



eau
seine
NORMANDIE

PROGRAMME PIREN-SEINE

Programme Interdisciplinaire de Recherche
sur l'Environnement de la Seine



Impact du changement
climatique
sur les ressources en **eau**
du bassin versant
de la **Seine**

Résultats du projet
GICC - RExHySS

ENSEMBLE
DONNONS
vie à l'eau

Agence de l'eau

#13

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 culturales 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 ses travaux.

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

Guy FRADIN

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

Le Programme de Recherche Interdisciplinaire sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine) est né en 1989 de la volonté du CNRS 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 75000 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.

Gilles BILLEN et Jean-Marie MOUCHET

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

Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine

Auteurs :

Florence HABETS^(1,2), Julien Boé⁽³⁾, Michel DÉQUÉ⁽⁴⁾, Agnès DUCHARNE⁽¹⁾,
Simon Gascoïn⁽⁵⁾, Ali HACHOUR⁽²⁾, Eric MARTIN⁽⁴⁾, Christian PAGÉ⁽³⁾,
Eric SAUQUET⁽⁵⁾, Laurent TERRAY⁽⁴⁾, Dominique THIÉRY⁽⁶⁾,
Ludovic OUDIN⁽¹⁾, Pascal VIENNOT⁽²⁾, Sylvain THERRY⁽¹⁾

Numéro ISBN : 978-2-918251-12-5
Dépôt légal : septembre 2011

(1) UMR Sisyphe 7619, Paris
(2) Centre de Géosciences Mines Paristech, Fontainebleau
(3) CERFACS, Toulouse
(4) Centre National de Recherche en Météorologie, Météo-France, Toulouse

(5) CESBIO, Toulouse
(5) CEMAGREF, Lyon
(6) BRGM, Orléans

RÉSUMÉ

Les activités anthropiques ont contribué à modifier le climat de façon durable sur les décennies passées et à venir. Un gros effort de la communauté scientifique nous permet d'appréhender ces évolutions à l'échelle régionale, avec cependant de nombreuses incertitudes sur la quantification des changements, voire même parfois, sur le signe de ces modifications. Cela explique pourquoi les résultats des études d'impact du changement climatique sur la ressource en eau ont évolué en moins d'une décennie.

Les projections climatiques sont obtenues à l'aide de modèles du système terrestre et sur des scénarios socio-économiques permettant l'estimation des émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols. Les modèles utilisés sont complexes, et ont beaucoup progressé au cours du temps pour mieux prendre en compte les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales et les différents processus chimiques.

Si ces modèles sont capables de reproduire les tendances climatiques observées à grande échelle, ils ont néanmoins des difficultés à les caractériser localement. Aussi, lorsque l'on s'intéresse à l'impact du changement climatique sur la ressource en eau d'un bassin versant, doit-on utiliser des méthodes de désagrégation* afin de mieux représenter les caractéristiques locales.

Ce fascicule présente les résultats du RExHySS, le programme de recherche sur l'impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme. Ce programme est financé par le programme Gestion et Impact du Changement Climatique (GICC) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transport et du Logement.

Dans ce projet, nous avons quantifié l'impact du changement climatique sur la ressource en eau de la Seine en prenant en compte les principales sources d'incertitude. Ainsi, nous avons utilisé deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre, six modèles de climats, trois méthodes de désagrégation et cinq modèles hydrologiques.

Les résultats ont mis en évidence une augmentation marquée de la température de l'air et de la demande évaporative au cours du XXI^e siècle, ainsi qu'une diminution marquée des précipitations estivales et une augmentation modérée des précipitations hivernales.

Cela se traduit par une diminution conséquente des débits de la Seine à son exutoire de $-23\% \pm 10\%$ à l'horizon 2050 et de $-29\% \pm 14\%$ à l'horizon 2100. La diminution des débits est généralisée sur l'ensemble du bassin et s'accompagne également d'une baisse du niveau des nappes. Cependant, cela ne modifie pas les risques d'inondation car l'intensité des crues décennales reste relativement inchangée.

SOMMAIRE

7 Introduction

8  Principe de l'effet de serre

9  LE GIEC : UN GROUPE D'EXPERTS

10 **COMPRENDRE**

L'évolution du climat et le changement climatique

11 L'histoire du temps

12 La modélisation du climat

13 L'évaluation des modèles de climat

 LES DÉBATS AUTOUR DE L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

16 La nécessité de recourir aux méthodes de désagrégation

 Présentation des différentes méthodes de désagrégation

22 **ÉTUDIER**

Les projections climatiques

23 De multiples scénarios d'émission de gaz à effet de serre

24 Les projections climatiques issues du 4^e exercice du GIEC

24 Les projections climatiques désagrégées utilisées sur le bassin de la Seine

26 **ÉVALUER**

Le climat du bassin de la Seine et ses évolutions

27 Les caractéristiques climatiques en temps présent du bassin de la Seine

28 Évaluation des simulations climatiques désagrégées

29 Évolutions possibles du climat

32 **ANALYSER**

L'impact sur l'hydrologie du bassin de la Seine

33 Les modélisations hydrologiques du bassin de la Seine

33 Réalisation des études d'impact sur l'hydrologie

34 L'impact du changement climatique sur le bilan hydrique

36 Application sur les débits de la Seine à Poses

38 Évolution des débits sur le bassin de la Seine et tendance sur les extrêmes

 Le projet climator

40 Impact du changement climatique sur la piézométrie

 COMPRENDRE L'ÉVOLUTION DES PROJECTIONS CLIMATIQUES AU COURS DU TEMPS

44 Conclusion

INTRODUCTION

Le constat dressé par la division Eau de l'ONU (UN-Water 2010) est clair : « *L'eau est le premier intermédiaire par lequel le changement climatique impacte les écosystèmes terrestres, ainsi que le mode de vie et le bien-être de nos sociétés* ». Ces impacts peuvent jouer à la fois sur le cycle annuel de l'eau et sur les extrêmes comme les risques d'inondation et de sécheresse, et ainsi affecter durablement l'hydrosystème*. L'agriculture et l'urbanisme, éléments importants sur le bassin de la Seine, devront s'adapter pour mieux supporter l'élévation de la température et l'évolution de la ressource en eau.

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, il faut se projeter dans un futur incertain, sur la base de scénarios décrivant l'évolution de certains éléments clés, l'évolution de la démographie ou de la consommation de produits dérivés du pétrole. Ces scénarios conduisent à différentes émissions de gaz à effet de serre et donc, à différentes évolutions du climat.

Dans ce fascicule, nous décrivons les travaux issus du projet de recherche RExHySS (Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme) financé par le programme Gestion et Impact du Changement Climatique (GICC) du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.

La méthodologie suivie dans le cadre de ce projet est représentée [figure 1](#). La première étape consiste à estimer les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols. Ces émissions sont alors utilisées par les modèles de climat pour en déduire l'évolution du climat

dans le futur. Ces simulations sont ensuite désagrégées (ou régionalisées) pour obtenir une meilleure estimation de l'évolution du climat à une échelle¹ plus fine. Ces informations régionales sont ensuite utilisées dans des modèles hydrologiques régionaux pour estimer l'impact du changement climatique sur les débits des rivières et le niveau des nappes phréatiques. Chacune de ces opérations conduit à une forme de simplification de la réalité, qui génère une part d'erreur ou d'incertitude. Pour estimer cette incertitude, plusieurs cas possibles ont été étudiés à chaque niveau.

Dans ce fascicule, nous présentons tout d'abord quelques éléments sur le changement climatique : les observations d'un réchauffement, les causes liées aux activités humaines, et la façon dont on peut reproduire les résultats grâce aux modèles des climat.

Ensuite, nous nous intéressons aux projections climatiques qui reposent sur l'utilisation de scénarios d'émission de gaz à effet de serre dans les modèles de climat.

Le cas particulier des études régionales nécessite un raffinement des simulations à cette échelle, ce qui se fait via l'utilisation de méthodes de désagrégation (ou de régionalisation).

Puis, l'analyse se concentre sur la présentation du climat du bassin de la Seine et ses évolutions projetées aux horizons 2050 et 2100.

Enfin, le fascicule présente l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, ainsi que les incertitudes associées.

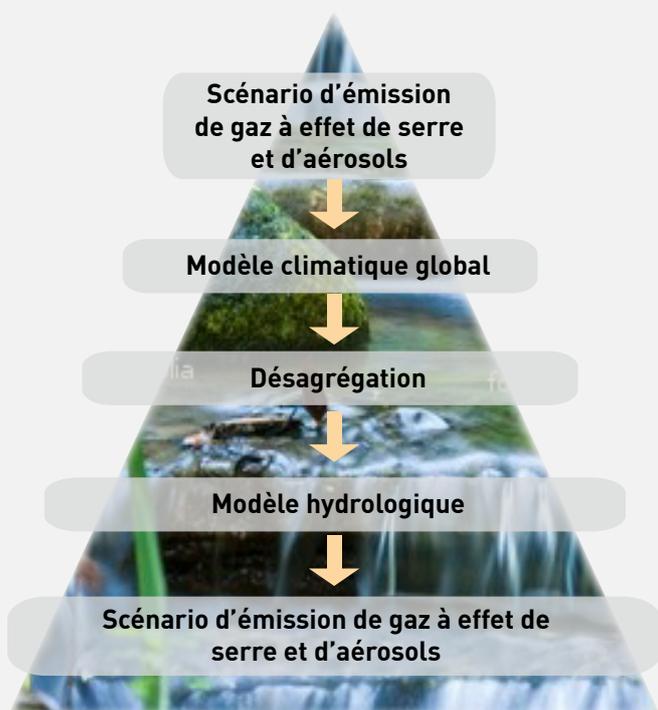


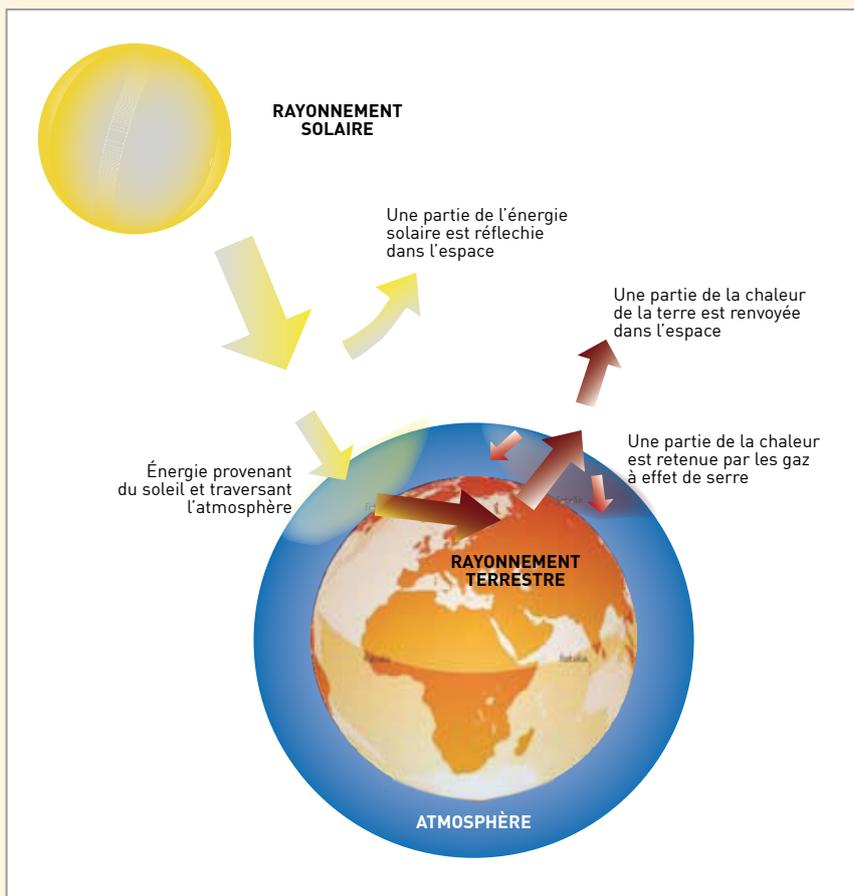
Figure 1 : Principe d'une étude d'impact du changement climatique.

¹ Dans ce rapport, la notion d'échelle fine réfère à une fine résolution, alors que la notion de grande échelle réfère à une résolution grossière.

Principe de l'effet de serre :

L'atmosphère laisse passer une partie du rayonnement du Soleil qui vient frapper le sol. Réchauffé, celui-ci émet un rayonnement infrarouge qui est en partie ou totalement piégé par l'atmosphère rendue «imperméable» par la présence de gaz dont principalement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone CO_2 et le méthane CH_4 . Ce rayonnement est alors réémis vers la surface, ce qui contribue au réchauffement de l'atmosphère.

Les gaz à effet de serre assurent à la Terre une température moyenne de $+15^\circ\text{C}$. En leur absence, notre climat serait très différent et très inhospitalier pour la vie. Leur teneur dans l'atmosphère a été stable pendant 8 000 ans jusqu'au début de l'ère industrielle. Depuis lors, l'homme brûle une quantité toujours accrue de combustibles fossiles dont les résidus atmosphériques sont également des gaz à effet de serre. Le volume de CO_2 ainsi rejeté (3 gigatonnes par an) a déjà provoqué un réchauffement global de la planète.





LE GIEC : UN GROUPE D'EXPERTS À PIED D'OEUVRE

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change, soit IPCC) a été créé en 1988 par deux agences de l'ONU, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Il a pour vocation d'étudier les travaux scientifiques concernant le changement climatique, de les discuter et d'aboutir à un consensus qui fait ensuite l'objet de rapports, directives méthodologiques et documents techniques.

Ces rapports sont destinés aussi bien aux scientifiques qu'aux décideurs. Ils ont servi de base à la négociation de plusieurs protocoles d'accords internationaux (Convention-cadre sur les changements climatiques du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro en 1992, protocole de Kyoto en 1995...). Son objectif n'est donc pas de mener des projets de recherche scientifique ou de procéder à des mesures de données climatiques, mais de guider les travaux concernant le changement climatique.

Le GIEC se compose de représentants nommés par les gouvernements de plus de 130 pays et organisations internationales. Il s'organise en trois groupes de travail :

- Le groupe I qui étudie la base scientifique de l'étude physique du changement climatique ;
- Le groupe II qui s'intéresse aux travaux sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique ;
- Le groupe III qui évalue les travaux sur les mesures d'atténuation du changement climatique.

Les travaux du GIEC ont donné lieu à quatre rapports : le 1^{er} nommé FAR pour First Assessment Report en 1990, le 2^e nommé SAR pour Second Assessment Report en 1995, le 3^e TAR pour Third Assessment Report en 2001 et le 4^e nommé AR4 pour 4^e Assessment Report en 2007. Un cinquième est actuellement en préparation. Le GIEC a également rédigé un rapport spécial sur les émissions de gaz à effet de serre : SRES pour Special Report on Emissions Scenarios. Ces scénarios d'émissions ont été utilisés lors du TAR et de l'AR4.

Des exercices d'intercomparaison des modèles de climat sont organisés en parallèle des exercices du GIEC. Ils servent de support à de nombreuses études qui sont ensuite analysées par le groupe I du GIEC. Ces exercices, nommés CMIP pour Coupled Model Intercomparison Project, ont pour but de mettre à disposition de la communauté scientifique les projections climatiques simulées par les modèles de climat disponibles dans des conditions comparables (c'est-à-dire avec les mêmes scénarios d'émission de gaz à effet de serre par exemple).

Dans le cadre du projet RExHySS, nous avons utilisé les résultats du CMIP3 qui ont fait l'objet d'études analysées dans l'AR4.

Même si les principes du GIEC et de ses documents de synthèse basés sur un consensus sont parfois critiqués, l'implication de la communauté scientifique internationale donne une grande légitimité à cet organisme. Ses actions lui ont valu de recevoir le prix Nobel de la Paix en 2007, conjointement avec Al Gore.

Les rapports du GIEC sont disponibles sur le site internet www.ipcc.sh.

L'évolution du climat et le changement climatique



Les débats autour du climat ont motivé la communauté scientifique à améliorer les méthodes, éclaircir les hypothèses et à mieux évaluer les incertitudes sur le réchauffement. Car si les modèles de climat représentent correctement les tendances observées à l'échelle du globe, ils ont longtemps eu du mal à représenter correctement les caractéristiques régionales. Pour étudier des domaines précis comme le bassin de la Seine, les scientifiques utilisent la « méthode de désagrégation » dont le but est à la fois d'affiner la représentation des caractéristiques locales et de corriger les erreurs des modèles.



L'histoire du temps

Afin de comprendre l'évolution du climat à venir, il faut connaître ses évolutions passées.

Tout d'abord, une définition : le climat correspond à l'ensemble des conditions météorologiques caractérisant une région. Son étude se fait sur des périodes assez longues, classiquement 30 ans, car le climat n'est pas stable et a beaucoup évolué sur de longues périodes. Les périodes glaciaires qui ont conduit à la formation de vallées du même nom ou à des dépôts de loess* sont une illustration de ces évolutions. La paléoclimatologie est la science qui étudie les variations passées du climat, que ce soit par la récolte de données, en particulier les carottages dans les calottes glaciaires ou par la modélisation. L'évolution de la température reconstituée à partir des observations depuis plus de 1 000 ans est présentée [figure 2](#), avec une approche plus détaillée des 250 dernières années dans la [figure 3](#).

On constate, sur le dernier siècle, une tendance marquée à un réchauffement rapide. Les climatologues estiment qu'une grande part de ce réchauffement s'explique par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et des aérosols dans l'atmosphère liée à l'activité humaine (transport, déforestation...). Or, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre ne fera probablement que s'accroître durant le XXI^e siècle, impliquant une hausse conséquente de la température de l'air.

Ce réchauffement va s'accompagner de multiples modifications : changement de l'humidité de l'air, de la formation des nuages, des précipitations et des rayonnements incidents. Ainsi, l'ensemble des variables climatiques sera affecté.

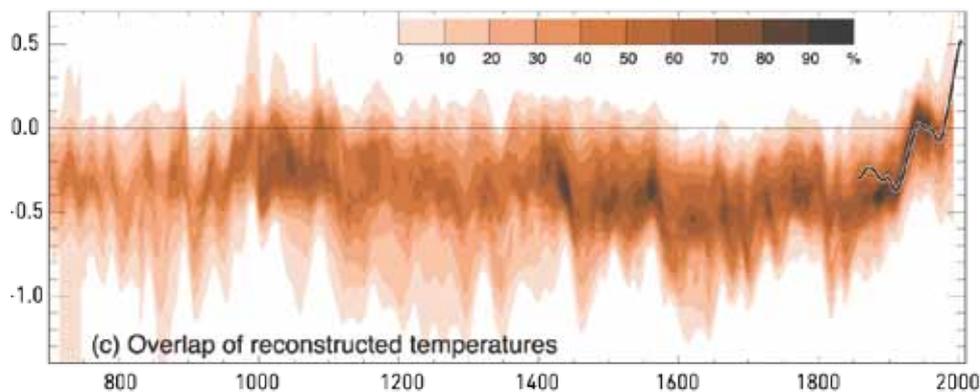


Figure 2 : Évolution de la température de l'air sur les 1 300 dernières années dans l'hémisphère Nord obtenue à partir de plusieurs observations indirectes de la température par rapport à la moyenne sur la période 1961-1990. Source : 4^e rapport du GIEC.

