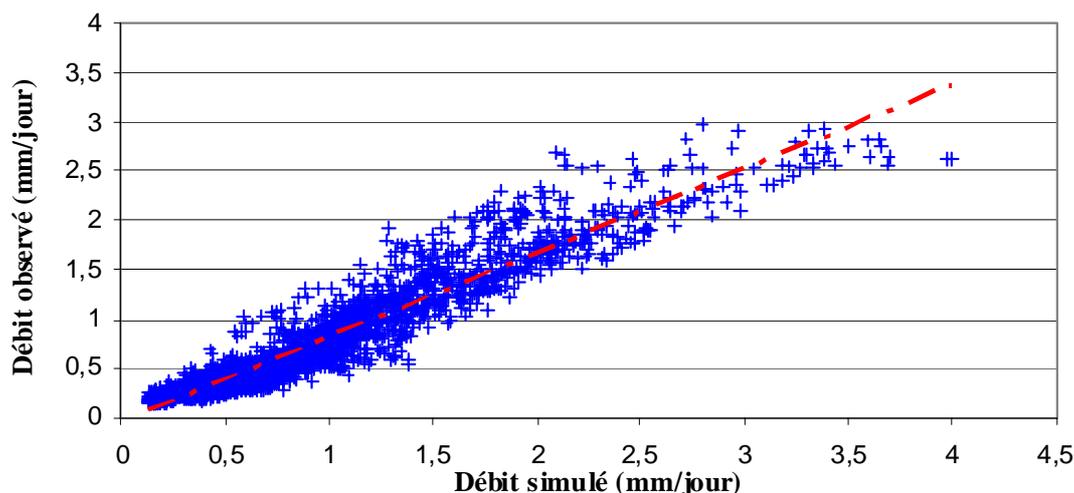
TOPMODEL	<b>86,2%</b>
GR4J	<b>82,7%</b>

**Tableau 4** : résultats obtenus sur le bassin entier en simulation (moyenne des critères de Nash obtenus en calage-contrôle systématique)

On peut donc voir que TOPMODEL apparaît plus performant que le modèle GR4J. Mais l'un des problèmes que nous avons rencontré, en contrôle, est une légère surestimation des forts débits (**Figure 23**).

On peut penser que cette surestimation est due à la mise en place du barrage Aube en 1990. En effet, on obtient cette surestimation en calant sur 1975-1990 et en contrôlant sur 1990-2001. Une étude plus approfondie réalisée lors du travail de DEA de Moulin (2003) a permis de montrer l'influence de la mise en place du barrage Aube. Celle-ci est très importante à l'aval immédiat du barrage, mais reste relativement ténue au niveau de Paris.

Il nous a donc à priori été impossible de nous affranchir de cette surestimation, mais la méthode de Yang permet en partie de corriger ce biais.



**Figure 23** : comparaison des débits simulés (TOMODEL) et observés à Paris Austerlitz

(débits obtenus en contrôle sur la période 1988-2001)

- Essai de compréhension du fonctionnement de TOPMODEL sur le bassin de la Seine

Un calage de TOPMODEL sur la période 1975-2001 donne les paramètres et les niveaux de réservoirs suivants (**Tableau 5**):

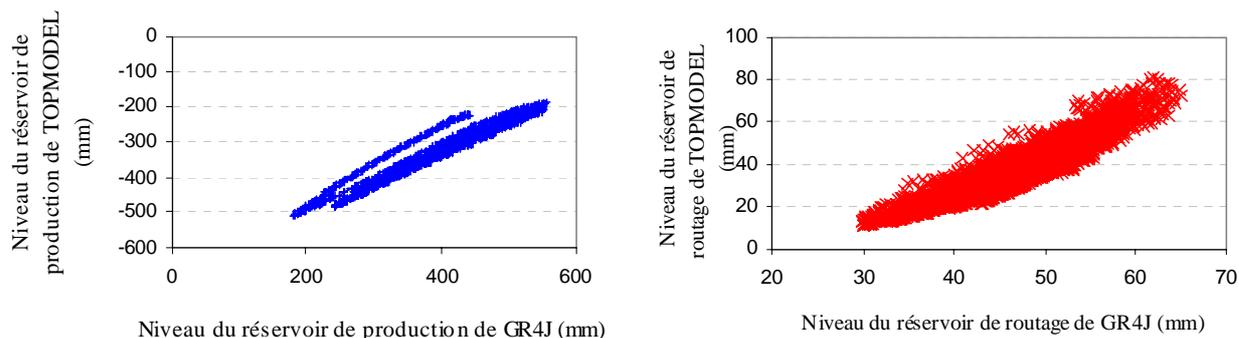
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
1790	0	0	3,46	103,78	-2,31	142,04	-2,85

**Tableau 5** : paramètres obtenus en calant le modèle sur la période 1975-2001

- Niveau moyen du réservoir de routage : 33,6 mm
- Niveau moyen du réservoir sol : -324 mm
- Niveau moyen du réservoir d'interception : 0 mm

Nous pouvons essayer d'appréhender le fonctionnement de TOPMODEL plus particulièrement sur le bassin de la Seine. Nous pouvons noter plusieurs choses. D'abord, le niveau du réservoir d'interception est toujours nul, du fait d'une capacité ( $X_3$ ) nulle avec donc une simple phase de neutralisation de la pluie par l'ETP comme dans GR4J. Ensuite, une étude du débit sortant du réservoir de production montre que celui-ci est également très proche de zéro. Ce réservoir, et la branche entière, ne sert finalement au système qu'à ajuster son bilan d'eau par le terme d'évaporation qui en sort avec un fonctionnement assez proche du réservoir de production de GR4J.

On a finalement un modèle qui se rapproche très fortement d'un modèle GR4J, avec donc une interception qui est identique, et des réservoirs (routage et production) qui ont un comportement similaire (**Figure 24**). Le graphique ci-dessous nous montre bien cette similitude de comportement entre les réservoirs respectifs. Les seules différences qui subsistent au final entre les deux modèles sont les termes de percolation, d'échange ainsi que la branche d'écoulement direct du modèle GR4J. On peut toutefois noter que le terme de percolation reste très faible et n'a donc pas de rôle très important.



**Figure 24** : corrélation entre les réservoirs de routage et production des modèles GR4J et TOPMODEL

#### 4.3.2 Performances des versions simplifiées de GR4J

Nous avons réalisé des ‘calages-contrôles systématiques’ en utilisant la même méthode que précédemment. Nous avons obtenu les résultats suivants :

	Nash(Q)
<b>Version classique GR4J</b>	82,8
<b>TOPMODEL</b>	86,1
<b>Version simplifiée 1 de GR4J</b>	84,4
<b>Version simplifiée 2 de GR4J</b>	86,8

**Tableau 6** : performances des versions simplifiées de GR4J en simulation

Nous nous attendions peut être à avoir de bons résultats de ces modèles simplifiés en prévision, mais pas en simulation. Or, il se trouve que ces modèles se sont montrés plus performants que la version classique de GR4J en arrivant, pour la version 2 à des performances très similaires à TOPMODEL.

Par ailleurs, ceci souligne encore une fois les similitudes observées en simulation entre GR4J et TOPMODEL, et l’on peut penser que les problèmes de cette version classique se situent au niveau de la branche rapide d’écoulement sur laquelle nous avons joué à travers ces modèles simplifiés.

#### 4.4 Impact de la pluviométrie

Nous avons ensuite voulu tester l’impact de la variabilité pluviométrique sur les performances des modèles. Ceci ayant par ailleurs aussi pour objectif de répondre à une demande concrète de la DIREN, à savoir si les performances des modèles sont significativement dégradées si l’on diminue à 40 le nombre de pluviomètres (chiffre qui correspond au nombre de pluviomètres actuellement disponibles en temps réel par la DIREN).

On obtient, en terme de critère de Nash, les résultats suivants :

	totalité	amont	aval	40 pluvios	10 pluvios
<b>TOPMODEL</b>	86,2	77,7	79,2	86,2	85,4
<b>GR4J</b>	82,7	86,5	67,8	82,2	81,5

**Tableau 7** : moyenne des critères de Nash (calage-contrôle systématique sur 1975-2001) obtenus en modifiant l’information pluviométrique

Remarque: les pluviomètres sont répartis sur le bassin de façon relativement homogène. Les pluviomètres amonts correspondent donc aux 50 pluviomètres les plus en amont du bassin et les pluviomètres ‘avals’ aux 50 les plus en aval.

Les résultats intéressants à tirer de ces résultats sont que :

- une réduction du nombre de pluviomètres (repartis cependant de façon homogène) ne nuit pas significativement à la qualité du modèle.
- étrangement, GR4J obtient de meilleurs résultats en n'utilisant que les pluviomètres amont ! Les explications de cette performance améliorée sont délicates à identifier.

#### 4.5 Passage d'un modèle global à un modèle semi-distribué

La Seine à l'amont de Paris reçoit un affluent majeur, la Marne. Les événements de crue n'étant pas forcément concomitants sur les deux cours d'eau, nous avons voulu essayer de voir si une prise en compte séparée permettait d'améliorer les résultats par rapport à une prise en compte globale.

Nous avons donc choisi de diviser le bassin de la Seine en deux sous-bassins : celui de la Marne et celui de la Seine (**Tableau 2**). L'idée étant de faire tourner les modèles sur chacun des sous-bassins puis d'additionner les débits ainsi obtenus, en incorporant un temps de propagation entre les stations de ces sous-bassins et la station de Paris-Austerlitz.

Dans un premier temps, nous avons utilisé le temps de propagation déterminé par le bureau d'étude Safège qui donne les chiffres suivants :

- transfert Gournay-Austerlitz : 1 jour
- transfert Alfortville-Austerlitz : 0,5 jour

Nous avons finalement choisi 1 jour entre Gournay et Austerlitz et 0 jour entre Alfortville et Austerlitz. Nous aurions pu prendre à chaque fois 1 jour, les résultats auraient été très similaires. Les performances des modèles sont finalement assez peu sensible au délai introduit.

