

7. Paramètres supplémentaires

7a. Débit des rivières

Anticiper l'évolution des débits des rivières sur la France est un exercice difficile. Il nécessite **l'utilisation de modèles possédant une résolution spatiale élevée**, de l'ordre de celle des bassins versants français, ainsi que la prise en compte de nombreux processus hydrologiques comme le stockage profond des eaux dans les aquifères ayant une influence importante sur le maintien des débits d'étiage en été.

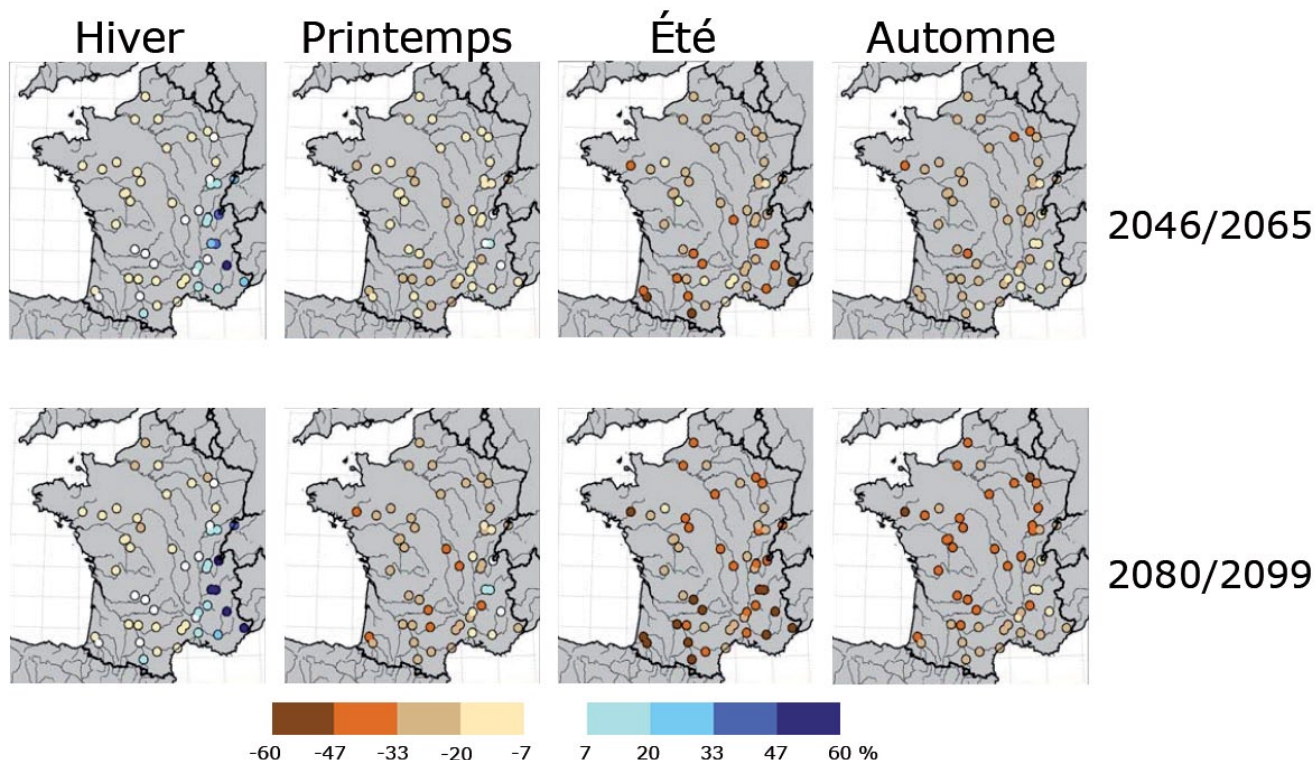
Des modèles hydro-météorologiques plus adaptés à ces problématiques que les modèles climatiques ont donc été développés depuis quelques années, comme la chaîne Safran-Isba-Modcou (SIM), développée par le CNRM et le Centre de géosciences de Mines Paris Tech. Ce modèle se compose de trois modules : SAFRAN fournit une analyse des forçages météorologiques au modèle de surface ISBA qui calcule les bilans d'eau et d'énergie en surface. MODCOU calcule ensuite l'évolution des aquifères et des débits des cours d'eau.

