



eau
seine
NORMANDIE

PROGRAMME PIREN-SEINE

Programme Interdisciplinaire de Recherche
sur l'Environnement de la Seine

Hydro géologie

du bassin de la Seine

Comprendre et anticiper
le fonctionnement
hydrodynamique du bassin
pour une gestion durable de
la ressource

Sous la direction de Pascal Viennot

ENSEMBLE
DONNONS
vie à l'eau

Agence de l'eau

#2

L'Agence de l'eau Seine-Normandie a pour mission, conjointement avec les acteurs de l'eau, de conduire les eaux du bassin de la Seine vers le bon état écologique.

Depuis 1989, le Programme de Recherche Interdisciplinaire sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine) nous aide à mieux comprendre le fonctionnement du bassin et contribue aux décisions de l'Agence.

Ce programme de recherche a apporté un éclairage décisif sur la manière dont les rivières et les zones humides participent à l'épuration de nos effluents, sur la nécessité de réduire nos rejets en phosphore pour limiter l'eutrophisation, sur l'impact attendu du changement de pratiques culturelles afin de réduire la contamination des eaux par les nitrates, etc.

Partenaire du PIREN-Seine, l'Agence de l'eau souhaite valoriser l'important travail accompli et soutenir les recherches futures en contribuant à la publication de ces travaux.

C'est l'objet de cette collection que de faire partager au plus grand nombre ces connaissances longuement mûries.

Guy Fradin

Directeur de l'Agence de l'eau Seine-Normandie

Le programme de recherche PIREN-Seine est né en 1989 de la volonté du CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) de faire se rencontrer les chercheurs de diverses disciplines (une centaine de personnes appartenant à une vingtaine d'équipes) et les acteurs qui ont en charge la gestion des ressources en eau (une dizaine d'organismes publics et privés) dans cet espace de 75 000 km² constituant le bassin hydrographique de la Seine. En s'inscrivant dans la durée, tout en redéfinissant périodiquement ses objectifs et ses orientations, le programme, basé sur la confiance et le dialogue, a permis l'émergence d'une culture scientifique partagée entre gestionnaires et scientifiques. Les recherches à caractère appliqué sont menées dans un cadre coordonné privilégiant le développement de notre capacité à analyser, à comprendre et à prévoir le fonctionnement de cet ensemble régional d'écosystèmes qu'est le bassin de la Seine : comment ce territoire, avec sa géologie, son climat, sa végétation, mais aussi avec ses activités agricoles, domestiques et industrielles, fabrique-t-il à la fois le milieu aquatique lui-même et la qualité de l'eau de nos rivières et de nos nappes ?

Par un pilotage souple et participatif, le programme a su concilier, au sein d'une même démarche, les exigences d'une recherche fondamentale qui vise à fournir les clés pour comprendre, avec celles de la demande sociale qui attend des outils pour guider l'action.

Mais la demande sociale ne s'exprime pas seulement par le questionnement technique des gestionnaires. Elle passe aussi par le débat public avec les élus, les associations, les citoyens. L'état présent du milieu aquatique résulte de l'action millénaire de l'homme sur son environnement. Sa qualité future dépendra de ce que nous en ferons ; ce qui appelle un débat sur la manière dont nous voulons vivre sur le territoire qui produit l'eau que nous buvons, compte tenu des contraintes que nous imposent la nature et la société. L'ambition du PIREN-Seine, en tant que programme de recherche publique engagé, est aussi d'éclairer un tel débat. C'est dans cet esprit que nous avons entrepris la publication de cette collection de travaux. Elle veut offrir aux lecteurs, sur les sujets porteurs d'enjeux en matière de gestion de l'eau, les clés de la compréhension du fonctionnement de notre environnement.

Jean-Marie Mouchel et Gilles Billen

Direction du Programme PIREN-SEINE



La collection du programme PIREN-SEINE

Cette collection analyse différents aspects du **fonctionnement du bassin de la Seine** et de ses grands affluents, soit 75 % du territoire d'intervention de l'Agence de l'eau Seine-Normandie. D'autres programmes, en liaison avec le PIREN-Seine, s'intéressent à des régions ou des problématiques différentes. Ainsi Seine-Aval se focalise sur l'estuaire de la Seine et édite une collection similaire depuis 1999.



#1 - Le bassin de la Seine



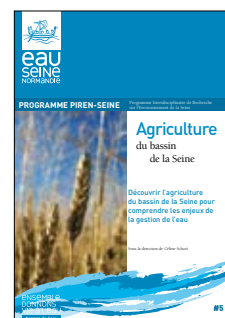
#2 - L'hydrogéologie



#3 - La pollution par les nitrates



#4 - Le peuplement de poissons



#5 - L'agriculture



#6 - L'eutrophisation des cours d'eau



#7 - Les métaux



#8 - La contamination microbienne



#9 - La micro pollution organique

D'autres fascicules sont à paraître dans les domaines suivants : les zones humides, les pesticides, l'histoire de Paris, les petites rivières urbaines et les risques écotoxicologiques.

La couleur de chaque fascicule renvoie à l'un des quatre objectifs principaux de l'Agence de l'eau :



Développer la gouvernance, informer et sensibiliser sur la thématique de l'eau



Satisfaire les besoins en eau, protéger les captages et notre santé



Reconquérir les milieux aquatiques et humides, favoriser la vie de la faune et de la flore



Dépolluer, lutter contre les pollutions de l'eau et des milieux aquatiques

Hydrogéologie

du bassin de la Seine

Auteurs :

Pascal VIENNOT⁽¹⁾, Agnès DUCHARNE⁽²⁾, Florence HABETS⁽²⁾,
François LAMY⁽³⁾, Emmanuel LEDOUX⁽¹⁾



RÉSUMÉ

Le bassin de la Seine est un organisme vivant, soumis au cycle de l'eau. Des hauteurs du plateau de Langres à son estuaire, la Seine, fleuve de plaine, a un régime lent. À l'équilibre naturel, elle reçoit globalement autant d'eau qu'elle en perd, ses crues ne sont pas brutales, ses étiages rarement sévères.

Mais, bien que la pluviométrie soit suffisante et que le bassin abrite d'importants aquifères, cet équilibre reste fragile. Une forte pression humaine de 16 millions d'habitants et une agriculture intensive fortement développée peuvent le rompre rapidement.

Aux pouvoirs publics et aux gestionnaires revient la lourde tâche de protéger efficacement la Seine et son bassin en régulant ses usages. Conformément à la loi sur l'eau de 1992, reprise par la Directive Européenne de 2000, ils ont à élaborer des schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) pour une gestion équilibrée de la ressource en eau.

Encore faut-il pour cela qu'ils aient compris comment « fonctionne » le bassin et qu'ils puissent prévoir ses évolutions et l'impact des aménagements en projet. C'est tout l'objet des travaux des chercheurs du PIREN-Seine, exposés dans ce fascicule.

À partir d'une description physique détaillée du bassin, de son climat et de ses aquifères, le fascicule « Hydrogéologie du bassin de la Seine » présente les grands enjeux de la gestion de l'eau : contenir les crues et assurer des débits suffisants en période sèche. Dès 1910, la construction de barrages-réservoirs a été entreprise à l'amont du bassin pour soutenir les étiages d'été et écrêter les crues hivernales. Ces ouvrages atteignent aujourd'hui une capacité totale de 830 millions de m³. Leur efficacité est sensible à l'échelle régionale. S'ils sont cependant trop éloignés de Paris pour protéger la capitale contre les inondations, ils permettent d'assurer en été les prises d'eau nécessaires à l'alimentation en eau potable de l'agglomération parisienne et de limiter les problèmes de qualité de l'eau.

Au-delà de ces données d'observation, les scientifiques disposent aussi de nouveaux outils, des modèles informatiques, qui leur permettent de synthétiser et de tester la compréhension qu'ils ont acquise du système hydrogéologique du bassin. Ils leur permettent également d'anticiper ses réactions aux changements.

Les caractéristiques des deux modèles utilisés sont présentées ici, ainsi que les objectifs auxquels ils répondent et leur pertinence. Grâce à eux, les interactions entre le fleuve et les aquifères du bassin ont pu être mises en évidence. Ils ont également servi à mesurer l'impact de l'évolution des prélèvements en nappe sur le débit des petits cours d'eau et du changement climatique sur le régime hydrologique suivant plusieurs hypothèses.

7 Introduction

COMPRENDRE

8 Le fonctionnement de la Seine et de son bassin

9 Une formation géologique en auréoles sédimentaires concentriques

11 Un relief peu accidenté, de faible altitude

12 Un climat tempéré et humide

13 Un réseau hydrographique de surface façonné par la géologie

15 Les enjeux de la gestion de l'eau

- > Les étiages sévères
- > Les crues
- > Prélèvements et régulation de la ressource en eau du bassin
- > Eaux superficielles : une contribution essentielle
- > Eaux souterraines : les prélèvements restent stables

22  LE CYCLE DE L'EAU

MODÉLISER

26 Le fonctionnement hydrodynamique du bassin

27 Introduction

28 Le modèle hydrologique CaB

- > Principes généraux
- > Paramètres d'entrée et calage

31 Le modèle hydrogéologique MODCOU

- > Principes généraux et objectifs
- > Couches de surface, formations aquifères
- > Paramètres d'entrée, calage
- > Application

PRÉVOIR

38 Pour décider sur la base d'éléments quantifiés

39 Première étude : Influence de l'augmentation des prélèvements en formation aquifère

44  QMNA5

45 Deuxième étude : Influence du changement climatique. De nouvelles études en cours

- > Conséquences du changement climatique sur le bassin
- > Impacts hydrologiques simulés par les modèles CaB et MODCOU
- > De nouvelles études en cours

52 Conclusion

INTRODUCTION

Ce document est plus particulièrement complémentaire de deux autres ouvrages édités dans la même collection : « L'agriculture dans le bassin de la Seine » et « La pollution du bassin de la Seine par les nitrates ».

Territoire arrosé par la Seine et ses affluents (Marne, Yonne, Oise principalement), le bassin de la Seine couvre une surface d'environ 78 600 km².

La densité des forêts sur le bassin est faible mais celle de l'agriculture est très forte. Cet espace est également très marqué par l'homme et une urbanisation importante s'est progressivement mise en place autour des grands cours d'eau.

La population compte environ 16 millions d'habitants dont 80 % vit en zone urbaine.

Elle est très concentrée : 55 % vit sur les 2 % du territoire que forme l'agglomération parisienne (8 millions d'habitants), un tissu urbain continu de 2 000 km².

Les activités humaines, anciennes ou actuelles, ont des conséquences énormes sur l'écoulement, la qualité des eaux et des milieux.

Dans la loi sur l'eau de 1992, le législateur a préconisé l'élaboration de schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) qui ont pour objet de fixer les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau. Cette disposition est reprise par la Directive européenne de 2000 qui institue la mise en place de plans de gestion.

Pour mieux asseoir et améliorer les décisions de gestion, il faut tenter de comprendre le fonctionnement du système Seine. Cette approche nécessite la mise en oeuvre de diagnostics et d'outils de gestion permettant d'envisager l'évolution de l'écosystème à la suite de la création d'une infrastructure, d'un nouvel aménagement, ou lors de la mise en oeuvre d'une mesure réglementaire.

C'est dans ce cadre que des démarches de recherche ont été engagées sur la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du « système Seine ».

Plus généralement ces démarches de recherche peuvent se diviser en trois phases :

- une **phase de compréhension** du système dans son ensemble par le biais d'études rigoureuses et détaillées menées sur le terrain ou en laboratoire ;
- une **phase de modélisation** qui permet une représentation mathématique du système et qui sera validée en confrontant les réponses de ces modèles aux mesures. Ces modèles, conçus d'abord comme outils de connaissance traduisant une certaine vision du système, devront ensuite être suffisamment opérationnels pour répondre aux questions posées par la gestion de la ressource en eau du bassin et guider ainsi l'action des organismes qui en ont la charge ;
- une **phase d'exploitation exploratoire** des modèles qui permet d'estimer la réponse du système à des changements de ses contraintes comme par exemple le climat ou la pression des activités humaines.

Cette démarche en trois grandes phases peut se résumer en :

COMPRENDRE

MODÉLISER

PRÉVOIR



Le fonctionnement de la Seine et de son bassin

La connaissance de la géologie, du relief et du climat du bassin conduit à une meilleure compréhension de son réseau hydrographique. À son tour, cette compréhension permet d'appréhender les enjeux de la gestion de l'eau.



Une formation géologique en auréoles sédimentaires concentriques

Le bassin versant de la Seine est presque entièrement situé dans le Bassin parisien, unité géologique caractérisée par une structure en auréoles sédimentaires concentriques, s'étageant du début du Secondaire (Trias) au Tertiaire supérieur (Miocène) et s'appuyant sur des massifs anciens (figure 1).

Ce bassin sédimentaire est caractérisé par un empilement de formations à faible pente convergeant vers le centre (géométrie dite « en pile d'assiettes » (figure 2)) et comprenant d'importantes formations aquifères séparées par des formations semi-perméables.



Les berges de Seine.

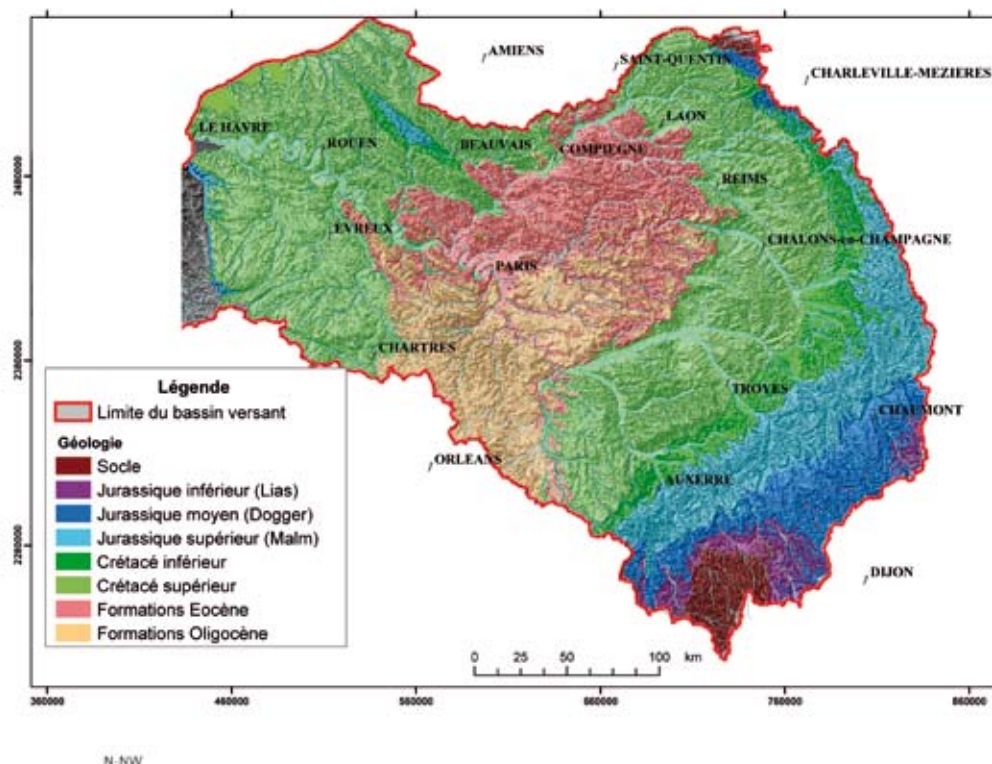


Figure 1 : Carte géologique simplifiée du bassin de la Seine. Les formations, du Jurassique inférieur au Crétacé supérieur, affleurent en auréoles concentriques autour d'une vaste zone de formations tertiaires (Eocène et Oligocène au centre du bassin).

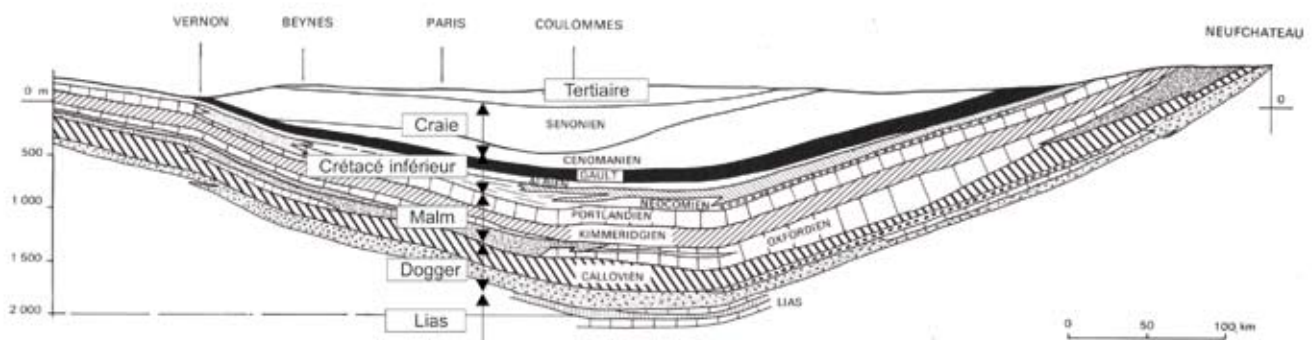


Figure 2 : Coupe générale transversale du bassin de la Seine (AESN, 1974). Cette coupe met en évidence l'empilement des différents horizons en « pile d'assiettes ».

COMPRENDRE

Cénozoïque (Tertiaire)	Quaternaire	2 MA	Homo sapiens
	Néogène	Pliocène	6 MA
		Miocène	23 MA
	Paléogène	Oligocène	34 MA
		Eocène	55 MA
		Paléocène	65 MA
Mésozoïque (Secondaire)	Crétacé	Supérieur	95 MA
		Inférieur	140 MA
	Jurassique	Malm	160 MA
		Dogger	181 MA
		Lias	210 MA
Paléozoïque (Primaire)	Trias	245 MA	Mammifères Dinosaures
	Permien	290 MA	Conifères

Échelle stratigraphique simplifiée et présentation des grands événements qui ont marqué l'histoire de la terre ces 300 derniers millions d'années.

Sources de la Seine en Côte d'or (21).



Calcaire.



Craie.

Les sources « officielles » de la Seine sont situées sur le plateau de Langres, à une altitude de 471 m. Le bassin versant du fleuve couvre 78 600 km² (au Havre), soit 12 % de la surface de la France. Dans ce bassin, le socle correspond à environ 3% de la superficie et est représenté par les affleurements cristallins du Morvan au sud-est et par ceux, métamorphiques* des Ardennes, au nord-est. Les roches sédimentaires à l'affleurement sont composées de couches alternées de calcaires, craies, marnes et argiles, sables quartzeux et grès.

Aux auréoles régulières du pourtour du bassin versant s'oppose l'empilement des couches tertiaires du centre où de nombreuses variations verticales de faciès sont enregistrées : des calcaires aux marnes et aux marnes gypseuses qui, bien que peu représentées à l'affleurement jouent un rôle important dans la chimie des eaux.

L'évolution de la morphologie du Bassin parisien sous l'effet de la tectonique conditionne l'agencement des reliefs et des paysages actuels ainsi que l'organisation de son réseau hydrographique.

Un relief peu accidenté, de faible altitude

Le relief du bassin est peu accidenté, avec des altitudes généralement inférieures à 300 m, dépassant rarement 500 m sauf dans le Morvan où elles culminent à 900 m [figure 3].

Ces altitudes modérées expliquent les faibles pentes des cours d'eau (de 0,01 à 0,03 m / 100m), qui coulent globalement vers l'ouest en incisant les cuestas* orientales, puis les plateaux du centre du bassin (plaines de Beauce et de Picardie par exemple) avant de former des méandres dans les plaines alluviales, notamment à l'aval de Paris.

La Seine se jette dans la Manche au Havre, après un parcours de 776 km, mais le domaine estuarien (eaux saumâtres et influence hydrodynamique de la marée) commence à Poses, en amont de Rouen, à 166 km de l'estuaire. Les sols actuellement présents sur le bassin de la Seine se sont formés à partir d'une couverture de limons et d'argiles quaternaires qui recouvrent les formations géologiques. Ils sont en général pourvus de bonnes capacités de rétention d'eau, qui contribuent à réguler le débit des rivières, en association avec une contribution importante des aquifères (dont le drainage vers les rivières constitue le débit de base de ces dernières) et une pluviométrie bien répartie au cours de l'année [figure 4].

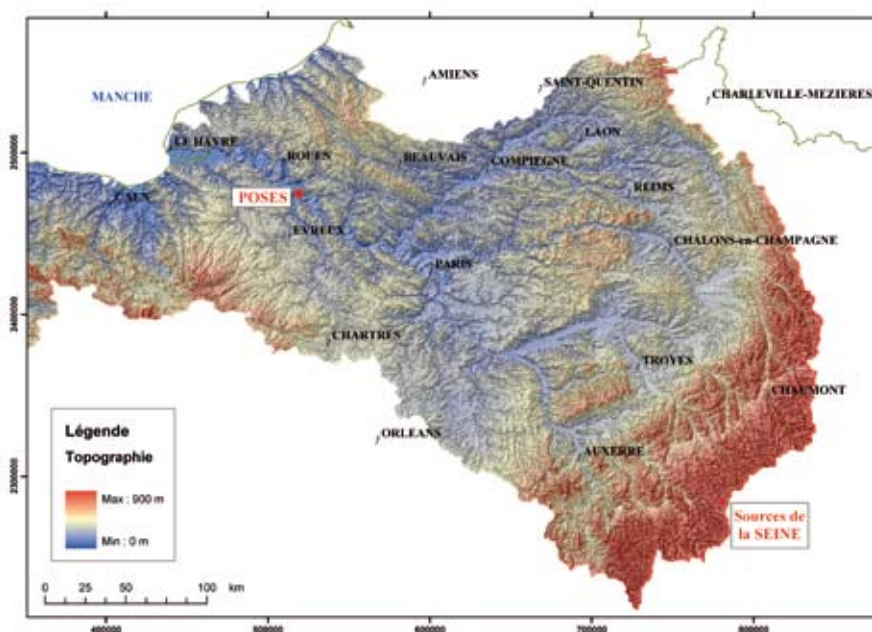


Figure 3 : Topographie et réseau hydrographique du bassin de la Seine.