Nous avons donc finalement obtenu les résultats suivants en n'incorporant pas de délai :

	Seine	Marne	Austerlitz	
			Global	Semi-distribué
<b>TOPMODEL</b>	84,8	83,1	86,2	80,5
<b>GR4J</b>	81,8	77,2	82,8	81,0

**Tableau 8 : moyenne de critères de Nash obtenus en contrôle sur différentes périodes en semi-distribué**

On voit ici que l'approche semi-distribuée ne semble pas améliorer significativement les performances, et peut même les dégrader. Nous avons donc décidé pour la suite de garder une approche globale. On peut noter par ailleurs que la Marne apparaît plus difficile à modéliser.

#### 4.6 Tentative de prise en compte de l'influence des barrages

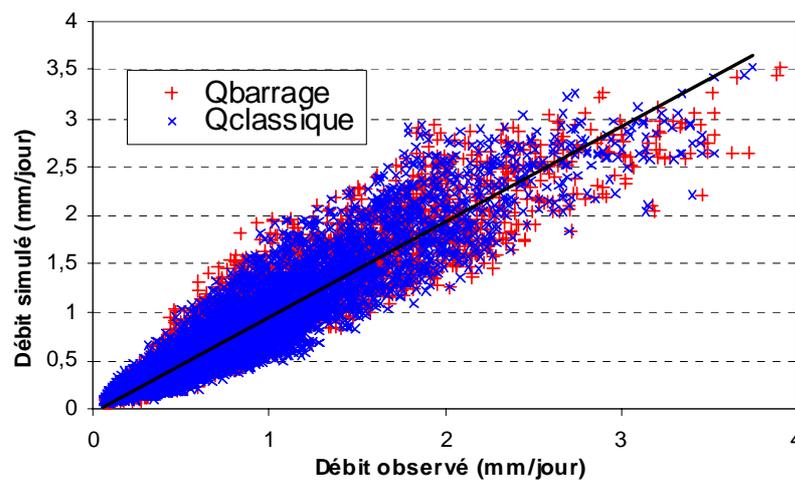
Une étude de DEA permettant de prendre en compte l'influence des barrages dans le modèle GR4J avait été réalisée l'an dernier (Moulin, 2003). La présence des barrages a été modélisée en instaurant différents points de prélèvements et de relargage au niveau des

différents réservoirs du modèle en fonction des niveaux de remplissage des barrages. Cette étude a pu montrer une légère amélioration des performances. Mais cette amélioration se fait essentiellement en période d'étiage, et finalement assez peu en période de crue où les barrages sont moins 'visibles'. Un calage-contrôle systématique sur 1975-2001 par périodes de 5 ans donne les résultats suivants :

	GR4J	GR4J barrage
Nash (Q) (%)	82,8	85,8

**Tableau 9** : comparaison des performances de GR4J avec et sans module barrage

On peut voir que le module 'barrage' apporte une légère amélioration. On peut voir aussi sur le graphique ci-dessous que l'utilisation de ce module ne semble pas avoir d'effet sur le biais systématique observé (**Figure 25**). Cette amélioration étant relativement faible, nous n'avons pas poursuivi dans cette voie.



**Figure 25** : comparaison des débits simulés par GR4J avec et sans module de barrage

#### 4.7 Conclusion des résultats en simulation

Il semble donc que des modèles classiques, TOPMODEL soit le modèle le plus performant, et qu'une approche semi-distribuée n'apporte pas de gain significatif. Un autre résultat intéressant est le paramétrage que l'on obtient pour ces modèles. En effet, TOPMODEL ajuste ses paramètres d'une façon telle que son comportement se rapproche très fortement du comportement de GR4J. On peut alors se demander si la structure du modèle est réellement importante, et si le paramétrage n'est pas plus important, et que finalement, les modèles ajustent leurs paramètres de façon à avoir un comportement similaire. C'est un fait souvent largement négligé en modélisation, que les modèles, grâce à leurs paramètres, dispose d'une forte capacité d'adaptation, cette adaptabilité évitant le recours à de nombreux modèles différents lorsque l'on travaille sur des bassins différents. On peut aussi noter les très bonnes performances des versions simplifiées de GR4J, qui par leurs simplifications, ne font finalement que se rapprocher plus encore, par leur structure, de TOPMODEL.

## 5 Résultats obtenus en prévision

### 5.1 Introduction et démarche de la phase de prévision

Précédemment, nous avons testé les différents modèles sur le bassin de la Seine afin de déterminer les plus performants. Nous allons maintenant passer en phase de prévision. La démarche adoptée a été de partir des résultats obtenus par la DIREN pour voir ce qui est réalisé et ce qui a besoin d'être fait ; puis nous présenterons nos résultats pour voir ce qu'ils apportent par rapport à ceux de la DIREN, en testant différentes méthodes de mise à jour. L'idée est aussi de voir si les modèles les plus performants en simulation sont aussi les modèles les plus performants en prévision. Les différentes combinaisons testées sont présentées dans le Tableau 10.

		Modèles				
		TOPMODEL	GR4J	GR4J version1	GR4J version2	Réseaux de neurones
Méthodes de mise à jour	Yang-états					
	Yang-paramètres					
	Report d'erreur					
	Directe					

**Tableau 10** : méthodes de mise à jour et modèles testés dans cette étude en contexte de prévision

Par ailleurs, pour chaque phase de prévision, nous avons testé deux scénarios de pluie :

- **pluie nulle** : nous avons supposé la pluie postérieure à l'instant de prévision nulle
- **pluie parfaite** : nous avons supposé la pluie postérieure à l'instant de prévision parfaitement connue

➤ Méthodologie utilisée :

Nous avons vu que la DIREN Ile de France réalise des prévisions à partir d'un débit correspondant à peu près à deux fois le débit moyen sur la période 1975-2001 (ce qui correspond au trait vert sur la Figure 22). Nous avons donc fixé ce même seuil comme 'seuil de crue', ce dernier correspondant au débit à partir duquel est effectuée une prévision. Le critère de persistance sera donc calculé en conséquence, et nous pouvons rappeler que ce critère de persistance sera calculé sur les crues de la période 1993-2001.

La méthodologie utilisée est donc la suivante :

- le modèle est calé sur la période 1975-1993
- le modèle est évalué en prévision à l'aide du critère de persistance sur les crues entre 1993 et 2001



### 5.2 Constat des résultats obtenus par la DIREN Ile de France

Les prévisions de la DIREN ne sont réalisées qu'à partir d'un seuil précis qui correspond à 3,2 m à l'échelle d'Austerlitz, et des prévisions n'ont pas été réalisées sur toutes les crues

(nous avons pu retrouver dans les archives 207 prévisions). Si l'on calcule un critère de persistance sur ces événements, on obtient 37%, ce qui est bon pour un horizon de prévision de un jour. L'idée de cette étude n'est donc pas forcément d'améliorer la prévision à 24h, mais de s'orienter vers des horizons plus grands.

### 5.3 Résultats obtenus par les différentes méthodes de mise à jour utilisant des modèles pluie-débit

#### 5.3.1 Résultats obtenus en utilisant la méthode de mise à jour de Yang

La démarche suivante a été adoptée :

- déterminer quels paramètres ou états seront mis à jours (limiter le nombre de paramètres ou états à modifier permet de limiter les problèmes de divergence)
- déterminer le recul pour l'ajustement (en jours)
- déterminer le nombre d'itérations à chaque pas de temps
- déterminer le nombre d'erreurs prises en compte

	Mise à jour sur les paramètres		Mise à jour sur les états	
	TOPMODEL	GR4J	TOPMODEL	GR4J
<b>Persistance</b>	<b>63,5</b>	38,6	46,5	36,4

**Tableau 11** : Prévisions réalisées avec un délai de 3 jours avec une pluie future supposée connue

	Mise à jour sur les paramètres		Mise à jour sur les états	
	TOPMODEL	GR4J	TOPMODEL	GR4J
<b>Persistance</b>	57,4	34,3	51,5	30,1

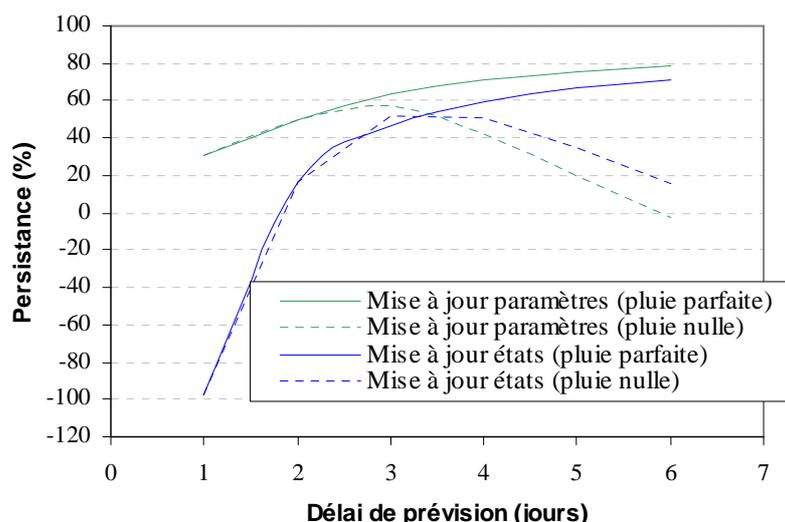
**Tableau 12** : Prévisions réalisées avec un délai de 3 jours avec une pluie future supposée nulle

Pour un horizon de prévision de 3 jours, il semble d'après le [Tableau 11](#) et le [Tableau 12](#) que TOPMODEL apparaisse plus intéressant que GR4J. Nous allons maintenant essayer de comparer les mises à jour sur les états et celle sur les paramètres avec TOPMODEL.

