



Projet RExHySS

**Impact du changement climatique
sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques
dans les bassins de la Seine et la Somme**

**Climate change impact
on the Water Resources and Hydrological Extremes
of the Seine and Somme river basins**

**Programme GICC
Rapport de fin de contrat**

Date : 21 Septembre 2009

Projet N° 0000454

Date du contrat : 20/12/2006

Responsable du projet : Agnès Ducharne
UMR Sisyphe (UPMC / CNRS / EPHE / ENSMP)
UPMC Case 105, 4 place Jussieu, 75005 Paris
Agnès.Ducharne@upmc.fr

Auteurs : Ducharne A, Habets F, Déqué M, Evaux L, Hachour A, Lepaillier A, Lepelletier T, Martin E, Oudin L, Pagé C, Ribstein P, Sauquet E, Thiéry D, Terray L, Viennot P, Boé J, Bourqui M, Crespi O, Gascoin S, Rieu J

TABLE DES MATIÈRES

SYNTHÈSE	5
Contexte général	6
Objectifs généraux du projet	6
Quelques éléments de méthodologie (et éventuelles difficultés rencontrées)	6
Résultats obtenus	7
Implications pratiques.....	13
Recommandations et limites éventuelles	13
Réalizations pratiques et valorisation	14
Partenariats mis en place, projetés, envisagés.....	15
Pour en savoir plus (quelques références).....	15
Liste des opérations de valorisation issues du contrat	16
RÉSUMÉS	18
RAPPORT SCIENTIFIQUE	20
I. Introduction	20
II. Impacts physiques du changement climatique	21
V1. Scénarios climatiques et régionalisation	21
1. Problématique	21
2. Les scénarios et méthodes de désagrégation utilisées dans RExHySS	21
3. Validation des scénarios désagrégés pour le temps présent	24
4. Projections climatiques pour les bassins de la Seine et de la Somme	25
5. Les incertitudes	27
V2. Modélisation hydrologique et ressources en eau	28
1. Analyse des réponses sur les débits	29
2. Analyse des réponses sur la piézométrie.....	31
3. Analyse du bilan hydrique	31
4. Analyse des incertitudes.....	33
V3. Analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes	34
1. Variables analysées.....	34
2. Analyse des débits restitués sous climat présent à l'échelle du bassin.....	35
3. Analyse des débits restitués sous changement climatique à l'échelle du bassin	36
4. Analyse des débits futurs de la Seine à Paris et de la Somme à Abbeville	38
5. Devenir de la piézométrie sur le bassin de la Somme	39
III. Conséquences sur les activités socio-économiques	40
V4a. Inondations de la Somme aval	40
1. Problématique et démarche	40
2. Résultats	41
V4b. Défaillances des débits d'étiage anthropisés	42
1. Problématique et démarche	42
2. Résultats	44
V5. Irrigation et ressources en eau souterraines	46
1. Problématique et démarche	46
2. Capacités du modèle STICS pour évaluer les besoins en irrigation.....	46
3. Impact du changement climatique sur les doses d'irrigation	47
4. Déficits d'alimentation des formations aquifères sous changement climatique.....	49
5. Impact croisé du déficit de recharge et de l'augmentation de l'irrigation.....	50
V6. Transfert aux gestionnaires	51
1. Incertitudes associées aux simulations climatiques et hydrologiques	52
2. Communication des résultats et des incertitudes.....	52
3. Implications opérationnelles et politiques d'adaptation	53
4. Perspectives du projet	53
IV. Conclusions et discussion	53
V. Références citées	55
Liste des Tables et Figures	58

ANNEXES	60
Tirés à part des publications	60
Compléments sur les différents volets du projet (non confidentiel)	60
aV1a. Méthode de désagrégation quantile-quantile.....	60
aV1b. Analyse des scénarios désagrégés.....	60
aV2a. Description des modèles hydrologiques.....	60
aV2b. Impacts du changement climatique sur la ressource en eau.....	60
aV3. Analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes.....	60
aV4a. Inondations de la Somme aval.....	60
aV4b. Défaillances des débits d'étiage anthropisés.....	60
aV5a. Vers une construction de scénarios d'irrigation à l'aide du modèle STICS.....	60
aV5b. Rétroaction des prélèvements par irrigation sur les nappes.....	60
aV6. Participants à l'atelier du 27 novembre 2008.....	60
Acronymes	61