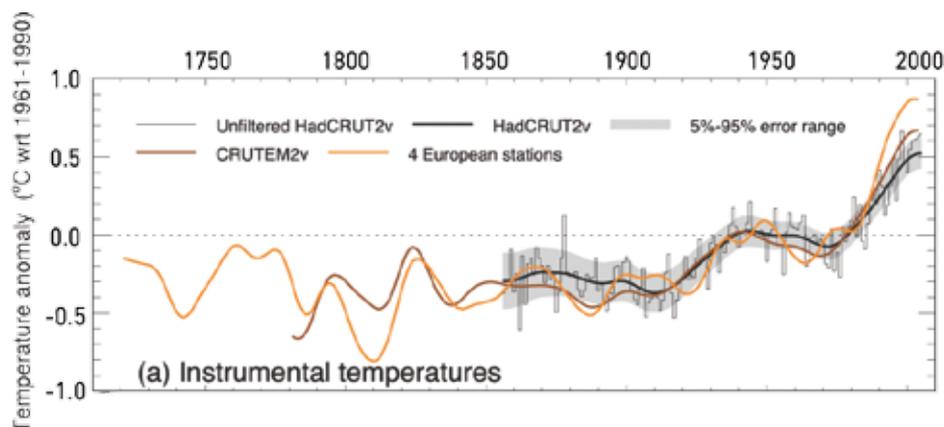


Figure 3 : Détails de la figure précédente sur les 250 dernières années, intégrant en complément différentes estimations basées sur des observations de température. Source : 4^e rapport du GIEC.

C'est donc à cette évolution du climat dans les prochaines décennies que fait référence le terme de « changement climatique ». On parle également de « changement global », certaines actions qui ne sont pas la conséquence

directe du changement climatique ayant elles-mêmes des répercussions sur le climat. Il s'agit notamment des modifications liées à l'occupation des sols : urbanisation, déforestation, agriculture...

La modélisation du climat

Pour modéliser le climat sur de longues périodes, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des processus qui interagissent avec l'atmosphère. Pour cela, les modèles de climat sont en général couplés à un modèle de circulation océanique, à un modèle de glace de mer, à un modèle de chimie atmosphérique... Ainsi, pour la modélisation climatique, on fait appel à un ensemble

de modèles, nommé Modèles de Circulation Générale (MCG, ou GCM en anglais, ou encore AOGCM pour préciser le lien Océan-Atmosphère). Ces types de modèles très complexes prennent en compte un grand nombre de processus et d'interactions. On les appelle communément « modèles du système terrestre » (*Earth system model* en anglais).

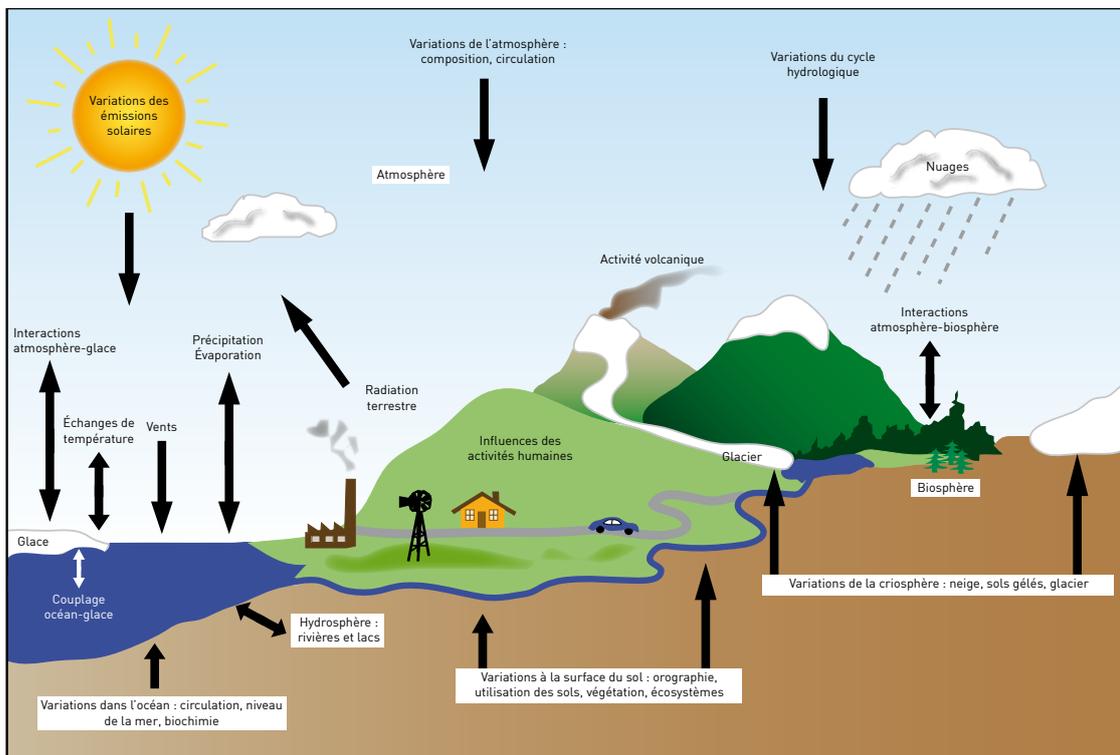


Figure 4 : Représentation des différents compartiments du système climatique et de leurs interactions (Source : 4^e rapport du GIEC).

Les processus qui sont modélisés par les modèles de climat sont représentés figure 4. On voit notamment les liens entre la banquise, l'océan, l'évaporation à la surface des océans (qui est plus importante que sur les continents) et sa condensation dans l'atmosphère qui conduit à la formation des précipitations.

Ces précipitations sont elles-mêmes conditionnées par la chimie atmosphérique et la formation des nuages. Les nuages dépendent et influencent le bilan radiatif reçu par la surface terrestre. Les zones continentales sont marquées par de fortes variabilités de l'occupation des sols (neige, forêt, cultures, villes) qui vont répondre différemment aux forçages

atmosphériques, et ainsi, renvoyer une quantité d'énergie plus ou moins importante vers l'atmosphère. Elles vont aussi répartir les précipitations en une part variable d'évaporation, d'infiltration vers les nappes ou d'écoulement vers les rivières. Les rivières s'écoulent ensuite vers les océans où elles influencent la circulation océanique, qui elle-même interagit sur la banquise et l'atmosphère.

Pour représenter ces processus sur l'ensemble du globe, les modèles découpent celui-ci en éléments (ou mailles). Ce découpage se fait dans les trois dimensions afin de couvrir l'étendue spatiale et l'ensemble des couches atmosphériques (figure 5).

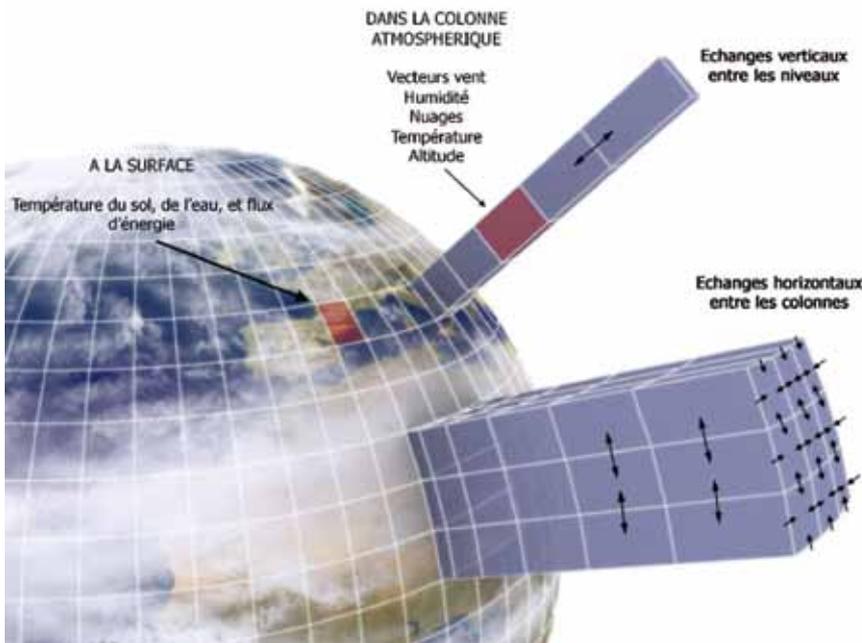


Figure 5 : Principe du découpage en maille utilisé par les modèles atmosphériques. Les mailles recouvrent l'ensemble du globe, avec plusieurs niveaux pour représenter les couches atmosphériques. Les échanges entre les mailles peuvent être latéraux ou verticaux.

L'évaluation des modèles de climat

Ces modèles relativement complexes ont besoin d'être évalués pour que l'on puisse s'assurer de leur pertinence. Pour cela, ils sont utilisés sur des périodes passées, et les variables simulées sont alors comparées aux observations disponibles.

La figure 6 illustre la capacité de ces modèles à reproduire les observations de température depuis 1900. Dans ces simulations, l'évolution observée des concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre est imposée, ainsi que les principales éruptions volcaniques qui génèrent de fortes émissions d'aérosols aux hautes altitudes (ces

éruptions sont marquées par une barre verticale sur la figure. On constate qu'en moyenne (courbe rouge sur la figure 6), les modèles représentent bien l'évolution observée de la température sur le XX^e siècle.

Cependant, on constate que chacune des simulations (en jaune sur la figure 6) peut avoir à certains moments des différences marquées par rapport aux observations. Cela est en partie dû à la forte sensibilité du climat : une petite variation localisée peut générer des fluctuations importantes. On appelle ce comportement « l'effet papillon » ou

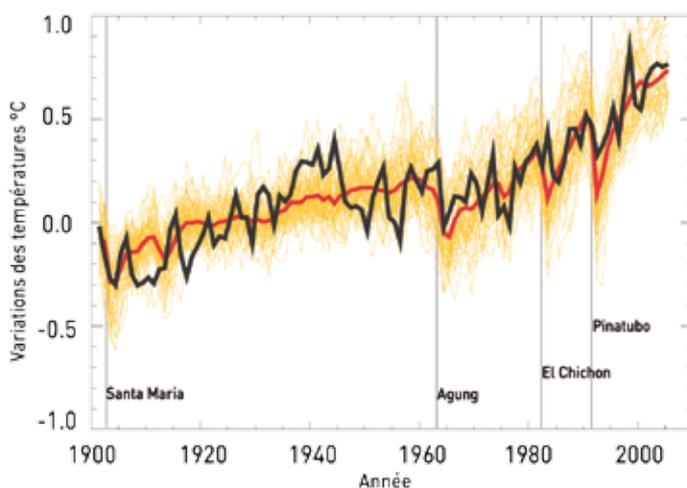


Figure 6 : Variations de la température mondiale moyenne à la surface de la terre par rapport à la période 1901–1950, telles qu'elles ont été observées et telles qu'elles ont été simulées par des modèles climatiques prenant en compte les concentrations en gaz à effet de serre et en aérosols d'origine naturelle et anthropique. Les lignes grises verticales indiquent les dates d'événements volcaniques majeurs, qui en augmentant la quantité d'aérosols dans l'atmosphère ont un impact sur le climat.

« l'effet chaotique ». Cela explique pourquoi les modèles de climat ne peuvent pas réellement simuler les conditions atmosphériques d'une année donnée, mais plutôt les tendances sur des périodes plus longues. Si cela peut sembler contradictoire, il s'agit avant tout d'une question relevant des lois de la statistique.

Reprenant l'exemple cité par le GIEC, ce n'est pas parce qu'on ne sait pas prévoir à quel âge une personne va mourir qu'on ne peut pas estimer l'espérance de vie d'une population. De même, les modèles de climat arrivent à bien reproduire l'augmentation de température observée. Ils permettent également de déterminer la cause de cette augmentation, et de

prouver que ce sont bien les activités humaines qui ont conduit à ce réchauffement.

Ainsi, la [figure 7](#) présente les températures simulées par les modèles de climat lorsqu'ils ne prennent en compte que les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols d'origine naturelle.

On constate dans ce cas des températures simulées relativement stables, contrairement à ce qui était obtenu [figure 6](#). Cela permet d'**attribuer la cause de l'augmentation de la température à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre liés aux activités humaines.**

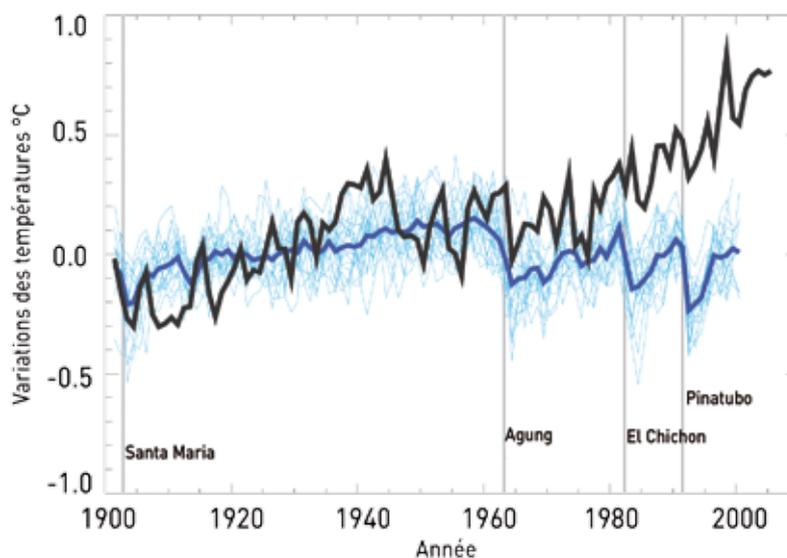


Figure 7 : Variations de la température mondiale moyenne à la surface de la terre sur la période 1901–1950. Par rapport à la figure 6, les variations simulées de la température mondiale moyenne (en bleu) sont basées uniquement sur les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols d'origine naturelle.
Source : 4^e rapport du GIEC.

La comparaison des simulations des modèles avec des observations est plus simple si l'on s'intéresse à des grands domaines (ensemble du globe ou des continents), que lorsqu'on s'intéresse à des régions plus petites. En effet, du fait de leur faible résolution spatiale, les modèles de climat ont du mal à représenter certains effets locaux. La [figure 8](#) présente la façon dont l'Europe est représentée à différentes résolutions spatiales. Les modèles de climat globaux les plus fins ont une résolution spatiale de l'ordre de 100 km, mais, de façon plus courante lors du 4^e exercice du GIEC autour des 300 km.

Dans ces conditions, les reliefs ou la proximité de la mer sont mal perçus par les modèles. Si l'on s'intéresse à la ville de Marseille, influencée à la fois

par la brise de mer et le Mistral qui s'engouffre entre le Massif Central et les Alpes, on comprend que les MCG ont du mal à représenter de façon précise son climat. Dans ce cas, l'origine des erreurs est bien connue et l'on sait que l'on peut mieux résoudre les processus lorsque la résolution spatiale augmente (notamment ceux liés à l'effet du relief). Ces erreurs ne remettent donc pas en question la validité du modèle, elles doivent simplement être corrigées. Les modèles de climat comportent d'autres erreurs systématiques qui sont moins liées aux caractéristiques locales, mais qui peuvent être associées à leur faible résolution spatiale et en particulier à la façon dont les processus sont représentés à ces échelles. La plupart des modèles de climat ont ainsi tendance à simuler de façon trop fréquente de faibles quantités de précipitations.

FAR : Résultats issus du 1^{er} rapport du GIEC
 SAR : Résultats issus du 2^e rapport du GIEC
 TAR : Résultats issus du 3^e rapport du GIEC
 AR4 : Résultats issus du 4^e rapport du GIEC

Le nombre de kilomètres indiqué sur chaque schéma du relief correspond à la résolution.

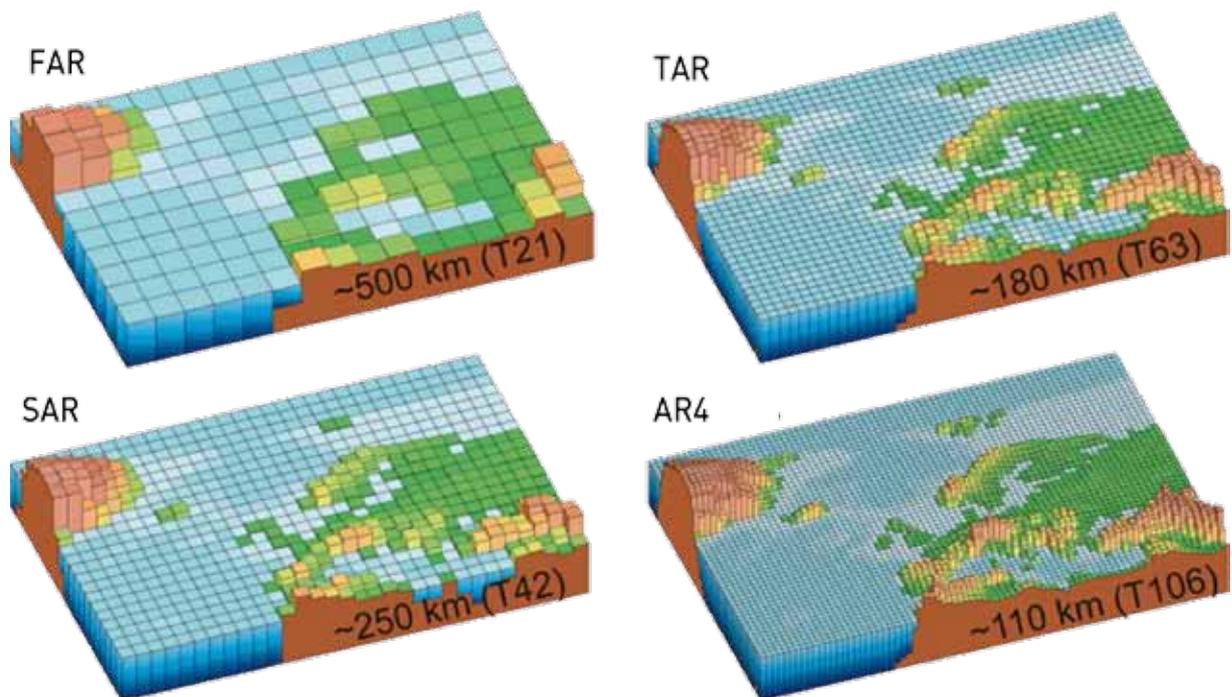


Figure 8 : Relief d'une partie étendue de l'Europe tel qu'il est vu par les modèles de climat pour différentes résolutions spatiales. Les modèles de climat ayant participé au 4^e rapport du GIEC ont des résolutions de l'ordre de 300 km, mais, les plus fins pouvaient avoir une résolution de côté. Source : 4^e rapport du GIEC.

Pour toutes ces raisons, les simulations des modèles de climat ne sont pas utilisées directement pour réaliser des études d'impact du changement climatique sur l'hydrologie. **Elles sont tout d'abord**

traitées, via un procédé nommé régionalisation ou désagrégation, afin de corriger les biais* et d'affiner la résolution spatiale.



LES DÉBATS AUTOUR DE L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

Les débats sur le changement climatique ont été assez médiatisés. Des personnes qui se qualifient de climato-sceptiques ont réfuté l'impact de l'homme sur le climat. Au-delà de l'affichage médiatique, on constate cependant un réel débat scientifique.

Ainsi, parmi les critiques, certains ont contesté le fait que la hausse observée des températures était majoritairement due à l'augmentation des gaz à effet de serre, et ont voulu rejeter la cause sur l'évolution du cycle solaire. Cela a conduit la communauté scientifique à améliorer les méthodes, éclaircir les hypothèses et mieux évaluer les incertitudes. Ainsi, le rôle des cycles solaires sur la température du globe est-il maintenant mieux quantifié.

Cependant, de nombreuses questions restent actuellement posées. Les satellites ont permis par exemple d'observer une augmentation de l'énergie reçue par la terre (différence entre les apports du soleil et les émissions terrestres) cohérente avec l'augmentation de l'effet de serre. Mais, des doutes persistent sur la répartition de ce surplus d'énergie entre différents éléments : fonte des glaces, réchauffement des océans et de l'atmosphère. À ce jour, les observations disponibles ne permettent pas d'être sûr de cette répartition.

De plus, certains processus pourraient intervenir et ralentir l'effet du réchauffement climatique (augmentation des aérosols en haute altitude ou formation de nuages bas ; on parle alors de rétroaction négative) ou au contraire, accélérer ce réchauffement (fonte des sols gelés avec libération de méthane ou libération des gaz stockés au fond des océans ; on parle alors de rétroaction positive).

