



aménagement de la bassée

INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DE LA SEINE

synthèse bibliographique

Version 2 du 5 juillet 2010



 egis eau



 ile de France



GRILLE DE REVISION DU DOCUMENT

INCIDENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DE LA SEINE	
<i>synthèse bibliographique</i>	
Version :	2
Date :	5 juillet 2010
Modifications	
Émetteur	Egis Eau
Rédaction (contrôle 1)	D CALVAR, Egis Eau
Vérification (contrôle 2)	R CROIX (Egis Eau), Erick LUCAT (Egis Conseil)
Destinataires	Grands Lacs de Seine

Versions antérieures	1			
Date	18/05/2010			
Modifications				
Émetteur	Egis Eau			
Rédaction (contrôle 1)	D CALVAR (Egis Eau)			
Vérification (contrôle 2)	R CROIX (Egis Eau)			
Destinataires	GLS			
<i>document1</i>				

SOMMAIRE

1. AVANT PROPOS	7
1.1 Présentation générale de l'étude	7
1.2 Synthèse	8
Evolution actuelle et future du climat au niveau du globe et de la France	8
Evolution de l'hydrologie de la Seine sous changement climatique	9
Conclusions pour la prise en compte du cahier des charges pour le projet de la Bassée	9
2. CADRE ET OBJET DE L'ETUDE	10
2.1 Cadre	10
2.2 Objet	11
3. ANALYSE DES DOCUMENTS DE REFERENCE	13
3.1 Historique des travaux sur le changement climatique	13
Présentation et organisation du GIEC	13
Objectifs du GIEC	13
Les activités/rapports du GIEC	14
3.2 Historique des travaux sur le changement climatique réalisés au niveau du bassin de la Seine	14
3.3 Bibliographie utilisée	16
Présentation générale des documents analysés	16
3.4 Etudes/recherches similaires sur des bassins connexes	20
4. METHODOLOGIE	21
4.1 Principe d'une étude d'impact sur l'hydrologie	21
4.2 Les modèles climatiques	22
4.3 Les méthodes de descente d'échelle	24
Objectifs des méthodes de descente d'échelle	24
Les méthodes de désagrégation statistique et dynamique	24
4.4 Les modèles d'impacts	25
4.5 Les incertitudes	26
5. BILAN DES CONNAISSANCES SUR LE THEME DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	27
5.1 Changement climatique sur le globe simulé par les modèles du GIEC	27
Evolution récente du climat	27
Evolution future du climat	28

5.2	Changement climatique sur la France simulés par les modèles du GIEC.....	30
	Evolution recente du climat.....	30
	Evolution future du climat	30
5.3	Les résultats obtenus sur le bassin de la Seine.....	32
	Evolution de l'hydrologie moyenne interannuelle	32
	Evolution potentielle du débit d'étiage de la Seine sous changement climatique.....	33
	Evolution potentielle des crues de la Seine sous changement climatique.....	36
6.	BILAN DES ENTRETIENS AVEC LES EXPERTS	39
6.1	Objet des entretiens réalisés	39
6.2	Synthèse des entretiens.....	39
	Commentaires sur les résultats du projet RExHySS	39
	Conclusion	41
7.	LE PROJET DE LA BASSEE ET PERSPECTIVES	42
7.1	Le projet de la Bassée.....	42
	Présentation générale du projet	42
	Les principes du projet	43
7.2	Les perspectives	43
	Incidences potentielles du changement climatique sur la gestion de l'ouvrage	43
	Evolution de l'intensité des crues sous changement climatique.....	44
	Evolution des conditions de génèse des crues de la Seine sous changement climatique	44
	Evolution de la forme des hydrogrammes des crues de la Seine sous changement climatique	44
7.3	Conclusion	45
	GLOSSAIRE	47
9.	ANNEXE 1 : FICHES DE LECTURE	51
10.	ANNEXE 2 : COMPTES RENDUS DES ENTRETIENS REALISES	67
11.	ANNEXE 3 : PRESENTATION DES SCENARIOS « SRES »	82

Liste des figures

Figure 3-1.	Définition du point d'évolution des documents analysés.....	16
Figure 3-2.	La démarche des impacts hydrologiques	17
Figure 4-1.	Principe d'une étude d'impact sur hydrologie	22
Figure 5-1.	Différences entre 1961 et 1990 de la température moyenne globale, du niveau de la mer et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord (Source GIEC, 2007).....	27

Figure 5-2. Evolution de la concentration de CO2 (source GIEC, 2007)	28
Figure 5-3. Réchauffement global moyen – projections par scénario SRES	29
Figure 5-4. Changement saisonnier de température (en °C) sur l'Europe entre les périodes 2080/2099 et 1961/1990, donné par la moyenne d'ensembles des modèles de GIEC AR4 (source : Boé, 2007).	31
Figure 5-5. Europe : Changement relatif (par rapport à la période 1971 - 2000) des précipitations hivernales (à gauche) et estivales (à droite) simulées par les multi-modèle CMIP3 pour période 2046-3065 et le scénario d'émission SRES A1B. les croix indiquent les zones où au moins 85% des signes des réponses des différents modèles sont en accord (source : Boé, 2007).	31
Figure 5-6. Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarios.	32
Figure 5-7. Localisation des points d'analyse	34
Figure 5-8. Evolution des quantiles centennaux du débit à Paris entre le climat présent (PST) et la fin du siècle (FS) : débits moyens sur 24 jours VCX24J(T= 100 ans) et débits journaliers QJXA100.	38
Figure 7-1. Localisation des casiers projetés (source : Grands Lacs de Seine)	43

Liste des tableaux

Tableau 3-1. Liste des documents analysés	19
Tableau 5-1. Station de Saint Florentin (l'Yonne). Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	34
Tableau 5-2. Station de Courlon (l'Yonne). Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	35
Tableau 5-3. Station de Mussy-sur-Seine. Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	35
Tableau 5-4. Station de Pont sur Seine. Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	35
Tableau 5-5. Station de Paris. Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	36
Tableau 5-6. Station de Saint Florentin (l'Yonne). Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	36
Tableau 5-7. Station de Courlon (l'Yonne). Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	36
Tableau 5-8. Station de Mussy sur Seine (la Seine). Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	37
Tableau 5-9. Station de Merry sur Seine (la Seine). Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	37
Tableau 5-10. Station Paris. Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS	37

1. AVANT PROPOS

1.1 Présentation générale de l'étude

Le présent document constitue le rapport final : incidence du changement climatique sur le bassin de la Seine, synthèse bibliographique.

Le dossier est structuré en six chapitres comme suit :

- ▶ Le chapitre premier rappelle les enjeux et objectifs de l'étude et le déroulement en trois phases de celle-ci ;
- ▶ Le second chapitre rappelle et synthétise les travaux sur le thème du changement climatique menés par le GIEC et les travaux sur le changement climatique réalisés au niveau du bassin de la Seine. En fin de chapitre une présentation générale de la bibliographie utilisée dans la cadre de la présente étude est réalisée ;
- ▶ Le troisième chapitre présente les étapes et les moyens employés (les scénarios socio-économiques SRES, les modèles climatiques, les méthodes de descente d'échelle, modèles d'impact) pour la réalisation d'une étude d'impact sur l'hydrologie ;
- ▶ Le quatrième chapitre présente un bilan des connaissances sur le thème du changement climatique tout d'abord au niveau de la France et par la suite au niveau du bassin de la Seine ;
- ▶ Le cinquième chapitre présente un bilan des entretiens réalisés par Egis Eau avec des différents experts dans le domaine du changement climatique et principalement les experts qui sont participés aux différents projets sur le bassin de la Seine (GICC Seine, RExHySS) ;
- ▶ Le dernier chapitre dresse une conclusion sur les incidences du changement climatique sur le projet de la Bassée.

1.2 Synthèse

Evolution actuelle et future du climat au niveau du globe et de la France

La présente étude a été réalisée à partir de plusieurs documents de référence disponibles actuellement. Ces documents ont été publiés entre 2001 et 2010.

Le quatrième rapport du GIEC 2007, présente les résultats des recherches menées par des spécialités du monde entier. Les résultats obtenus indiquent une évolution du climat actuel marqué par une augmentation des températures, du niveau de la mer, une diminution des glaciers et de la couverture neigeuse, des périodes de sécheresse plus longues et plus sévères, une augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère terrestre.

Selon les simulations réalisées dans le cadre du quatrième rapport du GIEC, à l'horizon 2100 le globe terrestre sera affecté par :

- ▶ un réchauffement en surface entre 1.8°C (scénario B1 ; pollution la plus réduite) et 4°C (scénario A1 F1 ; pollution la plus forte) (cf. Figure 5-3) ;
- ▶ une augmentation des précipitations aussi bien en été qu'en hiver aux hautes altitudes et dans les zones de convergence intertropicale et une diminution dans les régions subtropicales durant les deux saisons ;
- ▶ une élévation du niveau de la mer entre 18 et 38 cm dans le meilleur cas et 26 et 59 cm dans le cadre du scénario le plus défavorable ;
- ▶ une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone (acidification des océans) et une élévation de la température moyenne mondiale à la surface de la mer ;
- ▶ une réduction de la glace de mer dans l'Arctique et l'Antarctique. Les simulations les plus extrêmes prévoient une disparition complète, d'ici 100 ans, de la glace de mer en Arctique à la fin de l'été ;
- ▶ des vagues de chaleur et de fortes précipitations qui seront plus fréquentes. Les cyclones tropicaux (ainsi que les typhons et ouragans) deviendront plus intenses.

En ce qui concerne, l'évolution future du climat en France, à l'horizon 2100, les résultats obtenus dans le cadre du 4^{ème} rapport du GIEC montrent une augmentation généralisée de la température moyenne d'environ 2.5°C au printemps à 4°C en été.

Par rapport aux précipitations, la caractéristique principale la plus marquante des changements de précipitations sur la France est, la forte diminution estivale, souvent supérieure à 30%. Cette diminution est générale sur l'Europe du Sud.

Globalement, les précipitations augmentent au Nord de l'Europe et diminuent au Sud, mais la limite varie au cours de l'année : elle se situe plus au Nord en été et plus au Sud en hiver.

Sur des larges parties de l'Europe, entre ces deux zones aux changements robustes, il n'y a pas de cohérence de signe entre les modèles. C'est le cas de certaines parties de la France durant toutes les saisons. Il n'y a qu'en été que les signes sont cohérents sur la majorité du territoire français. **Sur les ¾ de la France, le signe du changement du régime des précipitations en hiver n'est pas cohérent entre les modèles et est, par conséquent incertain.**

Evolution de l'hydrologie de la Seine sous changement climatique

Les travaux sur l'incidence du changement climatique sur le bassin de la Seine sont regroupés dans deux documents de référence : GICC Seine (2001-2005) et RExHySS (2007-2009).

Par rapport au projet de la Bassée, le document de référence à considérer est le projet RExHySS. Ce projet vise à évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins versants de la Seine et de la Somme. Il constitue le document spécifique utilisant les résultats climatiques les plus récents.

Au cours du 21^{ème} siècle, l'ensemble des scénarios hydrologiques, mis en œuvre dans RExHySS, indique un assèchement prononcé des bassins étudiés, qui se traduit notamment par une baisse de la recharge annuelle des nappes (-33% en fin de siècle). Il s'ensuit une baisse des niveaux piézométriques, qui contribue à la baisse des débits moyens.

De manière générale, sous changement climatique, les bassins de la Seine et de l'Yonne, évoluent vers des étiages plus sévères. Les deux bassins se situent dans la classe de modification la plus extrême (-25 à 50%) dès le milieu de siècle quel que soit le modèle hydrologique.

Les auteurs de RExHySS indiquent qu'« En regard des incertitudes analysées (incertitudes générées par les modèles climatiques à grande échelle, des modèles hydrologiques et les méthodes de régionalisation), ces résultats sont robustes ».

L'évolution des crues sous changement climatique a été étudiée pour la crue décennale et la crue centennale. Les résultats obtenus dans RExHySS indiquent une évolution du régime des crues moins marquée que celui des étiages.

Le résultat principal est l'absence de tendance systématique qu'il s'agisse des pointes de crues journalières, ou des débits moyens sur 24 jours.

D'après les auteurs de RExHySS « *Les conclusions de cette étude peuvent se résumer par des variations probablement modérées du régime des crues, qu'il s'agisse des crues décennales comme des crues centennales. Ce résultat, beaucoup moins inquiétant que la baisse générale des ressources en eau projetée en parallèle, doit cependant être regardé avec beaucoup de précautions, vues les incertitudes fortes qui l'entachent* ».

Les différents entretiens réalisés par Egis Eau avec plusieurs experts sur le thème du changement climatique, viennent confirmer les résultats présentés ci-dessus.

Conclusions pour la prise en compte du cahier des charges pour le projet de la Bassée

Actuellement, les Grands Lacs de Seine étudient un projet sur le site de La Bassée en Seine-et-Marne qui vise à écrêter les crues de la Seine afin de contribuer à la protection contre les inondations de la région parisienne. Ce projet a été étudié et conçu sur le fonctionnement hydrologique actuel des crues historiques du 20^{ème} siècle.

En l'absence de certitude sur les tendances d'évolution des débits de crue, les résultats obtenus dans RExHySS ne remettent pas en cause le projet de la Bassée et sa conception actuelle. Les données utilisées pour la conception du projet (le fonctionnement hydrologique actuel des crues historiques du 20^{ème} siècle) constituent actuellement la meilleure source d'information.

2. CADRE ET OBJET DE L'ETUDE

2.1 Cadre

Le changement climatique est étudié depuis plus de 20 ans. Les différents rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) ont proposé des analyses de l'évolution climatique globale (1990, 1995, 2001 et 2007). Ces rapports ont mis en évidence un réchauffement dû à la combinaison d'une fluctuation naturelle du climat et à un forçage radiatif lié aux activités humaines.

Ces changements du climat global ont déjà et auront encore des conséquences sur les écosystèmes océaniques et terrestres et des impacts sur les activités humaines. Toutes les régions ne seront pas touchées de la même manière par les changements climatiques.

Au cours des dernières années, il a été constaté que le changement climatique est susceptible de se traduire par des modifications sensibles du comportement des grands bassins versants, y compris dans les zones tempérées, telles que celles du bassin versant de la Seine.

Actuellement, les Grands Lacs de Seine étudient un projet sur le site de La Bassée en Seine et Marne qui vise à écrêter les crues de la Seine afin de contribuer à la protection contre les inondations de la région parisienne. Ce projet a été étudié et conçu sur le fonctionnement hydrologique actuel des crues historiques du 20^{ème} siècle.

Le changement climatique est susceptible de se traduire par des modifications sensibles du comportement des grands bassins versants, y compris dans les zones tempérées, telles que celles du bassin versant de la Seine. Cependant, les modifications à une échelle de temps et d'espace, exploitables pour la conception générale d'un ouvrage hydraulique du type de la Bassée ne semblent pas encore disponibles.

2.2 Objet

L'objectif de la prestation est de faire le point sur les connaissances actuelles sur le changement climatique et des effets attendus sur l'hydrologie de la Seine.

La mission d'Egis Eau est basée sur une analyse bibliographique sur le thème du changement climatique en général et plus particulièrement de l'incidence du changement climatique sur le régime hydrologique de la Seine. Des entretiens avec plusieurs experts concernés par le sujet (climatologues, hydrologues) ont été réalisés.

La finalité de la prestation est de réaliser une note de synthèse décrivant les tendances du changement climatique sur le bassin de la Seine et le sous-bassin de l'Yonne. Cette synthèse comprend l'analyse de la prépondérance d'un phénomène par rapport à l'autre, ainsi qu'une estimation quantitative des phénomènes (modifications de pluviométrie et de débit).

Les résultats de cette prestation seront ensuite exploités par le prestataire de l'étude hydraulique d'optimisation de la gestion de l'ouvrage (HYD1) dans l'optique d'apprécier les conséquences du changement climatique sur l'ouvrage de la Bassée (fonctionnement de l'ouvrage sur la base du dimensionnement tel qu'établi dans le cadre des études antérieures, adaptation du fonctionnement de l'ouvrage, principes d'aménagement complémentaires...).

Le déroulement de l'étude comporte 3 phases :

- ▶ Phase 1 : Bibliographie et bilan descriptif des données ;
- ▶ Phase 2 : point sur l'état de l'art sur le thème du changement climatique par le biais d'entretiens avec un ensemble d'experts concernés par le sujet (climatologues, hydrologues) ;
- ▶ Phase 3 : Conclusion sur l'impact du changement climatique sur le projet de la Bassée.

3. ANALYSE DES DOCUMENTS DE REFERENCE

3.1 Historique des travaux sur le changement climatique

Présentation et organisation du GIEC

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, en anglais Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) a été créé en 1988, à la demande du G7 (aujourd'hui G20), par deux organismes de l'ONU : l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE).

Le GIEC est un organe intergouvernemental qui est ouvert à tous les pays membres de l'ONU et de l'OMM.

Le GIEC est organisé en trois groupes de travail :

- ▶ Groupe I : Il étudie les principes physiques et écologiques du changement climatique ;
- ▶ Groupe II : Il étudie les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique ;
- ▶ Groupe III : Il étudie les moyens d'atténuer (mitigation) le changement climatique.

S'y ajoute une équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre, qui a produit des guides méthodologiques pour ces inventaires.

Chaque groupe de travail (et l'équipe spéciale) a deux co-présidents, l'un représentant les pays développés, l'autre les pays en voie de développement.

Objectifs du GIEC

Le GIEC a pour « mission d'évaluer sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ».

Le GIEC n'est donc pas un organisme de recherche, mais un lieu d'expertise visant à synthétiser des travaux menés dans les laboratoires du monde entier.

Les activités/rapports du GIEC

L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers, à une évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique.

Le GIEC élabore aussi des rapports spéciaux et des documents techniques sur des sujets qui nécessitent des informations et des avis scientifiques indépendants et contribue en outre à la mise en œuvre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) par ses travaux sur les méthodes à appliquer pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre.

Depuis 1990, le GIEC a publié 4 rapports désignés sous les acronymes suivants :

- ▶ FAR (First Assessment Report) pour le Premier rapport (1990) ;
- ▶ SAR (Second Assessment Report) pour le Deuxième rapport (1995) ;
- ▶ TAR (Third Assessment Report) pour le Troisième rapport (2001) ;
- ▶ AR4 (4th Assessment Report) pour le Quatrième rapport (2007) ;
- ▶ AR5 pour le Cinquième Rapport (planifié).

Le GIEC définit actuellement les grandes lignes du Cinquième Rapport d'Evaluation (AR5), qui paraîtra en 2014.

▶ 1er rapport d'évaluation 1990

Il confirmait les informations scientifiques à l'origine des préoccupations sur le changement climatique. Il a incité l'ONU à établir une Convention cadre sur les changements climatiques adoptée en 1992 et entrée en vigueur en mars 1994.

En 1992, le GIEC a produit un rapport supplémentaire destiné aux négociateurs de la Convention-cadre sur les changements climatiques du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro, la même année. La principale conclusion de ce rapport est que les travaux scientifiques publiés depuis 1992 ne changeaient pas fondamentalement la compréhension de l'effet de serre et n'appelaient pas à remettre en cause les conclusions du précédent rapport.

▶ 2ème rapport d'évaluation : « Changements climatiques » en 1995

Ce rapport a fourni les bases de négociation du protocole de Kyoto.

▶ 3ème rapport d'évaluation : « Bilan 2001 des changements climatiques »

Il comprend les trois rapports des groupes de travail et un rapport de synthèse sur les questions scientifiques directement liées avec les politiques à suivre.

▶ 4ème rapport d'évaluation : « Changements Climatiques 2007 »

Le quatrième rapport d'évaluation (AR4) a été publié le 16 novembre 2007. Il compile les travaux de chacun des Groupes de travail présentés lors de trois sessions échelonnées au cours de l'année :

Le rapport du Groupe de travail I sur les bases scientifiques physiques des changements climatiques présenté à Paris, le 1er février 2007.

Le rapport du Groupe de travail II sur les conséquences, l'adaptation et la vulnérabilité aux changements climatiques présenté à Bruxelles, le 5 avril 2007.

Le rapport du Groupe de travail III sur l'atténuation des changements climatiques présenté à Bangkok, le 3 mai 2007.

Le Rapport de synthèse (RSY) qui fait la synthèse des précédents. Il fut rédigé sous la direction du Président du GIEC, et publié avec la version finale de l'AR4.

Chacune de ces quatre parties est accompagnée d'un résumé à l'intention des décideurs (summary for policy-makers, SPM) qui récapitule dans un format condensé les conclusions du groupe de travail pour des non-experts, et en particuliers les décideurs politiques. L'AR4 sert ainsi de base aux négociations de la Conférence de Copenhague de 2009.

► 5ème rapport d'évaluation: « Changements Climatiques 2014 »

Le GIEC travaille actuellement à la préparation d'un rapport prévu pour être livré en 2014.

3.2 Historique des travaux sur le changement climatique réalisés au niveau du bassin de la Seine

Deux études dédiées aux effets du changement climatique sur le bassin de la Seine ont été réalisées : GICC Seine et RExHySS.

Le projet GICC Seine fait partie du programme de recherche "Gestion et Impacts du Changement Climatique" (GICC) a été lancé en 1999 par le Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer (MEEDDM). L'objectif du projet GICC (2000-2005) Seine est d'étudier l'influence du changement climatique, en relation avec les changements des contraintes anthropiques directes, sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine.

Le projet RExHySS s'inscrit dans le prolongement des plusieurs études pilotées par le programme GICC sur les systèmes fluviaux, les projets GICC-Seine et GICC-Rhône. Il a bénéficié de l'expérience acquise dans le cadre de nombreux projets de recherche : Imfrex, Discendo, Ensembles, Rivages.

Il s'agit donc d'évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins versants de la Seine et de la Somme.

Le point de départ des études réalisées à l'échelle de la France et du bassin versant de la Seine est constitué par les données climatiques fournies par les MCGOA.

A la lecture des documents disponibles, il est constaté l'existence d'un « point d'évolution ». Ce point constitué par le 4ème rapport du GIEC (2007) est marqué par un progrès significatif des modèles climatiques de circulation générale MGC, une meilleure compréhension des incertitudes et de l'évolution du climat.

Au niveau du bassin de la Seine, ce point est marqué par une « évolution » potentielle des crues de la Seine sous changement climatique. Cet élément est détaillé dans le chapitre suivant.

