

**Les effets du changement climatique dans le contexte des
changements globaux
Expertise collective sur l'estuaire de Seine**

Synthèse sur les thèmes :

**Climatologie-Hydrologie
Qualité de l'eau**

Février 2010

Introduction

Actuellement de nombreux écosystèmes marins, estuariens, fluviaux et lacustres subissent des changements majeurs dans leur composition et/ou structure, et par conséquent 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. Par conséquent, un des défis majeurs des recherches scientifiques sur l'évolution et le devenir de ces écosystèmes est l'identification des mécanismes clés dans les interactions climat – homme – écosystèmes. Parmi ces différents écosystèmes, les estuaires, du fait de leur position à l'interface continent-mer, sont des systèmes complexes particulièrement sensibles aux changements climatiques et aux variations du niveau marin associées. De plus ces écosystèmes ont subi, depuis plusieurs siècles, une forte anthropisation (aménagement portuaire, endiguement...). Dans le cas de l'estuaire de Seine, l'incidence de ces aménagements sur l'évolution de l'estuaire a été relativement bien étudiée. En revanche, l'évolution de l'estuaire dans le contexte climatique global n'a pas encore été abordée.

De nombreux programmes ont été lancés pour étudier ces changements climatiques et leurs impacts. Parmi ceux-ci, on peut citer le programme NAST (National Assessment Synthesis Team, 2001), centré sur l'impact des changements climatiques aux Etats-Unis, et ACIA (Arctic Climate Impact Assessment, 2004), qui a évalué et synthétisé les travaux sur l'augmentation des radiations ultraviolet et leurs conséquences dans le fonctionnement climatique global.

Le programme Seine-Aval est un de ces programmes d'études et de recherche interdisciplinaire, appliqué sur l'estuaire de la Seine et qui a débuté en 1995. La zone d'étude couvre les cent soixante kilomètres de Poses, en amont de Rouen, à la baie de Seine. La quatrième phase du programme Seine-Aval se structure autour de trois axes « Système d'observation, Reconquête et restauration, Risques sanitaires et environnementaux » associés à trois questions respectives (posées par les partenaires du GIP Seine-Aval) : Comment va l'estuaire et comment évolue-t-il ? ; Quel estuaire voulons-nous ? A quels risques sanitaires et environnementaux sont exposées les populations de l'estuaire ? La réponse à ces questions, ne peut être envisagée qu'une fois replacées dans un cadre plus global d'évolution du climat, paramètre forçant naturel moteur de l'évolution des écosystèmes. Le projet d'expertise collective sur les effets du changement climatique sur l'estuaire de Seine dans le contexte des changements globaux s'insère donc dans ce cadre, et répond ainsi à l'une des priorités définies dans l'appel à proposition Seine Aval 4 – 2008 (Priorités 1 : Effets du changement climatique)

Il a pour objectifs de :

- reformuler les questions de société issues des partenaires du GIP Seine-Aval en problématiques scientifiques,
- créer une base commune de connaissances scientifiques thématiques des effets des changements climatiques sur les estuaires et le bassin de la Seine,
- développer une expertise intégrée (pluridisciplinaire) adaptée au contexte de l'estuaire de Seine,
- apporter les premiers éléments de réponses collectives aux principales questions que se posent les partenaires.

L'objectif final du projet étant de définir les questions prioritaires en terme de recherche et d'orienter les projets du programme Seine-Aval sur le thème des effets du changement climatique sur l'estuaire de Seine.

Le présent rapport a pour objectif de réaliser une synthèse sur les relations entre climat et hydrologie. Il s'articulera en quatre parties :

- le contexte qui s'attachera à une présentation générale du climat, puis de l'objet d'étude, la Seine ;
- les données et méthodes utilisées pour traiter les relations entre climat et hydrologie ;
- une synthèse bibliographique des travaux récents sur les impacts hydrologiques du changement climatique à l'échelle du globe et nationale ;
- une synthèse des travaux menés sur la relation climat/hydrologie sur la Seine.

1. Contexte

1.1. Présentation générale du climat

Le climat est généralement défini comme étant les conditions moyennes existantes dans un endroit donné, calculées d'après des observations d'au moins trente ans, selon la définition de l'Organisation Météorologique Mondiale. Il est donc caractérisé par des valeurs moyennes, mais également par des variations et des valeurs extrêmes.

A l'échelle de la planète, le climat représente un ensemble complexe qui est le produit, dans l'espace et dans le temps, de toute une série d'interactions et de rétroactions entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère.

L'énergie faisant fonctionner le climat tel qu'on le connaît est fournie très majoritairement par le soleil ; les autres sources d'énergies étant, en comparaison, de valeurs négligeables (342W/m^2 en moyenne pour l'énergie solaire, $0,05\text{ W/m}^2$ en moyenne pour l'énergie interne de la Terre).

Cependant, la répartition de l'énergie solaire se fait de manière inégale tant d'un point de vue spatial que temporel. En effet, la Terre est soumise à la variation de trois paramètres physiques, appelés cycle de Milankovitch : l'excentricité, l'obliquité et la précession climatique de la Terre. De ce fait, il existe une répartition temporelle de l'énergie solaire, suivant des périodicités à court terme (échelle journalière), du fait de la rotation de la Terre sur elle-même, à moyen terme (échelle saisonnière), du fait de la rotation de la Terre autour du soleil, et à long et très long termes (échelle annuelles à millénaires), du fait de la périodicité des paramètres du cycle de Milankovitch.

Il existe également une répartition spatiale de l'énergie solaire du fait de l'obliquité de la Terre par rapport au soleil. En effet, la zone d'exposition au soleil est plus faible au niveau de l'Equateur qu'aux pôles, ce qui provoque une concentration plus importante de l'énergie solaire au mètre carré au niveau de l'Equateur, concentration tendant à diminuer au fur et à mesure que l'on remonte dans les latitudes.

De par le fait de ces répartitions inégales d'énergie sur la Terre, il existe des mouvements atmosphériques et hydrosphériques qui cherchent à répartir équitablement l'énergie reçue sur toute la surface du globe terrestre. C'est pourquoi l'énergie solaire explique en grande partie les mouvements atmosphériques et hydrosphériques globaux.

Cependant, l'effet de la rotation de la Terre sur elle-même n'est pas négligeable : les masses d'air se déplaçant verticalement des pôles vers l'Equateur subissent une dérive de leur trajectoire due à l'effet de rotation terrestre, appelé force de Coriolis. Cette dérive est provoquée par la différence de vitesse de rotation existant entre les pôles (120m/s au 70° contre 465m/s à l'Equateur). Ainsi, une masse d'air partant du Nord et se déplaçant vers l'Equateur ne ralentit pas : elle se retrouve en retard par rapport au déplacement terrestre.

Il existe donc un fonctionnement atmosphérique global (fig. 1), avec des centres d'action de haute pression atmosphérique (anticyclones) et de basse pression atmosphérique (dépressions), qui interagissent étroitement entre eux. Ces interactions régissent l'état des conditions climatiques pour une région donnée, en fonction de l'intensité relative des différents centres d'action.

Figure 1 : Schéma de la circulation horizontale de l'atmosphère en Juillet (a) et en Janvier (b) (NOAA)

Les régimes climatiques et leurs fluctuations peuvent donc être décrits au moyen d'indices climatiques qui traduisent les variations relatives de ces différents centres d'action.

Par exemple, en Europe, l'Oscillation Nord-Atlantique (NAO ; Hurrell, 1995 et Hurrell et Van Loon 1997 ; Rind et al., 2002 ; Trigo et al., 2004) représente une redistribution de masse atmosphérique entre les régions arctiques ou subarctiques et les régions subtropicales de l'Atlantique. Plus précisément, la NAO lie l'intensité de la dépression d'Islande à la force et l'extension de l'Anticyclone des Açores. Le champ de pression de surface au niveau de la mer, pour lequel on dispose de séries chronologiques relativement longues est classiquement utilisé pour caractériser l'oscillation. On parle de phase positive lorsque les deux centres d'action se renforcent (creusement de la dépression d'Islande, gonflement et intensification de l'Anticyclone des Açores) ou de phase négative lorsque les deux centres s'affaiblissent simultanément (Figure 2). Ces deux phases, positives et négatives, jouent un rôle sur le déplacement du rail de dépressions qui détermine l'emplacement des dépressions (donc des précipitations) en Europe. Ainsi, lors d'une phase de NAO positive, le rail de dépressions est anormalement haut, ce qui provoque un accroissement des précipitations dans le Nord de l'Europe et une sécheresse plus importante dans le Sud de l'Europe. A l'inverse, lors d'une phase de NAO négative, le rail de dépressions est anormalement bas, ce qui provoque une diminution des précipitations dans le Nord de l'Europe et une augmentation de ceux-ci dans le Sud de l'Europe. De par sa localisation géographique, la NAO joue un rôle majeur sur le fonctionnement climatique de la zone Européenne (Hurrell, 1995 ; Hurrell et Van Loon, 1997), en particulier sur les précipitations et tempêtes associées (Rogers, 1997 ; Ulbrich et Christoph, 1999 ; Ulbrich et al., 1999 ; Mares et al., 2002 ; Keim et al., 2004).

Figure 2 : Evolution de l'indice annuel de l'Oscillation Nord Atlantique, Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK

L'Oscillation Arctique est un autre exemple d'indice introduit pour traduire la variabilité des différences de pression atmosphérique existant entre le pôle Nord et la valeur moyenne de la pression atmosphérique existant à la mi-latitude de l'hémisphère Nord. Une phase AO positive (lorsque la pression atmosphérique moyenne de mi-latitude de l'hémisphère Nord est supérieure à la pression atmosphérique du pôle Nord) se traduit par un renforcement des vents d'Ouest, donnant un hiver plus doux en Europe, tandis qu'en phase AO négative, les vents d'Ouest perdent en force, ce qui se traduit par un hiver plus froid en Europe.

Que ce soit à un pas de temps mensuel ou à un pas de temps annuel, le calcul de la valeur de corrélation entre la NAO et la AO (Figure 3) indique une très bonne corrélation temporelle entre ces deux signaux (supérieure à 0,95), qui sont, de ce fait, fortement liés.

Figure 3 : Evolution de l'indice journalier de l'Oscillation Arctique (données NOAA)

L'ENSO (Figure 4) est un phénomène océan-atmosphère trouvant son origine dans la région Pacifique sud ayant un impact global (i.e., planétaire). Il est particulièrement connu par les événements El Niño, et son phénomène inverse, la Niña, qui sont des anomalies de la température de surface de l'océan (SST) et de la pression atmosphérique du Pacifique.

Il existe de nombreuses méthodes de calcul de l'indice ENSO, certaines basées sur la SST pour certaines zones particulières, ou encore à partir de données enregistrées à partir de bouées fixées dans l'Océan, ou encore à partir d'un indice climatique obtenu par le calcul des différences de pression entre les masses atmosphériques de Tahiti et de Darwin. ENSO est donc un phénomène complexe, dont les phénomènes El Niño et la Niña sont les résultantes les plus connues.

Zebiak et Cane (1987) ont mis en évidence que ENSO a une influence sur les paramètres hydroclimatiques (précipitations, débits,...), influence mesurable partout dans le monde. Les tempêtes de l'Océan Atlantique ont par exemple tendance à augmenter dans le cas du phénomène la Niña (Arpe et Leroy, 2008). ENSO a été identifiée comme étant le principal mode de variabilité interannuelle de périodicité 3-8 ans au travers le monde.

Figure 4 : Evolution de l'indice annuel de l'Oscillation Australe, Physical Science Division, University of Colorado, E.U.

La Variabilité de l'Atlantique Tropical (TAV) regroupe les variations de la température des eaux de surface (SST), de la pression du niveau de la mer (SLP), du fonctionnement de la cellule de Hadley et de la convergence de la zone intertropicale. Elle correspond au « El-Niño » Atlantique, dans le sens où le phénomène est visible par rapport aux variations des eaux de surface comme c'est le cas pour le phénomène ENSO, mais est orienté Nord/Sud. On la décompose en deux indices océaniques, le TNA (Atlantique Tropical Nord) et le TSA (Atlantique Tropical Sud). La zone où est calculé le TNA correspond à la zone où se forment les cyclones et les tempêtes tropicales. Les variations du TNA, qui correspondent aux variations du SST de la région, ont, de fait, une influence sur le nombre, la puissance et la taille des cyclones et des tempêtes tropicales issues de l'Atlantique (Figure 5).

Figure 5 : Comparaison de l'index du TNA et du nombre de cyclones de 1959 à 2007 (données NOAA)

1.2. Le Changement climatique

On parle de changement climatique pour désigner une modification durable, rapide ou lente, des paramètres statistiques du climat global et/ou des climats régionaux. Depuis 1950, les scientifiques ont établi que la Terre est globalement soumise à un cas de réchauffement climatique.

Le terme de réchauffement climatique est utilisé pour désigner les phénomènes d'augmentation de la température atmosphérique et océanique observés à l'échelle mondiale depuis 1970. Cette constatation a contribué à la création de l'IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change, traduit en français en GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) en 1988 ; établi par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), qui l'ont chargé d'évaluer les informations scientifiques relatives au changement climatique, de mesurer les conséquences environnementales et socioéconomiques de ce changement et de formuler des stratégies de parade réalistes.

L'IPCC n'effectue pas de recherche et ne surveille pas les données climatiques ou autres paramètres appropriés. Il base son évaluation principalement sur la littérature scientifique et technique. L'IPCC est mené par un bureau de scientifiques, mais également par de nombreuses académies scientifiques et des chercheurs. Il synthétise les informations disponibles sur le changement climatique et le réchauffement global, et a édité quatre rapports importants passant en revue les dernières connaissances sur le climat. Le dernier, publié en 2007, a fait l'objet d'un résumé pour les décideurs, qui synthétise les différents impacts climatiques mesurés depuis 1950 en les classant comme "très probablement lié à l'augmentation de la température", augmentation "très probablement lié à l'impact anthropique depuis 1970".

L'IPCC propose également plusieurs scénarios climatiques, basés sur différentes possibilités de l'évolution socio-économique mondiale d'ici 2100, et évalue les impacts de cette évolution, aussi bien à l'échelle mondiale que continentale, sur la faune et la flore et sur les humains. L'IPCC met également en perspective les différentes options d'adaptation et de mitigation aux changements globaux en fonction des différents secteurs concernés en mettant l'accent sur les secteurs les plus fondamentaux (eau, agriculture, infrastructures côtières, santé humaine, tourisme, transport, énergie). Il met également en évidence les conséquences climatiques probables dues au réchauffement climatique, tout en soulignant que les changements climatiques observés actuellement et ceux qui sont attendus sont déjà "probablement irréversibles".

Depuis lors, l'IPCC a publié plusieurs évaluations de fond qui ont grandement aidé les gouvernements à élaborer et à mettre en place des politiques pertinentes en la matière et qui ont en particulier permis à la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), adoptée en 1992, et à son Protocole de Kyoto, adopté en 1997, de disposer des avis éclairés nécessaires. Depuis sa création, l'IPCC a fait paraître une série de rapports d'évaluation (en 1990, 1995, 2001, 2007), de rapports spéciaux, de documents techniques et de rapports méthodologiques qui sont devenus des ouvrages de référence pour les décideurs, les scientifiques, les experts et les étudiants.

Les résultats de l'IPCC indiquent que le réchauffement du système climatique est sans équivoque (IPCC, 2007). On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer.

La réalité d'un changement climatique (CC) suite à l'émission anthropique de gaz à effet de serre (GES) fait désormais l'objet d'un consensus bien affirmé (IPCC, 2007). Il repose sur la convergence de nombreux éléments de preuve :

- les tendances de température au cours des derniers siècles (e.g. Mann et al., 1998),
- la comparaison de ces tendances avec la variabilité naturelle du système climatique (e.g. IDAG, 2005),
- les simulations numériques, par des modèles de circulation générale (MCG), du CC qui pourrait résulter d'augmentations variées des GES.