SYNTHÈSE

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

Responsable scientifique du projet : Agnès Ducharme

UMR Sisyphe (UPMC / CNRS / EPHE / ENSMP)

UPMC Case 105, 4 place Jussieu, 75005 Paris

Agnes.Ducharme@upmc.fr

Partenaires directs du projet : CNRS, CERFACS, ARMINES, SOGREAH

Participants au projet :

	Partenaires	Personnes	Statut
P1	CERFACS	L. Terray J. Boé C. Pagé *	Chercheur CERFACS Doctorant CERFACS Postdoc CDD (V1)
P2	CNRM-GAME (URA 1357)	M. Déqué E. Martin	Ingénieur Ponts et Chaussées Ingénieur Ponts et Chaussées
P3	Sisyphe (UMR 7619)	A. Ducharme F. Habets L. Oudin P. Ribstein H. Bouddra * puis M. Bourqui * puis A. Hachour * O. Crespi S. Gascoin L. Moulin	Chargée de recherche CNRS Chargée de recherche CNRS Maitre de conférences Professeur Post-doc CDD (V2) Stagiaire M2 Doctorant Sisyphe ATER
P4	Armines	E. Ledoux P. Viennot	Directeur de recherche Ingénieur de recherche
P5	Cemagref Lyon	E. Leblois E. Sauquet	Ingénieur de recherche Chargé de recherche
P6	BRGM Orléans	D. Thiéry	Chef de projets de recherche
P7	SOGREAH	L. Evaux J. Rieu P. Sauvaget	Ingénieure Ingénieur Chef de projets
P8	Hydratec	A. Lepaillier T. Lepelletier	Ingénieure Chef de projets
P9	INRA (UMR EGC)	A. Perrier	Professeur émérite

* Rémunérés sur contrat RExHySS.

CONTEXTE GENERAL

Quelle situation, quels enjeux motivent ce projet ?

Nous intéressons à l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur deux grands hydrosystèmes fluviaux représentatifs du Nord de la France, la Seine et la Somme. A l'heure actuelle, grâce au climat océanique et à l'influence régulatrice des nappes souterraines, ces hydrosystèmes soutiennent bien les différents usages de l'eau en situation normale, notamment d'un point de vue quantitatif (eau potable, prélèvements agricoles, navigation, etc.). Ils sont en revanche très vulnérables aux extrêmes hydrologiques, comme ont pu l'illustrer les crues de 1910 de la Seine et 2001 de la Somme, ou les sécheresses de 2003 et 2005.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

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. Dans ce cadre, le premier objectif était de modéliser les impacts potentiels du changement climatique sur la composante physique des hydrosystèmes (climat, hydrologie), en caractérisant les incertitudes associées. Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés aux conséquences possibles de ces changements physiques sur les systèmes socio-économiques, en nous concentrant sur des questions particulièrement sensibles aux extrêmes hydrologiques (parmi lesquels l'irrigation et les inondations dans les corridors fluviaux). Un dernier objectif était de diffuser nos résultats aux acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau dans les bassins versants étudiés, pour initier une réflexion sur les stratégies d'adaptation au changement climatique.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

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 anthropiques pour le 21^{ème} siècle. Une étape importante est celle de la régionalisation ou désagrégation de ces scénarios climatiques de grande échelle, qui vise à introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les modèles climatiques de grande échelle, tout en corrigeant les distributions spatio-temporelles des défauts statistiques les plus pénalisants, ici pour la simulation hydrologique. L'étape suivante consiste à transformer ces scénarios climatiques désagrégés en scénarios hydrologiques, traduisant le fonctionnement des bassins versants (débits et niveaux des nappes phréatiques notamment). On utilise pour cela des modèles hydrologiques de bassin, qui sont d'abord calés sur les conditions actuelles, puis utilisés pour simuler le fonctionnement du bassin selon les scénarios climatiques désagrégés.