Cela laisse donc place à de multiples hypothèses, sources d'incertitudes importantes sur les projections climatiques.

La nécessité de recourir aux méthodes de désagrégation

Comme nous l'avons vu, les modèles de climat représentent correctement les tendances observées à l'échelle du globe, mais ont du mal à représenter correctement les caractéristiques régionales. C'est pourquoi lorsque l'on s'intéresse à des domaines réduits comme le bassin versant de la Seine, il est nécessaire d'utiliser une « méthode de désagrégation »,

dont le but est à la fois d'**affiner la représentation des caractéristiques locales** et de **corriger les erreurs des modèles**.

Afin d'illustrer l'importance de ces méthodes, la **figure 9** présente un exemple d'une désagrégation des précipitations annuelles simulées par un modèle de climat.

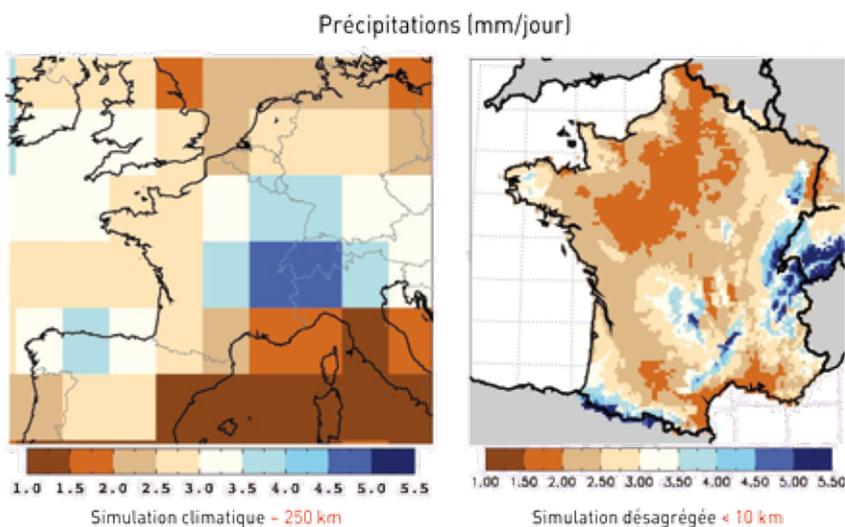


Figure 9 : Illustration de l'impact de la désagrégation. La désagrégation (par la méthode des régimes de temps) permet de retrouver les fortes précipitations sur les zones de relief (Pyrénées, Alpes, Cévennes, Massif Central, Vosges et Jura).

Source : Figure adaptée de Boé, 2007

Les méthodes de désagrégation se répartissent en deux grandes classes : les méthodes dites « dynamiques » font appel à un modèle de climat à échelle plus fine, alors que les méthodes dites « statistiques » reposent sur des liens entre les variables simulées à grande échelle et les variables locales. Ces méthodes statistiques introduisent des hypothèses supplémentaires et peuvent ainsi avoir un impact sur les projections climatiques désagrégées.

Afin d'être capable de quantifier cet impact, trois méthodes statistiques ont été utilisées lors du projet RExHySS :

- Une méthode relativement simple, appelée **méthode des anomalies** qui consiste à prendre en compte les variations moyennes simulées par le modèle de climat ;
- Une méthode plus affinée, prenant en compte les variations de la moyenne mais également de la distribution des variables simulées. Cette méthode est appelée **quantile-quantile** ;
- Une méthode prenant en compte les caractéristiques de grande échelle qui sont bien reproduites par les modèles de climat. Cette méthode est appelée **méthode des régimes de temps**.

Le **tableau 1** présente les avantages et inconvénients des trois méthodes statistiques utilisées. Ce qu'il faut retenir, c'est que les méthodes des régimes de temps et des quantiles-quantiles permettent d'appréhender l'évolution des phénomènes extrêmes dans le futur alors que la méthode des anomalies n'est pas adaptée pour cela.

Dans le cadre du projet RExHySS, un seul modèle a bénéficié d'une désagrégation dynamique : le modèle ARPEGE. Cependant, toutes les projections climatiques ont fait l'objet d'une désagrégation statistique par au moins l'une de ces trois méthodes.

Pour cela, elles s'appuient toutes sur la même analyse atmosphérique temps présent : la base de données SAFRAN de Météo-France, à 8 km de résolution (Quintana Seguí et al., 2007, Vidal et al., 2010). Cette analyse atmosphérique intègre l'ensemble des observations disponibles. Elle présente l'avantage d'avoir une description spatiale et temporelle homogène et continue.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Anomalies ou AN	Simple et mise en œuvre facile et rapide	Hypothèses très fortes et très peu réalistes sur les modifications de variabilité : la variabilité journalière et interannuelle est considérée invariante entre le futur et le passé.
Régime de temps ou RT	Applicable facilement à un grand nombre de projections climatiques Utilisable pour la quantification des incertitudes	Les liens grande échelle – échelle locale sont considérés invariants entre le futur et le passé. Non prise en compte d'événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à ceux de l'archive passée (sauf pour la température).
Dynamique quantile-quantile ou QQ	La plus complète pour la prise en compte des rétroactions et les modifications des extrêmes	Très coûteuse en temps calcul. Les erreurs du modèle pour la correction quantile-quantile sont considérées invariantes entre le futur et le passé.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des méthodes de désagrégation. Source : Terray et al., 2010.

Présentation des différentes méthodes de désagrégation

MÉTHODE DYNAMIQUE

Cette méthode de désagrégation consiste à utiliser un modèle de climat avec une meilleure résolution spatiale. Cela semble logique puisque beaucoup de problèmes sont liés à la faible résolution spatiale des modèles de climat. Cette solution souffre cependant d'un problème pratique important : plus la résolution est fine, plus le temps de calcul et les moyens numériques à mettre en place sont importants.

Afin de réduire ces coûts numériques, une solution couramment adoptée est d'augmenter la résolution spatiale sur le domaine d'intérêt uniquement. On utilise pour cela des modèles de climat régionaux (RCM). Ce système impose l'utilisation d'un modèle global qui fournit les conditions aux limites* (figure 9). Cette méthode est nommée « méthode dynamique », la solution apportée se basant sur la résolution des équations de la dynamique atmosphérique du modèle régional.

Bien que les modèles de climats régionaux permettent une meilleure représentation des caractéristiques régionales, ils ne sont pas parfaits et souffrent également de certains biais. Ainsi, avant d'utiliser les simulations des modèles de climat régionaux pour les études d'impact, ils doivent subir également une correction qui fait alors partie des désagrégations statistiques que nous allons évoquer ci-dessous.

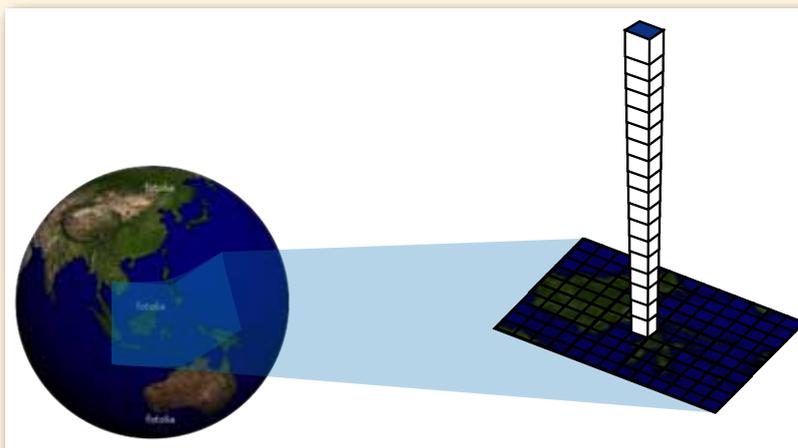


Figure 10 : Principe d'un modèle régional qui utilise les simulations d'un modèle global pour définir les conditions aux limites. Ce modèle simule, sur un domaine limité, l'ensemble des circulations atmosphériques en 3D. Le domaine plus réduit permet de raffiner la résolution spatiale.

Dans le cadre du projet RExHySS, un des modèles de climat utilisé, le modèle ARPEGE fait l'objet d'une désagrégation dynamique. Ce modèle, bien que global, a en effet une résolution variable, affinée sur l'Europe. Ainsi, la résolution en France de ce modèle est de l'ordre de 50 km (figure 11).

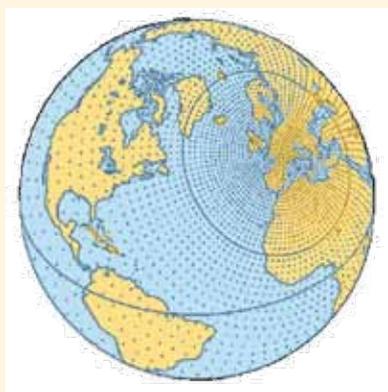


Figure 11 : Maillage irrégulier du modèle ARPEGE. La résolution maximale se situe à proximité de la France.

MÉTHODES STATISTIQUES

Les méthodes statistiques se déroulent en deux phases : une phase d'analyse ou d'apprentissage durant laquelle on va estimer les erreurs du modèle de climat et mettre en place une méthode visant à les corriger, et une phase d'application.

Ainsi, la phase d'apprentissage fait appel à la période de recouvrement entre les simulations climatiques et les observations. On parle alors de « temps présent modèle », afin de préciser qu'il s'agit d'une réalisation d'un modèle de climat sur le temps présent, c'est-à-dire sur le climat présent. La phase d'application peut comporter une période présente et une projection dans le futur.

• Méthode des anomalies

La plus simple des méthodes est la méthode dite des « perturbations » ou des « anomalies ». On considère que les erreurs des modèles de climat sont constantes dans le temps et que celles-ci sont additives ou multiplicatives. Ainsi, pour une variable météorologique comme la température pour laquelle l'erreur est additive, on peut parler par exemple d'une erreur de 1°C, en notant O l'observation atmosphérique et M la simulation du modèle climatique, p et f les indices pour les temps présents et futurs, et ε l'erreur du modèle, on a :

$$M_p = O_p + \varepsilon$$

$$M_f = O_f + \varepsilon$$

On ne connaît pas les observations atmosphériques dans le futur O_f , mais, on essaie de s'en approcher, via la correction de la projection climatique corrigée (M_{f_cor}). Or, on connaît l'analyse atmosphérique du temps présent O_p et les simulations des modèles dans le présent et le futur (M_p et M_f respectivement). On peut donc en déduire le modèle corrigé dans le futur comme étant :

$$M_{f_cor} \approx O_f = M_f - \varepsilon = O_p + (M_f - M_p)$$

Ainsi, l'anomalie (ou la perturbation) est la différence entre les sorties du modèle de climat dans le futur et dans le présent.

Pour certaines variables comme par exemple les précipitations, on considère que l'erreur n'est pas additive, mais, multiplicative (par exemple on considère une erreur de 10%). On a alors :

$$O_f = O_p * M_f / M_p$$

En pratique, cette méthode est appliquée en calculant des anomalies à des pas de temps mensuels. On se rend compte que cette méthode modifie la moyenne des variables atmosphériques temps présent, mais pas leur distribution. La distribution d'une variable correspond à une courbe en fréquence : on associe à une valeur le nombre de fois où celle-ci est atteinte sur la période et on trace le résultat en terme de pourcentage.

La [figure 12](#) présente le principe de cette méthode. En plus de la moyenne représentée par une barre verticale, elle représente l'ensemble de la distribution de la variable, qui correspond à une courbe en cloche. On voit que la distribution n'est pas modifiée : il y a toujours le même intervalle entre les valeurs minimales et maximales. Ainsi, s'il pleut 15 jours par mois en août dans le temps présent, il pleuvra autant de jour dans le futur, même si la quantité de pluie tombée est modifiée.

Cette méthode relativement simple ne permet donc pas de prendre en compte des modifications de la variabilité interannuelle qui sont pourtant simulées par les modèles de climat. C'est pourquoi de nouvelles méthodes ont été développées.

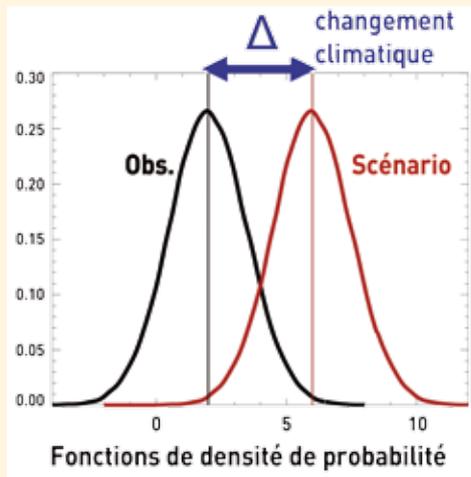


Figure 12 : Principe de la méthode des anomalies. La projection du climat dans le futur conserve la distribution des valeurs observées dans le temps présent, mais reste décalée par une perturbation déduite des simulations climatiques en temps futur et en temps présent. Source : étude de Boé 2007.

- **Méthode quantile-quantile**

Cette méthode est un raffinement de la méthode des anomalies. Mais, plutôt que de corriger la moyenne mensuelle, elle corrige l'ensemble de la distribution. La figure 13 présente le principe de cette méthode. Il y a cinq distributions : les distributions temps présent et futur simulées avant et après correction, et la distribution analysée. Cette dernière se confond avec la distribution temps présent modèle corrigée. On constate sur le temps présent que la distribution simulée par le modèle avant correction est très différente de celle observée : ainsi, l'amplitude de variation (i.e., la différence entre les valeurs minimales et maximales) est plus réduite (la cloche est plus étroite). Ainsi, si l'on s'intéresse aux valeurs extrêmes, par exemple, celles qui ne se produisent que 10 % du temps, voire même 1 % du temps, et qui correspondent aux extrémités de cette cloche, on constate que le modèle avant correction commet des erreurs assez fortes. Le principe de la correction quantile-quantile est de calculer une correction pour chaque pourcentage d'occurrence sur le temps présent.

L'hypothèse qui est ensuite faite pour la correction dans le futur est que la correction des fréquences est constante dans le temps. Ainsi, si l'on fait une erreur de 10 % sur un événement extrême qui apparaît 1 % du temps dans le présent, on suppose que cette erreur de 10 % s'applique à ce même type d'événement extrême dans le futur. Les courbes rouges montrent les distributions dans le futur avant et après correction.

Contrairement à la méthode des anomalies, on voit que les distributions des valeurs dans le présent et dans le futur sont différentes. On a ici une plus grande différence entre les extrêmes dans le futur. En effet, une des conséquences du changement climatique est une augmentation de la variabilité du climat.

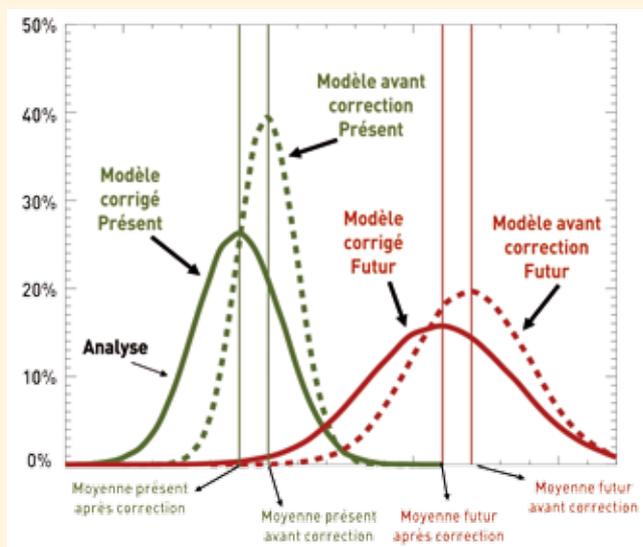


Figure 13 : Principe de la méthode quantile-quantile. On se base sur les distributions observées et simulées en temps présent pour construire une règle de correction. Cette règle est ensuite appliquée sur les simulations climatiques dans le futur pour bâtir une projection futur corrigée.

En pratique, la méthode quantile-quantile que nous avons utilisée a été développée par Déqué (2007). La correction est calculée sur chaque point de mesure, pour chaque variable et pour chaque saison. De plus, dans le cadre du projet RExHySS, les corrections de chaque variable ont été réalisées de façon consistante afin d'éviter des incohérences. Cela permet de s'assurer par exemple que, lorsqu'il pleut, l'humidité de l'air à 2 m est élevée.

• Méthode des régimes de temps

La méthode des régimes de temps (ou méthode des types de temps) repose sur un principe complètement différent des deux premières méthodes de désagrégation. Ici, on ne corrige plus des moyennes ou des distributions, mais, pour chaque journée simulée par le modèle de climat, on effectue une analyse par type de temps, et on recherche un « analogue » correspondant à ce type de temps dans les observations.

Cette méthode repose sur le constat que les modèles de climat reproduisent bien certaines variables à grande échelle, telle que la pression atmosphérique. Or, ces variables à grande échelle sont associées à des caractéristiques locales. La figure 14 présente le cas de deux situations observées avec un anticyclone placé au dessus de l'Irlande dans un cas, et sur le Groenland dans le second cas. Le premier cas est associé à des faibles précipitations dans le nord de la France, alors que le second cas correspond à de fortes précipitations. On voit donc que le champ de pression constitue un « prédicteur de grande échelle » pouvant donner des informations à une échelle plus fine.

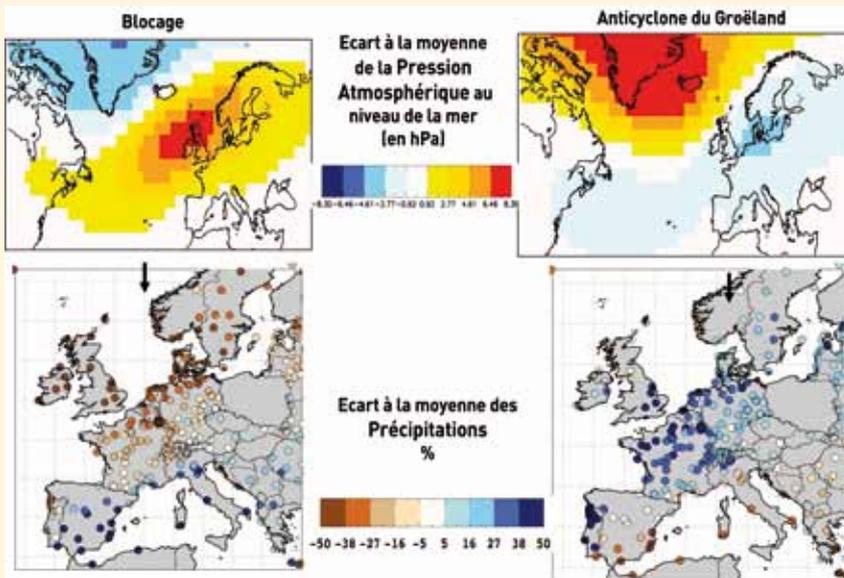
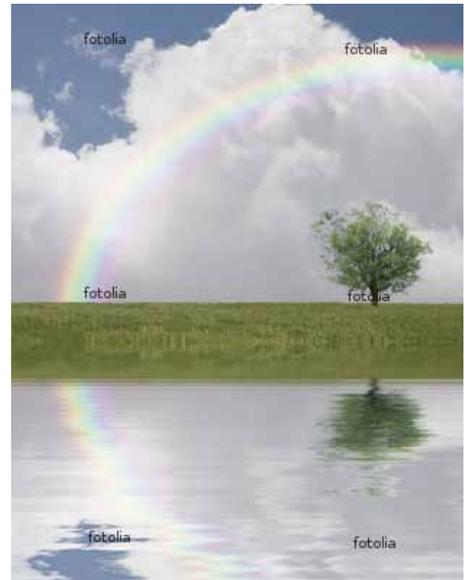


Figure 14 : Illustration du lien entre un « prédicteur » de grande échelle et des caractéristiques locales sur deux situations observées contrastées. En haut, des écarts à la moyenne de la pression atmosphérique au niveau de la mer, présentant un anticyclone situé sur l'Irlande à gauche, et sur le Groenland à droite, et en bas, caractéristique des précipitations associées à ces deux types de temps : à gauche, on constate une tendance à de faibles précipitations sur le nord de la France, alors qu'à droite, les précipitations sont relativement intenses.