Vue panoramique du barrage de Poses (© Rodolphe Delorme).

Construit de 1878 à 1885 près de l'ancien village des marins, le barrage de Poses peut retenir 7 m de hauteur d'eau et la marée y fait encore sentir ses derniers effets.

Les grandes écluses d'Amfreville-sous-les-Monts, qui font pendant à celles de Notre-Dame-de-la-Garenne, constituent la fin du fleuve canalisé.

La conception du barrage permet à l'eau de s'écouler par dessus lors des périodes de forts débits.

Sa construction a entraîné l'élévation du niveau de la Seine de près de 1m20.

Un climat tempéré et humide

La pluviométrie du bassin est due à un apport assez constant d'humidité par les vents d'ouest issus de l'Océan Atlantique (climat océanique). Cette humidité précipite abondamment sur les régions côtières du nord-ouest (Normandie, avec une pluviométrie de 800 à 1100 mm/an) puis sur les reliefs sud-est du bassin (pluviométrie supérieure à 800 mm/an pouvant atteindre 1300 mm dans le Morvan).

Les plateaux du centre du bassin sont moins bien arrosés (pluviométrie de 550 à 850 mm/an) car les vents d'ouest humides n'y rencontrent pas d'obstacle lié au relief favorisant la précipitation, les altitudes maximales ne dépassent pas 200 mètres en Île-de-France.

La Seine est le fleuve français où l'influence de la neige est la plus faible : le nombre de jours de neige est en effet très limité, à l'exception du Morvan où il peut atteindre 40 jours. L'influence nivale sur le régime hydrologique des rivières est donc négligeable.

Ce régime est dit « pluvial océanique ».

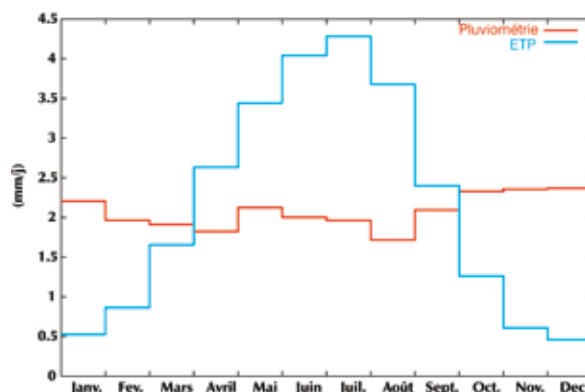
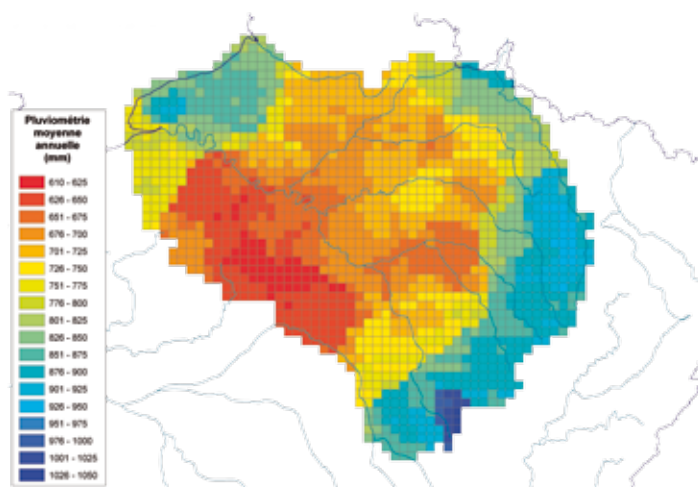


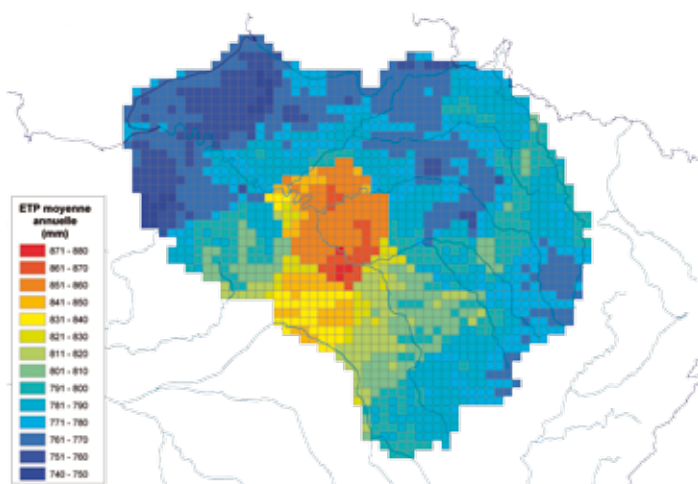
Figure 4 : Pluviométrie et évapotranspiration potentielle* (ETP) journalière moyenne (1970-2004) sur le bassin de la Seine.



**PLUVIOMÉTRIE MOYENNE ANNUELLE :
745 MM**

Figure 5 : Pluviométrie moyenne annuelle (1970-2004) sur le bassin de la Seine. On remarque une grande variabilité spatiale entre les régions, la pluviométrie moyenne passant pratiquement du simple au double entre la Beauce (moins de 620 mm/an) et le Morvan (près de 1100 mm/an).

(Sources : données SAFRAN/Météo-France).



**ÉVAPO-TRANSPIRATION POTENTIELLE
MOYENNE ANNUELLE : 759 MM**

Figure 6 : Évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne annuelle (1970-2004) sur le bassin de la Seine. L'ETP correspond à la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant. Dans la réalité, la qualité d'eau réellement évaporée (Évapo-Transpiration Réelle) est donc inférieure à l'ETP. Sur le bassin, elle est voisine de 600 mm.

(Sources : données SAFRAN/Météo-France).

Un réseau hydrographique de surface façonné par la géologie

Les déformations tectoniques, consécutives à la formation alpine, contrôlent largement le tracé du réseau hydrographique. Ces déformations expliquent d'une part la convergence générale du réseau vers l'Île-de-France et d'autre part, l'encaissement du réseau dans les plateaux (méandres encaissés de la Marne, de la Seine aval, ...).

On retrouve l'influence de la structure géologique sur les caractéristiques hydrologiques comme les écoulements spécifiques. La distribution spatiale de ces écoulements spécifiques* (d'après l'atlas de la Seine et des cours d'eau normands de G. Bédiet, AESN 1973-1978) présente en effet une organisation auréolaire. Les valeurs de l'écoulement spécifique sont inférieures à 4 litres/seconde au km² en Beauce, tandis qu'elles sont supérieures à 10l/s/km² sur toute la bordure est et sud-est du bassin, en relation avec les variations pluviométriques. Le maximum dépasse 20l/s/km² aux sources de l'Yonne.

Les principaux affluents de la Seine (l'Aube, la Marne et l'Oise) ont un régime hydrologique très similaire au sien parce qu'ils partagent le même climat tempéré, la même absence de relief et des caractéristiques géologiques comparables. Tous débutent leurs années hydrographiques en septembre et atteignent leurs débits maximum et minimum respectivement en janvier et en août.

Mis à part les 2000 km² correspondant à la haute vallée de l'Yonne dans le Morvan cristallin, le reste du bassin de la Seine se situe dans l'ensemble sédimentaire du Bassin parisien caractérisé par un empilement de couches à faible pente de différentes roches. Les aquifères* les plus importants sont situés dans les roches carbonatées (calcaires et craie) ou détritiques (sables et grès).

Les couches sédimentaires du Trias jusqu'au Crétacé affleurent en auréoles autour d'une vaste zone centrale Tertiaire transgressive*. La faible pente des assises vers le centre de la cuvette (environ 1,5 %) et l'augmentation simultanée de l'épaisseur des dépôts, conséquence d'une lente subsidence*, entraîne une puissance* maximale globale des couches de l'ordre de 3000 m sous la Brie.

Les formations aquifères sont séparées par des niveaux moins perméables, sans toutefois être complètement isolées les unes des autres. Il s'agit donc, en général, d'aquifères complexes ou multicouches.

Neuf formations aquifères principales ont été répertoriées dans le bassin, des plus anciennes (les plus profondes) aux plus récentes :

- **le Lias inférieur** (Sinémurien, Héttingien, Rhétien) ;
- **le Dogger** (Bathonien, Bajocien sous la formation du Callovien) dont les calcaires forment la Côte de Moselle et qui est exploité en région parisienne à des fins géothermiques ;
- **le Lusitanien** (Oxfordien) qui forme la Côte de Meuse à l'est du bassin ;
- **le Portlandien**, peu connu du point de vue hydrogéologique ;
- **l'Albien**, constitué d'un ensemble sableux, qui représente une des ressources en eau stratégique du bassin ;
- **la Craie** au sens large, constituée essentiellement par les formations du Cénomane et du Sénonien : de surface totale d'environ 110 000 km², sa surface occupe près de 65 000 km² dans le bassin de la Seine et ses ressources en eau sont estimées à 12 millions de m³ d'eau par an ;
- **les formations tertiaires** de :
 - l'Eocène moyen et inférieur (Lutétien, Yprésien, Thanétien, Montien) encore appelé nappe du Soissonais, s'écoule du nord vers le sud et se met progressivement en charge en direction de Paris ;
 - l'Eocène supérieur (Ludien, Marinésien, Auversien et Lutétien) qui correspond à la nappe du Champigny ;
 - l'Oligocène (Chattien et Stampien) encore appelé nappe de Beauce et des Sables de Fontainebleau qui possède un bassin d'alimentation qui s'étend largement au sud de la région parisienne. Cet aquifère est très exploité à des fins d'irrigation.

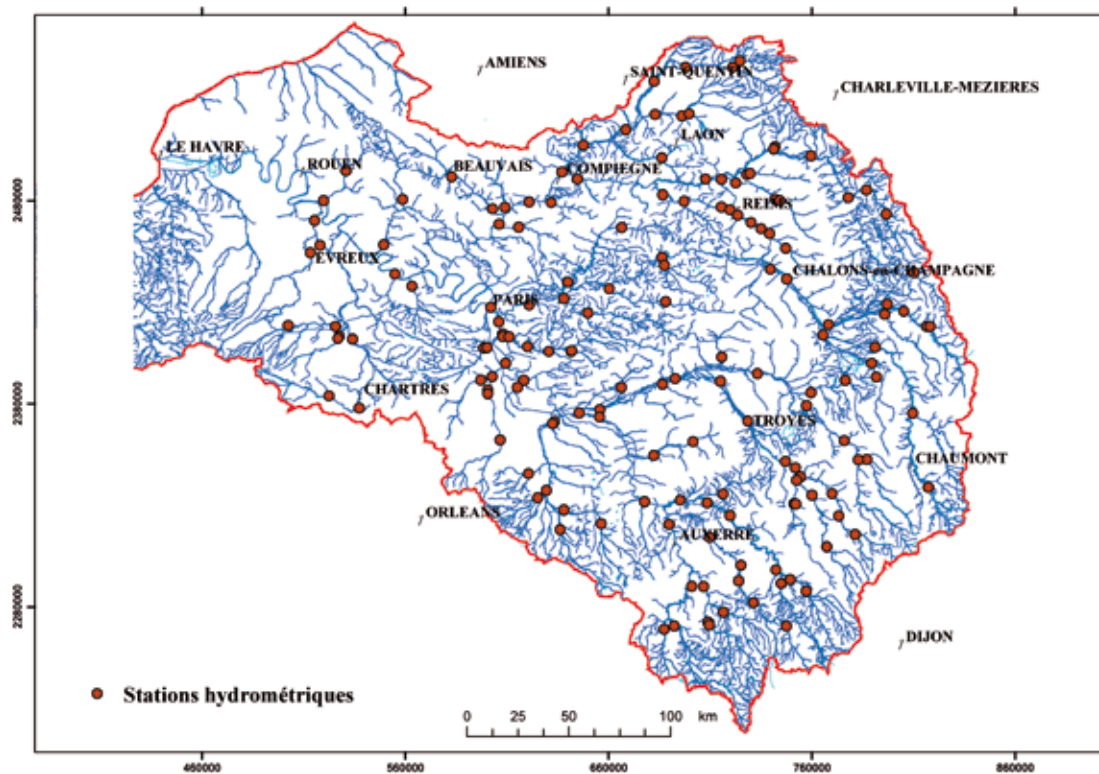


Figure 7 : Réseau hydrographique du bassin de la Seine et localisation des stations de mesures hydrométriques. On remarque l'influence marquée de la géologie sur la densité du réseau hydrographique : forte sur les formations du socle (Morvan) ou du Crétacé inférieur (auréole concentrique Auxerre-Troyes-St Dizier) et très faible sur la Craie affleurante ou l'Oligocène au sud de la Seine (Beauce par exemple).

Le réseau hydrographique de surface est directement lié aux nappes souterraines : les thalwegs* peuvent atteindre l'aquifère le plus superficiel situé en position de nappe libre.

En régime naturel et en période de basses eaux estivales, la rivière est alors alimentée par la nappe.

En période de hautes eaux, cela peut être l'inverse.

Enfin, la nappe des alluvions, bien développée dans les vallées des principaux cours d'eau, constitue la dixième formation aquifère rencontrée dans le bassin.

Peu épaisse (< 10 m), elle est très productive car alimentée tantôt par le cours d'eau, tantôt par l'aquifère.



« Coucher de soleil sur les gravières » (© Thierry Dichtenmuller) : Lorsqu'on exploite les granulats dans le lit majeur des rivières, les dépressions ainsi formées se remplissent d'eau provenant de l'aquifère des alluvions au fur et à mesure du creusement.

Les enjeux de la gestion de l'eau du bassin

Le bassin de la Seine bénéficiant d'une pluviométrie suffisante et d'aquifères importants, la ressource en eau n'y est pas un problème majeur. D'un point de vue quantitatif, ce sont plutôt les phénomènes d'étiage sévère et de crue qui suscitent les plus vives inquiétudes.

LES ÉTIAGES SÉVÈRES

Dès 1910 fut décidé un programme de construction de barrages-réservoirs à l'amont du bassin. Le rôle premier était de soutenir les étiages d'été et, secondairement, d'écrêter les crues hivernales.

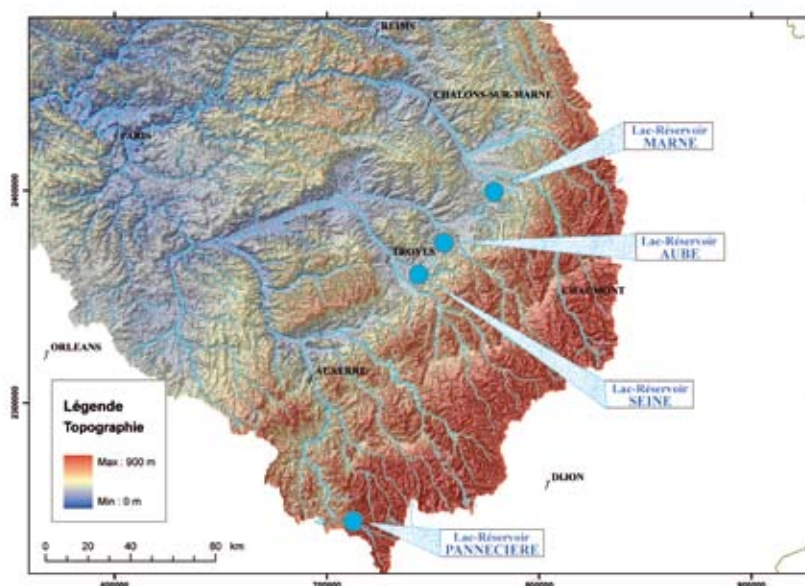
Les trois principaux barrages-réservoirs ont été construits, entre 1966 et 1990, en dérivation de la Seine, de la Marne et de l'Aube, sur une auréole argileuse imperméable (la formation géologique du Gault), à environ 200 km à l'amont de Paris.

Le quatrième, le barrage - réservoir de Pannecière, achevé en 1949, est situé sur la haute vallée de l'Yonne.

Le volume global pouvant être stocké dans les lacs-réservoirs et géré par l'IIBRBS (Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine) est de près de 805 millions de m³.

Ouvrage	Cours d'eau	Année de mise en service	Volume (millions de m ³)	Surface du bassin versant contrôlé
Pannecière	Yonne	1949	80	220 km ²
Lac-réservoir Seine	Seine	1966	205	2 400 km ²
Lac-réservoir Marne	Marne	1974	350	2 950 km ²
Lac-réservoir Aube	Aube	1990	170	1 700 km ²

Caractéristiques générales des ouvrages gérés par l'IIBRBS.



Situation géographique des barrages-réservoirs

Leur capacité totale atteint même environ 830 millions de m³ si on y ajoute les volumes supplémentaires qui leur sont réservés par les barrages du Crescent et du Bois-de-Chaumeçon (bassin versant de l'Yonne), gérés par Électricité de France.

Ces lacs et barrages permettent un écrêtement sensible des crues, significatif à l'échelle régionale. À Paris cependant, et du fait de leur éloignement, cette protection est limitée.

En effet, les quatre lacs-réservoirs contrôlent 17 % seulement du bassin versant en amont de Paris.

En outre, le barrage de Pannecière ne maîtrise que 2 % du bassin de l'Yonne.

À Paris, le rôle majeur des lacs-réservoirs réside donc dans le soutien du débit d'étiage en fin d'été et en automne, ces trois réservoirs pouvant restituer jusqu'à 60 m³/s, ce qui peut plus que doubler le débit d'étiage à Paris lors des périodes d'étiage sévère.

Les valeurs minimales annuelles des débits caractéristiques d'étiage moyen, jadis très faibles, ne descendent plus en dessous de 70 m³/s.

Ce soutien très efficace des étiages s'accompagne d'une forte régularisation de leur période d'occurrence, étroitement liée à la stratégie de remplissage et de vidange des réservoirs.

Dans les années 1950, les étiages étaient observés de juin à novembre et le mois de juin représentait 22% des occurrences des débits mensuels minimaux et octobre 26%.

Pour la période récente, plus de 85% des étiages sont observés en août (64%) et en septembre (21%).



Barrage de Pannecière IIBRBS, P. Pérouse – 2002.



Lac Seine : déversoir d'extrémité du canal d'amenée.



Lac Marne : église de Champaubert.



Lac Aube : cercle d'eau.

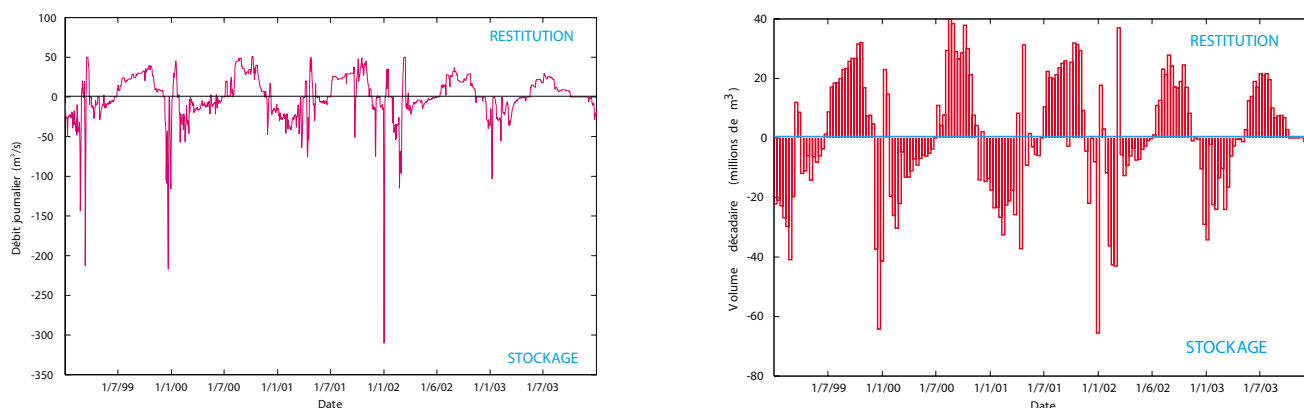


Figure 8 : Lac Marne : évolution des débits moyens journaliers et des volumes décadaires de stockage / restitution de 1999 à 2003.

Ce soutien des barrages-réservoirs permet en outre d'assurer les prises d'eau nécessaires à la production d'eau potable pour l'agglomération parisienne et de limiter les problèmes de qualité de l'eau, menacée par des pressions intenses d'origine humaine, avec des répercussions tant environnementales que pour l'alimentation en eau potable.

LES CRUES

D'une façon générale, deux principaux types de fonctionnement hydrologique de crue coexistent sur le bassin :

- **les crues rapides** de tête de bassin qui sont provoquées par des ruissellements intenses, de courte durée (quelques heures), correspondant à des précipitations fortes et localisées (orages d'été principalement) ;
- **les crues lentes** par débordement de rivières qui ont généralement lieu dans les vallées dont certains secteurs fortement urbanisés sont le siège d'une activité économique intense. Ces inondations, souvent puissantes, font suite à des pluies longues et régulières sur des bassins versants étendus. La durée de submersion peut atteindre plusieurs semaines voire, localement, plusieurs mois.

En région parisienne, les grandes crues sont rares et restent le fruit de la conjonction d'événements singuliers comme, par exemple, la présence de sols gelés sur le bassin versant qui provoquent un ruissellement massif, vers les cours d'eau, des eaux pluviales qui ne peuvent s'infiltrer dans les sols.

La grande crue de 1955 est un parfait exemple de ce phénomène.

Plus généralement, il importe de considérer qu'au droit de Paris le bassin versant de la Seine est déjà très vaste, près de 44 000 km², dont 12 700 appartiennent à la Marne et 10 900 à l'Yonne.

Sur sa majeure partie, ce bassin versant présente des pentes faibles ou modérées.

De ce fait, les pentes des cours d'eau qui le parcourent sont faibles et leur lit majeur peu encaissé.