		Délai (jours)					
		1	2	3	4	5	6
<b>Paramètres mis à jour</b>	Pluie parfaite	30,5	49,4	63,5	70,7	75,5	78,5
	Pluie nulle	30,5	49,4	57,4	42,6	19,5	-2,4
<b>Etats mis à jour</b>	Pluie parfaite <sup>1</sup>	-97,5	16,5	46,5	59,7	67,2	71
	Pluie nulle	-97,5	16,5	51,5	51,3	34,5	15,1

**Tableau 13** : comparaison des performances de TOPMODEL avec une mise à jour sur les paramètres ou une mise à jour sur les états

<sup>1</sup> Paramétrage Yang-états : le recul pour ajustement est de 30 et le nombre de cycles de 50.



**Figure 26** : persistances obtenues pour différents délais de prévision pour les deux méthodes de mise à jour

On peut en conclure les points suivants :

- le modèle le plus performant en prévision avec la méthode de Yang est TOPMODEL, et la mise à jour sur les paramètres semble être plus efficace. On peut cependant noter que pour des délais supérieurs à 4 jours, la mise à jour sur les états apparaît légèrement meilleure dans le cas où la pluie est supposée nulle.
- le graphique montre aussi que l'on a un délai de prévision qui peut être de l'ordre de 3 jours en l'absence de prévisions de pluie (décroissance de la persistance au delà de ce délai en absence de prévision de pluie).
- on peut aussi noter que les performances à 1 jour sont peu convaincantes (persistances faibles voire négatives), mais celles-ci deviennent intéressantes à partir de 2-3 jours.

Remarque : Les modalités choisies pour la mise à jour sont les suivantes :

	<b>TOPMODEL</b>
<i>Paramètres mis à jour</i>	X3,X4,X5,X6
<i>Recul pour ajustement</i>	120
<i>Nombre d'itérations</i>	50
<i>Nombre d'erreurs</i>	1

**Tableau 14** : modalités optimales déterminées pour la prévision

- Pourquoi la mise à jour sur les paramètres apparaît plus efficace ?

On peut voir d'après le **Tableau 14** que pour la mise à jour sur les paramètres, seuls  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_5$  et  $X_6$  sont mis à jour (une étude plus approfondie montre que  $X_6$  est le paramètre essentiel dans la mise à jour et que les autres ne sont finalement pas très importants). Pour la mise à jour sur les états, on a une particularité liée au comportement du modèle sur le bassin de la Seine. On a vu en effet précédemment en simulation que le réservoir d'interception était nul en permanence, celui-ci n'est finalement pas mis à jour et le niveau de celui-ci reste constamment égal à 0. D'autre part, le niveau du réservoir de production n'est pas mis à jour. En effet, le paramètre  $X_2$  (paramètre de vidange du réservoir exponentiel) qui correspond au niveau maximal du réservoir T est nul. Or, la mise à jour du réservoir T par la méthode de Yang se fait de façon itérative avec des itérations indexées sur la valeur de  $X_2$ , les itérations sont donc nulles ici, le niveau du réservoir T n'est donc finalement pas mis à jour.

### 5.3.2 Résultats obtenus par une méthode consistant en un simple report de l'erreur entre le débit observé et le débit simulé

Nous avons appliqué uniquement cette méthode de mise à jour à TOPMODEL.

#### ➤ Résultats de la méthode (a) :

Dans cette méthode, l'erreur est reportée intégralement, mais plus au-delà d'un certain seuil qui va correspondre à une limite maximale. Nous avons fait varier le facteur multiplicatif en fonction des horizons de prévision. Nous avons alors obtenu les critères de persistance donnés dans le Tableau 15.

		<b>Délai (j)</b>					
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Persistance (%)</b>	<b>Limite supérieure</b>	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
	Pluie parfaite	28,9	51,5	65,1	72,9	78,2	81,1
	Pluie nulle	28,9	51,5	60,4	44,7	19,8	-4,2

**Tableau 15** : critères de persistance obtenus par la méthode (a)

#### ➤ Résultats obtenus par la méthode (b) :

Dans cette méthode, seulement un pourcentage de l'erreur est reporté. En laissant varier le pourcentage de l'erreur reportée en fonction du délai de prévision, on obtient les résultats suivants :

		<b>Délai (j)</b>					
		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Persistance (%)</b>	<b>% optimal</b>	100	95	90	90	85	85
	Pluie nulle	28,8	50,0	58,8	42,4	20,1	-3,6
	Pluie parfaite	28,8	50,0	63,9	71,2	76,3	79,6

**Tableau 16** : critères de persistance obtenus par la méthode (b) en optimisant le pourcentage d'erreur reporté

### 5.3.3 Résultats obtenus par la méthode utilisant des versions simplifiées de GR4J

En contexte de prévision, nous avons testé la méthode de mise à jour directe décrite précédemment. Nous l'avons par ailleurs comparée à la méthode de Yang sur les paramètres (Tableau 17).

<b>Modèle</b>	<b>Mise à jour</b>	<b>Pluies futures</b>	<b>Délai (j)</b>					
			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Version 1</b>	<i>Méthode de Yang</i>	Pluie parfaite <sup>2</sup>	4,3	44,7	61,6	69,1	74,3	77,2
		Pluie nulle	1,9	43,6	55,4	47,2	25,9	3,1
	<i>Mise à jour directe</i>	Pluie parfaite	47,0	55,7	58,4	63,8	69,7	73,4
		Pluie nulle	34,3	50,5	43,2	35,8	31,7	29,5
<b>Version 2</b>	<i>Méthode de Yang</i>	Pluie parfaite <sup>3</sup>	36,9	48,6	57,9	64,9	70,0	73,2
		Pluie nulle	37,0	47,5	49,9	38,9	16,8	-7,1

<sup>2</sup> Paramétrage de Yang: X2 et X3 sont mis à jour, le recul pour ajustement est de 20 jours, le nombre d'itérations est fixé à 50.

<sup>3</sup> Paramétrage de Yang : X3 et X4 sont mis à jour, le recul pour ajustement est de 60 jours et le nombre d'itérations est de 50.

	<i>Mise à jour directe</i>	Pluie parfaite	49,0	57,3	59,8	65,3	71,5	75,6
		Pluie nulle	48,2	51,1	43,2	35,1	30,7	28,5

**Tableau 17 : critères de persistance (%) obtenus avec les versions simplifiées de GR4J**

Les paramètres ont été optimisés en prévision, ce qui donne de bien meilleurs résultats que de garder les paramètres optimisés lors de la phase de simulation (Remarque : ce calage en prévision explique que pour des délais courts, les performances ne soient pas identiques suivant que l'on prenne des pluies parfaites ou nulles, les paramètres devenant dépendant de l'horizon de prévision).

Les résultats montrent d'abord que la version 2 apparaît légèrement plus efficace que la version 1 et surtout nettement plus efficace que la version classique. La mise à jour directe apparaît par ailleurs plus efficace sur le court terme, alors que la méthode de Yang reste efficace sur le plus long terme. Nous comparerons par la suite ces résultats à ceux obtenus avec TOPMODEL duquel finalement se rapprochent très fortement ces versions simplifiées de GR4J.

- Conclusion sur les méthodes de mise à jour associées aux modèles pluie-débit:

Le Tableau 18 rassemble les principaux résultats obtenus avec ces modèles.

Modèles	Mise à jour	Délai (jours)			
		1	2	3	4
TOPMODEL	<i>Yang-paramètres</i>	30,5	49,4	57,4	42,6
TOPMODEL	<i>Report de l'erreur</i>	28,9	51,5	60,4	44,7
<b>Version simplifiée 2 de GR4J</b>	<i>Yang</i>	37,0	47,5	49,9	38,9
<b>Version simplifiée 2 de GR4J</b>	<i>Directe sur le réservoir de routage</i>	48,2	51,1	43,2	35,1

**Tableau 18 : performances obtenues avec les méthodes de mise à jour associées aux modèles pluie-débit (P futures nulles)**

En conclusion, on peut faire une distinction entre la prévision à court terme (1 et 2 jours) et celle à plus long terme (3 jours et plus). Sur le court terme, les modèles simples associés à des méthodes de mise à jour simples apparaissent les plus efficaces. Des modèles et des méthodes de mise à jour plus complexes type méthode de Yang apparaissent intéressants quant à eux pour des horizons de prévision plus grands. En fait, ces méthodes plus complexes sont également plus respectueuses de la logique de fonctionnement du modèle pluie-débit. Lorsque l'on augmente le délai de prévision, la mise à jour perd progressivement de son intérêt, et on se rapproche progressivement d'un fonctionnement en simulation. On aura alors une prévision d'autant meilleure que l'on se rapprochera du modèle tel qu'il est simulation.