Source : études de Boé 2007.

La méthode des régimes de temps que nous avons utilisée a été développée par Boé et al., 2006 (voir également, Boé et al., 2007; 2009, Pagé et al., 2008). Elle repose sur deux prédicteurs à grande échelle : la pression atmosphérique au niveau de la mer et un indice de température. À partir de ces deux prédicteurs issus de la simulation du modèle climatique, on recherche les journées similaires dans les analyses et observations disponibles. Puis, on choisit une journée parmi celles possibles, et on y associe l'analyse atmosphérique régionale disponible. Cela permet de reconstituer l'ensemble des variables atmosphériques, avec une bonne consistance et une évolution spatiale et temporelle réaliste.

En fin de siècle, les températures simulées par les modèles de climat étant beaucoup plus chaudes que celles du temps présent, le nombre de journées « analogues » disponibles en temps présent diminue fortement. C'est pourquoi un incrément de température peut être alors ajouté, en prenant soin de corriger de façon cohérente l'humidité spécifique, la partition entre les précipitations liquides et solides et le rayonnement infrarouge incident.



Les projections climatiques

Plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont disponibles, comme le choix des modèles climatiques globaux et les méthodes de désagrégation. Pour étudier les projections climatiques à l'échelle du bassin de la Seine, les scientifiques ne pouvaient pas traiter l'ensemble des simulations. Le point clé de l'étude était donc de sélectionner des projections représentatives des incertitudes.



De multiples scénarios d'émission de gaz à effet de serre

Les modèles de climat utilisent différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols, pour réaliser des projections sur l'évolution du climat jusqu'à 2100. Les experts du GIEC en ont sélectionné plusieurs afin de garantir une base de travail commune et représentative. Ces scénarios prennent en compte des facteurs sociétaux, démographiques et économiques. Le rapport spécial du GIEC a sélectionné différents scénarios, (nommés scénarios SRES pour *Special Report on Emission Scenario*) qui se divisent en quatre groupes :

- Les scénarios A1 pour lesquels la croissance économique mondiale augmente très rapidement et tend à lisser les inégalités actuelles, tandis que la population mondiale atteint son maximum autour de 2050, puis décroît. Parmi ces scénarios, on distingue trois cas en fonction de l'évolution des technologies utilisées :

- A1FI se base sur une technologie utilisant beaucoup de combustibles fossiles ;
- A1T se base sur des sources d'énergie autres que fossiles ;
- A1B se base sur un équilibre entre les sources d'énergie ;

- Le scénario A2 pour lequel le développement économique reste régional et très inégal, tandis que la population mondiale continue de croître dans certaines régions ;

- Le scénario B1 pour lequel la croissance économique est élevée et homogène, mais s'accompagne de mesures fortes à l'échelle globale pour réduire l'impact de l'activité humaine sur la consommation énergétique et sur l'environnement. L'évolution de la démographie est similaire à celle de la famille A1 ;

- Le scénario B2 pour lequel la croissance économique est toujours très hétérogène, mais s'accompagne d'initiatives locales pour préserver l'environnement. La croissance démographique se poursuit mais de manière moins marquée que dans le scénario A2.

Les émissions de gaz à effet de serre de ces différents scénarios sont présentées figure 15. Cette figure inclut les amplitudes des émissions obtenues par des scénarios postérieurs au SRES. Tous les scénarios tendent vers une augmentation des émissions au début

du siècle. Puis, selon les comportements humains ils conduisent soit à une diminution des émissions en fin de siècle (exemple du scénario A1B en vert), soit à une progression relativement constante de ces émissions (scénario A2 en rouge). Dans tous les cas, ces émissions contribuent à alimenter un stock de CO₂ et des autres gaz à effet de serre dont la quantité totale dans l'atmosphère continue d'augmenter même lorsque les émissions diminuent.

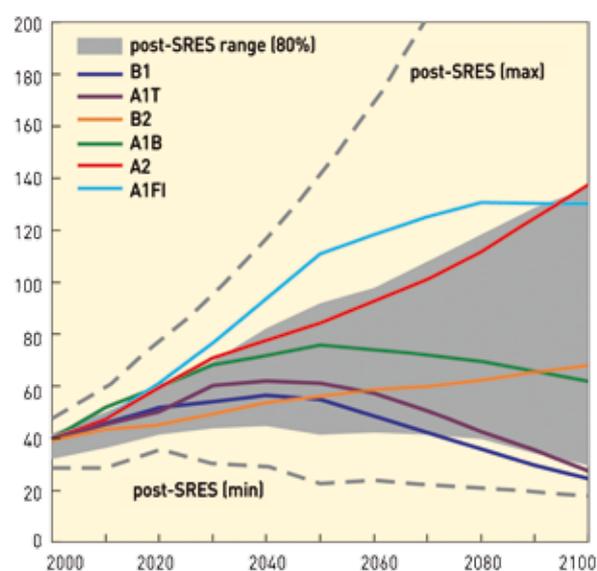


Figure 15 : Émissions mondiales de GES (en gigatonnes équivalent CO₂ par an) en l'absence de politiques climatiques additionnelles.

Six scénarios de référence (SRES, lignes colorées) et l'intervalle des scénarios (post-SRES, partie ombrée) sont représentés. Les courbes en pointillés délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les gaz à effet de serre pris en compte sont le CO₂, le CH₄, le N₂O et les gaz fluorés. Source : 4^e rapport du GIEC.

Ainsi, un modèle de climat donné va pouvoir simuler plusieurs projections climatiques en utilisant plusieurs scénarios d'émission différents.

Dans le cadre du projet RExHySS, nous avons choisi d'utiliser deux scénarios d'émission assez contrastés et cependant réalistes : le scénario A1B, qui prévoit une réduction des émissions à partir de 2050, et le scénario A2 qui prévoit une augmentation régulière des émissions tout au long du XXI^e siècle.

Les projections climatiques issues du 4^e exercice du GIEC

Les modèles de climat ne réagissent pas de la même façon à l'augmentation des gaz à effet de serre. Or, il est impossible de savoir quelle projection est plus réaliste qu'une autre. Cela constitue une incertitude qu'il faut prendre en compte en utilisant plusieurs modèles de climat, ce qui est réalisé grâce aux exercices CMIP (voir En savoir plus, page 9).

Dans ce fascicule, nous nous sommes intéressés principalement aux résultats de simulations climatiques réalisées lors du 3^e exercice d'intercomparaison des modèles de climat (CMIP3) analysées dans le 4^e rapport du GIEC. Les projections climatiques à l'échelle du continent européen ont été analysées tout d'abord à l'échelle des modèles de climat, sans désagrégation. La [figure 13](#) présente les changements de précipitations pour le milieu du XXI^e siècle tels que simulés par une vingtaine de modèles de climat sous scénario SRES A1B. En hiver, les projections montrent une diminution des précipitations au sud de l'Europe et une augmentation sur le nord de l'Europe.

Sur les 3/4 de la France, le signe du changement en hiver n'est pas cohérent entre les modèles, ce qui signifie qu'il pourrait y avoir une diminution ou une augmentation modérée des précipitations en hiver. En été, les précipitations continentales diminuent sur une grande partie de l'Europe, sauf les régions les plus au nord. La zone de transition marquée par l'incohérence de signe sur la réponse se déplace du sud vers le nord entre l'hiver et l'été. On note une forte cohérence de signe sur une grande partie sud et ouest de la France entre les différents modèles. La dispersion est inférieure à l'amplitude du signal, ce qui suggère que la réduction des précipitations estivales est un signal robuste.

Ces projections climatiques brutes sont cependant biaisées, et un travail de désagrégation et débiaisage a été conduit afin d'affiner ces projections sur le bassin de la Seine et d'en estimer l'impact sur la ressource en eau.

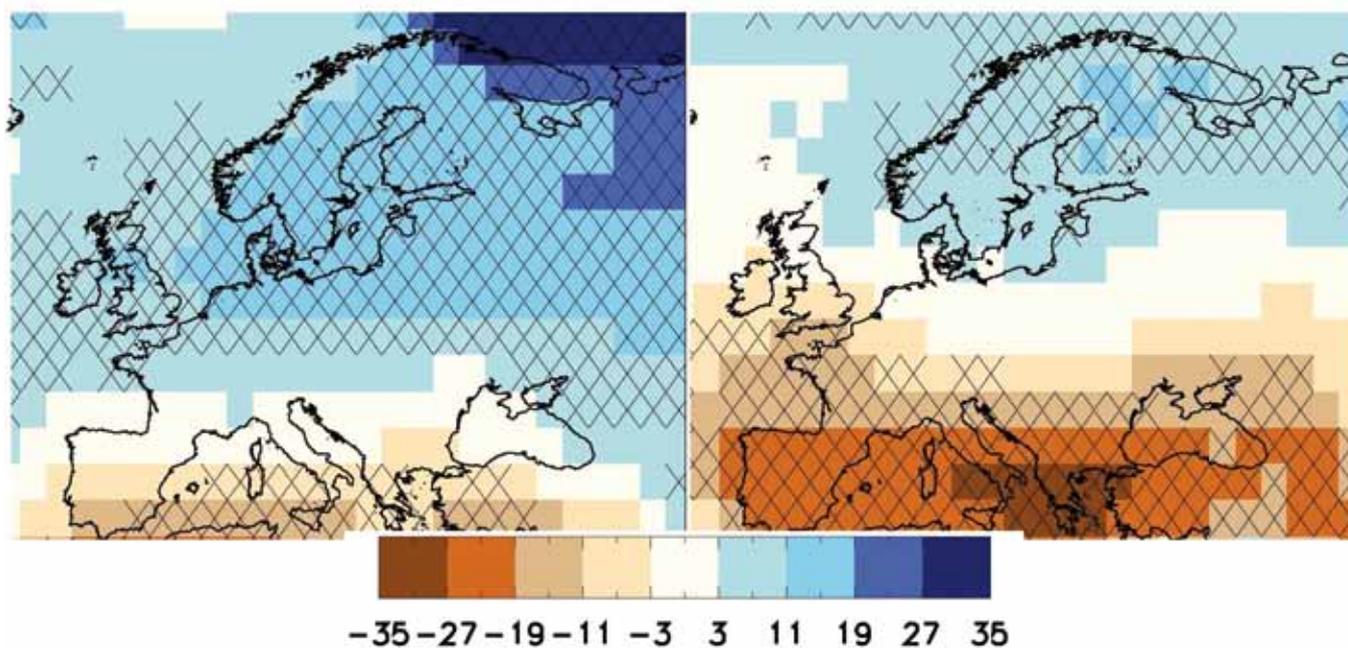


Figure 16 : Changement relatif par rapport à la période 1971-2000 des précipitations hivernales (à gauche) et estivales (à droite), simulé par plusieurs modèles du 4^e rapport du GIEC pour la période 2046-2065 et le scénario SRES A1B. Les croix indiquent les zones où au moins 85 % des réponses des différents modèles sont en accord. Source : étude de Boé, 2007.

Les projections climatiques désagrégées utilisées sur le bassin de la Seine

Dans le cadre du projet RExHySS, nous n'avons pas traité l'ensemble des simulations réalisées dans le cadre du 4^e exercice du GIEC. Sept modèles de climat ont été sélectionnés et désagrégés par au moins l'une des trois méthodes présentées précédemment. La [figure 17](#) résume la méthodologie suivie, le [tableau 2](#) rappelant l'ensemble des simulations disponibles.

Ces simulations débutent en général dans le proche passé pour se terminer à la fin du siècle. Ainsi, les projections du GIEC que nous avons utilisées recouvrent la période 1950-2100. Cependant, seule une partie de ces simulations est disponible. C'est pourquoi nous nous sommes focalisés sur deux périodes d'intérêt : l'horizon 2050 (ou milieu de siècle) et l'horizon 2100 (ou fin de siècle). Les périodes temps présent, milieu du siècle et fin de siècle sur lesquelles les simulations climatiques sont disponibles sont indiquées dans le [tableau 2](#).

Seul le scénario A2 du modèle ARPEGE de Météo-France, dénommé ARPV4, a pu être traité par les trois méthodes de désagrégation.

La simulation ARPEGE sous scénario SRES A1B réalisée par Météo-France est la seule qui soit disponible sur l'ensemble de la période 1950-2100. Cette simulation, qui

bénéficie déjà d'une désagrégation dynamique du fait de sa grille à résolution variable, a de plus été désagrégée par la méthode des régimes de temps (ARP_CONT). Bien que cette simulation ne soit pas plus représentative qu'une autre, nous l'utilisons par la suite pour illustrer certaines évolutions.

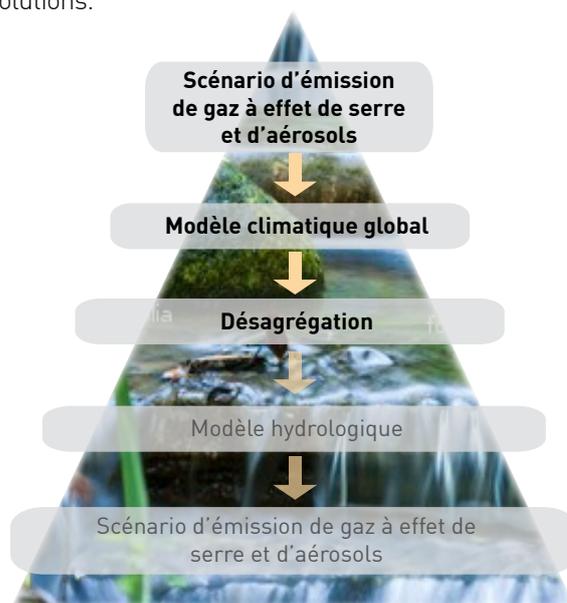


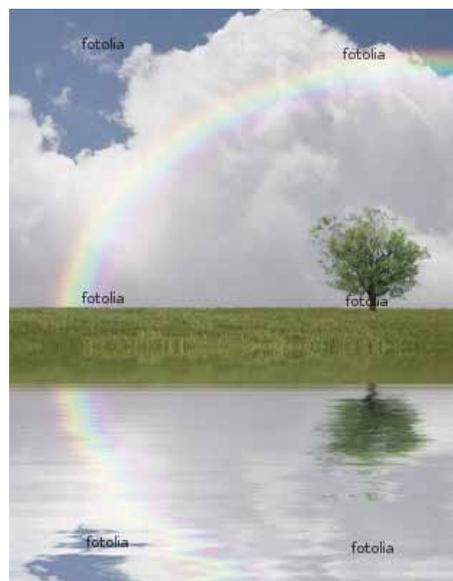
Figure 17 : Situation par rapport à la méthodologie générale. Les éléments en gras sont impliqués dans ce chapitre.

Modèles de climat	Acronyme	SRES	DESAG	PST	MS	FS
ARPV4	A1	A1B	ANOM	ND	ND	2071-2100
ARPV4	A2	A2	ANOM	ND	ND	2071-2100
ARPV4	RD1	A1B	QQ	1950-2010	ND	2071-2100
ARPV4	RD2	A2	QQ	1950-2010	ND	2071-2100
ARP_CONT	RC1	A1B	RT	1950-2000	2000-2070	2071-2100
ARPV4	RC2	A2	RT	1950-2000	ND	2070-2100
GFDL_CM2_0	G0	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
GFDL_CM2_1	G1	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
MPI_ECHAM5	EC	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
MRI_CGCM2_3_2A	MR	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
GISS_MODEL_E_R	GM	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
CCCMA_GCGM3_1	CC	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100

Tableau 2 : Présentation des scénarios disponibles.

SRES indique le scénario d'émission des gaz à effet de serre ; DESAG le nom de la méthode de désagrégation (ANOM = anomalie ; QQ = Quantile-Quantile ; RT = Régime de temps). PST MS et FS indiquent respectivement les périodes disponibles pour le temps présent, le milieu de siècle et la fin de siècle. Chaque scénario est représenté par un acronyme (en gras, après le nom des modèles).

Le climat du bassin de la Seine et ses évolutions



En premier lieu, l'étude porte sur les caractéristiques climatiques actuelles du bassin de la Seine et la façon dont les modèles de climat désagrégés arrivent à reproduire ces caractéristiques. Il s'agit ensuite, à partir de ces observations, de suivre les évolutions du climat projetées par ces modèles désagrégés aux horizons 2050 et 2100.



Les caractéristiques climatiques en temps présent du bassin de la Seine

Nous nous intéressons à trois variables caractéristiques : la température de l'air, les précipitations (P), et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'ETP est une variable très utilisée par les hydrologues et agronomes car elle représente la demande évaporative de l'atmosphère, et plus exactement, le flux d'évaporation que pourrait avoir un couvert de gazon bien alimenté en eau. Cette variable est donc généralement supérieure à l'évapotranspiration réelle, c'est-à-dire au flux d'évapotranspiration réellement observé, qui est estimé par les modèles hydrologiques via la résolution du bilan hydrique. L'ETP n'est pas mesurée directement : elle est recalculée à partir d'autres variables physiques comme le rayonnement solaire, la température, la vitesse du vent et l'humidité.

Les caractéristiques du bassin sont analysées à partir des observations issues de la base de données SAFRAN de Météo-France sur la période 1971-2000. Les précipitations sont assez faibles au centre du bassin (moins de 650 mm/an) et relativement importantes sur la bordure est (plus de 1000 mm/an). L'évapotranspiration potentielle indique que la demande évaporative de l'atmosphère est supérieure aux précipitations sur une grande partie du bassin, le rapport précipitation sur ETP étant inférieur à 1 (figure 18). On observe aussi que la température est plus importante sur Paris, du fait de l'îlot de chaleur urbain.

