

Enregistrement et effets du climat sur les stocks d'eau (fleuve, rivière / nappe souterraine / mer) à l'échelle globale, nationale (France) et régional (bassin de la Seine)

B. Laignel

Professeur des Universités, UMR 6143 CNRS M2C,
Département de Géologie, Université de Rouen, Place Emile Blondel,
76821 Mont-Saint-Aignan, France,
benoit.laignel@univ-rouen.fr

ملخص : يشكل تحديد آثار تغير المناخ على الموارد المائية تحدياً كبيراً للمجتمع في القرن الواحد والعشرين (21)، والذي يتطلب إجابة من طرف العلميين من أجل السماح بوضع وسائل تسيير تتناسب مع الوضعية الجديدة.

في هذا المنظور، تم تدعيم برنامج "السين-أفال" بمشروع خبرة جماعية حول آثار التغير المناخي من المستوى العالمي إلى مستوى نهر السين.

إن مختلف الدراسات التي تم حوصلتها في هذا العمل، تبرز أنه على الرغم من أن آثار التغير المناخي يمكن ملاحظتها بطرق مختلفة، باختلاف مناطق العالم، أو حتى حسب طبيعة الوسائل المستعملة، وهي متناسبة (1) حسب نفس مبدأ وجود هذا التغير (يمكن ملاحظته من خلال درجة الحرارة والتساقطات)، (2) على النتائج المحتملة للتغير المناخي في عمل الأنظمة الهيدرولوجية: بتغيرات كبيرة معبرة إحصائياً، والتي يمكن حذفها وهي أيضاً ناتجة عن النمذجة (تغير صبيب الأنهار، لمستوى الطبقات الجوفية، ارتفاع مستوى سطح البحر ودرجة حرارة المياه).

على مستوى نهر السين، الدراسات التي تم إنجازها من خلال برامج علمية مختلفة (Aval Seine، RexHyss، Seine-GICC)، تظهر بوضوح مع أفاق سنة 2100: ارتفاع في درجة حرارة الجو (من +2° إلى +4° مئوية)، وانخفاض في التساقطات (-12% على المتوسط)، لمتوسط صبيب نهر السين (-16 إلى -36%) وفي احتياط المياه الجوفية.

في ما يخص ارتفاع مستوى سطح البحر، نلاحظ منذ سنة 1938 (سنة القياسات الأولى)، ارتفاع في مستوى سطح البحر بـ +1.8 (+/-0.4 ملم) والذي سيستمر إلى غاية أفاق سنة 2100، ولكن بريب كبير في قيمة الارتفاع.

الكلمات الأساسية : التغير المناخي، الموارد المائية، الكرة الأرضية، فرنسا، نهر السين.

Résumé : La détermination de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau constitue un enjeu majeur de société pour le XXI^{ème} siècle, à laquelle les scientifiques doivent répondre, afin de permettre la mise en place d'outils de gestion adaptés à la nouvelle situation.

C'est dans cette optique que le programme Seine-Aval a supporté un projet d'expertise collective sur les effets du changement climatique de l'échelle globale à celle de la Seine.

Les différentes études synthétisées dans ce travail mettent en avant que, même si les effets du changement climatique peuvent être perçus de manière diverse suivant les régions du monde ou même selon la nature des outils utilisés, celles-ci sont en accord (1) sur le principe même de l'existence de ce changement (observable dans la température et dans les précipitations), (2) sur les conséquences potentiellement importantes du changement climatique sur le fonctionnement des hydrosystèmes : de grandes tendances statistiquement significatives peuvent déjà être déduites et sont aussi produites par modélisation (changement du débit des fleuves, du niveau des nappes souterraines, élévation du niveau de la mer et de la température de l'eau).

A l'échelle de la Seine, les études réalisées dans différents programmes scientifiques (Seine Aval, RexHySS, GICC-Seine), montrent clairement à l'horizon 2100 : une augmentation de la température atmosphérique (+2 à +4°C), une diminution des précipitations (-12% en moyenne), du débit moyen de la Seine (-16 à -36%) et des réserves en eau souterraines. Concernant, l'élévation du niveau marin, on constate depuis 1938 (année des premières mesures) une élévation du niveau de la mer de +1.8 (+/-0.4 mm), qui se poursuivra à l'horizon 2100, mais avec une incertitude assez grande sur la valeur d'élévation.

Mots clés : Changement climatique, ressource en eau, Globe, France, Seine.

Abstract : The determination of the impact of climate change on water resources constitutes a major stake of the 21st century for which scientists must answer, in order to allow the introduction of management tools adapted to the new situation.

With this in mind, the Seine-Aval program has supported a project of collective expertise on the effects of climate change on a global scale to that of the Seine watershed.

The various studies synthesized in this work highlight that, even if the effects of climate change can be perceived in different ways in different regions of the world or even the nature of the tools used, they are consistent : 1) on the principle of the existence of this change (observable in temperature and precipitation), 2) the potentially significant consequences of climate change on the behaviour of hydrosystems: statistically significant trends can already be deduced and are also produced by modeling (changing of the rivers discharge, the groundwater levels, rising sea level and increase of water temperature).

A l'échelle de la Seine, les études réalisées dans différents programmes scientifiques (Seine Aval, RexHySS, GICC-Seine), montrent clairement à l'horizon 2100 : une augmentation de la température atmosphérique (+2 à +4°C), une diminution des précipitations (-12% en moyenne), du débit moyen de la Seine (-16 à -36%) et des réserves en eau souterraines. Concernant, l'élévation du niveau marin, on constate depuis 1938 (année des premières mesures) une élévation de +1,8 (+/-0,4 mm), qui se poursuivra à l'horizon 2100, mais avec une incertitude assez grande sur la valeur d'élévation.

On the scale of the Seine, studies in various scientific programs (Seine Aval, RexHySS, GICC-Seine) show clearly in 2100: an increase of atmospheric temperature (+2 to +4°C), a decrease of rainfall (-12% on average), of the average discharge of the Seine (-16 to -36%) and groundwater resources. On the sea level rise, there since 1938 (first year of measurements), we observe a rise of 1.8 (+/-0.4 mm), which will continue through 2100, but with enough uncertainty great value on the rising.

Key Words : Climate Change, water resources, Earth, France, Seine river.

Introduction

Actuellement de nombreux hydrosystèmes (mers, fleuves, lacs...) subissent des changements majeurs dans leur composition et/ou structure, et par conséquence dans leur fonctionnement.

Aux facteurs anthropiques, tels que les problèmes de surexploitation, pollution industrielle, croissance urbaine, eutrophisation, et perte d'habitats, se superposent les fluctuations climatiques.

La détermination de l'impact du changement climatique sur ces hydro-écosystèmes constitue donc un enjeu majeur de société pour le XXI^{ème} siècle à laquelle les scientifiques doivent répondre, afin de permettre la mise en place d'outils de gestion adaptés à la nouvelle situation.

S'il est relativement aisé d'avoir une vision synthétique de l'étude du changement climatique et de ses impacts à l'échelle du globe grâce aux travaux de l'IPCC, il en est tout autre lorsqu'on descend d'échelle comme celles des fleuves et des estuaires. En effet, à cette échelle, il est très difficile d'avoir une vision exhaustive pour les raisons suivantes :

- bien que les études sur les hydrosystèmes soient nombreuses, elles sont généralement ciblées, soit sur un fleuve, soit sur un thème et des paramètres donnés ;
- les méthodes utilisées et les échelles spatiales appréhendées sont différentes ;
- la durée des chroniques de mesures doit être au minimum de 30 ans, afin de pouvoir réaliser des analyses fiables de la relation entre les fluctuations climatiques et la variabilité hydrologique ;
- la réflexion est menée actuellement, si bien que beaucoup d'études ne sont pas encore publiées et donc difficilement accessibles ;
- les hydrosystèmes sont généralement des zones anthropisées, où il est difficile de faire la part entre le climat et l'homme.

C'est pourquoi, le programme Seine-Aval a supporté un projet intitulé « Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux. Expertise collective sur l'estuaire de Seine », dont l'objectif était de réaliser une synthèse sur l'Enregistrement et les effets du climat sur les hydrosystèmes et leurs stocks d'eau de l'échelle globale à régional (bassin de la Seine), en passant par le territoire national français.

Ce travail a été présenté à l'Université Mentouri de Constantine dans le cadre du projet AUF-BEOM (Evolution de la ressource en eau dans la zone méditerranéenne méridionale : Diagnostic et proposition d'outils de gestion - Universités de Rouen, Béjaïa, Constantine, Marrakech et Tunis) et de la Journée d'études du 2 février 2011 à la Faculté des Sciences de la Terre (Laboratoires LASTERNE et LGE) de l'Université Mentouri de Constantine.

Le présent article a pour objectif de présenter une synthèse concernant l'évolution des paramètres hydroclimatiques au cours du siècle dernier et leur projection à l'horizon 2100. Il s'articulera en trois parties :

- les données et méthodes utilisées pour traiter les relations entre climat et hydrologie ;
- une synthèse bibliographique sur l'évolution des paramètres hydroclimatiques à l'échelle du globe et nationale (France) ;
- une synthèse des travaux menés sur l'évolution des mêmes paramètres sur le bassin versant de la Seine.

1. Données et méthodes utilisées pour analyser les effets du climat sur l'hydrologie

1.1 Paramètres mesurés et traités

Les contraintes principales pour étudier les relations entre les fluctuations climatiques et la variabilité hydrologique sont liées à la disponibilité des données et à la durée d'enregistrement qui doit être idéalement la plus longue possible. Il est communément admis qu'elle doit être au minimum de 30 ans. Ainsi, la température, les précipitations et le débit des fleuves sont de loin les paramètres météorologiques et hydrologiques les plus utilisés dans les différentes études menées sur le sujet. Il s'agit, effectivement, de par le monde, des données les plus mesurées et sur les périodes de temps les plus longues.

Cependant, d'autres paramètres peuvent être pris en compte, tels que la température des eaux (marines et continentales), le niveau des stocks d'eau (niveau de la mer, niveau des nappes souterraines...), par des mesures directes ou par satellites.

En ce qui concerne le traitement de ces données dans le cadre des recherches s'intéressant à l'enregistrement du climat et de son impact sur les hydrosystèmes, nous avons pu constater que deux grandes approches méthodologiques principales sont utilisées. La première approche est basée sur des méthodologies statistiques sur les données préexistantes mesurées (appelées données historiques) dont le but est d'étudier l'évolution passée et présente des différents paramètres hydroclimatiques (précipitations, température, débit, niveau de la mer...) et leurs fluctuations. La seconde est basée sur la modélisation de l'objet d'étude et de ses interactions avec les données hydroclimatiques, afin d'obtenir une simulation des données futures dans le but d'aboutir à des hypothèses sur le fonctionnement futur de l'objet étudié.

Méthodes rétrospectives : traitement des enregistrements historiques (données existantes)

Parmi les approches basées sur l'analyse des enregistrements historiques, il est possible de distinguer :

1) La caractérisation des régimes hydrologiques consiste à réaliser une classification des débits mensuels d'une année sur l'autre. Celle-ci, de façon générale, aide à mieux comprendre le fonctionnement des fleuves et de leur bassin versant et manière plus approfondie permet l'établissement de relations avec les régimes climatiques (indices climatiques NAO, ENSO...) (9, 10).