#### 5.4 Résultats obtenus en utilisant des réseaux de neurones

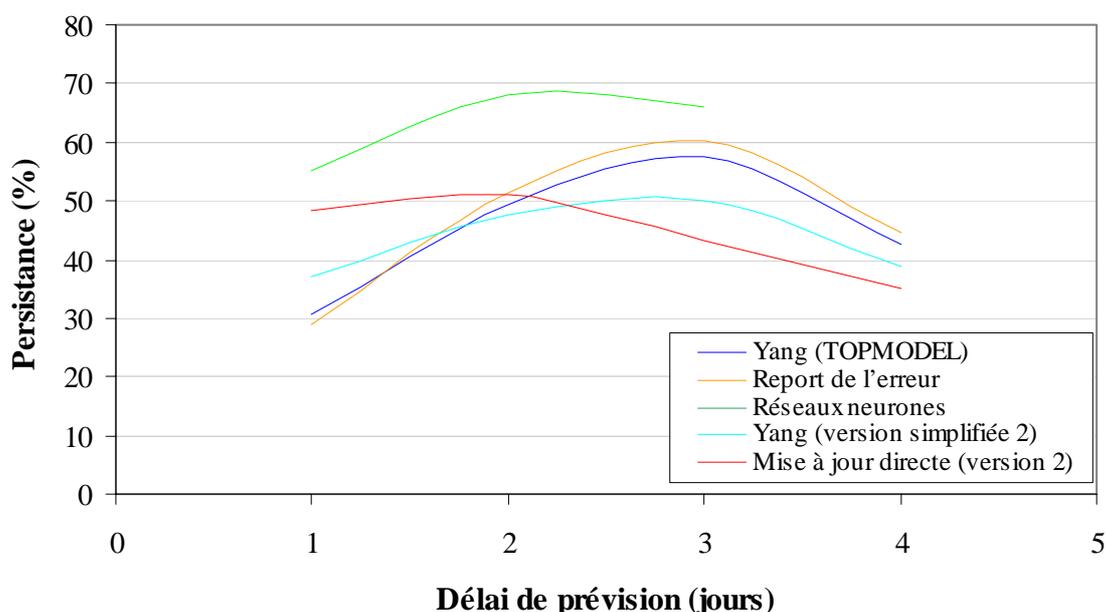
Nous avons d'abord déterminé le type de réseau de neurone le plus efficace sur le bassin de la Seine en testant différentes combinaisons d'entrées du modèle. Nous avons finalement choisi un réseau dont les entrées sont :  $Q(i)$ ,  $Q(i-1)$ ,  $P(i)$ ,  $P(i-1)$ ,  $P(i-2)$  et le nombre de nœuds cachés a été fixé à 5. Nous avons obtenu les résultats donnés au Tableau 19. Nous nous sommes contentés de la prévision à 3 jours, ce qui correspond à peu près au temps de réponse du bassin.

	Délai (jours)		
	1	2	3
<b>Persistence (%)</b>	55	68	66

**Tableau 19** : performances obtenues par les réseaux de neurones (*pluie nulle*)

#### 5.4.1 Comparaison entre les différentes méthodes de mise à jour

Nous avons résumé sur le graphique suivant les meilleurs résultats obtenus par les différentes méthodes de mise à jour. Nous avons choisi le contexte des pluies nulles et de ne pas dépasser un horizon de prévision de 4 jours, au-delà, les prévisions deviennent en effet hasardeuses, car très dépendantes de la prévision de pluie future, actuellement pas disponible quantitativement pour un tel horizon.



**Figure 27** : comparaison des différentes méthodes de mise à jour en *pluie nulle*

On peut voir ici que toutes les méthodes utilisées dans cette étude utilisant des modèles pluie-débit s'avèrent beaucoup moins performantes que les réseaux de neurones.

#### 5.4.2 Comparaison par rapport aux résultats de la DIREN

Dans un dernier temps, nous avons voulu comparer les différentes méthodes pour un horizon de prévision de un jour, sur les événements pour lesquels nous disposons de prévisions de la DIREN (voir Annexe 3). Les critères de persistance obtenus (voir Tableau 19) sont ici différents de précédemment car ils ont été calculés uniquement avec les événements où la DIREN avait réalisé des prévisions.

Méthode utilisée	Persistence (%)
DIREN	37
TOPMODEL (mise à jour des paramètres)	-71
TOPMODEL (report de l'erreur)	-84
Réseau de neurone	20
GR4J simplifié (mise à jour directe du réservoir de routage)	20

**Tableau 20** : performances en prévision obtenues par les différents modèles à 1 jour (P futures nulles)

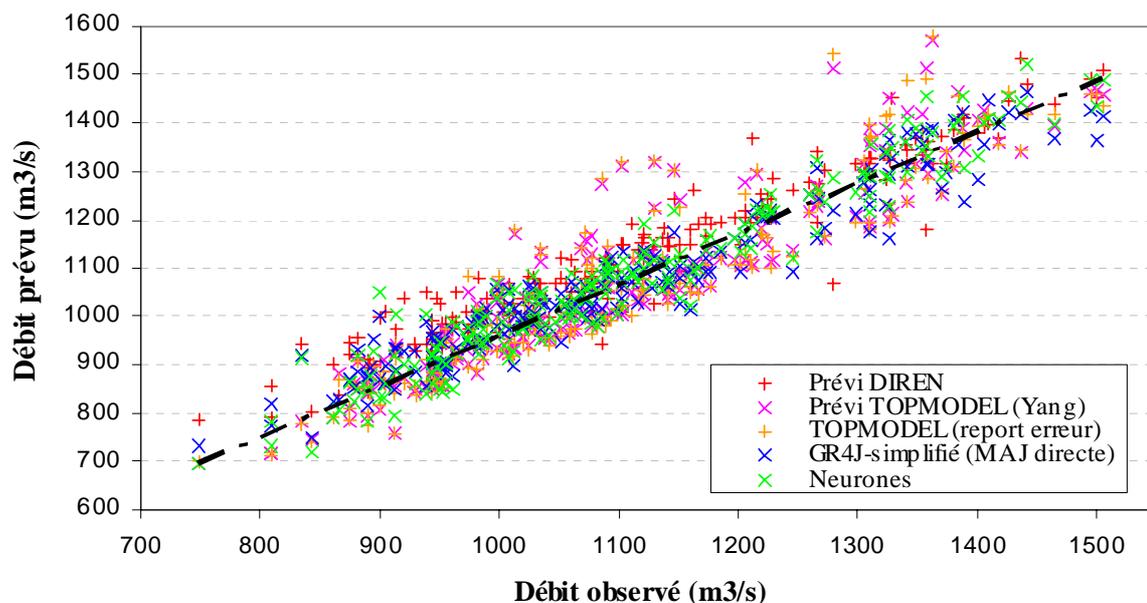


Figure 28 : comparaison entre les résultats de la DIREN et ceux des modèles testés (P futures nulles)

Pour un horizon de prévision de 1 jour, on peut finalement dire que plus la méthode de mise à jour est simple, plus les performances sont grandes. La méthode utilisée actuellement par la DIREN avec une expertise des prévisionnistes reste la plus performante.

### 5.5 Conclusion des résultats en prévision

On voit donc que la méthode de mise à jour est très importante, et qu’une méthode aussi complexe que la méthode de Yang n’est pas forcément plus efficace que des méthodes très simples. Pour des horizons de prévision relativement courts (de 1 à 3 jours), la méthode de Yang apparaît en effet moins efficace que d’autres méthodes plus simples. Par contre, au-delà de 3 jours, cette méthode s’avère plus efficace que beaucoup d’autres, mais elle fait cependant jeu égal avec une méthode aussi simple que le report de l’erreur entre le débit observé et le débit simulé. Un résultat important tient dans les très bonnes performances des réseaux de neurones qui s’avèrent très efficaces sur le bassin de la Seine.

## 6 Illustration des différents résultats obtenus

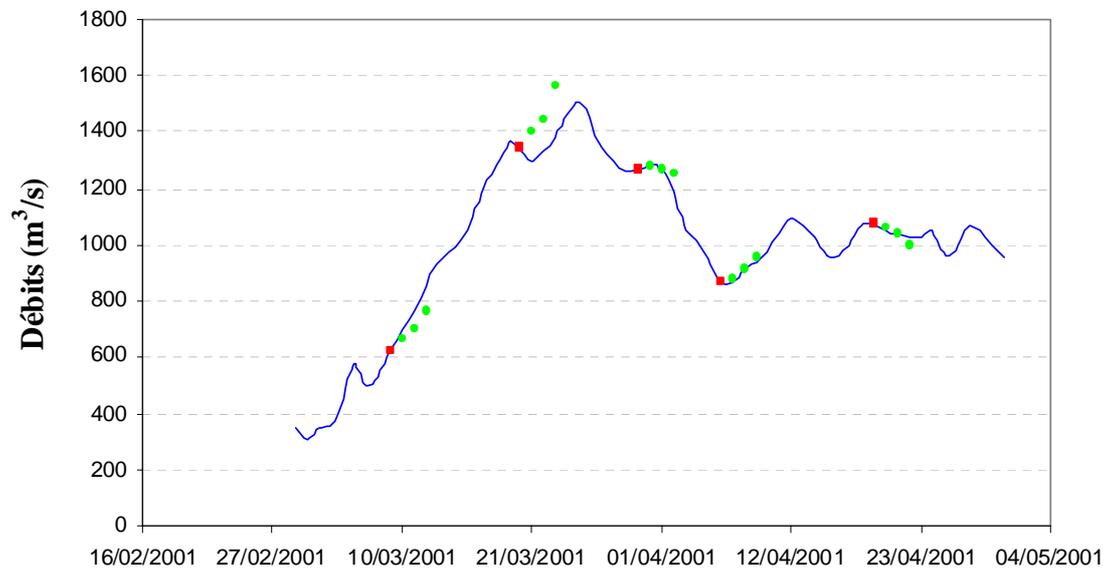
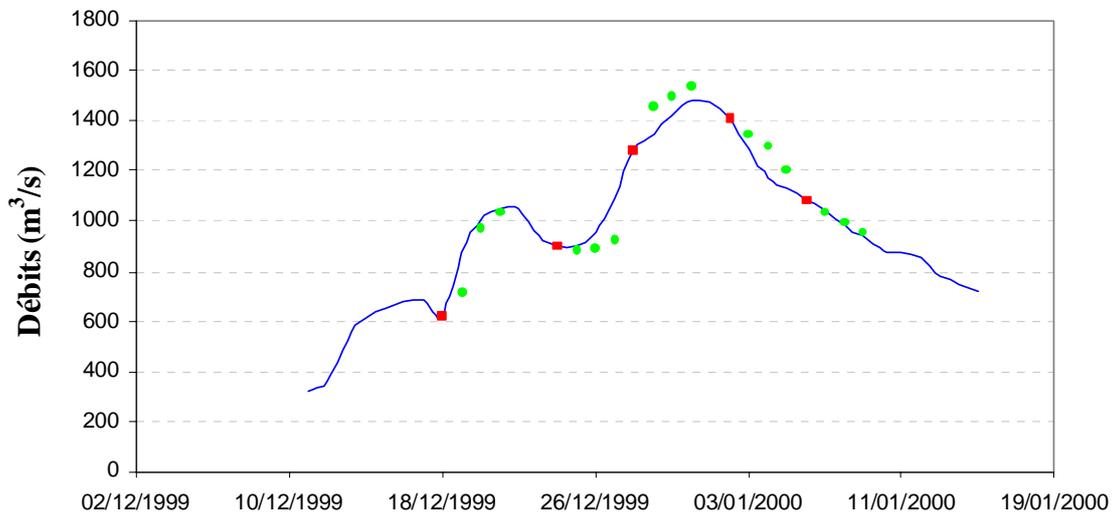
### ▪ Chroniques de débits et de prévisions