Dans ces conditions, les eaux de crue ne s'évacuent vers l'aval que très mal et les décrues sont longues.

En cas de paroxysmes pluvieux successifs, la première onde de crue des grands cours d'eau les plus lents (Marne, Seine) est rattrapée par la deuxième onde des rivières plus rapides (Yonne) et plus courtes et proches de Paris (Loing, Grand et Petit Morin).

Il y a alors empilement de deux générations de crue au droit de l'agglomération parisienne.

Cette configuration, redoutée par les responsables actuels de la prévision et de la protection des crues, est bel et bien celle qui a été observée en 1910.

Les effets importants de ces grandes crues leur ont valu d'être consignées depuis longtemps dans les chroniques de l'histoire parisienne.

Les plus anciens relevés historiques précis correspondent aux marques portées sur le pont de la Tournelle.

Depuis le milieu du 19^{ème} siècle, les références se font sur une échelle située au pont d'Austerlitz.

La crue la plus importante répertoriée par ailleurs est celle en date du 27 février 1658.

Le Zouave du pont de l'Alma, les pieds au sec.



Les crues les plus importantes		Les crues les plus récentes		
27 février 1658	8,96 m	6 janvier 1924	7,32 m	
28 janvier 1910	8,62 m	23 janvier 1955	7,12 m	Crue cinquantennale
26 décembre 1740	8,05 m	14 janvier 1982	6,15 m	La plus forte des 25 dernières années
9 février 1799	7,65 m			
28 janvier 1802	7,62m	Mars 2001	5,21 m	

Hauteurs de crues à l'échelle de Paris Austerlitz.

(Source DIREN Î.d.F : schéma directeur de prévision des crues du bassin Seine-Normandie).

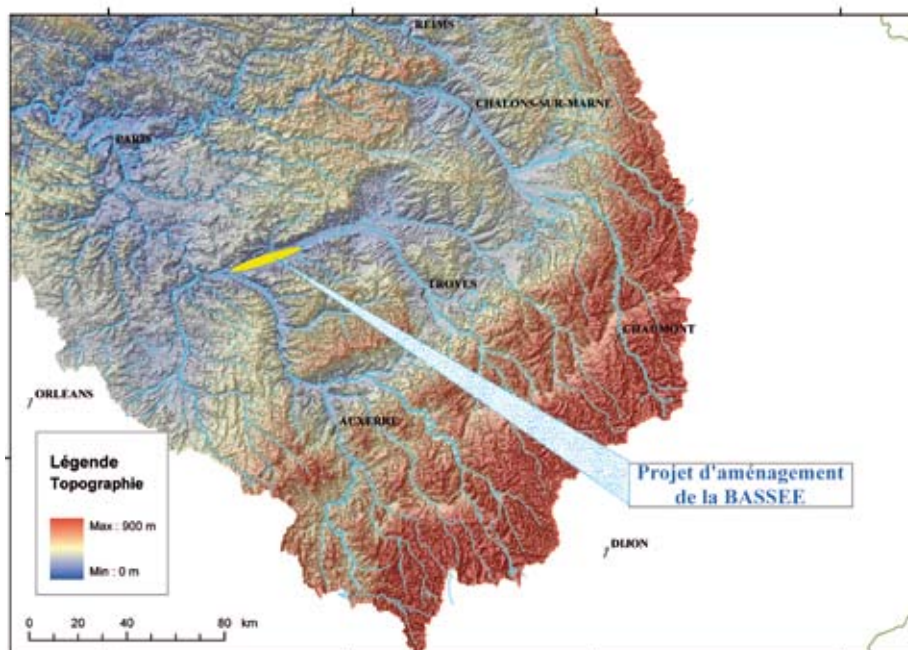
Les crues dans le bassin de la Seine atteignent rarement des écoulements de 40 l/s/km² alors que les autres fleuves français connaissent des pointes de débit beaucoup plus élevées (50 l/s/km² pour la Loire et le Rhône à leur embouchure et 70 pour le Rhin à Lauterbourg).

Les crues de la Seine ne sont donc pas exceptionnelles par rapport à celles des autres fleuves français.

La région parisienne restant vulnérable aux fortes crues et ce, malgré la présence des grands lacs-réservoirs, il a récemment été cherché d'autres actions visant en priorité à :

- décaler les crues de la Seine pour laisser passer les flots de l'Yonne : c'est le projet de la Bassée qui s'inspire d'aménagements réalisés sur le Rhin et qui consiste à retenir temporairement l'eau de la Seine. Cette eau serait stockée dans un ouvrage de 58 kilomètres de long, composé de 9 casiers répartis sur 2 300 hectares et pouvant contenir 55 millions de m³ d'eau sur une hauteur moyenne de 2,5 m ;
- écrêter la pointe de crue de l'Yonne en adaptant la gestion des barrages hydro-électriques de la Cure (principal affluent de l'Yonne).

Boucle de la grande Bosse
IIBRBS - P. Pérouse.



L'Yonne à Auxerre.



PRÉLÈVEMENTS ET RÉGULATION DE LA RESSOURCE EN EAU DU BASSIN

La ressource en eau du bassin de la Seine et plus généralement du bassin Seine-Normandie est suffisante pour satisfaire, de manière durable, les besoins globaux en eau.

Les besoins en eau potable pour l'ensemble de la population sont satisfaits à près de 46% par des prélèvements en eau superficielle (dans les rivières essentiellement).

Ces prélèvements ont légèrement augmenté lors des vingt dernières années, compensant la diminution des prélèvements en nappes souterraines.

Une des causes de ce transfert pourrait être l'abandon d'un certain nombre de captages du fait de la dégradation sensible de la qualité des eaux prélevées (nitrates, pesticides, ...).

EAUX SUPERFICIELLES : UNE CONTRIBUTION ESSENTIELLE

En 2001, le volume total prélevé en eau de surface dans le bassin Seine-Normandie s'élevait à 1,8 milliard de m³. La répartition par type d'usage montre que 43% du volume total est prélevé par les collectivités locales pour l'alimentation en eau potable de la population et à Paris pour le nettoyage de la voirie. Près de 30% est prélevé par Électricité de France pour le refroidissement des centrales électriques et 27% est destiné à la satisfaction des besoins en eau de l'industrie.

La production d'eau potable à partir des eaux de surface est effectuée dans 63 usines dont 46% sont situées en région Basse-Normandie. La capacité totale de production de ces usines est de 4 080 000 m³ jour. Les cours d'eau les plus sollicités pour satisfaire l'alimentation en eau potable sont essentiellement la Seine, la Marne et l'Oise en amont immédiat de Paris (94% des volumes prélevés) et en Basse-Normandie où les nappes ne peuvent satisfaire les besoins.

En millions de m ³ (2001)	Eau de surface	Eau souterraine	Total
Collectivités locales	788	900	1688
Centrales thermiques	537	-	537
Industries	493	220	713
Irrigation	7	80	87
Volume global	1825	1200	3025

Consommations des volumes d'eau.

Pour l'industrie, les prélèvements les plus importants se concentrent principalement entre Paris et la mer, et dans la vallée de l'Oise où sont implantés d'importants sites industriels.

Enfin, les très faibles prélèvements en rivière effectués à des fins agricoles (irrigation essentiellement) sont globalement répartis sur l'ensemble du bassin à l'exception des zones amonts.

EAUX SOUTERRAINES : LES PRÉLÈVEMENTS RESTENT STABLE

En 2001, le volume global prélevé en nappe s'élevait à 1,2 milliard de m³.

Ce volume est resté globalement stable depuis cette date. Certaines formations restent peu propices aux prélèvements (nappes profondes comme l'Albien, formations calcaires très karstiques, ...) alors que les formations de la Craie ou tertiaires (Éocène, Oligocène), ou encore les formations alluviales de la Seine aval sont largement exploitées.

La plupart des prélèvements en nappe sont destinés à l'alimentation en eau potable (~75%) soit 900 millions de m³ par an.

L'industrie consomme moins (220 millions de m³/an) et ce chiffre tend à baisser au cours de ces dernières années.

Les prélèvements industriels s'effectuent principalement dans la nappe de la Craie en bordure de la vallée de la Seine moyenne et aval.

Enfin, 80 millions de m³ (soit moins de 7% du total) sont prélevés à des fins agricoles en période d'étiage.

Ce chiffre fluctue fortement en fonction des années.

La plus grande partie des prélèvements agricoles s'effectue dans la plaine de Beauce mais les quantités sont largement sous-estimées dans les autres régions du fait de l'absence de compteurs de prélèvement.

Toutefois, sur ces zones, ce sont les prélèvements par les industriels et par les collectivités qui sont prédominants.



Collectivités locales.



Centrales thermiques.



Irrigation.



Industries.

Le cycle de l'eau

L'EAU ET LES RIVIÈRES : DE L'EAU QUI PLEUT À L'EAU QUI COULE

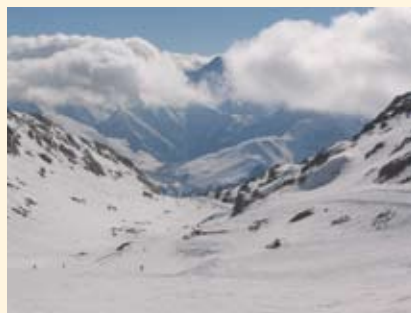
Le cycle de l'eau se déroule à la fois sur la Terre et dans l'atmosphère. Les rayons chauds du soleil provoquent l'évaporation de l'eau de surface. Transformée en vapeur, celle-ci refroidit en s'élevant et reforme des gouttelettes qui donnent à leur tour des nuages. Ces nuages, se déplaçant grâce au vent, se transforment en gouttes pour retomber sous forme de pluies. Ce sont ces pluies qui, sur les continents, alimentent les rivières qui retournent à la mer.

Le cycle est bouclé, c'est le mouvement perpétuel de l'eau.

Évaporation de l'eau de surface



Précipitation



Un chemin éternel



La quantité d'eau totale sur la terre est pratiquement restée inchangée depuis près de quatre milliards d'années lors de son apparition sous forme liquide.

L'eau ne se perd pas, elle ne se crée pas non plus, elle se transforme, passant au cours de son cycle de l'état gazeux (vapeur d'eau dans l'atmosphère) à l'état liquide (pluies, océans) ou à l'état solide (neiges, glaces en particulier polaires).

Il y a toujours autant d'eau qui s'évapore en tout point du globe que d'eau qui tombe en précipitations, mais pas au même endroit, ni au même moment. Lorsque l'on fait le bilan des flux hydriques, on constate que, chaque année, il s'évapore plus d'eau qu'il ne s'en précipite au-dessus des océans. Cette vapeur d'eau océanique vient donc précipiter sur les continents où là, à l'inverse, il précipite plus d'eau qu'il ne s'en évapore.

Que devient cette eau ?

Globalement elle retourne aux océans via les cours d'eau par ruissellement ou alimente les nappes souterraines par infiltration, nappes qui, elles même, alimenteront les cours d'eau.

Ce flux d'eau renouvelé constitue une sorte de « réserve annuelle » dans laquelle il est donc possible de puiser. Ces prélèvements doivent toutefois être maîtrisés pour assurer la pérennité de la ressource.

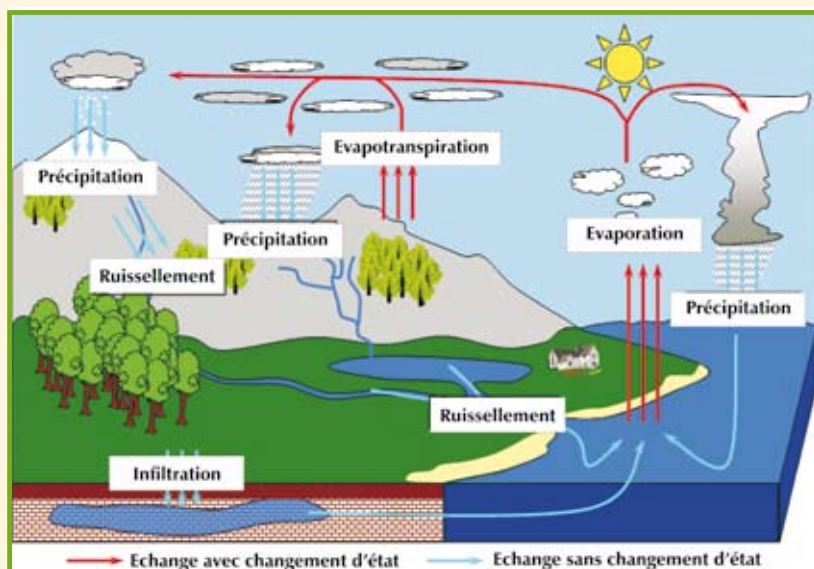


Figure 9 : La dynamique du cycle de l'eau
(documentation bibliothèque SVT - académie de Dijon).

repères

En moyenne sur l'année et sur l'ensemble du globe terrestre :

- > 65% des précipitations qui arrivent à terre s'évaporent,
- > 24% ruissellent
- > 11% s'infiltrent vers les nappes et les rivières souterraines.

En France, les précipitations sous forme de pluie et neige représentent, en année moyenne, près de 440 milliards de m³.

- > 100 milliards de m³ alimentent les nappes
- > 70 partent en ruissellement pour alimenter les rivières.

LES EAUX SOUTERRAINES

Les eaux souterraines proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable (argile, marnes).

Là, elles s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé aquifère.

L'eau souterraine chemine en nappe* dans le sous-sol sous l'effet de la gravité vers les points bas de la topographie, parfois pendant des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau.

Les nappes souterraines fournissent ainsi presque le tiers du débit total de tous les cours d'eau de la planète.

On distingue deux principaux types de nappes d'eau souterraine (figure 10) selon qu'elles circulent sous une couche perméable ou non :

- **les nappes libres*** : elles sont situées sous un sol perméable. Au-dessus de la nappe en effet, les pores du terrain perméable ne sont que partiellement remplis d'eau, le sol n'est pas saturé, et les eaux de pluie peuvent toujours l'imprégner davantage. Aussi, le niveau de la nappe peut-il monter ou baisser à son aise. De telles nappes peuvent donc contenir des volumes d'eau variables.

C'est le cas notamment des nappes d'accompagnement des rivières appelées également nappes alluviales. Elles sont formées par les grands épandages de sables et graviers des fleuves et des rivières.

Ces nappes fournissent 60% des eaux souterraines captées en France, en particulier grâce à leur facilité d'accès et leur bon débit. Elles sont le lieu privilégié des échanges entre les cours d'eau et les autres grandes nappes libres des coteaux mais sont de ce fait beaucoup plus vulnérables à la pollution.

- **Les nappes captives*** : elles sont emprisonnées entre deux couches géologiques très peu perméables. Elles sont dites captives car leur niveau ne peut s'élever à travers leur couverture. Ces nappes n'ont qu'un lien ténu avec la surface qui les alimente là où la couche perméable

affleure. De telles nappes se renouvellent donc plus lentement que les nappes libres. Elles sont en général relativement profondes, quelques centaines de mètres et plus et, si leur pente est forte, l'eau y est sous pression.

La pression est même parfois suffisante pour que le creusement d'un puits permette à l'eau de jaillir en surface : une telle nappe est alors dite artésienne.

Un exemple typique en France est celui de la nappe captive des Sables-Verts de l'Albien, qui se trouve, sous Paris à environ six cents mètres de profondeur mais dont les eaux d'infiltration se situent principalement aux environs d'Auxerre dans l'Yonne.

Au siècle dernier, cette nappe était artésienne et jaillissait à environ 10 mètres de la surface du sol. Mais elle a été intensément exploitée et aujourd'hui, l'eau doit être pompée.

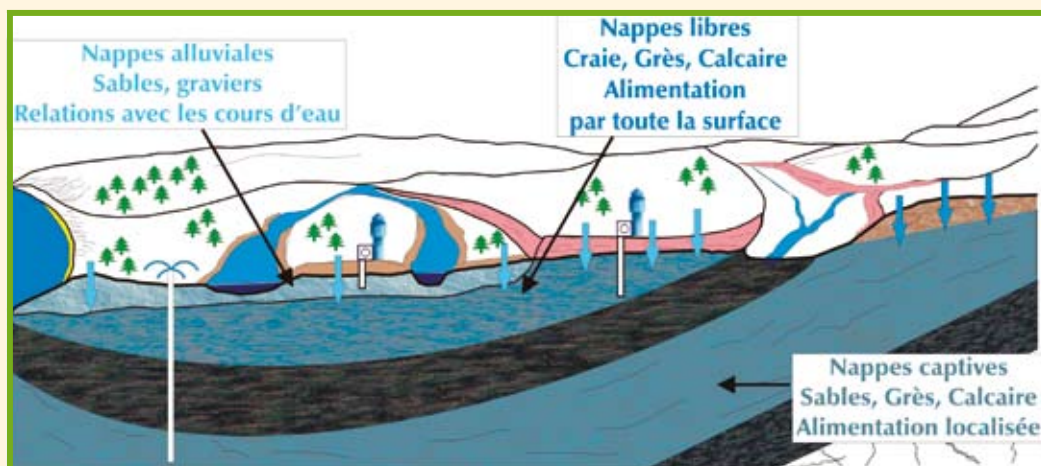


Figure 10 : Principaux types de nappes.

Les eaux souterraines ont des temps de résidence* extrêmement variables.

Certaines d'entre elles, étroitement liées au réseau superficiel qui les pourvoit en eau et qu'elles alimentent en retour de façon régulière, se renouvellent assez rapidement : en quelques jours ou quelques semaines pour les aquifères* des terrains karstiques*, comme celui de la Fontaine de Vaucluse, et en quelques années ou dizaines d'années pour la plupart des nappes superficielles en milieu sédimentaire* .

D'autres en revanche, plus profondes, n'ont que peu de liens avec la surface et se renouvellent beaucoup plus lentement : en quelques centaines ou milliers d'années, et parfois plus, pour les nappes sédimentaires profondes.

La même nappe des Sables-Verts de l'Albien, citée précédemment, met environ 30 000 ans pour se renouveler. Au Havre où elle termine son voyage, elle aurait même près de 100 000 ans d'âge.

A l'échelle humaine, de telles eaux peuvent donc être considérées comme quasiment non renouvelables.

Le périple souterrain des eaux de pluie est généralement lent.

L'eau progresse de quelques mètres par an seulement dans les sables fins par exemple. Les nappes ainsi formées ne sont jamais des étendues d'eau libre mais sont constituées par des couches de terrain saturées d'eau.

Ce lent voyage permet au flux de l'eau de se régulariser et aux nappes d'alimenter de manière régulière et pendant des années, les cours d'eau malgré le caractère erratique des pluies.

En période de sécheresse, les nappes ont donc un rôle de régulation extrêmement important.

Elles alimentent le « débit de base » des cours d'eau ou débit d'étiage. Les nappes libres sont de bien meilleures régulatrices que les nappes captives.

Sous nos latitudes, les aquifères sont alimentés principalement de novembre à mars car durant cette période le phénomène d'évapotranspiration est faible, les plantes vivent au ralenti et l'humidité des sols favorise l'infiltration. Les eaux souterraines reconstituent donc leurs réserves à cette époque de l'année.

Entre mai et octobre, en revanche, elles n'accumulent pratiquement plus d'eaux nouvelles et leur niveau baisse car elles continuent à alimenter les cours d'eau sauf lorsque le ou les hivers précédents ont été trop secs : dans ce cas, les cours d'eau peuvent se tarir.



Eaux souterraines.

Pour ne pas épuiser les nappes, indispensables à l'alimentation des cours d'eau, notamment en période estivale, il faut veiller à ne pas en extraire plus d'eau que l'écoulement naturel ne peut en offrir.

Pour cela, il importe de bien connaître au préalable le comportement des aquifères.

LES EAUX DE SURFACE

Comment rivières et fleuves sont-ils alimentés en eau ?

Rivières et fleuves se caractérisent par l'irrégularité de leur débit au cours de l'année, lequel dépend de multiples facteurs :

- la provenance de leurs eaux ;
- le rapport entre les précipitations et l'évaporation ;
- le taux de ruissellement sur leur bassin versant*.

Dans nos régions tempérées, ils connaissent en général leurs plus fortes eaux en hiver quand la pluviosité est importante et l'évaporation faible et/ou au printemps lors de la fonte des neiges et/ou en été lors de la fonte des glaciers alpins et pyrénéens. Certains cours d'eau sont par contre alimentés presque uniquement par des eaux souterraines et connaissent des régimes très réguliers car les nappes, qui ont reconstitué leur stock au cours de l'hiver, continuent à les alimenter durant l'été même en l'absence de pluie. C'est le cas par exemple de la Somme en Picardie dont le débit global est fourni à plus de 90 % par la nappe de la Craie.

repères

On a répertorié en France environ 450 aquifères dont 200 aquifères régionaux de tailles variées (100 à 100 000 km²) à ressource exploitable :

- > 25 nappes captives
- > 175 nappes libres

La productivité individuelle des forages d'exploitation varie de quelques m³ par heure à 200 m³/heure, parfois plus. Les ressources en eau souterraine sont bien réparties sur les 2/3 du territoire.

En France, ce sont actuellement environ 7 milliards de m³/an qui sont puisés dans les nappes d'eau souterraine couvrant ainsi :

- > 65% des besoins domestiques (principalement pour l'eau potable) ;
- > 20% des besoins agricoles (irrigation) ;
- > 25% des besoins industriels, non compris les prélèvements des centrales nucléaires.

Suivant les nappes, les volumes soutirés par année (par les exploitations) sont de l'ordre de 1 à 10% de leur débit naturel, ce qui est viable. Dans certains cas pourtant, ce pourcentage peut atteindre 50%, voire plus de 100%, ce qui n'est plus soutenable.

Le fonctionnement hydrodynamique du bassin

La simple observation de terrain a ses limites que les chercheurs dépassent par la conception de modèles informatiques. Ceux-ci leur permettent à la fois de confirmer leurs connaissances et de tester de nouvelles hypothèses.