Les simulations synthétisées dans le 4^{ème} rapport de l'IPCC montrent ainsi que la température moyenne de la surface du globe pourrait augmenter de 1 à 2°C d'ici à 2100, cette fourchette représentant l'incertitude liée à l'évolution des émissions de GES et aux MCG. Ces incertitudes sont plus importantes dès lors qu'on s'intéresse aux précipitations, et aux échelles plus fines, dans l'espace et dans le temps.

L'IPCC n'endosse cependant pas le rôle de l'évaluation régionale des conséquences du réchauffement climatique, ce qui, au niveau du bassin versant de la Seine, est évalué par différents programmes scientifiques, tels Seine Aval RexHySS, GICC Seine.

1.3. Présentation de l'estuaire de la Seine

Un estuaire est défini par la zone d'influence de la marée dynamique, c'est à dire par la zone influencée par le battement des marées.

L'estuaire de la Seine est un estuaire macrotidal, avec une forte amplitude de marée voisine de 7 mètres, qui entraîne une remontée de la marée dynamique jusqu'au barrage situé à Poses à 160 km de la Manche (point kilométrique : pk 202) (Fig. 6). La salinité, quant à elle, ne se fait ressentir que partiellement dans l'estuaire, jusqu'au pk 325, c'est à dire à Vieux-Port (la limite étant définie par rapport à une salinité de 0,5 ‰).

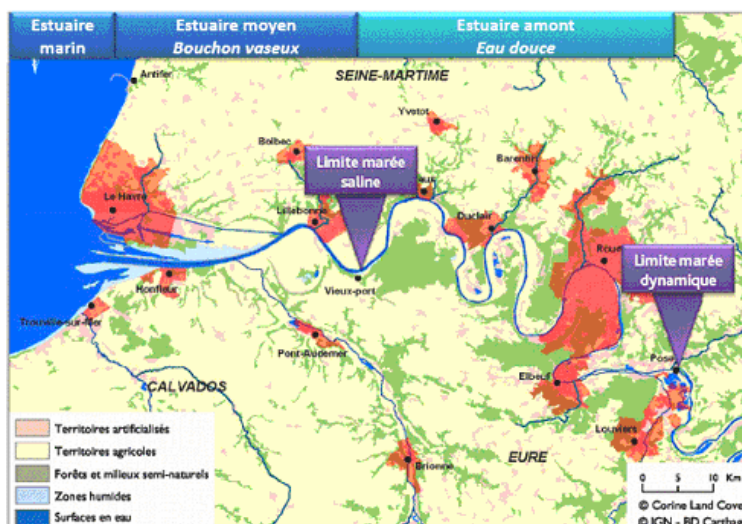


Figure 6 : L'estuaire de la Seine (<http://Seine-aval.crihan.fr>)

Trois zones peuvent ainsi être distinguées (selon la définition de l'estuaire de Fairbridge, 1980) :

- l'estuaire fluvial ou estuaire amont ou (zone d'eau douce) s'étend de Poses (pk 202) à Vieux-Port (pk 325),

- l'estuaire moyen, de Vieux-Port (pK 325) à Honfleur, est caractérisé par son mélange d'eau salée et d'eau douce (zone du gradient de salinité),
- l'estuaire aval ou estuaire marin (zone d'eau salée), s'étend de Honfleur à la baie de Seine.

En réalité, les limites de ces trois zones varient en fonction des conditions de marée et des conditions hydrologiques.

2. Méthodologies utilisées pour étudier les relations climat/hydrologie

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 qu'il existe de nombreuses études sur les fleuves et estuaires, celles-ci 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 réflexion est menée actuellement, si bien que de nombreuses études ne sont pas encore publiées et de ce fait difficilement accessibles.

De plus, bien qu'une définition claire et stricte existe pour définir le milieu estuarien, il n'en reste pas moins un objet d'étude très complexe à étudier, de par les nombreux paramètres à prendre en compte afin de ne pas fausser les interprétations ou les modèles. C'est pourquoi, bien qu'il s'agisse d'un domaine d'étude très important à prendre en compte, très peu d'études hydroclimatiques ont été menées sur la partie estuarienne des fleuves, comme celui de la Seine.

2.1. 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...), la salinité, 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, on a 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.

2.2. Méthodes rétrospectives : traitement des enregistrements historiques (données existantes)

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

- les méthodes probabilistes, qui ont pour objectif de caractériser les lois de distribution des variables aléatoires d'intérêt, afin de prévoir la probabilité d'occurrence de certaines valeurs (modélisation stochastique). Elles sont très employées en hydrologie pour la caractérisation des distributions des précipitations ou des débits moyens ou extrêmes annuels. Ces méthodes ont été également utilisées par certains auteurs pour l'étude des phénomènes de surcotes en domaine côtier (e.g., Ullmann et al., 2007) ;
- les approches que l'on peut qualifier de déterministes, en comparaison avec celles probabilistes évoquées ci-avant: elles 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., Anctil et Coulibaly, 2004 ; Massei et al., 2009) ;
- de manière plus descriptive, 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...) (Bower et al., 2004, 2007).

Au sein de ses grandes approches, de manière détaillée, on distingue, par exemple :

- Les méthodes statistiques inférentielles correspondent à la branche des mathématiques basée sur les tests statistiques (test de Mann-Kendall, test des empreintes climatiques, test de Fisher, test de Student,...). Ces méthodes sont utilisées en fonction de l'état de stationnarité (cas où la répartition statistique des données est indépendante du temps) ou de non-stationnarité (cas où la répartition statistique des données dépend du temps) des données étudiées et permettent d'établir, ou non, la véracité d'une hypothèse formulée.

Les données utilisées en hydrométéorologie s'étendent sur d'importantes périodes de temps sur des pas de temps compris entre l'échelle journalière et l'échelle annuelle. C'est pourquoi les tests adaptés sont nécessairement des tests de type non-stationnaires.

- Les analyses statistiques inférentielles sont les analyses rétrospectives les plus répandues (Mann, 1945 ; Kendall, 1975 ; Hirsch et al., 1982 ; Gan and Kwong, 1992 ; Burn, 1994 ; Santer et al., 1995 ; Hegerl et al., 1996 ; Tett et al., 1996 ; Westmacott et Burn, 1997, Rimbu et al., 2002) du fait de leur relative simplicité d'utilisation. On distingue : (1) les tests de tendance dont l'objectif est de définir des tendances statistiquement significatives ; (2) les analyses fréquentielles (ajustement

d'un paramètre à une loi statistique) dont le but est de déterminer les périodes de retour des événements extrêmes (crue, étiage...).

Cependant, ces analyses ne permettent pas d'approfondir les causes des changements climatiques ou hydrologiques, bien qu'elles puissent permettre d'émettre certaines hypothèses de travail. Elles peuvent également induire des contradictions, comme le montre la différence de résultats entre plusieurs études menées sur des données de la Péninsule Ibérique. Moreno et Martin (1986) déduisent, par l'intermédiaire de méthodes statistiques inférentielles, qu'aucune tendance significative d'évolution des paramètres climatiques n'existe, tandis que Rodrigo et al. (2000) et Pozo-Vazquez et al. (2000), en utilisant les méthodes décrites ci-dessous (analyses en ondelettes), montrent, au contraire, l'existence d'une évolution importante des paramètres climatiques.

- Les analyses spectrales considèrent l'objet étudié (système hydrologique, bassin versant) comme un système boîte noire qui filtre une donnée d'entrée (ex : précipitation) en une donnée de sortie (ex : débit). Par comparaison entre le signal d'entrée et celui de sortie, il est alors possible de mieux comprendre la réponse hydrologique du bassin versant aux précipitations et ses caractéristiques propres de filtrage. Il est également possible par ces méthodes d'aborder la variabilité hydrologique et de tenter de la relier avec les fluctuations climatiques.

- Les analyses en ondelettes permettent d'étudier la non-stationnarité des signaux, à la différence des analyses statistiques inférentielles. La transformée en ondelettes est réalisée en décomposant le signal brut en signaux prédéfinis sur une certaine période de temps (ou d'espace) : l'ondelette. Celle-ci est une fonction comportant un paramètre temporel et un paramètre de forme. Le premier dilate l'ondelette pour l'analyse des fréquences voulues et le deuxième translate l'ondelette sur l'axe des temps pour analyser cette fréquence au voisinage d'un moment du signal. L'ondelette choisie pour référence est appelée ondelette-mère et la modification de ses paramètres produit des ondelettes-filles. La transformée en ondelettes est donc réalisée en décomposant le signal en signaux définis sur une certaine période de temps (ou d'espace), ce qui permet d'analyser les variations du contenu fréquentiel au cours du temps. Ce type d'analyse permet alors de définir des périodicités et des ruptures dans les signaux hydrologiques et de les mettre en relation avec fluctuations climatiques (indices climatiques : NAO...) et l'impact anthropique.

Ces méthodes, sont désormais utilisées dans de nombreuses études hydroclimatiques (Kuhnel et al., 1990 ; Kumar et Foufoula-Georgiou, 1993 ; Meyers et al., 1993 ; Meyers et O'Brien, 1994 ; Padilla et Pulido-Bosch, 1995 ; Kumar, 1996 ; Labat et al., 1999, 2000, 2001 ; Larocque et al., 1998 ; Smith et al., 1998 ; Szilagyi et al., 1999 ; Breaker et al., 2001 ; Chambers et al., 2002 ; Gaucherel, 2002 ; Jiménez et al., 2002 ; Andreo et al., 2006 ; Massei et al., 2007). Elles permettent de retrouver l'influence, plus ou moins importante en fonction du temps, de paramètres climatiques dans les signaux de type hydrologique par l'intermédiaire de périodes de variabilités-types qui les caractérisent. Elles permettent également d'établir l'existence de ruptures dans le fonctionnement hydrologique d'un paramètre, caractérisées par un changement durable de l'importance de certaines périodes de variabilités-types dans le signal. Ces ruptures peuvent être de causes naturelles ou anthropiques.

A la méthode classique, s'ajoutent les analyses de cohérence par ondelettes qui sont pour l'instant peu utilisées, mais novatrices, car elles permettent d'appréhender le lien statistique entre variabilité hydrologique et fluctuations climatiques. Ces analyses ont un fonctionnement similaire aux analyses par ondelettes décrites ci-dessus, à la

différence qu'elles permettent de déterminer le degré de corrélation existant entre deux signaux au cours du temps et de l'espace (Maraun et Kurths, 2004).

2.3. Méthodes prospectives : Modélisation

2.3.1. Principe général

L'approche modélisatrice repose sur la construction d'un modèle de fonctionnement du système ciblé (bassin versant, écosystème, etc.), paramétrisé à partir de données enregistrées caractéristiques de ce système (précipitations, débits, caractéristiques et utilisation du sol, géologie,...), qui se voit ensuite soumis à un scénario climatique plus ou moins pessimiste (Mitchell et al., 1995 ; Hansen et al., 1997 ; Manabe et Stouffer, 1997 ; Carnell et Senior, 1998 ; Reader et Boer, 1998 ; Leander et al., 2008). Ces scénarios climatiques sont généralement basés 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 21^{ème} siècle. Cette articulation d'un modèle du climat et d'un modèle du système étudié permet de projeter le devenir du fonctionnement du système, avec des résultats qui dépendent des modèles et hypothèses mobilisés. Une étape importante dans ce cadre est celle de la régionalisation des scénarios climatiques produits par les modèles globaux vers l'échelle du système ciblé.

2.3.2. Les modèles climatiques

La description ci-dessous des modèles climatiques est basée sur les explications proposées par Cariolle (1999). Les modèles climatiques globaux sont les seuls permettant d'évaluer, sur de longues périodes, l'évolution du climat, celui-ci étant par nature global, même s'il possède des caractéristiques locales. Les modèles sont conçus comme le couplage de sous-modèles dédiés aux principaux compartiments du système climatique. On distingue ainsi les modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA), les modèles de circulation générale des océans (MCGO), les modèles de banquise et ceux représentant le fonctionnement de la surface des continents (sols et végétation), qui sont couplés pour rendre compte de l'ensemble des interactions entre ces différents compartiments. Il s'agit, en particulier, d'obtenir des bilans d'énergie, de quantité de mouvement, de vapeur d'eau et, éventuellement, d'autres composants ayant des interactions avec le bilan radiatif. Ce couplage global nécessite d'abord que les différents modules soient élaborés et validés, notamment par comparaison avec le climat observé.

Les MCGO utilisent généralement les données de salinité, de température potentielle et les directions, la force et l'intensité des vents. On parle de température potentielle (relatif à la pression de l'air) pour garder une référence de valeur constante par rapport aux changements de pression existant dans les océans. La composition de la donnée de salinité est quant à elle définie selon un standard international qui représente l'effet combiné des différents sels dissous dans les océans. La salinité est généralement utilisée afin de calculer la densité de l'eau océanique.

Les MCGA incluent quant à eux une résolution explicite du système d'équations adapté à la mécanique des fluides atmosphériques, des représentations

des principaux processus physiques (rayonnement, convection, nuages et précipitations), et des représentations du bilan hydrique et énergétique à l'interface sol-atmosphère. Les MCGA actuels (Déqué et al., 1994 ; Raghavak Laval et al., 1995) résolvent la circulation à une échelle de plusieurs centaines de kilomètres et ont été intégrés sur plusieurs décennies dans le cadre du programme AMIP de comparaison des modèles, au niveau international (Gates, 1992). Forcés à leur base par des conditions océaniques observées, ils reproduisent les grands traits du climat actuel : jets des latitudes moyennes, position des grands anticyclones, zones de convergence intertropicales, parcours des dépressions et des précipitations qui leur sont associées. Très fréquemment dérivés des modèles de prévision du temps, ils sont également validés à plus haute résolution, par la comparaison avec l'évolution de l'atmosphère sur des périodes plus courtes.

La simulation de l'évolution du climat sur le long terme implique le couplage de ces modèles. Les MCGO prennent en compte les processus dynamiques importants de la couche superficielle de mélange et interagissent avec les banquises arctique et antarctique. Couplés aux MGCA, ils leur fournissent les conditions de température de surface des océans et des mers, et reçoivent en retour les vents et les différents termes du bilan énergétique à la surface qui leur sont nécessaires pour calculer l'évolution des courants et la température superficielle et profonde de l'océan. Ces modèles couplés océan-atmosphère sont les principaux outils permettant le calcul des scénarios d'évolution climatique, à la base des travaux du GIEC/IPCC. Dans ce cadre, le changement climatique est provoqué par une modification de la composition de l'atmosphère (concentration en GES et aérosols) en fonction de scénarios socio-économiques d'émissions (Tableau 1).

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

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, 2001, 2007) En termes de concentration en GES, et donc de sévérité globale du changement climatique, les scénarios les plus optimistes sont les scénarios B1 et B2 et les plus pessimistes sont les scénarios A1 et A2.

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 (Laboratoire de Météorologie Dynamique, Masson et Joussaume, 1997) couplé au modèle océanique du Lodyc, 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 (Barthelet et al., 1998).

La simulation des scénarios climatiques nécessitant leur intégration numérique sur plusieurs siècles, la résolution horizontale des MGCA et des modèles couplés est limitée par la puissance des calculateurs. Bien que cette puissance ne cesse de croître, il est actuellement impossible de faire fonctionner ces modèles sur une grille homogène régulière couvrant le globe, avec des résolutions inférieures à la centaine de kilomètres. Or, à cette échelle, les représentations de l'orographie n'ont plus de sens, et les conditions d'occupation des sols (type de végétation et de sols) sont très imparfaitement représentées. Il est donc souvent difficile de les utiliser directement pour étudier les climats régionaux, notamment au niveau de l'Europe, où les caractéristiques du relief (arc alpin, Pyrénées) et l'influence des différents océans et mers (Atlantique, Mer du Nord, Méditerranée) sont prépondérantes.

