

# Prix de l'Association des Anciens de la Météorologie

**Fabienne Rousset**  
**Promotion d'élèves ingénieurs des travaux de l'ENM 2000/2003**

**Modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine à l'aide du modèle Safran-Isba-Modcou**

Stage de fin d'études, janvier-juin 2003

## Résumé

La forte urbanisation du bassin de la Seine, ainsi que son industrialisation et son agriculture intensive, le rendent particulièrement vulnérable aux sécheresses et inondations. Cet article est consacré à la modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine, à l'aide du système Safran-Isba-Modcou (SIM) : Safran reconstitue le forçage atmosphérique, Isba simule les processus de surface et Modcou calcule les débits des cours d'eau et les niveaux des nappes.

L'analyse des débits simulés par SIM a montré que les débits journaliers sont globalement bien restitués (en particulier pour les grands bassins). De plus, il est apparu que les zones urbaines peuvent avoir localement des impacts marqués sur les débits, mais à l'échelle du bassin leur contribution est faible. En outre, la simulation du niveau des nappes a mis en évidence les variations de la réserve en eau souterraine en fonction du régime climatique.

Enfin, une étude des épisodes de crues lentes de la Seine à Paris a été menée. Elle a mis en évidence le rôle crucial du souterrain, qui pendant les périodes de crues, stocke une partie des précipitations (ce qui diminue l'intensité et donc la dangerosité de ces phénomènes) et qui restitue cette eau en été pour fournir plus de 80 % des débits d'étiage. On a pu également démontrer la capacité de SIM à reproduire ces événements, ce qui conduit à la perspective d'utiliser SIM pour la prévision de ces crues, en utilisant non plus des champs météorologiques reconstitués par Safran mais des prévisions issues des modèles de prévision numérique ALADIN et ARPÈGE à plusieurs jours d'échéance.

## Introduction

Le bassin de la Seine est l'un des plus grands bassins français (figure 1), que sa forte urbanisation, sa concentration industrielle et son potentiel agricole élevé rendent particulièrement vulnérable aux phénomènes hydrologiques extrêmes comme les sécheresses ou les crues. Mon travail a porté sur la modélisation hydro-météorologique du bassin de la Seine sur une longue période (1985-2002) à l'aide du système couplé SIM, dans lequel Safran reconstitue le forçage atmosphérique, Isba simule les processus de surface et Modcou calcule les débits des cours d'eau et les niveaux des nappes. Le but de ce travail a été de qualifier le comportement de SIM sur ce bassin et de cerner son potentiel à reproduire les épisodes de crues.



Fig.1 : les bassins de la Seine (vert), de la Loire (orange), de la Garonne (rose) et du Rhône (jaune).

## 1. Le système SIM

Le système SIM permet de simuler une partie du cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant, des précipitations (données d'entrée) à l'écoulement en rivières, en passant par l'évapotranspiration, le stockage d'eau dans le sol, les transferts d'eau en surface (ruissellement) et dans les nappes aquifères. Il est constitué par le couplage des trois modèles Safran, Isba et Modcou (figure 2), chacun assurant la modélisation de différents processus.

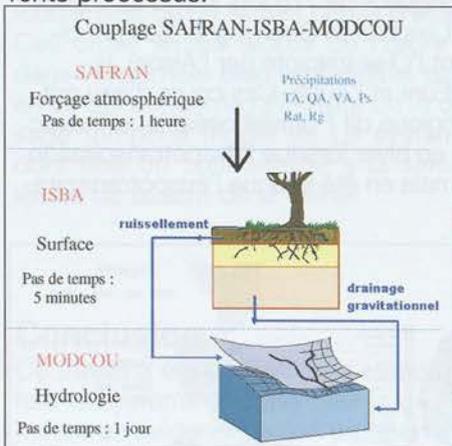


Fig.2 : Principe du couplage Safran-Isba-Modcou  
 TA: température à 2 mètres,  
 QA: humidité spécifique,  
 VA: vitesse du vent à 10 mètres,  
 Ps: pression de surface,  
 Rat: rayonnement atmosphérique,  
 Rg: rayonnement solaire descendant.

La simulation du bilan hydrique nécessite la connaissance des conditions atmosphériques (vent, température, humidité, etc). Les observations de ces paramètres ne sont disponibles qu'aux stations de mesure du réseau de Météo-France, alors que le système SIM travaille sur une grille régulière de 8 km de côté. C'est le système Safran qui assure le passage de l'un à l'autre.