Introduction

Le domaine de l'eau souterraine est représenté par les formations géologiques dont les interstices sont en permanence complètement saturés d'eau.

Ce domaine constitue donc un des maillons importants du cycle de l'eau, objet de longue date des préoccupations de l'hydrogéologie.

De nombreux efforts de recherche ont été consacrés à une bonne compréhension et à une bonne description de cet élément.

Parallèlement, et grâce aux progrès concomitants des moyens informatiques, la quantification des écoulements a permis le développement d'une nouvelle génération d'outils appelés modèles.

Les modèles utilisés actuellement appréhendent le fonctionnement hydrologique du bassin versant en tentant de représenter, entre autres, les processus du ruissellement dans l'espace et les variations de niveaux des aquifères.

Plus généralement, un modèle hydrogéologique est donc une représentation informatique d'un système permettant de relier ses propriétés aux contraintes auxquelles il est soumis (ici la météorologie, le réseau hydrographique du bassin, la topographie, la géologie, ...) et dont le niveau de simplification dépend des objectifs d'étude poursuivis.

Un modèle représente à la fois un outil :

- **de connaissance** permettant de synthétiser et de tester la compréhension que l'on a du fonctionnement du système ;
- **de prévision** permettant d'anticiper les réactions du système à des changements de ses contraintes (changement climatique, modification des prélèvements humains, ...).

La démarche de modélisation consiste d'abord à traduire les connaissances acquises à partir d'études rigoureuses et détaillées, menées sur le terrain et/ou en laboratoire, puis à valider les modèles en comparant leurs réponses à des mesures (débit des rivières, piézométrie, ...).

Deux principaux modèles hydro(géo)logiques ont ainsi été mis en œuvre ces dernières années sur le bassin de la Seine. Ces deux modèles ont une approche spatiale différente :

- **le modèle CaB** qui a été développé sur la base d'approximations de la physique des écoulements de la zone saturée, dans l'objectif de fournir une description spatiale des processus de façon réaliste, tout en ne conservant qu'un minimum de paramètres de calibration.
- **le modèle MODCOU** représentant finement et spatialement le comportement du bassin. Il utilise les équations de la physique des écoulements dont, en principe, les paramètres sont mesurables. Plus lourd à mettre en œuvre, les temps de calculs nécessaires sont, de fait, plus longs.

Le modèle hydrologique CaB

PRINCIPES GÉNÉRAUX ET OBJECTIFS

Le modèle CaB (pour « Catchment-Based ») est un modèle du fonctionnement des surfaces continentales, qui simule sur des bases physiques l'ensemble des processus régissant les bilans d'eau et d'énergie au niveau du sol. Ces différents processus dépendent d'une part des conditions météorologiques, et d'autre part des propriétés de la surface (albédo*, rugosité, indice de surface foliaire*, physiologie du couvert végétal, propriétés hydriques des sols, etc.).

Originellement développé pour être couplé avec un modèle climatique*, il est particulièrement adapté pour faire le lien entre hydrologie et climat. Comme son nom l'indique, l'unité élémentaire retenue pour le traitement des processus de surface n'est pas une maille régulière comme dans les modèles analogues, mais des bassins versants élémentaires. C'est un atout du point de vue hydrologique, car il permet de représenter la variabilité spatiale de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration et du ruissellement sur des bases physiques, en fonction de la topographie. La topographie entraîne en effet une redistribution latérale de l'humidité dans les bassins versants*, le degré de saturation augmentant des crêtes vers les thalwegs*. Cette variabilité latérale de l'humidité du sol s'accompagne évidemment d'une variabilité latérale du ruissellement et de l'évapotranspiration, qui sont tous deux plus intenses au niveau des thalwegs.

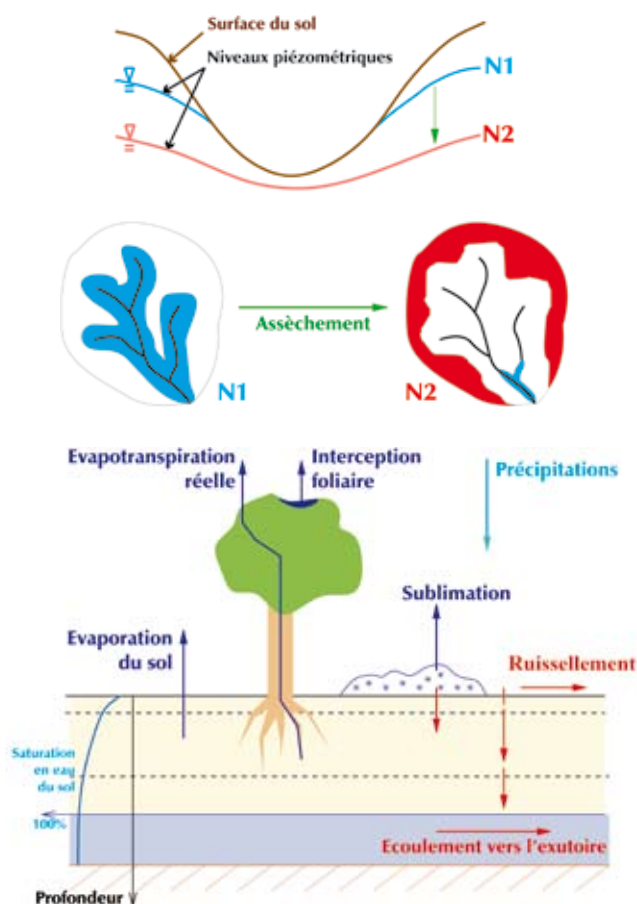
Le modèle CaB définit donc une distribution latérale de l'humidité racinaire dans chaque bassin versant élémentaire, en fonction de l'humidité moyenne du sol et de la topographie, décrite en terme d'indice topographique. La distribution de cet indice est caractérisée dans chaque bassin versant à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) à l'aide d'un système d'information géographique (SIG).

La distribution de l'humidité, qui évolue dans le temps, permet à chaque pas de temps de calcul (20 minutes) de subdiviser le bassin en trois fractions, caractérisées par des humidités différentes : saturée, stressée, intermédiaire.

Dans chacune de ces fractions, on peut alors décrire les différents processus de surface avec des paramétrisations adaptées à l'humidité locale :

- **L'évapotranspiration** est composée de l'évaporation de l'eau interceptée par le feuillage, de la sublimation de la neige, de la transpiration des plantes et de l'évaporation du sol nu. Ces quatre flux sont décrits en fonction de résistances, qui dépendent du type de végétation et de divers stress environnementaux : humidité et température de l'air et humidité du sol pour les deux derniers. Dans CaB, cette humidité dépend de la fraction considérée. Ainsi, la transpiration et l'évaporation du sol nu sont maximum dans la fraction saturée. La transpiration reste maximum dans la fraction intermédiaire, et s'annule dans la fraction stressée où l'humidité est sous le point de flétrissement*. L'évaporation du sol nu diminue quant à elle dans les fractions intermédiaires et stressées.
- **La répartition entre ruissellement et infiltration** dépend de l'humidité de la fraction considérée. Dans la fraction saturée, aucune infiltration n'a lieu, et toute l'eau disponible en surface ruisselle. Dans les deux autres fractions, l'infiltration est possible, et le ruissellement n'a lieu que quand l'intensité des précipitations excède la capacité d'infiltration du sol (qui diminue en fonction de l'humidité des premiers centimètres).
- **L'écoulement de base** correspond au drainage d'une nappe libre, décrite comme dans le modèle hydrologique TOPMODEL. Ce terme est calculé pour l'ensemble du bassin élémentaire, en fonction de la distribution de l'indice topographique et de l'humidité moyenne dans ce bassin, qui permettent de caractériser la distribution de la profondeur de la nappe dans le bassin considéré. Cette distribution contrôle aussi les transferts verticaux entre zone racinaire et nappe, qui sont généralement descendants en hiver (recharge) et ascendants en été.

Principe du modèle CaB



PARAMÈTRES D'ENTRÉE ET CALAGE

Le bassin de la Seine a été subdivisé en 29 bassins élémentaires (2 600 km² en moyenne).

Dans ces bassins, les principales données de forçage sont les données météorologiques (précipitations ; rayonnement incident, visible et infra-rouge ; température et humidité de l'air à 2 mètres ; vitesse du vent à 10 mètres ; pression atmosphérique).

Six années de données météorologiques ont été utilisées (août 1985 - juillet 1991). Fournies par Météo-France au pas de temps horaire et à la résolution de 8 km (données SAFRAN), elles ont été agrégées à la résolution du modèle (29 bassins élémentaires).

résultats

Les performances obtenues sont tout à fait satisfaisantes, et les contrastes entre, par exemple l'année hydrologique 87-88 très humide (crue très importante) et les années 89-90 et 90-91 sèches (étiages sévères), qui offrent un bon échantillonnage de la variabilité interannuelle du climat récent, sont bien rendus, malgré une tendance à surestimer les pics de crue.

La topographie permet de distribuer l'humidité du sol dans le bassin versant de calcul et de définir 3 fractions (saturée en bleu, stressée en rouge, intermédiaire en blanc).

Dans chaque fraction, les flux d'eau et d'énergie sont décrits par des paramétrisations adaptées à l'humidité de la fraction.

Remarque : cette nappe phréatique « conceptuelle » n'est pas équivalente au système aquifère qui prévaut dans le bassin de la Seine.

Les autres paramètres du modèle sont définis à partir d'informations sur :

- la topographie (Modèle numérique de terrain à la résolution de 100 m) ;
- la nature de la couverture végétale et l'évolution mensuelle de sa morphologie (indice de surface foliaire, hauteur...) ; ces paramètres sont caractérisés à partir d'observations satellitaires réalisées en 1987-1988 (données ISLSCP ; Sellers et al., 1996) ;
- les propriétés des sols ; la porosité et la profondeur du sol sont issues de la Base de Données Géographique des Sols de France (1:1 000 000 ; INRA), alors que le point de flétrissement et la conductivité hydraulique à saturation ont été calibrés.

MODÉLISER

Cette calibration fut réalisée pour optimiser les écoulements simulés, par comparaison avec les débits observés (données issues de la Banque Nationale de Données pour l'Hydrométrie et l'Hydrologie) en 20 stations de jaugeage. Les critères de performance sont les critères quantitatifs classiques en hydrologie (efficacité de Nash, biais, coefficient de corrélation), utilisés en appui d'une évaluation visuelle.

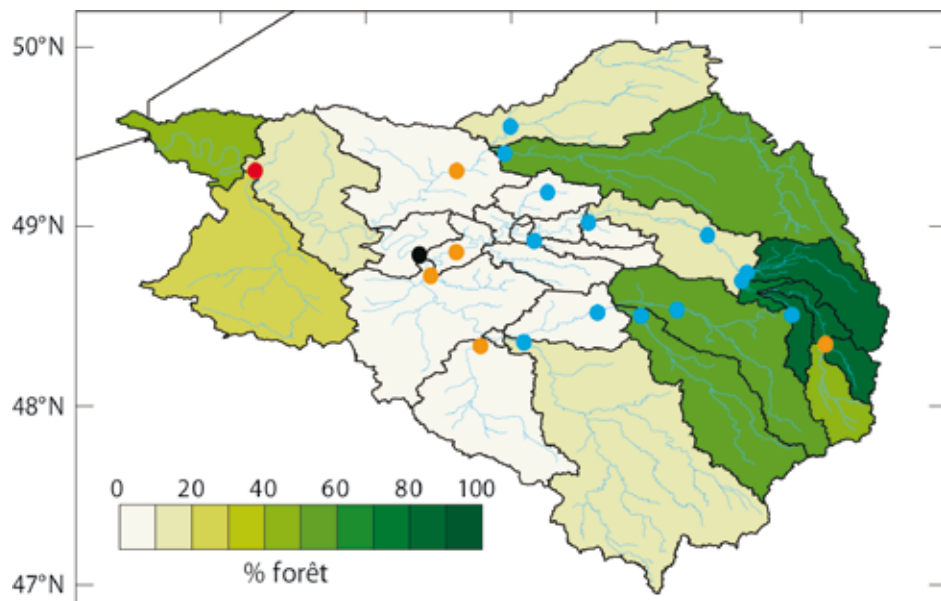


Figure 11 : Découpage du bassin versant de la Seine selon CaB et situation des stations de jaugeage.

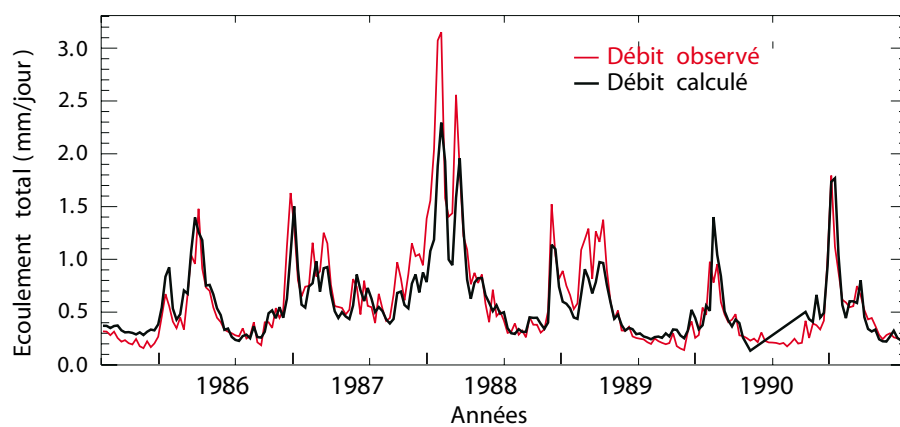


Figure 12 : Comparaison des écoulements observés et simulés par CaB : moyennes décennales à Poses entre le 1er août 1985 et le 31 juillet 1991.

Le modèle hydrogéologique MODCOU

PRINCIPES GÉNÉRAUX ET OBJECTIFS

Le modèle hydrogéologique MODCOU, développé au Centre de Géosciences de l'École des Mines de Paris couple les écoulements de surface et les écoulements souterrains afin de **reproduire, entre autres, les débits simulés aux rivières et les niveaux piézométriques des aquifères représentés.**

Globalement, un module de surface assure le bilan hydrique des précipitations (eau de pluie, neige) entre évaporation, ruissellement et infiltration et un module souterrain assure le transfert dans les formations aquifères et les échanges nappe-rivière (figure 13).

Pour ce modèle distribué, la région étudiée est divisée en une structure multicouche utilisant des mailles carrées emboîtées, mailles auxquelles sont rattachées les caractéristiques du domaine :

- directions de drainage et de ruissellement, altitude, distribution des zones de production qui sont les zones ayant les mêmes caractéristiques du point de vue du bilan hydrique des précipitations (répartition ruissellement / alimentation des nappes) pour les mailles de surface ;
- transmissivité*, drainance*, coefficient d'emmagasinement* pour les mailles des couches souterraines.

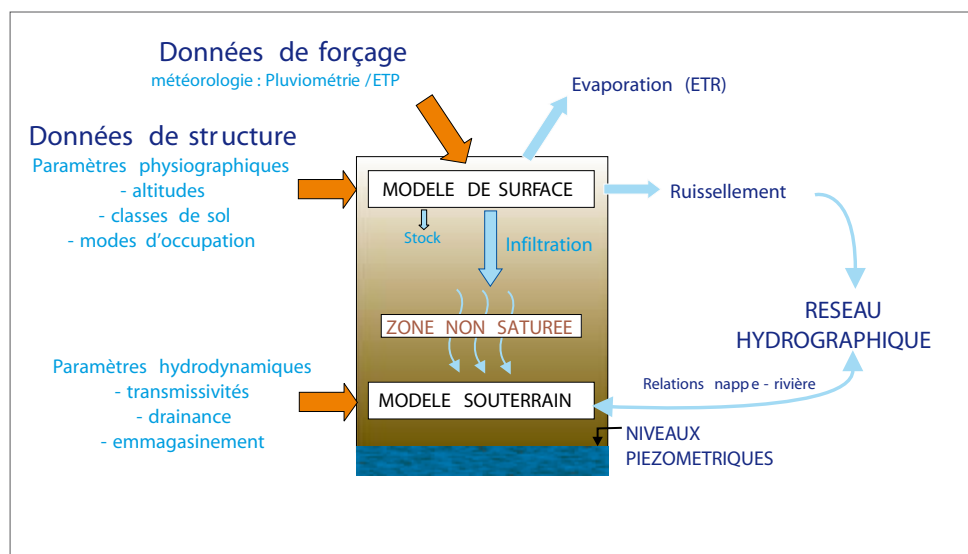


Figure 13 : Principe général du modèle hydrogéologique couplé MODCOU.

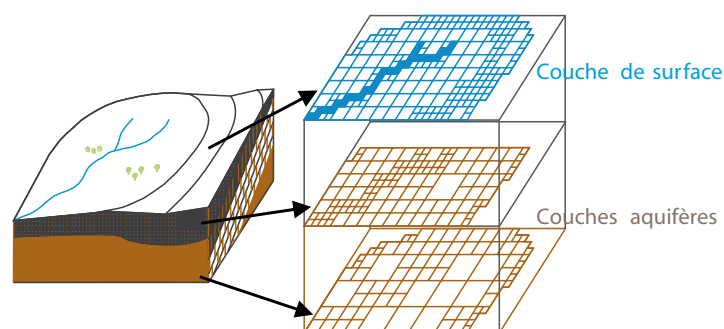


Figure 14 : Principe de la schématisation multicouche.

COUCHE DE SURFACE, FORMATIONS AQUIFÈRES

La prise en compte des écoulements souterrains dans la modélisation du système Seine implique d'étendre le domaine modélisé au-delà du bassin hydrologique stricto sensu de la Seine.

Ainsi les conditions aux limites du système hydrologique sont définies, dans la mesure du possible, par les limites hydrauliques des aquifères situées hors du

bassin et représentées en pratique par les cours d'eau principaux des bassins adjacents (Somme, Meuse, Loire, Loir et Touques). La couche de surface du « modèle Seine » couvre une surface totale de 95 560 km² et est constituée de 35 198 mailles de taille variable (de 1 à 8 kilomètres de côté).

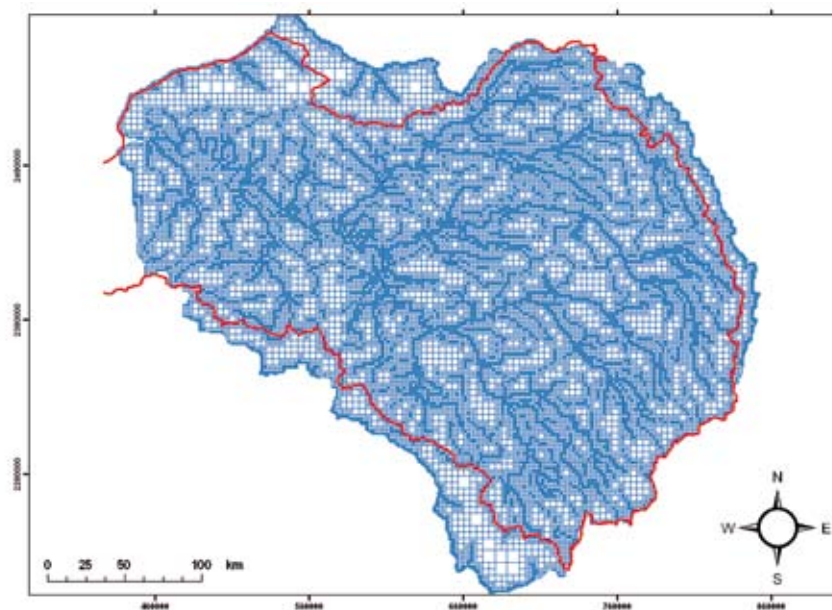


Figure 15 : Maillage de la couche de surface. La division en petites mailles permet de reproduire le réseau hydrographique principal (de bassin versant* supérieur à 250 km²) ainsi que les limites de ces bassins versants.

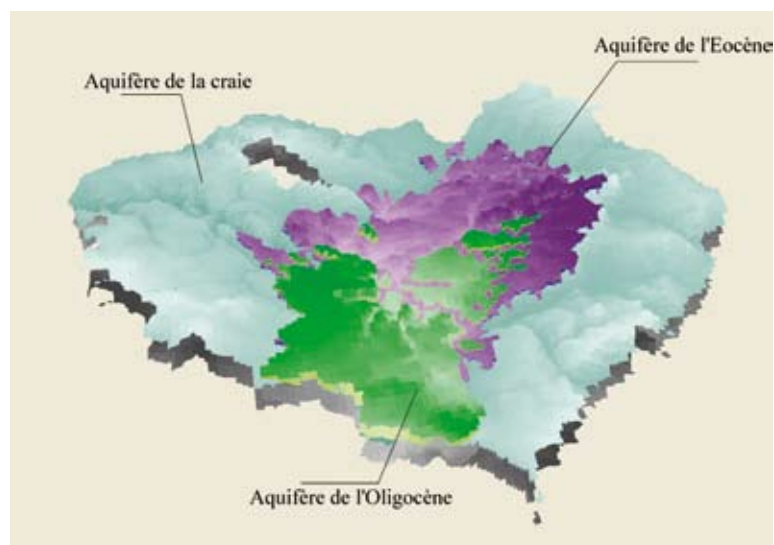


Figure 16 : Vue tridimensionnelle des trois principaux aquifères du bassin.

Les formations aquifères représentées dans le modèle sont au nombre de trois et sont respectivement, de la plus superficielle à la plus profonde, l'Oligocène, l'Eocène (au sens large) et la Craie.

Les formations aquifères de l'auréole ante Crétacé du bassin (du Lias inférieur à l'Albien), ne sont pas explicitement représentées du fait de surfaces affleurantes de faible extension et d'alimentation par infiltration généralement inférieure à 5%. Sur ces formations, une grande partie des précipitations est donc rapidement acheminée vers le réseau hydrographique de surface par l'intermédiaire du ruissellement direct ou par drainage des premiers décimètres de sol.