Pour pallier cette difficulté, des MGCA dont la résolution peut varier géographiquement ont été développés. Les modèles résolvant les équations de la dynamique atmosphérique en point de grille ont inclus la possibilité d'accroître la résolution sur une zone donnée, déterminée par une fenêtre en latitude et longitude. Un tel modèle a été notamment développé par le LMD, pour l'étude de processus équatoriaux. Une des difficultés réside alors dans le changement de résolution du domaine de haute résolution vers le domaine global, qui peut induire des frontières, et des problèmes numériques, en particulier dans la prise en compte du relief. Une approche différente a été adoptée par le CNRM, qui utilise une version non homogène du modèle ARPEGE-Climat. Cette version permet une bien meilleure représentation du relief, de la végétation et des sols sur l'Europe et le Nord de l'Afrique, tout en gardant une résolution globale permettant la description des principales caractéristiques du climat à grande échelle. Ce modèle a été validé par des intégrations de plusieurs dizaines d'années et les résultats comparés avec les données climatologiques disponibles (Déqué et Piedelièvre, 1995). Le modèle permet de reproduire certaines caractéristiques régionales, avec, en particulier, un minimum de précipitation dans la partie est de l'Espagne, dû à l'effet de barrière de la péninsule ibérique, et un accroissement des précipitations sur les reliefs des Alpes. On note, cependant, que le modèle n'est pas parfait et qu'il présente, par exemple, une sous-estimation des précipitations en Méditerranée, et une extension, trop au sud, des précipitations atlantiques, liée à un flux trop zonal à l'approche du continent européen.

2.3.3. Méthodes de régionalisation

De nombreuses études d'impact des changements climatiques nécessitent de prendre en compte des échelles spatiales très petites (Eckhardt et Ulbrich, 2003 ; Hreiche, 2003). C'est notamment le cas lorsqu'on s'intéresse à la réponse des hydrosystèmes ou des écosystèmes, qui nécessite de disposer des conditions météorologiques à l'échelle de quelques kilomètres. Un problème identique se pose pour la prévision du temps, pour laquelle les conditions locales doivent être prises en compte pour accroître la précision des prévisions. Pour répondre à ces problèmes, des modèles météorologiques, dits à méso-échelle, ont été développés. Il s'agit de modèles à aire limitée, dont les conditions aux limites latérales peuvent être fournies

par des MCGA ou des analyses météorologiques, et dont la résolution peut maintenant atteindre quelques kilomètres à quelques centaines de mètres. Météo-France exploite ainsi de manière opérationnelle une version du modèle Aladin (Bubnova et al., 1995), qui fournit des champs journaliers de vent et de température sur la France, avec une résolution inférieure à 10 km. A plus fine échelle encore, le modèle Méso-NH (Lafore et al., 1998) permet des simulations à quelques centaines de mètres de résolution. La stratégie habituelle d'utilisation de ces modèles pour des études d'impact consiste à les forcer par les conditions aux limites du système étudié, issues des MCGA de grande échelle, et de les intégrer sur plusieurs cycles annuels, afin d'obtenir des images de fonctionnement à échelle fine pour le climat actuel ou perturbé. Cette approche est d'autant plus intéressante qu'il est possible, à cette échelle, de décrire assez précisément les conditions d'occupation des sols.

Une autre stratégie très courante pour prendre en compte les petites échelles spatiales est de transformer les résultats des modèles climatiques globaux par des méthodes dites de régionalisation ou de descente d'échelle. Il s'agit d'introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les modèles climatiques de grande échelle, tout en corrigeant les distributions spatio-temporelles des défauts statistiques les plus pénalisants pour la simulation du système ciblé (hydrosystème, écosystème, etc.). Les méthodes sont nombreuses mais reposent toutes sur une phase d'apprentissage en temps présent, afin que le climat récent simulé ressemble après désagrégation au climat récent observé à petite échelle.

La méthode des perturbations mensuelles (Xu, 1999) constitue le « degré 0 » de ces méthodes de désagrégation statistique. Pour chaque variable météorologique, des perturbations sont calculées mensuellement, comme le rapport (ou la différence dans le cas de la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous CC et à l'actuel. Ces perturbations mensuelles servent à modifier les séries actuelles observées, en étant appliquées uniformément à tous les pas de temps du mois considéré.

Cette stratégie, utilisée dans le cadre du projet GICC-Seine par exemple (Ducharne et al., 2007), ne rend compte que du changement de climat moyen, et préserve sous climat perturbé la variabilité du climat actuel aux échelles qui ne sont pas celles du mois (journalières et interannuelle notamment). Le projet RExHySS bénéficie en revanche de deux méthodes de désagrégation plus récentes (méthode quantile-quantile, Déqué, 2007, et méthode des régimes de temps, Boé et al., 2006), qui permettent de rendre compte des changements de variabilité du climat de l'échelle journalière à interannuelle, et d'aborder l'impact du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques (crues, étiages).

2.3.4. Modélisation hydrologique

De manière complémentaire, il est possible de coupler les sorties de ces modèles avec des modèles hydrologiques permettant la reconstitution de l'évolution du débit des rivières, du niveau des nappes d'eau souterraines... Il est également possible de prendre en compte d'autres paramètres que les variations climatiques, notamment les actions directes de l'homme, telles les mises en culture, les friches et les reboisements, les aménagements...

Les méthodes de modélisation peuvent être ainsi utilisées en hydrologie pour des approches à des échelles de courtes durées (Schwarz, 1977 ; Cohen, 1986 ; Nemec et Schaake, 1982 ; Bultot et al, 1988 ; Bultot et al, 1992) afin d'étudier les

changements journaliers, mensuels ou saisonniers des précipitations ou des débits dans le cycle hydrologique. Elles peuvent également être utilisées à des échelles de longues durées (Schaafe et Chunzen, 1989 ; Arnell et al., 1990 ; Arnell et Reynard, 1993 ; Sefton, 1996) pour étudier les changements annuels et pluriannuels dans le but de connaître le fonctionnement probable d'un débit de fleuve, ou encore l'évolution probable des quantités de pluies moyennes annuelles tombant dans une région du monde.

3. Synthèse sur l'évolution des paramètres hydroclimatiques selon les méthodes et l'échelle d'observation (échelle globale à nationale)

De nombreuses études ont été menées pour tenter de quantifier les paramètres physiques marquant une évolution climatique perceptible à l'échelle humaine. Et, bien que les méthodes et les échelles spatiales diffèrent d'une étude à l'autre, la plupart des auteurs s'accordent quant au sens d'évolution des différents paramètres hydroclimatiques mesurés.

On remarquera, cependant, que la très grande majorité des études menées sur l'impact du changement climatique et ses relations avec les hydrosystèmes sont focalisées soit sur les fleuves, soit sur la mer ; les estuaires, centre de l'interaction de ces deux milieux, apparaissent peu étudiés sous cet angle. C'est pourquoi dans la suite de ce travail, nous présenterons principalement les résultats des études menées sur les fleuves et sur les mers.

La synthèse sera présentée par paramètres hydroclimatiques, selon les deux grandes méthodes (rétrospectives, prospectives) et à deux échelles d'observation (échelle globale à nationale)

3.1. Evolution des températures atmosphériques

3.1.1. Apport des méthodes rétrospectives

A l'échelle globale, de nombreuses études mettent en évidence une augmentation globale moyenne de la température atmosphérique au cours du XXe siècle de l'ordre de 0,6°C (Houghton et al., 1996, 2001 ; IPCC, 2007). 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 7). De plus, la dernière décennie du siècle précédent apparaît comme la période la plus chaude enregistrée depuis que les réseaux météorologiques existent.

Figure 7 : 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 (Figure 8). 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 (Figure 9). A l'échelle de la France, on note une augmentation comprise entre 0,7 et 1,1 °C, avec également une répartition spatiale hétérogène sur le territoire.

Figure 8 : Elévation de la température moyenne du globe au cours du XXe siècle (Itabashi, 2008)

Figure 9 : Cartographie des tendances 1901-2000 (en °C/siècle) de la température moyenne annuelle, à partir de soixante dix séries homogénéisées (Moisselin et al., 2002)

3.1.2. Apport de la modélisation

Les études de modélisation mettent en évidence une augmentation de la température de l'ordre de 1,5 à 3°C selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, dû à l'effet de serre additionnel. L'IPCC (2001, 2007) évalue, quant à lui, 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 10). Cependant, ces prévisions sont contrebalancées par d'autres études (Mitchell et al., 1995 ; Hansen et al., 1997; Manabe et Stouffer, 1997 ; Carnell et Senior, 1998 ; Reader et Boer, 1998) qui avancent l'hypothèse que le réchauffement global sera moins important que prévu, du fait de la présence d'autres gaz que ceux à effet de serre et de phénomènes de rétroaction qui compenserait, totalement ou en partie, l'effet de serre additionnel provoqué par la source anthropique.

Figure 10 : Modélisation de l'évolution de la température atmosphérique globale à l'horizon 2100 (Globalwarmingart.com – d'après données IPCC, 2001, 2007).

Cette augmentation de température toucherait toutes les régions du globe, mais toujours de façon inégale spatialement (Figure 10).

Figure 11 : Modélisation de la répartition spatiale de l'évolution de la température atmosphérique à l'échelle du globe à l'horizon 2100 (Globalwarmingart.com).

A l'échelle de la France (Figure 12), 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. La région de Haute-Normandie connaîtrait, quant à elle, une augmentation des températures moyennes annuelles de l'ordre de 1,5 à 2°C d'ici 2050 et de 3 à 5°C d'ici 2100.

Figure 12 : Valeurs de l'augmentation de la température atmosphérique maximale dans les régions française en 2050 (a) et 2099 (b) pendant la saison estivale selon un des scénarios les plus pessimistes (A2) (Source Météo France).

Cette élévation de température serait à l'origine d'une augmentation importante du nombre de jours de canicule en période estivale (Figure 13).

Figure 13 : Modélisation de l'évolution du nombre de jours de canicule par an en France à l'horizon 2100, selon 3 scénarios (Source Météo France).

3.2. Evolution des précipitations

3.2.1. Apport des méthodes rétrospectives

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 (Forland et al., 1998 ; Karl et Knight, 1998 ; Kunkel, 2003 ; Francis et Hengeveld, 1998 ; Suppiah et Hennessy, 1998 ; Iwashima et Yamamoto, 1993 ; Masson et al., 1999 ; Osborn et al., 2000, Massei et al., 2007). 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 (DelGenio et al., 1991 ; Loaciga et al., 1996 ; Trenberth, 1999 ; Held et Soden, 2000 ; Arnell et al., 2001 Ramanathan et al., 2001 ; Liepert et al., 2004 ; Wild et al., 2004).

Cependant, ce phénomène d'intensification est inégalement réparti dans le monde. Dans les faits, selon Chahine et al. (1997) et Barthelet et al. (1998), 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 (1992) 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. (2000), Rodrigo et al. (2000) et Andreo et al. (2006), 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 (1992).

3.2.2. Apport de la modélisation

Selon plusieurs études (Hennessy et al., 1997 ; Zwiers et Kharin, 1998 ; McGuffie et al., 1999 ; Osborn et al., 2000 ; Jones et Reid, 2001 ; New et al., 2001 ; Christensen et Christensen, 2004 ; Planton et al., 2005), 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 14).

Figure 14 : Anomalies de précipitations (en mm/jour) obtenues à la fin du XXIème siècle (moyenne des années 2090 à 2099) par rapport à la fin du XXème siècle (moyenne des années 2000 à 2009) (Modèle IPCC CNRM)

Les travaux d'Arnell (1996), de Déqué et al. (1998), de Palmer et Räisänen (2002), de Werrity (2002) et de Sumner et al (2003), 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 (Figure 15). 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.

Figure 15 : Changement relatif des Précipitations (%) en 2050 par rapport à 1970/2000 (IPCC, 2007)

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.

3.3. Evolution des débits et des stocks d'eau

3.3.1. Apport des méthodes rétrospectives

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 (Figure 16 ; Labat et al., 2004).

Figure 16 : Débit moyen (en l/s) mesuré sur les cinq continents entre 1880 et 1994 (Labat et al., 2004)

Ainsi, Sidle et Dhakal (2002) et Labat et al. (2004) ont calculé que la moyenne des débits mondiaux augmente de 4% pour chaque augmentation d'1 °C de la température atmosphérique (Figure 17), ce qui pourrait être relié à l'augmentation de l'intensité des précipitations (De Jonge et De Jong, 2002 ; Knowles et Cayan, 2002 ; Sidle et Dhakal, 2002) et à la fonte des neiges. Durant la période 1925-1994, la tendance à l'augmentation du débit correspondrait ainsi au réchauffement planétaire global. Cependant, cette conclusion serait à prendre avec précaution du fait du décalage entre les températures observées et la réponse du débit.

Figure 17 : Comparaison entre l'évolution de la température moyenne annuelle (en rouge) et le débit mondial (en bleu) entre 1875 et 1994 (Labat et al., 2004)

Cependant, de nombreuses autres études pointent l'existence de nombreuses disparités (Figure 13). A l'échelle globale, les différents auteurs (Alcamo et al., 1997 ; Arnell, 1999 ; Barthelet et al., 1998 ; André et Royer, 1999 ; Milly et al., 2002 ; Oltchev et al., 2002 ; Manabee et al., 2004 ; Onuchin et al., 2006 ; Labat, 2008) 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 (Cullen et de Menocal, 2000 ; Houghton et al., 2001 ; Cullen et al., 2002 ; Rimbu et al., 2002 ; Stanev et Peneva, 2002 ; Eckhardt et Ulbrich, 2003 ; Legesse et al., 2003 ; Liu et al., 2005 ; Pekárová et al., 2005 ; Dupuis et al., 2006 ; Jyrkama et Sykes, 2007 ; Archer et Fowler., 2008) 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 sols) par gravimétrie (GRACE), menées depuis 2002, indiquent également des disparités selon les grands bassins fluviaux mondiaux (Figure 18). Néanmoins, l'évolution moyenne globale serait à la diminution, avec une perte de 60 km³/an de 2002 à 2007.

Figure 18 : Tendances sur 2002-2007 des variations de stocks d'eau dans les grands bassins fluviaux d'après GRACE (Gravimétrie spatiale) (Cazenave, 2008)

3.3.2. Apport de la modélisation

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 (Wetherald et Manabe, 2002). 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 démontré dans les études des chroniques historiques de débit au cours du XXe 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 (Figure 19).

Figure 19 : Anomalies de débits dans le monde entre 2050 et la période 1971-1998 (Données NOAA)

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 (Arnell, 1996). 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. Ashmore et Church (2001) et Uhlenbrook et Hoeg. (2003) avancent que l'évolution de l'utilisation des sols aura un impact important sur le fonctionnement des bassins versants, bien que Herrmann (2004) 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 (Figure 20).

Figure 20 : Modélisation de l'évolution du débits des fleuves à l'échelle de la France à l'horizon 2050 (Source CERFACS/Météo-France)

3.4. 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.

3.4.1. Apport des méthodes rétrospectives

Gornitz (1995) et Cazenave et al., (1998) calculent, par des méthodes de relevés satellites ou par des mesures directes, que le taux annuel d'élévation global du niveau de la mer depuis le début du XXe siècle est de 1mm/an (Figure 21).

Figure 21 : Augmentation globale du niveau de la mer au cours du XXe siècle (Globalwarmingart.com – d'après données IPCC, 2001, 2007)

Cette évolution n'est toutefois pas identique partout dans le monde (Figure 22).