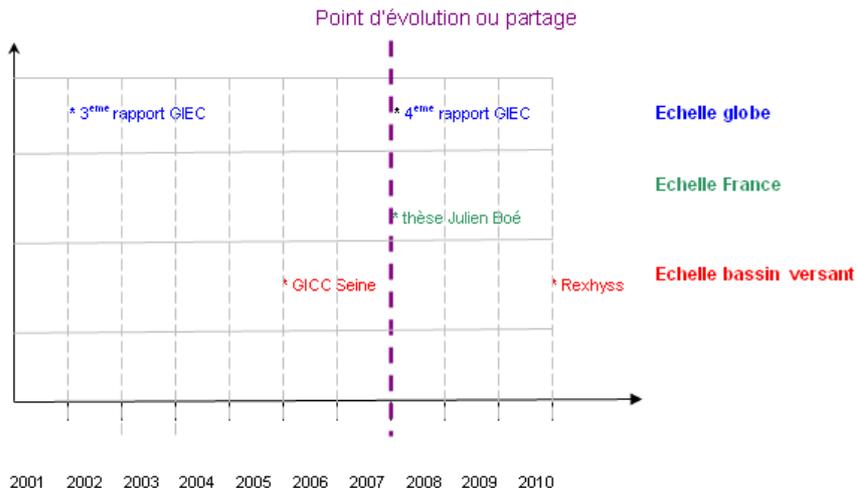


Figure 3-1. Définition du point d'évolution des documents analysés

3.3 Bibliographie utilisée

Présentation générale des documents analysés

Une première étape de l'étude a consisté en l'identification de la bibliographie disponible sur le thème du changement climatique et des effets attendus sur l'hydrologie de la Seine.

Etant donné que ce domaine de recherche avance rapidement et fait l'objet des travaux continus, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux travaux les plus récents (la liste des ouvrages étudiés ne constitue donc pas une liste bibliographique exhaustive sur le sujet).

Les documents (études, articles) ont été fournis par le Maître d'Ouvrage et Egis Eau.

Egis Eau a étudié ces documents disponibles de manière systématique en réalisant une fiche de lecture synthétique pour chaque source de données pertinente. Les fiches de lecture ont été annexées au présent document.

Les passages les plus pertinents de ces ouvrages ont été extraits et sont présentés dans les fiches de lecture et ci-dessous en caractères italiques.

Pour la réalisation de cette mission, Egis Eau a disposé d'une vingtaine de documents : thèses, publications dans les revues de spécialités, résultats des recherches. Ces documents, publiés entre 2001 et 2010, traitent de l'impact du changement climatique à différentes échelles : globe, continent, pays, bassin versant.

Le tableau après présente tous les documents identifiés ainsi que leur intérêt pour le projet de la Bassée. En fonction de l'échelle spatiale, les documents disponibles peuvent être partagés en deux catégories (cf. figure ci-dessous) :

- Echelle spatiale globale :** Projets dédiés à l'étude des effets du changement climatique à l'échelle du globe. Ces études sont constituées en grande partie des rapports du GIEC. Elles sont basées sur la mise en œuvre des modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA). Les résultats fournis sont des tendances d'évolution du climat du globe terrestre en termes de température, précipitations, évolution du manteau neigeux.... L'échelle spatiale de ces modèles est d'environ 250km² ;
- Echelle spatiale plus fine :** Projets dédiés à l'étude de l'impact du changement climatique à l'échelle de l'Europe, de la France voir du bassin versant. Les MCGOA ont une assez faible résolution spatiale (mailles de 250 à 450 km²), beaucoup plus faible que celle requise par les études hydrologiques (échelle locale à celle du bassin versant). Il y a donc une incompatibilité d'échelle qui justifie l'utilisation de méthodes de désagrégation d'échelles des scénarios climatiques. Ces méthodes sont de deux types et elles peuvent éventuellement être combinées : méthodes de régionalisation statistique et méthodes de régionalisation dynamique (modèles à échelle variable).

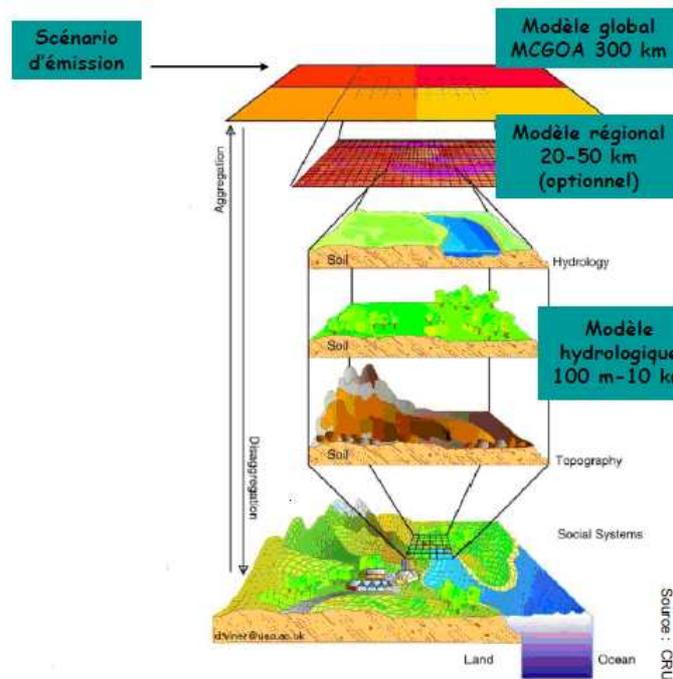


Figure 3-2. La démarche des impacts hydrologiques

Tableau 3-1. Liste des documents analysés

Auteur	Titre	Année	Nb pages	Commentaires	Intérêt pour le projet
Documents GIEC					
IPCC	Rapport de synthèse 2001	2001	124	Doc de référence générale	faible
IPCC	Rapport de synthèse 2001 (avant propos du rapport de synthèse)	2001	10	Doc de référence générale	faible
IPCC	Rapport de synthèse 2001. Annexes	2001	43	Doc de référence générale	faible
IPCC	Rapport de synthèse 2001. Résumé à l'intention des décideurs	2001	37	Doc de référence générale	faible
IPCC	Bilan 2001 du changement climatique: Les éléments scientifiques	2001	97	Doc de référence générale	faible
IPCC	Bilan 2001 du changement climatique: Conséquences, adaptation et vulnérabilité	2001	101	Doc de référence générale	faible
IPCC	Climate change and water	2007	214	Doc de référence générale	faible
IPCC	Climate change 2007. Synthesis report	2007	52	Doc de référence générale	fort
IPCC	Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability (chapter 12)	2007	40	Doc de référence générale	fort
Documents ONERC					
	Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France (document d'étape)	2008	247		faible
	Stratégies d'adaptation (documentation française)		107		faible
	Colloque ONERC		35	Quelques papiers intéressants	faible
Documents France					
Boé	Changement global et cycle hydrologique: une étude de régionalisation sur la France (thèse)	2008	278	Doc de base pour le BV Seine	fort
Terray, Braconnot	Projet Escrime. Etude des simulations climatiques réalisées par IPSL et MétéoFrance	2007	70		moyen
Redaud	Changement climatique et impact sur le régime des eaux en France	2002	41		moyen
Bassin versant Seine					
Ducharme et al,	Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Seine	2003	13		fort
Ducharme et al,	Projet GIC-Seine. Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine	2005	61		fort
Ducharme et al,	Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine	2008	2	Résumé d'une communication	moyen
Ducharme et al,	Projet REXHySS. Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme	2009	62	Rapport de fin de contrat	fort
Ducharme et al,	Projet REXHySS. Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique	2010	8	Résumé d'une communication	très fort

3.4 Etudes/recherches similaires sur des bassins connexes

D'après nos recherches deux études similaires aux projets GICC Seine et RExHySS ont été réalisées sur :

- ▶ le bassin du Rhône : Le projet GICC-Rhône s'est intéressé aux impacts à prévoir sur la partie française du bassin du Rhône, dans le cas d'un changement climatique revenant à un doublement du CO2 atmosphérique ;
- ▶ Le bassin de la Loire: la réalisation d'un « état des lieux et proposition de recommandation relatifs à la connaissance des impacts du changement climatique sur le bassin de la Loire, ainsi qu'aux stratégies ou mesures d'adaptation correspondantes déjà mises en œuvre pour le compte de l'Etablissement Public Loire ».

4. METHODOLOGIE

4.1 Principe d'une étude d'impact sur l'hydrologie

Le principe général d'une étude de l'impact hydrologique du changement climatique est d'utiliser les conditions climatiques du futur simulées par un modèle de climat global en fonction d'un scénario d'émissions atmosphériques (gaz à effet de serre et aérosols) pour le 21^{ème} siècle (cf. Figure 4-1).

Afin de traduire les effets du changement climatique à l'échelle locale plusieurs étapes sont nécessaires (cf. Figure) :

- 1. Réalisation des scénarios socio-économiques (SRES).** A partir de ces scénarios, des scénarios de concertation des gaz à effet de serre et aérosols sont réalisés. Dans le cadre du GIEC, 4 scénarios SRES ont été réalisés (voir annexe 3) ;
- 2. La mise en œuvre des modèles climatique de circulation générale.** Les meilleurs outils disponibles aujourd'hui pour réaliser des projections climatiques globales sous différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES) sont les modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA).
- 3. Mise en œuvre des méthodes de désagrégation** (descente d'échelle). Les modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA) constituent des modèles très complexes avec un fort coût numérique. Pour cela la résolution de ce type de modèle est à l'heure actuelle grossière (de l'ordre de 250 km²). Cette résolution n'est pas suffisante pour représenter correctement l'usage des sols, les contrastes terre-mer, le relief, qui ont pourtant un rôle majeur dans la détermination du climat régional et local. De plus, les modèles d'impact, tels que les modèles hydrologiques, nécessitent la plupart du temps des informations météorologiques en entrée à une résolution spatiale très fine, la plupart du temps inférieure à 10 km.

Pour cela, il faut réaliser une étape intermédiaire, nommée régionalisation, désagrégation ou encore downscaling. Elle consiste à dériver des variables simulées par les modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA) à basse résolution afin d'obtenir l'information climatique à haute résolution nécessaire aux modèles d'impact, doit être mise en œuvre. Cette étape est cruciale, et si une vaste panoplie de méthodes de désagrégation existe, « aucune ne peut prétendre être parfaite et/ou universelle (Boé, 2007) ». Depuis quelques années, les scientifiques français concentrent leurs efforts à l'analyse et le développement des méthodes de descente d'échelle. Une grande partie des études sur l'impact du changement climatique, réalisées tout particulièrement depuis 2007 par les experts français, est basée sur l'utilisation de deux méthodes : régimes de temps et quantile-quantile.

- 4. Mise en œuvre des modèles d'impact.** Cette étape consiste à transformer les estimations climatiques (dont températures atmosphériques, ETP et précipitations) fournies par les méthodes de désagrégation en grandeurs caractéristiques du fonctionnement hydrologiques des bassins versants (débits et niveaux des nappes phréatiques).

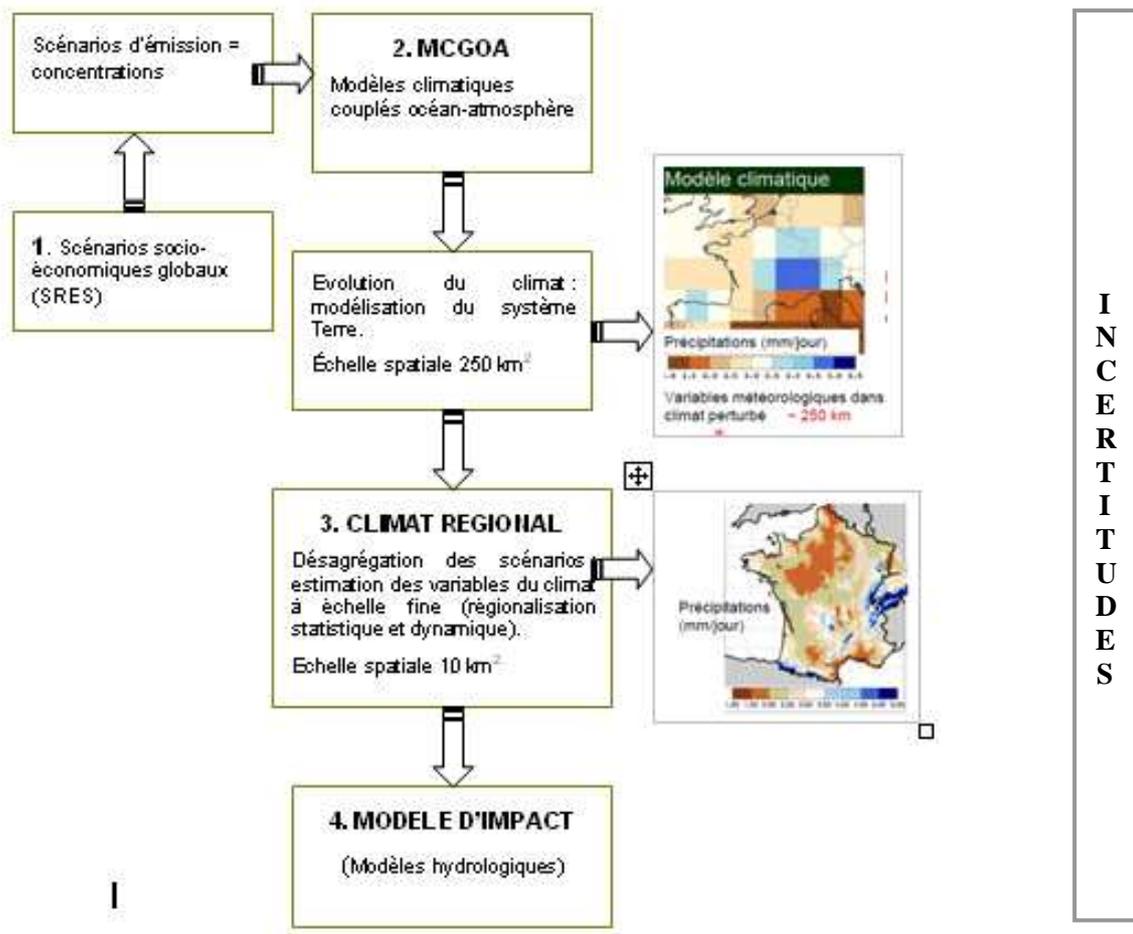


Figure 4-1. Principe d'une étude d'impact sur hydrologie

4.2 Les modèles climatiques

Un modèle climatique est un programme informatique conçu pour reproduire le comportement du climat terrestre.

Les projections par les scientifiques de l'évolution future du climat est possible par l'utilisation de modèles mathématiques traités informatiquement sur des superordinateurs. Ces modèles, dits de circulation générale, reposent sur les lois générales de la thermodynamique et simulent les déplacements et les températures des masses atmosphériques et océaniques. Les plus récents prennent aussi en considération d'autres phénomènes, comme le cycle du carbone.

Ces modèles sont considérés comme valides par la communauté scientifique lorsqu'ils sont capables de simuler des variations connues du climat, comme les variations saisonnières, le phénomène El Niño, ou l'oscillation nord-atlantique. Les modèles les plus récents simulent de façon satisfaisante les variations de température au cours du XXe siècle. En particulier, les simulations menées sur le climat du XXe siècle sans intégrer l'influence humaine ne rendent pas compte du

réchauffement climatique, tandis que celles incluant cette influence sont en accord avec les observations.

Les modèles informatiques simulant le climat sont alors utilisés par les scientifiques pour établir des scénarios d'évolution future du climat, mais aussi pour cerner les causes du réchauffement climatique actuel, en comparant les changements climatiques observés avec les changements induits dans ces modèles par différentes causes, naturelles ou humaines.

Ces modèles sont l'objet d'incertitudes de nature mathématique, informatique, physique, etc. Les trois principales sources d'incertitude mentionnées par les climatologues sont :

- ▶ La modélisation des nuages ;
- ▶ La simulation de phénomènes de petite échelle, comme les cellules orageuses, ou l'effet du relief sur la circulation atmosphérique ;
- ▶ La modélisation de l'interface entre les océans et l'atmosphère.

De façon plus générale, ces modèles sont limités d'une part par les capacités de calcul des ordinateurs actuels, et le savoir de leurs concepteurs d'autre part, la climatologie et les phénomènes à modéliser étant d'une grande complexité.

L'importance des investissements budgétaires nécessaires sont aussi un aspect non négligeable de la recherche dans le domaine du réchauffement climatique. Malgré ces limitations, le GIEC considère les modèles climatiques comme des outils pertinents pour fournir des scénarii d'évolution utiles du climat.

La France possède deux modèles climatiques développés par CNRM et par l'IPSL.

Le modèle numérique ARPEGE est un modèle de circulation générale global et spectral développé en collaboration avec le Centre Européen de Prévision (CEP à Reading, U.K.) pour la prévision numérique du temps.

La version climat d'ARPEGE, nommée ARPEGE-Climat, a été développée dans les années 90 (Déqué et al., 1994). Le modèle ARPEGE-Climat est devenu au cours du temps la composante atmosphérique du modèle "système terre" du CNRM couplant les différentes composantes du système climatique (atmosphère, océan, végétation, glace de mer). Ce modèle du système terre est décrit dans Salas y Melia et al. (2005) pour la version utilisée dans l'exercice IPCC-AR4 (rapport paru en 2007).

4.3 Les méthodes de descente d'échelle

Objectifs des méthodes de descente d'échelle

D'une façon générale, l'étude des impacts du changement climatique sur un système donné (hydrologique, écologique..) repose sur l'utilisation d'un modèle d'impact simulant le fonctionnement du système en réponse à un forçage météorologique.

Il est ainsi nécessaire de disposer de projections de l'évolution des variables météorologiques de forçage aux échelles spatiales et temporelles compatibles avec le modèle d'impact. A l'heure actuelle, la résolution typique de la composante atmosphérique d'un modèle circulation générale océan-atmosphère (MCGOA) est de l'ordre de 250 km.

Les modèles d'impact nécessitent la plupart du temps des informations climatiques d'entrée à une échelle spatiale très fine, souvent inférieure à la dizaine de kilomètres. De plus, le climat peut varier à des échelles spatiales très fines, en fonction notamment des caractéristiques physiographiques. Les modèles d'impact qui modélisent en général des processus se déroulant à une échelle très fine, sont souvent sensibles à ces variations de petite échelle du climat.

Les méthodes de descente d'échelle permettent de descendre à des échelles de l'ordre de la dizaine de kilomètres, et/ou de corriger les résultats des simulations en les calibrant aux observations (diminution des biais en particulier), en particulier pour étudier les extrêmes de précipitations et pour les régions à topographie complexe.

Les principaux objectifs de la régionalisation :

- ▶ Améliorer la représentation de la variabilité spatiale et temporelle du climat et de son évolution, en particulier les statistiques des événements extrêmes climatiques (vagues de chaleurs, fortes pluies, sécheresses, tempêtes, cyclones, ...).
- ▶ Faciliter les études d'impacts du changement climatique sur les différents secteurs socio-économiques (hydrologie, écosystèmes, santé, ...).

Les méthodes de désagrégation sont traditionnellement classées en deux grandes familles : désagrégation dynamique et désagrégation statistique (Mearns et al., 1999). Ces deux approches complémentaires peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée.

Les méthodes de désagrégation statistique et dynamique

Désagrégation ou descente d'échelle statistique: mise en œuvre au début des années 90 pour l'étude du changement climatique (Von Storch et al, 1993; Boé et al, 2006; Vrac, 2007; Royer et al, 2008...).

La désagrégation statistique repose sur l'idée que le climat régional est conditionné par deux facteurs : l'état climatique de grande échelle et des propriétés physiographiques locales, telles que la topographie, l'usage des sols, les contrastes terre/mer (von Storch, 1995,1999). Suivant cette idée, un modèle statistique reliant une ou des variables caractérisant l'état de l'atmosphère à grande échelle (variables prédictives) aux variables climatiques locales ou régionales (ou variables prédites) est bâti en se basant sur des observations.

Ce modèle statistique est ensuite utilisé pour dériver les variables climatiques régionales à partir de la grande échelle simulée par un modèle climatique basse résolution.

Un grand nombre de méthodes de descente d'échelle existe :

- ▶ **Classification en type de temps – analogues** : elle se base sur l'idée que les mêmes causes produisent les mêmes effets (pour le climat régional) ;
- ▶ **Régression** : établir un modèle de régression est un moyen simple de relier linéairement ou non-linéairement les variables locales aux prédicteurs de grande échelle ;
- ▶ **Générateur de temps** : est un modèle statistique visant à reproduire des séries temporelles respectant les propriétés statistiques de la variable climatique locale considérée, sans chercher néanmoins à en reproduire la séquence observée (Wilks et Wilby, 1999).

Désagrégation dynamique: aussi mise en œuvre au début des années 90 pour l'étude du changement climatique (Giorgi et al, 1992; Déqué et al, 1998; Li et al, 2005, ...). Elle consiste à reproduire le climat par un modèle climatique régional à aire limitée ou à maille variable.

4.4 Les modèles d'impacts

Dans le cadre du projet RExHySS 5 modèles hydrologiques ont été mobilisés : MODCOU, SIM, CLSM, EROS, GR4J. Ils couvrent les principales différences entre les grandes écoles de modélisation hydrologique (hydro-météorologiques vs hydrogéologiques, distribués vs globaux, à bases physiques vs conceptuels) et ont tous été validés en temps présent avec de bonnes performances, en utilisant les forçages météorologiques SAFRAN.

Le modèle hydrologique couplé MODCOU (Ledoux, 1984) a pour objectif de simuler les écoulements de surface et les écoulements souterrains dans un système hydrologique multicouche. Pour ce faire, il applique la méthode des différences finies, sur une structure constituée de mailles carrées emboîtées. Le modèle hydrogéologique MODCOU est un modèle distribué. Il représente les mêmes processus physiques (bilan hydrique de surface, transfert dans la zone non saturée, écoulements latéraux dans les nappes, échanges nappe-rivière, transfert en rivière), avec des formulations différentes.

Le modèle GR4J est un modèle de bassin à réservoirs, il représente de façon très implicite le fonctionnement des nappes.

MODCOU et GR4J utilisent un pas de temps supérieur ou égal à la journée, et de ce fait, nécessitent un minimum de variables atmosphériques : les précipitations et évapotranspirations potentielles journalières, ainsi que les températures minimales et maximales journalières.