PARAMÈTRES D'ENTRÉE, CALAGE

Les données d'entrée et de forçage du module de surface sont essentiellement constituées par les données météorologiques représentées par la pluviométrie globale (pluie + neige) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ces données météorologiques journalières, issues du système d'analyse SAFRAN de Météo France, sont entrées sur une grille régulière au pas de 8 kilomètres couvrant l'ensemble du domaine de surface.

Au niveau du module souterrain, le calage s'effectue essentiellement sur les valeurs de transmissivité* et de coefficient d'emmagasinement*. La transmissivité T est, avec le coefficient d'emmagasinement S , un paramètre régionalisé essentiel pour caractériser un aquifère dans la construction de modèle de simulation hydrodynamique. Sa relation au coefficient d'emmagasinement définit la diffusivité hydraulique, (T/S) . Suivant les ordres de grandeur des transmissivités qui le caractérisent, un aquifère est dit plus ou moins transmissif.

Le calage du modèle consiste à reproduire, au pas de temps journalier, sur une période de plus de 20 ans et de la manière la plus fiable possible l'ensemble des débits des principaux cours d'eau et des niveaux piézométriques mesurés sur les trois aquifères pris en compte. Plus de 50 piézomètres et 100 stations hydrométriques de mesure des débits ont été utilisés pour ce calage qui consiste dans l'ajustement des paramètres de structures du modèle de surface et du modèle souterrain.

Pour certains débits mesurés, ceux en particulier de la Seine et de ses principaux affluents en amont de Paris (Marne, Yonne, Aube), la comparaison avec les débits calculés nécessite de les naturaliser en les corrigeant de l'action de l'homme (prélèvements ou restitutions effectués par les différents barrages-réservoirs du bassin principalement).

MODÉLISER

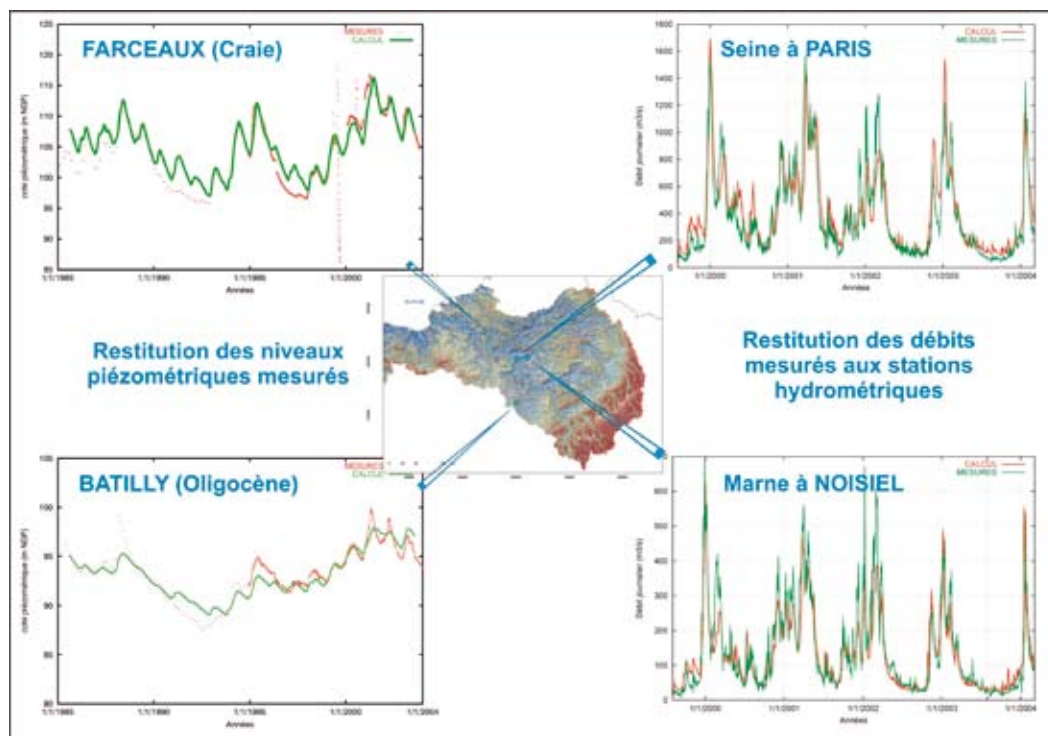


Figure 17 : Calage hydrodynamique du modèle en termes de restitution des cotes piézométriques des aquifères et de débit des rivières.

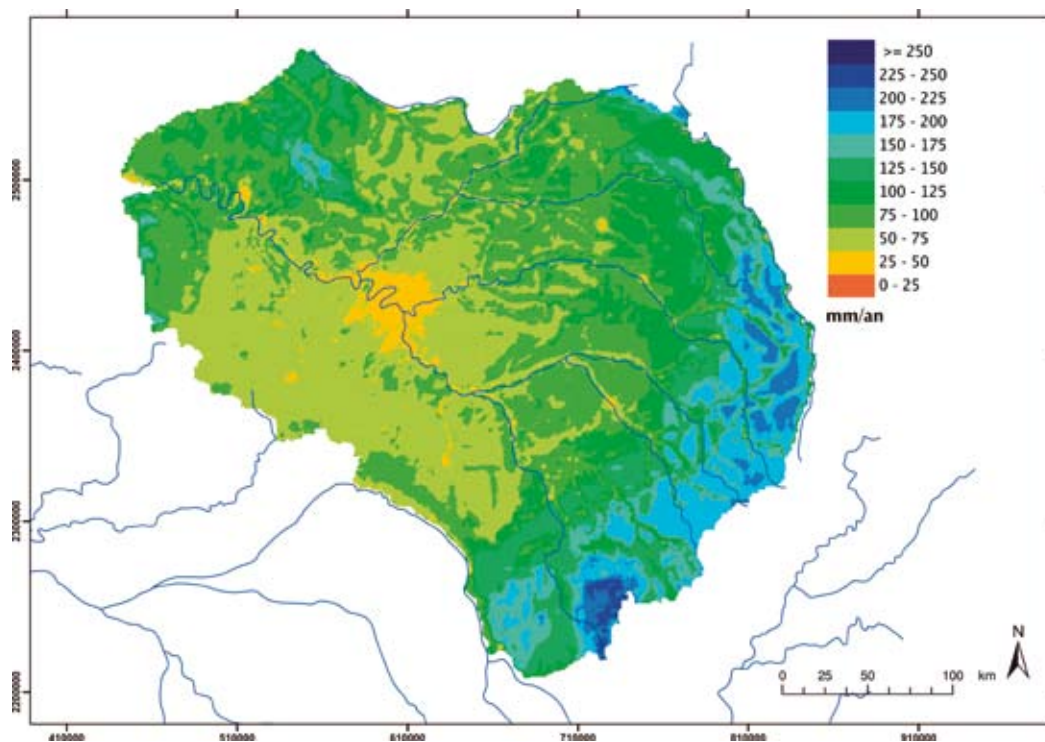
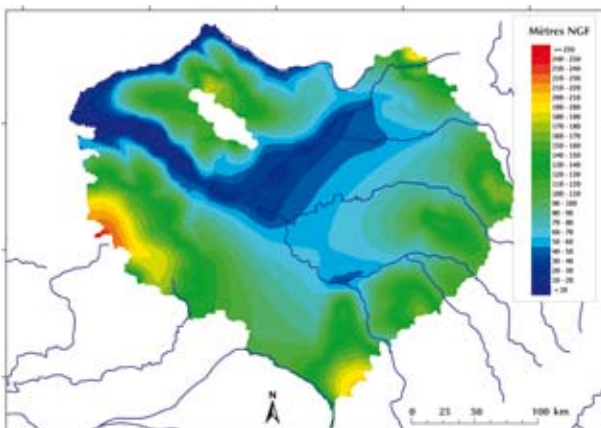
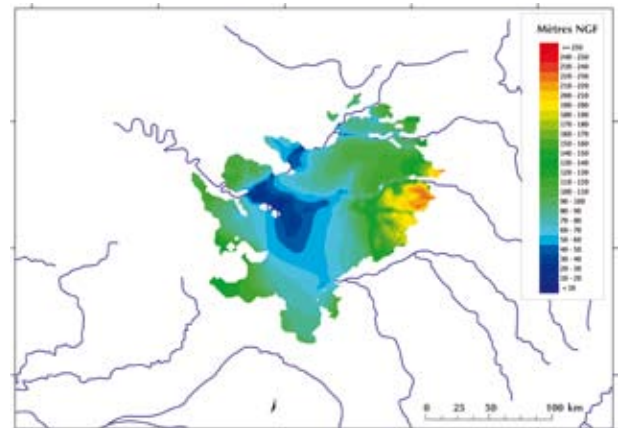


Figure 18 : Infiltration moyenne (alimentation des nappes par les pluies) calculée sur la période 1970-2005. Valeur moyenne sur le bassin : 154 mm/an.

Aquifère de la Craie



Aquifère de l'Eocène



Aquifère de l'Oligocène

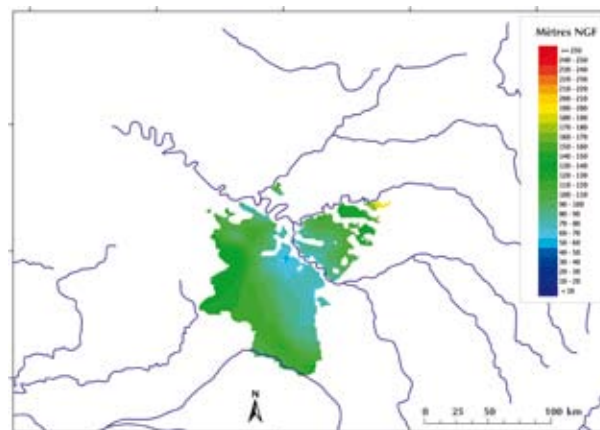


Figure 19 : Piézométrie moyenne calculée des trois formations aquifères simulées par MODCOU.

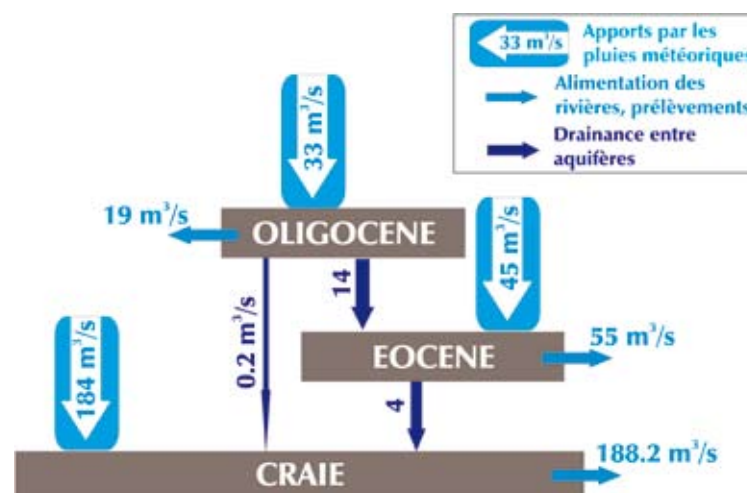


Figure 20 : Bilan hydrique moyen des aquifères sur la période 1971-2005.

APPLICATION

MODCOU met en évidence le rôle régulateur des nappes.

En effet, le modèle permet de faire la part, en toute maille et à chaque pas de temps journalier de calcul, entre les apports aux rivières par ruissellement et ceux liés à l'alimentation par les aquifères (figures 21 et 22). Sur le bassin de la Seine, le modèle montre que, pour de faibles débits à Paris, les nappes internes simulées (Craie, Éocène, Oligocène) contribuent à plus de 80% au débit total (figure 23). En période de hautes eaux, cette contribution apparaît toutefois se limiter à environ 180 m³/s (hiver 2001).

résultats

Une des premières applications de la modélisation du bassin de la Seine par l'application Modcou est de pouvoir quantifier ce qu'il est impossible d'approcher, à l'échelle du bassin, par des mesures physiques du fait de leur caractère diffus : le calcul de la contribution des nappes au débit global du fleuve ou de ses affluents.

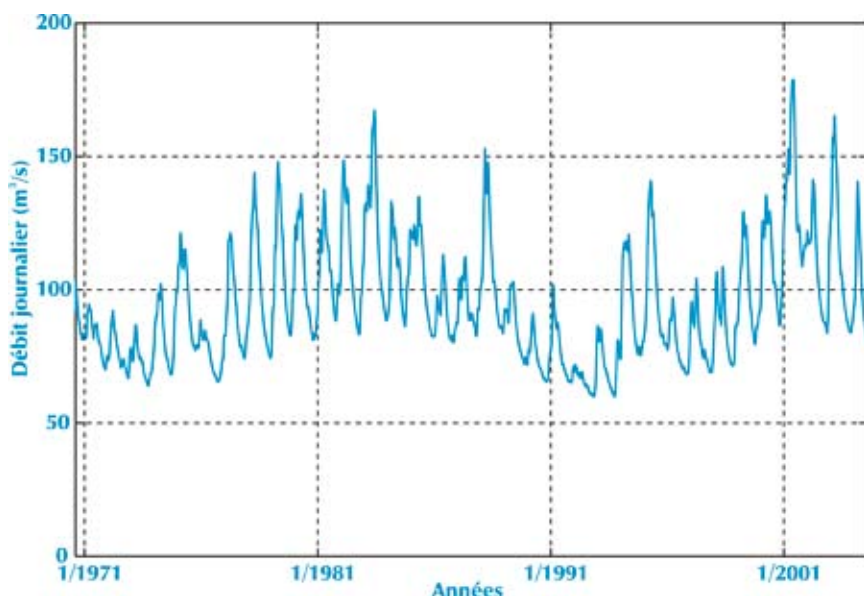


Figure 21 : Évolution temporelle de la contribution des nappes internes du bassin (Craie, Éocène, Oligocène) au débit global de la Seine à Paris.

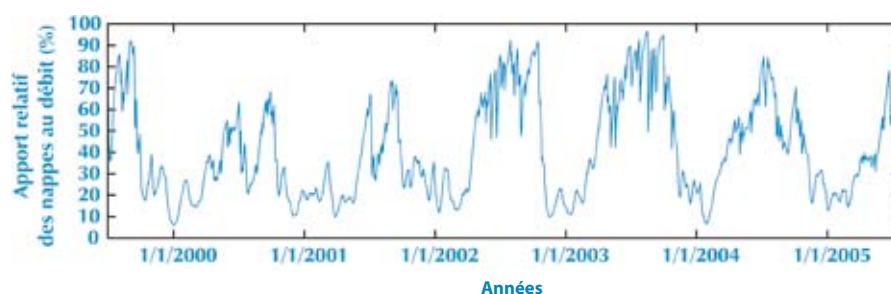
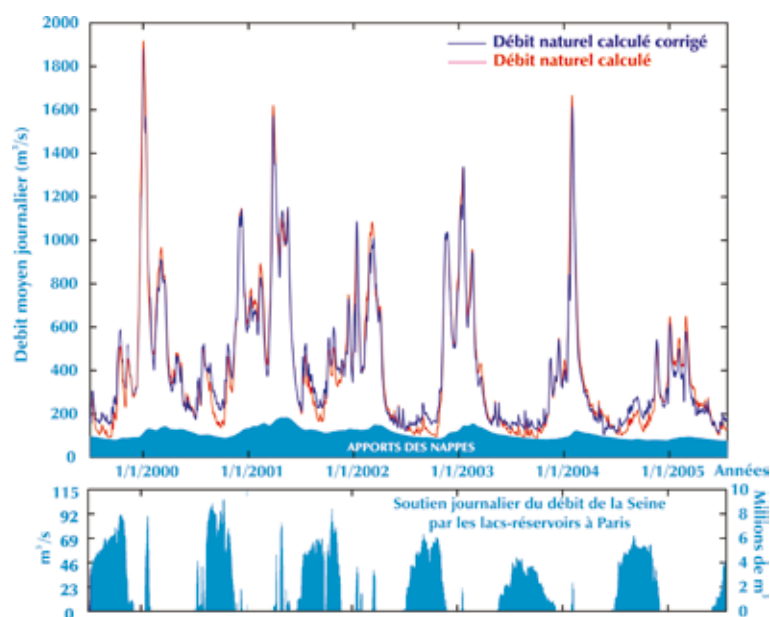


Figure 22 : Apports relatifs des grands aquifères centraux du bassin au débit de la Seine à Paris.

On remarque qu'en période d'étiage sévère (été 2003 par exemple) le débit naturel de la Seine (sans soutien par les lacs-réservoirs) est pratiquement exclusivement assuré par les grandes formations aquifères du bassin (Craie, Éocène, Oligocène).

Figure 23 : Évolution comparée des débits calculés de la Seine à Paris avec prise en compte ou non de la régulation du débit par les lacs-réservoirs et des apports par les formations aquifères.



De plus, le modèle permet de montrer qu'il n'existe pas de relation directe entre le débit d'étiage, qui reflète l'état des grands aquifères centraux du bassin à la reprise de la saison humide, et le débit de crue de l'année suivante (les hautes eaux étant contrôlées pour plus de 50% par les formations de l'auréole du Crétacé inférieur et du Jurassique, en amont des grands lacs de Seine).

L'analyse des situations d'étiage tardif en fonction de l'état des nappes a également été effectuée à l'aide du modèle hydrogéologique. Le principe de l'analyse consiste, à partir de la situation hydrologique calculée au moyen du modèle correspondant au 1^{er} mai de chaque année simulée (de 1971 à 2004), à simuler un étiage prolongé consécutif pendant un certain nombre de mois en supposant une absence totale de pluie [figure 24].

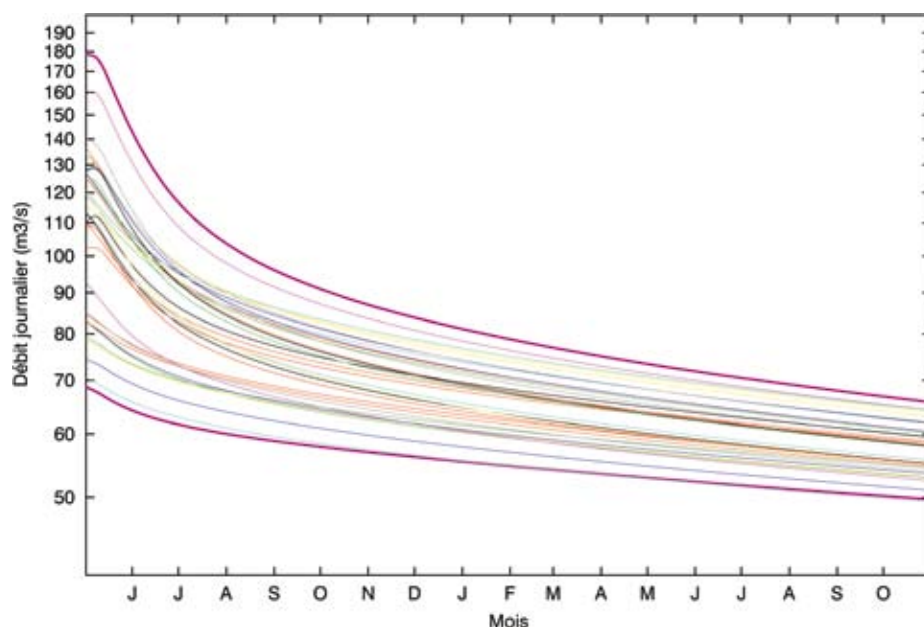


Figure 24 : Débits de base calculés à Paris en cas d'étiage prolongé (absence totale de précipitations pendant plusieurs mois consécutifs).

On échantillonne ainsi 33 situations de fin de printemps selon la variabilité climatique et l'on examine les conséquences sur le tarissement postérieur des cours d'eau.

On constate que les débits d'étiage résiduel sont bien corrélés au débit de base initial et que le débit

résiduel est d'autant plus fort que le débit initial est important. En d'autres termes, les calculs montrent que, pratiquement, la valeur des débits d'étiage naturel de fin d'été (non soutenus par les barrages - réservoirs) est directement dépendante de l'intensité de la recharge hivernale précédente.

Pour
décider
d' sur la base
éléments
quantifiés

Les prélèvements en eau augmentent et le climat se réchauffe. Encore faut-il décrire ces changements dans le cadre spécifique du bassin et évaluer leur impact sur les aquifères pour réagir efficacement. C'est l'objectif des dernières études.



Si la présence de grands aquifères et une pluviométrie conséquente assurent, a priori, au bassin de la Seine une ressource en eau importante, la forte pression constituée par la région parisienne et les nouveaux enjeux liés aux changements climatiques en cours ou à venir posent la question de la pérennité de cette ressource.

Les modèles mathématiques développés et mis en œuvre sur le bassin peuvent permettre d'apporter un certain nombre de réponses à ces interrogations. En effet, ces modèles peuvent être utilisés à des fins prospectives par modification de leurs variables d'entrée. Au niveau d'un bassin comme celui de la Seine, les deux principales entrées du modèle susceptibles de varier dans les prochaines années et d'avoir un impact important sur le fonctionnement hydrologique du bassin sont essentiellement :

- la modification des prélèvements effectués par les collectivités locales à des fins d'alimentation en eau, les industries ou l'agriculture ;
- la modification des variables climatiques (précipitation, évapotranspiration) du fait de l'augmentation des gaz à effet de serre.

Deux études visant plus particulièrement à quantifier l'impact de ces changements ont été menées.

Première étude : Influence de l'augmentation des prélèvements en formation aquifère

L'influence d'une augmentation de l'ensemble des prélèvements en nappes (prélèvements agricoles, industriels ou domestiques à des fins d'alimentation en eau potable (AEP)) sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin a été étudiée à l'aide du modèle hydrogéologique MODCOU présenté précédemment.

Le but général de l'étude n'était pas d'intégrer une évolution probable ou non des différents prélèvements dans les prochaines années mais plus simplement de chiffrer l'impact que pourrait avoir une modification sensible et généralisée des prélèvements liés aux activités humaines sur l'ensemble du bassin et définir ainsi les zones à risque.