2) les méthodes probabilistes ou d'hydrologie stochastique ont pour objectif de caractériser les lois de distribution des variables aléatoires d'intérêt, afin de prévoir la probabilité d'occurrence de certaines valeurs. Elles sont très employées en hydrologie pour la caractérisation des distributions des précipitations ou des débits moyens ou extrêmes annuels (crue, étiage).

3) les approches que l'on peut qualifier de déterministes, en comparaison avec celles probabilistes évoquées ci-avant, sont basées sur l'analyse des séries chronologiques, et vont du simple test de tendance à l'utilisation de techniques de traitement du signal. Elles ont pour but de décrire précisément les modalités des variations temporelles des signaux géophysiques, tels que les signaux climatiques, hydrométéorologiques, le niveau marin, etc. Contrairement aux méthodes probabilistes, elle offrent généralement la possibilité d'accéder à un certain déterminisme dans l'analyse des séries, par la détermination de liens potentiels et relations de causalité entre les processus aléatoires étudiés (e.g., 1, 51).

Dans le détail, on peut citer : les tests de tendance linéaire ou par Filtrage, lissage qui permettent d'identifier des tendances statistiquement significative (augmentation, diminution, stabilité) et des modes de variabilité des paramètres hydrologiques, les analyses spectrales (Fourier, ondelettes...) permettant également de manière plus fine de déterminer des modes de variabilité telles que des périodicités et/ou des ruptures dans les signaux hydrologiques, pouvant être mis en relation avec des fluctuations climatiques (indices climatiques : NAO, ENSO...), l'impact anthropique et/ou des caractéristiques propres de filtrage du bassin versant

Méthodes prospectives : Modélisation

L'approche modélisatrice repose quant à elle sur la construction d'un modèle de fonctionnement du système ciblé (bassin versant, écosystème,...), paramétré à partir de données enregistrées caractéristiques de ce système (précipitations, débits, caractéristiques et utilisation du sol, géologie,...). Ce modèle est ensuite soumis à un scénario climatique plus ou moins pessimiste, basé sur l'hypothèse d'une augmentation plus ou moins forte

des principaux gaz à effet de serre et aérosols dans l'atmosphère au cours du XXI^{ème} siècle, fondée elle-même sur des scénarios de trajectoire socio-économique mondiale (Tabl. 1)

Tableau 1. Résumé des quatre grands types de scénarios d'émission en GES et aérosols, utilisés comme entrée des scénarios climatiques les plus utilisés par la communauté scientifique (3^{ème} et 4^{ème} rapport de l'IPCC/GIEC, 29, 30). En terme de concentration en GES, et donc de sévérité globale du changement climatique, les scénarios les plus optimistes sont B1 et B2 et les plus pessimistes sont A1 et A2.

A1	A2	B1	B2
<ul style="list-style-type: none"> • Croissance économique mondiale sans virage environnemental • Démographie maximale en 2050, puis déclin de la population • Technologies plus efficaces • Homogénéisation du revenu par habitant 	<ul style="list-style-type: none"> • Croissance économique régionale sans virage environnemental • Démographie continue • Evolution technologique lente • Maintien des différences du revenu par habitant 	<ul style="list-style-type: none"> • Croissance économique mondiale avec virage environnemental • Démographie maximale en 2050, puis déclin de la population • Technologies plus efficaces • Homogénéisation du revenu par habitant 	<ul style="list-style-type: none"> • Croissance économique régionale avec virage environnemental • Démographie continue • Evolution technologique lente • Maintien des différences du revenu par habitant

Cette articulation d'un modèle du climat et d'un modèle du système étudié permet de projeter le devenir du fonctionnement de ce système selon plusieurs hypothèses d'évolution du climat. Une étape importante dans ce cadre est celle de la régionalisation des scénarii climatiques produits par les modèles globaux vers l'échelle du système ciblé (méthode de la descente d'échelle).

Les modèles climatiques globaux qui permettent de décrire l'évolution du climat à long terme sont basés sur le couplage de quatre sous-modèles dédiés aux principaux compartiments du système climatique, en particulier l'océan et l'atmosphère, afin d'obtenir un modèle décrivant au mieux les interactions entre ces compartiments : les Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA), les Modèles de Circulation Générale des Océans (MCGO), les modèles de banquise, et les modèles traduisant l'effet de la végétation et des sols. L'élaboration des modèles climatiques globaux nécessite dans un premier temps une validation de chacun des modèles le composant.

En France, deux modèles couplés ont été intégrés pour l'étude de la réponse transitoire du système climatique à l'augmentation du gaz carbonique. Il s'agit, d'une part, du modèle atmosphérique du LMD couplé au modèle océanique du Lodyc (Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie), et d'autre part, du modèle atmosphérique ARPEGE du CNRM (Centre National de Recherche Météorologique) couplé au même modèle océanique, à l'aide du coupleur Oasis développé par le Cerfacs. Cependant, l'application à une échelle régionale reste limitée en partie du fait d'une

mauvaise représentation de l'orographie et des conditions d'occupation du sol (type de végétation et type de sol), dont l'influence est prépondérante en Europe (influence des chaînes de montagne, des mers et des océans). Jusqu'à présent, le modèle le mieux adapté pour intégrer l'influence de ces éléments utilise une version non homogène du modèle ARPEGE-Climat.

Tous les modélisateurs s'accordent à dire qu'il existe de nombreuses incertitudes sur les données et les modèles et que, par conséquent, les chiffres obtenus doivent être pris avec beaucoup de précaution, et qu'il est surtout important de retenir les tendances lorsqu'elles sont significatives.

2. Evolution des paramètres hydroclimatiques : de l'échelle globale au territoire nationale français

2.1 Evolution des températures atmosphériques

A l'échelle globale, de nombreuses études mettent en évidence une augmentation globale moyenne de la température atmosphérique au cours du XX^e siècle de l'ordre de 0,6°C (26, 27, 30). Cette évolution de la température est marquée par des paliers et des accélérations, avec notamment deux phases d'augmentation des années 1910 à 1940, puis des années 1970 à nos jours (Figure 1). De plus, la dernière décennie du siècle précédent apparaît comme la période la plus chaude enregistrée depuis que les réseaux météorologiques existent.

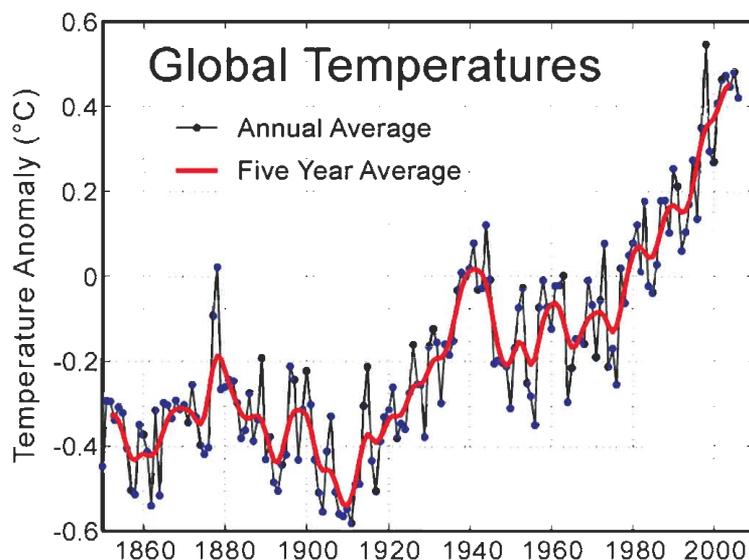


Fig. 1 Evolution de la température atmosphérique globale. Le zéro est la moyenne de température comprise entre 1961 et 1990. (NASA Earth Observatory - Globalwarmingart.com - données IPCC)

Cependant, cette augmentation de température se répartit inégalement à la surface de la Terre. L'augmentation de la température atmosphérique est plus forte dans la région polaire de l'hémisphère Nord, avec une augmentation moyenne comprise entre 1,5 à 2°C,

tandis que l'Europe et la France sont marquées par une augmentation moyenne d'1°C environ. A l'échelle de la France, on note une augmentation comprise entre environ 0,7 et 1,1°C, avec également une répartition spatiale hétérogène sur le territoire (Figure 2).

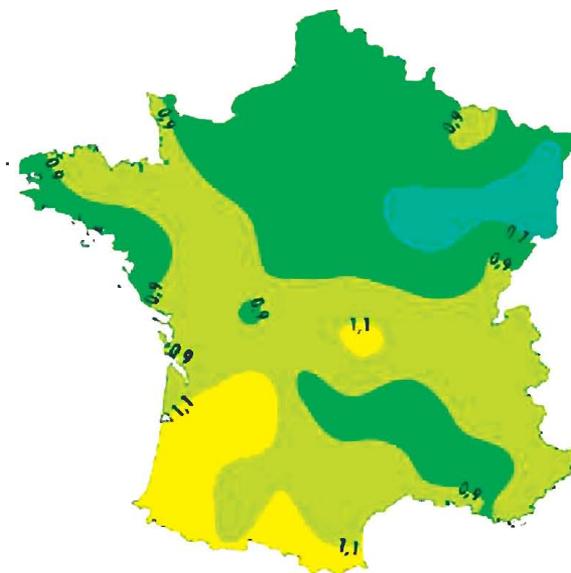


Fig. 2 Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de la température moyenne annuelle, à partir de soixante dix séries homogénéisées (56).

L'IPCC (29, 30) évalue l'augmentation de la température globale de la surface de la Terre, d'ici 2100, entre 1,1 et 6,4°C, mais de façon plus probable entre 1,8 et 4°C (Figure 3).

Global Warming Projections

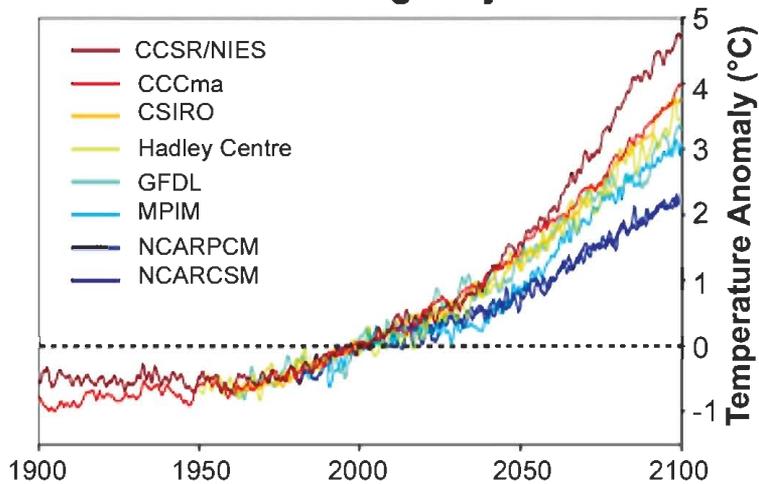


Fig. 3 Modélisation de l'évolution de la température atmosphérique globale à l'horizon 2100 (Globalwarmingart.com, d'après données IPCC, 29, 30).

Cette augmentation de température toucherait toutes les régions du globe, mais toujours de façon inégale spatialement : la région polaire de l'hémisphère Nord serait toujours la plus touchée, ainsi que le territoire de l'Amazonie.