Les modèles hydrométéorologiques CaB et SIM se distinguent des modèles précédents, car ils résolvent les cycles diurnes des bilans d'eau et d'énergie en surface.

Pour cela, ils nécessitent un grand nombre de variables atmosphériques en entrée : les précipitations (solides et liquides), la température et l'humidité de l'air, la vitesse de vent, les rayonnements visibles et infra-rouge incidents, et la pression de surface. Ces deux modèles sont assez différents. En particulier CaB simule une zone saturée représentant de façon implicite la nappe de la craie (selon Beven and Kirkby, 1979), alors que dans SIM, les écoulements latéraux des nappes sont simulés explicitement.

4.5 Les incertitudes

Une des difficultés des études d'impact du changement climatique est la prise en compte des multiples incertitudes

A l'heure actuelle, les modèles climatiques ne peuvent fournir que des scénarios de changement climatique à une échelle spatiale relativement grossière, et surtout entachés de multiples et importantes incertitudes, en particulier en ce qui concerne le cycle de l'eau.

D'après les différents experts, des incertitudes existent à tous les niveaux de ce type d'étude, de la génération des scénarios d'émission de GES et d'aérosols reposant sur des considérations économiques, politiques et démographiques, aux modèles d'impact en passant les simulations climatiques et la descente d'échelle. Ces incertitudes vont s'accumuler jusqu'au bout de la chaîne, c'est-à-dire les débits et autres variables hydrologiques.

Dans RExHySS une hiérarchisation des différentes sources d'incertitudes a été réalisée. Ainsi, il a été démontré que les incertitudes de la réponse hydrologique proviennent d'abord des modèles climatiques, puis des modèles hydrologiques et des méthodes de désagrégation avec une incertitude associée assez comparable.

L'ampleur de l'incertitude n'est pas identique à chaque étape. D'après Rowell 2006, « la simulation climatique constitue le plus souvent l'étape où l'incertitude est la plus forte ». Les entretiens menés par Egis Eau auprès de plusieurs experts français (A. Ducharne, F.Habets, E.Sauquet), confirment cette hypothèse.

Ce résultat nouveau montre qu'il est important de considérer les incertitudes liées aux modèles hydrologiques et aux méthodes de désagrégation pour ne pas introduire de biais dans l'impact projeté, de même qu'il est désormais acquis qu'il ne faut pas se limiter aux scénarios d'un seul modèle de climat.

5. BILAN DES CONNAISSANCES SUR LE THEME DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

5.1 Changement climatique sur le globe simulé par les modèles du GIEC

Evolution recente du climat

Le quatrième rapport du GIEC qui s'est tenu à Paris en 2007, présente les résultats des recherches menées par des spécialités du monde entier. Comparativement au rapport précédent, des évolutions significatives concernant l'évolution du climat ont été enregistrées.

S'appuyant sur des analyses plus élaborées et plus fines qu'auparavant, il conclut sur un réchauffement sans équivoque du climat actuel, au vu des observations sur l'augmentation des températures, le recul des surfaces occupées par la neige et les glaciers et sur l'élévation du niveau de la mer.

Ces résultats sont basés sur l'utilisation de modèles de circulation générale, qui couplent atmosphère et océan. Seul un nombre restreint de ces modèles avait été utilisé lors du précédent rapport.

Selon les experts du GIEC, l'essentiel de l'augmentation de la température moyenne du globe depuis le milieu du XX^{ème} siècle est très vraisemblablement dû à l'accroissement des gaz à effet de serre liés aux activités humaines.

Le rapport du groupe de travail I du GIEC, rendu public en février 2007 apporte des éléments plus précis concernant les changements climatiques récents.

Les principales conclusions sont les suivantes (voir Figure 5-1) :

- 11 des 12 dernières années figurent parmi les 12 années les plus chaudes depuis 1850, date du début des enregistrements. La température moyenne du globe a augmenté de 0.74°C en 100 ans (1906-2005) ;

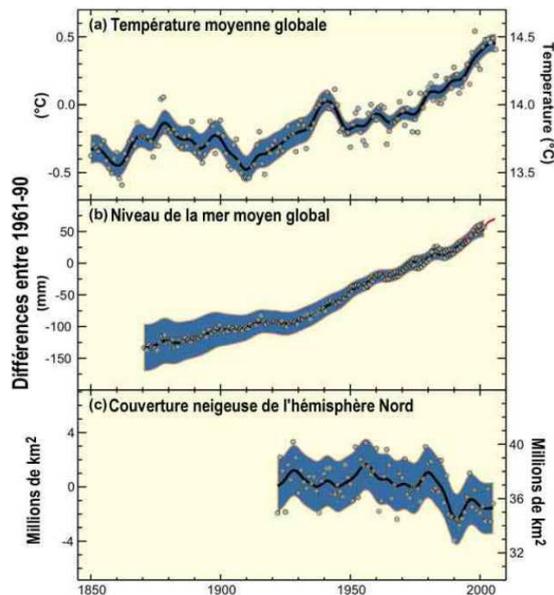


Figure 5-1. Différences entre 1961 et 1990 de la température moyenne globale, du niveau de la mer et de la couverture neigeuse dans l'hémisphère nord (Source GIEC, 2007)

- ▶ Sur l'ensemble de la planète, le niveau de la mer s'est élevé de 1.8 mm/an depuis 1961 et de 3.1 mm/an depuis 1993, sous l'effet de la dilatation thermique et de la fonte des glaciers, des calottes glaciaires et des nappes glaciaires polaires ;
- ▶ Depuis 1978 il est observé une diminution des glaciers et de la couverture neigeuse dans les deux hémisphères, environ 2.7 % par décennie dans l'océan Arctique avec un recul plus marqué en été 7.4% ;
- ▶ Des sécheresses plus sévères et plus longues ont été observées sur des larges étendues depuis 1970, particulièrement dans les régions tropicales et subtropicales ;
- ▶ La quasi-totalité de la hausse de température observée au cours de la seconde moitié du XXème siècle est très probablement imputable à l'action humaine ;
- ▶ La concentration du CO2 dans l'atmosphère est à son plus haut niveau depuis 6500 ans. Elle atteignait 379 parties par millions en 2005 contre 280 ppm à l'ère préindustrielle (cf. Figure 5-2).

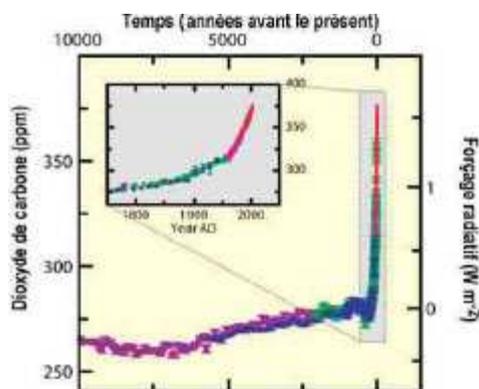


Figure 5-2. Evolution de la concentration de CO2 (source GIEC, 2007)

Evolution future du climat

Les projections pour le futur s'appuient sur un plus grand panel de modélisations. Comme en 2001, six scénarios connus comme ceux du RSSE (Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emissions) ont été testés en fonction des choix énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre. Une description détaillée de ces scénarios se trouve en annexe 3.

Les simulations ont été réalisées par une vingtaine de modèles climatiques et couvrent l'évolution du climat de 1860 à nos jours, ainsi que des projections pour le XXIe siècle.

Conformément aux simulations réalisées (6 scénarios) à l'échelle du globe à la fin du XXIe siècle il est constaté :

- ▶ Un réchauffement en surface entre 1.8 (scénario B1 ; pollution la plus réduite) et 4°C (scénario A1 F1 ; pollution la plus forte) (cf. Figure 5-3) ;
- ▶ Une augmentation des précipitations plus importantes en été qu'en hiver aux hautes altitudes et dans les zones de convergence intertropicale et une diminution dans les régions subtropicales durant les deux saisons ;
- ▶ Une élévation du niveau de la mer entre 18 et 38 cm dans le meilleur cas et 26 et 59 cm dans le cadre du scénario le plus défavorable ;

- ▶ Une augmentation de la concentration de dioxyde de carbone (acidification des océans) et une élévation de la température moyenne mondiale à la surface de la mer ;
- ▶ Une réduction de la glace de mer dans l'Arctique et l'Antarctique. Les simulations les plus extrêmes prévoient une disparition complète, d'ici 100 ans, de la glace de mer en Arctique à la fin de l'été ;
- ▶ Des vagues de chaleur et de fortes précipitations seront plus fréquentes. Les cyclones tropicaux (ainsi que les typhons et ouragans) deviendront plus intenses.

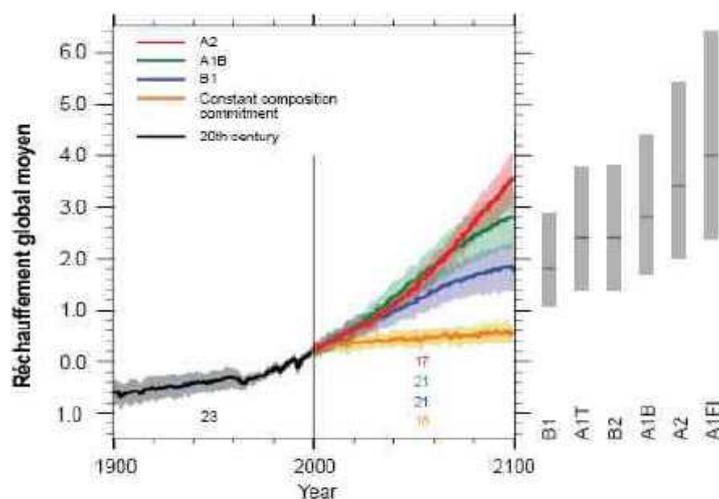


Figure 5-3. Réchauffement global moyen – projections par scénario SRES

5.2 Changement climatique sur la France simulés par les modèles du GIEC

Evolution recente du climat

Au cours du XXe siècle, la température moyenne de la France a augmenté de 0,1°C par décennie. En fin de XXe siècle, le réchauffement en France s'est accéléré à raison de 0,6°C par décennie sur la période 1976-2003.

Sur 1951-2000 il est net qu'en France les étés sont de plus en plus chauds et qu'il y a de moins en moins de jour de gel en hiver. Il semblerait qu'il y a de plus en plus de vagues de chaleur en été et moins de vagues de froid en hiver.

Sur 1951-2000, la variabilité des températures maximales présente des signes d'augmentation, notamment en été.

Les travaux de recherche menés par Météo France permettent de préciser ces évolutions à l'échelle du territoire français. L'augmentation des températures en France au cours du XXème siècle est ainsi estimée à 1°C.

Les simulations réalisées précisent que le climat futur sera caractérisé par des températures plus élevées, surtout en été, et surtout dans le Sud sur le pourtour Méditerranéen. Les précipitations seront :

- ▶ accrues en hiver, particulièrement à l'ouest,
- ▶ déficitaires dans le Sud en été et une réserve d'eau affaiblie, surtout pour le Sud (Météo France).

Evolution future du climat

Les simulations réalisées dans le cadre du 4^{ème} rapport du GIEC montrent une augmentation généralisée des températures.

La structure spatiale est variable selon la saison, avec une augmentation de la température maximale pour l'hiver sur l'Europe du Nord-Est lié probablement à la diminution du couvert neigeux, une augmentation maximale en été sur l'Europe du sud. Sur la France, l'augmentation de température moyenne va d'environ 2.5°C au printemps à 4°C en été.

Globalement, les précipitations augmentent au Nord de l'Europe et diminuent au Sud, mais la limite varie au cours de l'année : elle est plus au Nord en été et plus au Sud en hiver.

Sur des larges parties de l'Europe, entre ces deux zones aux changements robustes, il n'y a pas de cohérence de signe entre les modèles. C'est le cas de certaines parties de la France durant toutes les saisons. Il n'y a qu'en été que les signes sont cohérents sur la majorité du territoire français. **Sur les ¾ de la France, le signe du changement en hiver n'est pas cohérent entre les modèles et est, par conséquent incertain.**

La caractéristique principale la plus marquante des changements de précipitations sur la France est, d'ailleurs, la forte diminution estivale, souvent supérieure à 30%. Cette diminution est générale sur l'Europe de Sud.

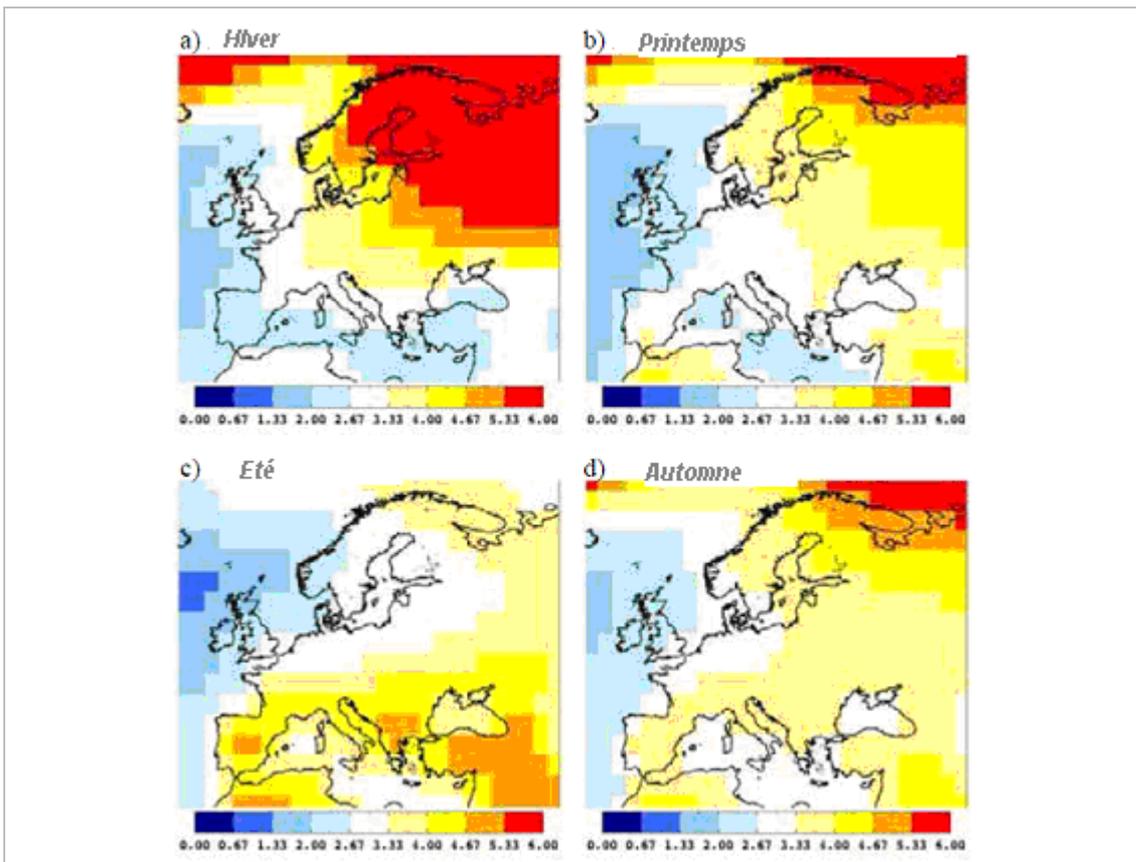


Figure 5-4. Changement saisonnier de température (en °C) sur l'Europe entre les périodes 2080/2099 et 1961/1990, donné par la moyenne d'ensembles des modèles de GIEC AR4 (source : Boé, 2007).

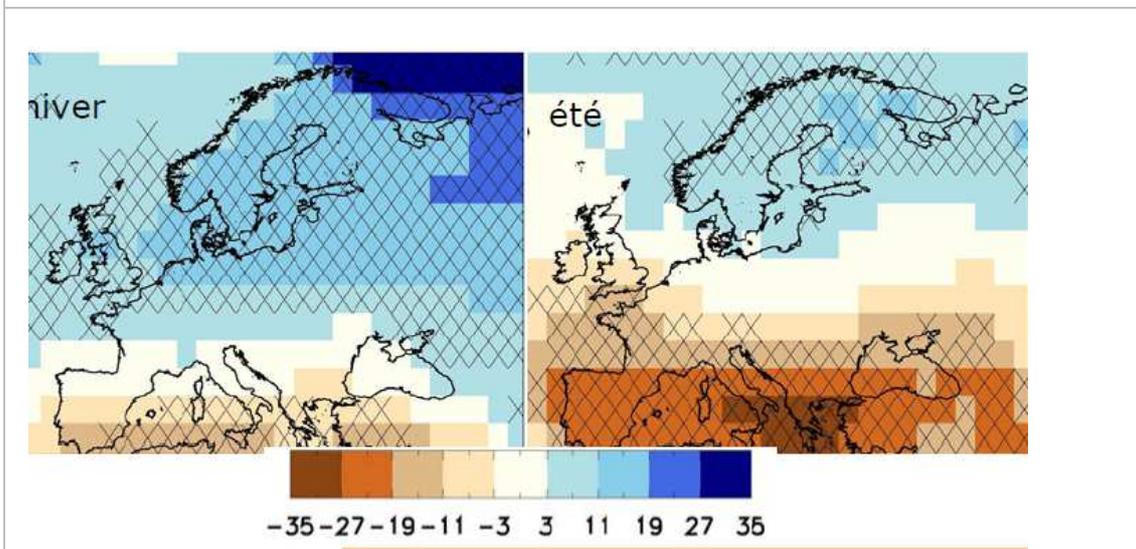


Figure 5-5. Europe : Changement relatif (par rapport à la période 1971 - 2000) des précipitations hivernales (à gauche) et estivales (à droite) simulées par les multi-modèle CMIP3 pour période 2046-3065 et le scénario d'émission SRES A1B. les croix indiquent les zones où au moins 85% des signes des réponses des différentes modèles sont en accord (source : Boé, 2007).

5.3 Les résultats obtenus sur le bassin de la Seine

Evolution de l'hydrologie moyenne interannuelle

Au cours du 21ème siècle, l'ensemble des scénarios hydrologiques, mis en œuvre dans RExHySS, indique un assèchement prononcé des bassins étudiés, qui se traduit notamment par une baisse de la recharge annuelle des nappes (-33% en fin de siècle, statistiquement significative selon le test de Student au risque $\alpha = 2\%$ en regard de la dispersion entre les différents scénarios hydrologiques). Il s'ensuit une baisse des niveaux piézométriques, qui contribue à la baisse des débits moyens.

Cette dernière est robuste puisque la baisse moyenne du débit de la Seine à son exutoire à Poses (-150 m³/s en fin de siècle, soit 28% du débit moyen actuel) est bien supérieure à l'incertitude, estimée par l'écart type associé (50 m³/s). Elle est déjà largement acquise à l'horizon 2050, s'exprime sur les hautes et les basses eaux, mais avec une incertitude plus élevée sur les hautes eaux. On note aussi un retard de 1 à 2 mois de l'hydrogramme moyen, notamment des hautes et basses eaux (cf. Figure 5-6)

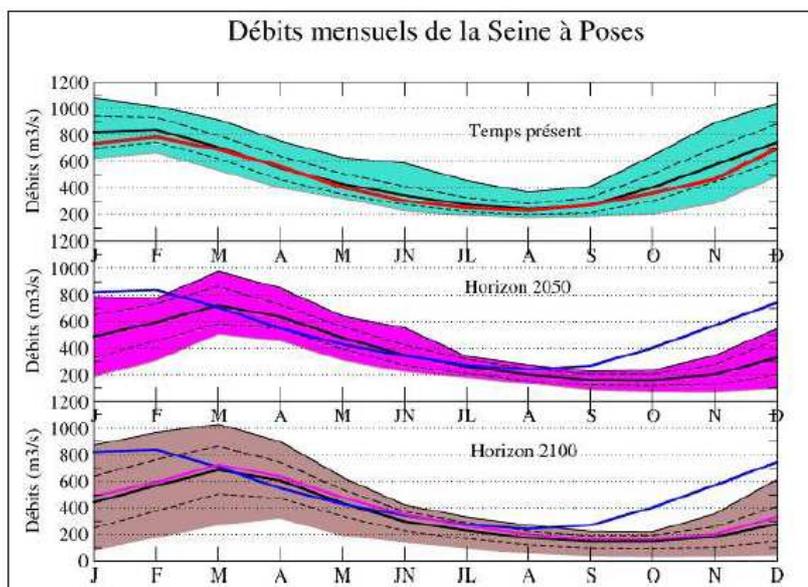


Figure 5-6. Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarios.

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 RExHySS, 2010).

Evolution potentielle du débit d'étiage de la Seine sous changement climatique

Ce sujet est traité par trois documents de référence : GICC Seine (2005), thèse de Julien Boé (2007), Rexhyss (2009). Les premiers deux documents traitent de façon générale ce sujet. Dans REXHySS il constitue un point central d'étude.

Le projet REXHYSS, lancé en 2007, vise à modéliser l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les bassins versants de la Seine et de la Somme, qui sont tous les deux soumis à un climat océanique, avec une influence régulatrice des nappes souterraines sur les débits.

Le point de départ des recherches est constitué par la construction et l'analyse d'un ensemble de scénarios climatiques pour le 21ème siècle, désagrégés dans les bassins versants de la Seine et de la Somme (21 scénarios). Parmi ces scénarios 6 ont été utilisés par l'ensemble des modèles hydrologiques mises en œuvre par la suite du projet. Ils ont été choisis de manière à représenter grossièrement la dispersion de l'ensemble total des changements simulés de précipitations et température.

Trois méthodes très différentes de désagrégation ont été implémentées et appliquées dans le cadre du projet REXHySS : la méthode des anomalies, la méthode quantile-quantile et la méthode des régimes de temps.

Dans le deuxième et le troisième volet, les 12 scénarios désagrégés sélectionnés dans le premier volet, ont été interprétés par 6 modèles hydrologiques représentatifs de l'état de l'art. Les impacts hydrologiques obtenus ont été analysés en distinguant les bilans hydriques, les régimes hydrologiques et les ressources en eau et les événements extrêmes, notamment les crues et étiages sévères.

Les scénarios régionalisés sur les deux bassins étudiés s'accordent sur un réchauffement au cours du 21ème siècle et une baisse importante des précipitations estivales. Le signe d'évolution des précipitations hivernales n'est pas certain. Toutefois, l'ensemble des scénarios considérés conduisent à un abaissement d'ici 2100 des cumuls annuels de 11% en moyenne.