Figure 22 : Anomalies du niveau de la mer dans le monde entre 1993 et 2005 (Données Legos/CNES ; Cazenave, 2008)

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.

Figure 23 : Distribution géographique des vitesses des variations du niveau de la mer le long des côtes françaises entre 1993 et 2006 (Données Legos ; Cazenave, 2008)

Les mesures directes indiquent, quant à elles, des variations comprises entre - 0,1 et + 0,4 cm/an (Figure 24).

Figure 24 : Résumé simplifié des tendances récentes de variation du niveau moyen de la mer sur les côtes françaises à partir des mesures directes (Pirazzoli, 2008)

Une des implications majeures de l'élévation du niveau marin est le risque d'inondation des côtes, schématisé sur la figure 25 pour les côtes françaises.

Figure 25 : Résumé simplifié des tendances récentes du risque d'inondation sur les côtes françaises (Pirazzoli, 2008)

3.4.2. Apport de la modélisation

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 (2001, 2007) indiquent une élévation du niveau marin comprise entre 18 et 59 cm (Figure 26).

Figure 26 : Modélisation de l'élévation du niveau marin (Globalwarmingart.com – d'après données IPCC, 2001, 2007) (élévation entre 18 et 38 cm pour le scénario le plus optimiste B1 et entre 26 et 59 cm pour le plus pessimiste A1)

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.

Certains scénarios évoquent une fonte brutale des glaces polaires (Lonsdale et al., 2008 ; Olsthoorn et al., 2008 ; Poumadère et al., 2008), pouvant provenir d'une arrivée d'eau plus chaude provenant des rivières nordiques (Bareiss et al., 1999). 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.

La figure 27 est un exemple de ce que pourrait donner cette remontée du niveau marin sur l'estuaire de la Tamise en Angleterre. La montée de cinq mètres du niveau marin provoquerait une invasion importante de la mer dans l'estuaire. Cela aurait également pour conséquence une perturbation de son fonctionnement du fait de l'accroissement de la part de l'effet de la houle et des marées dans celui-ci.

Figure 27 : Estuaire de la Tamise (Angleterre). En bleu le cours actuel de la Tamise, en blanc les zones potentiellement inondées en cas de montée de cinq mètres du niveau de la mer (Lonsdale et al., 2008)

3.5. Evolution de la température des eaux de surface

En parallèle avec 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 XXe siècle, en particulier depuis 1980 (Figure 28). Cette augmentation, bien que semblant faible, a d'importantes conséquences. Ainsi, Azemar et al. (2007) et MacKenzie et Schiedek (2007) 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.

Figure 28 : Evolution de la température de surface des eaux au cours du XXe siècle (Source : NASA/GISS)

Rodwell et al. (1999) mettent en évidence une augmentation de 2°C de la température de surface des eaux de l'Atlantique Nord au cours du XXe siècle, concordant avec les variations de la NAO (Figure 29).

Figure 29 : Evolution de la température des eaux de surface (SST) au cours du XXe siècle en Atlantique Nord et relation avec la NAO (Rodwell et al, 1999)

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 30 ; Moatar et Meybeck, 2005).

Figure 30 : Evolution de la température de l'eau de la Loire entre les années 1975 et 2005 (Moatar et Meybeck, 2005)

3.6. Evolution de la salinité

Il est difficile de proposer une synthèse de l'évolution du paramètre salinité en relation avec le changement climatique, car les études souvent ponctuelles ne permettent pas d'avoir une vision globale.

Suite à l'élévation du niveau de la mer, le taux et la pénétration de la salinité d'origine marine seront plus importants dans les estuaires, avec d'importantes conséquences sur le fonctionnement et sur la survie d'un grand nombre d'espèces biologiques fondamentales dans la chaîne alimentaire des estuaires (Martins et al., 2002 ; Patillo et al., 1997 ; Yuan et al., 2007).

L'évolution du taux de salinité ne dépend cependant pas que de la seule variation du niveau de la mer. Ainsi, Tolan (2007) a montré qu'il existait une corrélation entre le taux de salinité de l'estuaire du Texas et les variations de l'ENSO. Van Aken (2008) a, quant à lui, pointé l'importance des variations climatiques (NAO) dans les variations du taux de salinité dans l'embouchure de l'IJsselmeer en Mer du Nord au Pays-Bas.

4. Etat des connaissances sur l'influence du changement climatique en Seine

Trois programmes s'intéressent principalement à l'heure actuelle au rôle du climat sur le fonctionnement hydrologique de la Seine, utilisant chacun une des deux grandes familles de méthodes vues précédemment : Seine Aval, RExHySS, GICC-Seine.

Dans le cadre du programme Seine Aval, plusieurs projets s'intéressent entièrement (HydroClimat et expertise collective) ou pour partie à ce thème. Ces projets se basent essentiellement sur le traitement des données historiques.

Le projet RExHySS (Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme) a pour but d'évaluer l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins versants de la Seine et de la Somme (Ducharne et al., 2009). Il cherche à caractériser comment le changement climatique est susceptible de modifier la distribution de ces extrêmes, en terme de crue, d'étiage et de sécheresse. Pour appréhender les différentes incertitudes associées aux impacts du changement climatique futur, les débits, l'humidité du sol et les niveaux piézométriques sont simulés par plusieurs modèles hydrologiques en fonction de plusieurs scénarios de changement climatique. Un des buts du projet est de diffuser ces résultats aux acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau dans les bassins versants étudiés, sous une forme adaptée pour leur permettre une expertise socio-économique de la modification des extrêmes hydrologiques.

Dans ce projet, les incertitudes liées à la modélisation du climat ont classiquement été appréhendées en multipliant les scénarios de changement climatique. Nous avons ainsi produit 21 scénarios désagrégés, caractérisés par différents modèles climatiques (16), scénarios d'émissions (A1B et A2) et méthodes de régionalisation (3). Un sous-ensemble représentatif de 12 scénarios désagrégés a servi d'entrée à 5 modèles hydrologiques, afin de pouvoir également analyser les incertitudes liées à ces modèles, qui couvrent les principales différences entre les grandes écoles de modélisation hydrologique (hydrométéorologiques vs hydrogéologiques, distribués vs globaux¹, à bases physiques vs conceptuels) et ont tous été testés en temps présent avec de bonnes performances.

Bien que les méthodes d'études utilisées soient différentes, le projet HydroClimat (Seine Aval) et le projet RExHySS s'intéressent aux mêmes paramètres hydroclimatiques : la température atmosphérique, les précipitations, le débit de la Seine et la piézométrie. En ce qui concerne l'évapotranspiration potentielle, seul le projet RExHySS a étudié son évolution. Il s'agit, de fait, des paramètres les plus souvent étudiés dans le cadre d'études hydroclimatiques.

Enfin, pour aborder les possibles impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau, nous avons mobilisé les résultats d'un troisième projet, ceux du projet GICC-Seine, dont le but était d'étudier l'influence du changement climatique

¹ Pour les hydrologues français, un modèle global simule un bassin versant dans sa globalité, sans en décrire les hétérogénéités internes, ce qui correspond au sens français de global. Ce terme se traduit par « lumped » en anglais, et la confusion ne doit pas être faite avec l'anglicisme courant qui utilise global pour planétaire.

sur l'hydrologie et la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine (Ducharne et al., 2007). Ce projet a précédé le projet RExHySS, avec des méthodes similaires en ce qui concerne les impacts hydrologiques, mais en se basant sur des scénarios de changement climatique plus anciens (2^{ème} et 3^{ème} rapports de l'IPCC, au lieu de scénarios réalisés pour le 4^{ème} rapport de l'IPCC dans RExHySS), et en utilisant une méthode de régionalisation plus simple. Les impacts hydrologiques ainsi simulés sont cependant cohérents avec ceux obtenus dans le projet RExHySS, notamment en ce qui concerne le réchauffement atmosphérique et la baisse des débits d'étiage, qui constituent les changements les plus importants pour la qualité biogéochimique des cours d'eau.

4.1. Evolution des températures atmosphériques sur le bassin versant de la Seine

La figure 31 montre qu'il existe une tendance statistiquement significative à l'augmentation des températures moyennes mensuelles depuis le début ou la moitié du XXe siècle (selon les stations) à nos jours, aussi bien en amont, qu'en aval du bassin de la Seine (Mesquita, 2009).

Figure 31 : Variations moyennes mensuelles et tendance des températures de 1900 à 2007 dans la zone amont du bassin de la Seine et de 1940 à 2007 dans la zone aval (Mesquita, 2009)

Les scénarios de changement climatique désagregés 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 32). Ces scénarios soulignent aussi que la température atmosphérique régionale augmentera quelle que soit la saison, avec un réchauffement légèrement plus fort en été.

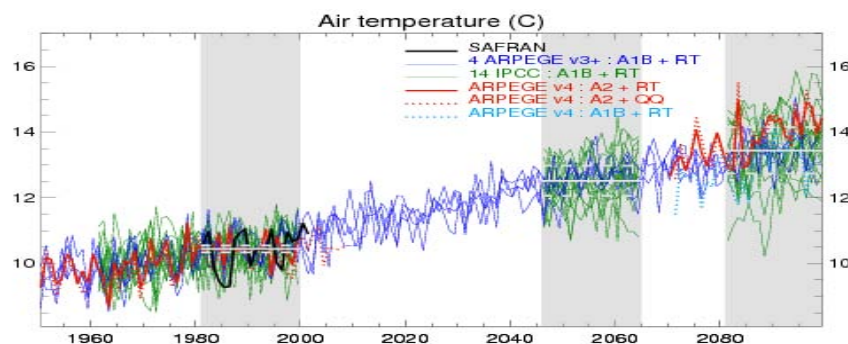


Figure 32 : Evolution de la température de l'air (moyennes annuelles en °C) dans le bassin de la Seine entre 1950 et 2100. La courbe noire représente les analyses SAFRAN basées sur les observations historiques et les courbes en couleur correspondent à 19 scénarios de changement climatique désagrégés dans le cadre du projet RExHySS. Pour les 3 plages de 19 ans indiquées en gris, centrées en 1990, 2055 et 2090, les moyennes et écart-types inter-scénarios sont représentées par les lignes grises continue et tiretées.

4.2. Evolution des précipitations sur le bassin versant de la Seine

En dehors de quelques stations exceptionnelles (Figure 33), l'ensemble des stations enregistrant les précipitations moyennes mensuelles sur le bassin aval de la Seine ou sur les bassins littoraux ne montrent aucune tendance significative.

Figure 33 : Variations des moyennes mensuelles de précipitations de stations localisés sur les bassins de l'Andelle (a) et du Commerce (b). (Mesquita, 2009)

Les analyses en ondelettes effectuées sur les précipitations moyennes mensuelles du bassin versant aval de la Seine (Figure 34) montrent, outre le cycle hydrologique à 1 an, l'existence de deux bandes de fréquences pluriannuelles, marquées à 2-3 ans et 5-7 ans. On remarque également l'existence d'une rupture dans la puissance de ces deux bandes de fréquences pluriannuelles aux alentours de 1990, se marquant par une baisse de la puissance de la bande quasi-biennale (2-3 ans), tandis que la bande à 6-7 ans augmente en puissance. Ces bandes de fréquences et cette rupture se retrouve dans l'indice climatique NAO, et seraient donc de ce fait d'origine climatique.

Figure 34 : Analyse en ondelettes des précipitations moyennes mensuelles du bassin versant aval de la Seine (Laignel et al., 2008 ; Massei et al., 2008 ; Mesquita, 2009)

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 :

- o 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 (Figure 35) ;
- o au 21^{ème} siècle, seul un scénario régionalisé parmi les 21 montre une augmentation (faible) des précipitations annuelles par rapport au temps présent ;
- o à l'échelle saisonnière, la réponse est dominée par une baisse importante et systématique des précipitations estivales ; l'évolution des précipitations hivernale est plus faible en amplitude, mais incertaine sur le signe (Figure 36) ;
- o 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.

L'évolution des précipitations est certainement l'élément le plus incertain des projections du changement climatique, mais la baisse des précipitations annuelles anticipée dans le bassin de la Seine représente la meilleure projection actuellement disponible, car convergente pour de nombreux scénarios de changement climatique correspondant à l'état de l'art (IPCC, 2007), et pour deux méthodes de désagrégation totalement différentes, mais validées en climat récent sur le domaine.

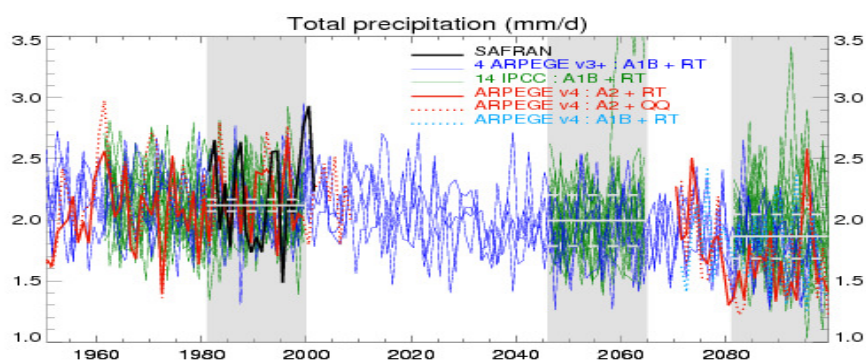


Figure 35 : Evolution des précipitations (moyennes annuelles exprimées en mm/j) dans le bassin de la Seine entre 1950 et 2100. La courbe noire représente les analyses SAFRAN basées sur les observations historiques et les courbes en couleur correspondent à 19 scénarios de changement climatique désagrégés dans le cadre du projet RExHySS. Pour les 3 plages de 19 ans indiquées en gris, centrées en 1990, 2055 et 2090, les moyennes et écart-types inter-scénarios sont représentées par les lignes grises continue et tiretées.

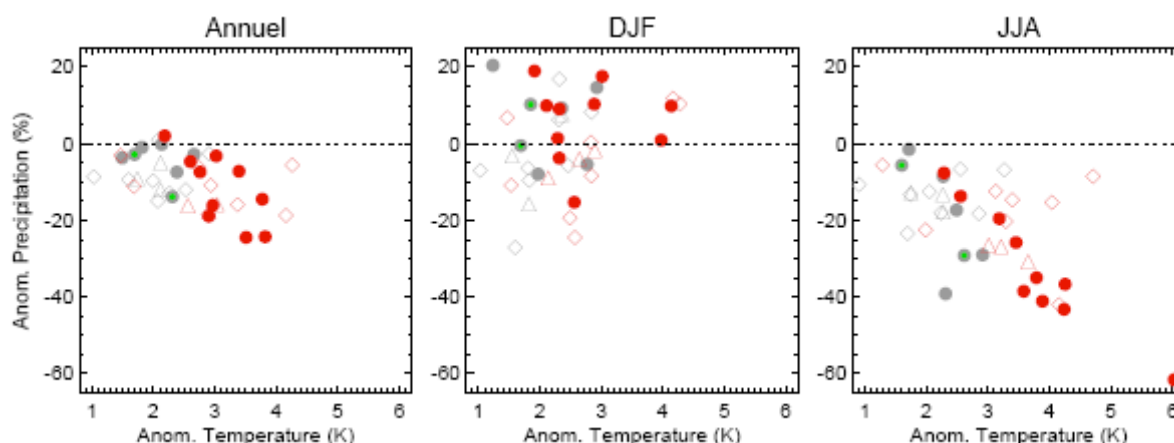


Figure 36 : Relations entre la réponse des précipitations et de température atmosphérique moyennes dans le bassin de la Seine, en moyenne annuelle, hivernale (DJF) et estivale (JJA). Les symboles rouges/gris représentent les réponses fin/milieu de siècle (différence entre la moyenne 2081-2099/2046-2065 et la période récente 1981-1999). Les symboles pleins correspondent aux scénarios analysés par les modèles hydrologiques (voir ci-dessous). Source : Ducharne et al., 2009.