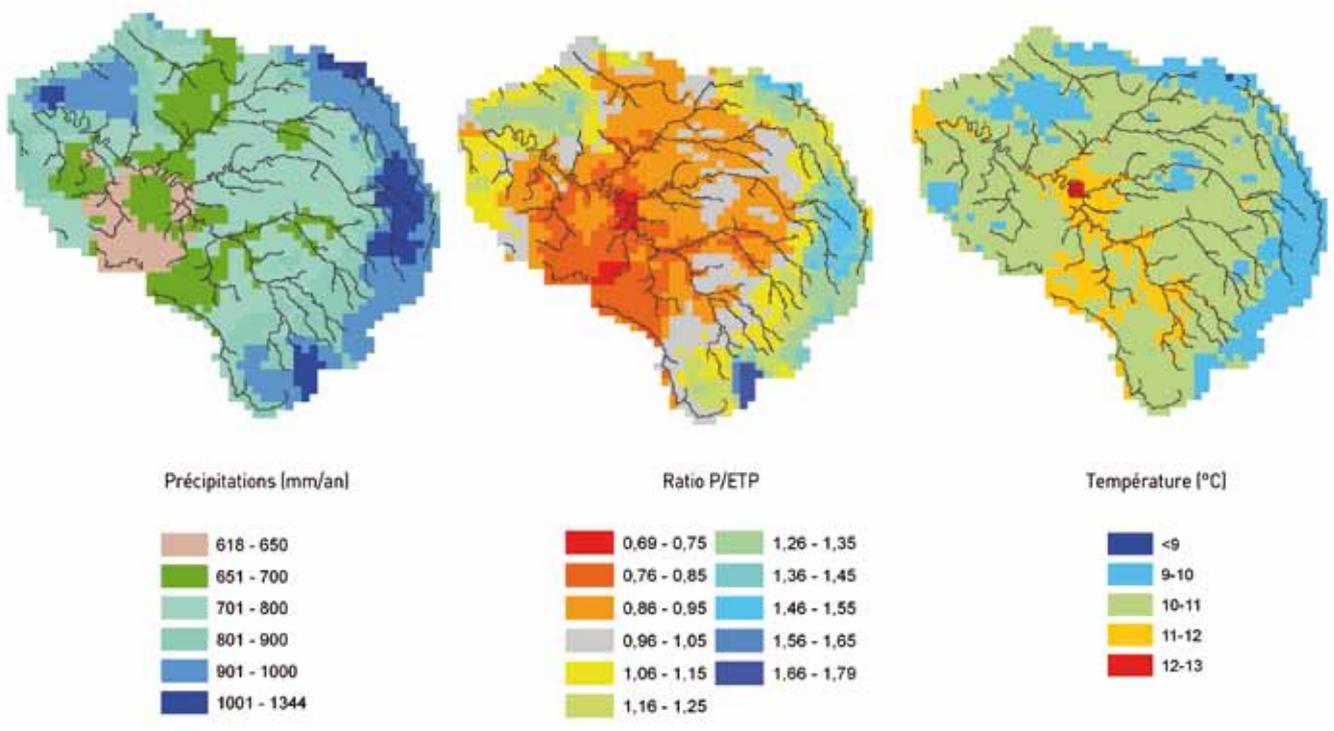


Figure 18 : Caractéristiques climatiques du bassin versant de la Seine issues de SAFRAN sur la période 1971-2000. Moyenne annuelle des précipitations, du ratio précipitations sur évapotranspiration réelle, et de la température de l'air

Évaluation des simulations climatiques désagrégées

Une première évaluation consiste à vérifier que les simulations climatiques désagrégées sur le temps présent se comparent favorablement aux observations. Ainsi, la *figure 19* présente la comparaison des évolutions lissées des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle entre les observations (analyse SAFRAN) et le scénario climatique ARPEGE A1B continu désagrégé par la méthode des régimes de temps. Ainsi que nous l'avons précisé au chapitre précédent, on ne doit pas s'attendre à ce que le modèle de climat reproduise les événements observés une année donnée. Par contre, il doit être capable de reproduire l'amplitude de variation ainsi que les tendances. Or, on constate une bonne adéquation entre les variations des

précipitations observées et celles modélisées après désagrégation. L'évolution de l'évapotranspiration potentielle varie cependant de façon plus lente dans le modèle désagrégé que dans les observations.

En moyenne, les modèles de climat désagrégés sont capables de bien représenter les caractéristiques du bassin de la Seine (*tableau 3*). Nous avons vérifié également que la dynamique des événements est bien reproduite, avec en particulier, une bonne représentation de la durée des épisodes précipitants, et une bonne reproduction de la répartition de l'intensité des précipitations entre les épisodes de fortes pluies et de faibles pluies.

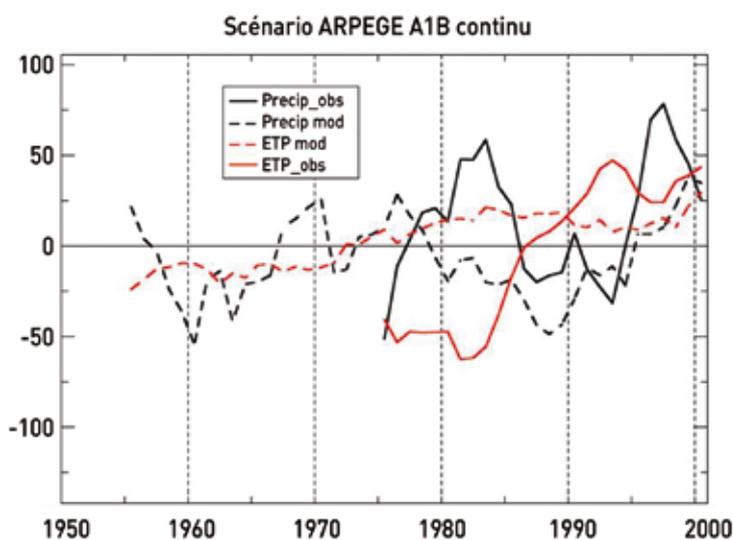


Figure 19 : Évolution des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle moyennée par rapport à la moyenne de la période 1970-2000. Les courbes continues correspondent aux observations, alors que les courbes en pointillés correspondent aux scénarios ARPEGE A1B continu désagrégé par la méthode des régimes de temps.

Analyse ou modèle de climat	Acronyme	P mm/j	ETP mm/j	T °C
SAFRAN		2,14	2,18	10,05
ARPV4	A1	ND	ND	ND
ARPV4	A2	ND	ND	ND
ARPV4	RD1	2,2	NC	NC
ARPV4	RD2	2,2	2,08	10,02
ARP_CONT	RC1	2,03	2,18	10,35
ARPV4	RC2	2,14	2,2	10,31
GFDL_CM2_0	G0	2,18	2,19	10,35
GFDL_CM2_1	G1	2,07	2,17	10,15
MPI_ECHAM5	EC	2,16	2,18	10,25
MRI_CGCM2_3_2A	MR	2,17	2,18	10,35
GISS_MODEL_E_R	GM	2,09	2,20	10,35
CCCMA_GCGM3_1	CC	2,17	2,19	10,25

Tableau 3 : Moyennes journalières des précipitations, évapotranspiration potentielle et température sur le bassin de la Seine à partir des données SAFRAN et obtenues par les scénarios climatiques désagrégés sur le temps présent.

Évolutions possibles du climat

La figure 20 résume les évolutions des précipitations, ETP et température estimée par les douze scénarios climatiques désagrégés en moyenne sur l'ensemble du bassin versant de la Seine. Ces évolutions par rapport au temps présent sont présentées par saison et en moyenne annuelle sur les deux périodes étudiées.

Tous les scénarios projettent une augmentation de la température de 1,5 à 3 °C à l'horizon 2050 et de 2 à 4,5°C à l'horizon 2100. Cela s'accompagne d'une augmentation

de l'ETP de 10 à 25 % à l'horizon 2050 et de 15 à 35 % à l'horizon 2100. En terme de précipitations, les résultats sont plus dispersés. Tous les scénarios s'accordent sur une diminution des précipitations en été et en automne. Cependant, les résultats sont contrastés en hiver et au printemps, saisons pour lesquelles une partie des scénarios indique une augmentation des précipitations, alors que l'autre indique une diminution. En terme de cumul annuel, cela conduit à une évolution des précipitations allant de +0,4 % à -14 % à l'horizon 2050 et de +4 % à -24 % à l'horizon 2100.

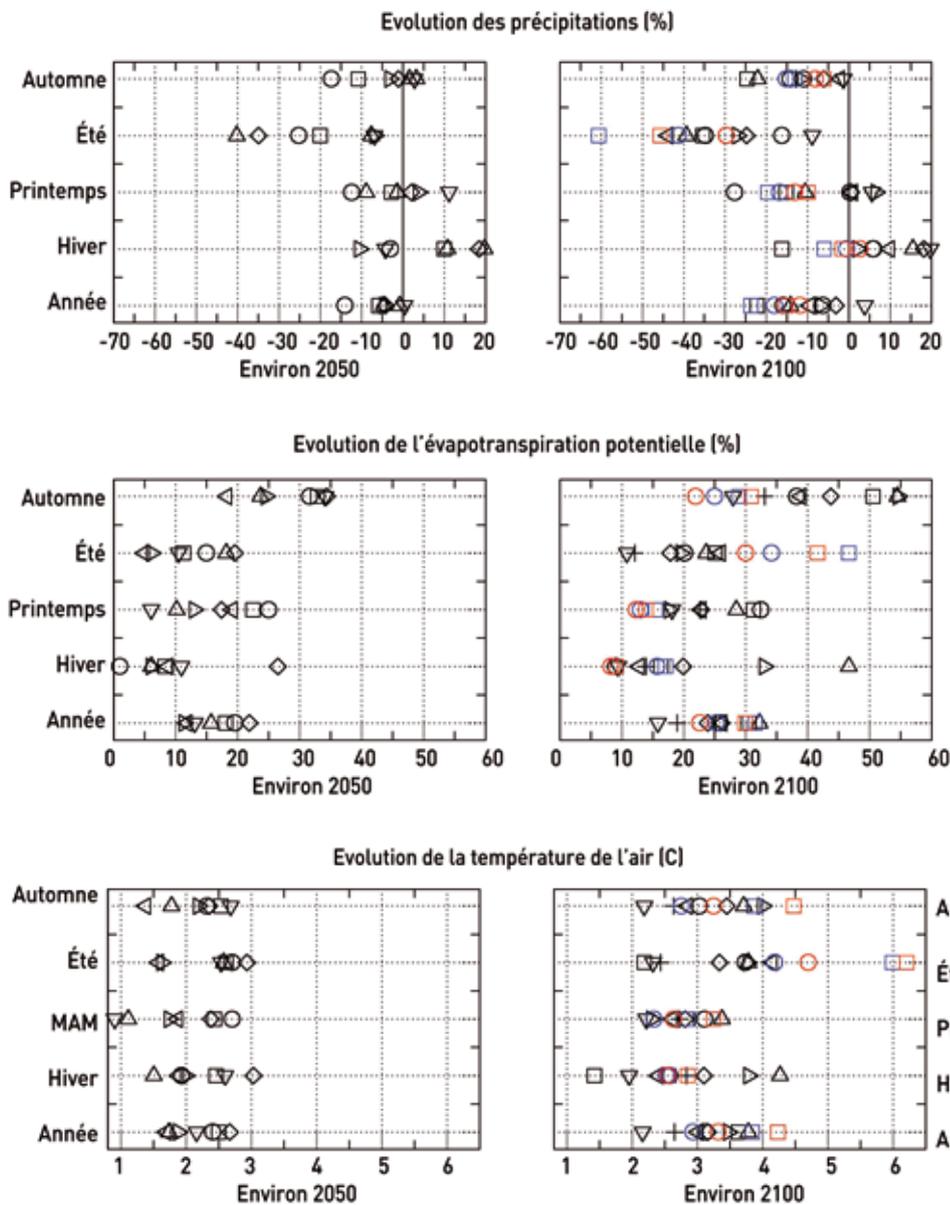


Figure 20 : Les figures présentent l'évolution des précipitations, des ETP et des températures à l'horizon 2050 et 2100.

Chaque symbole correspond à un modèle de climat désagrégé différent selon trois méthodes (régimes de temps, quantile-quantile, anomalies).

Afin d'illustrer cette tendance, la [figure 21](#) présente l'évolution sur la période 1950-2100 de la moyenne sur le bassin versant de la Seine des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle (ETP) simulées par le modèle ARPEGE sous scénario d'émission A1B et désagrégées par la méthode des régimes de temps.

On constate que l'augmentation de l'ETP est assez régulière sur la période et que la diminution des précipitations est plus irrégulière et s'accompagne toujours de fortes variations interannuelles (courbe en pointillés).

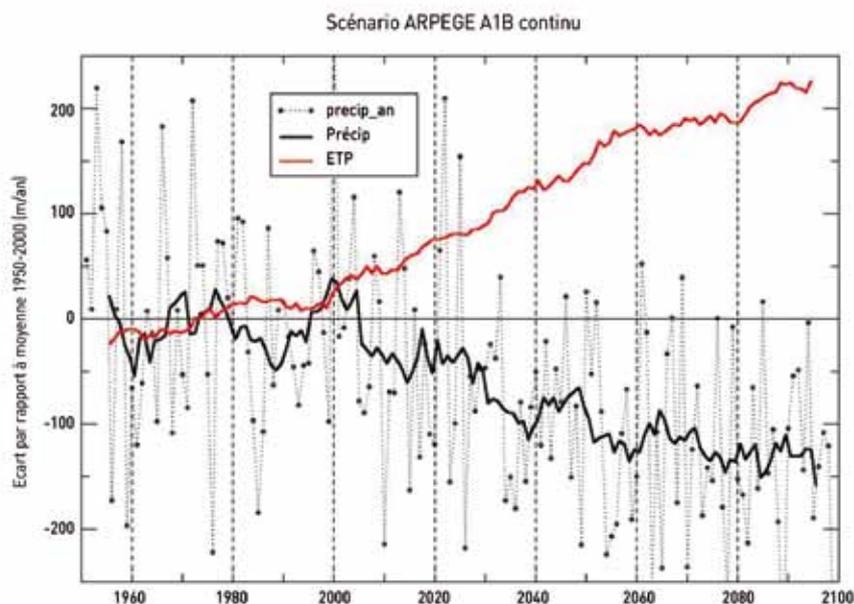


Figure 21 : Évolution des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle au cours du XXI^e siècle projetée par le modèle ARPEGE sous scénario SRES A1B, désagrégé par la méthode des régimes de temps. Les courbes présentent un lissage sur dix ans, alors que la courbe en pointillés montre la variabilité annuelle des précipitations.

La [figure 22](#) présente les cartes des impacts du changement climatique moyennés sur les sept scénarios désagrégés par la méthode des régimes de temps sur les deux périodes.

On constate que la diminution des précipitations atteint -7 à -10 % au nord du bassin en 2050 et qu'elle dépasse -10 % sur l'ensemble des pourtours

du bassin à l'horizon 2100. Or, ce sont les régions où les cumuls de précipitations sont les plus importants en temps présent ([figure 18](#)).

L'impact sur l'ETP est aussi plus homogène spatialement, avec cependant une augmentation plus marquée sur la bordure sud-est du bassin.

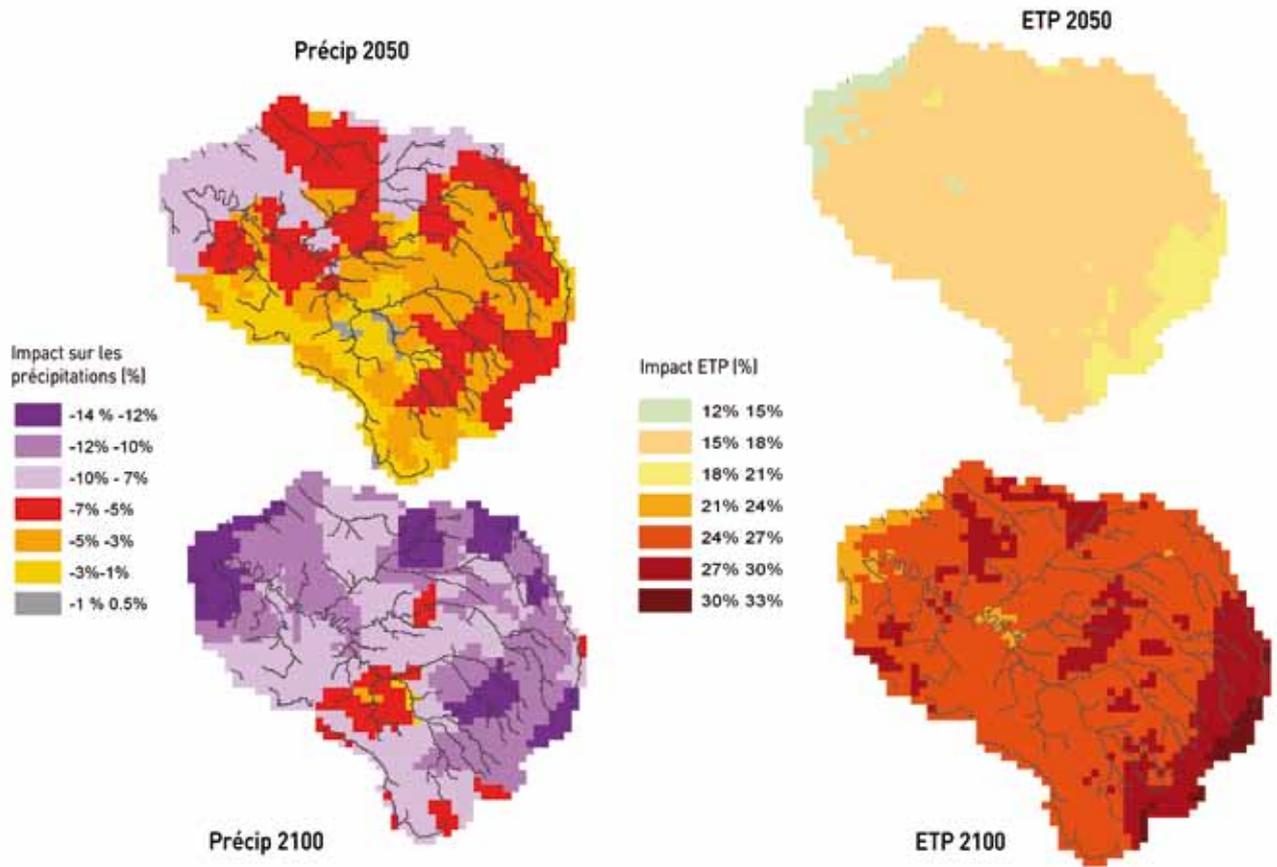


Figure 22 : Moyenne des évolutions par rapport au temps présent des précipitations et de l'ETP à l'horizon 2050 et 2100, estimée par les modèles de climat sous scénario A1B désagrégés par la méthode des régimes de temps.



L'impact sur l'hydrologie du bassin de la Seine



Pour étudier l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, les chercheurs ont appliqué les projections climatiques présentées dans les chapitres précédents. Ces projections n'étant pas disponibles en continu, les simulations sont faites sur trois périodes d'intérêt : temps présent, milieu de siècle et fin de siècle.



Les modélisations hydrologiques du bassin de la Seine

Le bassin versant de la Seine est caractérisé par la présence d'aquifères étendus et de trois principaux affluents : la Marne, l'Oise et l'Yonne.

Différents types de modèles hydrologiques ont été appliqués sur ce bassin. Parmi eux, les modèles à base physique représentent le fonctionnement du bassin versant. Ils décrivent en particulier les différents processus conduisant à la partition des précipitations en évaporation, ruissellement, et recharge de la nappe et des sols. Ils traitent aussi les processus impliqués dans les transferts : écoulement en nappe et en rivière, échanges nappe - rivière...

D'autres modèles qualifiés de conceptuels mettent en jeu une stratégie différente. Ils utilisent une approche simplifiée, avec un minimum de paramètres, et tentent de reproduire fidèlement les observations sans

représenter pour autant les processus. Ils se basent pour cela sur une période de calibration qui permet d'estimer tous les paramètres du modèle.

Ces modèles hydrologiques fonctionnent donc de façon très différente : ils simulent soit les débits, soit les débits et les aquifères en même temps, en décrivant l'espace de façon agrégée par sous bassin ou de façon régulière avec un maillage.

Pour étudier l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, nous avons pris en compte l'incertitude associée à la modélisation hydrologique. Tous ces modèles ont déjà été appliqués sur le bassin de la Seine. Ils se comparent de façon satisfaisante aux observations de débits. Les caractéristiques de ces modèles hydrologiques sont indiquées dans le [tableau 4](#).

Modèles	Type	Débits/piézométrie	Bilans	Références
CLSM	Hydrométéorologie	1 débit par sous bassin	Eau + Energie	Ducharme et al., 2007
EROS	Conceptuel	1 débit et 1 niveau piézométrique par sous bassin	Eau	Thiéry et al., 1995
GR4J	Conceptuel	1 débit par bassin	Eau	Perrin et al., 2003
MODCOU	Hydrogéologique	Débits et piézométrie en chaque point demandé	Eau	Ledoux et al., 2007
SIM	Hydrométéorologique	Débits et piézométrie en chaque point demandé	Eau + Energie	Habets et al., 2008

Tableau 4 : Résumé et caractéristiques des modèles dans le bassin de la Seine.

Réalisation des études d'impact sur l'hydrologie

Les études d'impact du changement climatique sur l'hydrologie sont réalisées en imposant dans les modèles hydrologiques les projections climatiques (figure 23).