Ce changement des précipitations se reflète sur les différentes variables hydrologiques. Dans le cadre de la présente analyse, Egis Eau s'est concentré sur l'étude des valeurs extrêmes du débit, c'est-à-dire :

- ▶ Le QMNA5 (le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale) pour les étiages ;
- ▶ Le QJXA10 : le débit journalier maximal de fréquence décennale ;
- ▶ Le QJXA100 : le débit journalier maximal de fréquence centennale

Les résultats obtenus dans le cadre du projet REXHySS, ont été reportés dans les différents points du réseau hydrographique afin d'identifier des disparités régionales et les bassins les plus sensibles aux évolutions du climat.

Compte tenu de la localisation du projet de la Bassée, Egis Eau s'est focalisé sur 2 stations du bassin de l'Yonne et 3 stations du bassin de la Seine : Courlon, St Florentin, Pont sur Seine Mery sur Seine et Mussy sur Seine.

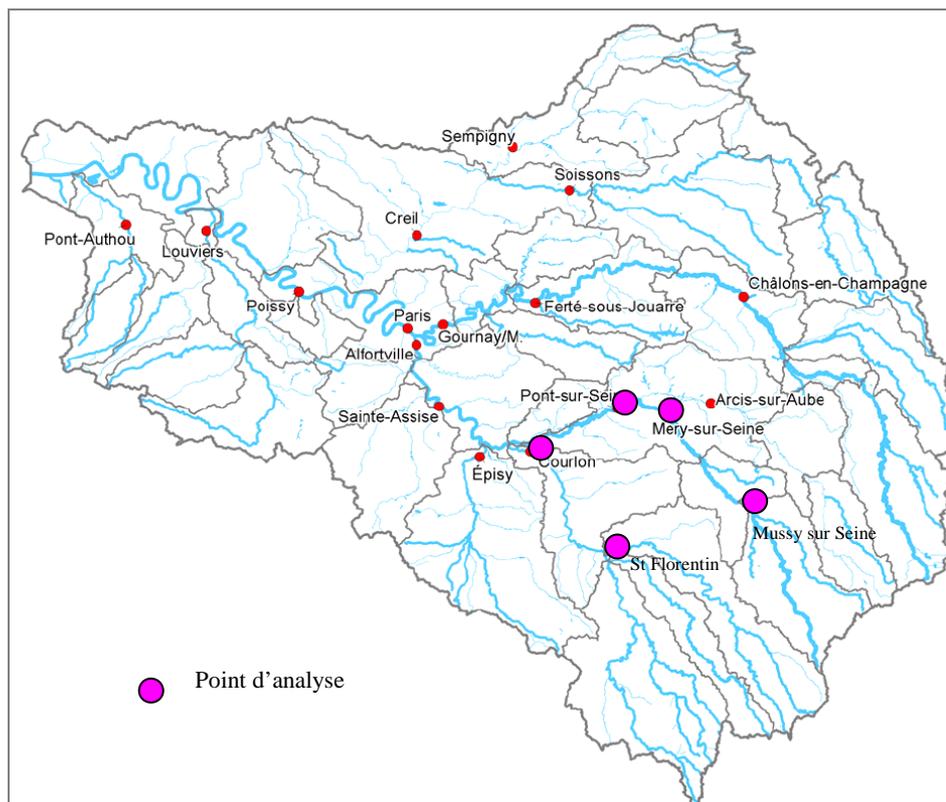


Figure 5-7. Localisation des points d'analyse

Les résultats obtenus par tous les modèles hydrologiques montrent un assèchement prononcé des bassins étudiés d'ici à la fin du 21ème siècle, avec une baisse des nappes et des débits en moyenne annuelle.

Dans la partie amont du bassin de l'Yonne, sous changement climatique le QMNA5 sera marqué par un abaissement variant entre (cf. Tableau 5-1) :

- Milieu de siècle : -25 % à -50% des débits temps présent ;
- Fin de siècle : -25 à -50% des débits temps présent.

Modèle hydrologique	Scénario A1B Milieu du siècle	Scénario A1B Fin du siècle	Scénario A2 Fin du siècle
EROS/GARDENIA	< -50%	-	< -50%
GR4J	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%
MODCOU	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%	< -50%
SIM	entre -10% et -25%	entre -10% et -25%	entre -10% et -25%

Tableau 5-1. Station de Saint Florentin (l'Yonne). Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS

Au niveau de la station de Courlon, on retrouve cette tendance à la baisse des débits d'étiage (cf. Tableau 5-2) :

- Milieu de siècle : entre 10 à 25% des débits temps présent ;
- Fin de siècle : entre -25 et -50 % des débits temps présent.

<i>Modèle hydrologique</i>	<i>Scénario A1B Milieu du siècle</i>	<i>Scénario A1B Fin du siècle</i>	<i>Scénario A2 Fin du siècle</i>
EROS/GARDENIA	entre -25 et -50%	-	< -50%
GR4J	entre -10 et -25%	entre -25 et -50%	entre -25 et -50%
MODCOU	entre -10 et -25%	entre -25 et -50%	entre -25 et -50%
SIM	entre -10 et -25%	entre -25 et -50%	entre -25 et -50%

Tableau 5-2. Station de Courlon (l'Yonne). Evolution du QMNA5 fournies par les modèles hydrologiques du projet REXHySS

En ce qui concerne, le bassin amont de la Seine, au niveau de la station de Mussy sur Seine (avant la confluence de la Seine avec l'Aube), il est constaté une baisse du QMNA5 entre (cf. Tableau 5-3) :

- Milieu du siècle : -25 à -50% des débits temps présent
- Fin du siècle : -25 à -50% des débits temps présent.

<i>Modèle hydrologique</i>	<i>Scénario A1B Milieu du siècle</i>	<i>Scénario A1B Fin du siècle</i>	<i>Scénario A2 Fin du siècle</i>
EROS/GARDENIA	< -50%	-	entre -25% et -50%
GR4J	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%
MODCOU	< -50%	< -50%	< -50%
SIM	entre -10% et -25%	entre -10% et -25%	entre -10% et -25%

Tableau 5-3. Station de Mussy-sur-Seine. Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet REXHySS

Cette baisse est confirmée par les résultats obtenus à la station de Pont sur Seine (cf. Tableau 5-4). Seul le modèle MODCOU a fourni un résultat dans ce point. Toutefois, les résultats fournis à d'autres points situés à proximité de cette station, indiquent un abaissement similaire du QMNA5.

<i>Modèle hydrologique</i>	<i>Scénario A1B Milieu du siècle</i>	<i>Scénario A1B Fin du siècle</i>	<i>Scénario A2 Fin du siècle</i>
EROS/GARDENIA	-	-	-
GR4J	-	-	-
MODCOU	entre -10% et -25%	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%
SIM	-	-	-

Tableau 5-4. Station de Pont sur Seine. Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet REXHySS

A partir de ces résultats, il est constaté que le QMNA5 sur les deux sous-bassins versants (l'Yonne et la Seine amont) se situe dans la classe de modification la plus extrême (-25 à -50%) dès le milieu de siècle quel que soit le modèle hydrologique. Le QMNA5 présente une évolution similaire sur les deux bassins versants.

Au niveau de Paris il est constaté une évolution similaire, baisse du QMNA5 entre -25 et -50 %.

Modèle hydrologique	Scénario A1B Milieu du siècle	Scénario A1B Fin du siècle	Scénario A2 Fin du siècle
EROS/GARDENIA	entre -25% et -50%	-	entre -25% et -50%
GR4J	entre -10% et -25%	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%
MODCOU	entre -10% et -25%	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%
SIM	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%	entre -25% et -50%

Tableau 5-5. Station de Paris. Evolution du QMNA5 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS

De manière générale, sous changement climatique, les bassins de la Seine et de l'Yonne, évoluent vers des étiages plus sévères. Les deux bassins se situent dans la classe de modification la plus extrême (-25 à 50%) dès le milieu de siècle quel que soit le modèle hydrologique.

« En regard des incertitudes analysées (incertitudes générées par les modèles climatiques à grande échelle, des modèles hydrologiques et les méthodes de régionalisation), ces résultats sont robustes ».

Evolution potentielle des crues de la Seine sous changement climatique

Crue décennale

L'évolution du régime des crues est moins marquée que celui des étiages. Ainsi, sur le bassin de l'Yonne, stations de Saint Florentin et Courlon, on constate que le QJXA10 évolue entre -10 et 0% au milieu du siècle et entre -25 à -10% en fin de siècle (cf. Tab 5-6 et Tab 5-7).

Modèle hydrologique	Scénario A1B Milieu du siècle	Scénario A1B Fin du siècle	Scénario A2 Fin du siècle
EROS/GARDENIA	entre -10% et 0%	-	< -25%
GR4J	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%	< -25%
MODCOU	entre 0 et 10%	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%
SIM	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%	entre -25% et -10%

Tableau 5-6. Station de Saint Florentin (l'Yonne). Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS

Modèle hydrologique	Scénario A1B Milieu du siècle	Scénario A1B Fin du siècle	Scénario A2 Fin du siècle
EROS/GARDENIA	entre -10% et 0%	-	< -25%
GR4J	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%	< -25%
MODCOU	entre -10% et 0%	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%
SIM	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%	< -25%

Tableau 5-7. Station de Courlon (l'Yonne). Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS

Au niveau du bassin de la Seine, au niveau de la station de Mussy sur Seine, on constate une baisse du QJXA10 comprise entre -10 et 0% en milieu de siècle et de -25 à -10% à la fin du siècle.

Modèle hydrologique	Scénario A1B Milieu du siècle	Scénario A1B Fin du siècle	Scénario A2 Fin du siècle
EROS/GARDENIA	entre 0 et 10%	-	< -25%
GR4J	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%	< -25%
MODCOU	entre 0 et 10%	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%
SIM	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%	entre -25% et -10%

Tableau 5-8. Station de Mussy sur Seine (la Seine). Evolution du QJXA10 fournies par les modèles hydrologiques du projet RExHySS

A la station de Merry sur Seine (en aval de la confluence de la Seine avec l'Aube), cette baisse du QJXA10 est confirmée vers la fin du siècle (cf. Tab 5-9).

Modèle hydrologique	Scénario A1B Milieu du siècle	Scénario A1B Fin du siècle	Scénario A2 Fin du siècle
EROS/GARDENIA	entre 0 et 10%	-	< -25%
GR4J	-	-	-
MODCOU	entre 0 et 10%	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%
SIM	-	-	-

Tableau 5-9. Station de Merry sur Seine (la Seine). Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS

Modèle hydrologique	Scénario A1B Milieu du siècle	Scénario A1B Fin du siècle	Scénario A2 Fin du siècle
EROS/GARDENIA	entre 0 et 10%	-	entre -25% et -10%
GR4J	entre 0 et 10%	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%
MODCOU	entre 0 et 10%	entre -10% et 0%	entre -10% et 0%
SIM	entre -10% et 0%	entre -10% et 0%	entre -25% et -10%

Tableau 5-10. Station Paris. Evolution du QJXA10 fournie par les modèles hydrologiques du projet RExHySS

De manière générale, le quantile de crue est plus fortement diminué (-25%) en fin de siècle qu'au milieu de siècle, et sous scénario A2 que sous scénario A1B.

Les résultats obtenus par les quatre modèles hydrologiques indiquent une évolution du régime des crues moins marquée que celui des étiages.

Il n'y a pas d'évolution supérieure à +10% sur le domaine, quel que soit l'horizon. La majorité des points se répartissent entre les classes du milieu.

Crue centennale

En ce qui concerne l'impact du changement climatique sur les crues centennales, le résultat principal est l'absence de tendance systématique, puisque les points de la figure après sont dispersés des deux cotés de la première bissectrice, qu'il s'agisse des pointes de crues journalières, ou des débits moyens sur 24 jours.

Pour le quantile QJXA100, la moitié seulement des scénarios hydrologiques conduisent à des évolutions significatives, toujours sans cohérence de signe. En revanche pour le quantile centennal de débit moyen sur 24 jours, VCX24J(T=100 ans), les tendances à la baisse sont plus nombreuses.

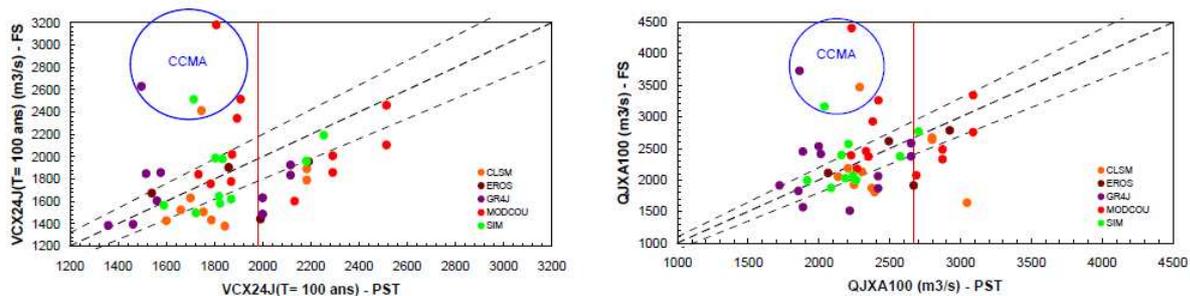


Figure 5-8. Evolution des quantiles centennaux du débit à Paris entre le climat présent (PST) et la fin du siècle (FS) : débits moyens sur 24 jours VCX24J(T= 100 ans) et débits journaliers QJXA100.

Un point par scénario hydrologique. La droite en tireté est la première bissectrice et celles en pointillé définissent les enveloppes à $\pm 10\%$ des valeurs PST. La droite verticale rouge donne les quantiles centennaux déduits des observations de débit (source RExHySS, 2010)...

6. BILAN DES ENTRETIENS AVEC LES EXPERTS

6.1 Objet des entretiens réalisés

Les interviews réalisées ont été structurées sur :

- ▶ la compréhension des documents analysés sur le thème du changement climatique et des résultats obtenus ;
- ▶ l'évolution potentielle des événements hydrologiques extrêmes (étiage et crues) du bassin de la Seine et les incertitudes qui s'attachent ;
- ▶ les perspectives et les évolutions des travaux sur le thème du changement climatique.

6.2 Synthèse des entretiens

Commentaires sur les résultats du projet RExHySS

Dans le cadre de la présente étude, 5 entretiens avec des experts français dans le domaine du changement climatiques ont été menés. Les comptes rendu des entretiens réalisés sont annexés au présent document (annexe 2).

Les experts interviewés ont participé aux travaux du 4^{ème} rapport du GIEC (projet Escrime) et aux projets GICC Seine et RExHySS.

L'entretien de chaque expert a débuté par une présentation de l'objet de l'entretien et du projet de la Bassée. Chaque expert a exposé en quelques mots ses compétences et sa contribution aux projets GICC Seine et RExHySS.

Les experts interviewés ont montré un vif intérêt pour le projet de La Bassée et ont apprécié la démarche engagée par le Maître d'Ouvrage sur ce sujet assez peu intégré dans les études actuelles. Généralement, ils avaient une bonne connaissance du projet. Une bonne partie des experts s'est interrogée sur la rentabilité de l'ouvrage (le coût de l'ouvrage et le coût total des dommages engendrés par la crue de 1910). Egis Eau a indiqué le coût actuel de l'ouvrage, (environ 500 millions d'euros) et le coût actualisé des dommages de la crue de 1910 (envrion17 milliards d'euros).

Lors de notre lecture et analyse des documents disponibles, tout particulièrement le projet GICC Seine et RExHySS, des éventuelles contradictions ou évolutions sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine ont été mises en évidence.

Si les résultats des deux projets concordent en ce qui concerne l'évolution des étiages, des différences sur l'évolution des crues sous changement climatique peuvent être observées.

Au niveau du bassin de la Seine, les résultats du projet GICC Seine, 2003 indiquent :

- ▶ des crues plus importantes en hiver qu'à l'actuel,
- ▶ des étiages plus sévères en été qu'à l'actuel (GICC Seine – 2003).

Les résultats des recherches menées après 2007 principalement par Julien Boé et Agnes Ducharne indiquent :

- des changements bien plus modérés sur les débits extrêmes que sur les débits intenses que des débits moyens (thèse Julien Boé, 2007),
- les quantiles de crues sont peu modifiés sous changement climatique, de même que la durée caractéristique des crues. Les QJXA10 évoluent entre -10 et +10% en milieu du siècle et entre -20 et +10% en fin de siècle (RExHySS, 2009).

Par conséquent, les entretiens réalisés ont porté sur les incertitudes liées aux différents stades de la modélisation (l'élaboration des scénarios climatiques et les simulations hydrologiques), la comparaison des résultats obtenus par les deux projets, GICC Seine et RExHySS tout particulièrement en ce qui concerne l'évolution potentielle des crues de la Seine et les perspectives.

Pour le projet, 14 scénarios du GIEC ont été traités. La dispersion de ces scénarios reflète assez bien l'incertitude actuelle sur les projections climatiques. Tous ces scénarios prédisent des précipitations annuelles en baisse (Agnès DUCHARNE, UMR Sisyphe / CNRS).

L'incertitude qui réside sur les précipitations hivernales est la plus importante compte tenu de la difficulté des modèles climatiques à représenter cette période de l'année (Michel DEQUE, Météo-France). Cette incertitude est aussi la plus préoccupante compte tenu du rôle des précipitations hivernales dans la recharge des nappes.

La baisse des précipitations hivernales est un résultat nouveau. Il y a quinze ans, tous les scénarios s'accordaient sur une hausse des précipitations hivernales en France. Le discours des climatologues a aujourd'hui évolué compte tenu des améliorations des modèles climatiques et d'une meilleure connaissance des incertitudes de modélisation liées à ces projections (Michel DEQUE, Météo-France).

Est-ce que l'évolution future des modèles permettra de trancher sur la question des précipitations hivernales et d'affiner les résultats de simulation hydrologique des crues ?

Les améliorations attendues des modèles climatologiques seront moins importantes que celles des quinze dernières années compte tenu de la réduction de la croissance des calculateurs.

Les progrès escomptés résident dans la prise en compte de nouveaux processus (passage de modèles utilisant les concentrations de CO₂ à des modèles utilisant les émissions de CO₂). En revanche, ces processus seront peut être traités de façon différente selon les modèles climatiques. Il est difficile d'envisager un resserrement spectaculaire des projections climatiques (Michel DEQUE, Météo-France).

Tous les modèles hydrologiques employés dans RExHySS (Eros/Gardenia, Sim, Modcou, Clim, GR4J) s'accordent sur une baisse prononcée des débits d'étiage pour tous les scénarios traités (A1B, A2) (Agnès DUCHARNE, UMR Sisyphe et Florence HABETS).

Concernant les extrêmes, il faut préciser que le projet RExHySS apporte des éléments nouveaux par rapport aux précédents projets GICC. En effet, les simulations hydrologiques ont été réalisées au pas de temps journalier et permettent ainsi de se pencher sur l'évolution des extrêmes et en particulier des crues (Florence HABETS, UMR Sisyphe).

Dès qu'il s'agit des extrêmes, les incertitudes augmentent considérablement et par conséquent, la dispersion des modèles pour les extrêmes est plus importante (Eric SAUQUET, Cemagref).

Autres études dans des bassins européens proches de celui de la Seine, ont abouti à la même conclusion de changement non significatif des crues (Agnès DUCHARNE et Florence HABETS, UMR Sisyphe).

Une seule étude réalisée en 2008 au niveau de l'Europe (Dankers, R) montre une forte augmentation des crues centennales dans le Nord de la France. Toutefois cette étude s'appuie que sur un unique scénario climatique, sans correction de biais. Ce fait, limite considérablement la portée de ce résultat en regard des incertitudes relevées par les autres études.

Conclusion

Les modèles climatiques ont beaucoup progressé cependant à l'heure actuelle ils souffrent encore de biais importants. Ces biais sont en partie à l'origine des différences de comportement entre les modèles (JM MOISSILIN, Météo France).

L'évolution des précipitations est certainement l'élément le plus incertain des projections du changement climatique. La baisse des précipitations annuelles dans le bassin de la Seine représente la meilleure projection actuellement disponible car commune pour des nombreux scénarios de changement climatique et pour des méthodes de descente d'échelle tout à la fois très différentes dans leur principe, et validées en climat récent sur le domaine. (Agnès DUCHARNE et Florence HABETS, UMR Sisyphe).

Les résultats actuels sont robustes en ce qui concerne l'évolution des débits d'étiage mais ils n'indiquent pas une tendance claire pour les crues (Florence HABETS, UMR Sisyphe).

Sous changement climatique, le régime des crues de la Seine, qu'ils s'agissent des crues décennales comme des crues centennales, sera marqué par des variations probablement modérées. Toutefois ce résultat est entaché par des fortes incertitudes (Eric SAUQUET, Cemagref, Florence HABETS, UMR Sisyphe, Agnès DUCHARNE, UMR Sisyphe).

7. LE PROJET DE LA BASSEE ET PERSPECTIVES

7.1 Le projet de la Bassée

Présentation générale du projet

Le concept de l'aménagement s'appuie sur le principe du ralentissement dynamique en visant à décaler les crues de la Seine pour laisser passer les flots de l'Yonne.

L'aménagement, qui s'inspire des aménagements artificiels intervenant dans la lutte contre les crues du Rhin, consiste ainsi à prélever temporairement en Seine un maximum d'eau et la retenir dans la zone dite de la Bassée, au plus près de la confluence, afin de laisser passer la pointe des fortes crues de l'Yonne.

Le site de La Bassée s'insère dans le territoire de la plaine alluviale de la Bassée compris entre Montereau-Fault-Yonne et Bray-sur-Seine.

Il s'agit de la plus vaste plaine d'inondation de la Seine et a ainsi de tout temps joué un rôle de tampon pour les crues de la Seine. L'augmentation de section du lit de la Seine pour permettre la navigation à grand gabarit a porté sa capacité avant débordement à des débits supérieurs à 400 m³/s environ (c'est à dire pour des crues plus importantes que celles de 1910) compte tenu de l'action des lacs-réservoirs Seine et Aube. Cette augmentation de section conjuguée aux coupures des méandres a aggravé ainsi le risque inondation à l'aval.

Dans ces conditions les réflexions qui ont été menées sur ce tronçon ont consisté à lui voir retrouver son rôle d'espace naturel d'expansion de crues et à valoriser écologiquement cette ancienne zone humide tout en favorisant le développement local.