4.3. Evolution des débits 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 deux de ses affluents (Andelle et Austreberthe) présente une tendance statistiquement significative à l'augmentation (Figure 37 ; Mesquita, 2009). L'augmentation du débit moyen de la Seine, depuis les années 1946, a été évaluée de +10 à +30% selon la tendance ajustée.

Figure 37 : Tendances dans l'évolution du débit journalier de la Seine et de ses affluents (ex : Austreberthe et Andelle) (Mesquita, 2009)

Dans le détail, les débits moyens, maximaux et minimaux journaliers annuels centrés de la Seine présentent systématiquement une tendance marquée par le passage d'anomalies négatives à des anomalies positives aux environs des années 1970-80 (Figure 38).

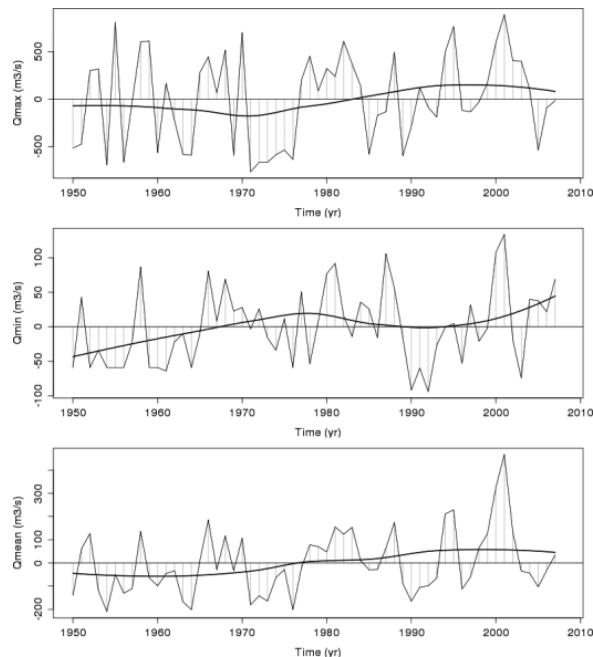


Figure 38 : Variations annuelles des valeurs journalières maximales, minimales et moyennes de débit de la Seine (à Poses) (Massei et al., 2008)

L'analyse en ondelettes des débits de la Seine et de ses affluents permet non seulement de retrouver les bandes de fréquences, mais également ces ruptures,

déjà observées dans la chronique des précipitations moyennes mensuelles (Figure 39). 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 coupures, 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 l'indice NAO, ce qui laisse supposer qu'il s'agit de ruptures climatiques.

Seine

Austreberthe

Figure 39 : Analyse en ondelettes du débit moyen annuel de la Seine et d'un de ses affluents (Austreberthe) (Laignel et al, 2008 ; Mesquita, 2009)

Au cours de la période 1950-2008, l'analyse en ondelettes révèle également une augmentation de la variance du débit pour l'année hydrologique (Figure 38), comme le montre également le profil de variance sur cette bande annuelle avec une tendance croissante (Figure 40). L'augmentation des écarts d'amplitude à la moyenne représentés par cette augmentation de la variance sur le cycle annuel est à rapprocher d'une intensification du cycle hydrologique (accroissement de l'écart entre hautes et basses eaux).

Figure 40 : Distribution de la variance du débit de la Seine sur la bande spectrale 0,8 à 1,2 ans (Mesquita, 2009)

Les changements climatiques régionaux décrits précédemment entraînent un assèchement prononcé du bassin de la Seine au cours du 21^{ème} siècle. Cet

assèchement se traduit par :

- 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 (Figure 41) ;
- 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) ;
- 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.

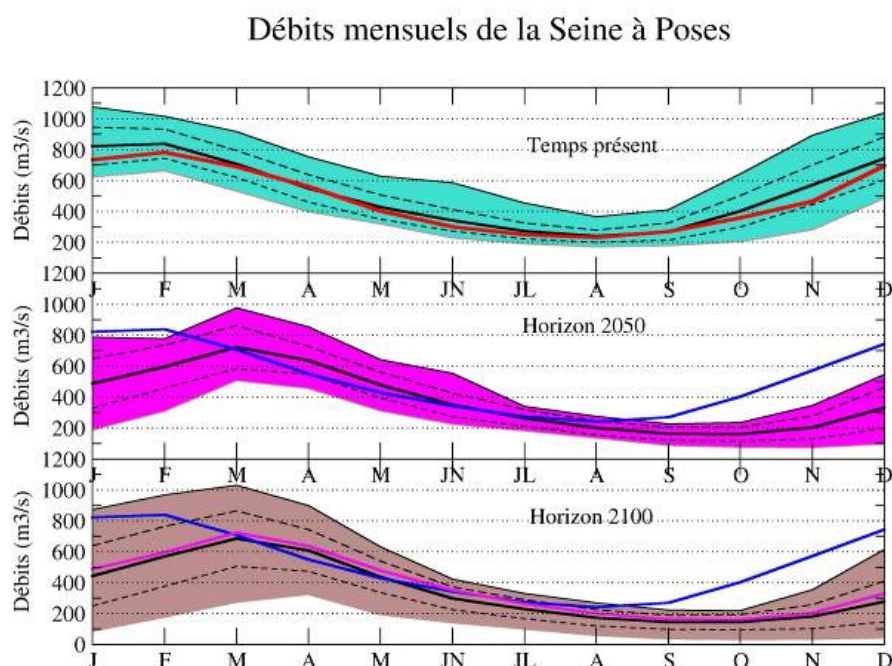


Figure 41 : Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses dans le cadre du projet RExHySS (ensemble de 5 modèles hydrologiques et de 12 scénarios désagrégés). L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe pour un écart-type. En haut: temps présent, la courbe rouge représente la moyenne mensuelle observée. Au milieu Horizon 2050: la courbe bleue représente la moyenne temps présent. En bas Horizon 2100: les courbes bleues et roses représentent les simulations temps présent et milieu de siècle respectivement. Source : Ducharne et al., 2009.

Le projet RExHySS s'est aussi intéressé à la réponse des débits extrêmes dans le réseau hydrographique de la Seine. Cette étude a été ciblée sur :

- le QMNA5 pour les étiages, i.e. le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale (débit mensuel ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être sous-passé) ;
- la proportion de jours dans l'année avec un débit supérieur au

- QMNA5 (fiabilité) ;
- le QJXA10 pour les crues, i.e. le débit journalier maximal annuel de fréquence décennale (débit journalier ayant une probabilité 1/10 chaque année d'être surpassé) ;
- une durée caractéristique de crue.

Les résultats synthétisés ci-dessous sont valables à l'entrée de l'estuaire à Poses :

- la réponse au changement climatique des valeurs extrêmes du débit est un peu plus contrastée que celle de l'hydrogramme moyen, puisque les QMNA5 baisseraient fortement, alors que les QJXA10 ne changeraient pas significativement (Figure 42) ; la durée des crues est également peu modifiée sous changement climatique ;
- l'analyse des étiages en termes de fiabilité montre que la durée des séquences de débits faibles au dessus du QMNA5 actuel (souvent pris par défaut comme seuil d'alerte sécheresse) est diminuée de manière significative. Les crises à gérer et restrictions d'usage aujourd'hui rares seraient donc plus fréquentes.

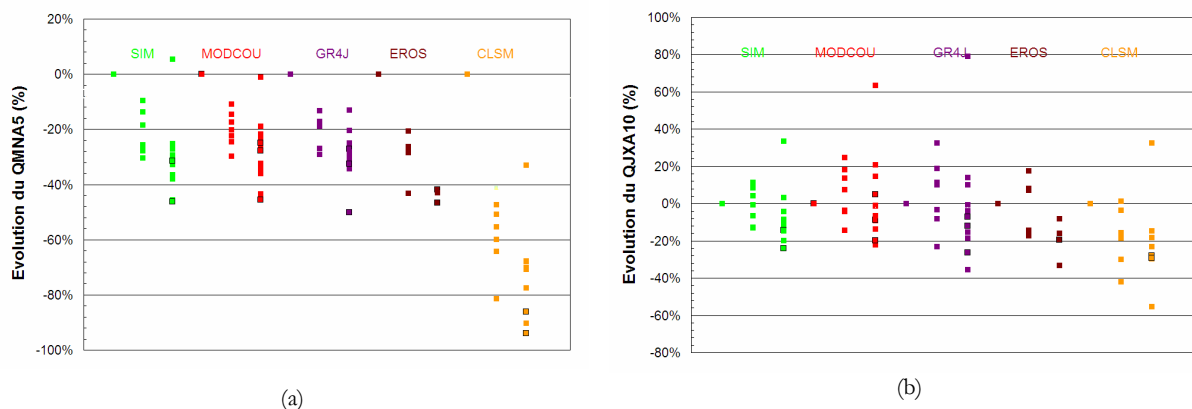


Figure 42 - Evolution des extrêmes du débit de la Seine à Paris : QMNA5 pour les étiages sévères (a) et QJXA10 pour les crues sévères (b). Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés à partir des scénarios désagrégés du climat présent. Les points entourés en noir correspondent aux scénarios A2. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent (0% de changement relatif quel que soit le scénario), la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle. Source : Ducharne et al., 2009.

4.4. Evolution de l'aquifère de la craie

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 (à Poses) et de ses affluents, les tendances dans l'évolution piézométrique apparaissent beaucoup plus complexes (Figure 43). En effet, on constate que 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.

Figure 43 : Tendances dans l'évolution du niveau de la nappe de la craie, de plusieurs piézomètres situés en Haute-Normandie (Slimani, 2009)

Slimani (2009) a montré qu'il existait un comportement différentiel des piézomètres en relation avec le contexte structural de la région de Haute-Normandie (Figure 44).

Figure 44 : Comportement de la piézométrie (aquifère de la craie) et rôle du contexte structural (Slimani, 2009)

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.

La réponse au changement climatique des principaux aquifères du bassin de la Seine (Craie, Eocène, Oligocène) a été simulée dans le cadre du projet RExHySS à l'aide du modèle hydrogéologique MODCOU (Ledoux et al., 1989). 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 confondus². 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 45).

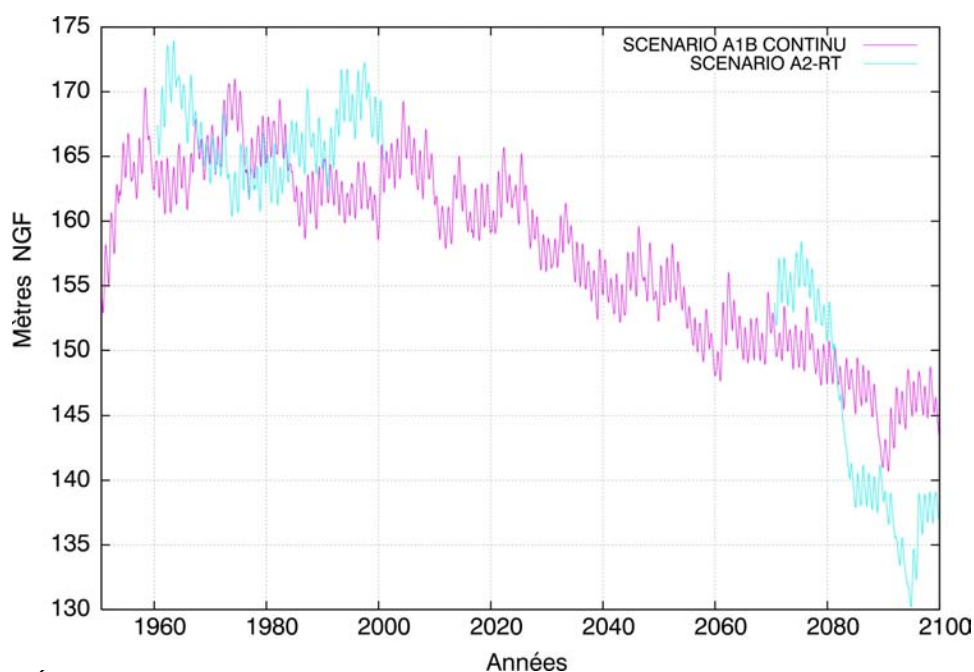


Figure 45 : Évolution de la piézométrie calculée dans la nappe de la Craie à Omécourt (Oise) par le modèle MODCOU, selon deux scénarios de changement climatique (modèle climatique ARPEGE, scénarios d'émissions A2 et A1B, méthode de désagrégation des Régimes de Temps). Source : Ducharne et al., 2009.

4.5. Evolution du niveau de la mer au Havre

Pirazzoli (2008) met en évidence l'existence d'une élévation du niveau de la mer au Havre (Figure 46) de 1938 à 2006 de + 1,8 mm +/- 0,4 mm/an, avec une accélération de 1993 et 2006 : + 2,7 mm +/- 1,5 mm/an.

² Prélèvements globaux de 3025 Mm³ dans le bassin de la Seine en 2001 : en eaux de surface + eaux souterraines, pour les usages domestiques, industriels et agricoles (source : Agence de l'Eau Seine-Normandie)

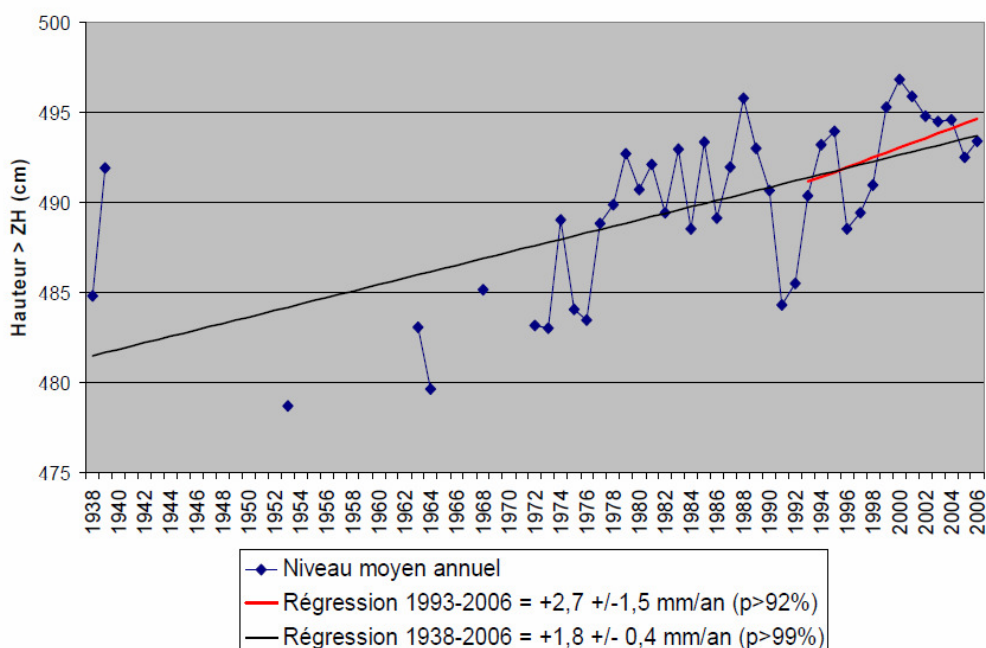


Figure 46 : Variation du niveau moyen de la mer au Havre (Pirazzoli, 2008)

En se basant sur les données de P. Pirazzoli, 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 47). Attention, il ne s'agit que d'une simple image qui ne doit être en aucun cas 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.