Une des principales innovations du projet RExHySS est d'aborder l'évolution des extrêmes hydrologiques, ce qui est permis par deux méthodes de désagrégation développées récemment par la communauté scientifique française. Il s'agit de la méthode des régimes de temps (Boé et al., 2006 ; Pagé et al., 2008) et de la méthode quantile-quantile (Déqué, 2007), qui permettent de rendre compte des changements de variabilité du climat de l'échelle journalière à interannuelle, en plus du changement de climat moyen.

Un autre élément méthodologique important concerne l'analyse des incertitudes. Pour appréhender les incertitudes liées à la modélisation du climat, nous avons classiquement multiplié les scénarios de changement climatique par des modèles de grande échelle. Mais nous avons aussi pris en compte les incertitudes liées aux scénarios d'émissions anthropiques, à l'horizon des projections, aux méthodes de désagrégation, et aux modèles hydrologiques, en considérant au moins deux possibilités pour chacune de ces sources d'incertitudes. Nous avons notamment comparé les réponses de 6 modèles hydrologiques différents, selon 12 scénarios climatiques désagrégés.

La variété des sources d'incertitudes considérées, qui constitue une des richesses du projet, entraîne aussi un certain nombre de difficultés, liées à la multiplicité des scénarios hydrologiques en bout de chaîne. La première vient du fait que tous les scénarios hydrologiques possibles n'ont justement pas été simulés, ce qui complique la hiérarchisation des incertitudes. Cette difficulté a été levée grâce à

une méthode d'analyse multi-variable permettant d'interpoler les croisements manquants (selon Déqué et al, 2007, à partir de Kendall et al., 1977). Par ailleurs, tous les scénarios hydrologiques simulés n'ont pas été systématiquement analysés pour ce qui relève de leurs conséquences socio-économiques, du fait du caractère exploratoire des ces études.

Une autre difficulté tient à la lourdeur de l'extraction des caractéristiques des débits extrêmes, puisque ces débits sont simulés en de nombreuses stations pour chaque scénario hydrologique. Nous avons donc sélectionné dans ce cadre des variables tout à la fois pertinentes pour la gestion et facile caractériser automatiquement sur un grand nombre de chroniques, dont le débit journalier maximal annuel de fréquence décennale $QJXA10$, et le débit mensuel minimal annuel de fréquence $QMNA5$.

RESULTATS OBTENUS

Le projet s'est organisé selon 6 volets qui sont repris dans cette synthèse. Le volet V1 est consacré à la construction et à l'analyse des scénarios climatiques désagrégés. Les impacts hydrologiques résultants ont été analysés en distinguant ce qui concerne les bilans hydriques, les régimes hydrologiques et les ressources en eau (V2) et les événements extrêmes, notamment les crues et étiages sévères (V3).

Parmi les conséquences possibles de ces changements physiques sur les systèmes socio-économiques, nous avons initialement prévu de caractériser l'évolution des crues inondantes dans les corridors fluviaux des deux bassins. Les résultats du V3 ne montrant que des changements non significatifs des crues extrêmes, nous nous sommes limités 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 maritime (V4a). Nous nous sommes davantage intéressés aux situations d'étiage et sécheresse, qui domineront la vulnérabilité des activités humaines selon les résultats du projet. Nous avons d'abord tenté d'analyser comment le changement climatique pouvait modifier l'influence des pressions anthropiques sur les débits d'étiage (V4b), et le volet V5 s'est consacré aux 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 (V6).