Pour cela, il utilise ces observations, ainsi que des analyses modèles pour les " interpoler " temporellement et spatialement, afin d'obtenir les valeurs horaires de paramètres tels que la température, le vent, le rayonnement ou encore les précipitations en chaque point de la grille. Le modèle Isba simule les processus à l'interface Sol Biosphère Atmosphère. En fonction des caractéristiques de la surface (profondeur du sol, texture du sol, type de végétation, etc.) et des conditions atmosphériques, il calcule le bilan d'énergie et le bilan hydrique (stockage dans le sol, évaporation, évapotranspiration des plantes, drainage, ruissellement).

Enfin, le modèle hydrologique Modcou, développé par le Centre d'Informatique Géologique de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, simule les écoulements d'eau dans les rivières et dans les nappes. Pour cela, il utilise en entrée les données de drainage et de ruissellement calculées par Isba.

L'eau ruisselée alimente les transferts de surface, elle est routée le long de la rivière jusqu'à l'exutoire du bassin. L'eau drainée alimente les nappes, Modcou calculant les écoulements latéraux et les échanges entre nappes. Il simule également les échanges d'eau entre la surface et le souterrain qui ont lieu au niveau des rivières. Ainsi il en déduit les débits des rivières et les niveaux des nappes.

## 2. Le bassin de la Seine

Le bassin de la Seine s'étend du Morvan au sud, à la

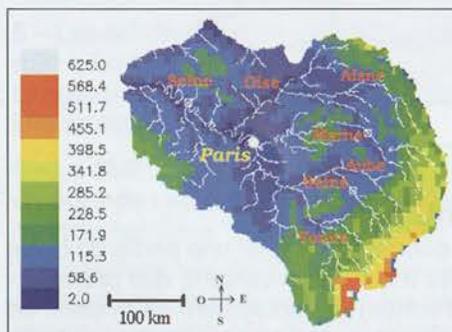


Fig.3 : Le bassin de la Seine: relief (altitude en mètre) et cours d'eau.

Champagne au nord et à la Normandie à l'ouest. Le relief y est peu accidenté (figure 3), avec des altitudes généralement inférieures à 300 m, dépassant rarement 500 m sauf dans le Morvan

où elles atteignent 600 m. Ces altitudes modérées expliquent les faibles pentes des cours d'eau et l'existence de nombreux méandres.

La Seine, d'une longueur de 776 km, prend sa source sur le plateau de Langres en Bourgogne. Ses principaux affluents sont l'Oise (rejointe par l'Aisne), la Marne, l'Yonne, l'Eure et l'Aube. Ces cours d'eau ont un régime hydrologique dit " pluvial océanique ", avec un débit maximal en hiver lorsque l'évapotranspiration est faible, et minimale en été lorsque l'évapotranspiration est forte.

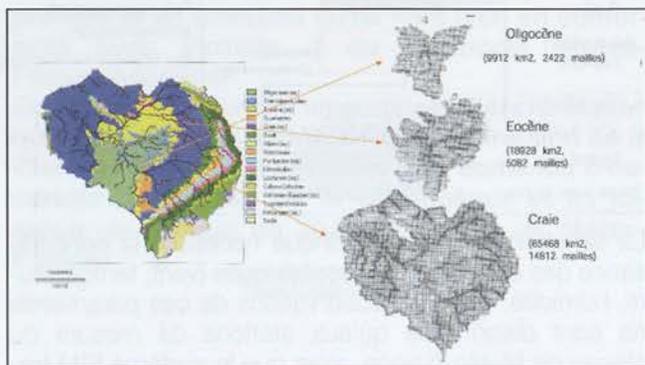


Fig.4 : Carte géologique simplifiée du bassin de la Seine (à gauche) et aquifères modélisés (à droite).

Le bassin de la Seine a un fonctionnement hydrogéologique très complexe, avec de nombreuses couches géologiques empilées (figure 4).

Seules les trois nappes principales ont été sélectionnées pour la modélisation (figure 4) : l'Oligocène, l'Eocène et la Craie. Chacune est alimentée directement par la surface et comme elles sont au moins en partie superposées, elles ne sont alimentées dans leur partie captive que faiblement par des échanges entre nappes. Le domaine souterrain modélisé est particulièrement complexe.

## La pluviométrie du bassin de la Seine

La répartition spatiale des pluies sur le bassin de la Seine n'est pas homogène : alors que le centre du bassin est le moins arrosé (environ 600 mm/an), sa bordure Est (Morvan) est beaucoup plus pluvieuse (plus de 1 200 mm/an). La pluviométrie du bassin est également très contrastée dans le temps (figure 5 : évolution du cumul annuel (mm) de précipitations) : le bassin a connu entre 1985 et 2002 des années sèches, comme par exemple 1995-1996 avec seulement 555 mm, mais aussi des années très pluvieuses avec plus de 1 000 mm en 1999-2000 et 2000-2001.