Figure 47 : 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)

Dans le cadre du projet RExHySS, une étude a été menée par le bureau d'étude SOGREAH sur l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les inondations de la Somme aval. L'influence de l'élévation du niveau marin due au changement climatique a été évaluée pour deux hypothèses basées sur les résultats de l'IPCC à

l'échelle globale : +0,21 m (hypothèse optimiste) et +0,51 m (hypothèse pessimiste). Ces élévations du niveau marin, en modifiant le fonctionnement de l'écluse de Saint-Valéry (qui marque la limite avec le domaine estuarien), entraînent des inondations plus importantes, notamment à Abbeville, que celles que l'on aurait actuellement pour les mêmes débits de la Somme. Cependant, compte tenu de l'ampleur des actions menées suite à 2001 en matière de réaménagement des ouvrages hydrauliques dans la vallée de la Somme, une crue de la Somme qui se produirait avec l'élévation du niveau marin due au changement climatique ne devrait en aucun cas provoquer des inondations aussi importantes que celles effectivement constatées en 2001 (avec un fonctionnement moins performant de l'écluse de Saint-Valéry). Hors période de crue, l'élévation du niveau marin due au changement climatique pourrait aussi conduire à revoir le fonctionnement de l'écluse de Saint-Valéry-sur-Somme dans le sens d'une augmentation du temps de fermeture des ouvrages à marée haute et du nombre de manœuvres par an (Ducharne et al., 2009).

4.6. Impact du changement climatique sur certains paramètres de la qualité de l'eau de la Seine

Les résultats sur la température et la qualité biogéochimique de l'eau ont été principalement obtenus dans le cadre du projet GICC-Seine, qui se base sur des scénarios de changement climatique sur la Seine assez cohérents avec ceux du projet RExHySS plus récents. C'est notamment le cas en ce qui concerne le réchauffement atmosphérique et la baisse des débits d'étiage, qui constituent les changements les plus importants pour la qualité biogéochimique des cours d'eau, puisque c'est en été que s'expriment l'essentiel des processus biogéochimiques qui la contrôlent (phyto et zooplancton, activité bactérienne).

4.6.1. Température de l'eau

Afin de rendre compte du réchauffement des cours d'eau sous CC (Changement Climatique), Ducharne (2008) a utilisé une modélisation statistique (e.g. Stephan et Preud'homme, 1993 ; Webb et Nobilis, 1997 ; Caissie et al., 1998). Celle-ci permet de définir une relation affine entre la température de l'eau journalière et la température de l'air au voisinage, moyennée sur les jours précédents. Ces relations furent explorées sur la période « chaude » de 1993-1999 et en 88 stations qui échantillonnent toute la variété des cours d'eau du bassin de la Seine (Ducharne, 2008).

Suite à la convergence de la température de l'eau vers sa température d'équilibre radiatif au fur et à mesure que l'eau s'écoule vers l'aval, les paramètres de ces relations peuvent être définis en fonction de l'ordre de Strahler des cours d'eau, avec d'excellentes performances, puisque l'essentiel de la variance de la température de l'eau est ainsi expliqué ($R^2 > 0.88$ aux petits ordres de Strahler, i.e. à l'amont du bassin, et atteignant 0.95 à partir de l'ordre 4).

A partir de l'ordre 6, i.e. dans les principaux axes (Seine jusqu'à l'aval de l'Yonne, Marne jusqu'à la confluence à la Saulx, Oise jusqu'à la confluence à l'Aisne), la pente de la relation est très proche de 1, si bien qu'une augmentation de la température de l'air se reporte directement sur celle de l'eau. Ce résultat a été utilisé pour déduire les températures de l'eau sous CC dans le cadre du projet GICC-Seine, en ajoutant l'augmentation moyenne de température de l'air donnée par les

scénarios climatiques aux valeurs actuelles. Par soucis de simplicité, ce résultat a été extrapolé à l'ensemble du bassin et la saisonnalité du réchauffement climatique a été négligé (Ducharne et al., 2007).

4.6.2. Qualité biogéochimique de l'eau

Les impacts du CC sur la qualité de l'eau (restreinte aux nutriments, carbone, oxygène, eutrophisation) résultent du réchauffement de l'eau, qui joue sur la cinétique des différents processus biogéochimiques, et des changements de débit, qui agissent sur la dilution, la sédimentation et les temps de rétention. Dans le cadre du projet GICC-Seine, une question originale était de comparer l'ordre de grandeur de ces impacts à ceux qui pourraient résulter de l'évolution probable des principales contraintes anthropiques directes dans le bassin, à savoir la pollution azotée diffuse d'origine agricole, telle que simulée par le modèle couplé STICS-MODCOU-NEWSAM et les rejets ponctuels, domestiques et industriels (Ducharne et al., 2007).

L'analyse fut menée à l'aide du modèle RIVERSTRAHLER (Billen et al., 1994 ; Garnier et al., 1995 ; Billen et Garnier, 1999), qui permet le calcul, avec une résolution décadaire, des variations géographiques et saisonnières du débit, de la qualité de l'eau (nutriments, matières en suspension, carbone organique, oxygène) et du fonctionnement écologique d'un réseau hydrographique (dynamique des populations microbiologiques planctoniques, y compris eutrophisation) en fonction des contraintes constituées par la morphologie des cours d'eau, les lames d'eau écoulées, l'insolation et la température de l'eau, l'usage du sol du bassin versant et les rejets ponctuels d'eaux usées.

Les résultats à Poses sont représentatifs des tronçons aval du réseau hydrographique, où le temps de résidence de l'eau depuis l'amont est suffisamment long pour permettre la croissance du phytoplancton et donc du zooplancton, et où les apports ponctuels domestiques et industriels dégradent significativement la qualité de l'eau.

L'impact cumulé du CC simulé à l'issue du 21^e siècle est une augmentation des teneurs en nitrates par rapport aux teneurs en 2000, que ce soit dans les aquifères (+20 mg/l environ) ou dans les cours d'eau (+10 mg/l environ). La différence entre ces deux compartiments s'explique par la contribution des écoulements de surface aux débits et par la dénitrification riveraine. Une généralisation du décret de janvier 2004 sur l'agriculture raisonnée (réduction de la fertilisation azotée de -20% et introduction de CIPAN) aurait un impact opposé du même ordre. Dans tous les cas étudiés, les teneurs en nitrate sont trop fortes pour être limitantes pour la croissance algale, et les impacts ci-dessus ne se propagent pas sur l'eutrophisation de la Seine.

Une prospective spécialisée, intégrant l'évolution de la démographie, des taux de raccordement, du secteur industriel et du progrès technologique d'épuration et de dépollution, indique une réduction importante des apports ponctuels au cours du 21^e siècle, allant de 30 à 75% selon les polluants dans le scénario illustré en figure 48. L'impact de ce scénario est considérable sur les nutriments, et entraîne une amélioration notable de l'oxygénation et de l'eutrophisation. Le CC accentue la baisse de la biomasse algale mais contrecarre l'oxygénation du milieu. Ces impacts du CC s'expliquent essentiellement par le réchauffement de l'eau, alors que les changements de débits simulés n'ont pratiquement aucun impact (Ducharne, 2008). L'importance relative de ces deux facteurs de changement pourrait bien sur être

modifiée si les changements de débit étaient plus importants.

En termes d'apports de nutriments à l'estuaire, les changements ci-dessus devraient se traduire par une augmentation des apports en nitrate, une baisse des apports en phosphate et une augmentation des apports en silice dissoute (du fait de la diminution des blooms de diatomées dans les cours d'eau de la Seine). Ce dernier point devrait profiter aux diatomées de l'estuaire, et pourrait y limiter les blooms de phytoplancton non siliceux (e.g. Cugier et al., 2005).

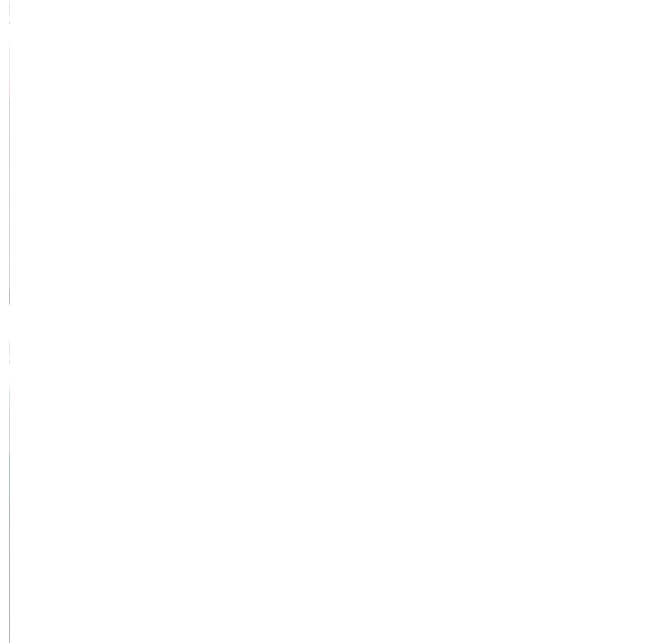


Figure 48 : Impact du changement climatique et de la réduction des rejets ponctuels sur la qualité de l'eau simulée à Poses par RIVERSTRAHLER (moyennes interannuelles). Les différences entre les simulations SAT (Same As Today) et REF indiquent les impacts de la réduction des apports ponctuels, celles entre REF et A2-Tw indiquent l'impact du CC qui résulte des changements de débit et d'apports diffus en nitrate, et celles entre A2-Tw et A2 indiquent l'impact du réchauffement de l'eau (Source : Ducharne, 2007).

4.6.3. Dynamique des matières en suspension en Seine

Aucune étude majeure (publiée) ne met, à l'heure actuelle, en évidence l'existence d'une influence des paramètres climatiques sur la dynamique des matières en suspension (MES). Pourtant, cette dynamique reste un des facteurs majeurs dans le fonctionnement et l'évolution des estuaires. De plus, les MES sont des supports naturels aux contaminants chimiques (Martin et al., 1976) et microbiologiques.

De nombreuses études menées dans le cadre du programme Seine-Aval se sont intéressées à la dynamique des MES et ont montré que celle-ci était reliée aux paramètres hydrologiques de l'estuaire, tels que le débit du fleuve, les marées, mais également la salinité.

a. Approche rétrospective : dynamique de la décantation/sédimentation et de la remise en suspension.

Les matériaux transportés par la Seine, de Poses à son embouchure, sont essentiellement composés de sables fins et de vases, essentiellement transportés en suspension dans l'eau. La répartition des sédiments transportés par le fleuve se fait en fonction de l'énergie du milieu, ce qui explique que, en dehors des zones abritées comme les bras morts, le port de Rouen et certaines zones intertidales protégées des courants, les apports de matériaux provenant du débit se retrouvent dans leur grande majorité stockés au niveau de la partie de l'estuaire aval, dû aux phénomènes d'opposition de la marée et de la salinité, au niveau du bouchon vaseux ou dans les vasières intertidales.

Dans l'estuaire, les vitesses des courants varient en intensité et s'inversent au cours d'un cycle semi-diurne de marée. Ces fluctuations cycliques des capacités de transport se traduisent par l'alternance de phases de remises en suspension, voire d'érosion lorsque la vitesse de frottement est suffisante, et de décantation et sédimentation lorsque l'énergie est insuffisante pour supporter le matériel en suspension.

L'estuaire aval est par définition la zone d'affrontement entre les masses d'eaux d'origine fluviale et d'origine marine. Du fait de l'opposition de ces forces, la limite entre ces deux zones, appelée point nodal de densité, induit la formation d'une zone de concentration turbide, ou bouchon vaseux. Cette zone est formée conjointement par les processus de décantation à partir des eaux fluviales sus-jacentes et les processus de floculation-défloculation dans le gradient de salinité. Sa formation s'explique du fait de l'opposition des courants résiduels profonds provenant du débit du fleuve et de la marée qui se rencontrent et s'annulent, provoquant l'existence d'une zone d'énergie faible, favorisant la décantation et la sédimentation.

Pendant les périodes d'étiage, le bouchon vaseux tend à remonter vers l'amont du fleuve, tandis qu'en période de crue, le bouchon vaseux tend à descendre vers l'aval, pouvant même être évacué du système en formant alors un panache turbide. A l'échelle des variations de la marée, celui-ci tend alors à se déplacer dans l'embouchure au gré du cycle de marée, et donc à se concentrer ou, au contraire, à se diluer.

A cela s'ajoute le rôle des vasières dans la dynamique sédimentaire de l'estuaire. Celles-ci connaissent une période d'érosion, plus ou moins importante en fonction des conditions météorologiques, durant les périodes de transition (printemps/automne) et en particulier pendant la période d'étiage (période estivale). Les vases molles déposées lors des périodes de hautes et basses mers sont régulièrement remises en suspension lors des périodes de flot et de jusant. Les vasières consolidées peuvent également être érodées lorsque l'énergie du milieu est suffisante, alors que les vases molles ont déjà été remobilisées. Enfin, les vases réduites compactes peuvent également être érodées lors des événements de tempête.

b. Modélisation : un outil de gestion de l'estuaire de la Seine

L'approche modélisatrice des dynamiques dans l'estuaire de la Seine a pour but premier d'obtenir un modèle de son fonctionnement. Le modèle utilisé peut être plus ou moins précis en fonction de la problématique posée. Le but final est d'obtenir un ensemble de modèles interdépendants qui pourrait permettre une meilleure prévision et donc une meilleure gestion du milieu estuarien quant aux modifications principalement d'origine anthropique qui pourraient y intervenir.

Il existe deux grands types de modèles pour l'estuaire de la Seine. Les modèles MODESTE et SAM (Simulation Advection Multivariable) sont des modèles de simulation utilisés pour la modélisation de l'hydrodynamisme et du transport de masse dans l'ensemble de l'estuaire de la Seine. Les modèles HISWA, WAVEMUD, Tassement, Flocculation, MOFEA, RIVE, MOCO, Manganèse et ELISE sont des modèles de simulation utilisés pour la modélisation de processus particuliers de l'estuaire de la Seine en complément des modèles MODESTE et SAM (Figure 49).

Figure 49 : Couplages et interactions entre les différents modèles développés dans le programme Seine Aval

Plusieurs études ont montré que les nombreux aménagements d'origine anthropique successifs ont modifié par exemple la pénétration de la marée et de la salinité dans l'estuaire et ainsi provoqué une évolution des conditions de la sédimentation dans l'estuaire et son embouchure.

A partir de ces constatations, on peut donc supposer que, en cas de modification des conditions hydrologiques du système, que ce soit par une diminution significative du débit de la Seine et/ou une élévation du niveau de la mer, la dynamique des matières en suspension connaîtra également des changements profonds, ce qui aura des conséquences sur l'évolution des zones en érosion et sédimentation, et sur le transport des contaminants...

Il apparaît donc fondamental de poursuivre la modélisation de la dynamique hydrosédimentaire de l'estuaire, calée à partir des prévisions de modification du débit et d'élévation du niveau marin.

A titre d'exemple, un premier essai de modélisation a été réalisé par Le Hir (2000) et présenté dans le cadre du colloque d'Arles en 2000 « Le changement climatique et les espaces côtiers ». En intégrant une élévation du niveau de la mer de 60 cm sur l'estuaire de la Seine, les simulations du modèle tridimensionnel ont donné les résultats suivants :

- une faible sensibilité de la remontée des eaux marines à l'élévation du niveau de la mer, avec un déplacement de l'ordre de 1 km vers l'amont des isohalines de faible salinité. La modélisation sur la Loire avec le modèle Télémac-3D avait donné une

progression identique du front de salinité de 1 km vers l'amont (Dribault et Peltier, 1996).

- des différences sur le bouchon vaseux à peine perceptibles (simulation pendant une période de 6 mois pour un débit de 350 m³/s, légèrement inférieur au débit moyen du fleuve) : les masses en suspension du bouchon vaseux restent équivalentes et on observe un recentrage de celui-ci vers le chenal central. En revanche, dans l'estuaire de la Loire, les simulations ont montré un déplacement du bouchon vaseux d'environ 2 km vers l'amont.