Les résultats montrés précédemment étant assez difficiles à appréhender concrètement, nous avons souhaité présenter ces résultats autrement, en montrant notamment des chroniques de débit, et d’autres graphiques correspondant à ce dont se servirait réellement le prévisionniste.

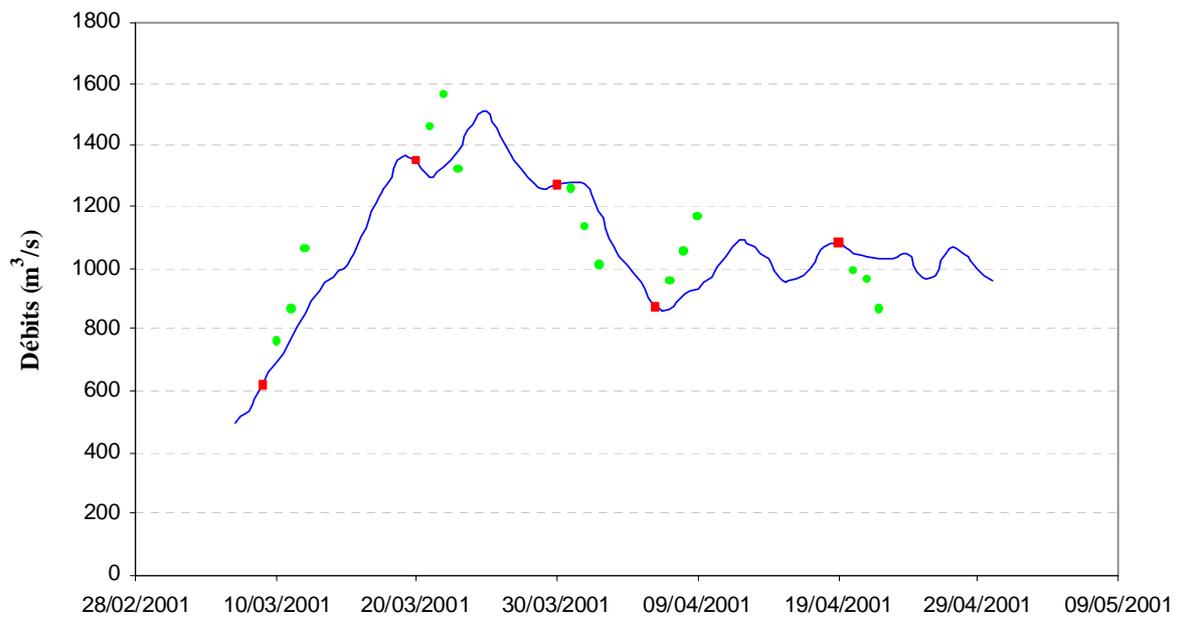
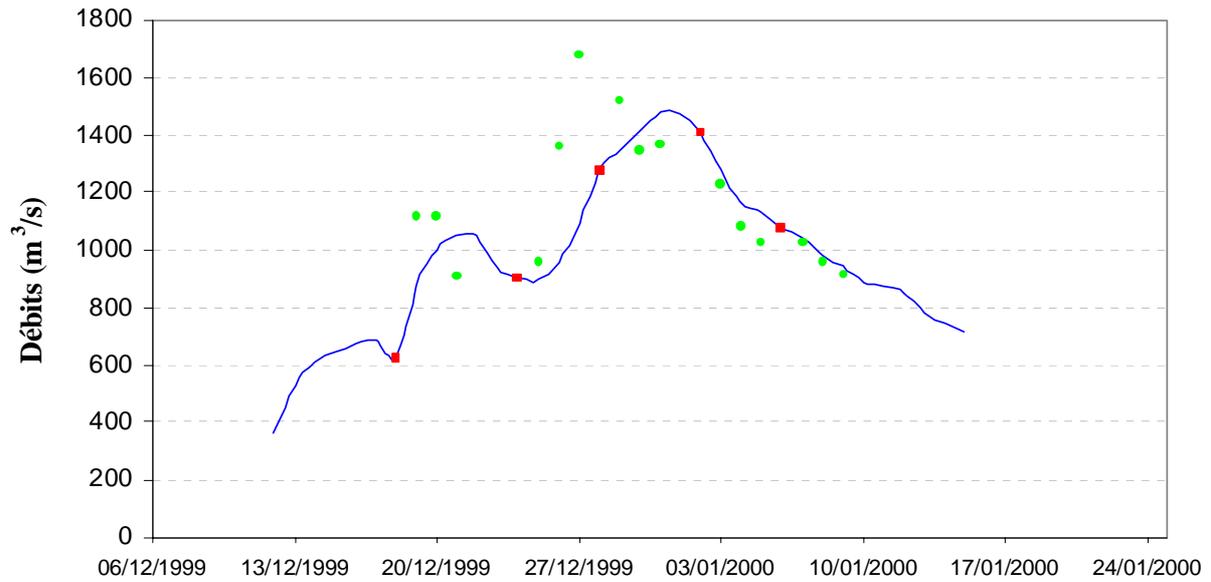
Nous avons ainsi essayé de représenter différentes crues :

- la crue du 11/12/1999 au 15/1/2000
- la crue du 1/03/2001 au 30/04/2001

Nous avons figuré sur les graphiques le débit observé à l'instant de prévision et les prévisions les plus efficaces pour des horizons de prévision de 3 jours (car cela correspond au délai que demande la préfecture). Afin de ne pas surcharger les graphiques, nous avons représenté uniquement les modèles les plus performants : le réseau de neurones (**Figure 29**) et le report de l'erreur avec TOPMODEL.



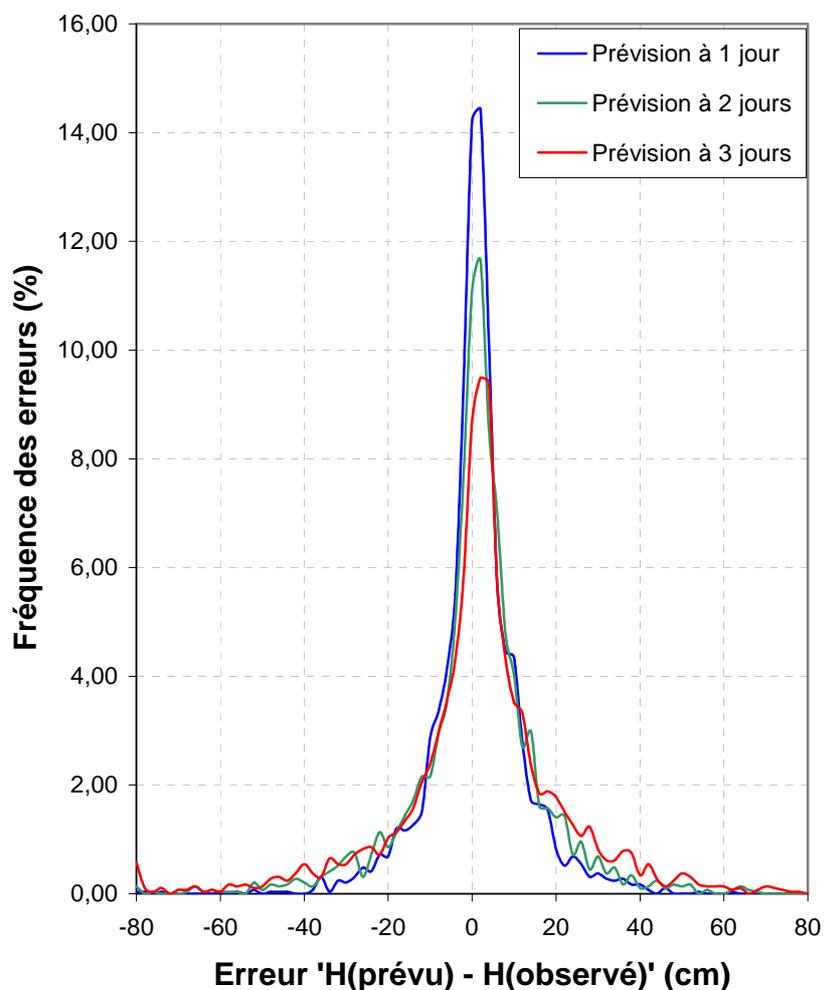
**Figure 29** : prévisions obtenues par la modélisation avec les réseaux de neurones (P futures nulles)



**Figure 30** : prévisions obtenues avec TOPMODEL et un report de l'erreur entre le débit observé et le débit simulé (P futures nulles)

▪ **Distribution des erreurs entre les hauteurs observés et prévus (à l'échelle d'Austerlitz)**