Lorsque les projections sont disponibles de façon continue, les modèles effectuent une simulation sur la période 1950-2100. Cependant, la plupart des projections climatiques ne sont pas disponibles en continu, mais plutôt sur trois périodes d'intérêt : temps présent, milieu de siècle et fin de siècle. Dans ce cas, chaque modèle hydrologique effectue une simulation sur chacune des trois périodes.

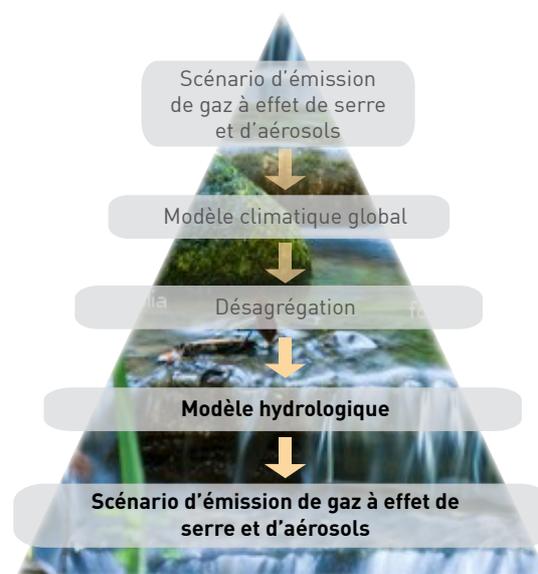


Figure 23 : Situation par rapport à la méthodologie générale.

Par la suite, le terme simulation fera référence aux résultats d'un modèle hydrologique forcé par les projections d'un modèle de climat sous scénario d'émission de gaz à effet de serre et désagrégé sur les périodes disponibles.

Toutes ces simulations sont réalisées en supposant qu'il n'y a pas de modifications de l'occupation du sol, c'est-à-dire avec des évolutions de l'extension des zones urbaines et des pratiques agricoles actuelles identiques dans le futur. On suppose également qu'il n'y a pas de modifications de l'extension et de la gestion des ouvrages, en particulier pour la capacité de stockage des barrages.

L'impact du changement climatique sur le bilan hydrique

On s'intéresse tout d'abord à l'évolution du bilan hydrique sous changement climatique, c'est-à-dire à l'évolution de la partition des précipitations en évaporation et en écoulement, entre le futur et le temps présent.

Les résultats pour chaque simulation en terme d'impact entre les périodes futures et le temps présent sont présentées figure 24. Les projections

des modèles de climat désagrégés sont identifiées par un symbole et les modèles hydrologiques par une couleur. On retrouve sur l'axe des abscisses la dispersion des précipitations que l'on avait étudié figure 20, amplifiée légèrement par le fait que la moyenne des précipitations n'est pas calculée sur le même domaine pour tous les modèles hydrologiques, du fait qu'ils n'ont pas la même extension spatiale selon qu'ils considèrent explicitement ou non la présence des aquifères.

On constate une assez forte dispersion sur la partition de ces précipitations en évaporation (de +15 à -20 %) et en écoulement (de +5 à -80 %). Cependant, on distingue certaines particularités pour l'horizon 2050 (période 2045-2065) : la diminution des précipitations se traduit par une diminution plus marquée des débits que de l'évaporation (les symboles sont situés en dessous de la droite 1 : 1 tracée en gras). Le modèle CLSM se distingue pour chaque projection climatique : l'évaporation augmente dans le futur par rapport au temps présent, alors que pour les autres modèles hydrologiques, cela n'est vrai que pour certaines projections climatiques.

D'autre part, les résultats obtenus en fin de siècle accentuent les résultats obtenus en milieu de siècle, avec une dispersion plus forte.

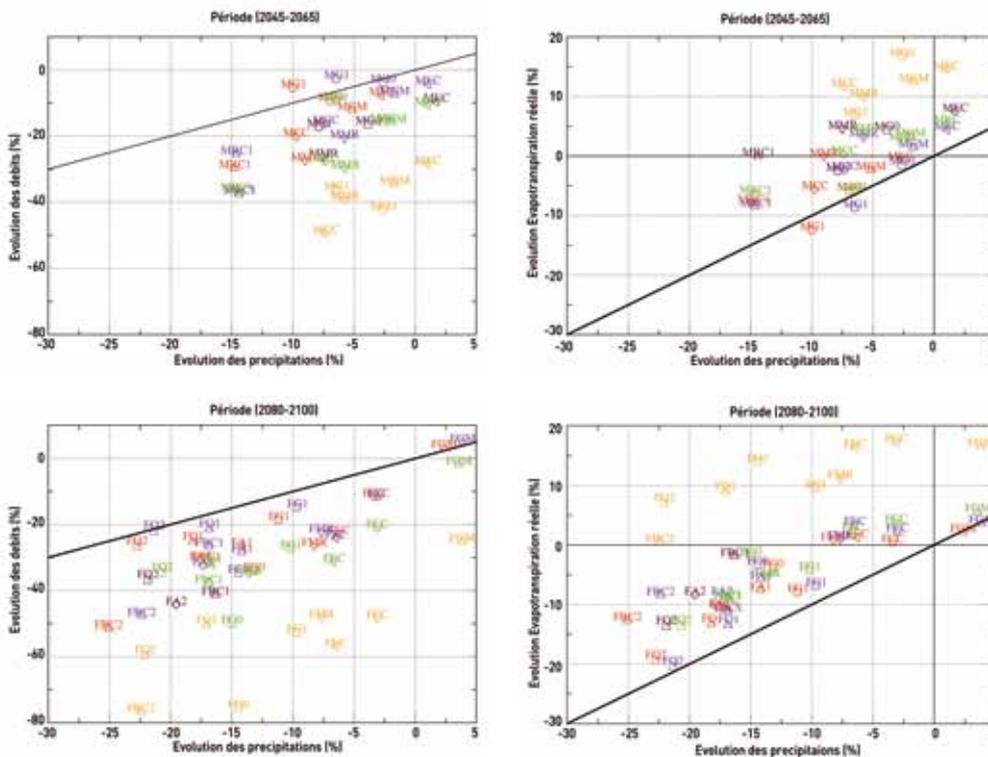


Figure 24 : Représentation de l'évolution de l'évaporation réelle et des débits en fonction de l'évolution des précipitations à l'horizon 2050 et 2100. Chaque symbole correspond à une simulation, les lettres correspondent à une projection climatique désagrégée, et les couleurs aux différents modèles hydrologiques. La courbe 1 : 1 pour laquelle les évolutions des deux variables sont identiques est tracée en ligne épaisse.

Afin d'affiner l'analyse de ces résultats, la [figure 25](#) représente l'évolution mensuelle du débit (Q_{tot}), de l'évaporation (ETR) et du stock d'eau (ΔW) en moyenne sur chaque projection climatique. Seuls les résultats du modèle hydrologiques MODCOU ne sont pas représentés, car on ne dispose pour ce modèle que des bilans au pas de temps annuel.

On retrouve les cycles traditionnels, c'est-à-dire, une évaporation faible en hiver et forte au printemps. Ceci se traduit par une diminution du stock d'eau dans le sol au printemps (valeurs négatives), alors qu'il se recharge en hiver (valeurs positives). Les écoulements sont maxima en hiver, et minima en été. On notera que la notion d'écoulement correspond ici aux débits de la Seine à Poses exprimés en mm/jour.

Si l'on regarde les résultats sur le temps présent, on constate qu'ils sont très similaires entre les modèles en terme d'écoulement. Cependant, les résultats sur les deux autres termes (évapotranspiration réelle et évolution du stock d'eau dans le sol) sont bien plus contrastés. Ainsi, l'évaporation mensuelle maximale varie de 2 à 4 mm/jour et les variations du stock d'eau dans les sols de 1 à plus de 3 mm/jour. Ainsi, la représentation du fonctionnement du bassin versant par les modèles hydrologiques est assez différente, bien que ceux-ci représentent de façon satisfaisante les débits observés en temps présent. Cela résulte du fait que la plupart des modèles sont calés sur les débits observés mais ne valident généralement pas les autres termes du bilan.

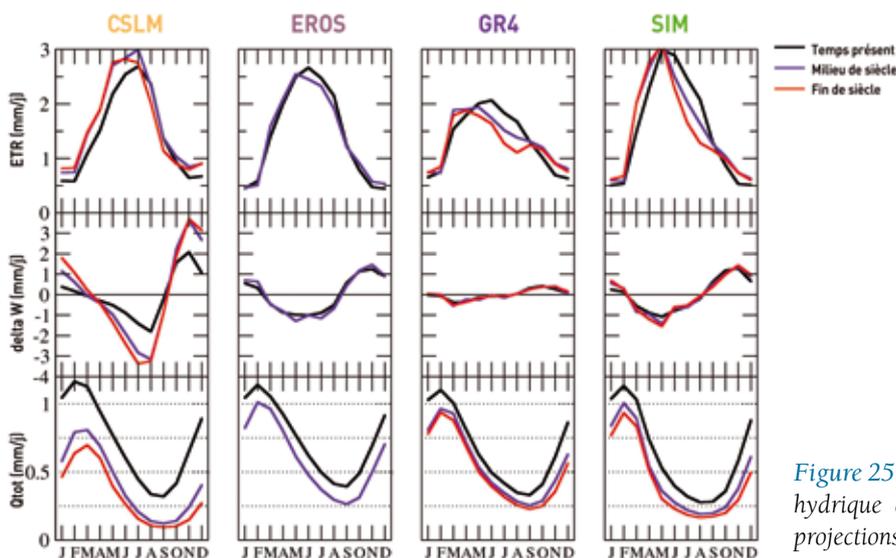


Figure 25 : Évolution mensuelle des termes du bilan hydrique calculés en moyenne sur les différentes projections climatiques CLSM, EROS, GR4 et SIM.

Les résultats en milieu de siècle et en fin de siècle montrent des différences plus importantes entre les modèles. Du fait de l'augmentation de l'ETP, l'évaporation réelle est plus importante au début du printemps. Cela se traduit par une diminution du contenu en eau du sol plus rapide, et donc, par l'apparition d'un stress hydrique* plus précoce. L'évaporation diminue alors de façon conséquente en été, pour tous les modèles sauf pour CLSM. En effet, pour ce dernier, on constate que l'évaporation est soutenue. Cela se traduit par une plus forte évolution du stock d'eau dans le sol, dont l'amplitude est environ deux fois plus importante dans le futur que dans le présent.

Concernant l'écoulement, on constate une diminution de celui-ci pour tous les modèles, quasiment tous les mois. Cependant, la diminution des écoulements est

bien plus importante pour le modèle CLSM que pour les autres, du fait qu'une part plus importante des précipitations a contribué à l'évaporation.

L'analyse du bilan hydrique nous permet cependant de douter des résultats obtenus par le modèle CLSM. En effet, on sait que même en temps présent, l'évaporation est limitée l'été par le stress hydrique : les contenus en eau du sol sont trop faibles pour que les plantes arrivent à y puiser facilement de l'eau, ce qui limite donc leur évapotranspiration. Cela implique que le contenu en eau du sol varie chaque année entre des valeurs minimales et maximales relativement similaires d'une année sur l'autre. Cela est cohérent avec les simulations de l'évolution du stock d'eau du sol des trois modèles EROS, GR4 et SIM qui montrent une amplitude similaire sur les trois périodes.

Mais, ce n'est pas le cas pour le modèle CLSM dont l'amplitude de variation du stock d'eau dans les sols est deux fois plus importante en temps futur qu'en temps présent. Une telle évolution pourrait s'expliquer si une part importante du bassin versant ne subissait pas de stress hydrique en temps présent, ce qui se traduirait donc par un faible déstockage d'eau en été par rapport au stock d'eau disponible. C'est le cas par exemple des zones humides ou des bas de versant qui conservent des contenus en eau assez importants, même en été. Cependant, pour être cohérent avec les résultats obtenus par CLSM, il faudrait que ces zones non stressées représentent 60 % du bassin versant en temps présent, ce qui est irréaliste. Les résultats sont jugés irrecevables et sont donc exclus dans la suite de l'analyse.

Cette analyse permet de relever qu'il ne suffit pas qu'un modèle obtienne des résultats réalistes sur la période actuelle pour être capable de donner des résultats cohérents dans des conditions climatiques différentes.

Application sur les débits de la Seine à Poses

La figure 26 présente la façon dont les modèles hydrologiques utilisant les variables atmosphériques issues des simulations des modèles de climat désagrégés en temps présent sont capables de reproduire les débits observés de la Seine à Poses. La figure présente la moyenne de ces modèles, ainsi que les débits moyens mensuels observés. On dénote une trentaine de simulations qui présentent une certaine

dispersion. La dispersion est illustrée à la fois par les variations maximales entre les simulations (zone colorée) et par l'écart type (en pointillés). Si la dispersion est importante, les modèles hydrologiques forcés par les modèles de climats désagrégés sont capables de bien représenter les débits moyens mensuels. Cela permet de s'assurer de la pertinence de la méthode utilisée sur le temps présent.

Pour les projections aux horizons 2050 et 2100, le principe est le même. Les résultats sont présentés figure 27. L'impact du changement climatique, estimé par l'évolution des débits dans le futur par rapport à la période actuelle (figures de droite), utilise pour référence en temps présent les simulations de chaque trio modèle hydrologique / modèle de climat / méthode de désagrégation en temps présent, et non pas les observations de débits en temps présent.

Dès l'horizon 2050, on constate une diminution assez nette des débits pour tous les mois. La réduction est plus marquée en automne (-30 % en octobre). En hiver, pèse une forte incertitude sur l'évolution des débits puisqu'il y a environ le même nombre de projections conduisant à une augmentation des débits qu'à une diminution.

À l'horizon 2100, la tendance à la diminution des débits s'accroît encore tout au long de l'année. En automne, la diminution des débits atteint 40 %, alors qu'en hiver, elle atteint en moyenne 15 %, avec cependant un petit nombre de quatorze modèles hydrologiques / scénario d'émission de gaz à effet de serre / modèle de climat / méthode de désagrégation projetant une augmentation des débits en hiver.

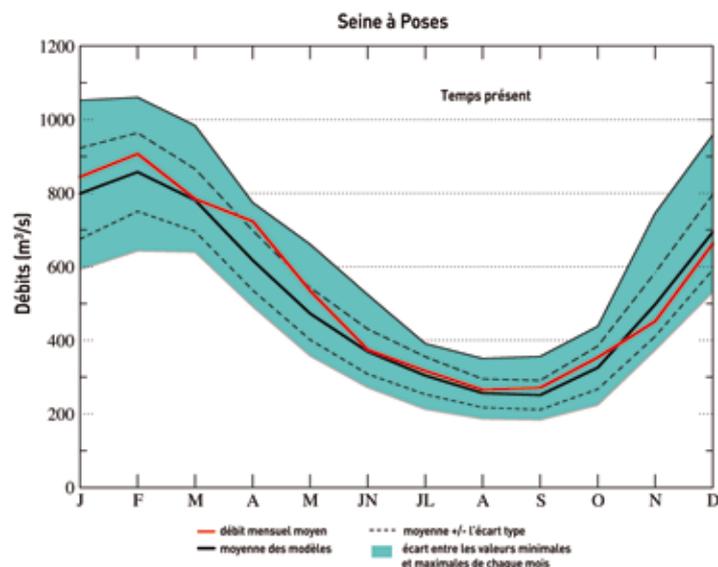


Figure 26 : Débits mensuels moyens simulés par les modèles hydrologiques utilisant les simulations temps présents des modèles climatiques désagrégés.

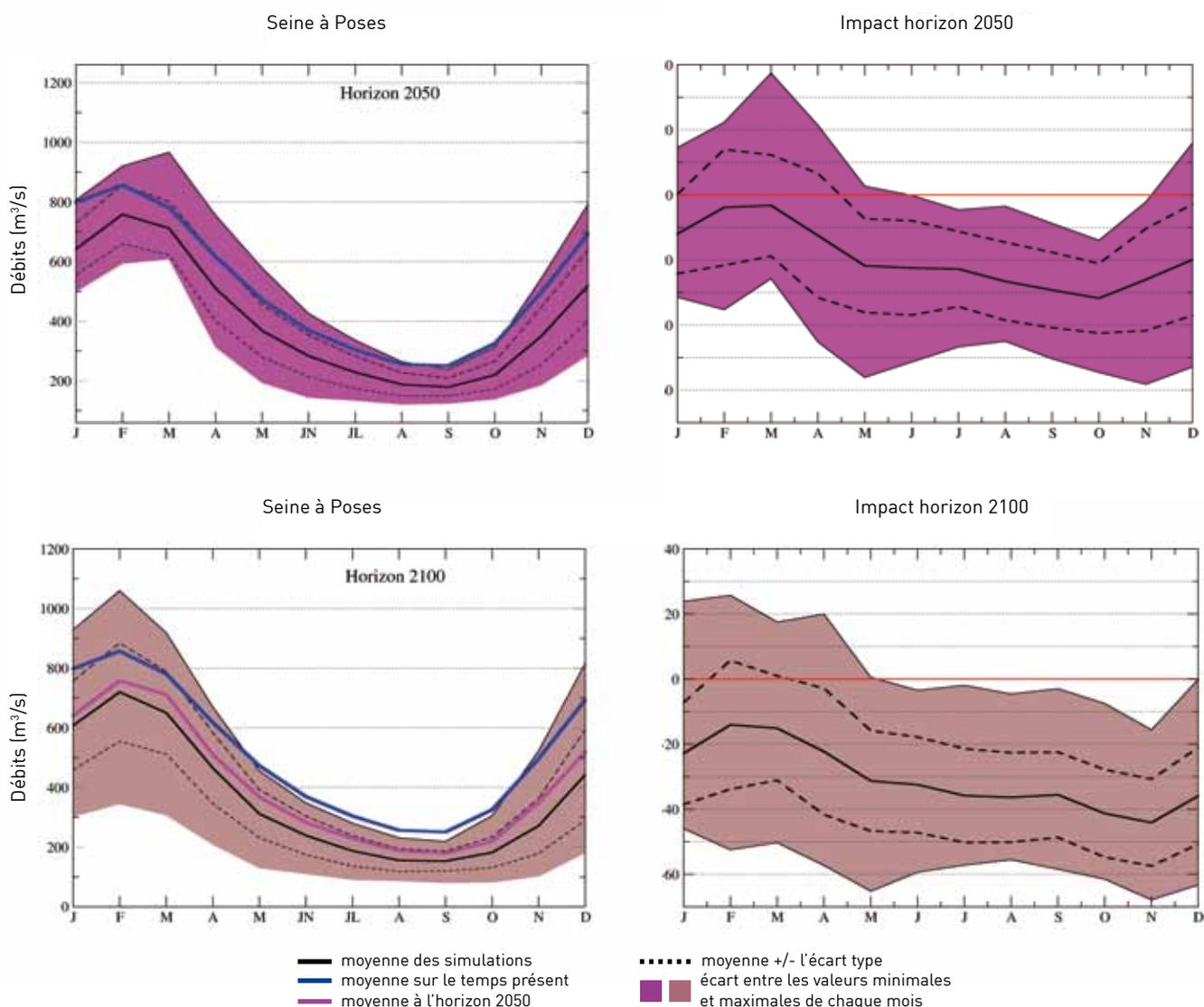


Figure 27 : Impact du changement climatique sur les débits de la Seine à Poses aux horizons 2050 et 2100.

La courbe épaisse en noir représente la moyenne des simulations sur la période, la courbe en bleu la moyenne sur le temps présent, et la courbe rose la moyenne sur l'horizon 2050. Les pointillés représentent la moyenne +/- l'écart-type, et les zones pleines, l'écart entre les valeurs minimales et maximales de chaque mois.