Ces simulations ne tiennent cependant pas compte de l'ensemble des interactions des différents stocks de l'estuaire (mer, débit de la Seine et de ses affluents, nappes souterraines). Les simulations futures devront donc intégrer ces interactions et notamment les différentes hypothèses de diminution de débit et des stocks souterrains.

Conclusions et recommandations

Conclusions

A l'échelle du globe, les travaux de l'IPCC permettent d'avoir une vision relativement synthétique du réchauffement climatique et de ses effets.

En revanche, à des échelles plus restreintes, comme celle des fleuves et de leur bassin versant, et encore plus des estuaires, à partir de la bibliographie, il devient très difficile, pour ne pas dire impossible d'avoir une vue exhaustive. Ceci est lié au fait que :

- bien que les études sur ces hydrosystèmes soient nombreuses, elles sont généralement ciblées, soit sur un fleuve (ou estuaire), soit sur un thème et des paramètres donnés ;
- les méthodes utilisées et les échelles spatiales appréhendées sont différentes ;
- la réflexion est menée actuellement, si bien que beaucoup d'études ne sont pas encore publiées et donc difficilement accessibles.

Par ailleurs, les estuaires sont des milieux de nature complexe, demandant un rayon d'expertise étendu. En effet, ils se trouvent non seulement à l'interface entre les domaines continentaux et océaniques, mais sont également le plus souvent des zones anthropisées, où il est difficile de faire la part entre le climat et l'homme.

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 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 rapport 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, mais également les précipitations), 2) sur les conséquences potentiellement importantes du changement climatique sur le fonctionnement des fleuves et des estuaires. 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, les études des effets du changement climatique sont récentes et sont regroupées principalement dans trois programmes : Seine Aval, RexHySS, GICC-Seine. Tout comme pour les autres fleuves dans le monde, ces travaux s'intéressent essentiellement à la relation entre le changement climatique et le fonctionnement hydrologique de la Seine (bassin superficiel et souterrain).

Ces études montrent clairement une augmentation de la température depuis le siècle dernier et qui se poursuivra jusqu'à l'horizon 2100 (+2 à +4°C). 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).

Le débit moyen de la Seine, quant à lui, qui montre une tendance à l'augmentation depuis les années 50 (+10 à +30% en moyenne selon la tendance ajustée), devrait connaître selon les modèles une diminution au cours du 21^{ème} siècle. Les résultats récents du projet RExHySS indiquent ainsi une baisse du débit de la Seine à Poses entre -16 et -36% à la fin du 21^{ème} siècle. Les réserves en eau souterraines suivraient la même tendance significative à la diminution au cours du 21^{ème} siècle.

L'élévation du niveau de la mer, estimée 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. En ce qui concerne les projections sur l'élévation du niveau marin, les incertitudes sont 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.

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.

Un schéma conceptuel des relations entre les principaux paramètres climatiques et les différents stocks d'eau et des hypothèses d'évolution des paramètres hydroclimatiques pour de futurs scénarios en Seine à l'horizon 2100 sont proposés en guise de synthèse (Figure 50).

Recommandations

Suite à cette synthèse, quatre orientations majeures peuvent être dégagées. Elles concernent l'élévation du niveau de la mer, les interactions entre les différents stocks d'eau de l'estuaire (mer, fleuve, aquifère), les événements extrêmes et les archives sédimentaires.

Tout d'abord, comme indiqué précédemment, il semble à l'heure actuelle difficile de définir un scénario unique de l'élévation du niveau de la mer pour l'estuaire et les travaux futurs devront donc s'orienter sur différents scénarios, minimaliste à maximaliste.

De ce fait, il apparaît important de pousser les investigations sur les données marégraphiques, mais également satellitaires, au delà de la détermination de simple tendance, afin notamment de préciser les scénarios d'élévation du niveau de la mer qui devront être modélisés. Cet ensemble permettra alors de mieux comprendre les effets de l'élévation du niveau marin, aussi bien sur les inondations, que la modification de la qualité de l'eau, au travers notamment de la progression du front de salinité et de la dynamique des MES. Dans le détail, il serait, par exemple, intéressant de mener des études sur l'évolution spatiale et temporelle de la zone de

l'estuaire moyen, correspondant à la zone de mélange des eaux douces et salées. On pourrait ainsi qualifier et quantifier l'évolution de cette zone, et savoir si elle a progressé ou reculé dans l'estuaire, et si donc l'influence de la mer est contrebalancée ou aggravée selon l'évolution du débit de la Seine.

En réalité, le fonctionnement hydrologique de l'estuaire de Seine doit être étudié de manière intégrée et nécessite donc de mieux comprendre les interactions entre l'évolution du niveau de la mer, du débit de la Seine et de l'aquifère de la craie. Ce type d'étude devra être mené à la fois à partir des enregistrements historiques et à partir de la modélisation. Les études de l'évolution du débit et de l'aquifère de la craie du bassin de la Seine devront donc être poursuivies en fonction de l'évolution des modèles et être mis en relation avec des scénarios d'élévation du niveau de la mer. Ce travail servira de base pour la modélisation de la dynamique du bouchon vaseux et du gradient de salinité et des implications sur la qualité des eaux (en relation également avec l'évolution de la température).

Par ailleurs, autant les évolutions du débit moyen sont relativement robustes, autant il apparaît important de concentrer les efforts sur les événements extrêmes, dont la fréquence, l'amplitude et les conditions d'apparition restent encore mal connues. Les débits extrêmes de la Seine à Poses ont été étudiés dans le projet RExHySS, qui suggère une intensification des étiages sévères et des changements incertains mais faibles des crues sévères. La prise en compte des événements extrêmes dans le bassin contributif de l'estuaire reste en revanche à construire. Une contribution importante y provient du ruissellement, qui dépend localement de processus assez particuliers, ainsi que du changement des précipitations, qui reste une source d'incertitude majeure, tant en ce qui concerne les cumuls annuels que les moyennes et la répartition saisonnières. Ces incertitudes sont encore plus importantes sur les intensités journalières, et ce d'autant plus que l'échelle spatiale est ici très fine.

Outre les événements extrêmes dans les précipitations et les débits, les études futures devront s'attarder sur les tempêtes (intensité, direction des vents), à l'origine notamment de phénomènes de surcote pouvant entraîner des inondations ponctuelles, ou encore de dégradations liées à la force du vent sur les ouvrages aériens (portuaires par exemple).

Enfin, un dernier point à considérer concernerait la mise en perspective du changement climatique dans le cadre des variations climatiques sur des échelles de temps plus grandes que celle du siècle dernier. Sur la Seine, les archives sédimentaires pourraient permettre d'atteindre non seulement cet objectif, mais aussi de faire des zooms sur des périodes clés affectées par des changements climatiques significatifs ayant eu des conséquences importantes sur la sédimentation et la morphologie de l'estuaire, telles que l'optimum médiéval ou le petit âge glaciaire.

Au regard de cette expertise, il apparaît fondamental de mener à bien l'ensemble de ces études, afin de mieux appréhender le fonctionnement futur des estuaires et les importants changements auxquels la société devra s'adapter dans les décennies à venir.

Hypothèses d'évolution des paramètres hydroclimatiques pour futurs scénarios en Seine à l'horizon 2100

Projections obtenues	Température atmosphérique : +2 à +4°C
dans le cadre de ReHyss	Précipitations moyennes annuelles : -12% en moy
	Débit moyen annuel Seine : -26 % en moy (-16 à -36%)
	Recharge des aquifères : -2700 Mm ³ /a

Projections sur l'élévation du niveau marin :

- 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

Figure 50 : Schéma conceptuel des relations entre les principaux paramètres climatiques et les différents stocks d'eau et hypothèses d'évolution des paramètres hydroclimatiques pour de futurs scénarios en Seine à l'horizon 2100

Bibliographie

- ACIA, 2004. Anon., 2004. Impacts of a Warming Arctic, Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK p. 139.
- Alcamo, J., Doll, P., Kaspar, F., Siebert, S., 1997. Global Change and Global Scenarios of Water Use and Availability: An Application of Water GAP1.0. University of Kassel, Kassel, Germany.
- Anctil, F., Coulibaly, P., 2004. Wavelet Analysis of the Interannual Variability in Southern Québec Streamflow. *Journal of Climate*, 17: 163-173.
- 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.
- 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.
- 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
- Arnell, N.W., Brown, R.P.C., Reynard, N.S., 1990. Impact of climatic variability and change on river flow regimes in the UK. Institute of Hydrology Report No. 107, Wallingford, Oxfordshire, UK, 154 pp.
- Arnell, N.W., Reynard, N.S., 1993. Impact of climate change on river flow regimes in the United Kingdom. Report to Department of the Environment, London, 129 pp. Boorman, D.B., Hollis, J.M. and Lilly, A., 1995. Hydrology of soil types:
- Arnell, N.W., 1996. Global warming, river flows and water resources. Wiley, Chichester.
- Arnell, N.W., 1999. The impacts of climate change on water resources. Meteorological Office, Climate change and its impacts. Hadley Centre, Bracknell
- 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).
- Arpe, K., Leroy, S.A.G., 2008. Atlantic hurricanes—Testing impacts of local SSTs, ENSO, stratospheric QBO—Implications for global warming. *Quaternary International*, In press, corrected proof.
- Ashmore, P., Church, M., 2001. The impact of climate change on rivers and river processes in Canada. *Geological Survey of Canada Bulletin* 555.
- Azemar, F., Van Damme, S., Meire, P., Tackx, M., 2007. New occurrence of *Lecane decipiens* (Murray, 1913) and some other alien rotifers in the Schelde estuary (Belgium). *Belgian Journal of Zoology* 137, 75-83.
- Bareiss, J., Eicken, H., Helbig, A., Martin, T., 1999. Impact of river discharge and regional climatology on the decay of sea ice in the Laptev Sea during spring and early summer. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 31 (3), 214– 229.
- 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 IIa, 677-684

Boe, J., Terray, L., Habets, F. and Martin, E., 2006. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111(D23).

Billen, G., Garnier, J., Hanset, P., 1994. Modelling phytoplankton development in whole drainage networks: The RIVERSTRAHLER model applied to the Seine river system. *Hydrobiologia*, 289: 119-137.

Billen, G., J. Garnier, 1999. Nitrogen transfer through the Seine drainage network: a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER Model. *Hydrobiologia*, 410: 139-150.

Bower D., Hannah D.M., McGregor G.R., 2004. Techniques for assessing the climatic sensitivity of river flow regimes, *Hydrological Processes*, 18, 2515-2543

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

Breaker, L.C., Liu, P.C. and Torrence, C., 2001. Intraseasonal oscillations in sea surface temperature, wind stress, and sea level off the central California coast. *Continental Shelf Research*, 21(6-7): 727-750.

Bubnova R., Hello G., Benard P., Geleyn J.-F., 1995. Integration of the fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain following coordinate in the framework of the Arpge/Aladin NWP system, *Monthly Weather Review*, 123, 515-535

Bultot, F., Coppens, G.L., Dupriez, G.L., Gellens, D., Meulenbershs, F., 1988. Repercussions of a CO₂ doubling on the water cycle and on the water balance -- a case study for Belgium. *J. Hydrol.*, 99: 319-347.

Bultot, F., Gellens, D., Spreafico, M., Schadler, B., 1992. Repercussions of a CO₂ doubling on the water balance -- a case study in Switzerland. *J. Hydrol.*, 137: 199-208.

Burn, D.H., 1994. Hydrologic effects of climatic change in West-Central Canada,, *journal of Hydrology*, 180; 53-70.

Caissie, D., El-Jabi, N., St-Hilaire, A., 1998. Stochastic modelling of water temperatures in a small stream using air to water relations, *Can. J. Civ. Eng.*, 25, 250-260,

Cariolle D., 1999. La régionalisation des scénarios d'évolution climatique : vers les études d'impacts. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 328, 249-259.

Carnell R.E., Senior C.A., 1998. Changes in mid latitude variability due to increasing greenhouse gases and sulphate aerosols, *Climate Dynam.*, 14,369-383

Cazenave A., Dominh K., Gennero M.C., Ferret B., 1998. Global mean sea level changes observed by Topex-Poseidon and ERS-1, *Phys. Chem. Earth*, sous presse

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.

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.

Chambers, D.P., Mehlha, C.A., Urban, T.J., Nerem, R.S., 2002. Analysis of interannual and low-frequency variability in global mean sea level from altimetry and tide gauges. *Physics and Chemistry of the Earth* 27, 1407–1411.

Christensen, O.B., Christensen, J.H., 2004. Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global and Planetary Change* 44, 107–117.

Cohen, S.J., 1986. Impacts of CO₂-induced climatic change on water resources in the Great Lakes Basin. *Clim. Change*, 8: 135-153.

Cugier, P., Billen, G., Guillaud, J.F., Garnier, J. and Menesguen, A., 2005. Modelling the eutrophication of the Seine Bight (France) under historical, present and future riverine nutrient loading. *Journal of Hydrology*, 304(1-4): 381-396.

Cullen HM, De Menocal PB., 2000. North Atlantic influence on Tigris–Euphrates streamflow. *International Journal of Climatology* 20: 853–863.

Cullen HM, Kaplan A, Arkin PA, DeMenocal PB., 2002. Impact of the North Atlantic oscillation on the Middle Eastern climate and streamflow. *Climatic Change* 55: 315–338.

De Jonge, V.N., De Jong, D.J., 2002. 'Global change' impact of inter-annual variation in water discharge as a driving factor to dredging and spoil disposal in the river Rhine system and of turbidity in the Wadden Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 55, 969-991.

Déqué M., Devreton C., Braun A., Cariolle D., 1994. The Arpege/IFS atmospheric model: a contribution to the french community climate modelling, *Clim. Dynam.*, 10, 249-266.

Déqué M., Piedelievre J.-P., 1995. High resolution climate simulation over Europe, *Clim. Dynam.*, 11, 321-339.

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, 173-189.

Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.

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.

Dribault P., Peltier E., 1996. Impact de la surélévation de la mer sur l'estuaire de la Loire. Etude hydraulique sur modèle numérique. Rapport final du programme de recherche : Elévation du niveau de la mer le long des côtes de France. Mesures, impacts, réponses. Paris, Ministère de l'Environnement, 13 p.

Ducharne A, Baubion C, Beaudoin N, Benoit M, Billen G, Brisson N, Garnier J, Kieken H, Lebonvallet S, Ledoux E, Mary B, Mignolet C, Poux X, Sauboua E, Schott C, Théry S, Viennot P, 2007. Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375/1-3 : 293-312, 10.1016/j.scitotenv.2006.12.011

Ducharne, A., 2007. La Seine en 2100 ? Impacts croisés du changement climatique et des pressions anthropiques directes. Actes du 86ème Congrès de l'ASTEE, Barcelona, (Spain), 4-7 Juin 2007.

Ducharne, A., 2008. Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrology and Earth System Science*, 12, 797-810.

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, 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.

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

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.

Fairbridge, R.W., 1980. The estuary its definition and geodynamics cycle. *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries*, ed. Olausson, E. & Cato, I. Wiley, New York, 1-35.

Francis, D., Hengeveld, H., 1998. Extreme weather and climate change. Environment Canada, Downsview, Ontario

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.

Gan, T.Y., Kwong, Y.T., 1992. Identification of warming trends in Northern Alberta and Southern Northwest territories by the non-parametric Kendall's test. In: Kite, G.W., Harvey, K.D., (Eds.), *Using Hydrometric Data to Detect and Monitor Climatic Change*. Proceedings of NHRI Workshop No. 8, national hydrography research institute, Saskatoon, Saskatchewan.

Garnier J., G. Billen, M. Coste., 1995. Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling. *Limnology. & Oceanography*, 40: 750-765.