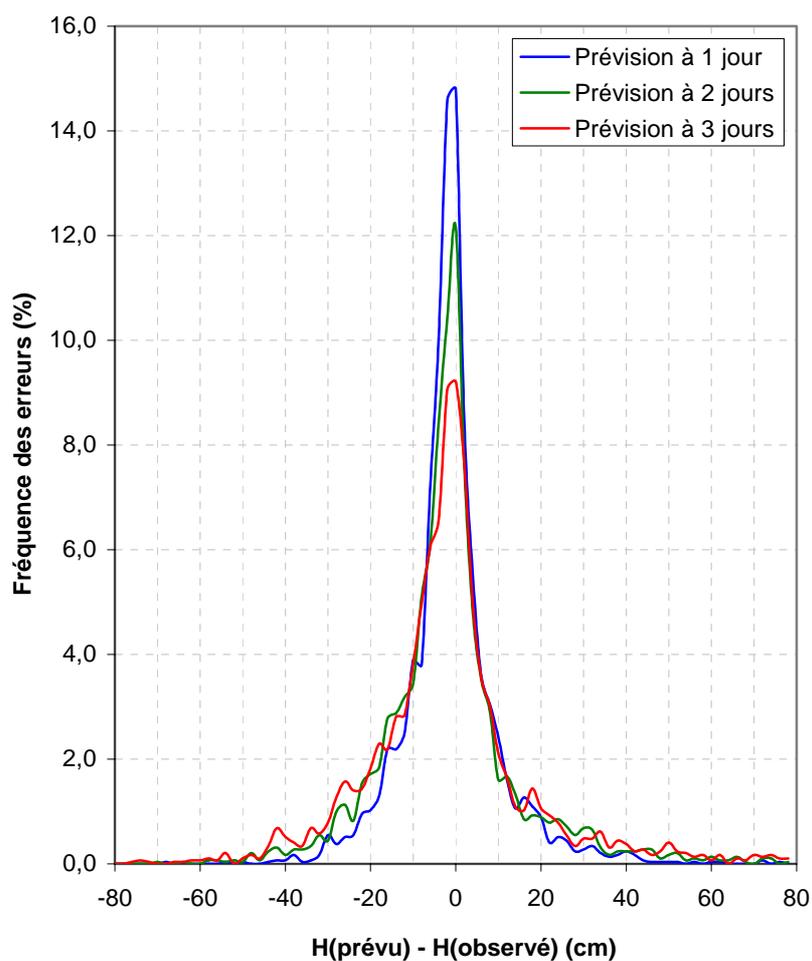
Le critère de persistance est d'autre part assez difficile à appréhender. Nous avons représenté ci-dessous la distribution des erreurs entre la prévision (à 1,2 ou 3 jours) et l'observation sur la période 1994-2001.



**Figure 31** : distribution des erreurs sur les hauteurs pour les réseaux de neurones

Ecart de hauteur (cm)	Délai de prévision (jours)		
	1	2	3
±10	78,7	68,6	60,3
±20	93,0	86,2	78,6
±30	97,6	94,0	88,1

**Tableau 21** : pourcentages de débits compris dans la fourchette d'écart de hauteur entre la valeur prévue et la valeur réelle pour les réseaux de neurones



**Figure 32** : distribution des erreurs pour la version simplifiée 2 de GR4J et la mise à jour directe

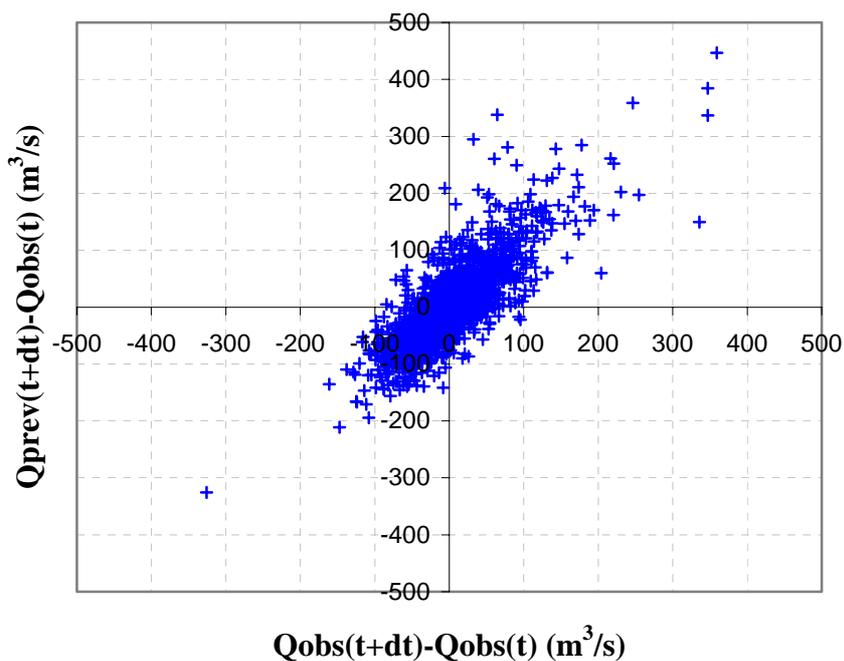
Ecart de hauteur (cm)	Délai de prévision (jours)		
	1	2	3
±10	77,5	66,2	61,1
±20	92,6	84,3	79,3
±30	97,4	92,8	88,8

**Tableau 22** : pourcentages de débits compris dans la fourchette d'écart de hauteur souhaitée pour la version simplifiée 2 de GR4J et la mise à jour directe

Les résultats montrent que l'on obtient une précision sur les hauteurs de +/- 10 cm supérieure à 75 % des cas à 1 jour et supérieure à 60 % des cas à 3 jours, ce qui est très intéressant d'un point de vue opérationnel.

- **Variations prévues et observées**

L'idée ici était de voir si le modèle comprend bien les augmentations ou les baisses de Débit. Cet aspect est important du point de vue du prévisionniste étant donné qu'il doit éviter absolument les cas où sa prévision va dans le sens contraire de ce qui se passe réellement (prévision d'une baisse alors qu'il y aura une hausse ou inversement. Sur l'exemple de la Figure 33, on voit que ces cas d'erreurs flagrantes sont majoritairement évités (peu de points dans les quadrants 2 et 4).



**Figure 33** : corrélation entre les variations des débits observés et l'écart entre le débit prévu et le débit observé pour la version simplifiée 2 de GR4J et un délai de prévision de 1 jour

## Conclusions et perspectives

L'objectif de cette étude était donc de déterminer l'applicabilité d'un modèle pluie-débit conceptuel globaux sur le bassin de la Seine en amont de Paris. Les résultats se sont avérés intéressants et encourageants.

En phase de simulation, nous sommes arrivés à différentes conclusions. TOPMODEL s'est avéré être le modèle reproduisant le plus efficacement le comportement du bassin de la Seine. Et un aspect intéressant est que TOPMODEL et GR4J ont montré des comportements très similaires. Des versions simplifiées de GR4J (Tangara, 2004) où la branche d'écoulement direct lors du routage a été supprimée et ne comportant que trois paramètres, ont permis d'atteindre le niveau de performance de TOPMODEL. Pour ce qui est de la semi-distribution, les résultats ont été assez décevants. En effet, une séparation des bassins de la Seine et de la Marne n'a pas permis d'améliorations significatives au niveau des résultats, bien que les deux bassins aient à priori des comportements différents.

En contexte de prévision, les résultats ont été nuancés. La méthode de mise à jour de Yang, assez complexe, s'est avérée finalement aussi efficace que des méthodes beaucoup plus simples comme un simple report de l'erreur entre le débit observé et le débit simulé. Et TOPMODEL s'est avéré toujours plus performant que GR4J en prévision. Mais la surprise est venue d'un autre type de mise à jour et des deux versions simplifiées de GR4J. Ces modèles ont été appliqués avec une mise à jour très directe qui consiste à réajuster le niveau du réservoir de routage en fonction du débit de l'instant précédent. Les résultats ont été étonnants et très largement meilleurs que précédemment, notamment pour des délais de prévision courts de l'ordre de la journée où les méthodes de mise à jour précédentes s'avéraient être relativement peu performantes. On arrive finalement à des critères de persistance de l'ordre de 65% pour des délais de prévision de trois jours, ce qui est correct, et ce qui en fait un outil intéressant pour la DIREN Ile de France. Mais l'une des plus grosses surprises de notre étude est venue des réseaux de neurones. Les performances de ceux-ci se sont en effet avérées nettement meilleures que les méthodes précédentes. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps d'approfondir ces réseaux de neurones ; il aurait notamment été intéressant de tester ce modèle en conditions de pluie connue et de voir les performances pour des délais supérieurs à 3 jours.

Il serait intéressant pour la suite de comparer les prévisions obtenues à celles réalisées par des modèles purement hydrauliques ou des modèles associant hydrologie pour prévoir les apports amont et hydraulique pour la propagation aval. Ce type de modèles correspond à un niveau de découpage du bassin bien supérieur à ce que nous avons adopté ici dans notre étude. Cependant, les résultats peu encourageants obtenus lors de nos tentatives de semi-distributions sembleraient indiquer que le raffinement du découpage du bassin ne va pas de pair avec une augmentation significative des performances des modèles.

## Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe 'hydrologie' du Cemagref, et plus particulièrement Charles Perrin pour sa disponibilité et sa patience. Je tiens aussi à remercier Pierre Javelle de la DIREN Ile de France qui a co-encadré ce stage et qui m'a fait appréhender le recul qu'il fallait prendre par rapport aux mesures hydrologiques. Je voudrais aussi remercier François Anctil de l'Université Laval qui m'a fournis les codes pour les réseaux de neurones et m'a fourni les explications afin de les utiliser.