Pour quantifier l'impact du changement climatique et les incertitudes associées, il est nécessaire de s'assurer que les résultats ne sont pas biaisés par un échantillon non homogène. Ainsi, tous les modèles hydrologiques n'ont pas réalisé des simulations sur l'ensemble des projections climatiques désagrégées, et les trois méthodes de désagrégation n'ont pas été appliquées à chaque modèle de climat. On utilise donc une méthode statistique permettant de corriger les échantillons et de quantifier les impacts et leurs incertitudes. Les impacts sur les débits de la Seine à Poses conduisent à l'horizon 2050 à une diminution de $126 \pm 55 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $-23 \pm 10 \%$ et à l'horizon 2100 à une diminution de $157 \pm 76 \text{ m}^3/\text{s}$, soit $-29 \pm 14 \%$.

Cette méthode permet également d'identifier les principales sources d'incertitudes. Comme on pouvait s'y attendre, ce sont les modèles de climat qui sont à l'origine de la plus grande dispersion, et donc, de la plus grande source d'incertitude, du fait de la complexité des processus et interaction représentés. Puis, la dispersion associée aux méthodes de désagrégation et aux modèles hydrologiques sont environ du même ordre de grandeur. L'estimation des incertitudes reste partielle dans la mesure où l'on ne peut exclure l'occurrence d'un événement d'origine humaine ou naturelle d'une ampleur telle que cela change toutes les hypothèses qui ont servi à construire les scénarios utilisés.

Évolution des débits sur le bassin de la Seine et tendance sur les extrêmes

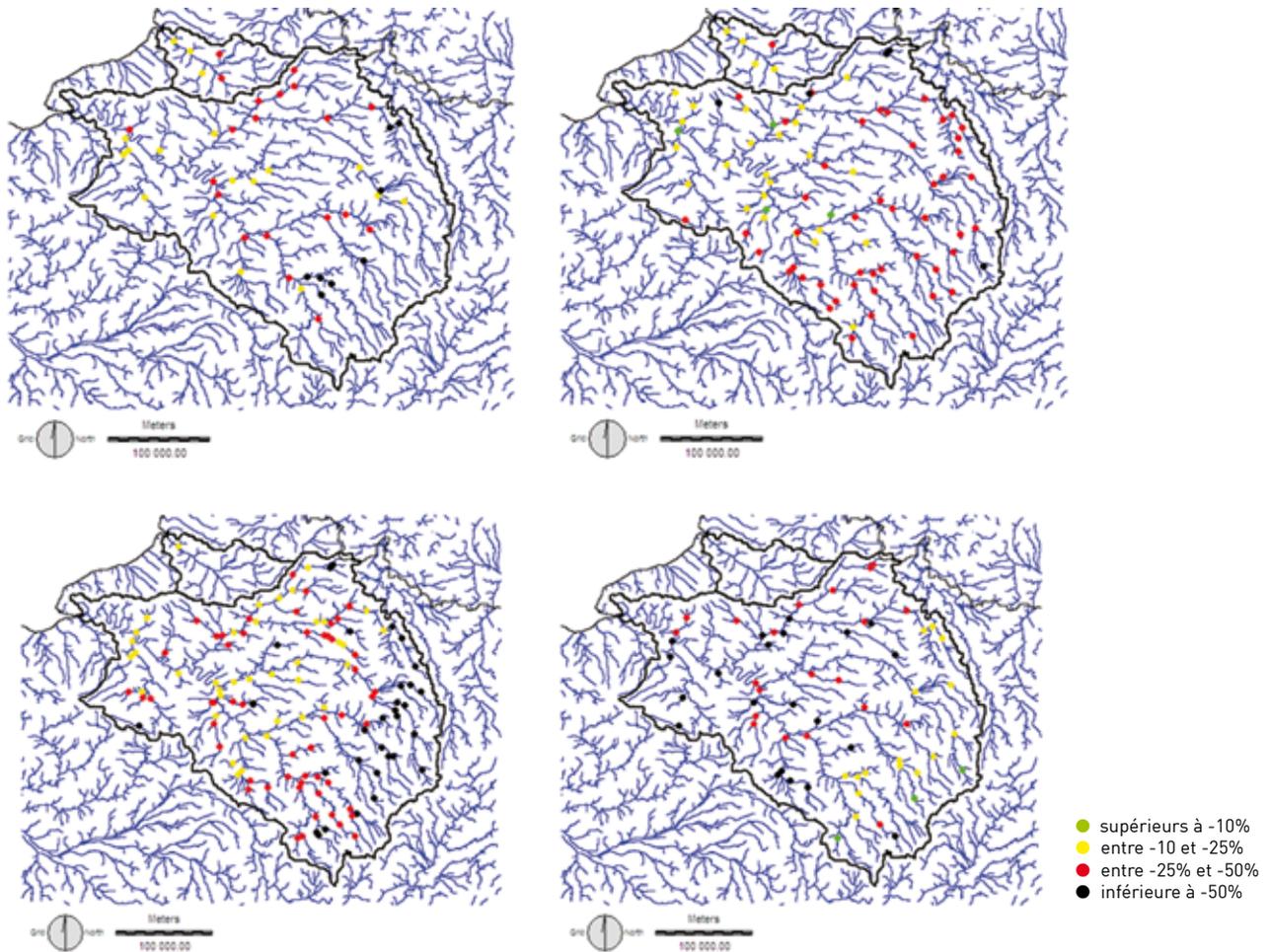


Figure 28 : Cartes des évolutions du QMNA5 (débits représentatifs des étiages) en relatif par rapport aux valeurs temps présent pour les scénarios A1B Milieu de siècle, simulées, de droite à gauche et de haut en bas par EROS, GR4J, MODCOU et SIM. Chaque point représente une station hydrométrique.

Les résultats obtenus à l'exutoire du bassin sont comparables à ceux obtenus sur la Seine à Paris. Sur l'ensemble du bassin, on constate également une tendance maquée à la diminution des débits. La méthode utilisée dans RExHySS permet d'étudier l'évolution des extrêmes : crues décennales et étiages sévères. Malgré une réduction des débits, on ne constate pas de tendance à la diminution des crues décennales. Une minorité de

simulations indique même un risque d'augmentation de ces crues. Par contre, il y a une tendance généralisée à la réduction des étiages sévères. Cependant les variabilités spatiales ne sont pas représentées de la même façon d'un modèle à l'autre, comme cela est illustré figure 28 pour les résultats des modèles hydrologiques forcés par la projection ARPEGE – A1B en milieu de siècle, désagrégés par la méthode des régimes de temps.



LE PROJET CLIMATOR

Climator est un programme de recherche scientifique financé par l'Agence nationale de la recherche (ANR) dans le cadre du programme « Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés ».

Entre 2007 et 2010, il a réuni dix-sept équipes de chercheurs issus de champs disciplinaires variés (climatologie, agronomie, écologie, science du sol, etc.) et exerçant au sein de sept instituts ou organismes de recherche. Son objectif était de mettre au point des méthodes d'analyse de l'impact du changement climatique sur les cultures agricoles afin de proposer des scénarios d'évolution possibles des systèmes agraires.

L'étude a porté sur la France entière grâce à douze sites d'études en métropole et un situé aux Caraïbes. Chaque site est représentatif d'un type de climat (tropical, océanique, méditerranéen et continental). Une extrapolation des résultats est donc possible à l'échelle nationale.

Le principe général a consisté à croiser les résultats de modèles climatiques, agronomiques et forestiers pour simuler l'effet du changement climatique sur l'agriculture et la sylviculture.

Les projections climatiques pour les années 2020-2050 (futur proche) et pour les années 2070-2100 (futur lointain) sont basées sur le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B proposé par le GIEC. Celui-ci se définit par une forte croissance économique et un pic démographique en 2050 aboutissant à 700 ppm de concentration en CO₂ dans l'atmosphère à la fin du XXI^e siècle, malgré une baisse des émissions mondiales à partir de 2050. Ce scénario a été intégré au modèle atmosphérique ARPEGE utilisant des données climatiques issues de modèles globaux, mais régionalisées par des méthodes statistiques et dynamiques. Cette descente d'échelle et/ou correction de biais permet d'obtenir des variables climatiques à une échelle fine (maille de 8km de côté).

Les résultats des travaux montrent qu'outre une augmentation des températures, le changement climatique aura pour conséquence une diminution des précipitations. Cela aura de nombreuses répercussions qui influenceront directement sur les pratiques agricoles et sur les systèmes sylvicoles :

- baisse de la recharge des nappes phréatiques ;
- diminution des épisodes de gel à l'automne ;
- augmentation de l'aire de culture possible d'espèces estivales, tant en latitude qu'en altitude ;
- accélération des rythmes de croissance des plantes ;
- augmentation légère des rendements du blé et des prairies ;
- diminution des rendements des cultures irriguées ;
- augmentation de la vulnérabilité des forêts au dépérissement.

D'autres résultats ont été obtenus lors de cette étude :

- les différences régionales et locales entre les sites étudiés sont notables. Il est ainsi impossible de définir une évolution globale des systèmes du fait du changement climatique ;
- la grande variabilité inter-annuelle du climat entraînera une variation de l'impact du changement climatique sur les systèmes agraires ;
- les incertitudes concernant les évolutions sociales, économiques et démographiques ne se font sentir que pour les scénarios du futur lointain. Une adaptation des systèmes agricoles est donc d'ores et déjà possible.

Le projet Climator a donné lieu à un colloque de restitution en juin 2010 ainsi qu'à la publication d'un livre vert avec le soutien de l'Ademe, disponible sur internet (www.ademe.fr).

Impact du changement climatique sur la piézométrie

Comme pour les débits, le niveau des nappes montre une tendance à la baisse. Cependant, les variabilités spatiales de cette diminution sont très contrastées, du fait des différentes contraintes qui influencent les aquifères. En effet, ils dépendent à la fois de la recharge par les précipitations efficaces, mais aussi, par l'infiltration de l'eau en rivière. D'autre part, la dynamique de la nappe est très différente selon que celle-ci est captive, c'est-à-dire située entre deux couches imperméables, ou libre, lorsqu'elle est capable d'atteindre la surface, ou qu'elle se situe à proximité d'une rivière.

Ainsi, la [figure 29](#) présente l'évolution du niveau piézométrique sur trois stations présentant des impacts assez contrastés. Une station présente une baisse conséquente du niveau piézométrique, avec cependant une dispersion très marquée en fin de siècle, une autre, une diminution modérée du niveau piézométrique avec une faible dispersion, et une troisième une diminution modérée avec une forte dispersion.

Ces trois piézomètres sont localisées [figure 30](#) où l'on présente la variabilité spatiale de l'évolution du niveau des nappes sur 137 piézomètres entre le temps présent et les horizons 2050 et 2100. Dans certains cas, essentiellement au centre du bassin, on constate de très faibles évolutions des niveaux piézométriques, très homogènes selon les projections. Cela peut s'expliquer par la proximité avec une rivière ou par le fait que le piézomètre est captif. Sur les pourtours des bassins, les amplitudes de variations sont plus fortes, et la dispersion entre les projections également. Ce sont pour parties des zones de plateaux où la recharge de la nappe évolue fortement.

À l'horizon 2100, on constate que certains piézomètres indiquent une augmentation possible de la piézométrie. Ces résultats sont obtenus pour la projection climatique la plus humide ([figure 24](#)). Cependant, dans l'ensemble, le niveau piézométrique tend vers une diminution plus importante qu'en 2050.

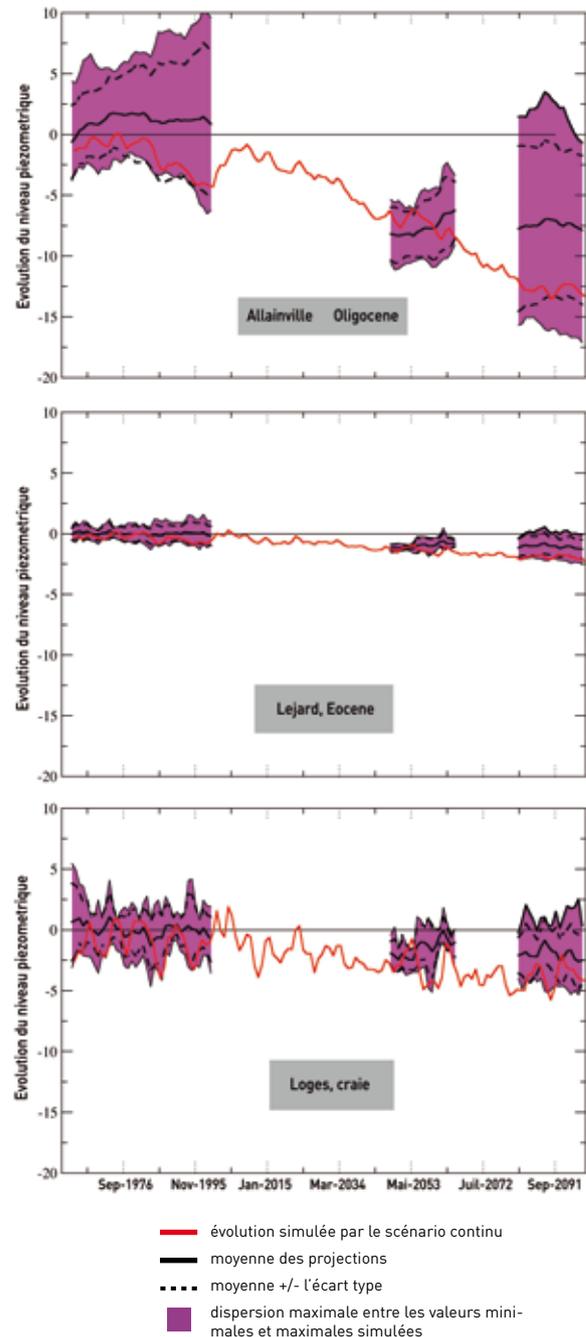
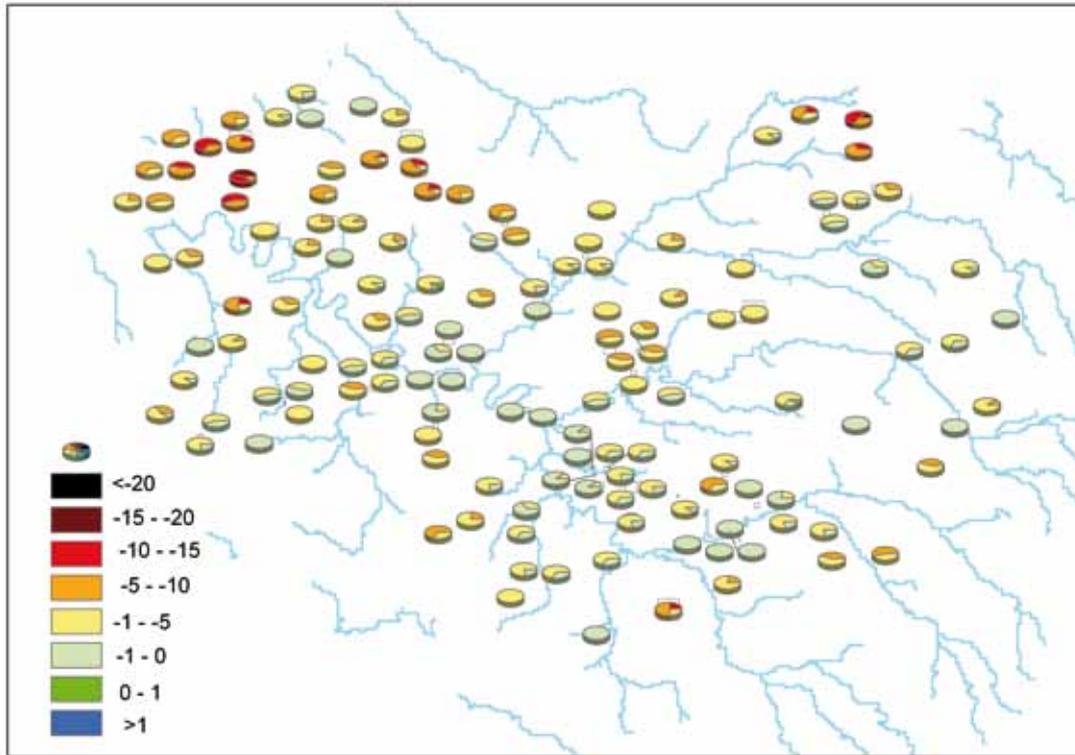


Figure 29 : Évolution du niveau piézométrique de trois stations présentant des variations sensiblement différentes par rapport à la moyenne de référence temps présent.

Horizon 2050



Horizon 2100

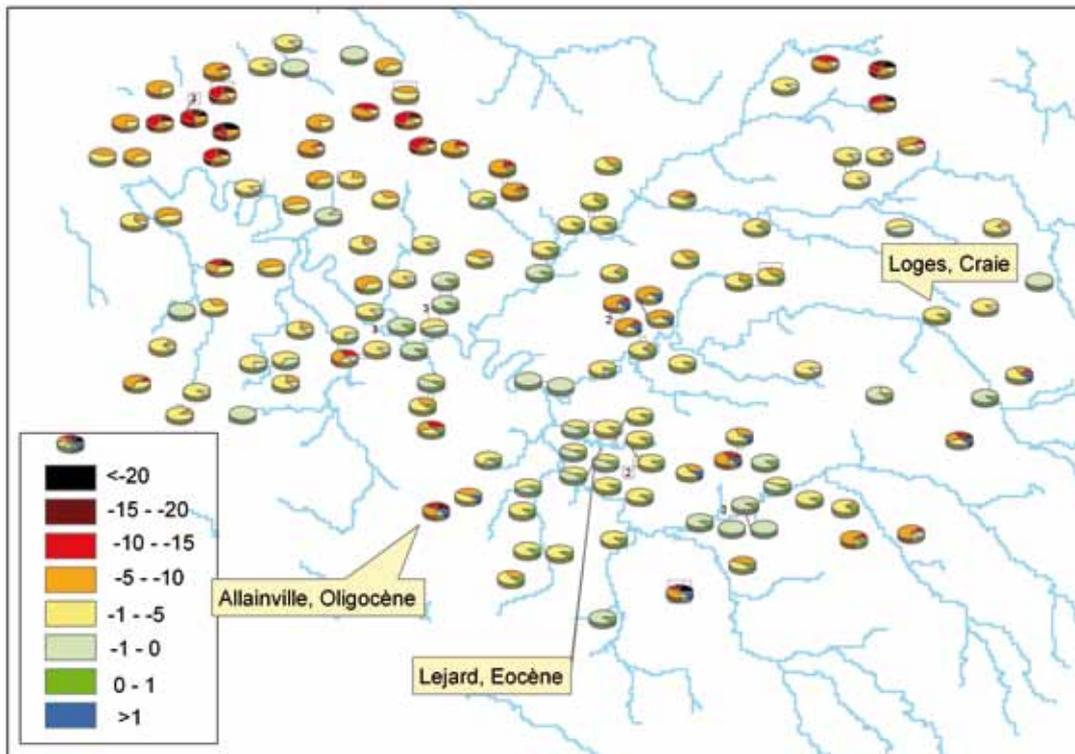


Figure 30 : Impact du changement climatique sur 137 piézomètres tel que simulés par MODCOU avec 9 projections climatiques désagrégés. Les camemberts montrent l'évolution des piézométries en mètre sur les 9 projections : en haut, horizon 2050 et en bas, horizon 2100.

Comprendre l'évolution des projections climatiques au cours du temps

Les différents exercices d'intercomparaison organisés par le GIEC ont permis de confirmer et d'affiner les principales tendances de l'impact du changement climatique aussi bien sur la température que sur les précipitations. Une précédente étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine avait été réalisée il y a quelques années avec des projections climatiques datant de la fin des années 1990 et du début des années 2000. Les résultats de cette étude ont notamment été présentés dans le fascicule « Hydrogéologie du bassin de la Seine » par Viennot et al., 2009. Or, ces impacts étaient très différents de ceux qui sont obtenus actuellement.