Grâce à cette chaîne, une simulation réaliste des débits sur plusieurs grands bassins versants français est désormais opérationnelle à Météo-France et permet d'anticiper les épisodes de sécheresses et de crues. Des études d'impacts du changement climatique sont également possibles avec SIM. Afin de simuler l'évolution des débits sur la France, les forçages atmosphériques SAFRAN sont alors remplacés par des forçages issus de scénarios climatiques. Avant d'être imposés en entrée d'ISBA, **les paramètres météorologiques issus des scénarios globaux sont désagrégés vers une échelle spatiale plus fine (8 km)**.

Malheureusement, **il existe peu de simulations hydrologiques utilisant les scénarios régionaux B2 et A2 qui nous intéressent dans ce rapport**. Nous pouvons cependant nous appuyer sur plusieurs travaux qui, même s'ils n'utilisent pas ces scénarios, peuvent nous donner une idée des changements prévus sur la France. Les principales conclusions des plus récentes études menées sur cette problématique sont listées ci-dessous :

- **thèse Julien Boé (2007)** : un des objectifs de cette thèse soutenue en 2007 était de mettre en oeuvre des **méthodes de régionalisation pour réaliser de mul-**

tiples scénarios hydro-météorologiques et étudier les impacts du changement climatique sur la France. Cette étude utilise **diverses simulations du modèle AR-PEGE-Climat et de la base de données du GIEC (IPCC, 2007), en se basant sur le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B**, que l'on peut considérer comme intermédiaire aux scénarios A2 et B2. Si des incertitudes sont associées au choix de la méthode de désagrégation et au choix du modèle climatique global, des signaux clairs apparaissent sur la France dès le milieu du XXI^e siècle (figure ci-dessous) :



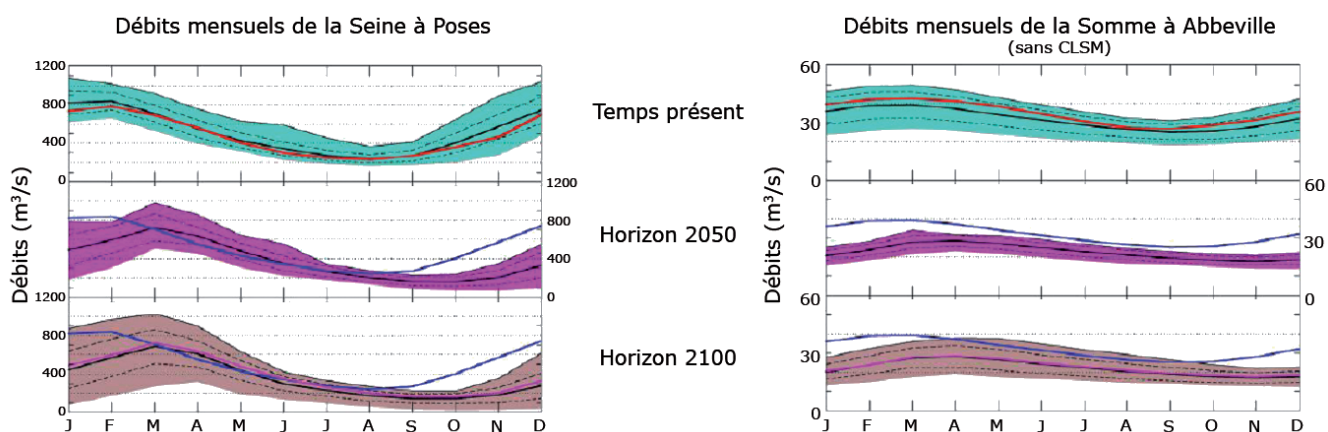
Changements relatifs (en %) des débits sur la France obtenus par désagrégation statistique de simulations réalisées à partir de 20 modèles du GIEC. On montre la période 2046-2065 (en haut) et la période 2080-2099 (en bas). Ces anomalies sont déterminées en calculant la différence entre la moyenne d'ensemble des simulations et la valeur observée sur la période de référence (1970-1999) pour les 50 stations utilisées. D'après Boé (2007).