## Références

- Anctil, F., C. Perrin, et al.** (2003). "Ann output updating of lumped conceptual rainfall/runoff forecasting models." *Journal of the American Water Resources Association* 39(5): 1269-279.
- Andréassian, V., C. Perrin, et al.** (2004). "Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models." *Journal of Hydrology*. 286(1-4): 19-35.
- Andreassian, V., C. Perrin** (2003). Des modèles pluie-débit pour répondre aux besoins hydrologiques opérationnels. Dea HHGG, support de cours.
- Bachet** (1934). Note sur la propagation et l'annonce des crues. *Annales des Ponts et Chaussées*, Mai-Juin, p. 409.
- Beven, K. J. and M. J. Kirkby** (1979). "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1): 43-69.
- Box, G. E. P. and G. M. Jenkins** (1976). *Time series analysis - Forecasting and control*. Oakland, California, Holden Day.
- Champion, M.** (2001). "Les inondations en France du VI<sup>e</sup> siècle à nos jours." Cemagref Editions, Antony: 3000 p.
- Chéry, V.** (2000). "Inondations: quels risques pour l'agglomération parisienne?" *Annales des Mines, Réalités industrielles*.
- DDE de la Sarthe** (2003). "Etude et mise au point de modèles de prévision de crues sur le bassin de l'Huisne et de la Sarthe amont." Rapport d'étude Cemagref, Safège.
- Edijatno** (1991). Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Strasbourg, Université Louis Pasteur/ENGEES: 242 p.
- Edijatno and C. Michel** (1989). Recherche sur la mise au point d'un modèle journalier pluie-débit pour les petits bassins non jaugés, Cemagref.
- Fortin, V., T. B. M. J. Ouarda, et al.** (1997). "Revue bibliographique des méthodes de prévision des débits." *Revue des Sciences de l'Eau* 10(4): 461-487.
- Goubet, A.** (1997). Les crues historiques de la Seine à Paris, le risque crue en région Parisienne. Colloque d'hydrotechnique. 155<sup>e</sup> session du comité scientifique et technique, Paris, Société hydrotechnique de France.
- Houdré, F.** (2001). "Historique de l'annonce des crues." Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.
- Hydratec** (1997). "Inventaire et analyse des principaux modèles de simulation des crues sur le bassin Seine-Normandie." Rapport pour l'Agence Seine Normandie.
- Jenni, S.** (2001). Prévision des crues à l'aide d'un modèle pluie-débit sur le haut bassin de la Loire, Université Pierre et Marie Curie (Paris), Rapport de DEA Cemagref (Antony): 50 p.
- Michel, C.** (1989). Hydrologie appliquée aux petits bassins versants ruraux. Antony, Cemagref: 528 p.
- Moulin, L.** (2003). Prise en compte des barrages-réservoirs dans un modèle pluie-débit global, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Rapport de DEA Cemagref (Antony): 58 p.
- Nascimento, N. O.** (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Paris, Thèse de doctorat CERGRENE/ENPC: 550 p.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe** (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology* 27(3): 282-290.
- Perrin, C.** (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony): 530 p.
- Schneider, M.** (1997). Caractérisation météorologique de la crue de 1910. Le risque crue en région Parisienne. Colloque d'Hydrotechnique, 155<sup>e</sup> session du comité scientifique et technique., Paris, Société Hydrotechnique de France.
- Wallis, J. R. and E. Todini** (1975). "Comment upon the residual mass curve coefficient." *Journal of Hydrology* 24: 201-205.
- 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/CERGRENE: 350 p.
- Yang, X. and C. Michel** (2000). "Flood forecasting with a watershed model: a new method of parameter updating." *Hydrological Sciences Journal* 45(4): 537-546.

## **Annexe 1 : Inventaires des méthodes dans le reste de la France (en opérationnel) (Atelier SCHAPI, 2004)**

Il existe une grande diversité des méthodes de prévisions utilisées par les différents services d'annonce de crue. Dans la plupart des services d'annonce de crue, on utilise les deux systèmes suivants :

- la méthode de la réglette de Bachet est encore très fréquemment utilisée.
- des modèles de régression linéaire sur les débits sont aussi fréquemment utilisés, liant un ou plusieurs débits amont et un débit plus en aval en prenant en compte des temps de propagation, et éventuellement des apports intermédiaires (DIREN Rhône Alpes).

Certains SPC commencent à élaborer des outils plus perfectionnés :

- la DIREN Picardie utilise un modèle pluie-débit global (GARDENIA) pour la Somme développé par le BRGM
- la DIREN Lorraine utilise pour prévoir les crues sur la Meuse le logiciel MOISE qui a été développé par le bureau d'étude BCEOM, qui correspond en fait à une interface intégrant les données de pluviométrie et de débits en temps réel et les injectant dans différents modèles. Deux modèles sont utilisés ici : un modèle hydrologique global AGYR qui découpe en fait le bassin en 150 sous-bassins sur lesquels est appliqué le modèle GR4J puis le tout est couplé à une prise en compte de la propagation des différentes ondes de crue, et un modèle hydraulique (STREAM développé par le bureau d'étude BCEOM) 1D à casier basé sur un modèle numérique de terrain. Les délais de prévision sont ici de un à plusieurs jours selon la position du point de prévision dans le bassin.
- Le modèle Hydra (Hydratec-Silogic) sur l'aval des bassins de l'Oise et de l'Aisne, qui va être opérationnel d'ici quelques mois. Ce modèle intègre deux séries de modules : des modules pluie-débit sur les bassins versants amont des vallées de l'Oise et de l'Aisne, associés à un module hydraulique de propagation. On a donc ici une association entre des modèles pluie-débit et un modèle hydraulique.
- Le modèle Hydromath développé par le groupement Cemagref-Safège qui est aussi utilisé sur les bassins de l'Oise et de l'Aisne. C'est un logiciel articulé autour du modèle TOPMODEL, en utilisant la plate-forme multi-modèles SOPHIE.
- La DIREN Midi Pyrénées a développé l'outil Sophie qui correspond à une plate-forme multi-modèles d'annonce de crue. Elle a été développée de façon opérationnelle à partir de 1989 par la DIREN Midi-Pyrénées en collaboration avec le CERGRENE au niveau du bassin supérieur de la Garonne. Le principe de cette procédure est une combinaison linéaire de modèles en attribuant un poids différent à chaque pas de temps suivant leurs performances passées, le critère de qualité utilisé étant la variance des erreurs des prévisions avec la réalité. Différents types de modèles peuvent être incorporés : modèles 'relation linéaire', 'pluie-débit', 'réglette Bachet', 'relations puissances', 'prévision intuitive formalisée'. Une extension est prévue (Carla) qui est un outil de calage des modèles et de simulation de prévision, utilisant trois types de modèles : les modèles à propagation de type relation linéaire, les modèles pluie-débit

de type Fabret, les modèles pluie-débit à réservoir du Cemagref. Carla est en test au Schapi, à la DIREN Midi-Pyrénées et au Cemagref.

- on peut noter l'existence de modèles globaux développés par EDF (Mordor) utilisés pour prévoir des débits de crue ou d'étiage, importants pour gérer les barrages ou les centrales nucléaires. Elle prévoit d'ailleurs d'en utiliser sur le bassin de la Seine afin de prévoir les étiages au niveau de Nogent car il y a une centrale nucléaire.

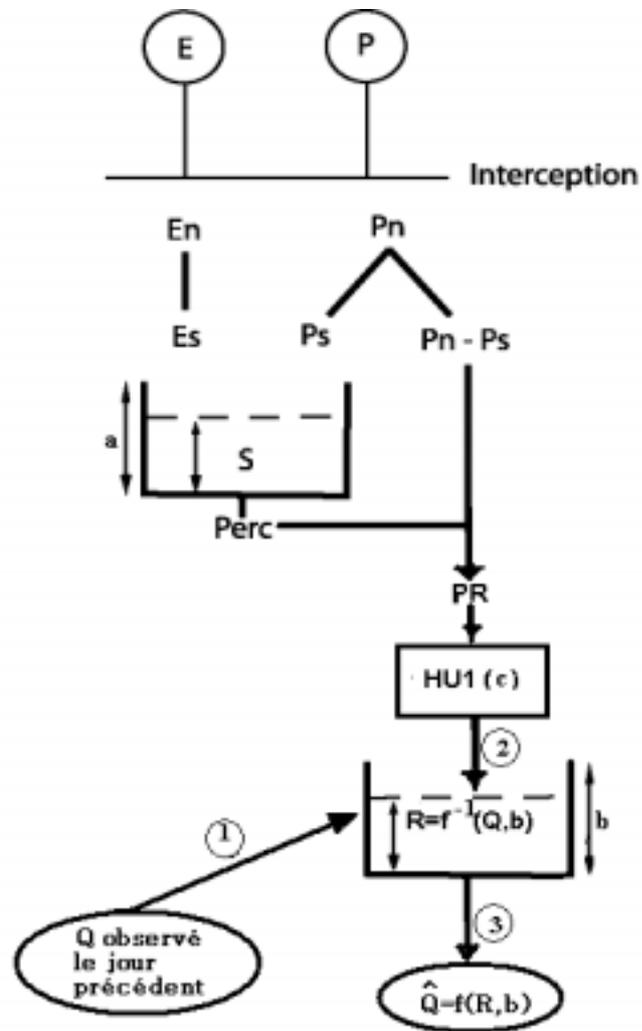
Il existe enfin d'autres modèles utilisés en France, plus particulièrement pour les 'crues éclair' qui ne sont pas ici l'objet de l'étude. Et il existe ensuite une multitude de modèles non opérationnels encore mais qui sont en cours d'étude comme par exemple le modèle SIM (Safran-Isba-Modcou) développé par MétéoFrance couplant un modèle hydrologique distribué à un modèle atmosphérique.