Cela s'explique en partie par le fait qu'il y avait moins de modèles climatiques, et moins de méthodes de désagrégation dans le précédent projet. D'autre part, on ne disposait que de deux modèles hydrologiques, dont un qui a depuis été invalidé. Cependant, si l'on compare les résultats du modèle hydrologique MODCOU avec les projections simulées sur plusieurs d'années d'intervalle par un modèle de climat et avec la même méthode de désagrégation (ici, la méthode des « anomalies »), on obtient les résultats suivants :

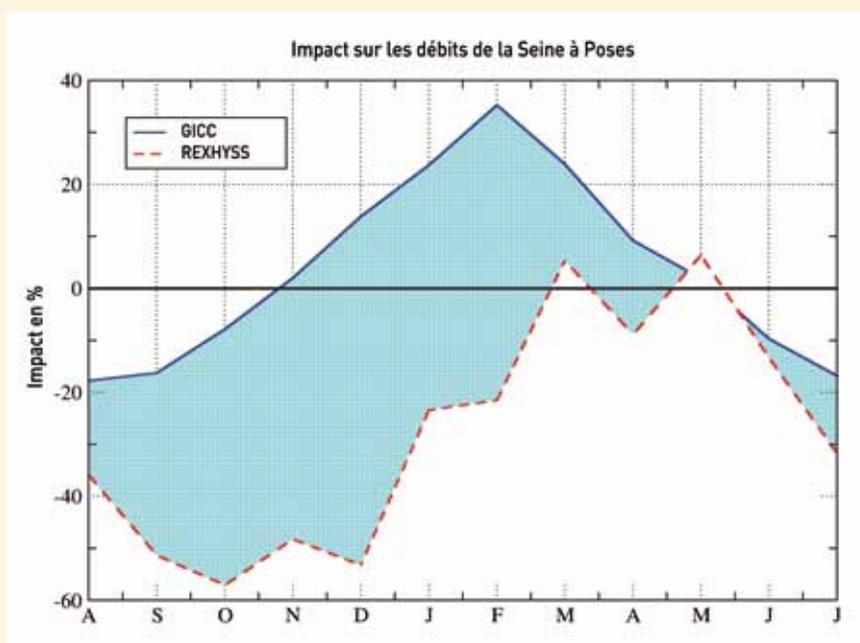


Figure 31 : Comparaison des impacts du changement climatique sur le bassin de la Seine à Poses obtenus lors de la précédente étude GICC, et ceux obtenus lors du projet RExHySS.

Alors qu'on projetait une forte augmentation des débits hivernaux et une diminution modérée des débits estivaux, on est passé à une projection dans laquelle les débits diminuent fortement en été et en automne, avec des impacts modérés au printemps.

Ces différences s'expliquent par le fait que la zone de transition s'est globalement déplacée plus au nord en hiver, le sud de l'Europe étant caractérisé par des projections climatiques qui indiquent une diminution des précipitations alors qu'elles augmentent dans le nord de l'Europe (figure 16). Ainsi, alors que les précipitations hivernales augmentaient fortement avec les anciennes projections climatiques, elles n'augmentent que modérément dans les dernières projections.

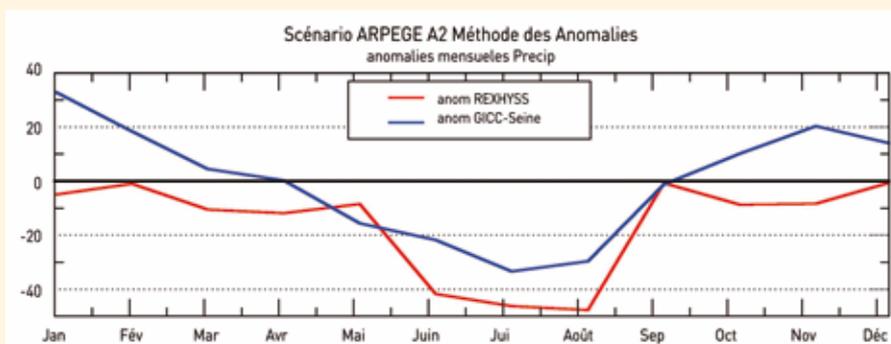


Figure 32 : Impact du changement climatique sur les précipitations mensuelles (en pourcentage d'évolution par rapport au temps présent) obtenus par le modèles ARPEGE sous scénario A2 à l'époque du GICC-Seine (en bleu) et de REXHYSS (en rouge)

Cela conduit à des impacts très différents sur les précipitations annuelles, puisqu'on pouvait avoir localement des augmentations des précipitations annuelles alors que les nouvelles projections indiquent une diminution marquée des précipitations sur l'ensemble du bassin de la Seine.

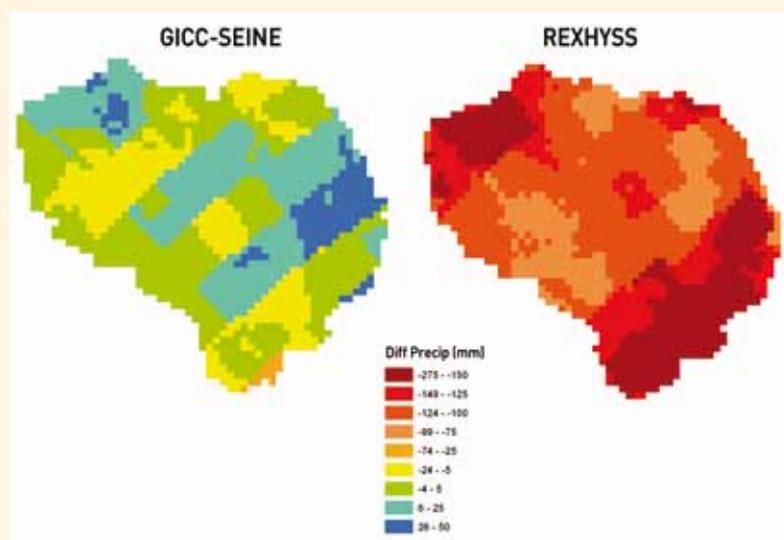


Figure 33 : Cartes de l'impact du changement climatique sur les précipitations (en pourcentage du temps présent) obtenues par ARPEGE sous scénario SRES A2 lors du GICC Seine (à gauche) et de REXHYSS (à droite).

Ainsi, l'expérience acquise lors des précédents projets montre qu'il est important de réaliser de nouvelles études d'impact du changement climatique sur l'hydrologie au fur et à mesure que les projections du GIEC sont rendues disponibles. Cela est particulièrement important pour le bassin de la Seine qui se trouve à proximité d'une zone de transition entre des zones de diminution et d'augmentation des précipitations.

Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau du bassin de la Seine sont assez marqués, avec une tendance prononcée à la diminution de la ressource en eau, tendance qui ne s'accompagne pourtant pas d'une réduction des risques de crue.

De façon antagoniste, la réduction de la ressource en eau accompagnée d'une élévation de la température et de la demande évaporative risque d'impliquer des besoins en eau supplémentaires. L'agriculture risque de vouloir recourir de façon plus intensive à l'irrigation. D'autre part, un besoin accru en eau sera lié au besoin de régulation thermique, notamment pour lutter contre les canicules, que ce soit via la climatisation naturelle (ou bioclimatisation) basée sur l'effet rafraichissant de l'évaporation (via les surfaces d'eau libres ou végétalisées) ou par des moyens artificiels via les climatiseurs. Cela conduit à devoir aborder la problématique de la production d'énergie, elle-même impactée par la disponibilité de la ressource en eau.

Ainsi, il est important de mettre en place une stratégie d'adaptation au changement climatique qui soit cohérente pour gérer au mieux l'évolution de la ressource en eau à l'échelle du bassin versant.

Plusieurs initiatives ont été menées ou sont en cours afin de déterminer les différentes actions qui peuvent être menées afin de réduire l'exposition aux risques,

voire de bénéficier des opportunités associés au changement climatique. Au niveau national, on peut citer notamment le plan d'adaptation au changement climatique réalisé en 2010 par l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC), ainsi que le projet EXPLORE 2070 dit « Eau et changement climatique : quelles stratégies d'adaptation possibles » du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.

Ces stratégies d'adaptation visent notamment à adapter les pratiques agricoles, via des modifications de date de semis, de variétés ou de cultures, à économiser l'eau et à essayer de conserver une disponibilité de la ressource en eau via des stockages en nappe ou en surface. D'autres actions visent également à préserver la qualité de l'eau qui sera elle aussi impactée par le changement climatique.

Afin d'anticiper les besoins d'adaptation, il est nécessaire de s'appuyer sur des projections réalistes. Or, celles-ci sont susceptibles d'évoluer. À l'instar des prévisions météorologiques, il est nécessaire de réaliser une nouvelle étude d'impact du changement climatique sur la ressource en eau au fur et à mesure que de nouvelles projections climatiques sont disponibles, et en particulier, à chaque nouvel exercice du GIEC. Cette veille scientifique permettra d'affiner les conclusions de cette étude.

Bibliographie

4^e rapport du GIEC : Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R.K., Kwon W.T., Laprise R., Magana Rueda V., Mearns L., Menendez C.G., Raisanen J., Rinke A., Sarr A. et Whetton P., 2007. Regional Climate Projections. In *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA.

Boé Julien, 2007. Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France. Thèse de l'Université de Toulouse (Toulouse III - Paul Sabatier) accessible sur le site http://www.cerfacs.fr/globc/publication/thesis/2007/these_boe.pdf.

Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, 7 (12), 1643–1655. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1602>.

Boé J., Terray L., Habets F., Martin E., 2009. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resour. Res.*, 45, W08426.

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. and 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

Ducharne A., Habets F., Déqué M., Evaux L., Hachour A., Lepaillier A., Lepelletier T., Martin E., Oudin L., Pagé C., Ribstein P., Sauquet E., Thiéry D., Terray L., Viennot P., Boé J., Bourqui M., Crespi O., Gascoïn S., Rieu J., 2009. Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, rapport final du projet REXHySS, programme GICC, 62 pp. Disponible sur le site http://www.sisyphe.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/DOCS/Rapport_final_0000454_web.pdf.

Habets F., Boone A., Champeaux J.L., Etchevers P., Franchistéguy L., Leblois E., Ledoux E., Le Moigne P., Martin E., Morel S., Noilhan J., Quintana P., Segui Rousset-Regimbeau F., Viennot P., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research [D: Atmospheres]*, 113, D06113(2008)18.

Ledoux E., Gomez E., Monget J.M., Viavattene C., Viennot P., Benoit M., Mignolet C., Schott C., Mary B., 2007. Agriculture and Groundwater Nitrate Contamination in the Seine Basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Science of the Total Environment* 375: 33-47.

ONERC, Plan national d'adaptation au changement climatique, 2010, 213 pages. Accessible sur le site www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Onerc_concertation_adaptation_mesures_23_06_2010.pdf.

Pagé C., Terray L. et Boé J., 2008. Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21^e siècle : les scénarii SCRATCH08. Technical Report *TR/CMGC/08/64*, CERFACS, Toulouse, France. Disponible sur le site http://www.cerfacs.fr/globc/publication/technicalreport/2008/report_scenarios.pdf.

Perrin C., Michel C., et Andréassian V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4): 275-289.

Quintana-Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Franchistéguy L., Morel S. and Noilhan J., 2008. The SAFRAN atmospheric analysis: Description and validation. *J. Applied Meteorol. and Climatology*, 47, 92–107.

Thiéry D., et Moutzopoulos C., 1995. Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. VIII^{èmes} journées hydrologiques de l'ORSTOM « Régionalisation en hydrologie, application au développement ». In Le Barbé et E. Servat (Ed.) ORSTOM Editions, pp. 285-295.

UN WATER, 2010 : rapport disponible sur le site internet www.unwater.org.

Viennot P., Ducharne A., Habets F., Lamy F., Ledoux E., 2009. Fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine, Plaquette du programme PIREN-Seine, isbn/978-2-918251-01-9 , accessible sur le site <http://www.sisyphe.upmc.fr/piren/?q=book/975>.



Glossaire

Adaptation : ajustement des systèmes naturels de l'individu à la communauté ou des systèmes humains face à un nouvel environnement ou un environnement changeant. L'adaptation aux changements climatiques indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques.

Aquifère : formation géologique souterraine 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 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.

Biais : différence entre une valeur observée et son estimation.

Conditions aux limites : terme employé pour faire référence aux valeurs imposées à la frontière du domaine modélisé pour chaque variable. Dans le cadre d'un modèle de climat régional, ces valeurs sont variables dans le temps et en général prescrites par un modèle de climat global.

Débiaisage : action de corriger les biais, c'est-à-dire, de rapprocher une variable estimée vers la valeur observée.

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

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat. Cette organisation a été mise en place en 1988 à la demande du G7 (États-Unis, Japon, Allemagne, France, Grande Bretagne, Canada, Italie) par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme pour l'environnement des Nations Unies. Son appellation anglaise est IPCC pour Intergovernmental Panel on Climate Change. Son rôle est d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué par l'homme.

Effet de serre : phénomène naturel reposant sur le fait que l'atmosphère terrestre se conduit un peu comme la vitre d'une serre en laissant pénétrer la chaleur du soleil et en l'emprisonnant. 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.

ETP : évapotranspiration potentielle. C'est le flux d'eau qui pourrait s'évaporer d'une surface engazonnée bien alimentée en eau. L'ETP est souvent utilisée pour représenter la demande évaporative de l'atmosphère. Elle est estimée à partir de plusieurs variables atmosphériques, telle que les rayonnements incidents, la température, l'humidité et la vitesse du vent.

ETR : évapotranspiration réelle. C'est le flux d'eau réellement évaporé au dessus d'une surface. L'évapotranspiration réelle peut se décomposer en plusieurs termes : évaporation du sol nu et des surfaces d'eau libre, transpiration de la végétation, de la sublimation de la neige ou de la glace. Du fait de la complexité de la mesure de ce flux, on dispose de peu de points d'observations de l'ETR. Ce flux est généralement estimé par des modèles.

Forçage atmosphérique : ce sont les variables permettant de décrire les conditions météorologiques. Ces variables sont utilisées en entrée des modèles hydrologiques, d'où le terme de forçage. La plupart des modèles hydrologiques utilisent simplement les données journalières de précipitations et d'ETP, alors que les modèles hydrométéorologiques qui simulent à la fois les bilans d'eau et d'énergie ont besoin du cycle diurne des précipitations, des rayonnements solaire et infrarouge, de la température et de l'humidité de l'air, ainsi que de la vitesse du vent.

Hydrosystème : système composé de différents milieux aquatiques associés (eau courante, eau stagnante, eaux semi-aquatiques ou terrestres, eaux superficielles ou souterraines) dans un secteur géographique délimité, notamment un bassin versant. Le concept d'hydrosystème insiste sur la notion de système et sur son fonctionnement hydraulique et biologique qui peuvent être modifiés par les actions de l'homme. Un hydrosystème peut comprendre un ou plusieurs écosystèmes.

Loess : roche sédimentaire détritique meuble formée par l'accumulation de limons issus de l'érosion éolienne. Les loess sont réputés favorables à l'agriculture grâce notamment à leur capacité de rétention en eau. Les régions loessiques sont traditionnellement des terres à blé comme la Beauce.

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.

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.

Projection climatique : projection de la réponse du système climatique aux scénarios d'émissions ou de concentration de gaz à effet de serre et d'aérosols, ou de scénarios de forçage radiatif, souvent fondée sur des simulations par des modèles climatiques. La différence faite entre projections climatiques et prévisions climatiques souligne le fait que les projections climatiques dépendent des scénarios d'émissions / des concentrations / du forçage radiatif utilisé, eux-mêmes basés sur des hypothèses, concernant, par exemple, de futurs développements socio-économiques et technologiques susceptibles ou non de se produire, et pour lesquels il existe une incertitude importante.

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

QMNA5 : le QMNA5 est calculé sur plusieurs années comme le QMNA médian à partir d'un ajustement à une loi statistique. Il correspond au 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 ».

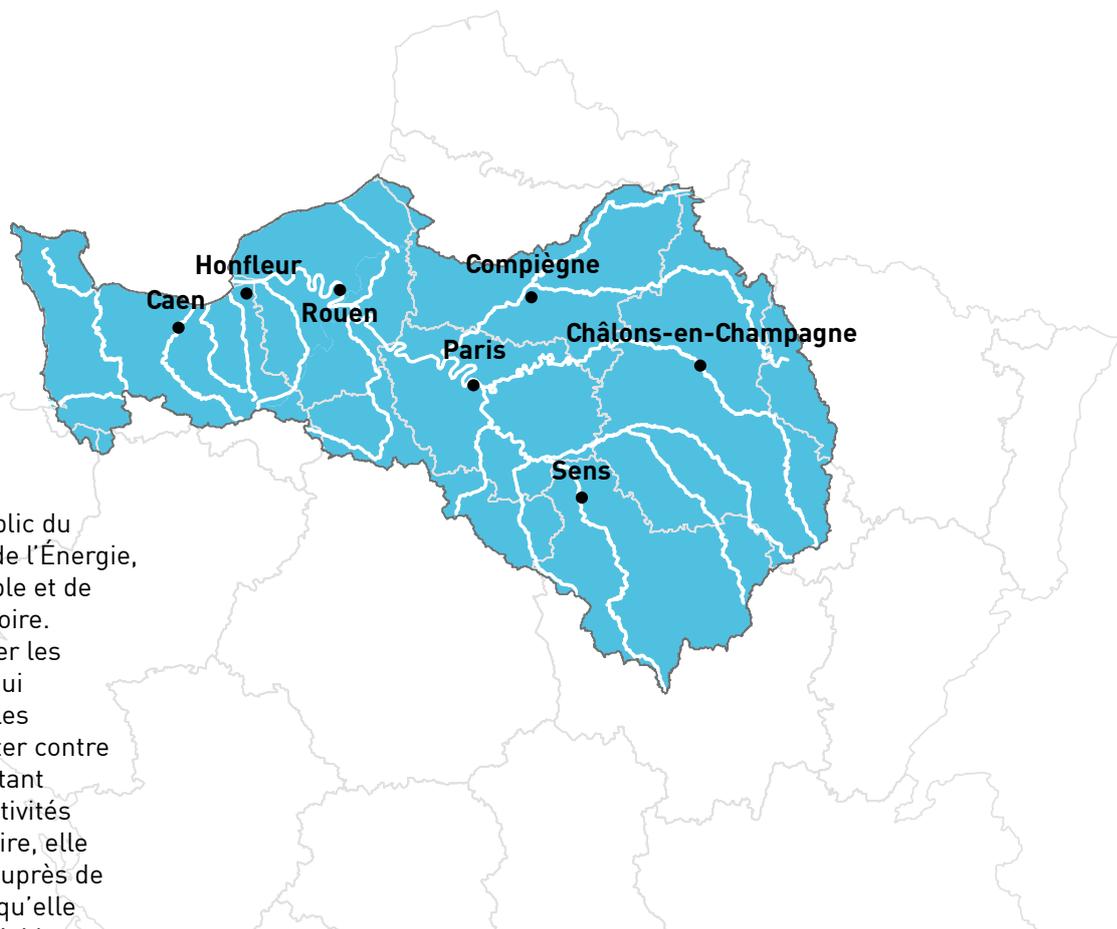
SAFRAN : c'est un système d'analyse atmosphérique utilisé à Météo-France pour rassembler l'ensemble des observations locales de façon à reconstituer un forçage atmosphérique consistant, disponible sur un domaine spatial régulier de 8km de côté au pas de temps horaire. Les analyses SAFRAN couvrent l'ensemble du territoire métropolitain de 1958 à nos jours.

SRES : Special Report on Emission Scenario. Cela fait référence au rapport spécial du GIEC dédié aux scénarios d'émissions des gaz à effet de serre et d'aérosol.

Stress hydrique : situation dans laquelle il n'y a plus assez d'eau dans les sols pour permettre de répondre à la demande évaporative de l'atmosphère (ETP). En condition de stress hydrique, l'évaporation réelle (ETR) est limitée par la ressource en eau accessible.



**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 : 978-2-918251-12-5
Dépôt légal : septembre 2012