V1. Scénarios climatiques et régionalisation

Changement climatique dans les bassins de la Seine et de la Somme au cours du 21ème siècle

- Réponse de la température de l'air : réchauffement en moyenne annuelle (de +1.5 à +3°C en milieu de siècle et entre +2 et +4°C en fin de siècle). Pas de fortes variations saisonnières de cette réponse.
- Réponse des précipitations :
 - o baisse importante et systématique des précipitations estivales ; l'évolution des précipitations hivernales est plus faible en amplitude, et incertaine sur le signe ; les cumuls annuels montrent une tendance quasi systématique (-6% en moyenne sur tous les scénarios milieu de siècle, et -12% en moyenne sur tous les scénarios fin de siècle) ;
 - o au 21ème siècle, seul un scénario régionalisé montre une augmentation des précipitations annuelles par rapport au temps présent (scénario GM fin de siècle, augmentation faible dans le bassin de la Seine seulement) ;
 - o régime des précipitations : la baisse des précipitations se traduit par une augmentation du nombre de jours sans précipitation et une persistance plus importante des épisodes secs ; la persistance des événements pluvieux change peu ;
- Réponse de l'évapotranspiration potentielle (ETP), qui caractérise la demande évaporative : augmentation systématique, plus importante en fin de siècle (+23% en moyenne) qu'en milieu de siècle (+16% en moyenne).
- La réponse régionale du changement climatique est importante dès 2050 ; les réponses sont plus marquées en fin de siècle qu'en milieu de siècle, mais la dispersion entre les scénarios est aussi plus importante.

Résultats méthodologiques sur les méthodes de désagrégation

- Nous avons comparé trois méthodes de désagrégation. La méthode des régimes de temps (Boé et al., 2006 ; Pagé et al., 2008) et la méthode quantile-quantile (Déqué, 2007) ont été développées récemment par la communauté scientifique française et permettent d'aborder l'évolution des extrêmes hydrologiques. Ce n'est pas le cas de la méthode plus simple des anomalies, utilisée comme référence avec des études antérieures.
- De plus, deux variantes de la méthode quantile-quantile ont été comparées, selon que l'ajustement des fonctions de répartition des variables météo est effectué au pas de temps de 6h (variante par défaut) ou au pas de temps de 1 jour (variante QQ1j).
- Validité des méthodes de désagrégation en temps présent, par comparaison avec les forçages météorologiques de la base de données SAFRAN (Quintana-Sequi et al., 2008) :
 - non pertinent pour la méthode des anomalies, où le temps présent, par définition, est constitué de la base de données SAFRAN ;
 - biais faibles et des distributions des valeurs journalières réalistes pour les deux méthodes quantile-quantile et des régimes de temps, malgré une sous-estimation de la persistance des épisodes secs ;
 - la méthode quantile-quantile offre de moins bonnes distributions des précipitations journalières : précipitations nulles sous-estimées, précipitations faibles surestimées, persistance des événements pluvieux surestimée ;
 - la variante QQ1j améliore nettement la persistance des épisodes secs, mais l'influence est faible sur les épisodes pluvieux ;
 - pour des modèles hydrologiques calés à partir des forçages météorologiques SAFRAN, il est indispensable de calculer les ETP journalières comme dans cette base de données, i.e. à partir des variables météorologiques horaires (ou au pas de temps de 6h pour la méthode quantile-quantile). Les ETP calculées à partir des moyennes journalières des forçages météorologiques sont sous-estimées et entraînent une surestimation des débits.
- Influence des méthodes de régionalisation sur le changement climatique simulé : les 3 méthodes donnent des réponses similaires en fin de siècle.
- Impact des méthodes de désagrégation sur les débits simulés :
 - les débits simulés par les différents modèles hydrologiques à partir des différents scénarios désagrégés sont relativement réalistes ;
 - les scénarios quantile-quantile entraînent des débits plus importants que les scénarios désagrégés par la méthode des régimes de temps ;
 - les différences induites par les méthodes quantile-quantile et des régimes de temps sur le régime des pluies n'expliquent que 20% des différences de débit entre ces méthodes.