Cet ouvrage situé aux portes de l'île de France et notamment de l'agglomération parisienne permet de compléter efficacement le dispositif existant : lacs réservoirs en amont et protections locales à la traversée de la zone urbanisée.

L'effet cumulé des 4 lacs existants et de l'aménagement de la Bassée contribue à maintenir le niveau de la Seine en dessous de ces hauteurs critiques pour un large spectre de crue.

L'ouvrage de la Bassée est « mono objectif », c'est-à-dire dédié uniquement à l'écrêtement des crues. De part son système de fonctionnement, il peut être mobilisé sur une large gamme des crues créant des dommages en aval et pour tous les types de crues (crue simple, double ou multiple).

L'ouvrage permet d'agir sur des niveaux de crues contrastés présentant des périodes de retour diverses et étalées (entre 10 et 100 ans environ) sur les différents points du réseau hydrographique. L'ouvrage n'est pas optimisé pour une crue de projet unique mais peut être utilisé de manière à mobiliser un volume de stockage optimal pour une gamme de crues de projet.

Les principes du projet

Les études globales d'aménagement de la Bassée menées par les Grands Lacs de Seine ont conclu à la faisabilité d'un ouvrage qui serait constitué d'unités de stockage remplies par pompage uniquement lors des fortes crues. Le projet comprend 58 km de talus-digue de faible hauteur qui délimitent 2 300 hectares d'aires de sur-stockage en aval de Bray-sur-Seine. Le volume stockable pendant la pointe de crue de l'Yonne est estimé à 55 millions de m³.

La gestion de l'ouvrage est basée sur une prévision faite en temps réel fixée à 3 jours pour les crues de l'Yonne et de la Seine. L'ouvrage serait utilisé en moyenne tous les 5 à 6 ans, pendant 2 à 2,5 semaines.

Le remplissage se fera avec un débit maximal de 200 m³/s lorsque la Seine atteindra un certain niveau à Montereau-Fault-Yonne. La vidange de l'ouvrage interviendra une fois le pic de crue de la Seine passé pour ne pas aggraver celui-ci et entraîner d'aggravation des inondations sur les territoires connexes à l'ouvrage.

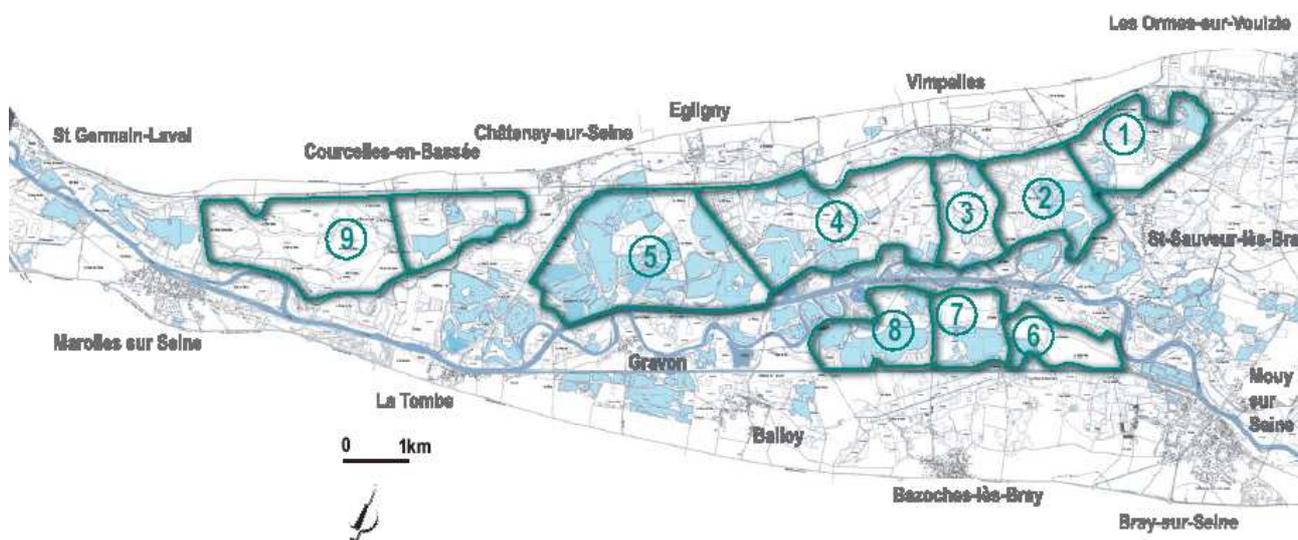


Figure 7-1. Localisation des casiers projetés (source :Grands Lacs de Seine)

7.2 Les perspectives

Incidences potentielles du changement climatique sur la gestion de l'ouvrage

Les effets du changement climatique peuvent influencer sur la gestion de l'ouvrage par trois effets potentiels.

- ▶ Par une évolution de l'intensité des crues

En cas de crue moins fréquente ou moins intense l'intérêt de limiter l'aléa inondation et de réaliser l'ouvrage s'en trouverait amoindrie.

- ▶ Par une évolution des conditions de genèse des crues

De la même manière si les conditions de genèse des crues notamment la contribution des ruissellements sur sol gelé se trouvait réduite sous changement climatique, l'intensité des crues pourrait être moindre.

- ▶ Par une évolution de la dynamique des crues et de la forme des hydrogrammes

On peut craindre que les changements climatiques conduisent à des crues plus rapides et intenses notamment sur l'Yonne qui modifierait les conditions de gestion de l'ouvrage.

Evolution de l'intensité des crues sous changement climatique

Comme évoqué dans le chapitre précédent, à l'heure actuelle, le projet RExHySS constitue le document de référence en ce qui concerne le changement climatique sur le bassin de la Seine. Par ailleurs, ce projet est le seul qui traite les effets du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques (crues).

D'après RExHySS les crues extrêmes, identifiées par les quantiles décennaux QJXA10 et centennaux QJXA100, ne chargerait pas significativement. Les QJXA10 évoluent entre -10 et +10% en milieu du siècle et entre -20 et +10% en fin de siècle.

L'évolution des débits de crue est « moins certaine, les simulations réalisées montrant des cas d'augmentation comme de diminution, en lien avec une dispersion importante des changements de précipitation (positifs ou négatifs selon les simulations climatiques ».

Les résultats obtenus par RExHySS indiquent un « absence d'évolution forte sur les crues, que ce soit sur la dynamique ou sur l'intensité ».

Ces résultats constituent la seule donnée disponible à l'heure actuelle sur l'évolution potentielle des crues de la Seine sous changement climatique. D'après l'étude RExHySS ainsi que les différents entretiens réalisés, a priori, sous changement climatique, le régime des crues de la Seine et de l'Yonne va subir des variations modérées. Ces résultats doivent cependant être regardés avec beaucoup de précautions, étant donné les incertitudes qui s'attachent.

Les résultats des analyses des conséquences du changement climatique sur ce thème contribuent à justifier la nécessité de réduire l'aléa inondation sur le bassin de la Seine en l'absence d'évolution forte.

Evolution des conditions de genèse des crues de la Seine sous changement climatique

Plusieurs des crues majeures du 20^{èmes} siècle ont été partiellement générées par des ruissellements intenses sur sol gelé. Pour la crue de 1910, le ruissellement sur sol gelé aurait une part prépondérante dans la formation du pic de crue principal.

Les modèles climatiques concluent à une augmentation des températures moyennes de 3 à 4 °C sur le secteur du bassin de la Seine en fin de siècle. La tendance affichée est celle d'une diminution des vagues de froid.

Les conséquences de cette augmentation pourrait être de diminuer les vagues de froid voire le risque de ruissellement intense sur sol gelé.

Ce phénomène n'a cependant pas été spécifiquement étudié dans le cadre du projet REXHYSS. Il représenterait une piste de travail intéressante :

- ▶ qualification et analyse plus précise du rôle des sols gelés dans la genèse des crues majeures passées
- ▶ incidence du réchauffement attendu sur la genèse des crues sous changement climatique

En l'absence d'élément spécifique sur ce thème, les documents existants n'apportent pas de conclusion sur l'incidence du changement climatique sur les conditions de genèse des crues.

Evolution de la forme des hydrogrammes des crues de la Seine sous changement climatique

En juin 2006, ACRI, CNRS et M. Duband ont réalisé une étude intitulé « Étude des phénomènes météorologiques océaniques et méditerranéens interagissant sur la génération des crues exceptionnelles du bassin de la Seine amont de Paris ». L'objectif de cette étude est la détermination des intrusions méditerranéennes dans la génération des phénomènes de crue exceptionnels sur le bassin versant de la Seine.

Cette étude apporte des éléments intéressants descriptifs de la situation actuelle et passée, observée à travers les données climatologiques existantes.

Elle conclut que la contribution méditerranéenne aux crues de la Seine est une réalité qui est estimée en volume autour de 20 % des précipitations annuelles moyennes. Cette contribution « sud » peut jouer un rôle prépondérant sur la survenue d'une crue significative.

En revanche, l'étude ne se prononce pas sur les conséquences du changement climatique, que ce soit sur l'intensité des phénomènes de crue, sur les modifications dans la typologie ou la saisonnalité des crues, notamment celles issues du bassin de l'Yonne, ou sur l'accroissement éventuel de la fréquence des intrusions méditerranéennes et de leur intensité.

L'effet du changement climatique pourrait alors être de renforcer le régime de sud ou d'entraîner des précipitations plus brusques et intenses sur le bassin de la Seine notamment de l'Yonne. Un tel effet pourrait alors raccourcir les temps de montée de crue et la forme des hydrogrammes et remettre en cause les conditions actuelles de prévisions de crues sur ce bassin et la gestion en temps réel de l'ouvrage de la Bassée.

L'analyse bibliographique et les entretiens d'expert menés n'ont pas permis d'apporter d'éléments de réponse à ces interrogations sur les types de temps générant les crues sous changement climatique ou de disposer d'éléments spécifiques sur la forme des hydrogrammes notamment sur les temps de montée. Les résultats obtenus par RExHySS indiquent par ailleurs une « absence d'évolution forte sur les crues, que ce soit sur la dynamique ou sur l'intensité ».

En l'absence d'éléments spécifiques sur ce thème, les documents existants n'apportent pas de conclusion sur l'incidence du changement climatique sur des modifications de forme des hydrogrammes des crues (crues plus rapides et intenses).

7.3 Conclusion

Les recherches les plus récentes et en particulier RExHySS concluent :

- sur une variation modérée des régimes de crue sous changement climatique sans dégager une tendance nette par rapport aux sens des évolutions attendues sur le bassin de la Seine,
- sur une tendance nette à la baisse générale des débits d'étiage et de la ressource.

Si ces tendances d'évolution se confirment,

- les risques liés aux étiages et la ressource qui sont aujourd'hui modérés notamment grâce à l'effet des lacs réservoirs pourront devenir plus forts à horizon d'un siècle.
- le risque lié aux crues de la Seine constitue aujourd'hui comme à l'horizon d'un siècle un risque majeur pour la région Ile de France.

Ces résultats ne remettent ainsi pas en cause les conclusions des études conduites sur l'opportunité de réaliser l'ouvrage de la Bassée.

Par ailleurs, les études du projet de la Bassée ont été basées sur une approche sur les crues historiques de la Seine notamment celles du 20^{ième} siècle. En l'absence de tendance d'évolution affirmée du régime de crues, cette approche historique constitue bien la méthode la plus fiable pour la définition de l'ouvrage et de son mode de gestion.

8. GLOSSAIRE

Aérosols

Suspension, dans un milieu gazeux, de particules solides ou liquides, d'une taille 0.1 à 10 nm, présentant une vitesse de chute négligeable.

Albedo

Rapport du rayonnement énergétique réfléchi par une surface ou un milieu, au rayonnement incident. Ce rapport peut être exprimé en pourcentage ou en fraction de 1. La neige couvrant de grands espaces a un albédo élevé (jusqu'à 0,9 ou 90%) à cause de sa couleur blanche, tandis que la végétation a un faible albédo (généralement environ 0,1 ou 10%) à cause de ses couleurs sombres et de son absorption de la lumière pour la photosynthèse. Les nuages ont un albédo intermédiaire et sont les facteurs les plus importants de l'albédo de la terre. L'albédo moyen de la Terre est d'approximativement 0,3.

Effet serre

A l'origine phénomène naturel, il permet à la température de basse atmosphère de se maintenir à 15°C en moyenne. Il est lié à la présence dans l'atmosphère de certains gaz (gaz carbonique, méthane..) qui piègent le rayonnement émis par la Terre et renvoie une partie de ce rayonnement en direction du sol. Du fait de la production trop importante par l'homme de gaz à effet de serre, les températures sont en sensible augmentation.

Effet de serre additionnel ou anthropique

Amplification de l'effet de serre naturel, due aux rejets de gaz à effet de serre d'origine humaine. Cette addition est dangereuse et provoque un réchauffement accru de la surface terrestre. Ce constat a été confirmé et affiné par le Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) dans son quatrième rapport publié en 2007.

Gaz à effet de serre (GES)

Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et réémettent le rayonnement infrarouge." (art 1.5 de la Convention-cadre).

Les gaz à effet de serre concernés par les négociations sur le changement climatique sont cités dans l'Annexe A du Protocole de Kyoto : Le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (HFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).

En quantité et du fait de sa longue durée de vie dans l'atmosphère, le gaz carbonique est le principal gaz à effet de serre, c'est pourquoi les émissions de GES sont calculées en "équivalent CO₂".

**GIEC (Groupe intergouvernemental (d'experts) sur l'évolution du climat)
En anglais : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**

Le GIEC a été fondé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations unies pour l'Environnement. Il joue un rôle central dans les négociations internationales sur le changement climatique.

Sa mission est de rassembler des données scientifiques, techniques et socio-économiques pertinentes afin d'envisager les risques des changements climatiques liés aux activités humaines. Il doit également formuler et évaluer des stratégies possibles de prévention et d'adaptation. Il a publié son premier rapport en 1990. Mis à jour en 1992, ce rapport a servi de base à la négociation de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, convention adoptée à Rio de Janeiro en juin 1992. Son deuxième rapport a été publié en 1995 et son troisième rapport a été rendu public en 2001.

Incertitude

L'expression du degré pour laquelle une valeur (état futur) est inconnue. Contrairement au risque, l'incertitude suggère une probabilité inconnue d'occurrence. L'incertitude peut résulter d'un manque d'information ou d'un désaccord avec ce qui est connu. Il peut avoir diverses sources, des erreurs quantifiables dans les données, des concepts définis ambigus, ou des projections incertaines du comportement des hommes. Cette incertitude peut ainsi être représentée par des mesures quantitatives ou par des états qualitatifs.

IPCC: scénarios SRES

Special Reports on Emission Scenarios par l'IPCC, contenant des informations sur un possible développement climatique futur et les conséquences pour la société et l'environnement. Les scénarios d'émissions sont un composant central de n'importe quelle évaluation de changement de climat. Pour plus d'informations, consultez la page scénarios SRES de l'IPCC.

Model climatique

Une représentation numérique du système climatique qui est basé sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composants, leurs interactions et les processus de feed-back. Un model climatique est utilisé pour étudier les caractéristiques du climat. Les modèles climatiques étaient simples, mais maintenant il y a une évolution vers des modèles plus complexes suivant les facteurs chimiques et biologiques.

Modèle climatique (MCGOA)

Représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composants, leurs processus d'interaction et de rétroaction, et représentant la totalité ou une partie de ses propriétés connues. Le système climatique peut être représenté par des modèles présentant divers niveaux de complexité - une « hiérarchie » de modèles peut être identifiée pour un composant individuel ou un ensemble de

composants, et ces modèles présentent des différences telles que le nombre de dimensions spatiales, l'étendue de la représentation explicite des processus physiques, chimiques ou biologiques ou le degré d'inclusion des paramétrages empiriques. Des modèles de circulation générale couplés Atmosphère/océan (MCGOA) fournissent une représentation générale du système climatique. Il existe une évolution vers des modèles plus complexes à chimie et biologie actives. Les modèles climatiques sont des outils de recherche utilisés pour l'étude et la simulation du climat, mais également dans des buts opérationnels, notamment des prévisions climatiques mensuelles, saisonnières et interannuelles.

Projection sur le climat

Une description de la réponse du système climatique au scénarios sur les émissions ou les concentrations en gaz à effet de serre et aérosols, souvent basé sur les simulations par modèles climatiques. Les projections climatiques sont sujet à des incertitudes, parce qu'ils sont typiquement basés sur des prétentions concernant les développements technologiques et socio-économiques futurs qui peuvent ou non être réalisés.

Scénario de changement climatique

Un scénario climatique porte sur des projections sur le futur climat possible, contenant le développement des facteurs influents, les émissions de gaz à effet de serre, le changement de température et l'augmentation du niveau de la mer et de leurs relations. Un scénario de changement climatique est la différence entre un scénario de climat et le climat actuel.



9. ANNEXE 1 : FICHES DE LECTURE

FICHE DE LECTURE DE DOCUMENT

Identification :

Maître d'ouvrage : Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC)

Auteur : groupe d'experts français

Titre : Livre blanc Escrime

Date : 2007

Contenu :

Thème : changement climatique

Objectifs :

Résumé :

Pour la première fois, les équipes françaises, regroupées dans le cadre du projet Escrime, ont réalisé l'ensemble des simulations climatiques requises par le Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et ont ainsi pu contribuer plus fortement à la préparation de son 4^{ème} rapport de 2007. Mais aussi les chercheurs réunis dans le cadre du projet Escrime ont réalisé des simulations et produit des analyses indépendantes.

Les principaux résultats issus de l'ensemble de ces travaux font l'objet de cet ouvrage.

Les principaux résultats issus de l'ensemble des analyses du projet ESCRIME ont été synthétisés et classés en trois grandes thématiques : modélisation globale et évolution du climat, rétroactions et variabilité climatique, régionalisation et détection-attribution du changement climatique.

Modélisation globale et évolution du climat

La France possède deux modèles climatiques, l'un développé par Météo-France et le CERFACS, l'autre par l'IPSL, qui diffèrent principalement par leur composante atmosphérique.

Les simulations réalisées pour le GIEC couvrent l'évolution du climat de 1860 à nos jours, ainsi que des projections pour le 21^{ème} siècle.

Pour les changements climatiques futurs, plusieurs résultats sont considérés comme robustes car ils se retrouvent dans les différents modèles et ont des explications théoriques. Ce sont notamment la distribution géographique de l'accroissement de température (celui-ci étant plus élevé sur les continents que sur les océans et très fort en région Arctique), la répartition par bandes de latitude des changements des précipitations (augmentation près de l'équateur et aux hautes latitudes, diminution dans les régions subtropicales), l'augmentation de l'intensité des tempêtes aux moyennes latitudes ou le retrait de la glace de mer dans les régions polaires. Les modèles climatiques nous donnent des indications, mais ils peuvent être contradictoires et il est parfois difficile d'établir leur fiabilité.

Pour le 20^{ème} siècle, les tendances des températures simulées par les modèles français (CNRM-CM3 et ISPL-CM4) sont cohérentes avec les observations aussi bien à l'échelle globale qu'à l'échelle de la France.

Pour le climat futur, les deux modèles simulent une évolution des températures assez semblable. Pour les précipitations en revanche, les divergences sont plus importantes, notamment sur leur intensité au-dessus des continents et sur la distribution géographique de leur évolution.

Rétroactions et variabilité climatique

- divergence des modèles climatiques dans l'ampleur du réchauffement global de la Terre qu'ils

prévoient en réponse à un doublement du CO₂. Cette incertitude provient avant tout des différences intermodèles dans la réponse radiative des nuages de couche limite (stratus, stratocumulus et cumulus) au changement climatique ;

- amplification du changement climatique suite à la rétroaction positive entre le changement climatique anthropique et le cycle du carbone (donnée mise en évidence depuis peu) ;
- la réponse des précipitations aux forçages anthropiques, demeure encore incertaine dans de nombreuses régions. Elle est beaucoup plus difficile à prévoir que celle des températures.

Régionalisation et détection du changement climatique

Une évaluation de l'impact d'un changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence des phénomènes de vent, de température et de précipitations sur la France a été réalisée en utilisant des simulations à haute résolution sur l'Europe par les modèles de l'IPSL et du CNRM sous l'hypothèse du scénario SRES-A2.

L'accent a été mis sur la fréquence des vagues de chaleur, des tempêtes et les phénomènes de pluies abondantes ou de sécheresses sur le territoire métropolitain. En outre l'impact sur la fréquence des cyclones tropicaux dans l'Atlantique Nord a été étudié. Trois approches ont été utilisées pour évaluer l'impact du changement climatique : l'approche directe qui utilise directement les variables du modèle, l'approche statistique qui établit sur les observations une relation empirique entre les variables observées de grande échelle et le risque météorologique associé et l'approche dynamique qui prend une situation météorologique dans son ensemble sur l'Atlantique Nord et l'Europe un jour donné et identifie les phénomènes extrêmes associés.

Les résultats montrent une réponse très claire de l'augmentation des vagues de chaleur, une augmentation modérée du risque de forte pluie l'hiver, et un impact quasi négligeable sur les vents forts.

La réponse de la fréquence des cyclones dépend de l'hypothèse sur l'évolution de la température des océans, mais les précipitations associées aux cyclones sont en augmentation.

Détection et attribution

Les études menées au sein de la communauté française sont les premières à suggérer qu'il est possible de détecter, dans les observations des températures minimales d'été en France, une empreinte spatiale du changement climatique d'origine anthropique à des échelles sous-régionales.

Les travaux d'attribution montrent que la majeure partie de ce réchauffement est due à l'action combinée des gaz à effet de serre et des aérosols sulfatés. Les analyses réalisées semblent indiquer que les non linéarités entre l'eau du sol et la température, via les changements d'évapotranspiration, sont responsables de la structure spatiale du réchauffement. D'autre part, les études sur les précipitations montrent qu'il est également possible de détecter un signal anthropique sur les tendances hivernales des dernières décennies. La séparation du signal sur les précipitations en une partie dynamique d'échelle régionale et un résidu, montre que cette composante dynamique capture presque complètement la tendance observée.

Conclusion :

Les principales conclusions sont :

- ✚ Augmentation des températures plus marquée au niveau des continents.
- ✚ Divergences importantes entre les modèles sur la tendance des précipitations et notamment leur intensité au-dessus des continents et sur la distribution géographique de leur évolution.
- ✚ Divergences importantes entre les modèles dans l'ampleur du réchauffement global de la Terre qu'ils prévoient en réponse à un doublement du CO₂.
- ✚ La possibilité de rétroaction positive entre le changement climatique anthropique et le cycle du carbone qui pourrait correspondre à un réchauffement induit 1.5°C supérieur aux estimations faites à l'aide des modèles climatiques traditionnels.