## 3. Analyse des résultats de la simulation

### Évolution des nappes souterraines

Le niveau des nappes évolue de façon très similaire aux cumuls de précipitations (figure 5 et figure 6 : évolution annuelle de la quantité d'eau (m³) stockée dans chacune des trois nappes et globalement dans le souterrain). En effet le souterrain emmagasine de l'eau les années les plus arrosées (7 années sur 17) et perd de l'eau les années les plus sèches.

Entre 1985 et 2002, la quantité d'eau stockée dans le souterrain diminue (d'en moyenne 0,2 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an), en

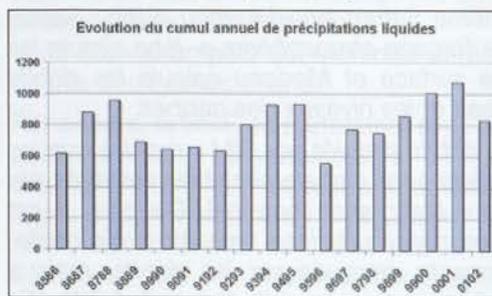


Fig.5 : Variation du cumul annuel de précipitations (mm) en moyenne sur le bassin (cumul annuel calculé du 1er août au 31 juillet suivant).

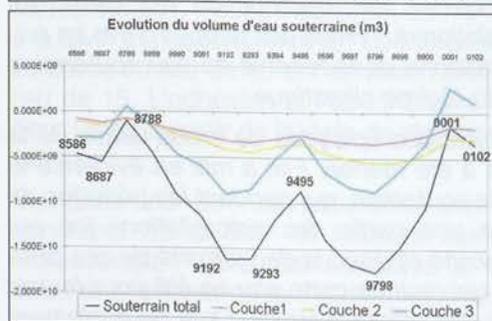


Fig.6 : Variation annuelle de la quantité d'eau stockée dans le souterrain.

effet la quantité d'eau qui s'infiltre dans le souterrain (8,8 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an) est plus faible que la quantité d'eau fournie par le souterrain aux rivières (9,0 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an). Le volume d'eau souterraine a beaucoup diminué pendant les années sèches (de 1988 à 1994 et de 1996 à 1998), et les dernières années pluvieuses (de 1999 à 2002) n'ont pas réussi à ramener les nappes à leur volume de 1985.

**Analyse des débits journaliers**

La bordure Est du bassin, région la plus pluvieuse, est aussi la zone où de nombreuses rivières (dont la Seine) prennent leur source, et on a calculé que 70 % du débit de la Seine à Paris provient de l'alimentation des cours d'eau par les précipitations dans cette région.

Le bassin de la Seine est l'un des plus urbanisés de France, avec environ 2 000 km<sup>2</sup> de ville. Les zones urbaines sont caractérisées par un ruissellement très fort, et si elles peuvent avoir localement un impact marqué sur les débits, les crues et les inondations, à l'échelle du bassin versant leur influence est très faible : leur contribution représente moins de 1 % des débits des grandes rivières.

Les débits journaliers simulés par SIM ont été comparés aux observations de plus de 150 stations hydro-

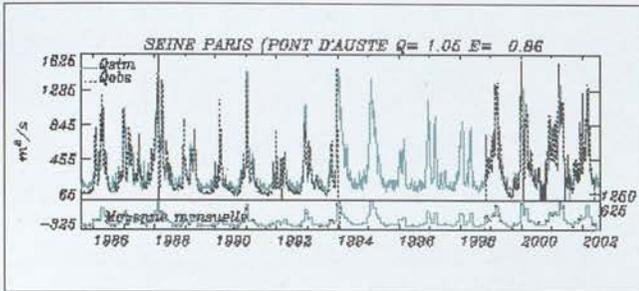


Fig.7 : Débits journaliers (en haut) et mensuels (en bas), observés et simulés, de la Seine à Paris.