- **forte diminution généralisée des débits moyens en été et en automne,**
- **étiages plus fréquents et sévères, augmentation des débits en hiver sur les Alpes et le sud-est du pays,**
- **changements bien plus modérés des débits intenses que des débits moyens.**

Une des limites de cette étude réside dans le fait qu'elle n'utilise que le modèle hydrologique SIM, ce qui ne permet pas de quantifier l'incertitude associée au modèle hydrologique utilisée.

- **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*) : ce projet

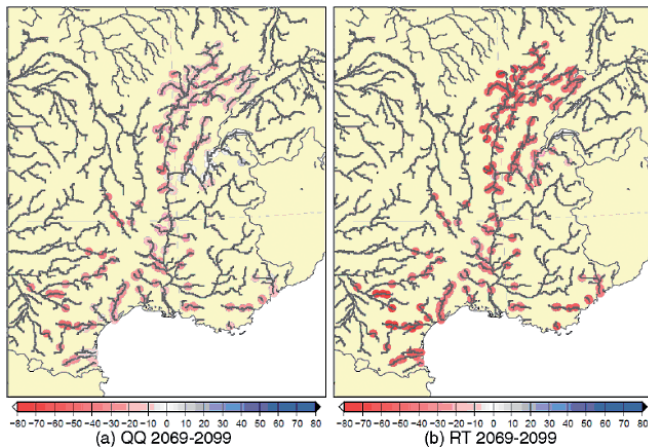
complète les travaux de Boé (2007) sur les bassins de la Seine et de la Somme. Il corrige une des principales limitations de leur étude en utilisant six modèles hydrologiques représentatifs de l'état de l'art. **Douze scénarios climatiques ont été désagrégés**, correspondant à des **scénarios A1B et A2** issus d'ARPEGE-Climat et de modèles du GIEC. Comme le suggère la figure suivante, tous les modèles simulent un **assèchement prononcé des bassins étudiés d'ici à la fin du XXI^e siècle, avec une baisse des nappes et des débits en moyenne annuelle**. Cette baisse, globalement comprise entre 20 et 40% des débits temps présent, est robuste en regard des incertitudes analysées, qui proviennent de manière dominante des modèles climatiques de grande échelle, suivis des modèles hydrologiques et des méthodes de désagrégation.



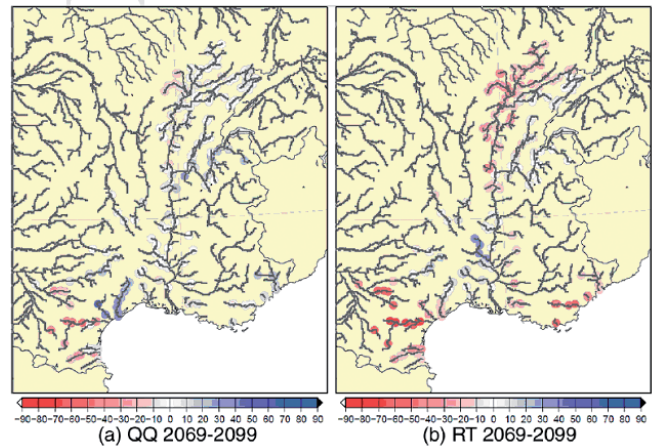
Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses (à gauche) et la Somme à Abbeville (à droite) par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarios. L'enveloppe représente les minimums et les maximums simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe 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.

- **A l'échelle saisonnière, la baisse des débits se répercute davantage sur les hautes eaux** que sur les basses eaux, dont la baisse est moins robuste. La réponse des valeurs extrêmes est plus contrastée. Sur l'ensemble des stations analysées, les débits caractéristiques des étiages sévères baisseraient fortement, et la durée des séquences de débits faibles augmenterait. Au contraire, les crues extrêmes ne changeraient pas significativement.
- **projet CYPRIM (CYclogénèse et PRéCipitation Intenses en Méditerranée)** : l'un des objectifs de ce projet consistait à **déterminer l'impact hydrologique du changement climatique** avec SIM. Il se focalise **sur la zone méditerranéenne et utilise le scénario A2 à haute résolution désagrégé à 8 km** selon la méthode statistique

de Boé et al. (2006). Le principal résultat de ce projet est le suivant : **malgré un climat plus sec et une diminution des débits moyens dans cette région à l'horizon 2069-2099** (figure ci-dessous, à gauche), **les crues éclairs pourraient être aussi fortes (voire plus) qu'aujourd'hui** (figure ci-dessous, à droite). La période de référence est 1970-2000.