Limites et perspectives :

- ✚ les recherches effectuées par le GIEC sont réalisées à l'échelle du globe. Quelques tendances pour la France peuvent être extraites, principalement de l'impact du changement climatique sur la température. Toutefois, ces résultats ne fournissent pas d'informations pertinentes pour le projet.

FICHE DE LECTURE DE DOCUMENT

Identification :**Maître d'ouvrage :**

Auteur : plusieurs spécialistes français (Agnes Ducharne, Sylvain Théry, Emmanuel Ledoux, Pascal Viennot, Eric Gommez, Michel Déqué)

Titre : Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine – GICC Seine

Date : décembre 2003

Contenu :

Thème : impact du changement climatique

Objectifs : évaluer l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine.

Résumé :

Le présent article apparu en décembre 2003 dans la revue en sciences de l'environnement, vol 4, No3, fait partie intégrante du projet « GICC-Seine » développé dans le cadre du programme « Gestion et Impact du Changement Climatique » du Ministère Français de l'Ecologie et du Développement Durable.

L'objectif de ce projet est d'étudier l'influence du changement climatique sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine, en relation avec les changements des contraintes anthropiques directes, notamment celles qui sont liées à l'agriculture. Dans le présent article, seuls les impacts hydrologiques du changement climatique sont détaillés.

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine et de son bassin, trois scénarios de changement climatique à partir de trois paires de simulations réalisées avec le modèle de circulation générale ARPEGE (Météo-France) ont été construits.

Les trois paires de simulations (OLD, B2 et A2), représentant le climat sous concentrations de CO₂ actuelles et augmentées, ont été réalisées avec les deux versions du modèle de circulation générale ARPEGE. Ces deux versions partagent la caractéristique d'un maillage variable, qui est plus dense dans une région dite « zoom ».

Leur impact a été évalué grâce à 2 modèles hydrologiques : le modèle CaB, développé pour simuler les bilans d'eau et d'énergie dans les modèles de circulation générale mais qui ignore les aquifères profonds, contrairement au modèle hydrogéologique MODCOU.

Avec chacun des deux modèles hydrologiques CaB et MODCOU, quatre simulations ont été réalisées :

- ✚ une simulation de référence sous scénario climatique actuel (le climat effectivement observé pendant la période de référence),
- ✚ trois simulations sous climat modifié, c'est-à-dire forcées par les trois scénarios de changement climatique construits pour le modèle considéré.

Impact simulé par le modèle CaB

« L'impact sur l'hydrologie du bassin des trois scénarios de changement climatique, par rapport à une référence 1987-1988, consiste en une augmentation de l'évaporation, en lien avec le réchauffement. En été, elle joue de concert avec une diminution des pluies pour diminuer l'humidité du sol (c'est cette réduction qui entraîne la diminution de l'évaporation en août par flétrissement de la végétation) et les débits (écoulements).

En hiver, les différences d'évaporation sont très faibles entre la référence et les simulations sous changement climatique (sauf en janvier où l'évaporation est plus faible sous changement climatique, ce qui traduit en fait une condensation / rosée supérieure car l'air est plus chaud et plus humide). Malgré cela, les débits augmentent en proportion moindre que les pluies, voire même diminuent dans la simulation B2, car une partie des précipitations sert à reconstituer l'humidité du sol perdue en été. En terme de débits, l'impact peut

finalement se résumer par :

- ✚ des crues plus importantes en hiver qu'à l'actuel,
- ✚ des étiages plus sévères en été qu'à l'actuel. »

Impact simulé par le modèle MODCOU

« Le modèle MODCOU s'accorde avec le modèle CaB sur cette intensification des contrastes saisonniers de débit de la Seine, qui s'observe selon les trois scénarios de changement climatique. MODCOU montre aussi que les variations de profondeur des nappes aquifères sont généralement faibles (amplitude généralement inférieure à 2 m), sauf dans le cas du scénario B2, qui montre localement des baisses plus importantes du niveau piézométrique de la nappe de la Craie.

Ces deux modèles s'accordent, selon les trois scénarios, sur une intensification des contrastes saisonniers sous changement climatique, illustrée par des crues plus importantes en hiver et des étiages plus sévères en été. »

Conclusion :

La tendance qui émerge des trois scénarios, selon les deux modèles hydrologiques, est une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine (augmentation des crues hivernales, étiages estivaux plus sévères).

« En ce qui concerne les variables caractérisant l'hydrologie du bassin (écoulements et humidité du sol), qui sont importantes pour de nombreux secteurs économiques (agriculture, navigation, industries de l'eau...), nous avons montré que, selon le modèle CaB, la marge d'incertitude est inférieure au signal moyen en été.

C'est donc avec le maximum de confiance que l'on peut dire que l'humidité du sol et les débits d'étiage devraient diminuer en été sous changement climatique (horizon 2100). L'évolution des débits de crue est beaucoup moins certaine, nos simulations montrant des cas d'augmentation comme de diminution, en lien avec une dispersion importante des changements de précipitation (positifs ou négatifs selon les simulations climatiques) »

Limites et perspectives :

Les simulations de changement climatique effectuées dans le cadre de la présente étude ne suffisent pas à « appréhender toutes les incertitudes des simulations de changement climatique, qui proviennent des MCG eux-mêmes et des scénarios d'émissions en gaz à effet de serre (Houghton et al., 2001) »

L'étude des trois simulations ARPEGE de changement climatique confirme que les variations de précipitations constituent une des incertitudes majeures quant aux effets potentiels de l'augmentation de CO₂. Ces variations de précipitation contrôlant largement les impacts hydrologiques, il est fondamental de disposer d'autres simulations MCG pour espérer caractériser la marge d'incertitude du changement climatique potentiel.

L'étude présentée ci-dessus est donc en cours de généralisation, en exploitant 9 autres simulations de changement climatique, par six MCG différents, certains forcés par différents scénarios d'émissions. Une analyse préliminaire confirme que la température augmente dans tous les cas (à titre d'exemple, la température augmente en été de 4°C en moyenne sur les 12 simulations, et de 10°C selon la simulation la plus chaude).

FICHE DE LECTURE DE DOCUMENT

Identification :

Maître d'ouvrage : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer

Auteur : Agnes Ducharne

Titre : Projet RExHyss : Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme – Programme GICC

Date : septembre 2009

Contenu :

Thème : impact du changement climatique

Objectifs : évaluer l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur deux grands hydrosystèmes fluviaux représentatifs du nord de la France : la Seine et la Somme.

Résumé :

Le projet REXHYSS vise à modéliser l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les bassins versants de la Seine et de la Somme, qui sont tous les deux soumis à un climat océanique, avec une influence régulatrice des nappes souterraines sur les débits.

Le projet a été organisé en trois parties et 6 volets.

Le premier volet est consacré à la construction et l'analyse d'un ensemble de scénarios climatiques pour le 21^{ème} siècle, désagrégés dans les bassins versants de la Seine et de la Somme. L'objectif principal est d'y quantifier l'impact hydrologique du changement climatique et les incertitudes liées au climat, y compris sur les extrêmes hydrologiques.

Ainsi, plusieurs scénarios de changement climatique (21 scénarios) ont été fournis pour REXHYSS. Parmi ces scénarios 6 ont été utilisés par l'ensemble des modèles hydrologiques mis en œuvre par la suite du projet. Ils ont été choisis de manière à représenter grossièrement la dispersion de l'ensemble total pour les changements simulés de précipitations et température.

Trois méthodes de désagrégation très différentes ont été implémentées et appliquées dans le cadre du projet REXHYSS : la méthode des anomalies, la méthode quantile-quantile et la méthode des régimes de temps.

Dans le deuxième et le troisième volet, les 12 scénarios désagrégés sélectionnés dans le premier volet, ont été interprétés par 6 modèles hydrologiques représentatifs de l'état de l'art. Les impacts hydrologiques obtenus ont été analysés en distinguant ce qui concerne les bilans hydriques, les régimes hydrologiques et les ressources en eau et les événements extrêmes, notamment les crues et étiages sévères.

A l'origine du projet, il a été anticipé que le changement climatique pourrait augmenter les débits de référence associés aux crues sévères. Dans ce cas, le projet envisageait d'étudier dans son quatrième volet l'impact du changement climatique sur l'extension des inondations dans les zones clés des bassins à l'aide de modèles hydrauliques dédiés.

L'analyse des extrêmes du débit réalisée dans le volet trois a cependant montré que, dans le cadre des hypothèses faites, les changements des crues décennales étaient modérées au cours du 21^{ème} siècle dans les différentes stations des deux bassins, et « *probablement peu significatifs en regard de l'incertitude qui pèse sur la caractérisation (ou prédétermination) de ces crues de référence (e.g Hubert, 2005). L'analyse plus spécifique des débits de la Seine à Paris et de la Somme à Abbeville suggère même que les crues rares y auraient des débits associés plus faibles en fin de siècle qu'actuellement.* »

Les résultats du volet 3 ne montrant que des changements non significatifs des crues extrêmes, dans le volet 4 le projet se limite à estimer l'impact de l'élévation du niveau de la mer, due au changement climatique, sur les inondations de la Somme aval, dont le fonctionnement hydrologique est fortement soumis à l'influence marine. En ce qui concerne le bassin de la Seine, l'étude a porté sur les conséquences potentielles du changement climatique sur les défaillances des débits d'étiage. Le projet a tenté d'analyser comment le changement

climatique pouvait modifier l'influence des pressions anthropiques sur le débit d'étiage et les interactions entre irrigation et ressources en eau souterraines sous changement climatique.

Le dernier volet concerne la réflexion sur ces résultats avec les gestionnaires des bassins.

Conclusion :

Les scénarios régionalisés sur les deux bassins étudiés s'accordent sur un réchauffement au cours du 21^{ème} siècle et une baisse importante des précipitations estivales. Le signe d'évolution des précipitations hivernales n'est pas certain. Toutefois, l'ensemble des scénarios considérés conduit à un abaissement d'ici 2100 des cumuls annuels, 11% en moyenne.

Les résultats obtenus montrent un assèchement prononcé des bassins étudiés d'ici à la fin du 21^{ème} siècle, avec une baisse des nappes et des débits en moyenne annuelle. Globalement cette baisse varie entre 20 et 40% des débits du temps présent. En regard des incertitudes analysées (incertitudes générées par les modèles climatiques à grande échelle, des modèles hydrologiques et des méthodes de régionalisation), ces résultats sont robustes.

A l'échelle saisonnière, la baisse des débits se répercute davantage sur les basses eaux que sur les hautes eaux, dont la baisse est moins robuste. La réponse des valeurs extrêmes est plus constatée. Sur l'ensemble des stations analysées, les débits caractéristiques des étiages sévères (QMNA5) baisseraient fortement, et la durée des séquences de débits faibles sous le QMNA5 actuel augmenterait. Au contraire, les crues extrêmes, identifiées par les quantiles décennaux QJXA10, ne changeraient pas significativement.

Ainsi, les conclusions principales issues des recherches menées dans le cadre du projet RExHySS sont :

- ✚ en fin de siècle, le quantile QMNA5 pourrait diminuer de 40% (scenario A1B) à 50% (scénario A2) ;
- ✚ la durée des séquences de débits faibles au dessous du QMNA actuel (souvent pris comme seuil d'alerte de sécheresse) augmente de manière significative ;
- ✚ les quantiles de crues sont peu modifiés sous changement climatique, de même que la durée caractéristique des crues. Les QJXA10 évoluent entre -10 et +10% en milieu du siècle et entre -20 et +10% en fin de siècle ;
- ✚ forte diminution des hauteurs de nappe.

Toutefois l'auteur principal du document, Agnes Ducharne, attire l'attention du lecteur sur la modification modérée des débits de crue, notamment décennales. « *Ce résultat bénéfique doit cependant être regardé avec beaucoup de précautions, vues les incertitudes fortes qui s'attachent* ».

La conclusion principale du projet est que « *l'humidité du sol et les débits d'étiage devraient diminuer en été sous changement climatique (horizon 2100)* ».

L'évolution des débits de crue est beaucoup moins certaine, les simulations réalisées montrant des cas d'augmentation comme de diminution, en lien avec une dispersion importante des changements de précipitation (positifs ou négatifs selon les simulations climatiques) ».

Limites et perspectives :

« La réponse des hautes eaux reste très incertaine, au point que même son signe n'est pas certain. Notre réponse se caractérise par une réponse de faible amplitude des crues, mais d'autres études montrent ses réponses plus fortes, sans qu'une tendance systématique n'émerge sur les bassins européens proches des bassins de la Seine et de la Somme. La comparaison avec d'autres résultats (GICC-Seine, autres études européennes, avec des scénarios et méthodes variés) suggère que la réponse des débits de crues est étroitement liée à la réponse des précipitations annuelles, avec une forte sensibilité (des variations faibles des précipitations entraînant des variations plus importantes des débits) »

La baisse des débits d'étiages est au contraire très robuste.

Dans ce contexte, deux types de recommandations peuvent être tirées de ce projet :

- ✚ « le premier concerne la diffusion aux gestionnaires de l'information scientifique sur les impacts du changement climatique ;
- ✚ Les autres politiques relèvent plutôt des politiques d'adaptation, et concernent les actions qui pourraient être engagées sans attendre au vu des résultats les plus robustes du projet RExHYSS, à savoir la baisse des ressources en eau et des débits d'étiage. Etant donné l'accroissement probable des tensions entre les différents usagers de l'eau qui en résulte, la première recommandation consiste en une évaluation hiérarchisée des besoins en eau pour les différents usagers, et la seconde concerne la révision des seuils utilisés pour la gestion, comme le QMNA5 pour l'alerte de sécheresse ».

FICHE DE LECTURE DE DOCUMENT

Identification :

Maître d'ouvrage : Université Paul Sabatier – Toulouse III

Auteur : Julien Boé

Titre : Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France

Date : novembre 2007

Contenu : impact du changement climatique

Objectifs : étudier le changement climatique sur l'Europe et la France ainsi que les mécanismes associés.

Résumé :

Cette thèse se propose d'étudier le changement climatique sur l'Europe et la France ainsi que les mécanismes associés afin de caractériser au mieux ses impacts sur le cycle hydrologique des grands bassins versants français. Pour répondre à cet objectif, des informations climatiques à très fine échelle spatiale sont nécessaires. Or, à l'heure actuelle, les modèles climatiques globaux ont une résolution spatiale bien trop limitée pour pouvoir fournir ce type d'information. De plus, de fortes incertitudes existent en ce qui concerne les changements climatiques attendus, en particulier à l'échelle régionale.

Cet ouvrage constitue un document didactique permettant de comprendre la complexité du climat, la multitude des processus intervenant, les difficultés et les incertitudes associées à l'étude des impacts du changement climatique à l'échelle du globe, et plus particulièrement à l'échelle de la France.

Il est divisé en quatre parties :

- ✚ La première partie décrit le cycle hydrologique de manière globale, ses interactions avec le climat. Elle permet d'envisager à l'aide de considérations simples la nature des changements qui pourraient affecter le cycle de l'eau. Un bref bilan des principaux résultats récents sur les impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau a été présenté, en partant de l'échelle globale pour aller jusqu'à l'échelle du territoire français ;
- ✚ La deuxième partie de cet ouvrage est dédiée à l'étude du cycle de l'eau en France au cours du 20^{ème} siècle, en termes d'état moyen et de variabilité temporelle. Un intérêt particulier a été accordé à l'étude des précipitations, variable du cycle de l'eau la mieux observée ;
- ✚ La troisième partie est dédiée à la description et à la validation des méthodes de désagrégation utilisées par la suite ;
- ✚ Finalement, dans la quatrième partie le changement climatique sur la France et l'Europe est étudié ainsi que l'évolution du cycle hydrologique en France au cours du 21^{ème} siècle, à l'aide d'un ensemble d'outils complémentaires.

Conclusions :

Dans le cadre de cette étude, les méthodes de régionalisation mises en œuvre ont permis de réaliser de multiples scénarios hydro-météorologiques et d'étudier les impacts du changement climatique sur la France. Si des incertitudes sont associées au choix de la méthode de désagrégation et au choix du modèle climatique global, des signaux clairs apparaissent :

- ✚ Forte diminution généralisée des débits moyens en été et en automne ;
- ✚ Etiages plus fréquents et sévères,
- ✚ Augmentation du nombre de jours d'étiage très importante,
- ✚ Augmentation des débits en hiver sur les Alpes et le sud du pays, changements bien plus modérés des débits intenses que des débits moyens,
- ✚ Diminution des précipitations neigeuses sauf dans certaines régions en haute altitude,

✚ Diminution généralisée des hauteurs de neige.

La forte incertitude sur l'amplitude des diminutions de précipitations en été a un impact limité sur les changements simulés des débits au cours de l'été.

Limites et perspectives :

Le changement climatique va impliquer et implique déjà des modifications importantes du cycle de l'eau. Si à l'échelle globale des considérations physiques simples permettent de comprendre en partie les évolutions attendues, à mesure qu'on descend en échelle, les difficultés et les incertitudes augmentent.

Quasiment toutes les études des impacts du changement climatique, telles que celles de la Seine et du Rhône, sont confrontées à deux problèmes majeurs : la régionalisation du changement climatique, et la caractérisation des incertitudes.

Les meilleurs outils dont on dispose aujourd'hui pour réaliser des projections climatiques globales sous différents scénarios d'émission de GES, sont les modèles de circulation générale couplés océan-atmosphère (MCGOA). Néanmoins, en raison de leur fort coût numérique, la résolution de ce type de modèle est à l'heure actuelle grossière (de l'ordre de 250 km²).

Cette résolution n'est pas suffisante pour représenter correctement l'usage des sols, les contrastes terre-mer, le relief qui ont pourtant un rôle majeur dans la détermination du climat régional et local. De plus, les modèles d'impact, tels les modèles hydrologiques, nécessitent la plupart du temps des informations météorologiques en entrée à une résolution spatiale très fine, la plupart du temps inférieure à 10 km.

Une étape intermédiaire, nommée régionalisation, désagrégation ou encore downscaling, consistant à dériver des variables simulées par les MCGOA à basse résolution afin d'obtenir l'information climatique à haute résolution nécessaire aux modèles d'impact, doit être mise en œuvre. Cette étape est cruciale, et si une vaste zoologie de méthodes de désagrégation existe, **aucune ne peut prétendre être parfaite et/ou universelle.**

La deuxième difficulté des études d'impact du changement climatique est la prise en compte des multiples incertitudes qui interviennent. A toutes les étapes de ce type d'étude, de la génération des scénarios d'émissions de GES aux modèles d'impact, en passant par les simulations climatiques et la régionalisation, des incertitudes existent et vont s'accumuler.

L'ampleur de l'incertitude n'est pas identique à chaque étape. En amont du modèle d'impact, la simulation climatique constitue le plus souvent l'étape où l'incertitude est la plus forte (Rowell, 2006).

Au vu des résultats obtenus dans le cadre de la présente étude, la question qui se pose est : comment améliorer le réalisme et réduire les incertitudes des scénarios climatiques régionaux dans le cadre de l'étude des impacts du changement climatique ?

Une première possibilité facile à mentionner mais difficile à réaliser en pratique est d'améliorer les modèles climatiques globaux (et les modèles climatiques régionaux, mais cela est lié).

Actuellement, les modèles climatiques sont en constante « complexification » et tendent à se rapprocher de plus en plus de la « réalité » dans le sens qu'ils intègrent de plus en plus de processus physiques intervenant dans le système climatique terrestre réel (inclusion de la végétation, de la chimie atmosphérique, du cycle du carbone...). Néanmoins, un temps de maturation important est sans doute nécessaire avant que ces modifications n'améliorent réellement le réalisme des projections climatiques. De plus, ce ne sont pas ces modifications qui réduiront les incertitudes qui existent entre les différents modèles.

Ensuite, il s'agirait aussi d'améliorer les méthodes de désagrégation statistique et /ou correction de biais. Ces méthodes ont fait et font encore l'objet de nombreux travaux, et une vaste palette d'outils statistiques a déjà été testée. Il ne faut pas probablement ici à un saut qualitatif majeur, tant que les processus à l'œuvre dans le changement climatique régional ne seront pas mieux compris.

Pour ces deux raisons, il est fort probable que l'incertitude du changement climatique régional soit radicalement diminuée dans les années à venir et les approches multi-modèles resteront nécessaires.

Dans un futur proche, les simulations régionales réalisées dans le cadre du projet européen ENSEMBLE basées sur un ensemble de couples MCGOA/MCR permettront de disposer d'une base de scénarios régionaux échantillonnant bien mieux l'incertitude, et constitueront une grande opportunité pour les études des impacts du changement climatique sur l'Europe.

FICHE DE LECTURE DE DOCUMENT

Identification :

Maître d'ouvrage : Grands Lacs de Seine

Auteur : ACRI, CNRS Service aéronomie, D. Duband

Titre : Étude des phénomènes météorologiques océaniques et méditerranéens interagissant sur la génération des crues exceptionnelles du bassin de la Seine amont de Paris

Date : Juin 2006

Contenu :

Climatologie, hydrologie

Objectifs :

Détermination des intrusions méditerranéennes dans la génération des phénomènes de crue exceptionnels sur le bassin versant de la Seine

Résumé :

L'étude a consisté en une analyse poussée des aspects météorologiques, pluviométriques et hydrologiques du bassin versant de la Seine. Les données correspondantes ont été collectées et leur qualité a été contrôlée avant exploitation.

Les données météorologiques ont été analysées pour identifier des types de temps distincts, ce qui a permis d'identifier les phénomènes de type océanique, méditerranéen et autres.

L'étude a conclu notamment sur le fait que les phénomènes d'intrusions méditerranéennes apparaissent assez fréquemment : elles correspondent à 25% des situations météorologiques pendant le 20^{ème} siècle.

Les épisodes de temps méditerranéens sont caractérisés par une durée courte (90% de ces phénomènes ont moins de 5 jours) et ne présentent pas de cycles particuliers. Par opposition, les phénomènes océaniques sont plus longs (90% ont moins de 10 jours).

En termes quantitatifs, les phénomènes de régime méditerranéen sont responsables de contributions comparables à celles des régimes océaniques.