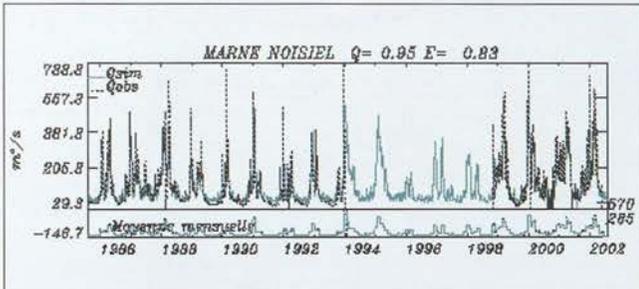


Fig.8 : Débits journaliers (en haut) et mensuels (en bas), observés et simulés, de la Marne à Noisiel.

métriques réparties sur l'ensemble du bassin (par exemple la Seine à Paris, figure 7 et la Marne à Noisiel, figure 8). Différents critères statistiques ont été utilisés pour qualifier la qualité de la simulation, notamment le critère de Nash ou efficacité (noté E, pour être optimisé il doit être proche de 1). Les résultats sont globalement satisfaisants, avec 55 % des stations pour lesquelles le critère de Nash dépasse 0,5 (moyen) et 25 % pour lesquelles il dépasse 0,7 (bon). On constate également que la qualité de la simulation augmente avec la superficie du sous-bassin versant : alors que les plus petites stations ont les scores les moins bons, les grandes sont les mieux simulées.

**4. Étude de la simulation des crues de la Seine à Paris**

Les neuf plus fortes crues de la Seine à Paris ayant eu lieu entre 1998 et 2002 ont été simulées et analysées, en particulier les crues de décembre 1999 et mars 2001, dont la durée de retour est d'environ 10 ans et pour lesquelles le débit a atteint 1 500 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> avec une hauteur de 5,20 m au Pont d'Austerlitz, soit 2 m au-dessus du seuil d'alerte (figure 10).

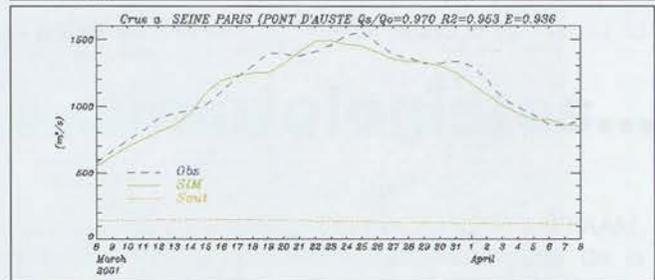
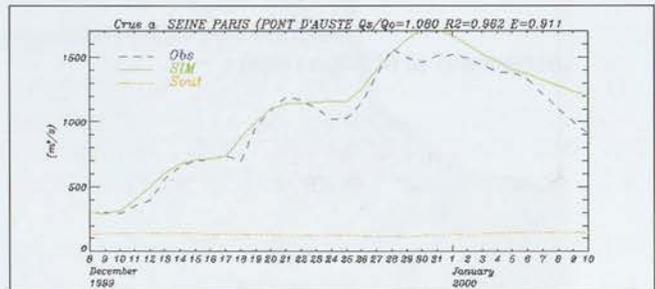
On a constaté que les crues de la Seine à Paris sont généralement liées à des précipitations s'étalant sur plusieurs jours, réparties sur le bassin et sur le sol déjà



Fig.10 : Les crues de la Seine (en hauteur d'eau au pont d'Austerlitz) et le Zouave du pont de l'Alma.

chargé d'eau. Les ondes de crue des affluents de la Seine (Oise, Marne, Seine amont, Yonne) se rejoignent et leur phasage temporel conditionne l'intensité et la durée de la crue à Paris.

En outre, cette étude a permis de mettre en évidence le rôle essentiel du souterrain pendant les périodes de crues. En effet, une partie des précipita-



tions est drainée vers les nappes et stockée, ce qui atténue l'intensité de la crue. Sans ce stockage dans le souterrain, l'eau serait rapidement ruisselée vers les rivières et le débit maximal de la crue de décembre 1999 par exemple ne serait plus de 1 550 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> mais plus de 3 000 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> ! Le souterrain permet donc d'amortir très nettement les crues et diminue de ce fait leur dangerosité. Cette eau stockée est ensuite restituée en été pour fournir plus de 80 % des débits d'étiage.

Ces crues lentes (durée de l'ordre d'un mois) sont dans l'ensemble bien reproduites par SIM, aussi bien en ce qui concerne l'intensité de la crue que son phasage temporel (figure 9). Le système SIM se révèle donc être un outil adapté à la simulation des crues lentes du bassin de la Seine.

**Conclusion**

Ce travail a été l'occasion d'étendre pour la première fois le système SIM au bassin de la Seine. On a pu mettre en évidence le bon comportement de SIM malgré la complexité du domaine souterrain, avec des débits bien restitués. On a pu montrer également que SIM est capable de reproduire les crues lentes du bassin de la Seine de façon tout à fait satisfaisante, ce qui conduit à envisager de l'utiliser en mode prévision, afin d'anticiper au mieux ces événements extrêmes que sont les crues.