Au niveau des calculs d'impact, une augmentation arbitraire de 50 et 100% (voire 200% dans le cas des prélèvements agricoles) du volume total prélevé en nappe pour chaque secteur d'activité (pris individuellement ou collectivement) a donc été étudiée par le modèle en terme de variations de niveaux piézométriques des grands aquifères du bassin (Oligocène, Eocène, Craie) et de débit des petits cours d'eau amont.

En effet, si des variations piézométriques de faible ampleur peuvent avoir des conséquences limitées en terme de débit des grands cours d'eau à l'échelle du bassin du fait du rôle intégrateur de ce dernier, leurs influences peuvent être non négligeables sur le débit des petits cours d'eau amont, notamment en période d'étiage.

Si les prélèvements totaux sur le bassin restent globalement stables depuis plusieurs années, il peut être nécessaire d'étudier l'impact du transfert de ces prélèvements d'une « source » vers une autre (d'un prélèvement en rivière vers un prélèvement en nappe suite à une pollution accidentelle à grande échelle par exemple) sur le fonctionnement hydrodynamique du « système Seine ».

Parmi les prélèvements précisés plus avant, seuls ceux effectués exclusivement en nappe et sur le bassin de la Seine ont été pris en compte (les prélèvements en nappe alluviale et donc à proximité des cours d'eau ne sont pas intégrés).

La répartition géographique par commune des trois grands types de prélèvements (agricoles, alimentation en eau potable et industriels) est précisée sur les figures 25 à 27.

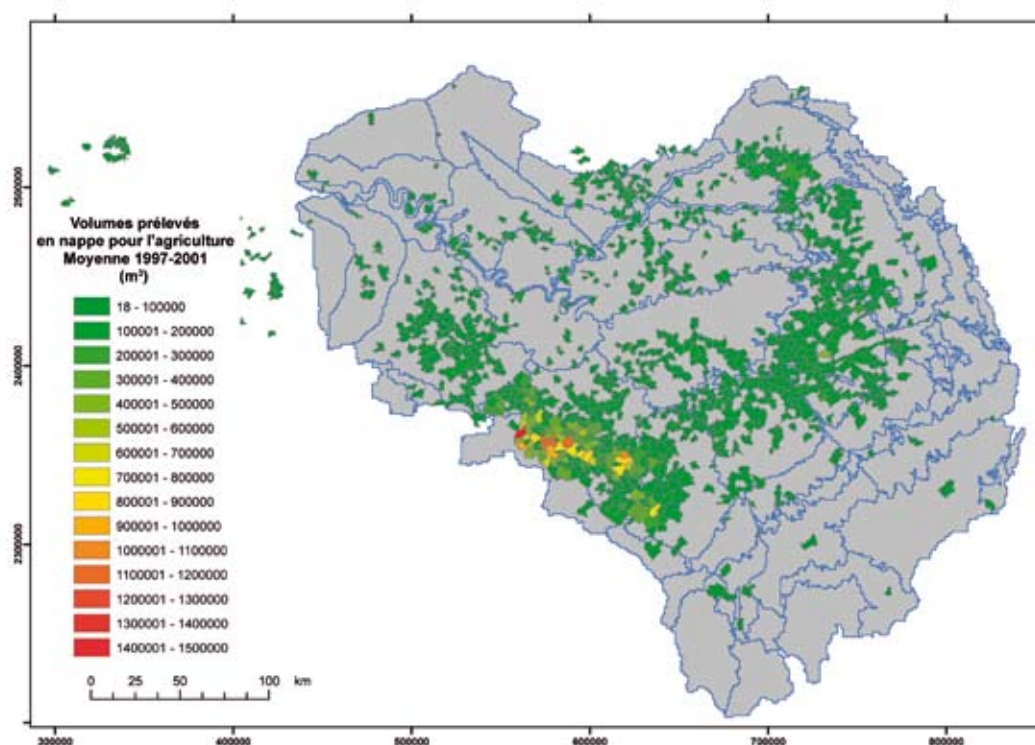


Figure 25 : Moyenne annuelle des prélèvements agricoles en nappe par commune sur le bassin Seine-Normandie - années 1997-2001 - (Source : DIREN Île-de-France). On remarque que la plus grande partie des prélèvements s'effectue en Beauce.

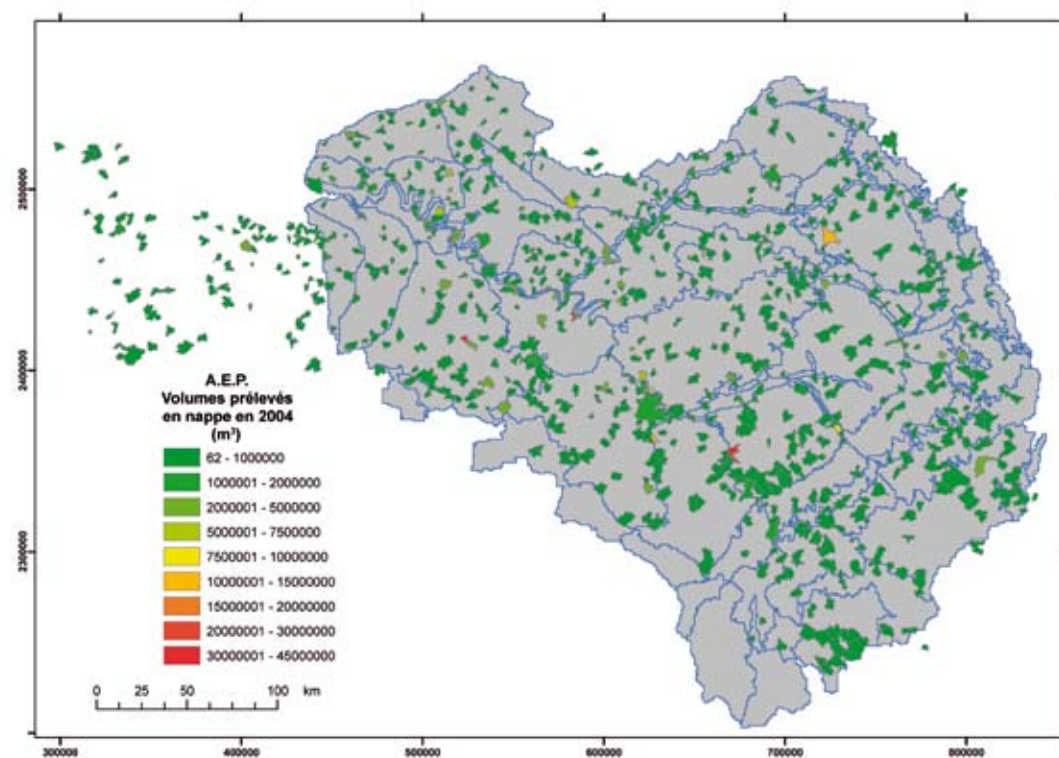


Figure 26 : Moyenne annuelle des prélèvements d'alimentation en eau potable (A.E.P.) effectués en nappe en 2004 et par commune sur le bassin Seine-Normandie (Source : AESN).

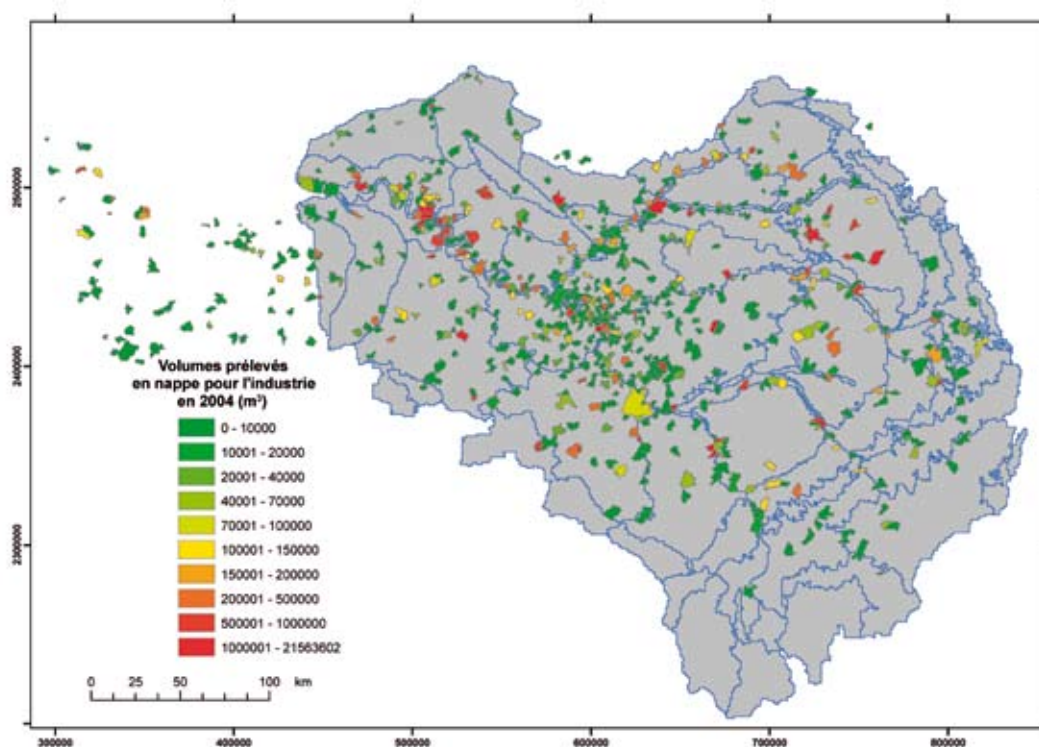


Figure 27 : Moyenne annuelle des prélèvements industriels effectués en nappe en 2004 et par commune sur le bassin Seine-Normandie (Source : AESN).

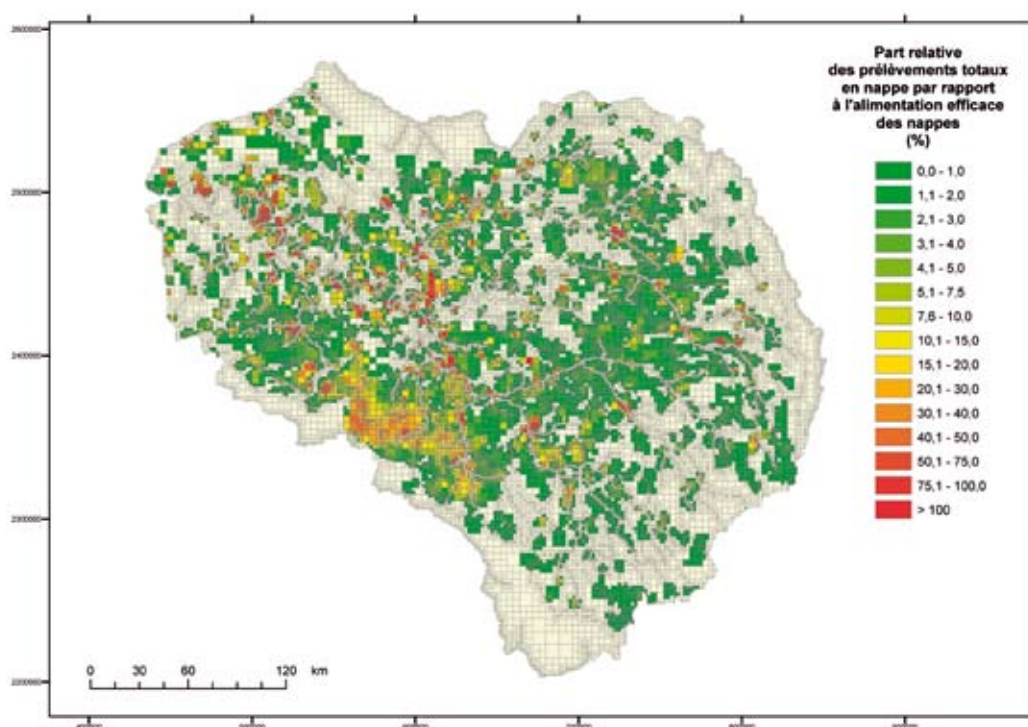


Figure 28 : Part relative des prélèvements globaux en nappe par rapport à l'alimentation efficace calculée de ces dernières par infiltration des eaux des pluies.

Si ces prélèvements, pris dans leur globalité, ne représentent en moyenne que moins de 5% de l'alimentation totale des nappes du bassin par l'infiltration des pluies calculée par le modèle (l'infiltration est de l'ordre de 154 mm/an en moyenne sur le bassin de la Seine), localement, certains peuvent excéder la recharge ce qui à terme pourrait entraîner un épuisement de la ressource.

Par hypothèse simplificatrice, l'introduction de prélèvements accrus dans le modèle s'effectue localement par pompage dans les formations aquifères au droit des communes concernées, sans condition particulière d'accès à la ressource.

Par convention, les valeurs de prélèvements à des fins A.E.P. et industrielles sont uniformément réparties tout au long de l'année alors que celles des prélèvements agricoles sont réparties sur 4 mois (de mai à août).

Différentes simulations ont été effectuées en fonction du taux d'augmentation des prélèvements et les principaux résultats obtenus ont été exploités sous forme :

- d'évolution relative du débit d'étiage liée aux différents prélèvements supplémentaires en période d'année hydrologique moyenne (figure 29) ;
- d'évolution relative de la valeur ou de la période de retour du QMNA5* (débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans) calculé sur les 33 dernières années (période globale de simulation) (figure 30).

Globalement, les résultats de cette étude montrent que certaines zones du bassin sont très sensibles à des variations piézométriques, même limitées, liées à une intensification des prélèvements en nappe et dont la première conséquence est la limitation des débits de base des petits cours d'eau amont du bassin.

Compte tenu de la répartition géographique actuelle de la pression, une des régions au centre des interrogations reste la Beauce, du fait de prélèvements agricoles importants, en grande majorité pratiqués en nappe, dont une augmentation pourrait avoir des conséquences non négligeables sur l'hydrologie des cours d'eau locaux.

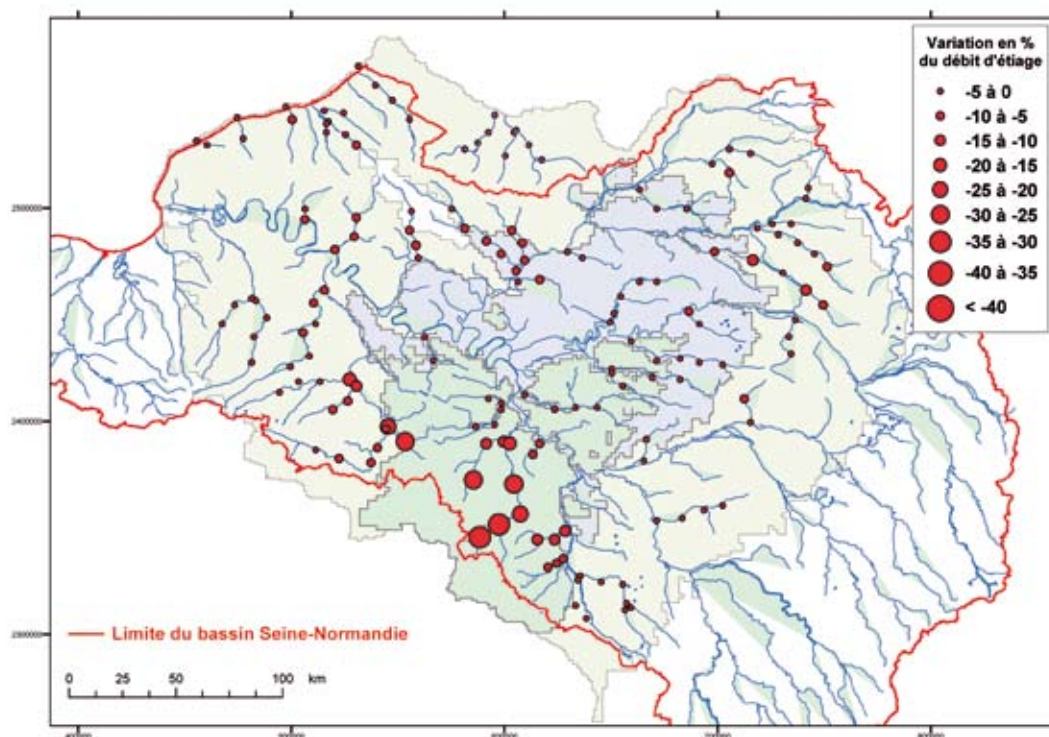


Figure 29 : Évolution en pourcentage du débit d'été calculé en année moyenne, liée à une multiplication par deux des prélèvements agricoles et industriels en nappe du bassin et de 50% des prélèvements A.E.P.

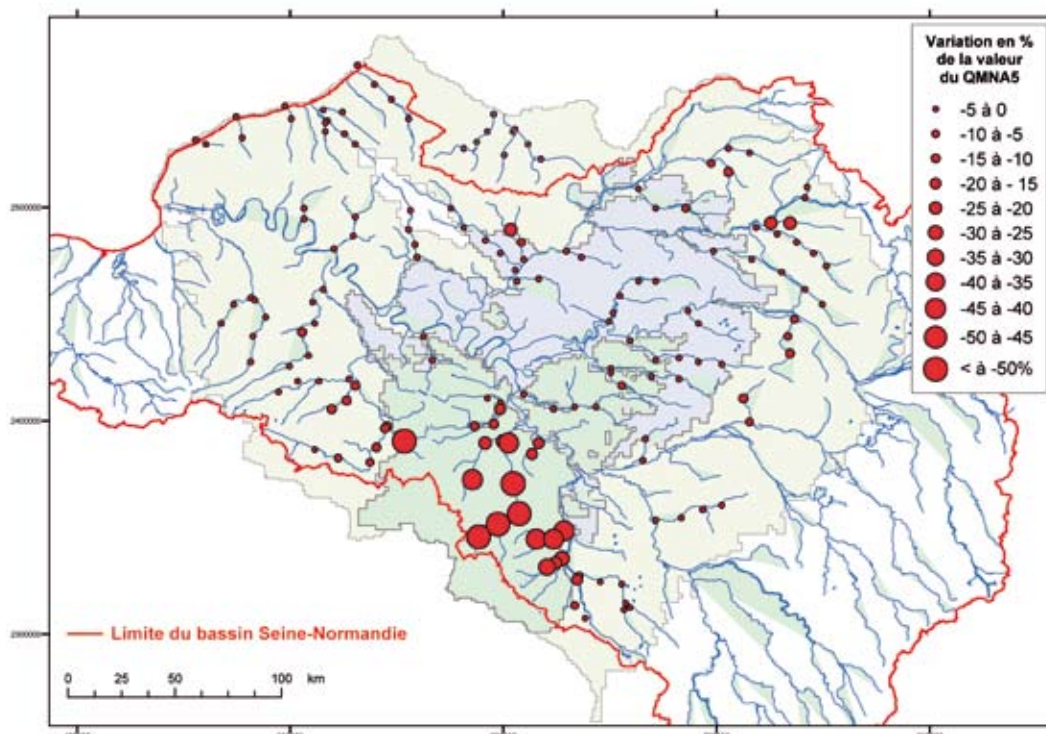


Figure 30 : Évolution en pourcentage de la valeur actuelle du débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans (QMNA5) calculé en année moyenne, liée à une augmentation par deux des prélèvements agricoles et industriels en nappe du bassin et de 50% des prélèvements A.E.P.



QMNA5

QMNA5 : LE DÉBIT DE RÉFÉRENCE

Contexte

La loi sur l'eau du 3 janvier 1992, a mis en place une gestion globale et équilibrée de la ressource en eau, de manière à satisfaire simultanément l'ensemble des usages de l'eau, à préserver et restaurer les écosystèmes aquatiques et les protéger contre toute pollution. Un contrôle des usages par l'administration au moyen des procédures de déclaration et d'autorisation est institué par l'article 10 de cette loi, et les décrets d'application 93-742 et 93-743 (dit « décret nomenclature »). Le traitement des dossiers est entre autre effectué en fonction de la taille et des caractéristiques d'écoulement des rivières, et notamment du débit de référence.

Définition du débit de référence

Le débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans (QMNA 5) permet aux services instructeurs d'identifier le régime qui s'applique et d'apprécier les incidences du projet. Le QMNA 5 est une notion statistique correspondant au débit moyen mensuel minimum ayant une chance sur cinq de ne pas être dépassé une année donnée, ou encore n'étant pas dépassé en moyenne vingt fois par siècle. Il est communément appelé «débit d'étiage quinquennal».

Utilisations concrètes du débit de référence

Il est particulièrement utilisé dans le cadre de la police de l'eau, afin:

- de déterminer le régime de traitement des dossiers de rejet et de prélèvement en eaux superficielles ou dans les nappes d'accompagnement (déclaration ou autorisation) ;
- de distinguer le cas où le débit de référence est supérieur ou inférieur à $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, pour les dossiers concernant les rejets en eaux superficielles (rubrique 2.3.0 et 2.3.1 du décret nomenclature n°93-743) ;
- de fixer les volumes des prélèvements et rejets en eaux superficielles (en application notamment du décret nomenclature) en fonction de la sensibilité des milieux naturels concernés ;
- d'évaluer, en cas de sécheresse, la gravité de la crise et d'aider à la prise de mesures permettant une répartition quantitative des eaux en fonction des milieux et des usages.

Le débit de référence est également utilisé dans l'élaboration et la révision des objectifs de qualité des rivières.