On peut aussi noter qu'il y a une volonté du SCHAPI d'homogénéiser les systèmes de prévision des crues au niveau des futurs SPC. La plate-forme Sophie associée à l'outil de calage Carla semble être l'orientation principale adoptée en essayant de choisir les modèles les plus efficaces.

## Annexe 2 : architecture des différents modèles pluie-débit utilisés

GR4J		<p>if <math>P \geq E</math>, <math>Pn = P - E</math>, <math>En = 0</math>  if <math>P &lt; E</math>, <math>En = E - P</math>, <math>Pn = 0</math></p> $Ps = \frac{Pn \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X4}\right)^2\right)}{1 + \frac{Pn}{X4} \cdot \left(1 + \frac{S}{X4}\right)}$ $Es = \frac{En \cdot \frac{S}{X4} \left(2 - \frac{S}{X4}\right)}{1 + \frac{En}{X4} \cdot \left(2 - \frac{S}{X4}\right)}$ $Perc = S - \left(S^{-4} + \left(\frac{9}{4} \cdot X4\right)^{-4}\right)^{\frac{1}{4}} \quad S = S - Perc$ $0 \leq j \leq X3, \quad SH1(j) = \left(\frac{j}{X3}\right)^{\frac{5}{2}}$ $j > X3, \quad SH1(j) = 1$ $0 \leq j \leq X3, \quad SH2(j) = \frac{1}{2} \left(\frac{j}{X3}\right)^{\frac{5}{2}}$ $X3 < j \leq 2 \cdot X3, \quad SH2(j) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{j}{X3}\right)^{\frac{5}{2}}$ $j > 2 \cdot X3, \quad SH2(j) = 1$ $F = X1 \cdot \left(\frac{R}{X2}\right)^{\frac{7}{2}}$ $Qd = \max(0, Q1 + F)$ $R = \max(\varepsilon, R + Q9 + F)$ $Qr = R - \left(R^{-4} + X2^{-4}\right)^{-\frac{1}{4}} \quad R = R - Qr$ $Q = Qr + Qd$
TOPMODEL		$S = S + P$ $Es = \min(S, E) \quad S = S - Es \quad E' = E - Es$ $Pr = \max(0, S - X3)$ $S = S - Pr$ $Ps = \frac{Pr}{1 + \exp(X6 - T/X5)}$ $T = T + Pr - Ps$ $Es = \frac{E'}{1 + \exp(X7 - T/X8)}$ $T = T + Es$ $R = R + Ps \quad Qr = \frac{R^2}{R + X1} \quad R = R - Qr$ $Qt = X2 \cdot \exp\left(\frac{T}{X2}\right) \quad T = T - Qt$ $Q = Qt + Qr$ <p>(with a delay of X4 time step)</p>

- versions simplifiées de GR4J



### Annexe 3: prévisions à 1 jour (hauteurs en m) issues du modèle hydraulique de la DIREN

DATES	Prévi.	DATES	Prévi.	DATES	Prévision	DATES	Prévi.	DATES	Prévi.
<b>1993/1994</b>		03/02/1995	4,6	<b>1996/97</b>		05/01/2000	4,3	22/04/2001	3,6
30/12/1993	3,65	04/02/1995	4,59	05/12/1996	3,26	06/01/2000	3,8	23/04/2001	3,5
31/12/1993	3,62	05/02/1995	4,35			07/01/2000	3,8	24/04/2001	3,55
01/01/1994	3,8	06/02/1995	4,28	27/02/1997		08/01/2000	3,65	25/04/2001	3,55
02/01/1994	3,7	07/02/1995	4,06	28/02/1997	3,35	09/01/2000	3,5	26/04/2001	3,4
03/01/1994	4,06	08/02/1995	3,98			10/01/2000	3,2	27/04/2001	3,6
04/01/1994	4,38	09/02/1995	3,62	<b>1997/98</b>		11/01/2000	3,05	28/04/2001	3,6
05/01/1994	4,54	10/02/1995	3,51	30/04/1998				29/04/2001	3,5
06/01/1994	4,38	11/02/1995	3,1	01/05/1998	3,45	21/02/2000	3,55	30/04/2001	3,3
07/01/1994	4,53	12/02/1995	3,4	02/05/1998	3,65	22/02/2000	3,6	01/05/2001	3,35
08/01/1994	4,58	13/02/1995	3,15	03/05/1998	3,5	23/02/2000	3,55	02/05/2001	3,9
09/01/1994	4,66	14/02/1995	2,98			24/02/2000	3,5	03/05/2001	4,05
10/01/1994	4,71	15/02/1995	2,86	<b>1998/99</b>		25/02/2000	3	04/05/2001	3,9
11/01/1994	4,74	16/02/1995	2,95	22/02/1999				05/05/2001	3,95
12/01/1994	4,79	17/02/1995	3,19	23/02/1999	3,6	<b>2000/2001</b>		06/05/2001	3,5
13/01/1994	4,7	18/02/1995	3,32	24/02/1999	3,82	28/11/2000	3,35	07/05/2001	3,6
14/01/1994	4,44	19/02/1995	3,18	25/02/1999	4,1			08/05/2001	4
15/01/1994	4,36	20/02/1995	3,1	26/02/1999	3,96	30/11/2000	3,15	09/05/2001	4,05
16/01/1994	4,18	21/02/1995	3,16	27/02/1999	3,8			10/05/2001	3,95
17/01/1994	4,1	22/02/1995	3,17	28/02/1999	3,55	15/03/2001	3,45	11/05/2001	3,6
18/01/1994	4,02	23/02/1995	3	01/03/1999	3,6	16/03/2001	3,95		
19/01/1994	3,66	24/02/1995	2,76	02/03/1999	3,55	17/03/2001	4,3	<b>2001/2002</b>	
20/01/1994	3,16			03/03/1999	3,66	18/03/2001	4,6	31/12/2001	
		26/02/1995	3,22	04/03/1999	3,75	19/03/2001	4,85	01/01/2002	3,75
31/01/1994		27/02/1995	3,85	05/03/1999	3,6				
01/02/1994	3,24	28/02/1995	3,88	06/03/1999	3,65	21/03/2001	4,5	03/01/2002	3,75
02/02/1994	3,26	01/03/1995	3,88	07/03/1999	3,5	22/03/2001	4,5		
03/02/1994	3,26	02/03/1995	3,77	08/03/1999	3,3	23/03/2001	4,8	24/02/2002	3,8
04/02/1994	3,4	03/03/1995	3,36	09/03/1999	3,4	24/03/2001	4,95	25/02/2002	3,4
05/02/1994	4,1	04/03/1995	3,33	10/03/1999	3,45	25/03/2001	5,2	26/02/2002	3,65
06/02/1994	4,25	05/03/1995	3,12	11/03/1999	4,1	26/03/2001	5,1	27/02/2002	3,7
07/02/1994	4,16	06/03/1995	3,18	12/03/1999	4,45	27/03/2001	4,75	28/02/2002	3,75
08/02/1994	4,06	07/03/1995	3,18	13/03/1999	4,5	28/03/2001	4,6	01/03/2002	3,8
09/02/1994	3,92	08/03/1995	3,45	14/03/1999	4,5	29/03/2001	4,5	02/03/2002	3,95
10/02/1994	3,7	09/03/1995	3,38	15/03/1999	4,25	30/03/2001	4,45	03/03/2002	4
11/02/1994	3,4	10/03/1995	3,1	16/03/1999	3,75	31/03/2001	4,55	04/03/2002	4,15
12/02/1994	3,3	11/03/1995	2,9	17/03/1999	3,6	01/04/2001	4,55	05/03/2002	4,1
13/02/1994	3,02	12/03/1995	2,6	18/03/1999	3,35	02/04/2001	4,4	06/03/2002	3,85
14/02/1994	2,84	13/03/1995	2,59	19/03/1999	3,25	03/04/2001	3,9	07/03/2002	3,7
						04/04/2001	3,5	08/03/2002	3,45
11/04/1994		21/03/1995	3,4	<b>1999/2000</b>		05/04/2001	3,3	09/03/2002	3,35
12/04/1994	3,25	22/03/1995	4,05	22/12/1999	3,6	06/04/2001	3		
13/04/1994	3,08	23/03/1995	3,9	23/12/1999	3,55			<b>2002/2003</b>	
		24/03/1995	3,78	24/12/1999	3,4	10/04/2001		05/01/03	3,75
<b>1994/1995</b>		25/03/1995	3,35	25/12/1999	3,15	11/04/2001	3,55	06/01/03	4
24/01/1995	3,65	26/03/1995	3,45			12/04/2001	3,8	07/01/03	4,1
25/01/1995	3,88	27/03/1995	3,1	27/12/1999	3,15	13/04/2001	3,9	08/01/03	4,2
26/01/1995	4,25	28/03/1995	3,3	28/12/1999	3,6	14/04/2001	3,7	09/01/03	3,85
27/01/1995	4,1	29/03/1995	3,25	29/12/1999	4	15/04/2001	3,4	10/01/03	3,5
28/01/1995	4,55	30/03/1995	3,5	30/12/1999	4,7	16/04/2001	3,3	11/01/03	3,15
29/01/1995	4,83	31/03/1995	3,25	31/12/1999	5	17/04/2001	3,4		
30/01/1995	4,98	01/04/1995	3,04	01/01/2000	5,15	18/04/2001	3,7	06/02/03	3,55
31/01/1995	4,88	02/04/1995	2,8	02/01/2000	5,3	19/04/2001	3,85	07/02/03	3,45
01/02/1995	4,65	03/04/1995		03/01/2000	5	20/04/2001	3,7	08/02/03	3,4
02/02/1995	4,5	04/04/1995	2,65	04/01/2000	4,7	21/04/2001	3,55		