A l'échelle de la France, selon le scénario utilisé, l'augmentation des températures moyennes annuelles pourraient être de l'ordre de

1,5 à 2°C d'ici 2050, et de 3 à 5°C d'ici 2100, avec des disparités plus ou moins importantes en fonction des régions et des saisons concernées. Cette élévation de température serait à l'origine d'une augmentation importante du nombre de jours de canicule en période estivale (Figure 4).

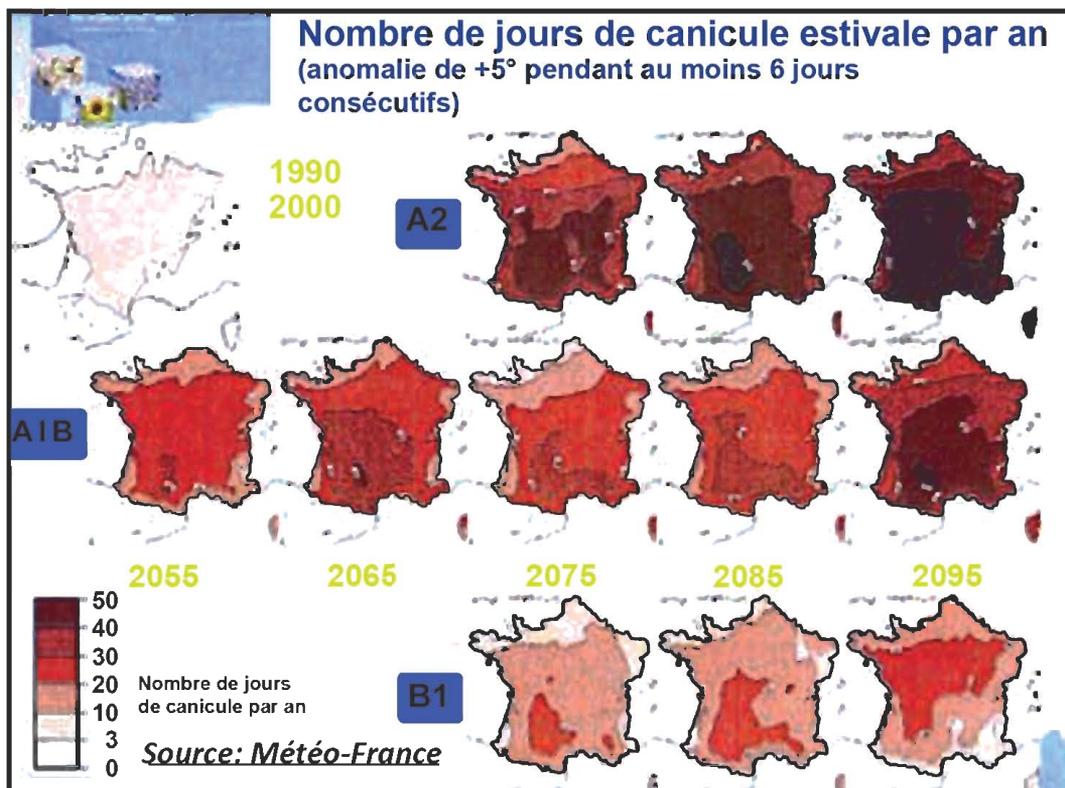


Fig. 4 Modélisation de l'évolution du nombre de jours de canicule par an en France à l'horizon 2100, selon 3 scénarios (Source Météo France).

2.2 Evolution des précipitations

Les résultats des différentes études portant sur l'évolution des précipitations montrent que, dans une moyenne globale, le changement climatique se traduit essentiellement par une intensification des précipitations, en particulier depuis les dernières décennies (22, 34, 35, 21, 74, 31, 52, 61, 50). Ce phénomène d'intensification des précipitations se traduit par une accélération moyenne globale du cycle de l'eau d'environ 3%, du fait de l'augmentation de la température atmosphérique globale provoquant un accroissement de l'évaporation et donc des précipitations (17, 44, 75, 23, 7, 68, 42, 79).

Cependant, ce phénomène d'intensification est inégalement réparti dans le monde. Dans les faits, selon Chahine et al. (12) et Barthelet et al. (8), les phénomènes d'intensifications sont limités aux plus hautes latitudes et aux zones équatoriales, les zones comprises entre 20 et 45° de latitude ne connaissant, de fait, qu'une stagnation de la vitesse du cycle de l'eau, voire marque, dans certaines zones, un ralentissement.

A l'échelle de l'Europe, les mesures compilées par Hulme (28) montrent l'existence d'un dipôle « assèchement méditerranéen » / « humidification sur l'Europe de l'Ouest et du Nord », sur les quinze dernières années. Cette constatation est à relier avec la mise en évidence, par Pozo-Vazquez et al. (67), Rodrigo et al. (70) et Andreo et al. (3), de l'importance de l'effet des variations de la NAO sur le fonctionnement des précipitations. En effet, la NAO, depuis 1990, est essentiellement dans une phase positive, ce qui se traduit par un assèchement de la zone méditerranéenne et une humidification de l'Europe de l'Ouest et du Nord, ce qui est compatible avec les mesures compilées par Hulme (28).

Selon plusieurs études (24, 80, 46, 61, 33, 57, 13, 65), l'intensification des précipitations d'un point de vue mondial s'amplifiera dans l'avenir, provoquant sur la même logique une récurrence plus rapide des événements extrêmes. Ces études mettent également en évidence que c'est surtout au niveau de la répartition mondiale des précipitations que des changements se feront, avec une augmentation des précipitations dans les zones équatoriales et au niveau des pôles, au détriment des zones méditerranéennes, tropicales sèches et tempérées (Figure 5).

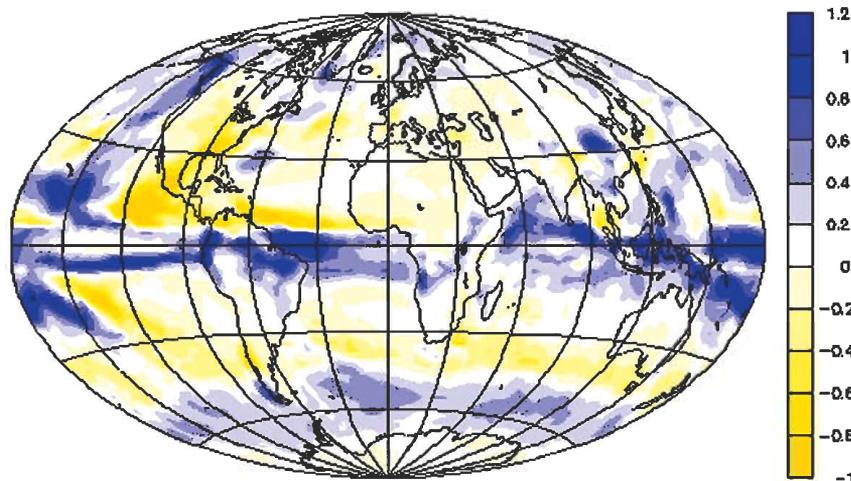


Fig. 5 Anomalies de précipitations (en mm/jour) obtenues à la fin du XXI^{ème} siècle (moyenne des années 2090 à 2099) par rapport à la fin du XX^{ème} siècle (moyenne des années 2000 à 2009) (Modèle IPCC CNRM)

Les travaux d'Arnell (5), de Déqué et al. (16), de Palmer et Räisänen (62), de Werrity (77) et de Sumner et al (73), appliqués à l'Europe de l'Ouest, à l'Angleterre ou à l'Ecosse, montrent que le réchauffement climatique futur augmentera les valeurs des précipitations d'hiver en premier lieu au détriment des précipitations d'été. Ils mettent également en évidence la poursuite probable de l'assèchement du Sud de l'Europe

et d'une plus grande humidification du Nord de l'Europe.

Pour les régions situées au N et NW de la France, il demeure néanmoins de très grandes incertitudes car ces dernières se situent dans la zone de transition : les modèles indiquent une diminution des précipitations annuelles et estivales, tandis qu'en hiver, suivant le modèle, on prévoit une diminution ou une augmentation.

L'évolution des précipitations, que ce soit d'un point de vue mondial ou d'un point de vue régional, influence le fonctionnement des hydrosystèmes et leurs stocks d'eau (superficiels et souterrains), au travers des processus de ruissellement et d'infiltration. L'évolution de ces stocks d'eau mondiaux a un impact sur l'évolution socio-économique mondiale et régionale. C'est pourquoi, de nombreuses études s'intéressent à l'évolution de ces stocks, et notamment au débit des fleuves.

2.3 Evolution des débits et des stocks d'eau

A l'échelle mondiale, de nombreuses études pointent une évolution importante des débits mondiaux. A partir des années 1920, on constate une augmentation du débit des fleuves sur tous les continents, à l'exception de l'Afrique et de l'Europe (36). L'augmentation du débit moyen à l'échelle du globe serait à mettre en relation avec l'augmentation des précipitations moyennes et la fonte des glaciers. Cependant, d'autres études pointent l'existence de nombreuses disparités. A l'échelle globale, les différents auteurs (6, 8, 2, 54, 59, 48, 60, 37)

montrent que c'est surtout dans les hautes latitudes (au-dessus du 50°N et en-dessous du 50°S) et au niveau de l'Equateur que les valeurs de débit montrent une tendance à l'augmentation significative, tandis que dans les latitudes moyennes et dans les régions subtropicales, les valeurs de débit tendent à stagner, voire à diminuer de façon significative, en particulier pendant la période hivernale.

Néanmoins, ils notent également que ces grandes règles connaissent des exceptions régionales. De fait, de nombreuses études à échelle locale (14, 27, 15, 69, 72, 20, 41, 43, 63, 19, 32, 4) montrent qu'il existe des disparités de réponse en fonction des caractéristiques physiographiques du bassin versant de la rivière.

Les mesures satellitaires de l'évolution des stocks d'eau (souterrains et superficiels : fleuves, lacs, humidité des sols) par gravimétrie (GRACE), menées depuis 2002, indiquent également des disparités selon les grands bassins fluviaux mondiaux (Figure 6). Néanmoins, l'évolution moyenne globale serait à la diminution, avec une perte de 60 km³/an de 2002 à 2007.