L'étude a également déterminé les débits de crue de période de retour comprise entre 10 ans et 1000 ans pour les bassins versants de l'Yonne, la Marne, la Seine amont et la Seine à Paris. En particulier, cette analyse a conduit à affecter à la crue de 1910 une période de retour comprise en 70 et 80 ans.

Limites et perspectives

L'étude climatologique ACRI apporte des éléments intéressants descriptifs de la situation actuelle et passée, observée à travers les données climatologiques existantes.

En revanche, l'étude ne se prononce pas sur les conséquences du changement climatique, que ce soit sur l'intensité des phénomènes de crue, sur les modifications dans la typologie ou la saisonnalité des crues, notamment celles issues du bassin de l'Yonne, ou sur l'accroissement éventuel de la fréquence des intrusions méditerranéennes et de leur intensité.

FICHE DE LECTURE DE DOCUMENT

Identification :

Maître d'ouvrage :

Auteur : Agnes Ducharne et al.

Titre : Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique

Date : mars 2010

Contenu : Climatologie, hydrologie

Objectifs : Evaluer l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine (étiage, crues)

Résumé :

Cette étude s'inscrit dans le cadre plus large du projet RexHyss, qui visait à estimer l'impact de ce changement climatique d'origine anthropique sur l'évolution des ressources en eau et des extrêmes hydrologiques au cours du 21^{ème} siècle dans les deux bassins versants du Nord de la France, ceux de la Seine et de la Somme.

La présente étude se focalise sur l'évolution potentielle des crues dans le bassin de la Seine au 21^{ème} siècle.

Pour cela, 12 scénarios de changement climatique d'origine anthropique ont été régionalisés pour servir en entrée de 5 modèles hydrologiques différents.

La désagrégation de ces scénarios climatiques a été faite à l'aide des deux méthodes : une désagrégation dynamique (par un modèle climatique à haute résolution) avec une correction de biais quantile-quantile et une désagrégation statistique basée sur l'analyse des régimes de temps. Ces méthodes sont calibrées sur le climat récent, en utilisant comme observations les données météorologiques de la base SAFRAN sur la période 1971-2000.

L'étape suivante consiste à transformer ces scénarios climatiques en scénarios hydrologiques, décrivant des évolutions possibles des débits et des niveaux des nappes phréatiques dans les bassins versants. Cinq modèles hydrologiques MODCOU, SIM, CLSM, EROS et GR4J ont été mis en œuvre. Ces modèles ont été calés sur les conditions actuelles, puis utilisés pour simuler le fonctionnement du bassin selon les scénarios de changement climatique désagrégés.

Conclusions :

Au cours du 21^{ème} siècle, les scénarios désagrégés s'accordent sur :

- ✚ Un réchauffement de +1.5 à +3°C en milieu de siècle et entre +2 et +4°C en fin de siècle ;
- ✚ Une baisse des précipitations estivales de manière systématique, avec une augmentation de la persistance des événements secs ;
- ✚ Une faible variation des événements pluvieux ;
- ✚ Une évolution incertaine des précipitations hivernales (le signe n'est pas certain);
- ✚ Une baisse des cumuls annuels de manière quasi systématique : - 6% en moyenne sur tous les scénarios du milieu de siècle, et -12% en moyenne sur tous les scénarios fin de siècle, avec comme seule exception à la baisse + 2% en fin de siècle.

En ce qui concerne l'évolution des ressources en eau, les conclusions issues de la présente étude sont :

- ✚ Un assèchement prononcé des bassins étudiés, qui se traduit notamment par une baisse de la recharge annuelle des nappes (-33 % en fin de siècle) ;
- ✚ Une baisse des niveaux piézométriques et des débits moyens. Pour la Seine la baisse moyenne du débit à son exutoire à Poses sera d'environ 150 m³/s en fin de siècle, soit 28% du débit moyen actuel ;
- ✚ Un retard de 1 à 2 mois de l'hydrogramme moyen, notamment des hautes et basses eaux.

En ce qui concerne l'évolution du régime des crues de la Seine, la conclusion est une absence d'évolution significative des crues dans le bassin de la Seine.

*Les conclusions de cette étude peuvent se résumer par des variations **probablement modérées du régime des crues, qu'il s'agisse des crues décennales comme des crues centennales**. Ce résultat, beaucoup moins inquiétant que la baisse générale ressource en eau projetée en parallèle, doit cependant être regardé avec beaucoup de précaution, vues les incertitudes fortes qui l'entachent »*

Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux d'autres études dans les bassins proches de celui de la Seine. La même conclusion se détache de « **changement non significatif des crues dans le bassin de la Somme, comme d'autres auteurs dans les bassins belges, et comme une autre étude antérieure dans le bassin de la Seine** »

Un seul document « The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France » publié en 2008 dans le Journal of Géophysical Research, montre une augmentation des crues centennales dans le Nord de la France. Toutefois « *cette étude à l'échelle européenne ne s'appuie que sur un unique scénario climatique, sans correction de biais, ce qui limite considérablement la portée de ce résultat en regard des incertitudes relevées par les autres études* ».

10. ANNEXE 2 : COMPTES RENDUS DES ENTRETIENS REALISES

Statut de l'entretien

REALISE

Rappel des objectifs généraux de la démarche (analyse de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine et de l'Yonne)

Analyse de l'adaptabilité du projet au changement climatique

Présentation du ou des interlocuteur(s)

Nom de l'interlocuteur principal	FLORENCE HABETS
Organisme(s) d'appartenance	Centre de Géosciences de Mines Paris Tech
Poste occupé actuellement	Chargée de recherche Unité Mixte de Recherche 7619 Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux – Sisyphe Centre de Géosciences Mines ParisTech Groupe de Recherche Hydro-Géo-Ingénierie - Systèmes hydrologiques et réservoirs
Les publications et communications	Jusqu'à aujourd'hui, F. Habets a participé et/ou coordonné plusieurs projets de recherche. Parmi les études réalisées, seules celles directement liées au thème de l'étude ont été retenues : Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Colloque SHF : Risque inondation en Ile de France (Mars 2010)
Les travaux en cours/participation à des projets de recherche sur le thème du changement climatique	Suivi hydrométéorologique à l'échelle de la France

Objectifs de l'entretien

- Obtenir des précisions sur les travaux réalisés (hypothèses, méthodes, outils) ;
- Disposer de commentaires pertinents sur les résultats obtenus ;
- Prendre connaissance des perspectives et recherches en cours.

Organisation de l'entretien

Date de réalisation de l'entretien	12 avril 2010
Conducteur de l'entretien	Daniela CALVAR et Rémy CROIX
Modalités d'introduction auprès de l'interlocuteur	
Documents de référence pour la présentation du projet et de la démarche d'entretien	(Note, rapport)

Modalités de rédaction du CR	CR unique, rédigé par DC (EGIS Eau)
Dans quelle(s) activité(s) l'entretien/ la réunion s'insèrent-t-ils ?	<p>Si connue, indiquer la référence du futur CR. Sinon cocher la/les cases.</p> <p><input type="checkbox"/> Analyse de l'acceptabilité sociale et politique du projet</p> <p><input type="checkbox"/> 1.2.1-MAN (management mission) <input type="checkbox"/> 1.2.4-FON (maîtrise foncière)</p> <p><input type="checkbox"/> 1.2.1-DIR (adm. Générale mission) <input type="checkbox"/> 1.2.5-COM (concertation/ communication)</p> <p><input type="checkbox"/> 1.2.1-MAQ (maquette 3D) <input type="checkbox"/> 1.2.6-ORG (organisation études)</p> <p><input type="checkbox"/> 1.2.2-PRG (programme) <input type="checkbox"/> 1.2.10-FIN (suivi financier)</p> <p><input type="checkbox"/> 1.2.3-ADM (procédures)</p>

Grille d'entretien (inclure dans le cadre ou joindre en document séparé)

Présentation de l'interlocutrice et des études réalisées et/ou auxquelles elle a participé :

Florence Habets est chargée de recherche, UMR- Sisyphé ENSMP. Elle fait partie de l'équipe « Systèmes hydrologiques et réservoirs » du Centre de Géosciences des Mines Paris Tech.

Elle est spécialiste en hydrogéologie, pollution des eaux souterraines et changement climatique.

Eau-dyssée est un projet de modélisation intégrée de l'hydrosystème qui s'appuie sur le couplage de modèles existants.

Florence Habets participe et a participé à plusieurs projets dont :

- **PIREN SEINE** : Le PIREN-Seine est un groupement de recherche dont l'objectif est de développer, à partir de mesures de terrain et de modélisations, une vision d'ensemble du fonctionnement du système formé par le réseau hydrographique de la Seine, son bassin versant et la société humaine qui l'investit.
- **EAU-dyssée** : Il s'agit de réaliser une plateforme de modélisation hydrométéorologique et biogéochimique, pour le suivi et la prévision de la ressource en eau (quantité et qualité) des hydrosystèmes naturels et perturbés.
- **RExHySS** : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme

Question 1 : Plusieurs documents sur le thème du changement climatique ont été identifiés et analysés par Egis Eau. Les travaux de recherche menés dans le cadre du projet REXHySS constituent les documents de référence. Vous êtes un des co-auteurs de ces recherches. Pouvez-vous préciser quelle est votre contribution (rôle) dans ce projet ?

Le projet REXHySS constitue un projet complexe qui suit le programme GICC Seine. Dans le cadre de ce projet, plusieurs modèles climatologiques ainsi que plusieurs méthodes de descente d'échelle et modèles hydrologiques ont été mis en œuvre. Ces travaux ont été réalisés par une équipe pluridisciplinaire formée par des climatologues et hydrologues.

Son objectif est l'étude des valeurs extrêmes.

Dans le cadre de ce projet, Florence Habets est intervenue dans la dernière partie consacrée à la comparaison des résultats obtenus par les cinq modèles hydrologiques mis en œuvre.

Question 2 : Pouvez-vous décrire en quelques mots le travail effectué dans le cadre du projet REXHySS? Quels sont les entrants et les sortants ?

1^{ère} étape : La première partie des recherches a été dédiée à la réalisation des modèles climatologiques et à la mise en œuvre des méthodes de désagrégation (descente d'échelle). Les résultats obtenus lors de cette première partie (pression, température, humidité et évapotranspiration) constituent les entrants des modèles hydrologiques.

Une partie des entrants a été fournie par les simulations réalisées par l'équipe française pour la préparation du 4^{ème} rapport du GIEC. Toutefois des simulations supplémentaires ont été effectuées par Météo France (M. Déqué) avec le modèle ARPEGE. Les simulations effectuées pour le GIEC ont été réalisées sur une période d'environ 30 ans. Ces nouvelles simulations couvrent une période beaucoup plus longue.

Les modèles climatiques sont très complexes avec une résolution spatiale assez réduite. Les biais sont systématiques. Ils fournissent des erreurs sur les précipitations.

2^{ème} étape : Afin de corriger les erreurs, des méthodes de descente d'échelle sont mises en œuvre. Dans le cadre du projet REXHySS, trois méthodes de désagrégation ont été mises en œuvre : régime de temps, quantile-quantile et anomalies. Ce travail a été réalisé par les météorologues du CERFACS.

3^{ème} étape : Mise en œuvre de 6 modèles d'impact.

Les entrants des modèles hydrologiques sont constitués par les sortants des modèles climatologiques (pression, température, humidité et évapotranspiration).

Question 3 : Egis Eau a analysé plusieurs documents qui traitent du thème du changement climatique et tout particulièrement de l'impact du changement climatique sur le bassin de la Seine. Parmi les documents de référence se trouvent les travaux effectués pour le projet REXHySS et le GICC Seine. En comparant les résultats obtenus, il est constaté des différences tout particulièrement au niveau des précipitations et des crues.

Les résultats obtenus lors du programme GICC Seine (Ducharne et al., 2003) estiment « des crues plus importantes en hiver qu'à l'état actuel ». Toutefois cette tendance ne se retrouve pas dans le dernier document de recherche du projet REXHySS présenté le 23 mars au colloque SHF. D'après ce document, au niveau du bassin de la Seine à l'horizon 2100, il est constaté « des variations probablement modérées du régime des crues, qu'il s'agisse des crues décennales comme des crues centennales ». Comment s'expliquent ces différences ou évolutions ? Quelles sont les incertitudes associées ?

Ces différences sont induites par les scénarios climatiques. La France se trouve dans une zone d'incertitudes des précipitations. La frontière n'est pas bien définie.

Concernant les extrêmes, il faut préciser que le REXHySS apporte des éléments nouveaux par rapport aux précédents projets GICC. En effet, les simulations hydrologiques ont été réalisées au pas de temps journalier et permettent ainsi de se pencher sur l'évolution des extrêmes et en particulier des crues. Dès lors qu'il s'agit des extrêmes, les incertitudes augmentent considérablement et par conséquent, la dispersion des modèles est plus importante.

Dans le projet GICC Seine, il a été considéré que dans le futur les précipitations augmenteront. Actuellement, les simulations des modèles climatiques prévoient plutôt une baisse des précipitations sur le bassin de la Seine.

Les simulations des modèles climatiques prévoient une augmentation des précipitations au nord de l'Europe et une diminution au sud, mais la limite varie au cours de l'année : elle est plus au nord en été et plus au sud en hiver.

Sur des larges parties de l'Europe, entre ces deux zones aux changements robustes, il n'y a pas de cohérence de signe entre les modèles. C'est le cas de certaines parties de la France dont le bassin de la Seine fait partie durant toutes les saisons.

Il n'y a qu'en été que l'on trouve une cohérence de signe sur la majorité du territoire français. Sur les ¾ de la France, le signe du changement en hiver n'est pas cohérent entre les modèles et est donc incertain.

Dans le cadre du projet RExHySS, une comparaison des résultats, obtenus avec ceux d'autres études dans des bassins européens proches de celui de la Seine, a été réalisée. Cette comparaison a abouti à la même conclusion.

Une seule étude réalisée au niveau de l'Europe prévoit une augmentation des crues centennales dans le Nord de l'Europe. Toutefois cette étude est basée sur un unique scénario climatique, sans correction de biais. Ce fait limite considérablement la portée de ce résultat.

Dans le cadre du projet RExHySS, le biais des modèles régionaux utilisés a été corrigé.

Question 4 : Les résultats obtenus dans le projet RExHySS peuvent-ils être considérés comme fiables ou peuvent-ils éventuellement être mis en cause par d'autres recherches ?

Actuellement, pour la préparation du 5^{ème} rapport du GIEC, des simulations climatologiques sont engagées. La date de rendu est prévue vers septembre-octobre 2010. Ces nouvelles simulations permettront de mieux établir la frontière de précipitations entre le nord et le sud (précisions sur la zone d'incertitude).

Toutefois, les résultats obtenus peuvent être considérés comme **fiables**. Un des résultats obtenus prévoit la baisse des précipitations. Cette tendance à la baisse des précipitations hivernales dans le nord du pays et donc dans le bassin de la Seine, a commencé à se profiler depuis 2005 (fin du programme GICC).

En ce qui concerne le projet « La Bassée » le document de référence à prendre en compte est le projet RExHySS.

Une présentation complète des résultats du projet RExHySS sera réalisée par M. Déqué et Mlle Habets le 8 juin 2010 à l'Agence de l'Eau Seine Normandie. M. François Lamy organise cette communication.

Question 5 : Dans le Sud de la France, des pluies intenses, les « cévenoles », génèrent des crues très rapides et fortes. La remontée éventuelle de ces phénomènes plus au Nord peut modifier la forme et éventuellement le débit de pointe des crues de la Seine. Le changement climatique est-il susceptible de modifier le type de temps qui génère les crues de la Seine ?

D'après les modèles climatologiques, il n'y a pas de remontée vers le Nord des phénomènes de cévenoles. De plus, deux des trois méthodes de descente d'échelle employées ne sont pas capables de modéliser le changement de type de temps. Par exemple, la méthode de régime de temps n'est pas capable de modéliser un événement pluvieux non observé.

Cette question constitue une piste à explorer dans les futurs travaux. A partir des simulations déjà réalisées, un travail spécifique sur le type de temps peut éventuellement être fait (délais environ 1 an).

Statut de l'entretien

REALISE

Rappel des objectifs généraux de la démarche (analyse de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine et de l'Yonne)

Analyse de l'adaptabilité du projet au changement climatique

Présentation du ou des interlocuteur(s)

Nom de l'interlocuteur principal	AGNES DUCHARNE
Organisme(s) d'appartenance	CNRS
Poste occupé actuellement	Chargée de recherche au CNRS Unité Mixte de Recherche 7619 Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux – Sisyphe
Les publications et communications	<p>De 1997 à aujourd'hui, A. Ducharne a participé et/ou coordonné plusieurs projets de recherche. Parmi les études réalisées, seules celles directement liées au thème de l'étude ont été retenues :</p> <p>Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Colloque SHF : Risque inondation en Ile de France (Mars 2010)</p> <p>Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans le Nord de la France. Conférences mensuelles du Laboratoire Hydrosociences Montpellier, Mars 2010 (Montpellier, France).</p> <p>Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les Extrême hydrologiques dans le bassin de la Seine et de la Somme. Rapport final du projet RexHySS, Programme GICC (2009)</p> <p>La Seine après 2050 ? Impacts croisés du changement climatique et des pressions anthropiques directes, Colloque annuel du Cercle Français de l'Eau, Octobre 2007 (Paris, France).</p> <p>La Seine en 2100? Impacts croisés du changement climatique et des pressions anthropiques directes. ASTEE, Congrès 2007, Juin 2007 (Barcelona, Spain).</p> <p>Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes (2006)</p> <p>Influence du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine (2003)</p>
Les travaux en cours/participation à des projets de recherche sur le thème du changement climatique	<p>Ducharne A, Bellier S, Crespi O, Gascoin S, Zhao Y. Validation of a catchment-based land surface model in the Seine River basin (France) using a simple routing model</p> <p>Sterling S, Ducharne A, Polcher J, Rojstaczer S. The impact of global land cover change on evapotranspiration and the terrestrial water cycle</p> <p>Bustillo V, Moatar F, Ducharne A. Comparison of water temperature models for climate change assessment. Case of the Middle Loire River (France). Submitted to J. Hydrol. (January 2010).</p>

Objectifs de l'entretien

- Obtenir des précisions sur les travaux réalisés sur le thème du changement climatique (hypothèses, méthodes, outils) ;
- Confirmer notre compréhension et les conclusions des documents étudiés ;
- Disposer de commentaires pertinents sur les résultats obtenus ;
- Prendre connaissance des perspectives et recherches en cours.

Organisation de l'entretien

Date de réalisation de l'entretien	12 avril 2010
Conducteur de l'entretien	Daniela CALVAR et Rémy CROIX, Egis Eau
Documents de référence pour la présentation du projet et de la démarche d'entretien	(Note, rapport)
Modalités de rédaction du CR	CR unique, rédigé par DC (Egis Eau)
Dans quelle(s) activité(s) l'entretien/la réunion s'insèrent-ils ?	Si connue, indiquer la référence du futur CR. Sinon cocher la/les cases. <input type="checkbox"/> Analyse de l'acceptabilité sociale et politique du projet <input type="checkbox"/> 1.2.1-MAN (management mission) <input type="checkbox"/> 1.2.4-FON (maîtrise foncière) <input type="checkbox"/> 1.2.1-DIR (adm. g ^{ale} mission) <input type="checkbox"/> 1.2.5-COM (concertation/communication) <input type="checkbox"/> 1.2.1-MAQ (maquette 3D) <input type="checkbox"/> 1.2.6-ORG (organisation études) <input type="checkbox"/> 1.2.2-PRG (programme) <input type="checkbox"/> 1.2.10-FIN (suivi financier) <input type="checkbox"/> 1.2.3-ADM (procédures)

Grille d'entretien

Présentation de l'interlocutrice et des études réalisées et/ou auxquelles elle a participé :

Agnès Ducharne possède un DEA "Ecologie Générale et Production Végétale" (Paris 6, Paris 11, INA-PG) et un magistère de Biologie-Biochimie. Elle a réalisé un Doctorat à l'Université Paris sur "Le cycle de l'eau : modélisation de l'hydrologie continentale, étude de ses interactions avec le climat"

La spécialité d'Agnès Ducharne est, par conséquent, la modélisation de l'hydrologie des surfaces continentales.

Dans ce cadre, ses travaux s'articulent autour de deux axes :

- comprendre et hiérarchiser l'influence des principales contraintes de l'hydrologie des surfaces continentales, à savoir le climat et les propriétés des surfaces continentales (occupation des terres, topographie, hydrogéologie, ...),
- évaluer l'influence de ces contraintes sur la qualité des eaux (température, flux de nutriments, oxygénation, eutrophisation, dénitrification dans les zones ripariennes).

La thématique de l'évolution future de la ressource en eau, d'un point de vue quantitatif et qualitatif (notamment dans le contexte d'anthropisation croissante) est au cœur de ses études et recherches.

Introduction : Présentation de l'objectif de l'étude et du projet de la Bassée par Egis Eau à l'interlocuteur.

Question 1 : Plusieurs documents sur le thème du changement climatique ont été identifiés et analysés par Egis Eau. Les travaux de recherches menés dans le cadre du projet Rexhyss constituent les documents de référence. A. Ducharne est un des co-auteurs de ces recherches. Quel est votre rôle au sein du CNRS et du projet RexHyss ?

Chargée de recherche au CNRS en tant que spécialiste en modélisation hydrologique et des liens entre l'hydrologie et le climat, A. Ducharne travaille sur la modélisation hydrologique à l'échelle de la France.

La démarche générale employée consiste à adapter des modèles mathématiques de fonctionnement de la surface continentale afin de modéliser le climat. Le principe est d'améliorer les performances hydrologiques de ces modèles par le calage afin de modéliser l'impact du changement climatique.

Depuis son entrée au CNRS (2000), A. Ducharne a coordonné et participé à deux projets sur le changement climatique.

1. Le premier projet réalisé entre 2000 et 2005 est le projet GICC Seine. Ce projet constitue une introduction aux futures recherches sur le sujet. Ce dernier a soulevé des questions sur les incertitudes, les extrêmes hydrologiques, la descente d'échelle...
2. Des réponses sont apportées dans le projet REXHySS, second projet coordonné par A. Ducharne dans lequel elle a développé un outil de modélisation hydrologique.

Le projet GICC Seine contenait un volet sur l'impact sur la qualité de l'eau en articulation forte avec le programme Piren Seine.

Question 2 : Sous changement climatique, les caractéristiques des crues (durée, volume, allure de l'hydrogramme) seront-elles modifiées ?