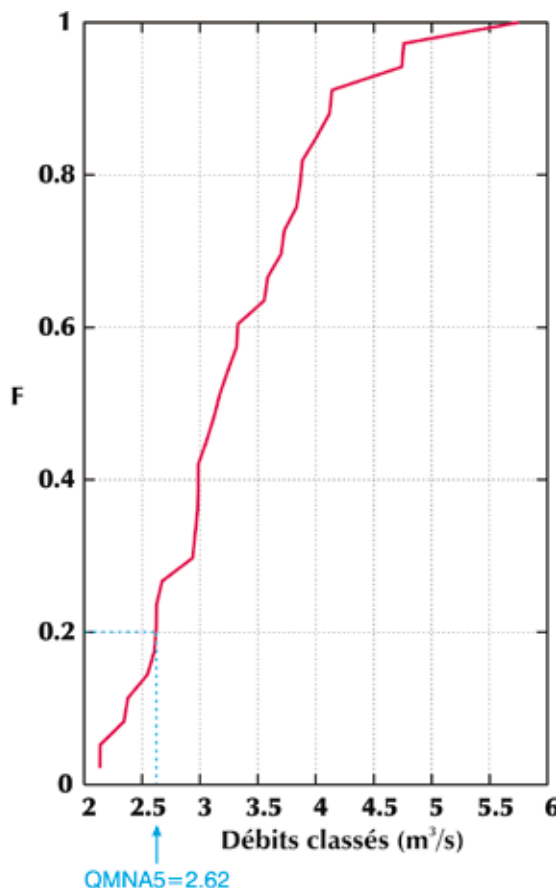
Enfin, pour les rivières régionales - hors pays de Bray et secteurs de sources -, il correspond sensiblement au débit biologique garanti, qui permet le maintien des espèces et le déroulement de leur cycle biologique.

PRINCIPE GÉNÉRAL DU CALCUL DU DÉBIT MINIMAL MENSUEL DE RETOUR 5 ANS (QMNA5)

A partir d'une longue chronique de débits mesurés ou calculés en un point du réseau hydrographique, sont effectués :

- le calcul des débits moyens mensuels sur la période considérée (33 années dans le cas des simulations effectuées sur le bassin de la Seine) ;
- la sélection pour chaque année civile du débit moyen mensuel minimal, indépendamment du mois où il est observé ;
- le tri de ces valeurs de débit moyen mensuel minimal de la plus faible à la plus forte en y associant une fréquence F.

La valeur $F=0.5$ représente la médiane (il y a autant de valeurs de débit moyen mensuel minimum en deçà et en delà de cette valeur). Pour les valeurs inférieures à 0.5 on pose $T=1/F$, T exprimant la « rareté en années », d'où l'expression de période de retour. Avec $T=5$ ans, $F=0.2$.



Deuxième étude : Influence du changement climatique

La réalité d'un changement climatique lié à l'augmentation des gaz à effet de serre* et notamment du CO₂, fait désormais l'objet d'un consensus bien affirmé. Ce consensus repose sur la convergence de nombreux éléments de preuve, relatifs :

- aux tendances d'évolution de la température moyenne au cours des derniers siècles ;
- à la comparaison de telles tendances avec la variabilité naturelle du système climatique ;
- aux simulations, par des modèles climatiques*, des modifications du climat qui pourraient résulter d'augmentations variées des gaz à effet de serre.

Les études synthétisées en 2001 par le GIEC* montrent que la température moyenne de la surface du globe pourrait augmenter de 1.5 à 6°C d'ici à 2100, cette fourchette représentant l'incertitude liée aux modèles climatiques, d'une part, et à l'évolution des émissions des gaz à effet de serre d'autre part.

Si l'on s'intéresse au cycle de l'eau, ce réchauffement global entraîne une augmentation de l'évaporation et, par suite, des précipitations moyennes à l'échelle du globe, même si les simulations de changement climatique suggèrent une réduction des précipitations dans les tropiques. Les variations de précipitations constituent de fait une des incertitudes majeures quant aux effets potentiels de l'augmentation des gaz à effet de serre. Ces incertitudes augmentent en outre à l'échelle régionale.

C'est en particulier le cas en Europe, où les changements de précipitation estivale ont des signes différents selon les modèles climatiques : régionalement, certains modèles prédisent une augmentation des précipitations, d'autres une diminution.

Plus spécifiquement, la France est traversée par la limite entre une zone d'augmentation moyenne des précipitations au nord et une zone de diminution moyenne au sud, mais cette limite, qui varie en latitude selon les modèles climatiques, balaye le bassin de la Seine.

La question des impacts hydrologiques du changement climatique dans le bassin de la Seine revient donc, dans un premier temps, à cerner la nature du changement de climat (précipitations, températures, etc.) dans ce bassin régional :

- peut-on identifier le changement de climat le plus probable, quelle est l'incertitude associée ?
- peut-on en estimer les conséquences sur le régime hydrologique des cours d'eau, les risques de crue et de sécheresse, le fonctionnement des nappes aquifères ?

Pour ce faire, des scénarios régionaux de changement climatique ont été construits à partir des projections réalisées par des modèles climatiques, et leurs conséquences hydrologiques ont été analysées à l'aide des modèles hydrologiques déjà présentés.

Scénarios de changement climatique :

Les modèles climatiques sont les meilleurs outils actuellement disponibles pour appréhender le changement climatique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre. Les projections du changement climatique réalisées par ces modèles présentent les avantages d'être quantifiées, spatialisées et de prendre en compte la physique du système climatique au mieux des connaissances actuelles.

Comme indiqué ci-dessus, ces modèles sont cependant sujets à de nombreuses incertitudes, dont l'évaluation est problématique, et qui augmentent à l'échelle régionale.

Certaines incertitudes sont liées à la connaissance imparfaite du système climatique, d'autres sont inhérentes à la modélisation numérique : découpage de l'espace et du temps, hypothèses simplificatrices, méthodes numériques. Les projections du changement climatique sont aussi soumises aux incertitudes inhérentes aux scénarios d'émissions en gaz à effet de serre. Ces derniers dépendent en effet principalement de l'évolution des activités humaines, qui est, par essence, imprévisible.

La stratégie qui est communément adoptée dans ce contexte incertain est de disposer de plusieurs projections du changement climatique, dont les ressemblances sont indicatrices des tendances les plus probables, et dont les différences donnent une idée de la marge d'incertitude du changement climatique potentiel. Il faut cependant noter que les différents modèles climatiques, actuellement opérationnels, n'échantillonnent vraisemblablement pas toute la gamme des incertitudes inhérentes à la modélisation du climat. En effet, ils correspondent tous aux meilleures connaissances actuelles du système climatique et des techniques numériques, mais celles-ci sont évidemment perfectibles.

Pour étudier l'impact du changement climatique dans le bassin de la Seine, 12 simulations du changement climatique ont donc été utilisées. Elles ont été réalisées à l'aide de 8 modèles climatiques différents, forcés par un choix de 3 scénarios différents d'émissions en gaz à effet de serre.

Les 8 modèles climatiques retenus sont représentatifs de la diversité des modèles actuels, en particulier pour certains éléments importants de la dispersion des projections du changement climatique. C'est le cas du modèle océanique utilisé pour simuler l'évolution des températures de surface de la mer au cours du XXI^e siècle.

Ces 8 modèles globaux présentent aussi des résolutions spatiales très variées. Aux plus grossières, qui correspondent à des maillages réguliers, le bassin de la Seine n'est recouvert que par 4 mailles du modèle climatique. Les deux versions du modèle ARPEGE de Météo-France partagent en revanche la caractéristique d'un maillage variable [\(figure 31\)](#), qui permet régionalement une résolution plus fine (on parle de « zoom »), tout en maintenant la cohérence de la dynamique de l'atmosphère à grande échelle.

CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN

Qu'en est-il alors des variables météorologiques qui influencent l'hydrologie du bassin de la Seine ?

Des changements simulés par l'ensemble des 12 combinaisons modèles climatiques / scénarios d'émission, il ressort que :

- dans tous les cas, le rayonnement infra-rouge incident augmente significativement, en conséquence directe de l'augmentation de l'effet de serre atmosphérique ;
- il en résulte un réchauffement, qui est systématique et toujours statistiquement significatif ;
- l'humidité de l'air augmente également dans tous les cas (car l'air chaud peut contenir plus de vapeur que l'air froid), de manière significative ;
- les précipitations présentent une réponse radicalement différente, avec une tendance assez générale vers une augmentation en hiver et une diminution en été. La dispersion est cependant marquée, avec quelques simulations qui sortent du comportement général en été. La résultante sur les 12 simulations de ces changements saisonniers est une diminution des précipitations annuelles, mais qui n'est pas statistiquement significative ;
- le rayonnement solaire incident tend à augmenter en été, car la diminution des précipitations réduit la nébulosité ;
- les deux dernières variables considérées (pression atmosphérique et vitesse du vent) présentent des variations faibles et non statistiquement significatives.



Figure 31 : Résolution du modèle climatique ARPEGE-IFS18 dans le bassin de la Seine.

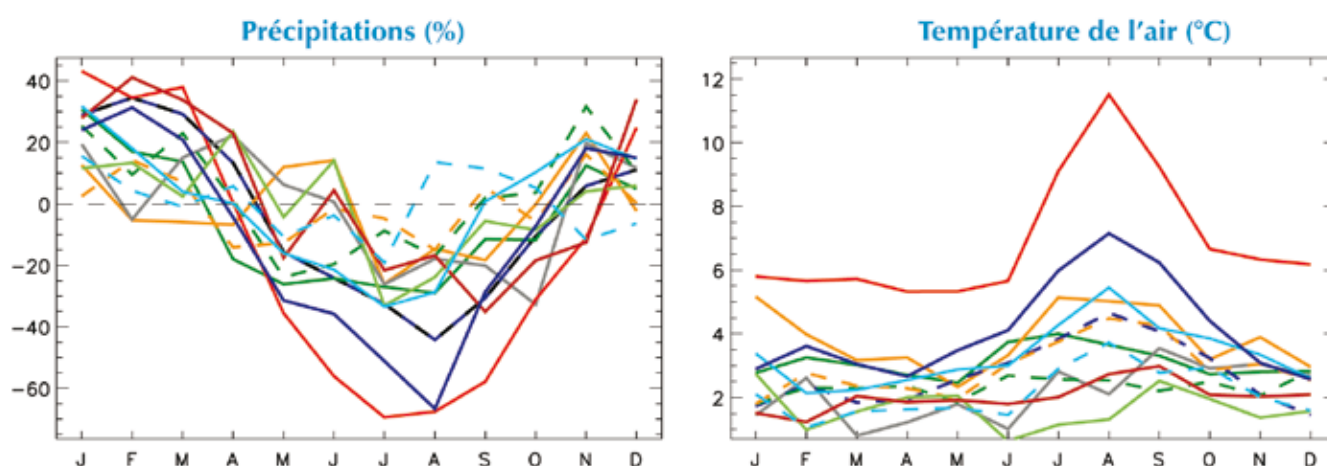


Figure 32 : Variations mensuelles moyennes par rapport à l'actuel (1985-1991) des précipitations et de la température de l'air selon les 12 simulations de changement climatique exploitées.

La méthode de désagrégation* utilisée pour prendre en compte ces changements climatiques dans les simulations hydrologiques est de construire des séries météorologiques représentatives du climat futur, en perturbant les séries météorologiques actuelles.

Pour chaque variable météorologique, des perturbations sont calculées mensuellement, en chaque maille du modèle climatique, comme le rapport (ou la différence dans le cas de la température) entre le climat mensuel moyen des deux scénarios qui composent une simulation du changement climatique, le scénario de changement climatique et le scénario de référence.

Ces perturbations mensuelles servent à modifier les séries actuelles observées, en étant appliquées uniformément à tous les pas de temps du mois considéré. Cette stratégie ne rend compte que du changement de climat moyen, et préserve sous climat perturbé la variabilité du climat actuel aux échelles qui ne sont pas celles du mois (journalière et interannuelle notamment).

		Température (°C)	Précipitations (mm/an)
Scénario de référence (1985-1991)		9.27	759
12 scénarios de changement climatique	Moyenne	12.37	730
	Changement moyen	3.10	-29.2
	Changement minimal	1.65	-146
	Changement maximal	6.88	+10.9

Statistiques du climat actuel de référence (1985-1991) et des 12 scénarios de changement climatique associés, en termes de moyenne interannuelle sur l'ensemble du bassin de la Seine de la température et des précipitations.

IMPACTS HYDROLOGIQUES SIMULÉS PAR LES MODÈLES CaB ET MODCOU

Un des principaux objectifs poursuivi par ces simulations est la caractérisation de la part d'incertitude des impacts hydrologiques liés à la prospective climatique par l'intermédiaire des modèles climatiques et des scénarios d'émission en gaz à effet de serre au cours du XXI^{ème} siècle.

Cette analyse a été menée à l'aide de 13 simulations effectuées avec le modèle CaB et de 5 avec le modèle MODCOU :

- une simulation dite « de référence » sous climat actuel ;
- 12 (ou 4) simulations sous climat perturbé, c'est-à-dire forcées par les scénarios de changement climatique, construits sur la base du climat actuel au pas de temps horaire.

En été, le modèle CaB accentue fortement le contraste par rapport à l'actuel car pour tous les scénarios, la baisse du débit d'étiage de la Seine à Poses est sensible (entre 15 et 45%).

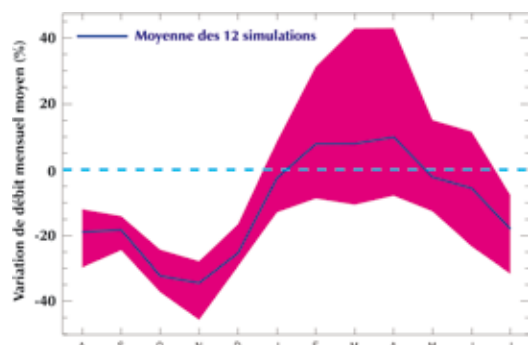
Ceci résulte du fait que ce modèle ne prend pas en compte l'effet régulateur des nappes contrairement au modèle MODCOU.

En effet, pour ce dernier, l'influence du changement climatique en été se fait moins sentir d'autant que les précipitations hivernales, et donc susceptibles de recharger les nappes, sont globalement plus importantes sous scénarios perturbés.

Si ces grandes tendances s'observent au niveau des stations intégratrices de l'ensemble du fonctionnement hydrodynamique du bassin (stations aval du bassin), l'analyse de l'évolution des débits sur l'ensemble des stations du bassin de la Seine montre des situations sensiblement différentes en fonction de leur situation géographique.

Si l'on regarde l'évolution moyenne annuelle des débits (figure 34), dans le cas par exemple de l'impact des simulations climatiques d'un scénario du modèle de Météo-France (ARPEGE-NEWA2), il ressort que les stations situées en tête de bassin voient leur débit moyen baisser alors que les stations situées plus au centre du même bassin voient leur débit légèrement augmenter.

modèle CaB -12 scénarios



Modèle Modcou - 4 scénarios

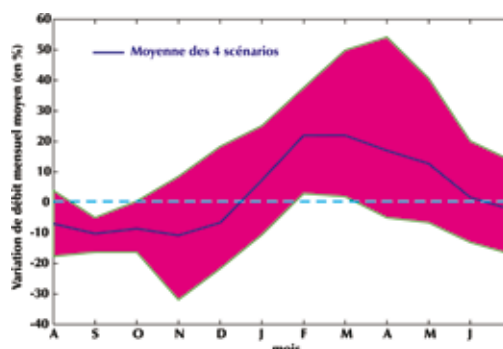


Figure 33 : Enveloppe des variations relatives de débit calculé de la Seine à Poses par rapport à l'actuel.

Ceci s'explique, entre autres, par le rôle des nappes d'accompagnement qui, du fait de recharges plus importantes en fin d'hiver assurent un soutien accru au débit des rivières, notamment en période d'étiage.

Par contre, en l'absence de nappe importante, les stations situées sur les parties affleurantes des formations ante Crétacé du bassin voient leur débit moyen annuel baisser du fait du déficit hydrique estival et automnal important (diminution des précipitations et augmentation de l'évapotranspiration potentielle).

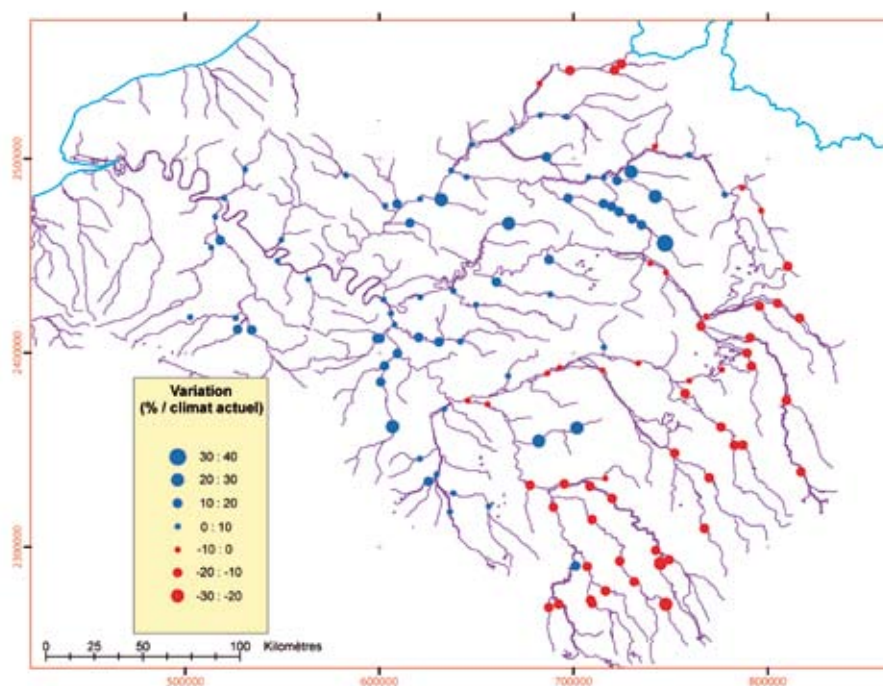


Figure 34 : Évolution du débit moyen annuel calculé par MODCOU aux stations hydrométriques sous scénario climatique de Météo-France (ARPEGE-NEWA2).

Les points bleus indiquent une augmentation du débit par rapport à l'actuel et les points rouges une diminution.

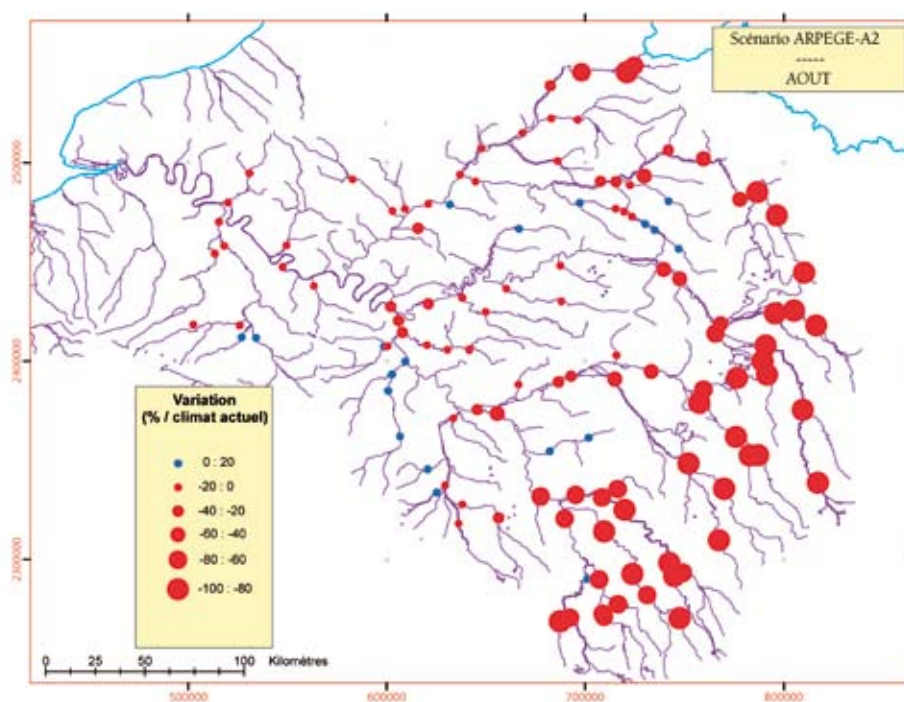


Figure 35 : Évolution relative du débit moyen calculé au mois d'août par MODCOU aux stations hydrométriques sous scénario climatique de Météo-France (ARPEGE-NEWA2).

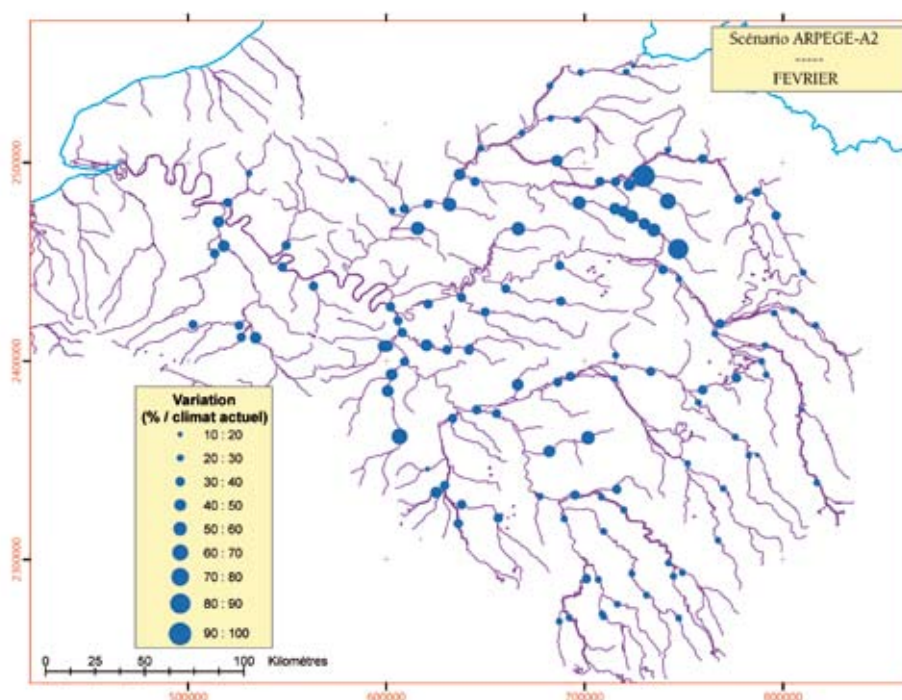


Figure 36 : Évolution relative du débit moyen calculé au mois de février par MODCOU aux stations hydrométriques sous scénario climatique de Météo France (ARPEGE-NEWA2).