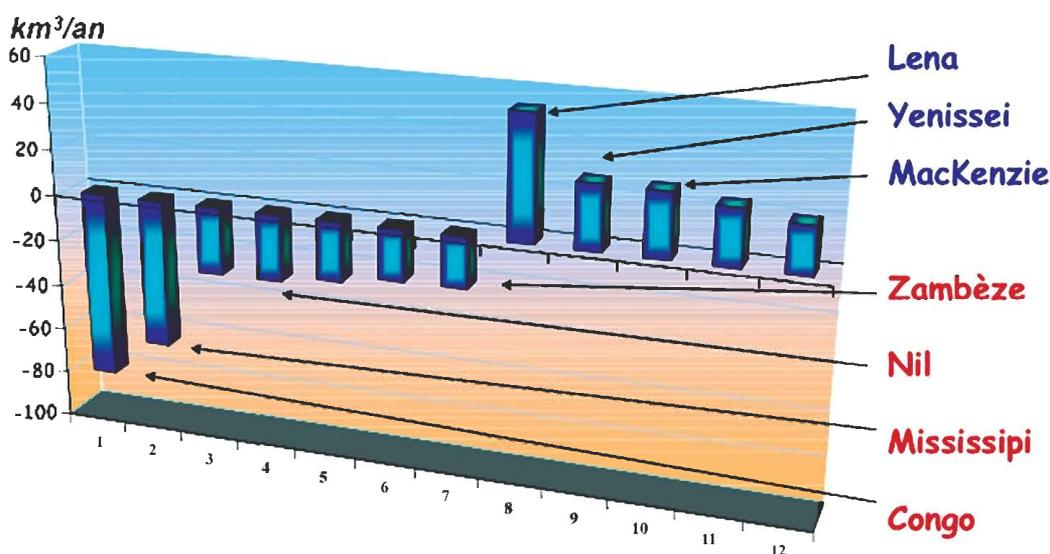


Fig. 6 Tendances sur 2002-2007 des variations de stocks d'eau dans les grands bassins fluviaux d'après GRACE (Gravimétrie spatiale) (11)

A l'échelle mondiale, les projections des modèles évaluent une augmentation du débit moyen mondial de 7,3% d'ici 2050, dû à l'accélération du cycle de l'eau (78). Ceci serait lié à une amplification de l'augmentation des débits dans les hautes latitudes et au niveau de l'Equateur par rapport à ce qui a été

démonstré dans les études des chroniques historiques de débit au cours du XX^e siècle. Les disparités spatiales entre hautes latitudes et équateur où le débit augmentera et les régions subtropicales et méditerranéennes où le débit diminuera seraient donc plus importantes qu'au cours du dernier siècle.

Ces constatations sont également à contrebalancer en fonction du contexte régional, qui voit, par exemple, une augmentation des débits moyens dans le Nord de l'Angleterre et une diminution des débits moyens dans le Sud de l'Angleterre de l'ordre de 5 à 15% d'ici 2050 (5). Ceci serait lié aux caractéristiques propres du bassin versant (morphologie, lithologie, occupation du sol, soutien par la nappe) et à l'existence d'un facteur difficilement mesurable dans l'avenir : l'action anthropique sur l'évolution des bassins versants des fleuves et des rivières. Uhlenbrook et Hoeg (76) avancent que l'évolution de l'utilisation des sols aura un impact important sur le fonctionnement des bassins versants, bien que Herrmann (25) met en avant que les débits ne seront influencés par ce paramètre que de façon graduelle dans l'avenir.

A l'échelle de la France, on postule à l'horizon 2050, quel que soit le fleuve, une diminution voire une stagnation, à l'exception de l'hiver pour les cours d'eau situés dans les Alpes centrales et méridionales.

2.4 Evolution du niveau de la mer

L'augmentation globale des températures atmosphériques n'a pas seulement des conséquences sur l'évolution des précipitations et des débits, mais également sur l'élévation du niveau marin, à cause de la fonte des glaces polaires et de l'expansion du volume océanique par dilatation thermique.

L'élévation globale du niveau de la mer calculée, par des méthodes de relevés satellites ou par des mesures directes, est de 20 cm depuis le début du XX^e siècle (Figure 7).

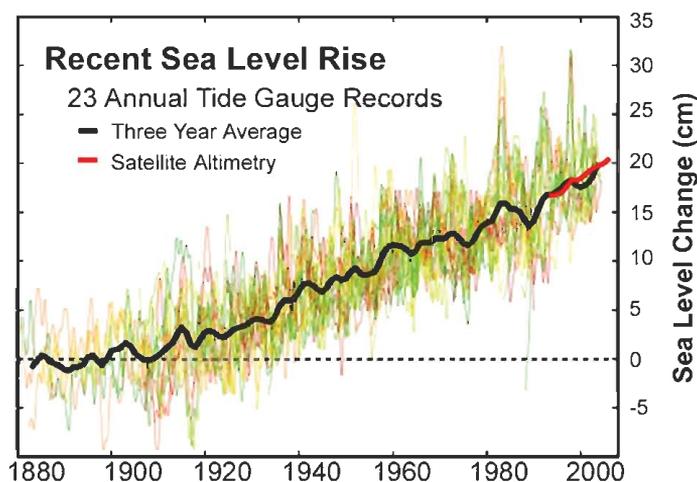


Fig. 7 Augmentation globale du niveau de la mer au cours du XX^e siècle (Globalwarmingart.com – d'après données IPCC, 29, 30)

Cette évolution n'est toutefois pas identique partout dans le monde. Les travaux du LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales) sur les anomalies du niveau de la mer par mesures satellitaires entre 1993 et 2005, montrent par exemple une tendance à la stagnation ou à la diminution du niveau de la mer à l'Est de l'Océan Pacifique et dans l'Océan Indien et une augmentation à l'Ouest du Pacifique et au Nord et au Sud de l'Océan Atlantique.

La distribution géographique des vitesses des variations du niveau de la mer le long des côtes françaises, toujours par données satellites, indique entre 1993 et 2006, une variation comprise entre 0 et + 2,5 mm/an et ponctuellement entre + 2,5 et + 5 mm/an.

Les mesures directes indiquent, quant à elles, des variations comprises entre -0,1 et +0,4 cm/an (Figure 8).

De nombreuses études mettent en avant une montée importante du niveau de la mer au cours du XXI^e siècle. Les travaux de l'IPCC (29, 30) indiquent une élévation du niveau marin comprise entre 18 et 59 cm (Figure 9).

La modélisation de l'élévation du niveau de la mer n'est pas aisée, si bien que l'incertitude sur la valeur proposée est nettement plus grande que pour la température. Ainsi, les études se suivent et indiquent généralement des chiffres à la hausse : de 60 cm comme chiffre maximum, on est passé à 80 cm, puis à 1 m dans certaines études.

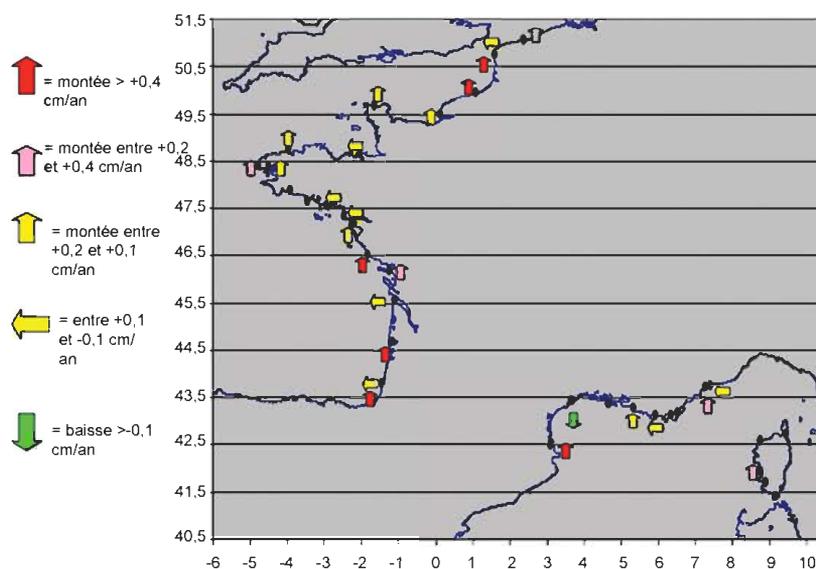


Fig. 8 Résumé simplifié des tendances récentes de variation du niveau moyen de la mer sur les côtes françaises à partir des mesures directes (64).

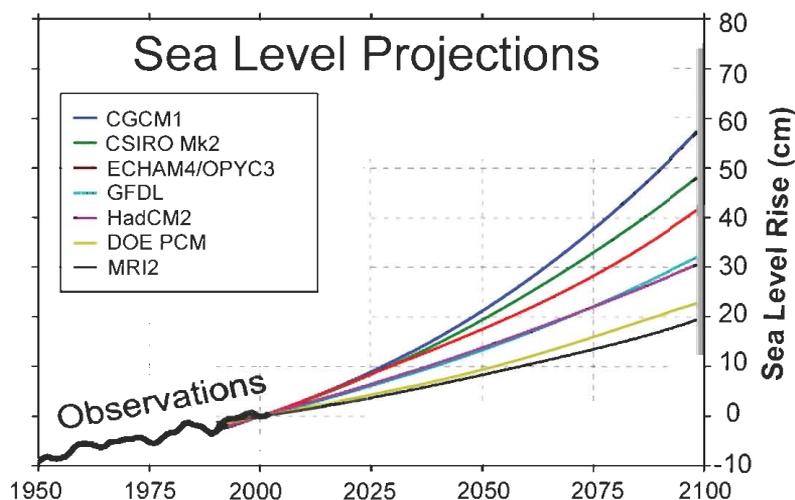


Fig. 9 Modélisation de l'élévation du niveau marin (Globalwarmingart.com – d'après données IPCC, 29, 30) (élévation entre 18 et 38 cm pour le scénario le plus optimiste B1 et entre 26 et 59 cm pour le plus pessimiste A1)

Certains scénarios évoquent une fonte brutale des glaces polaires (45, 58, 66), pouvant provenir d'une arrivée d'eau plus chaude provenant des rivières nordiques. Cela provoquerait une surélévation importante du niveau de la mer, pouvant atteindre une augmentation de cinq mètres en l'espace d'un siècle, ce qui aurait un impact dramatique sur le fonctionnement des rivières et des estuaires du monde, ainsi que sur nos sociétés.

2.5 Evolution de la température des eaux de surface

En parallèle de l'évolution de la température atmosphérique, de par le fait de l'existence

d'interactions entre l'atmosphère et l'océan, de nombreuses études soulignent une augmentation de la température moyenne globale des océans de 1°C au cours du XX^e siècle, en particulier depuis 1980 (Figure 10). Cette augmentation, bien que semblant faible, a d'importantes conséquences. Ainsi, MacKenzie et Schiedek (47) montrent que l'augmentation de la température de surface des eaux a pour conséquence un changement des conditions de vie biologique, permettant à certaines espèces invasives de s'installer dans des endroits qu'elles n'auraient pu coloniser il y a encore deux décennies.

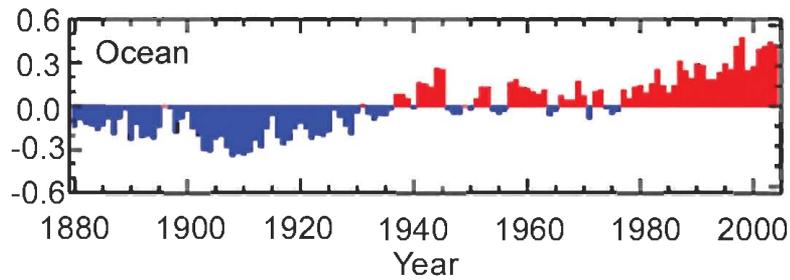


Fig. 10 Evolution de la température de surface des eaux au cours du XX^e siècle (Source : NASA/GISS)

En parallèle, on note une augmentation de la température des eaux des fleuves. Par exemple, sur la Loire, la température de l'eau a augmenté de 0,8 °C entre 1975 et 2005 (Figure 11 ; 55).