Analyse des incertitudes

- Pour appréhender les incertitudes liées à la modélisation du climat, nous avons classiquement multiplié les scénarios de changement climatique. Nous avons ainsi produit 20 scénarios régionalisés, caractérisés par différents modèles climatiques et scénarios d'émissions anthropiques utilisés pour les simulations du GIEC, et différentes méthodes de désagrégation.
- La plupart des changements climatiques régionaux ci-dessus sont très robustes face à la dispersion échantillonnée (au sens d'un signe de variation par rapport à l'actuel qui est systématique entre les différents scénarios). Les changements les moins robustes dans ce sens sont les précipitations hivernales (pas de cohérence des signes) et dans une moindre mesure les précipitations annuelles (une exception à la hausse).
- Les incertitudes sur le climat futur dans le projet RExHySS sont dominées par celles des modèles climatiques. Les incertitudes induites par les méthodes de désagrégation et par les scénarios d'émissions sont moindres. Les incertitudes liées à la variabilité climatique intrinsèque n'ont pas été analysées.
- Un sous-ensemble de 12 scénarios fut sélectionné pour représenter la dispersion des 20 scénarios ci-dessus dans le cadre des volets V2 et V3.

V2. Modélisation hydrologique et ressources en eau

Réponse hydrologique des bassins de la Seine et de la Somme au cours du 21^{ème} siècle

- Les changements climatiques régionaux ci-dessus entraînent un assèchement prononcé des bassins étudiés au cours du 21^{ème} siècle. Cet assèchement se traduit par :
 - une tendance à la baisse de l'évapotranspiration, qui s'accroît avec la baisse des précipitations annuelles, mais avec une dispersion assez importante y compris en signe ;
 - une baisse de la recharge des nappes, qui représente environ 30% de la recharge actuelle en fin de siècle, et 25% en milieu de siècle (voir aussi V5) ;
 - il en suit une baisse des niveaux piézométriques de ces nappes d'où une baisse du débit de base alimenté par ces nappes ;
 - la résultante est une baisse des débits, en moyenne annuelle et en toute saison (basses et hautes eaux). On note aussi un retard de 1 à 2 mois de l'hydrogramme moyen, notamment des hautes et basses eaux.
- L'essentiel de ces changements est acquis dès le milieu de siècle, avec une amplitude cependant moindre qu'en fin de siècle.
- Le signal de diminution des écoulements, débits et niveaux piézométriques est robuste, mais la dispersion est importante et l'amplitude de ces baisses est difficile à quantifier :
 - forte réduction des incertitudes en éliminant les résultats du modèle CLSM, jugé irréaliste dans sa réponse (voir ci-dessous) ;
 - on obtient alors une baisse en fin de siècle de 140 m³/s du débit moyen de la Seine à son exutoire (Poses), soit 28 % du débit moyen actuel. Les incertitudes autour de cette valeur sont d'environ 50 m³/s (soit environ 10% du débit moyen actuel) ;
 - une analyse analogue du débit de la Somme à Abbeville indique une baisse de 10 m³/s du débit moyen (soit 29 % du débit moyen actuel) avec une incertitude de 5 m³/s ;
 - la réponse des deux bassins est donc très comparable en moyenne.

Analyse des incertitudes

- Pour appréhender les incertitudes liées à la modélisation hydrologique, nous avons comparé les simulations des différents scénarios climatiques régionaux par 6 modèles hydrologiques :
 - qui couvrent les principales différences entre les grandes écoles de modélisation hydrologique ;
 - qui ont tous été testés en temps présent avec de bonnes performances.
- Le modèle CLSM a cependant été exclu des analyses d'incertitude, en raison d'un comportement jugé incorrect dans sa réponse au changement climatique. La validation d'un modèle en temps présent ne suffit donc pas à garantir une réponse réaliste sous changement climatique, même pour un modèle à bases physiques.
- 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. Ce résultat nouveau, permis la démarche du projet RExHySS, 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.
- Les incertitudes liées aux scénarios d'émission ou à l'échéance temporelle (milieu de siècle vs fin de siècle) sont beaucoup plus faibles, ce qui est cohérent avec le fait que l'essentiel des impacts est acquis dès le milieu de siècle.
- Une des difficultés de cette attribution des sources d'incertitudes vient du fait que nous n'avons pas croisé tous les facteurs : seul un modèle climatique a été forcé par les deux scénarios d'émissions anthropiques (A2 et A1B) ; seul un scénario a été régionalisé par les 3 méthodes de désagrégation, et les différents scénarios climatiques désagrégés n'ont pas été simulés par tous les modèles hydrologiques. Des résultats convergents ont été obtenus par deux méthodes d'analyse : une méthode basique reposant sur moyennes et écarts-types, et une méthode plus sophistiquée, qui commence par interpoler les valeurs des croisements manquants (selon Déqué et al., 2007, à partir de Kendall et al., 1977).