Variation (en %) du débit moyen sur la période septembre à décembre. À gauche : désagrégation par correction quantile-quantile ; à droite : désagrégation par régimes de temps.



Variation (en %) du quantile 99% du débit sur la période septembre à décembre. À gauche : désagrégation par correction quantile-quantile ; à droite : désagrégation par régimes de temps.

- **projet IMAGINE 2030** : dans le cadre de ce projet, deux modèles hydrologiques ont été utilisés pour examiner l'évolution de la ressource en eau sur le bassin de la Garonne à l'horizon 2030. Ces modèles ont été forcés grâce à la désagrégation statistique de 19 scénarios climatiques issus des modèles du GIEC (12 scénarios A1B, 7 scénarios A2). Les résultats montrent des **apports annuels en baisse et une sévérité accrue des étiages (en termes d'intensité et de durée) en réponse à des températures plus élevées dès 2030**. Les écoulements estivaux sont diminués du fait d'une évapotranspiration accrue, et d'une fonte de la neige plus précoce sur les massifs pyrénéens.

A noter que **deux projets sont en cours** et devraient prochainement apporter un éclairage nouveau sur la question :

- **projet CLIMSEC** (*Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*) : ce projet s'intéresse à **l'évolution des sécheresses au XXI^e siècle** en se focalisant sur l'eau du sol. Pour cela, l'ensemble ISBA-MODCOU est forcé par des projections climatiques à haute résolution (scénarios A1B et A2) pour simuler l'évolution de différents indicateurs hydrologiques, dont les débits des rivières. Les **résultats**

seront disponibles courant 2011.

- **projet EXPLORE 2070** : ce projet porte sur **l'impact et l'adaptation au changement climatique à l'horizon 2050-2070, et comporte un volet dédié à l'hydrologie du sol**. Il sera basé sur **l'étude de simulations globales du GIEC désagrégées à 8 km, ainsi que sur des simulations régionales (résolution de 50 km) réalisées avec ARPEGE-Climat**. Le **scénario médian (A1B)** d'émission de gaz à effet de serre a été privilégié en raison du grand nombre de modèles désagrégés disponibles sur la France. L'approche multi-modèles sera donc privilégiée devant l'approche multi-scénarios afin d'appréhender les incertitudes. Il est à noter que des simulations globales à 50 km ainsi que des simulations régionales centrées sur l'Amérique du Nord seront analysées pour estimer les évolutions climatiques dans les DOM (Antilles, Réunion, Guyane).

7b. Niveau de la mer

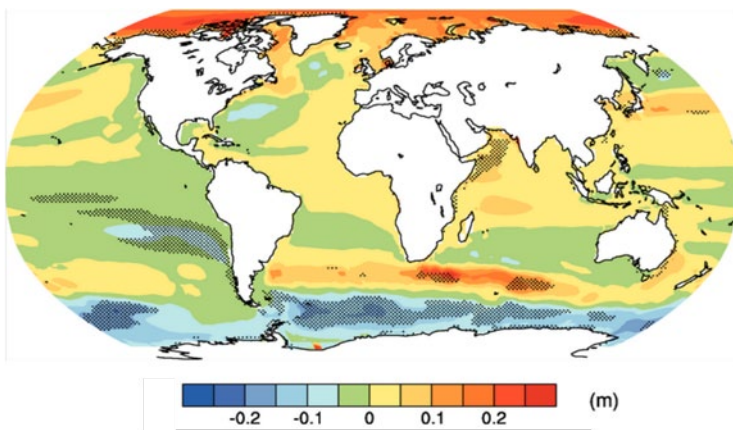
Selon le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2007), **le niveau moyen de la mer pourrait s'élever d'une hauteur comprise entre 23 cm et 51 cm entre la fin du XX^e siècle et la fin du XXI^e siècle dans le cas du scénario A2, entre 20 cm et 43 cm pour le scénario B2**. L'expansion thermique de la masse d'eau océanique due au réchauffement atmosphérique en est la principale contribution (entre 70 et 75% de l'élévation totale) le reste étant lié à la fonte des glaces continentales (notamment du Groenland). Bien que tous les modèles du GIEC s'accordent sur une élévation du niveau de la mer dans un climat qui se réchauffe, **des incertitudes importantes demeurent**. Les projections du GIEC ne prennent en effet pas en compte l'impact éventuel d'une accélération de la fonte des calottes en liaison avec les changements de la dynamique de la glace, telle que suggérée par les observations récentes. Des projections cherchant à reproduire indirectement cet effet ont récemment été publiées dans la littérature scientifique. L'une d'entre elles (Grinsted et al, 2010) conduit notamment à une augmentation du niveau moyen de la mer, sur la même période que précédemment, comprise entre 82 cm à 1 m 20 pour le scénario d'émission B2 et entre 93 cm à 1 m 36 pour le scénario A2. Cependant, comme le conclut un atelier du GIEC sur l'augmentation du niveau de la mer et les instabilités des calottes¹, les méthodes utilisées