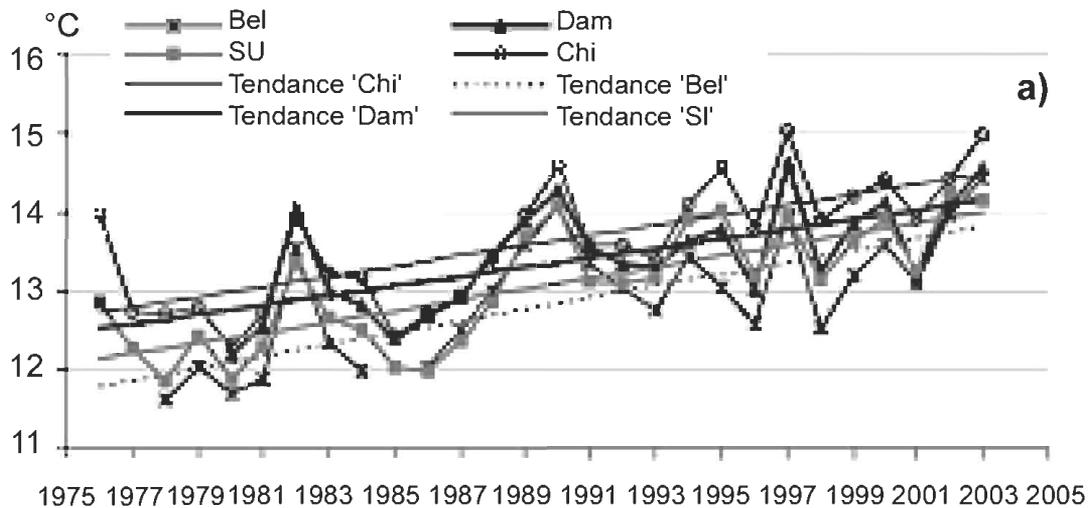


Fig. 11 Evolution de la température de l'eau de la Loire entre les années 1975 et 2005 (55)

3. Evolution des paramètres Hydroclimatiques à l'échelle du bassin versant de la Seine

3.1 Présentation du bassin versant de la Seine

La Seine est un fleuve long de 776 km qui draine un bassin versant de 74 250 km². Le fleuve prend sa source près de Dijon à une altitude de 470 m et se jette en Manche au large du Havre (Figure 12). La superficie du bassin versant de la Seine représente 14% de la superficie nationale. 16 millions d'habitants vivent sur le bassin versant, soit 26% de la population nationale, dont 80% vivent en zone

urbaine. Ce bassin versant concentre 40% de l'activité économique française et 50% du trafic fluvial national. L'occupation du bassin versant de la Seine est dominée par les cultures (60% de la superficie du BV). Le reste du bassin versant est occupée par des prairies, zones boisées, urbaines et quelques surfaces en eau libre.

Le cours de la Seine peut être subdivisé en trois parties : le cours supérieur en amont de la confluence avec l'Oise ; le cours moyen compris entre la confluence avec l'Oise et celle avec l'Èure ; le cours inférieur (ou basse vallée) en aval de la confluence avec l'Èure ou pris le plus souvent en aval du barrage de Poses (zone estuarienne) (Figure 12).

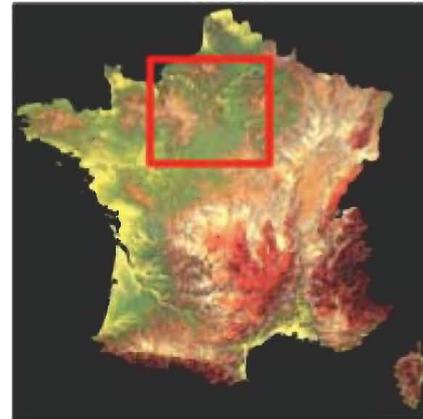


Fig. 12 La Seine

A l'échelle de la Seine, les études sur l'évolution des paramètres hydro-climatiques sont récentes et sont regroupées principalement dans trois programmes : Seine Aval, RexHySS, GICC-Seine.

3.2 Evolution des températures atmosphériques sur le bassin versant de la Seine

Les études montrent clairement une augmentation de la température depuis le siècle dernier (Figure 13 ; 53) et qui se poursuivra jusqu'à l'horizon

2100 (+2 à +4°C). En effet, les scénarios de changement climatique désagrégés dans le cadre du projet RExHySS s'accordent sur une augmentation de la température atmosphérique dans le bassin de la Seine d'ici 2100 (de +1.5 à +3°C en milieu de siècle et entre +2 et +4°C en fin de siècle ; Figure 14 ; 18). Ces scénarios soulignent aussi que la température atmosphérique régionale augmentera quelle que soit la saison, avec un réchauffement légèrement plus fort en été.

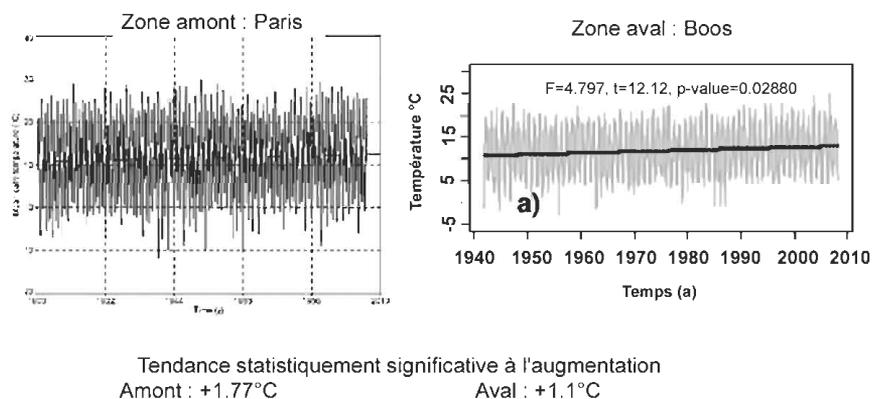


Fig. 13 Variations moyennes mensuelles et tendance des températures sur deux exemples de stations météorologiques : de 1900 à 2007 dans la zone amont du bassin de la Seine et de 1940 à 2007 dans la zone aval (53)

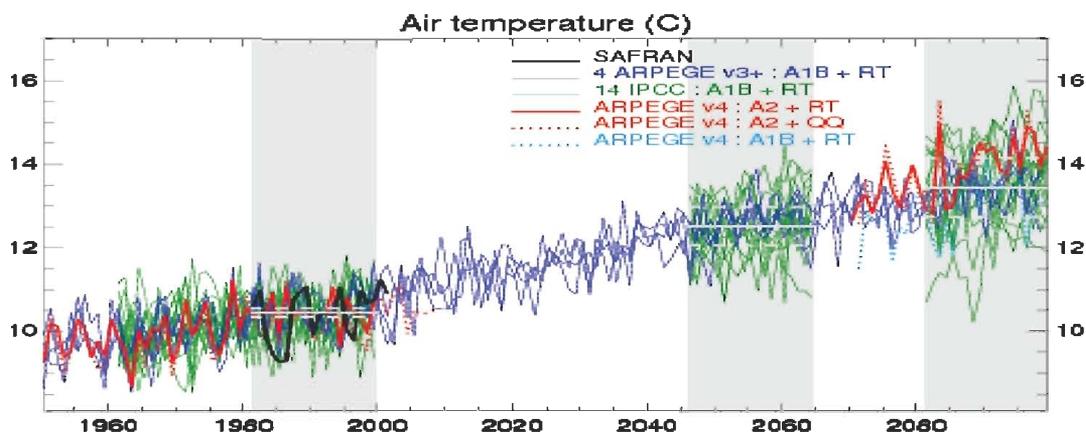


Fig. 14 Evolution de la température de l'air (moyennes annuelles en °C) dans le bassin de la Seine entre 1950 et 2100. La courbe noire représente les analyses SAFRAN basées sur les observations historiques et les courbes en couleur correspondent à 19 scénarios de changement climatique désagrégés dans le cadre du projet REXHySS (18).

3.3 Evolution des précipitations sur le bassin versant de la Seine

Si les précipitations ne montrent pas de tendance significative dans les données enregistrées, en revanche, celles-ci pourraient diminuer d'ici 2100 (-12% en moyenne dans le bassin de la Seine). Les différents scénarios de changement climatique désagrégés dans le cadre du projet REXHySS montrent une réponse concordante des précipitations dans le bassin de la Seine au cours du 21^{ème} siècle (Figure 15) :

- les cumuls annuels montrent une tendance quasi systématique : -6% en moyenne sur tous les scénarios en milieu de siècle, et -12% en moyenne sur tous les scénarios en fin de siècle ;

- au 21^{ème} siècle, seul un scénario régionalisé parmi les 21 montre une augmentation (faible) des précipitations annuelles par rapport au temps présent ;
- à l'échelle saisonnière, la réponse est dominée par une baisse importante et systématique des précipitations estivales ; l'évolution des précipitations hivernales est plus faible en amplitude, mais incertaine sur le signe ;
- la baisse des précipitations se traduit par une augmentation du nombre de jours sans précipitation et une persistance plus importante des épisodes secs; la persistance des événements pluvieux change peu.

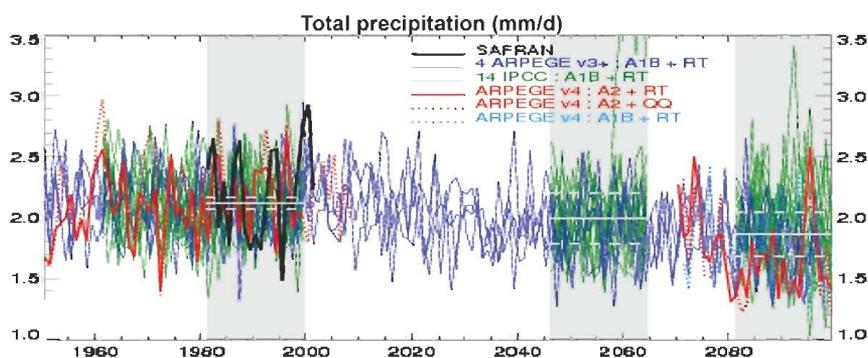


Fig. 15 Evolution des précipitations (moyennes annuelles exprimées en mm/j) dans le bassin de la Seine entre 1950 et 2100. La courbe noire représente les analyses SAFRAN basées sur les observations historiques et les courbes en couleur correspondent à 19 scénarios de changement climatique désagrégés dans le cadre du projet REXHySS (18).

3.4 Evolution des débits et de l'aquifère crayeux sur le bassin versant de la Seine

Bien que l'on n'observe pas de tendance significative à l'augmentation des précipitations, le débit de la Seine (à Poses) et de ses affluents

présente une tendance statistiquement significative à l'augmentation (Figure 16 ; 53). L'augmentation du débit moyen de la Seine, depuis les années 1946, a été évaluée de +10 à +30% selon la tendance ajustée.