Volet 3. Analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes

Réponse des extrêmes hydrologiques des bassins de la Seine et de la Somme

- L'étude des valeurs extrêmes du débit a été ciblée sur :
 - le $QMNA5$ pour les étiages, i.e. le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale
 - la proportion de jours dans l'année avec un débit supérieur au $QMNA5$, qui caractérise la fiabilité, et dont l'inverse définit les périodes de défaillances ;
 - le $QJXA10$ pour les crues, i.e. le débit journalier maximal annuel de fréquence décennale
 - une durée caractéristique des crues.
- Les modèles hydrologiques représentent de manière acceptable les extrêmes actuels du débit, qu'ils soient forcés par des données météorologiques issues des analyses SAFRAN ou simulées (scénarios régionalisés Temps présent).
- Dans les deux bassins, la réponse au changement climatique des valeurs extrêmes du débit est un peu plus contrastée que celle de l'hydrogramme moyen, puisque les $QMNA5$ baisseraient fortement, alors que les $QJXA10$ ne changeraient pas significativement.
- En fin de siècle, le quantile $QMNA5$ pourrait diminuer de 40% sous scénario A1B et de plus de 50% sous scénario A2 (estimations médianes établies à l'échelle régionale tous modèles hydrologiques confondus exceptés CLSM). Cette réduction est supérieure aux incertitudes pesant sur ce quantile (entre -20 et +20%, médianes des écarts relatifs entre borne de l'intervalle de confiance et valeur centrale sous climat présent sur l'ensemble des stations exploitées).
- L'analyse des étiages en termes de défaillance montre que la durée des séquences de débits faibles au dessous du $QMNA5$ actuel (souvent pris par défaut comme seuil d'alerte sécheresse) est augmentée de manière significative. Les crises à gérer et restrictions d'usage aujourd'hui rares seraient donc plus fréquentes.
- Les quantiles de crue sont peu modifiés sous changement climatique, de même que la durée caractéristique des crues. Les $QJXA10$ évoluent entre -10 et +10% en milieu de siècle. A titre de comparaison, l'intervalle de confiance à 95% en relatif autour du $QJXA10$ actuel est entre -12 et +25% de la valeur centrale du seul fait des fluctuations d'échantillonnage (valeurs médianes des bornes de l'intervalle de confiance sur les stations exploitées) ; les évolutions sont donc inférieures ou équivalentes à l'incertitude actuelle. En fin de siècle, les stations montrent des $QJXA10$ qui évoluent entre -20 et +10%.
- La spatialisation des résultats fait apparaître des évolutions différenciées selon les secteurs pour les caractéristiques d'étiage. On retrouve notamment une organisation concentrique qui rappelle les structures géologiques du bassin parisien.
- L'analyse des extrêmes des niveaux piézométriques sur le bassin de la Somme montre une forte diminution des hauteurs de nappe. L'examen repose sur les courbes des hauteurs classées. Nous avons examiné les évolutions des centiles Q05 et Q95, i.e. les hauteurs dépassées respectivement 5% et 95% du temps. On attendrait une diminution moyenne de l'ordre de -4 m pour Q05 et de l'ordre de -2.5 m pour Q95.

Résultats méthodologiques sur l'analyse des extrêmes

- La simulation des extrêmes dépend de la structure du modèle hydrologique et du choix de caler sur les débits observés ou naturalisés.
- L'analyse de l'évolution transitoire des extrêmes du débit a été testée pour le scénario continu de 150 ans, sur les débits de la Seine à Paris et de la Somme à Abbeville, à l'aide de fenêtres glissantes de 20 ans. Cette analyse suggère que l'essentiel de l'évolution des $QMNA5$ se joue entre 2000 et 2050.
- Les séries chronologiques de hauteurs piézométriques ont la particularité d'être fortement auto-corrélées dans le temps. Les valeurs extraites – y compris les maxima ou minima annuels – sont donc peu adaptées à un traitement statistique classique car elles ne répondent pas à la propriété souhaitée d'indépendance. Nous avons donc choisi de caractériser la piézométrie par des quantiles des courbes des hauteurs classées.