En ne tenant pas compte de l'incertitude importante liée à la projection des précipitations, la conclusion sur le **régime des crues** est qu'il changera probablement de manière modérée. Il reste difficile de préciser si l'aléa crue aura plutôt tendance à diminuer ou à augmenter. Ce résultat dépend d'une incertitude liée aux précipitations qu'il n'est pas évident à quantifier (cf. rapports du Giec). A. Ducharne garde à l'esprit ce résultat mitigé et tente de poursuivre ses recherches pour améliorer la précision dans ce domaine.

Les résultats des modèles réalisés tendent vers des **étiages** plus longs et plus sévères.

Une analyse sur le changement des extrêmes des pluies et de tout ce qui concerne l'évolution des crues centennales à Paris a fait l'objet d'une annexe au projet REXHySS. L'auteur, Eric Sauquet (cf. fiche entretien), a réalisé une note complète sur le Gradex, la variabilité des extrêmes des pluies et des débits, qui a été transmise aux Grands Lacs de

Seine. Cette note, réalisée en février 2010, n'était pas prévue dans le projet RExHySS initial.

L'évolution du régime des crues constitue une problématique importante ayant des conséquences sur le fonctionnement hydrologique de l'ouvrage de la Bassée. Ce dernier a été calé sur les crues historiques du 20^{ème} siècle.

Question 3 : Egis Eau a analysé plusieurs documents qui traitent du thème du changement climatique et tout particulièrement de l'impact du changement climatique sur le bassin de la Seine. Parmi les documents de référence se trouvent les travaux effectués pour le projet RExHySS et le GICC Seine. En comparant les résultats obtenus, il est remarqué des différences tout particulièrement au niveau des précipitations et des crues.

Les résultats obtenus lors du programme GICC Seine (Ducharne et al., 2003) estiment qu'il y aura « des crues plus importantes en hiver qu'à l'état actuel ». Toutefois cette tendance ne se retrouve pas dans le dernier document de recherche du projet RExHySS présenté le 23 mars au colloque SHF. D'après ce document, au niveau du bassin de la Seine à l'horizon 2100, il est constaté « des variations probablement modérées du régime des crues, qu'il s'agisse des crues décennales comme des crues centennales ». Comment s'expliquent ces différences ou évolutions ? Quelles sont les incertitudes associées ?

Les **modèles de climat à grande échelle** sont principalement responsables de la différence de réponse obtenue. En effet, les deux projets ont été réalisés à 7 ans d'intervalle. Les modèles de climat à grande échelle ont beaucoup évolué depuis l'année 2000 : ils ne produisent plus la même projection climatique aujourd'hui.

A priori, les modèles ont évolué vers une amélioration des conditions climatiques mais cela est difficile à affirmer.

Les **méthodes de descente d'échelle** ont également joué un rôle dans les différences constatées, mais l'impact n'est que de deuxième ordre.

Dans le projet RExHySS, 3 méthodes de descente d'échelle ont été testées dont une qui avait été utilisée dans le projet GICC Seine. Il s'agit de la méthode des anomalies, mais il n'y a pas de grand changement sur le résultat hydrologique.

C'est le scénario climatique de grande échelle sur l'amont du bassin de la Seine qui a le plus d'influence sur les résultats obtenus. Malheureusement, les projections utilisées dans le projet RExHySS ne sont pas des projections définitives. Il est très probable que ces projections climatiques soient encore amenées à évoluer.

Les modèles climatiques sont très sensibles aux conditions initiales. Les différences sont principalement concentrées sur les résultats de précipitations. D'après les résultats, il est constaté un déplacement de la limite (en + ou en -) des précipitations. Dix ans séparent les rapports 3 et 4 du Giec. La limite «-» s'est déplacée vers le nord.

Il n'y a pas d'analogie à faire entre la projection climatique et la prévision météorologique même si c'est la même grandeur physique à petite échelle. Il ne s'agit pas de la même interprétation :

- Pour le climat, des moyennes et des statistiques sont réalisées sur le long terme ce qui « gomme » beaucoup de défauts. Des prévisions climatiques au-delà de 5 jours deviennent alors pertinentes.
- En revanche les précipitations sont difficiles à simuler de manière précise ce qui pose problème pour l'hydrologie.

Pour le moment, une simulation de variables quantitatives précises et à petite échelle manque encore de précision. Cependant, de manière générale, il est possible de simuler le climat.

Question 4 : Dans le Sud de la France, des pluies intenses, les « cévenoles », génèrent des crues très rapides et fortes. La remontée éventuelle de ces phénomènes plus au Nord peut modifier la forme et éventuellement le débit de pointe des crues de la Seine. Le changement climatique est-il susceptible de modifier le type de temps qui génère les crues de la Seine ?

Y aura-t-il des types de temps générateurs de crues changeants? Des influences méditerranéennes ?

Les types de temps évoqués dans la question font référence à la « méthode des régimes de temps », une des 3 méthodes de régionalisation. Il n'est pas question de statistiques ici.

D'après les résultats obtenus, il n'y a, a priori, pas de changement important en terme de volume de crues. Par conséquent, les ondes de crues gardent les mêmes vitesses.

Question 5 : Sous quelle échéance y aura-t-il de nouveaux résultats complémentaires au projet RExHySS ?

Les groupes de recherche de climatologie impliqués dans les projections de changement climatique à grande échelle sont en train de faire les simulations qui serviront de base au 5^e rapport du GIEC. Il n'y aura pas de lancement de projets d'impact tant que ces simulations n'auront pas été faites.

Pour la recherche pure, ces études d'impact n'ont pas forcément d'intérêt.

D'autres groupes de recherche en Europe font peut-être des recherches dans ce domaine.

Mises à part les incertitudes liées aux modèles hydrauliques, il subsiste une grosse incertitude pour les projections : quelle sera l'évolution des émissions de gaz à effet de serre sur la période de temps projetée ?

Statut de l'entretien

REALISE

Rappel des objectifs généraux de la démarche (analyse de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine et de l'Yonne)

Analyse de l'adaptabilité du projet au changement climatique

Présentation du ou des interlocuteur(s)

Nom de l'interlocuteur principal	MICHEL DEQUE
Organisme(s) d'appartenance	METEO FRANCE
Poste occupé actuellement	
Les publications et communications	
Les travaux en cours/ participation à des projets de recherche sur le thème du changement climatique	

Objectifs de l'entretien

- Obtenir des précisions sur les travaux réalisés (hypothèses, méthodes, outils) ;
- Disposer de commentaires pertinents sur les résultats obtenus ;
- Prendre connaissance des perspectives et recherches en cours.

Organisation de l'entretien

Date de réalisation de l'entretien	13 avril 2010
Conducteur de l'entretien	Daniela CALVAR et Rémy CROIX
Modalités d'introduction auprès de l'interlocuteur	
Documents de référence pour la présentation du projet et de la démarche d'entretien	(Note, rapport)
Modalités de rédaction du CR	CR unique, rédigé par DC (EGIS Eau)
Dans quelle(s) activité(s) l'entretien/ la réunion s'insèrent-ils ?	Si connue, indiquer la référence du futur CR. Sinon cocher la / les cases. <input type="checkbox"/> Analyse de l'acceptabilité sociale et politique du projet <input type="checkbox"/> 1.2.1-MAN (management mission) <input type="checkbox"/> 1.2.4-FON (maîtrise foncière) <input type="checkbox"/> 1.2.1-DIR (adm. Générale mission) <input type="checkbox"/> 1.2.5-COM (concertation/ communication) <input type="checkbox"/> 1.2.1-MAQ (maquette 3D) <input type="checkbox"/> 1.2.6-ORG (organisation études) <input type="checkbox"/> 1.2.2-PRG (programme) <input type="checkbox"/> 1.2.10-FIN (suivi financier) <input type="checkbox"/> 1.2.3-ADM (procédures)

Présentation de l'interlocuteur et des études réalisées et/ou auxquelles il a participé :

Question 1 : Plusieurs documents sur le thème du changement climatique ont été identifiés et analysés par Egis Eau. Les travaux de recherche menés dans le cadre du projet RExHySS constituent les documents de référence. Vous êtes un des co-auteurs de ces recherches. Pouvez-vous préciser quelle est votre contribution (rôle) dans ce projet ?

Le projet RExHySS est composé de 31 personnes (9 équipes). L'équipe CNRM, de laquelle fait partie M Déqué, a participé pendant 2 ans au projet Rexhyss et plus précisément au volet 1, c'est-à-dire la réalisation des scénarios climatiques et la régionalisation.

Le groupe d'experts international sur l'évolution du climat (GIEC) a proposé un certain nombre de scénarios d'émissions annuelles de gaz à effet de serre et d'aérosols pour le 21^{ème} siècle, en se fondant sur des hypothèses socio-économiques. Ces modèles globaux ont une résolution spatiale assez réduite (résolution horizontale de l'ordre de 300 km). Les scénarios climatiques du projet RExHySS sont constitués des scénarios réalisés pour le 4^{ème} rapport du GIEC ainsi que des scénarios spécifiquement conçus pour ce projet.

Ces scénarios ont subi une descente d'échelle. Cette étape a été réalisée par l'équipe Cerfacs. Dans le cadre du projet Rexhyss, les simulations hydrologiques ont été réalisées au pas de temps journalier et permettent ainsi de se pencher sur l'évolution des extrêmes et en particulier des crues.

Question 2 : Pouvez-vous décrire les résultats obtenus par le projet RExHySS ainsi que les incertitudes qui s'attachent à ces résultats ?

Tous les scénarios s'accordent sur une diminution des précipitations annuelles.

L'incertitude qui réside sur les précipitations hivernales est la plus importante compte tenu de la difficulté des modèles climatiques à représenter cette période de l'année.

La baisse des précipitations hivernales est un résultat nouveau. Il y a une dizaine d'années, tous les scénarios s'accordaient sur une hausse des précipitations hivernales en France. Le discours des climatologues a aujourd'hui évolué compte tenu des améliorations des modèles climatiques et d'une meilleure reconnaissance des incertitudes de modélisation liées à ces projections.

Question 3 : Dans un futur proche (d'ici 5 ans), peut-on s'attendre à un resserrement spectaculaire des projections climatiques qui peuvent éventuellement mettre en cause les résultats obtenus par le projet RExHySS ?

Les améliorations attendues des modèles climatologiques seront moins importantes que celles des dernières années. Actuellement le développement des calculateurs a atteint un seuil. Les progrès escomptés résident dans la prise en compte de nouveaux processus. Toutefois, il est difficile d'envisager un resserrement spectaculaire des projections climatiques.

Question 4 : Egis Eau a analysé plusieurs documents qui traitent du thème du changement climatique et tout particulièrement de l'impact du changement climatique sur le bassin de la Seine. Parmi les documents de référence, se trouvent les travaux effectués pour le projet RExHySS et le GICC Seine. En comparant les résultats obtenus, il est constaté des différences tout particulièrement au niveau des précipitations et des crues.

Les résultats obtenus lors du programme GICC Seine (Ducharne et al., 2003) estiment « des crues plus importantes en hiver qu'à l'état actuel ». Toutefois, cette tendance ne se retrouve pas dans le dernier document de recherche du projet RExHySS, présenté le 23 mars au colloque SHF. D'après ce document, au niveau du bassin de la Seine à l'horizon 2100, il est constaté « des variations probablement modérées du

régime des crues, qu'il s'agisse des crues décennales comme des crues centennales ». Comment s'expliquent ces différences ou évolutions ? Quelles sont les incertitudes associées ?

Ces différences sont induites par les scénarios climatiques. La France se trouve dans une zone d'incertitudes des précipitations. La frontière n'est pas bien définie. Sur une grande partie de la France, le signe du changement en hiver n'est pas cohérent entre les modèles et est donc incertain. La majorité des modèles employés dans RExHySS calcule une baisse des précipitations hivernales, d'où les résultats obtenus (variations modérées du régime des crues de la Seine).

D'après les résultats du projet RExHySS, le phénomène de diminution des pluies hivernales est plus probable que le phénomène d'augmentation.

Question 5 : Dans le Sud de la France, des pluies intenses, les « cévenoles », génèrent des crues très rapides et fortes. La remontée éventuelle de ces phénomènes plus au Nord peut modifier la forme et éventuellement le débit de pointe des crues de la Seine. Le changement climatique est-il susceptible de modifier le type de temps qui génère les crues de la Seine ?

Les phénomènes de cévenoles se manifestent par des pluies intenses >400 mm/j. Or les modèles de climat ne sont pas capables d'étudier des pluies d'une intensité supérieure à 100 mm/j. Compte tenu de ce fait, cette question ne s'est pas posée dans RExHySS.

Un autre projet, CYPRIM, a eu comme sujet principal l'étude de précipitations intenses.

Dans le cadre de ce projet, une approche pluri-disciplinaire a été mise en œuvre, en vue de caractériser les systèmes météorologiques à l'origine de vents violents ou de précipitations intenses, à partir de sources de données diverses (radars, sondages et imagerie satellite, ré-analyses, modèles couplés océan-atmosphère pour le climat, modèles couplés à maille très fine atmosphère - océan superficiel - hydrologie). Toutefois ce projet n'a pas abouti.

Statut de l'entretien REALISE

Rappel des objectifs généraux de la démarche (analyse de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine et de l'Yonne)

Analyse de l'adaptabilité du projet au changement climatique

Présentation du ou des interlocuteur(s)

Nom de l'interlocuteur principal	ERIC SAUQUET
Organisme(s) d'appartenance	CEMAGREF
Poste occupé actuellement	Chargé de recherche Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique
Les travaux en cours/participation à des projets de recherche sur le thème du changement climatique	Jusqu'à aujourd'hui, E. Sauquet a participé et/ou coordonné plusieurs projets de recherche. Parmi les études réalisées, seules celles directement liées au thème de l'étude ont été retenues : Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Colloque SHF : Risque inondation en Ile de France (Mars 2010) Peut-on étendre l'échéance de prévision des crues en optimisant la prévention de pluies par recherche d'analogues ? Application au bassin de la Seine à Paris. Colloque SHF : Risque inondation en Ile de France (Mars 2010)

Objectifs de l'entretien

- Obtenir des précisions sur les travaux réalisés (hypothèses, méthodes, outils) ;
- Disposer de commentaires pertinents sur les résultats obtenus ;
- Prendre connaissance des perspectives et recherches en cours.

Organisation de l'entretien

Date de réalisation de l'entretien	14 avril 2010
Conducteur de l'entretien	Daniela CALVAR et Rémy CROIX
Documents de référence pour la présentation du projet et de la démarche d'entretien	(Note, rapport)
Modalités de rédaction du CR	CR unique, rédigé par DC (EGIS Eau)
Dans quelle(s) activité(s) l'entretien/ la réunion s'insèrent-ils ?	Si connue, indiquer la référence du futur CR. Sinon cocher la/les cases. <input type="checkbox"/> Analyse de l'acceptabilité sociale et politique du projet <input type="checkbox"/> 1.2.1-MAN (management mission) <input type="checkbox"/> 1.2.4-FON (maîtrise foncière) <input type="checkbox"/> 1.2.1-DIR (adm. Générale mission) <input type="checkbox"/> 1.2.5-COM (concertation/communication) <input type="checkbox"/> 1.2.1-MAQ (maquette 3D) <input type="checkbox"/> 1.2.6-ORG (organisation études) <input type="checkbox"/> 1.2.2-PRG (programme) <input type="checkbox"/> 1.2.10-FIN (suivi financier) <input type="checkbox"/> 1.2.3-ADM (procédures)

Grille d'entretien

Présentation de l'interlocuteur et des études réalisées ou/auxquelles il a participé

Eric Sauquet est spécialiste en analyse statistique de l'aléa hydrologique, régionalisation des descripteurs de régime hydrologique, gestion des risques d'inondation ainsi qu'en climatologie appliquée à l'hydrologie dont l'impact du changement global sur la ressource en eau.

Il est responsable du groupe thématique HYSCAH « Hydrologie Statistique et Climatologie Appliquée à l'Hydrologie ». Le groupe cherche à caractériser et à modéliser avec des outils statistiques le comportement des principaux termes du bilan hydrologique (précipitation, température, débit) à l'échelle des bassins versants. Les recherches menées visent notamment à mieux comprendre les phénomènes extrêmes actuels et futurs pour limiter leurs effets néfastes sur la gestion de l'eau et à apporter des connaissances nouvelles sur les précipitations et leurs structures spatio-temporelles, d'assurer la liaison entre la modélisation climatique et ses impacts hydrologiques.

Il s'est investi dans l'étude du changement climatique et de ses impacts sur les hydro-systèmes en participant à différents projets sur le devenir des grands bassins versants français :

- projet RexHyss sur le bassin de la Seine,
- projet Imagine2030 sur le bassin de la Garonne (coordinateur),
- projet Hydroqual sur le bassin de la Loire.

Question 1 : Sous changement climatique, les caractéristiques des crues (durée, volume, allure de l'hydrogramme) seront-elles modifiées ?

Il est impossible de se prononcer sur la dynamique des crues. L'étude de l'évolution des cours d'eau existants a été réalisée de même que des analyses sur des bassins versants de surface supérieure à 50 km². Le travail réalisé est général (et donc pas à l'échelle d'une région), et les éléments dynamiques et concomitants n'ont pas été au centre de l'analyse.

Question 2 : Pouvez-vous décrire en quelques mots le travail effectué dans le cadre du projet REXHySS ? Quels sont les entrants et les sortants ?

Le rôle de l'équipe de recherche, dont je fais partie, est de collecter l'ensemble des simulations de débits. Le modèle fonctionne pour simuler le climat actuel. Les prévisions du modèle sous changement climatique nécessitent une vérification des biais.

Sont réalisés :

- un ensemble d'analyses comparatives faites sur les moyennes et sur les extrêmes,
- un test du modèle pour simuler le temps actuel,
- des analyses comparatives sous différents horizons et sous différents modèles.

Les analyses sont réalisées pour un ensemble de 100 bassins versants et des sous bassins-versants qui servent de point de contrôle.

Les outils d'analyse statistiques utilisés sont standards. La variable étudiée ayant un intérêt hydrologique est le QMNA5 (débit moyen minimum annuel de période de retour 5 ans). Sur la chronique de débits obtenue est alors appliquée une loi de Gumbel pour une fenêtre de 20 ans.

Le modèle climatique permet de restituer un climat sur une période. Les variables influençant le climat sont les forçages et la teneur en gaz à effet de serre. Le modèle est alors relativement complexe.

La crue est considérée comme un événement ponctuel car elle est due à des précipitations elles-mêmes ponctuelles.

Le débit centennal (Q100) a été obtenu par ajustement du Gradex. Les résultats du projet REXHySS montrent que les quantiles QJXA100 n'évoluent pas significativement (des variations modérées).

Question 3 : Les résultats obtenus dans le projet RExHySS peuvent-ils être considérés comme fiables ou peuvent-ils éventuellement être mis en cause par d'autres recherches ?

Dans les précédentes générations de scénarios était annoncé un renforcement des pluies en hiver. Actuellement, compte tenu des progrès principalement des modèles climatiques, il n'y aurait pas d'augmentation des pluies en hiver (pas de crues exceptionnelles). Le GIEC réalise des analyses sur les débits mensuels, et donc pas sur des événements extrêmes.

Les modèles hydrauliques réalisés sur les extrêmes présentent des incertitudes car le modèle n'est pas calé sur ces périodes-là.

Concernant la réponse hydrologique, les modèles hydrologiques donnent le même bilan mensuel mais pas la même dynamique (réponse différente).

Les incertitudes ne sont liées qu'à une seule variable ou à un seul composant. Elles se manifestent à tous les niveaux en commençant par les modèles climatiques et en finissant par les modèles hydrologiques. Toutefois à l'heure actuelle, on considère que la principale source d'incertitude est constituée par les modèles climatiques.

Question 4 : Le changement climatique génère des incertitudes pour le projet de la Bassée, qui est dimensionné pour absorber les types de pics de crue actuels. Les caractéristiques des crues (durée, volume, allure de l'hydrogramme) seront-elles différentes dans le futur ?

Les caractéristiques des crues modélisées sont les suivantes:

- aucune tendance ne se distingue clairement (beaucoup de bruit)
- l'occurrence des crues : la saisonnalité des crues est plus marquée
- les débits plus forts arrivent plus tard (léger décalage de l'hydrogramme). Le décalage des crues se rencontre au printemps.
- Le débit mensuel se trouve décalé.
- Il n'y a pas d'augmentation du risque par rapport à l'état actuel.
- Les étiages sont décalés vers la fin de l'automne

Par conséquent, pour la Seine à Paris on peut admettre :

- un renforcement des étiages,
- pour les crues, il n'y a pas de définition définitive étant donné la présence d'incertitudes. Il n'y a pas d'évolution notable sur les crues (-20% /+20%).

Question 5 : Sous quelle échéance y aura-t-il de nouveaux résultats complémentaires au projet RExHySS ?

RExHySS étant terminé, les chercheurs travaillent sur l'exploitation des résultats. Des publications devraient apparaître dès l'année prochaine.

11. ANNEXE 3 : PRESENTATION DES SCENARIOS « SRES »

Scénarios d'émissions du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES)

Les scénarios SRES sont définis à partir de différentes évolutions possibles des principaux paramètres de l'économie mondiale. Ils n'incluent pas d'initiatives climatiques supplémentaires par rapport à la situation actuelle, ce qui signifie que l'on n'inclut aucun scénario qui suppose expressément l'application de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou des objectifs du Protocole de Kyoto pour les émissions.

Présentation des scénarios SRES

		Degré d'ouverture et de convergence du monde	
		Elevé	Faible
Prise en compte de considérations sociales et environnementales	Faible	A1	A2
	Elevé	B1	B2

A1. Forte croissance économique et mondialisation

Le canevas et la famille de scénarios A1 décrivent un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique: forte intensité de combustibles fossiles (A1FI), sources d'énergie autres que fossiles (A1T) et équilibre entre les sources (A1B) ("équilibre" signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies de l'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).

A2. Continuité des tendances actuelles : prédominance énergies fossiles et augmentation des disparités régionales

Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

B1. Dématérialisation et recherche d'efficacité durable

Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

B2. Priorité au local et à la durabilité

Le canevas et la famille de scénarios B2 décrivent un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

On pourra retenir qu'en termes d'évolution des émissions de gaz à effet de serre, le scénario le plus pessimiste est le scénario A2 ; le plus optimiste est B1.