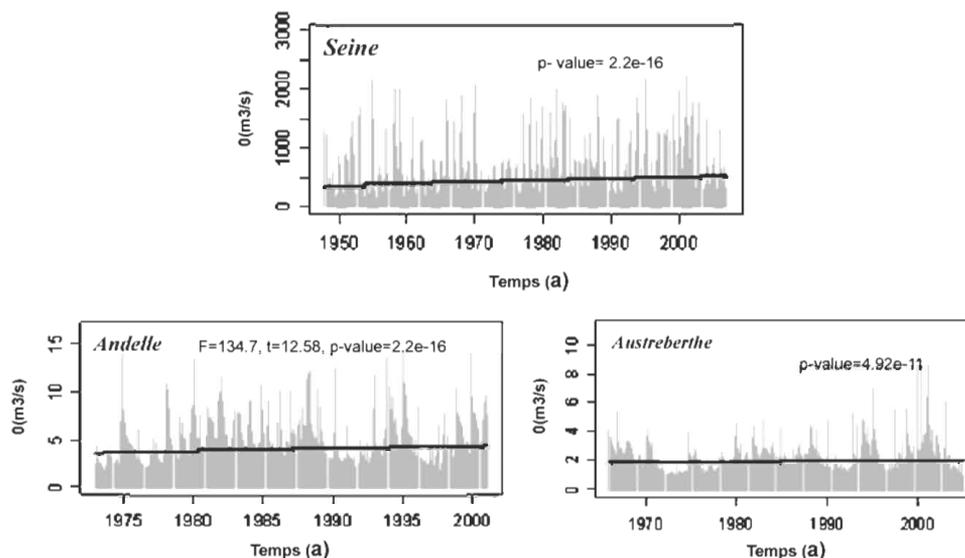


Fig. 16 Tendances dans l'évolution du débit journalier de la Seine et de ses affluents (ex : Austreberthe et Andelle) (53)

Connaître l'évolution de l'aquifère de la craie est essentiel, car c'est lui qui assure le débit de base de la Seine et de ses affluents.

Contrairement au débit de la Seine et de ses affluents, les tendances dans l'évolution piézométrique apparaissent beaucoup plus complexes. En effet, suivant la localisation géographique des piézomètres, la tendance du niveau de la nappe de la craie peut être à l'augmentation, à la stagnation, voire à la diminution. Les tendances ne sont d'ailleurs pas toujours significatives.

En réalité, le comportement différentiel des piézomètres situés dans l'aquifère de la craie s'explique par une surimposition du contexte structural au gradient hydraulique : selon ce contexte, on note une accentuation ou un blocage du drainage, avec des compartiments qui stockent beaucoup d'eau et d'autres moins (71).

L'analyse en ondelettes du débit et de la piézométrie du bassin de la Seine et de ses affluents permet non seulement de retrouver les bandes de fréquences, mais également des ruptures, observables dans la chronique des précipitations moyennes mensuelles (Figure 17). On observe ainsi des bandes de fréquences à 1 (cycle hydrologique), 2-3, 5-7 et 15 ans, présentes également dans l'indice NAO. Pour les discontinuités, on remarque sur le débit de la Seine, qu'en 1970, la bande de fréquence

pluri-biennale perd en puissance, tandis que la bande de fréquence à 15 ans gagne en puissance. Puis, à partir de 1990, on constate un gain de puissance des bandes fréquentielles à 5-7 ans, ainsi qu'un renforcement de la puissance du cycle hydrologique (1 an). Ces deux discontinuités s'observent également dans d'autres hydrosystèmes de tailles différentes de part et d'autre de l'Atlantique et de la Méditerranée, ainsi que dans l'indice climatique NAO (Oscillation Nord Atlantique), ce qui laisse supposer qu'il s'agit de ruptures globales et climatiques.

Les changements climatiques régionaux devraient entraîner un assèchement prononcé du bassin de la Seine au cours du 21ème siècle. Cet assèchement se traduit dans la modélisation par (Figure 18) :

- une tendance à la baisse de l'évapotranspiration, qui s'accroît avec la baisse des précipitations annuelles, mais avec une dispersion assez importante y compris en signe ;
- une baisse de la recharge des nappes, dont il résulte une baisse des niveaux piézométriques de ces nappes et une baisse du débit de base alimenté par ces nappes (voir plus bas) ;
- la résultante est une baisse des débits, en moyenne annuelle et en toute saison, que ce soit en basses et hautes eaux ;
- l'essentiel des changements est acquis dès le milieu de siècle ;

- l'amplitude de la baisse des débits et des niveaux piézométriques est sujette à une incertitude importante, mais elle est robuste (baisse systématique, réponse moyenne supérieure à la dispersion).

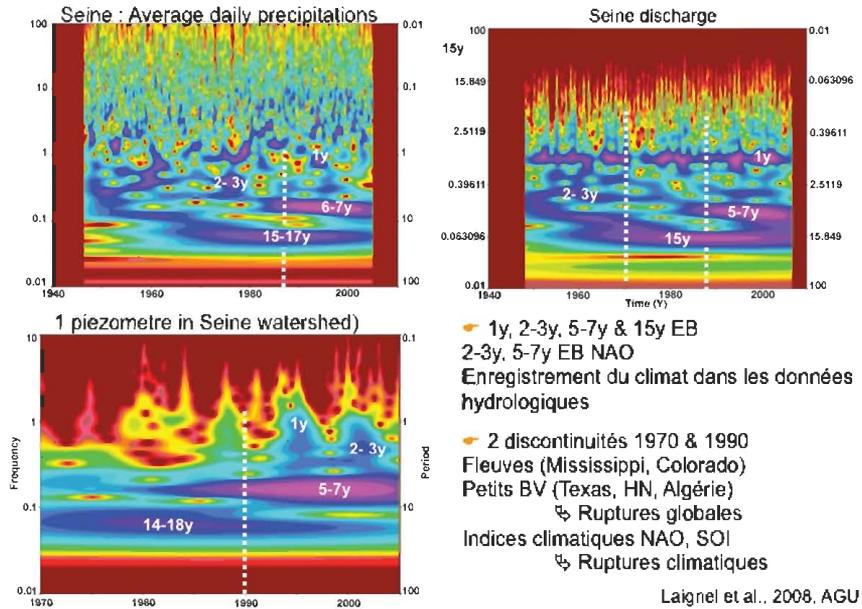


Fig. 17 Enregistrement du climat dans les précipitations, le débit et la piézométrie du bassin de la Seine (38, 39)

Débîts mensuels de la Seine à Poses

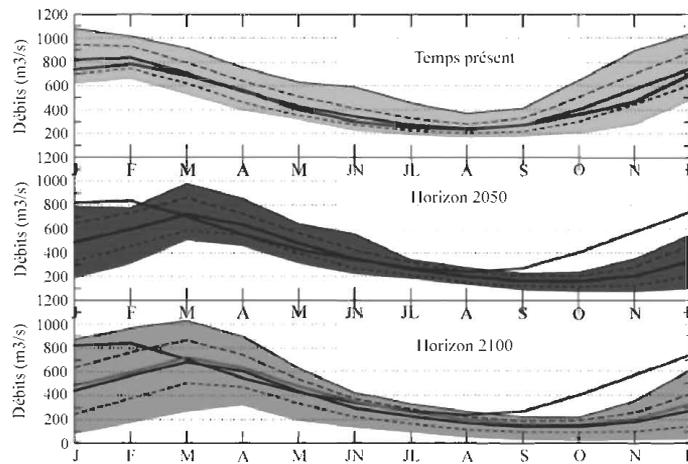


Fig. 18 Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses dans le cadre du projet REXHySS (ensemble de 5 modèles hydrologiques et de 12 scénarios désagrégés). L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. En haut: temps présent, la courbe grise foncée représente la moyenne mensuelle observée. Au milieu Horizon 2050: la courbe grise foncée représente la moyenne temps présent. En bas Horizon 2100: les courbes noires et grises foncées représentent les simulations temps présent et milieu de siècle respectivement. Source : 18.

Les analyses d'incertitude réalisées dans le cadre du projet REXHySS indiquent ainsi une baisse en fin de siècle de 140 m³/s du débit moyen de la Seine à Poses, soit 26% du débit moyen actuel. Les incertitudes autour de cette valeur sont d'environ 50 m³/s (soit environ 10% du débit moyen actuel), et proviennent d'abord des modèles climatiques, puis des modèles hydrologiques.

La réponse au changement climatique des principaux aquifères du bassin de la Seine (Craie, Eocène, Oligocène) a également été simulée dans le cadre du projet REXHySS à l'aide du modèle hydrogéologique MODCOU (40). Les principaux résultats sont une baisse importante de la recharge de ces aquifères : déficits moyens sur l'ensemble des aquifères simulés de 2200 Mm³/a en milieu de siècle

et de 2700 Mm³/a en fin de siècle, en moyenne sur les 19 scénarios désagrégés testés. Ces déficits sont du même ordre de grandeur que les volumes actuellement prélevés sur la totalité du bassin de la Seine, tous usages confondus. Comme seulement 40 % de ces prélèvements ont lieu en nappe, les déficits de recharge sous changement climatique sont

donc largement supérieurs aux prélèvements actuels en nappe.

Cette diminution de la recharge sous changement climatique entraîne bien sûr une baisse sensible des niveaux piézométriques dans les aquifères, dans l'ensemble des formations aquifères du bassin de la Seine, comme illustré dans la Craie (Figure 19).

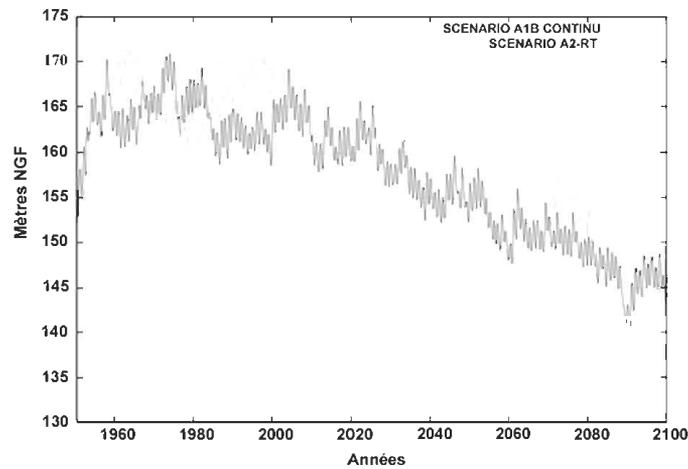


Fig. 19 Évolution de la piézométrie calculée dans la nappe de la Craie à Omécourt (Oise) par le modèle MODCOU, selon deux scénarios de changement climatique (modèle climatique ARPEGE, scénarios d'émissions A2 et A1B, méthode de désagrégation des Régimes de Temps). Source :18.

3.5 Evolution du niveau de la mer au Havre

En ce qui concerne l'élévation du niveau de la mer, l'estimation, à partir des mesures in situ (marégraphiques), semble montrer une accélération sur la période 1993-2006 (+2,7 +/-1,5 mm) comparée à celle 1938-2006 (+1,8 +/-0,4 mm), avec une incertitude cependant plus grande sur la période récente (Figure 20).

Les projections sur l'élévation du niveau marin, quant à elles, présentent des incertitudes d'autant

plus grandes pour l'estuaire de la Seine, qu'elles sont déjà importantes pour les modèles à l'échelle globale, et il n'existe pas de scénario unique à proposer.

Néanmoins, l'élévation du niveau marin dans l'estuaire de Seine soulève bon nombre de questions concernant les zones humides inondables, la progression du gradient de salinité et son impact sur l'écosystème, et donc des questions directement sur la restauration et les zones à protéger ou non dans l'estuaire.