Gates W.L., 1992. AMIP: The atmospheric model intercomparison project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 1962-1970

Gaucherel, C., 2002. Use of wavelet transform for temporal characterisation of remote watersheds. *Journal of Hydrology* 269, 101–121.

Gornitz V., 1995. Monitoring sea level changes, *Climatic Change*, 31, 515-544

Hansen J., Sato M., Ruedy R., 1997. Radiative forcing and climate response, 1. *Geophys. Res. - Atmos.*, 102, 6831-6864

Hegerl C.C., von Storch H., Hasselmann K., Santer B.D., Cubasch U., Jones P.D., 1996. Detecting greenhouse-gas-induced climate change with an optimal fingerprint method, *J. Climate*, 9, 2281-2306

Held, I.M., Soden, B.J., 2000. Water vapor feedback and global warming. *Annu. Rev. Energy Environ.* 25, 441–475

Hennessy, K.J., Gregory, J.M., Mitchell, J.F.B., 1997. Changes in daily precipitation under enhanced greenhouse conditions. *Climate Dynamics* 13, 667–680

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.

Hirsch, R.M., Slack, J.M., Smith, R.A., 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, 18, 107-121.

Houghton J.T., Meiro Filho L.G., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A., Maskell K. (eds.), 1996. *Climate Change 1995 – The Science of Climate Change*, Cambridge

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.

Hreiche, A., 2003. Modélisation conceptuelle de la transformation pluie-débit dans le contexte méditerranéen. *Sciences de l'eau*. Université Montpellier II, 242p.

Hulme M., 1992. A 1951-1980 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models, *Clim. Dynam.*, 7, 57-72

Hurrell, J. W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.

Hurrell, J. W., Van Loon H., 1997. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 36, 301-326.

IDAG, 2005. Detecting and Attributing External Influences on the Climate System : A Review of Recent Advances. *J. Clim.*, 18, 1291-1314.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2001. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Impacts, Adaptation & Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge.

Itabashi, H., 2008. Overview of Global Warming and Animal Industries, 2008 March,. Nippon Veterinary and Life Science University. Conference.

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.

Jiménez, P., Andreo, B., Carrasco, F., Duraín, J.J., Lo´pez-Geta, J.A., 2002. Caracterizacio´n de acuíferos carboná´ticos del sur de España a partir de su respuesta hidrodinamica. In: Carrasco, F., Duraín, J.J., Andreo, B. (Eds.), *Karst and Environment*, pp. 105– 113

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

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.

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.

Keim, B. D., R. A. Muller, G. W. Stone, 2004. Spatial and temporal variability of coastal storms in the North Atlantic Basin, *Mar. Geol.*, 210(1– 4), 7 – 15.

Kendall, M.G., 1975. *Rank correlation measures*. Charles Griffin, London, 202pp.

Knowles, N., Cayan, D.R., 2002. Potential effects of global warming on the Sacramento/San Joaquin watershed and the San Francisco estuary. *Geophysical Research Letters* 29.

Kuhnel, I., McMahon, T.A., Finlayson, B.L., Haines, A., Whetton, P.H., Gibson, T.T., 1990. Climatic influences on streamflow variability: a comparison between southeastern Australia and southeastern United States of America. *Water Resource Research*, 26 (10), 2483–2496.

Kumar, P., Foufoula-Georgiou, E., 1993. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields. Segregation of large and small scale features using wavelet transform. *Water Resource Research* 29 (8), 2515–2532.

Kumar, P., 1996. Role of coherent structure in the stochastic dynamic variability of precipitation. *Journal of Geophysical Research* 101 (26), 393–404.

Kunkel, K.E., 2003. North American trends in extreme precipitation. *Natural Hazards* 29, 291–305.

Labat, D., Ababou, R., Mangin, A., 1999. Analyse en ondelettes en hydrologie karstique: 1re partie: analyse univarié e de pluies et débits de sources karstiques. *Comptes Rendus Academy Scientific Paris, Series IIa* 329, 873–879.

Labat, D., Ababou, R., Mangin, A., 2000. Rainfall runoff relations for karstic springs: continuous wavelet and multiresolution analyses. *Journal of Hydrology* 238, 149–178.

Labat, D., Ababou, R., Mangin, A., 2001. Introduction of wavelet analyses to rainfall-runoffs relationship for karstic basins: the case of Licq-Atherey karstic system (France). *Ground Water* 39 (4), 605–615.

Labat, D., Godd  ris, Y., Probst, J.L., Guyot, J.L., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27, 631–642.

Labat, D., 2008. Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers. *Advances in Water Resources* 31, 109–117

Lafore J.-P., Stein J., Asencio N., Ducrocq V., Duron J., Fisher C., Heriel P., Mascart P., Masso V., Pinty J.-P., Redelsperger J.-L., Richard E., Vila-Guero de Arellano J., 1998. The MESO-NH atmospheric simulation system. Part 1: adiabatic formulation and control simulations, *Ann. Geophysicae*, 16,90-1 09

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.

Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., Banton, O., 1998. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology* 205, 217–231.

Leander , R, Adri Buishand, T., van den Hurkn B.J.J.M., de Wit, M.J.M., 2008. Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *Journal of Hydrology* 351, 331– 343.

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, Massachusett: Kluwer Academic, 435–54.

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.

Le Hir P., 2000. Effets    attendre de l'élévation du niveau de la mer dans les estuaires : les cas de la Seine et de la Loire. Colloque « Le changement climatique et les espaces côtiers », Arles 12-13 octobre 2000, 34-40

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.

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.

Loaciga, H.A., Valdes, J.B., Vogel, R., Garvey, J., Schwarz, H., 1996. Global warming and the hydrologic cycle. *J. Hydrol.* 174, 83–127.

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.

MacGuffie, K., Henderson-Sellers, A., Holbrook, N., Kothavola, Z., Balachova, O., Hoeksstra, 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.

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.

Manabe S., Stouffer R.J. 1997. Climate variability of a coupled ocean-atmosphere-land surface model: implication for the detection of global warming (Walter Orr Roberts lecture), *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 78,1177-1185

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.

Mann, H.B., 1945. Non-parametric test against trend, *Econometrica*, 13, 245-259.

Mann, M.E., Bradley, R.S., Hughes, M.K., 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779-787.

Maraun,D., Kurths, J., 2004. Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 505–514.

Mares, I., C. Mares, M. Mihailescu, 2002. NAO impact on the summer moisture variability across Europe, *Phys. Chem. Earth.*, 27(23– 24), 1013– 1017.

Martin J.M., Meybeck, M., Salvadori, F., Thomas A., 1976. Pollution chimique des estuaires: état actuel des connaissances

Martins, I., Maranhao, P., Marques, J.C., 2002. Modelling the effects of salinity variation on *Echinogammarus marinus* Leach (Amphipoda, Gammaridae) density and biomass in the Mondego Estuary (Western Portugal), *Ecological modelling*, 152, 247-260.

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.

Massei N., Laignel B., Mesquita J., Motelay A., Deloffre J., Lafite R., 2008 - The variability of Seine river discharge (France) was investigated using daily longterm hydrological changes of the Seine river discharge, France (poster). AGU, San Francisco 2008.

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

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.

Masson, Joussaume S., 1997. Energetics of the 6000.yr BP atmospheric circulation in boreal summer, from large-scale to monsoon areas: a study with two versions of the LMD AGCM, /. *Climate*, 10, 2888-2903

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.

Meyers, S.D., Kelly, B.G., O'Brien, J.J., 1993. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology with application to the dispersion of Yanai waves. *Monthly Weather Review* 121 (10), 2858–2866.

Meyers, S.D., O'Brien, J.J., 1994. Spatial and temporal 26-day SST variations in the equatorial Indian Ocean using wavelet analysis. *Geophysics Research Letter* 21 (9), 777–780.

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.

Mitchell J.F.B., Davis R.A., Ingram WJ., Senior C.A. 1995. On surface temperature, greenhouse gases, and aerosols: models and observations, /. *Climate*, 8,2364-2386

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.

Moisselin J.M., Schneider M., Canellas C., Mestre O., 2002. Les changements climatiques en France au 20ème siècle. Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, n°38, août 2002, 45-56.

Moreno, M.C., Martí'n, J., 1986. Estudio preliminar sobre las tendencias de la precipitación anual en el Sur de la Península Ibérica. El caso de Gibraltar. II Simposio sobre el Agua en Andalucía 2, 37–44.

NAST, 2001. National Assessment Synthesis Team, 2001: Climate Change Impacts on the United States: The Potential Consequences of Climate Variability and Change: Overview, US Global Change Research Program, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, p. 612.

Nemec, J., Schaake, J., 1982. Sensitivity of Water-Resource Systems to Climate Variation. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 27(3): 327-343.

New, M., Todd, M., Hulme, M., Jones, P., 2001. Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology* 21, 1899–1922.

Olsthoorn, X., van der Werff, P., Bouwer, L.M., Huitema, D., 2008. Neo-Atlantis: The Netherlands under a 5-m sea level rise. *Climatic Change* 91, 103–122.

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., Vygotskaya, 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

Onuchin, A., Balzter, 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.

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.

Padilla, A., Pulido-Bosch, A., 1995. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. *Journal of Hydrology* 168, 73–89.

Palmer, T.N., Räisänen, J., 2002. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature* 415, 512–514.

Patillo, M.E., Czapla, T.E., Nelson, D.M., Monaco, M.E., 1997. Distribution and Abundance of Fishes and Invertebrates in Gulf of Mexico Estuaries. In: *Species Life History Summaries*. ELMR Report No. 11, vol. II. NOAA/NOS Strategic Environmental Assessment Division, Silver Spring, MD, 377 pp.

Pekárová, P., Koniček, 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.

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>.

Planton, S., Déqué, M., Douville, H., Spagnoli, B., 2005. Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique. *C.R.Geoscience* 337, 193–202.

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.

Pozo-Vázquez, 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.

Ramanathan, V., Krutzen, P.J., Kiehl, J.T., Rosenfeld, D., 2001. Aerosols, climate, and the hydrologic cycle. *Science* 294, 2119–2124.

Reader M.C., Boer G.J. 1998. The modification of greenhouse gas warming by the direct effect of sulphate aerosols, *Clim. Dynam.*, 14,593-607 Santer B.D., Taylor

Raghavak Laval R.C., Sadourny R., Polche J., 1995. Atmospheric response to tropical denuding of vegetation. Elsevier Science Ltd.

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.

Rodrigo, F.S., Esteban-Parra, M.J., Pozo-Vázquez, D., Castro Díez, Y., 2000. Rainfall variability in S Spain on decadal to centennial time scales. *International Journal of Climatological* 20, 721–732.

Rodwell, M. J., D. P. Rowell, C. K. Folland, 1999. Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, 398, 320–323.

Rogers, J.C., 1997. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe, *J. Clim.*, 10, 1635– 1647.

Santer B.D., Taylor K.E., Wigley T.M.L., Penner J.E., Jones P.D., Cubasch U., 1995. Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate, *Clim. Dynamics*, 12, 77-100

Schaake, J.C., Chunzben, L., 1989. Development and application of simple water balance models to understand the relationship between climate and water resources. New directions for surface water modelling. Proc. of Symposium held in Baltimore, MD, May 1989. IAHS Publ. no. 181. International Association of Hydrological Sciences, Washington, DC, pp. 343-352.

Schwarz, H.E., 1977. Climatic change and water supply: how sensitive is the Northeast? In: *Climate, Climate Change and Water Supply*. National Academy of Sciences, Washington, DC, pp. 111-120.

Sefton, J., 1996. Output Gaps and Inflation: an Approach Using a Multivariable Beveridge-Nelson Decomposition, Discussion Paper, 87, NIESR.

Sidle, R.C., Dhakal, A.S., 2002. Potential effect of environmental change on landslide hazards in forest environments. In: Sidle, R.C. (Ed.), *Environmental change and geomorphic hazards in forests*. CABI, Wallingford, pp. 123–165.

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.

Smith, L.C., Turcotte, D.L., Isacks, B.L., 1998. Streamflow characterization and feature detection using a discrete wavelet transform. *Hydrological Processes* 12, 233–249.

Stanev EV, Peneva EL., 2002. Regional sea level response to global climatic change: Black Sea examples. *Global and Planetary Changes* 32: 33–47.

Stefan, H.G., Preud'homme, E.B., 1993. Stream temperature estimation from air temperature, *Water Resources Bulletin*, 29, 27-45.

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.

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.

Szilagyi, J., Parlange, M.B., Katul, G.G., Albertson, J.D., 1999. An objective method for determining principal time scales of coherent eddy structures using orthonormal wavelets. *Advances Water Resource* 22 (6), 561–566.

Tett S.F.B., Mitchell J.F.B., Parker D.E., Allen M.R., 1996. Human influence on the atmospheric vertical temperature structure. Detection and observations, *Science*, 274, 1170–1173

Tolan, J.M., 2007. El Niño-Southern Oscillation impacts translated to the watershed scale: Estuarine salinity patterns along the Texas Gulf Coast, 1982 to 2004. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 72 247–260

Trenberth, K.E., 1999. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change* 42, 327–339.

Trigo, R.M., Pozo-Vasquez, D., Osborn, T.J., Castro-Diez, Y., Gamiz-Fortis, S., Esteban-Parra, M.J., 2004. North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* 24, 925–944.

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.

Ulbrich, U., M. Christoph, 1999. A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing, *Clim. Dyn.*, 15, 551–559.

Ulbrich, U., M. Christoph, J. G. Pinto, J. Corte-Real, 1999. Dependence of winter precipitation over Portugal on NAO and baroclinic wave activity, *Int. J. Climatol.*, 19, 379–390.

Ullmann, A., Pirazzoli, P.A., Tomasin, A. Sea surges in Camargue: Trends over the 20th century, *Continental Shelf Research* 27 (2007) 922–934

Van Aken, H.M., 2008. Variability of the salinity in the western Wadden Sea on tidal to centennial time scales. *Journal of Sea Research* 59, 121–132

Webb, B.W., Nobilis, F., 1997. Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: a case study, *Hydrol. Proc.*, 11, 137–147.

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.

Westmacott, J.R., Burn, D.H., 1997. Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson river basin. *Journal of Hydrology* 202, 263–279.

Wetherald, R.T., Manabe, S., 2002. Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *Journal of Geophysical Research* 107, D19.

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

Xu, C.Y., 1999. Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98–9: 295–304.

Yuan, F., Miyamoto, S., Anand, S., 2007. Changes in major element hydrochemistry of the Pecos River in the American Southwest since 1935. *Applied Geochemistry* 22, 1798–1813.

Zebiak, S.E., Cane, M.A., 1987. A Model El Niño–Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115, 2262–2278.

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.

Liste des experts ayant participé à la synthèse :

Benoît LAIGNEL (PR, Coordinateur), UMR CNRS 6143 « Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Rouen, benoit.laignel@univ-rouen.fr

Nicolas FRITIER (Doctorant), UMR CNRS 6143 « Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Rouen, nicolas.fritier@etu-univ-rouen.fr

Nicolas MASSEI (MCF, Hydroclimat, Qualité de l'eau), UMR CNRS 6143 « Morphodynamique Continentale et Côtière », Université de Rouen, nicolas.massei@univ-rouen.fr

Agnès DUCHARNE (CR, Hydroclimat, Qualité de l'eau), UMR Sisyphe 7619 CNRS, Université Pierre et Marie Curie, agnes.ducharne@ccr.jussieu.fr

Anniët LAVERMAN (CR, Qualité de l'eau), UMR Sisyphe 7619 CNRS, Université Pierre et Marie Curie, Anniët.Laverman@ccr.jussieu.fr

Henri ETCHEBER, (CR, Qualité de l'eau), UMR EPOC 5805 CNRS, Université de Bordeaux 1, h.etcheber@epoc.u-bordeaux1.fr