¹ " IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities", Kuala Lumpur (Malaisie), 21-24 June 2010:

pour ces projections manquent de base physique et doivent donc être considérées avec beaucoup de précautions.

Au-delà de 2100, l'estimation de la contribution de la fonte des calottes à l'augmentation du niveau moyen de la mer est bien sûr encore plus incertaine. Les seules estimations chiffrées données par le GIEC en 2007 sont celles de la contribution de la dilatation thermique sous l'hypothèse du scénario d'émission A1B (compris entre les scénarios B2 et A2) suivi d'une stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre à partir de 2100. Selon ces estimations, **le niveau moyen de la mer augmenterait de 30 cm à 80 cm en 2300 par rapport à 1980-1999**, et continuerait à augmenter à un rythme décroissant au cours des siècles suivants à cause des processus lents de transport de la chaleur vers les couches océaniques les plus profondes.

La distribution régionale du changement du niveau de la mer est quant à elle encore plus difficile à estimer car elle dépend de l'évolution locale de plusieurs paramètres : de la température de l'océan, de la salinité, des courants marins, de la pression de surface, de l'apport d'eaux continentales ou encore de la déformation des plateaux continentaux. Dans son dernier rapport, le GIEC présente les disparités régionales d'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2090, telle que prévue par la moyenne



Élévation du niveau de la mer relative à la moyenne globale prévue par 16 modèles du GIEC forcés avec le scénario A1B. Période 2080-2099. Les zones en pointillées indiquent les régions pour lesquelles les modèles sont en bon accord.

d'ensemble des modèles dans le cas du scénario A1B (carte ci-contre). Le faible niveau de confiance des résultats est dû à la forte dispersion des modèles. Les modifications prévues sur les régions qui nous concernent sont particulièrement incertaines, d'autant plus pour la mer Méditerranée pour laquelle le

GIEC ne donne pas de valeurs. **L'élévation du niveau de la mer Méditerranée est en effet difficile à estimer** à l'aide des modèles globaux car ceux-ci ne prennent pas en compte de manière réaliste les échanges d'eau entre la Méditerranée et l'océan Atlantique au niveau du détroit de Gibraltar.

Simuler l'évolution du niveau de la mer à l'échelle des zones côtières nécessite l'utilisation de modèles haute résolution et la prise en compte des nombreux processus responsables des variations du niveau de la mer. Des travaux préliminaires concernant la mer Méditerranée sont parus récemment (Tsimplis et al. 2008, Marcos et Tsimplis 2008) et seront complétés dans le cadre du second volet du projet VANIMEDAT (*Decadal and interdecadal variability of sea level in the Mediterranean and Northeast Atlantic*) qui s'appuiera sur des modèles régionaux océaniques à haute résolution pour étudier l'évolution du niveau de la mer sur la Méditerranée et l'Atlantique Nord-est. Le projet CIRCE (*Climate Change and Impact Research: the Mediterranean Environment*) devrait également apporter des éléments de réponses pour la mer Méditerranée, même si les incertitudes sur ces évaluations ne pourront pas être correctement estimées avant plusieurs années.