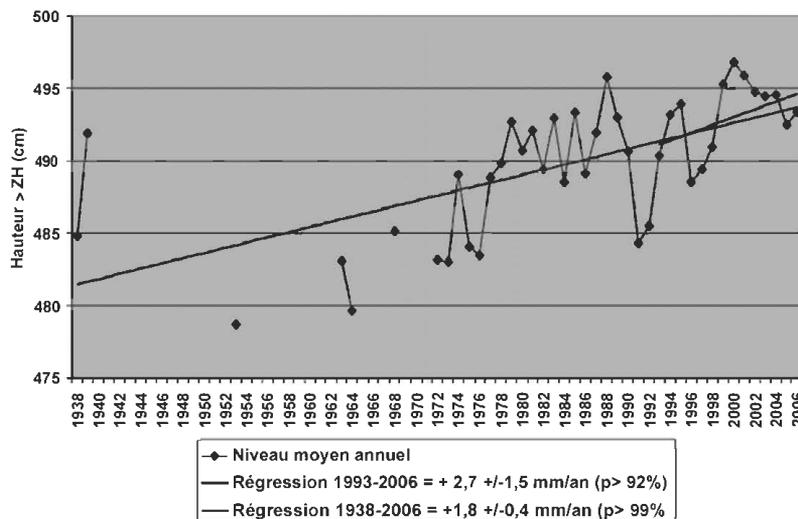


Fig. 20 Variation du niveau moyen de la mer au Havre (64)

A titre illustratif, en se basant sur les données de P. Pirazzoli (64), avec un passage de la cote 8 CMH (niveau moyen de pleine mer de vive eau) à la cote 9 CMH, le GIP Seine Aval a réalisé, à partir du MNT de l'estuaire de la Seine, une image de ce que pourrait devenir l'estuaire en terme de zones inondées (Figure 21). Attention, il ne s'agit que

d'une simple image qui ne doit être en aucun considérée comme la future configuration de l'estuaire. Cependant, cette image a le mérite de positionner la réflexion sur une modification de la zonation actuelle de l'estuaire (niveaux d'eau, salinité, température, régime fluvial...) et ainsi sur les zones à protéger et les actions de restauration.

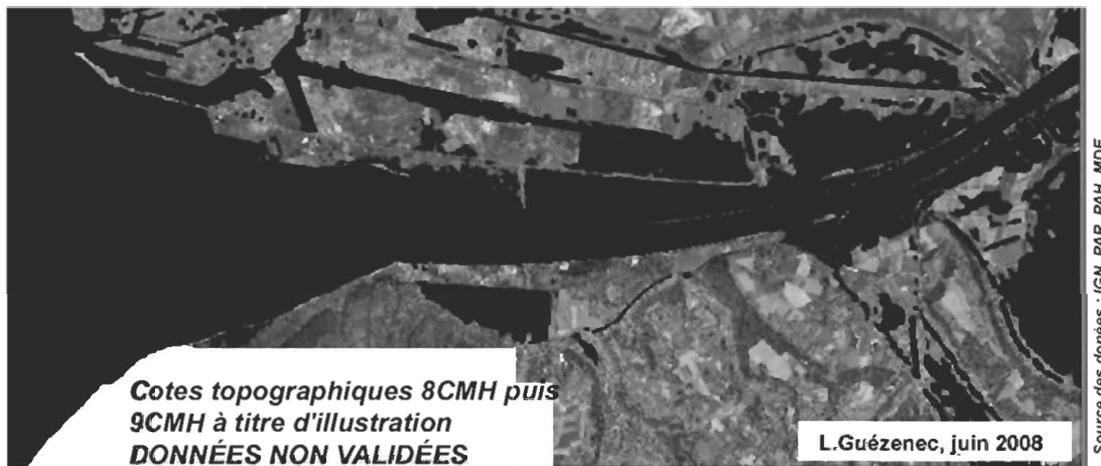


Fig. 21 Image de l'estuaire de Seine dans le cas de figure du passage de la cote 8 CMH (niveau moyen de pleine mer de vive eau) à la cote 9 CMH (selon les données de P. Pirazzoli, 64)

3.6 Impact du changement climatique sur la qualité de l'eau de la Seine

Enfin, concernant la qualité de l'eau, les travaux du GICC-Seine, indiquent que les principaux impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau résulteraient du réchauffement de l'eau (la température de l'eau étant elle-même liée à la température de l'air), qui joue sur la cinétique des différents processus biogéochimiques, et que les effets des changements de débit, qui agissent sur la dilution, la sédimentation et les temps de rétention, seraient moindres.

4. Conclusion

La synthèse de ce projet a mis en avant que, si à l'échelle du globe, les travaux de l'IPCC/GIEC (29, 30) permettent d'avoir une vision relativement synthétique du réchauffement climatique et de ses effets ; en revanche, à des échelles plus restreintes, comme celle des hydrosystèmes régionaux, il devient très difficile d'avoir une vue exhaustive. Dans les études, de l'échelle globale à l'échelle régionale, les paramètres climatiques les plus analysés sont respectivement la température atmosphérique et les précipitations. Les paramètres hydrologiques les plus étudiés sont le débit et les niveaux et stocks d'eau, comprenant notamment

le niveau de la mer et celui des nappes souterraines...

En ce qui concerne la relation entre le changement climatique et la modification de la qualité de l'eau, bien qu'il existe des études sur ce thème, il est très difficile d'avoir une vision synthétique pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment. De plus, ceci est également lié à la disponibilité des données et à la durée d'enregistrement qui doit être généralement au minimum de 30 ans afin de pouvoir réaliser des analyses fiables de la relation entre les fluctuations climatiques et la variabilité hydrologique.

Les différentes études synthétisées dans ce projet ont mis en avant que, même si les effets du changement climatique peuvent être perçus de manière diverse suivant les régions du monde ou même selon la nature des outils utilisés, celles-ci sont en accord : 1) sur le principe même de l'existence de ce changement (observable dans l'augmentation de la température, mais également des précipitations), 2) sur les conséquences potentiellement importantes du changement climatique sur le fonctionnement des hydrosystèmes et de leurs ressources en eau. Ceci s'observe d'ores et déjà, et de grandes tendances significatives peuvent déjà être déduites et sont aussi produites par modélisation sur l'évolution des stocks d'eau, du débit et de la température de l'eau.

A l'échelle de la Seine, plusieurs scénarios d'évolution des paramètres hydroclimatiques à l'horizon 2100 peuvent être proposés,

- élévation de la température atmosphérique de +2 à +4°C,- diminution des précipitations moyennes annuelles de -12% en moyenne,débit moyen annuel de la Seine de -26 % en moyenne (-16 à -36%),
- diminution de la recharge des aquifères de -2700 Mm³/a. En ce qui concerne les projections sur l'élévation du niveau marin, 3 hypothèses peuvent être retenues :

- Valeur minimale à partir de la tendance observée dans les mesures : +18 à +27 cm,

- Valeur haute du GIEC/IPCC : +60 cm,

- Valeur haute du GIEC/IPCC + Surcote : +1 m.

Références Bibliographiques

- (1) Anctil, F., Coulibaly, P., 2004. Wavelet Analysis of the Interannual Variability in Southern Québec Streamflow. *Journal of Climate*, 17: 163-173.
- (2) André J.C., Royer J.F., 1999. Les fluctuations à court terme du climat et l'interprétation des observations récentes en terme d'effet de serre. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 328, 261-272.
- (3) Andreo B., Jiménez P., Duran J.J., Carrasco F., Vadillo I., Mangin A., 2006. Climatic and hydrological variations during the last 117–166 years in the south of the Iberian Peninsula, from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses. *Journal of Hydrology* 324, 24-39.
- (4) Archer, D.R., Fowler, H.J., 2008. Using meteorological data to forecast seasonal runoff on the River Jhelum, Pakistan. *Journal of Hydrology* 361, 10– 23.
- (5) Arnell, N.W., 1996. *Global warming, river flows and water resources*. Wiley, Chichester.
- (6) Arnell, N.W., 1999. *The impacts of climate change on water resources*. Meteorological Office, Climate change and its impacts. Hadley Centre, Bracknell.
- (7) Arnell, N.W., Liu, C., Compagnucci, R., da Cunha, L., Hanaki, K., Howe, C., Mailu, G., Shiklomanov, I., Stakhiv, E., 2001. *Hydrology and water resources*. In: McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J., White, K.S. (Eds.), *IPCC Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability, The Third Assessment Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, 1000. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 133–191 (1000 pages).
- (8) Barthelet P., Bony S., Braconnot P., Braun A., Cariolle D., Cohen-solal E., Dufresne J.-L., Delecluse P., Dequik M., Fairhead L., Filiberti M.-A., Forichon M., Grandpeix J.-Y., Guilyardi E., Houssais M.N., Imbard M., Le Treut H., Levy C., Li Z.X., Madec C., Marquet P., Marti O., Planton S., Terray L., Thual O., Valcke S., 1998. Global coupled simulations of climate change due to increased atmospheric CO₂ concentration, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 326, serie Ila,677-684.
- (9) Bower D., Hannah D.M., McGregor G.R., 2004. Techniques for assessing the climatic sensitivity of river flow regimes, *Hydrological Processes*,18, 2515-2543.
- (10) Bower D., McGregor G.R., Hannah D.M., Sheridan S.C., 2007. Development of a Spatial Synoptic Classification Scheme for Western Europe, *International Journal of Climatology*, 27, 2017-2040 DOI:10.1002/joc.1501.
- (11) Cazenave A., 2008 - L'eau en questions : une mesure spatiale de la ressource. Forums régionaux du savoir, Hôtel de Région Haute-Normandie, 4 décembre 2008.
- (12) Chahine, M.T., Haskins, R., Fetzer, E., 1997. Observation of the recycling rate of moisture in the atmosphere: 1988-1994. *GEWEX News (WRCP)*, 7,4,1-4.
- (13) Christensen, O.B., Christensen, J.H., 2004. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global and Planetary Change* 44, 107–117.
- (14) Cullen HM, De Menocal PB., 2000. North Atlantic influence on Tigris–Euphrates streamflow. *International Journal of Climatology* 20: 853–863.
- (15) Cullen HM, Kaplan A, Arkin PA, DeMenocal PB., 2002. Impact of the North Atlantic oscillation on the Middle Eastern climate andnStreamflow. *Climatic Change* 55: 315–338.
- (16) Déqué M., Marquet P., Jones R.G., 1998. Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Clim. Dynam.*, 14, 173-1 89.
- (17) DelGenio, A.D., Lacis, A.A., Ruedy, R.A., 1991. Simulations of the effect of a warmer climate on atmospheric humidity. *Nature* 351, 382–385.