DE NOUVELLES ÉTUDES EN COURS

À ce jour, de nouvelles études sur l'impact du changement climatique dans le bassin de la Seine sont initiées.

Elles ont pour objectif de préciser ses effets, leurs conséquences sur des zones précises du bassin et l'influence de l'agriculture par le biais de l'irrigation.

Elles posent plus particulièrement les questions suivantes :

- Comment le changement climatique est-il susceptible de modifier la distribution des extrêmes, en terme de crues, d'étiages et de sécheresse (analyse fréquentielle et prédétermination) ? Ces analyses seront alimentées par les débits, humidités du sol et niveaux piézométriques simulés par plusieurs modèles hydrologiques.
- Quelles sont les manifestations particulièrement sensibles pour la société de ces extrêmes ?
 - Quelles peuvent être les modifications de l'extension des crues dans des zones clés des bassins (vallée de la Somme en amont d'Abbeville, corridor fluvial de la Seine, incluant Paris et plaine alluviale de la Bassée) pour certaines périodes de retour ?
 - Quelles sont les relations entre l'agriculture et les hydrosystèmes continentaux, en ce qui concerne les besoins en irrigation, leur impact sur la ressource en eau, la production agricole et la pollution diffuse par les nitrates, qui peuvent être simulés dans le bassin de la Seine grâce à un modèle agronomique couplé à MODCOU ?
 - Comment ces processus et leurs interactions peuvent être modifiés sous l'effet du changement climatique, en distinguant l'effet du changement de climat moyen et celui du changement de variabilité ?

Pour ce faire, deux nouvelles méthodes de désagrégation* des simulations de changement climatique (méthode des régimes de temps et méthode de la correction variable) permettront de rendre compte des changements de variabilité du climat, de l'échelle journalière à interannuelle, en plus du changement de climat moyen.

Les premières analyses des données fournies par ces nouvelles simulations de changement climatique tendraient à montrer qu'à la fin du siècle, les précipitations moyennes mensuelles futures seraient toujours inférieures aux précipitations actuelles, même en hiver, contrairement aux scénarios présentés précédemment.

Au niveau de l'impact sur les débits simulés des rivières, si la diminution estivale des débits d'étiage était confirmée et accentuée du fait d'un abaissement progressif du niveau des formations aquifères d'accompagnement, des baisses importantes seraient également à craindre en hiver.

Cet ensemble ne serait bien sûr pas sans conséquences sur le fonctionnement hydrodynamique général du bassin de la Seine.

La gestion de l'eau en France a longtemps mis en avant la satisfaction des usages.

Le développement des agglomérations et des activités humaines, notamment industrielles, et l'évolution de l'agriculture, ont multiplié les atteintes aux milieux aquatiques, tant au niveau quantitatif que qualitatif.

Les acteurs ont alors pris conscience des limites d'une approche trop cloisonnée et de la nécessité, pour le développement durable des usages, de prendre en compte les milieux aquatiques et leur sauvegarde dans leur ensemble.

Sur le bassin de la Seine, plusieurs approches de modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème ont été mises en place et sont en constante évolution. Le modèle MODCOU, par exemple, qui intègre une description explicite des formations aquifères va être très prochainement repris afin de distinguer plus finement les différentes formations aquifères du Tertiaire.

Ceci doit permettre d'améliorer l'outil en terme de représentation du fonctionnement hydrodynamique actuel mais également, et surtout, en terme d'outil de prospection et de prévision d'impact de telle ou telle politique d'aménagement.

Ces outils et leurs applications peuvent et doivent permettre d'aider à la mise en place des SAGE* qui « définissent les objectifs et les règles pour une gestion intégrée de l'eau, au niveau local ».

Chaque grand bassin hydrographique* peut désormais mieux organiser et mieux prévoir ses orientations fondamentales.

En outre, l'amélioration de la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de la Seine et l'apport des modèles existants ou à venir, doit permettre d'éviter certaines erreurs commises par le passé.

Un Plan Seine a d'ailleurs été établi et porte sur l'ensemble des problématiques du fleuve pour établir un projet de développement durable.

Deux enjeux, identifiés comme prioritaires, ont été mis en avant dans ce plan du point de vue quantitatif :

- **les inondations** : définition et mise en oeuvre d'un programme global pluriannuel de réduction des effets d'une crue similaire à celle de 1910 ;
- **un projet général de développement durable**, permettant de concilier les différents usages et fonctions du fleuve : corridor biologique d'importance nationale et européenne, axe de transport, axe économique, axe de renouvellement urbain et de valorisation touristique.

Cette connaissance du fonctionnement hydrodynamique et la possibilité de le reproduire par le biais de modèles mathématiques est également indispensable à la compréhension de la dynamique d'autres paramètres influençant l'état écologique du bassin.

En effet l'eau est le principal vecteur des pollutions sur ou dans le sol. On peut citer par exemple celle des aquifères par les nitrates.

Ceux-ci, essentiellement produits de l'agriculture intensive active depuis plusieurs décennies sur le bassin, sont en effet solubles dans l'eau.

Lessivés par les pluies, les nitrates sont alors entraînés à distance par infiltration vers les nappes ou ruissellement vers les cours d'eau.

Des compétences humaines et des outils d'analyse, toujours perfectibles, ont donc été créés ces dernières années pour aider les gestionnaires dans leur tâche de gestion durable du bassin dans sa globalité.

Des études sont toujours en cours ou initiées pour aller plus avant et affiner encore la connaissance du fonctionnement de cet hydrosystème, si important mais si fragile.

Souhaitons que tous ces efforts permettent toujours que « Sous le pont Mirabeau coule la Seine... ».

Bibliographie

- AESN. (1976). Les bassins de la Seine et des cours d'eau normands – Hydrologie générale et conclusions. Agence de l'Eau Seine-Normandie, Nanterre, tome 1, fasc. 6.
- Billen, G., Garnier, J., & Hanset, P. (1994). Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289 : 119-137.
- BRGM, site web, <http://www2.brgm.fr/divers/nappes>.
- CNRS- Direction à l'Information Scientifique et Technique sous la direction de Dominique ARMAND, (2006), L'eau douce une ressource précieuse, Collection Sagascience - www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/accueil.html.
- Ducharne, A., et al (2005). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. Rapport final du projet GICC Seine, 60 pp.
- Ducharne, A., Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E., Déqué, M. (2003). Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, *VertigO*, La revue en sciences de l'environnement sur le WEB, Vol.4 N° 3, décembre 2003.
- Ducharne, A., Koster, R.D., Suarez, M., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2: Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.*, 105[D20]: 24823-24838.
- Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S., Viennot P. (2007). Long term prospective of the Seine river system : confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375, 292-311, doi:10.1016/J.scitotenv.2006.12.011.
- Gibelin, A.-L. & Déqué, M. (2003). Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dyn.*, 20: 327-339.
- Gomez, E. (2002). Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse de l'École des Mines de Paris, 287 pp.
- Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D., Noguer, M., van der Linden, P., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC*. Cambridge University Press. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm
- Koster, R.D., Suarez, M., Ducharne, A., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 1: Model structure. *J. Geophys. Res.*, 105[D20]: 24809—24822.
- Ledoux, E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de l'Ecole des Mines de Paris.
- Meybeck M., de Marsily G. & Fustec E., (1998), *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Ed. Elsevier.
- Nakicenovic, N. & Swart, R., editors (2000). *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, UK.
- PIREN Seine, (2001), *La Seine en équations, des modèles pour mieux comprendre la Seine et restaurer sa qualité*, co-édition CNRS - AESN.
- Planton, S., Déqué, M., Douville, H. and Spagnoli, B. (2005). Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique, *C.R. Géoscience*, 337 : 193-202.
- Viennot P., Ledoux E. (2004). Modélisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine – Calage du comportement des nappes internes du bassin de la Seine – prévision des étiages, Ecole des Mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique, rapport LHM/RD/04/30, 92p.
- Viennot P., Ledoux E. (2006). Influence de l'augmentation des prélèvements anthropiques en formations aquifères sur le fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine, Ecole des Mines de Paris, Centre de Géosciences, rapport R060713PVIE, 106p.

Glossaire

Albedo : rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et 1 au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit.

Aquifère : formation géologique souterraine, formée de roches poreuses ou fissurées, dans laquelle l'eau peut s'infiltrer, s'accumuler et circuler; le mot aquifère désigne à la fois le contenant (les roches) et son contenu (l'eau).

Bassin versant ou bassin hydrographique : territoire associé à une rivière et regroupant tous les terrains sur lesquels ruissellent, s'infiltrent et courent toutes les eaux qui alimentent cette rivière.

Biosphère : ensemble de toutes les fractions de la planète où se développent des organismes vivants.

Coefficient d'emmagasinement : rapport du volume d'eau libéré ou emmagasiné par unité de surface d'un aquifère à la variation de charge hydraulique correspondante.

Cuesta : c'est le nom espagnol de la notion « côte ». C'est une forme du relief dissymétrique constituée d'un côté par un talus à profil concave (le front), en pente raide et, de l'autre, par un plateau doucement incliné en sens inverse (le revers). Les cuestas sont à trouver aux bordures des bassins sédimentaires peu déformés. Le Bassin parisien en est un bon exemple puisqu'il se termine à l'Est par une succession de côtes : côtes de Meuse, suivies des côtes de Moselle puis de la fin du plateau lorrain.

Désagrégation : méthode statistique qui permet de relier des variations à grande échelle à des variations beaucoup plus locales.

Drainance : phénomène de passage d'eau à travers une formation semi-perméable et échange entre celle-ci et un aquifère contigu, généralement captif.

Écoulement (ou débit) spécifique : c'est la valeur du débit rapporté à la surface du bassin versant. Il s'exprime en litre par seconde et par kilomètre carré.

Effet de serre : L'effet de serre est un phénomène naturel reposant sur le fait que l'atmosphère terrestre se conduit un peu comme la vitre d'une serre : elle laisse pénétrer la chaleur du soleil et l'emprisonne. Ce sont les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère qui piègent les rayons infrarouges émis par la Terre. Plus ils sont abondants, plus l'atmosphère et le sol se réchauffent.

Etiage : plus bas niveau des eaux d'un cours d'eau.

Evapotranspiration potentielle (ETP) : Ensemble des phénomènes et des flux d'évaporation physique et de transpiration biologique, notamment de la végétation, qui interviennent dans le bilan d'eau d'un territoire, d'un hydrosystème terrestre, comme facteur de flux sortant. Elle est exprimée le plus généralement en hauteur moyenne évaporée sur la surface considérée pendant une durée définie (millimètres par jour par exemple).

Faciès : en géologie, terme très général désignant la catégorie dans laquelle on peut ranger une roche en fonction de ses caractéristiques : faciès argileux, sableux, calcaire, ...

Gaz à effet de serre : les gaz à effet de serre sont des composés chimiques contenus dans l'atmosphère où ils emprisonnent la chaleur. Ils retiennent une partie de la chaleur solaire, selon le mécanisme dit d'effet de serre. Ces gaz, dont le principal est le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂), sont présents naturellement en quantité minoritaire dans l'atmosphère (moins de 1%).

GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Il fut créé en 1988, par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, afin « d'évaluer l'information scientifique, technique et socio-économique pertinente pour comprendre le risque du changement climatique d'origine humaine ». Les publications du GIEC sont préparées par plusieurs centaines de scientifiques de diverses nationalités et sont généralement reconnues comme réunissant le consensus scientifique le plus large sur le changement climatique.

Hydrosphère : ensemble de toutes les fractions de la planète impliquées dans le cycle de l'eau, soit les mers et océans, la surface des continents, l'atmosphère et la biosphère.

Indice de surface foliaire : est défini comme la moitié de la surface foliaire totale par unité de surface du sol. Il s'exprime en m²/m².

Karstique : se dit des terrains calcaires que l'eau a progressivement creusés, formant diverses cavités telles qu'avens, failles et galeries.

M.C.G. (Modèle de Circulation Générale) : représentation numérique en trois dimensions de l'atmosphère permettant de simuler le climat et de faire des prévisions climatiques.

Milieu sédimentaire : milieu provenant du démantèlement d'anciennes roches par érosion ou sédimentation, qui est l'ensemble des processus selon lesquels des particules en suspension se déposent. La sédimentation des roches s'effectue généralement en milieu marin.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

Modèles climatiques : modèles numériques globaux en trois dimensions de l'atmosphère et des océans, permettant de simuler le climat et de faire des prévisions climatiques ; aussi appelés modèles de circulation générale. Pour simuler les évolutions spatio-temporelles de la température, de la pression, de l'humidité atmosphérique et de la salinité des océans, ces modèles prennent en compte l'advection (vents et courants), les processus radiatifs, la physique des nuages, les changements de phase de l'eau (gel/fonte, condensation/précipitation, etc.), les échanges avec la surface terrestre (flux de chaleur latente, sensible, etc.), la convection, la turbulence. Les modèles climatiques incluent désormais le plus souvent des paramétrisations de la chimie atmosphérique, des aérosols et du cycle du carbone. Les échelles de distances résolues dans ces modèles sont typiquement de l'ordre de la centaine de kilomètres (c.a.d. que les caractéristiques de cette taille ou plus petites ne sont pas directement résolues). La résolution temporelle de ces modèles (fréquence de calcul des différents champs) est comprise en général entre 20 minutes et une heure.

Nappe (d'eau souterraine) : ensemble de l'eau contenue dans une fraction perméable de la croûte terrestre totalement imbibée, conséquence de l'infiltration de l'eau dans les moindres interstices du sous-sol et de son accumulation au-dessus d'une couche imperméable ; ces nappes ne forment de véritables rivières souterraines que dans les terrains karstiques.

nappe captive : nappe d'eau souterraine circulant entre deux couches de terrains imperméables.

nappe d'accompagnement : nappe d'eau souterraine voisine d'un cours d'eau dont les propriétés hydrauliques sont très liées à celles du cours d'eau ; l'exploitation d'une telle nappe induit une diminution du débit d'étiage du cours d'eau, soit parce que la nappe apporte moins d'eau au cours d'eau, soit parce que le cours d'eau se met à alimenter la nappe.

nappe libre : nappe d'eau souterraine circulant sous un sol perméable.

Point de flétrissement : humidité du sol en dessous de laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau.

Puissance : en géologie, terme équivalent à l'épaisseur d'une formation.

QMNA : débit mensuel minimal annuel, c'est le plus faible des débits des 12 débits mensuels d'une année civile. Le QMNA médian, calculé sur plusieurs années, est donc établi à partir de mois différents (ex. septembre 91, août 92, octobre 93, septembre 94...).

QMNA5 : calculé sur plusieurs années comme le QMNA médian à partir d'un ajustement à une loi statistique, le QMNA5 est le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (ayant une probabilité 1/5 (chaque année) de ne pas être dépassé). Le QMNA5 est aussi appelé « débit mensuel d'étiage de fréquence quinquennale sèche » ou, de façon plus condensée, « débit mensuel d'étiage quinquennal » ou encore comme il est nommé dans la nomenclature de la loi sur l'eau « débit moyen mensuel sec de récurrence 5 ans ».

Roche métamorphique : roche qui a subi une modification minéralogique à la suite d'élévations de température et de pression. Le métamorphisme est donc une transformation à l'état solide d'une roche préexistante.

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

Subsidence : affaissement lent d'une partie de l'écorce terrestre sous le poids des sédiments ou de l'affaissement plus ou moins rapide causé par des vides sous-jacents.

Temps de résidence : temps nécessaire pour apporter à un aquifère un volume égal à sa capacité de stockage. On peut également parler de temps de renouvellement des eaux.

Thalweg (talweg) : ligne reliant les points les plus bas du lit d'un cours d'eau ou d'une vallée.

Transgressif : dans le domaine de la géologie, la transgression est l'envahissement des continents par la mer, dû à un affaissement des terres émergées ou à une élévation générale du niveau des mers (ou des deux effets cumulés).

Transmissivité : paramètre régissant le flux d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu (mesuré selon une direction orthogonale à celle de l'écoulement), et par unité de gradient hydraulique.



**eau
seine**
NORMANDIE

L'Agence de l'eau Seine-Normandie

est un établissement public du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. Sa mission est de financer les ouvrages et les actions qui contribuent à préserver les ressources en eau et lutter contre les pollutions, en respectant le développement des activités économiques. Pour ce faire, elle perçoit des redevances auprès de l'ensemble des usagers qu'elle redistribue sous forme d'aides financières aux collectivités locales, aux industriels, aux artisans, aux agriculteurs et aux associations qui entreprennent des actions de protection du milieu naturel. Ses actions s'expriment à travers un programme pluriannuel. Les études et recherches pilotées par l'Agence contribuent à la gestion équilibrée de la ressource en eau et de tous les milieux aquatiques.

Siège

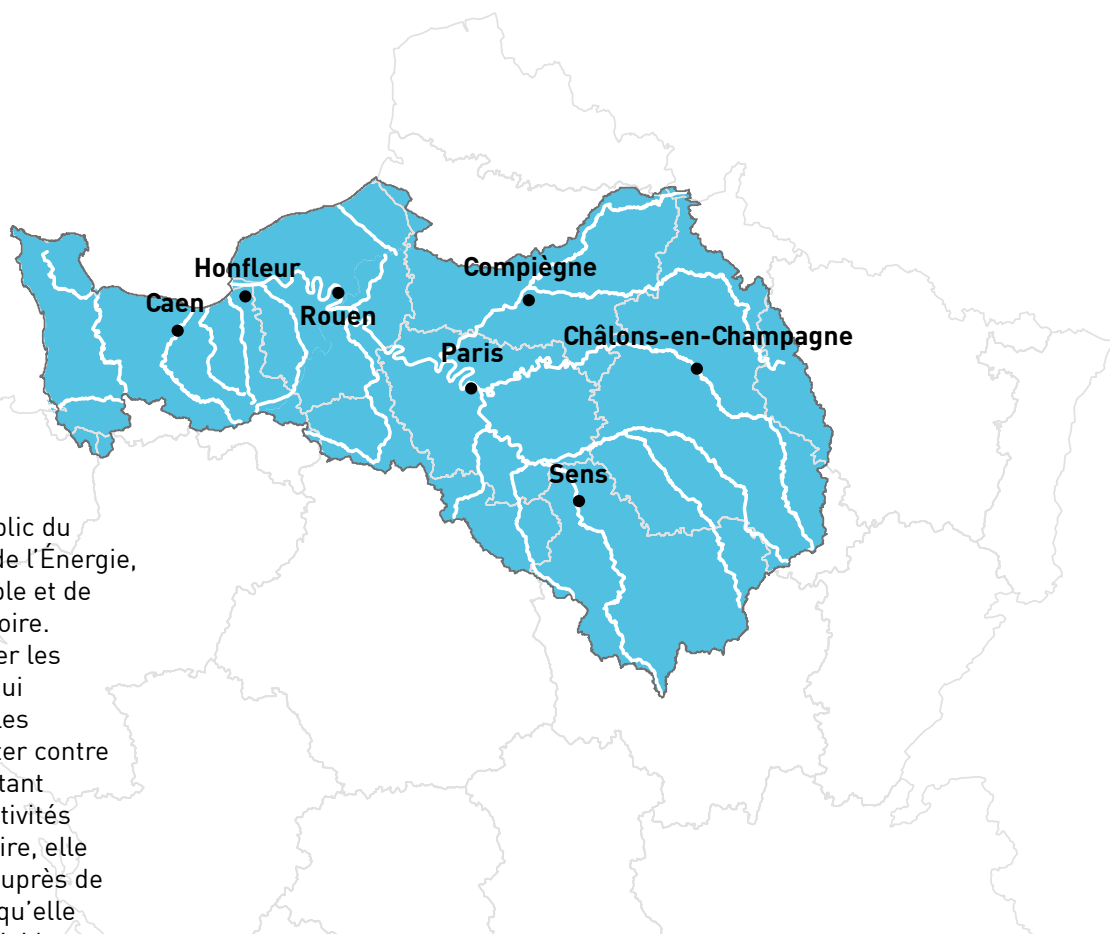
51, rue Salvador Allende
92027 Nanterre Cedex
Tél. 01 41 20 16 00
Fax 01 41 20 16 09

www.eau-seine-normandie.fr

Programme PIREN-Seine

Direction et secrétariat :
UMR CNRS 7619 Sisyphe
Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)
4, place Jussieu 75005 Paris
Tél. 01 44 27 74 24
Fax 01 44 27 45 88

www.piren-seine.fr



Les PARTENAIRES du PIREN-Seine

AGENCE DE L'EAU SEINE-
NORMANDIE (AESN)
www.eau-seine-normandie.fr

CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE (CNRS)
www.cnrs.fr

DIRECTION RÉGIONALE DE
L'ENVIRONNEMENT
(DIREN ÎLE-DE-FRANCE)
www.ile-de-france.ecologie.gouv.fr

EAU DE PARIS
www.eaudeparis.fr

INTERNATIONAL ZINC ASSOCIATION
(IZA)
www.iza.com

LYONNAISE DES EAUX
www.lyonnaise-des-eaux.fr

LES GRANDS LACS DE SEINE :
INSTITUTION INTERDÉPARTEMENTALE
DES BARRAGES-RÉSERVOIRS DU
BASSIN DE LA SEINE (IIBRBS)
www.iibrbs.fr

SYNDICAT DES EAUX
D'ÎLE-DE-FRANCE (SEDIF)
www.sedif.com

SYNDICAT INTERDÉPARTEMENTAL
POUR L'ASSAINISSEMENT DE
L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE
(SIAAP)
www.siaap.fr

UNION NATIONALE DES PRODUCTEURS
DE GRANULATS (UNPG)
www.unicem.fr

VOIES NAVIGABLES DE FRANCE
(VNF)
www.vnf.fr

ENSEMBLE
DONNONS
VIE À L'EAU

Agence de l'eau

Numéro ISBN : 978-2-918251-01-9
Dépôt légal : janvier 2009