- (18) Ducharme 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, Gascoin S, Rieu J, 2009 - Rapport final du Projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. www.sisyphe.jussieu.fr, 62 p.
- (19) Dupuis, H., Michel, D., Sottolichio, A., 2006. Wave climate evolution in the Bay of Biscay over two decades. *Journal of Marine Systems* 63, 105–114.
- (20) Eckhardt, K., Ulbrich, U., 2003. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology* 284, 244–252.
- (21) Francis, D., Hengeveld, H., 1998. Extreme weather and climate change. Environment Canada, Downsview, Ontario.
- (22) Forland, E.J., Alexandersson, H., Drebs, A., Hamssen-Bauer, I., Vedin, H., Tveito, O.E., 1998. Trends in maximum 1-day precipitation in the Nordic region. DNMI report 14/98, Klima, Norwegian Meteorological Institute, Oslo, pp. 1–55.
- (23) Held, I.M., Soden, B.J., 2000. Water vapor feedback and global warming. *Annu. Rev. Energy Environ.* 25, 441–475.
- (24) Hennessy, K.J., Gregory, J.M., Mitchell, J.F.B., 1997. Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions. *Climate Dynamics* 13, 667–680.
- (25) Herrmann, A., 2004. Runoff formation in mountainous environments and possible effects of global warming. In: *Studies in mountain hydrology* (Eds: Herrmann, A. and Schröder, U.), IHP/HWRP Berichte 2, Koblenz.
- (26) Houghton J.T., Meiro Filho L.G., Callander B. A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K. (bds), 1996. *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change*, Cambridge.
- (27) Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.C., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A., 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (28) Hulme M., 1992. A 1951-1980 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models, *Clim. Dynam.*, 7, 57-72.
- (29) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- (30) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Impacts, Adaptation & Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge.
- (31) Iwashima, T., Yamamoto, R., 1993. A statistical analysis of the extreme events: long-term trend of heavy daily precipitation. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 71, 637–640.
- (32) Jyrkama, M.I., Sykes, J.F., 2007. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario). *Journal of Hydrology* 338, 237–250.
- (33) Jones, P.D., Reid, P.A., 2001. Assessing future changes in extreme precipitation over Britain using regional climate model integrations. *International Journal of Climatology* 21, 1337–1356.
- (34) Karl, T.R., Knight, R.W., 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79, 1413–1449.
- (35) Kunkel, K.E., 2003. North American trends in extreme precipitation. *Natural Hazards* 29, 291–305.
- (36) Labat, D., Goddérès, Y., Probst, J.L., Guyot, J. L., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27, 631–642.
- (37) Labat, D., 2008. Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers. *Advances in Water Resources* 31, 109–117.
- (38) Laignel B., Massei N., A. Rossi, J Mesquita, S. Slimani, 2008. Some examples of water resources variability in the context of climatic fluctuations (poster). AGU, San Francisco 2008.
- (39) Laignel B., Massei N., Rossi A., Mesquita J., Slimani S., 2010 - Water resources variability in the context of climatic fluctuations on both sides of the Atlantic Ocean. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources*. Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). IAHS Publ. 340.
- (40) Ledoux E, Girard G, de Marsily G, Villeneuve JP, Deschenes J., 1989. Spatially distributed modeling: conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In: Morel-Seytoux HJ, editor. *Unsaturated flow in hydrologic modeling—theory and practice*. NATO ASI Ser. CNorwell, Massachusset: Kluwer Academic, 435–54.

- (41) Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., Gasse, F., 2003. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology* 275, 67–85.
- (42) Liepert, J., Roeckner, E., Lohmann, U., Liepert, B.G., 2004. Aerosols dampen the water cycle in a warmer and moister world. *Geophys. Res. Lett.* 31. doi:10.1029/2003GL0190660.
- (43) Liu, B., Yang, D., Ye, B., Berezovskaya, S., 2005. Long-term open-water season stream temperature variations and changes over Lena River Basin in Siberia. *Global and Planetary Change* 48, 96–111.
- (44) Loaciga, H.A., Valdes, J.B., Vogel, R., Garvey, J., Schwarz, H., 1996. Global warming and the hydrologic cycle. *J. Hydrol.* 174, 83–127.
- (45) Lonsdale, K.G., Downing, T.E., Nicholls, R.J., Parker, D., Vafeidis, A.T., Dawson, R., Hall, J., 2008. Plausible responses to the threat of rapid sea-level rise in the Thames Estuary. *Climatic Change* 91, 145–169.
- (46) MacGuffie, K., Henderson-Sellers, A., Holbrook, N., Kothavola, Z., Balachova, O., Hoekstra, J., 1999. Assessing simulations of daily temperature and precipitation variability with global climate models for present and enhanced greenhouse climates. *International Journal of Climatology* 19, 1–26.
- (47) MacKenzie, B.R., Schiedek, D., 2007. Long-term sea surface temperature baselines—time series, spatial covariation and implications for biological processes. *Journal of Marine Systems* 68, 405–420.
- (48) Manabe, S., Wetherald, R.T., Milly, P.C.D., Delworth, T.L., Stouffer, R.J., 2004. Century-scale change in water availability: CO₂-quadrupling experiment. *Climatic Change* 64, 59–76.
- (49) Mann, H.B., 1945. Non-parametric test against trend, *Econometrica*, 13, 245–259.
- (50) Massei, N., Durand, A., Deloffre, J., Dupont, J. P., Valdès, D., Laignel, B., 2007. Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in northwestern France over the past 35 years. *Journal of Geophysical research* 112.
- (51) Massei, N., Laignel, B., Deloffre, J., Mesquita, J., Motelay, A., Lafite, R. & Durand, A., 2009. Long-term hydrological changes of the Seine river flow (France) and their relation to the North-Atlantic Oscillation over the period 1950–2008. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.2022.
- (52) Masson, S.J., Waylen, P.R., Mimmack, G.M., Rajaratnam, B., Harrison, J.M., 1999. Changes in extreme rainfall events in South Africa. *Climatic Change* 41, 249–257.
- (53) Mesquita, J., 2009. Facteurs de contrôle des modalités de la réponse hydrologique des bassins versant en substrat carbonaté : comparaisons entre la Haute Normandie et la région d’Austin au Texas. *Hydrologie. Thèse Doctorat, Univ. Caen*, 179 p.
- (54) Milly, P.C.D., Wetherald, T.T., Dunne, K.A., Delworth, T.L., 2002. Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature* 415, 514–517.
- (55) Moatar, F., Meybeck, M., 2005. Compared performances of different algorithms for estimating annual nutrient loads discharged by the eutrophic River Loire. *Hydrological Processes*, 19(2): 429–444.
- (56) Moisselin J.M., Schneider M., Canellas C., Mestre O., 2002. Les changements climatiques en France au 20^{ème} siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, n°38, août 2002, 45–56.
- (57) New, M., Todd, M., Hulme, M., Jones, P., 2001. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology* 21, 1899–1922.
- (58) Olsthoorn, X., van der Werff, P., Bouwer, L.M., Huiteima, D., 2008. Neo-Atlantis: The Netherlands under a 5-m sea level rise. *Climatic Change* 91, 103–122.
- (59) Oltchev, A. Cermak, J., Gurtz, J., Tishenko, A., Kiely, G., Nadezhdina, N., Zappa, M., Lebedeva, N., Vitvar, T., Albertson, J.D., Tatarinov, F., Tishenko, D., Nadezhdin, V., Kozlov, B., Ibrom, A., Vygodskaya, N., Gravenhorst, G., 2002. The response of the water fluxes of the boreal forest region at the Volga’s source area to climatic and land-use changes. *Physics and Chemistry of the Earth* 27, 675–690.
- (60) Onuchin, A., Baltzer, H., Borisova, H. and Blyth, E., 2006. Climatic and geographic patterns of river runoff formation in Northern Eurasia. *Advances in Water Resources*, 29(9): 1314–1327.
- (61) Osborn, T.J., Hulme, M., Jones, P.D., Basnett, T. A., 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. *International Journal of Climatology* 20, 347–364.
- (62) Palmer, T.N., Räisänen, J., 2002. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature* 415, 512–514.

- (63) Pekárová, P., Koníček, A., Miklánek, P., 2005. Influence of landuse on runoff regime in experimental microcatchments of the Institute of Hydrology SAS. Veda, Bratislava, ISBN 80-224-0865-4, 216 pp.
- (64) Pirazzoli P.A., 2008. Evolution et projections du niveau moyen des mers et des phénomènes de surcotes: les hypothèses pour analyser les effets sur l'estuaire de la Seine et le littoral. Séminaire de lancement de l'expertise collective sur le changement climatique, GIP Seine Aval, juin 2008, Maison de l'Université de Rouen, <http://seine-aval.crihan.fr>.
- (65) Planton, S., Déqué, M., Douville, H., Spagnoli, B., 2005. Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *C.R.Geoscience* 337, 193–202.
- (66) Poumadère, M., Mays, C., Pfeifle, G., Vafeidis, A.T., 2008. Worst case scenario as stakeholder decision support: a 5- to 6-m sea level rise in the Rhone delta, France. *Climatic Change* 91, 123–143.
- (67) Pozo-Va'zquez, D., Esteban-Parra, M.J., Rodrigo, F.S., Castro Díez, Y., 2000. An analysis of the variability of the North Atlantic Oscillation in the time and the frequency domains. *International Journal of Climatological* 20, 1675–1692.
- (68) Ramanathan, V., Krutzen, P.J., Kiehl, J.T., Rosenfeld, D., 2001. Aerosols, climate, and the hydrologic cycle. *Science* 294, 2119–2124.
- (69) Rimbu, N., Boroneant, C., Buta, C., Dima, H., 2002. Decadal variability of the Danube river flow in the lower basin and its relation with the North Atlantic Oscillation. *Int. J. Climatol.* 22:1169–1179.
- (70) Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M.J., Pozo-Va'zquez, D., Castro Díez, Y., 2000. Rainfall variability in S Spain on decadal to centennial time scales. *International Journal of Climatological* 20, 721–732.
- (71) Slimani, S., 2009. Les fonctionnements hydrologiques de l'aquifère karstifié de la Craie de Haute-Normandie: conséquences des contextes morphologiques et structuraux. Thèse Doctorant, Univ. Rouen, 261 p.
- (72) Stanev EV, Peneva EL., 2002. Regional sea level response to global climatic change: Black Sea examples. *Global and Planetary Changes* 32: 33–47.
- (73) Sumner, G.N., Romero, R., Homar, V., Ramis, C., Alonso, S., Zorita, E., 2003. An estimate of the effects of climate change on the rainfall of Mediterranean Spain by the late twenty first century. *Climate Dynamics* 20, 789–805.
- (74) Suppiah, R., Hennessy, K.J., 1998. Trends in total rainfall, heavy rain events and number of dry days in Australia. *International Journal of Climatology* 18, 1141–1164.
- (75) Trenberth, K.E., 1999. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change* 42, 327–339.
- (76) Uhlenbrook, S., Hoeg, S., 2003. Quantifying uncertainties in tracer-based hydrograph separations: a case study for two-, three- and five-component hydrograph separations in a mountainous catchment. *Hydrol. Processes*, 17, 431-453.
- (77) Werritty, A., 2002. Living with uncertainty: climate change, river flows and water resource management in Scotland. *The Science of the Total Environment* 294, 29–40.
- (78) Wetherald, R.T., Manabe, S., 2002. Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *Journal of Geophysical Research* 107, D19.
- (79) Wild, M., Ohmura, A., Gilgen, H., Rosenfeld, D., 2004. On the consistency of trends in radiation and temperature record and implications for the global hydrologic cycle. *Geophys. Res. Lett.* 31, L11201 doi: 10.11029/2003L091188.
- (80) Zwiers, F.W., Kharin, V.V., 1998. Changes in the extremes of the climate simulated by CCC GCM2 under CO2 doubling. *Journal of Climate* 11, 2200–2222.