V4a. Inondations de la Somme aval

- Etant donné le faible impact du changement climatique sur les crues extrêmes (révélé par les *QJXA10* ci-dessus), nous nous attachés à évaluer les conséquences sur les inondations de la Somme d'un autre impact du changement climatique, celui de l'élévation du niveau marin.
- La dynamique et l'extension des inondations ont été simulées par le modèle hydraulique de la Somme CARIMA-1D à casiers (SOGREAH, 2005). Ce modèle tient compte du réaménagement de la vallée de la Somme et de ses ouvrages hydrauliques, dont l'écluse de Saint-Valéry-sur-Somme, qui a eu lieu suite à la crue de 2001.
- L'influence de l'élévation du niveau marin est évaluée sur la base des conditions hydrologiques des crues de 2001 (centennale) et de 1994 (décennale) pour deux hypothèses d'élévation basées sur les résultats du GIEC à l'échelle globale : +0,21 m (hypothèse optimiste) et +0,51 m (hypothèse pessimiste).
- L'élévation du niveau marin, en modifiant le fonctionnement de l'écluse de Saint-Valéry, entraîne des inondations plus importantes, notamment à Abbeville, que celles que l'on aurait actuellement pour les mêmes débits de la Somme.
- Compte tenu de l'ampleur des actions menées suite à 2001 en matière de réaménagement des ouvrages hydrauliques dans la vallée de la Somme, l'élévation du niveau marin ne devrait en aucun cas provoquer des inondations aussi importantes que celles constatées en 2001 si une crue comparable venait à survenir une nouvelle fois à la fin du 21^{ème} siècle.

V4b. Consommations anthropiques et débits influencés

- On parle de défaillance des débits d'étiage quand la faiblesse des débits menace l'équilibre des différents usages de l'eau. Ces défaillances sont classiquement caractérisée par la baisse des débits sous un seuil critique (souvent le *QMNA5*). Ce volet s'intéresse à l'impact du changement climatique sur les défaillances des débits anthropisés, en combinant ses influences indirectes sur certaines pressions anthropiques à son influence directe sur les débits et ressources en eau souterraines (V2 et V3).
- Cette étude s'appuie sur la méthodologie développée sur le territoire de l'Agence de l'Eau Seine Normandie dans le cadre de l'étude du bilan prospectif « besoins-ressources » des eaux superficielles (Maurel et al., 2008). Cette approche a été modifiée dans le but de tenir compte du contexte de changement climatique. Elle se décompose en deux étapes :
 - Constitution de chronique de débits « anthropisés » à partir des débits « non influencés » simulés dans le volet 2 par le modèle hydrogéologique MODCOU. Ces débits anthropisés reconstitués prennent en compte les prélèvements souterrains et superficiels et l'impact de la gestion des barrages réservoirs. L'impact des prélèvements dans les nappes dépend de la recharge annuelle estimée par le modèle MODCOU avec les scénarios climatiques.
 - Calcul d'indicateur caractérisant les situations de défaillance (caractérisées à partir du nombre de jours annuels passés sous le *QMNA5* actuel) pour les situations présentes et futures en certains points à enjeux du réseau hydrographique.
- Nous avons retenu les débits simulés sous deux scénarios milieu de siècle, qui sont assez représentatifs des évolutions possibles des précipitations à cet horizon, que nous avons préféré à l'horizon fin de siècle pour rester le plus cohérent possible avec l'absence d'évolution de certaines influences anthropiques.
- Les débits anthropisés correspondant indiquent des situations de défaillance plus longues et plus fréquentes pour la plupart des stations en milieu de siècle. En moyenne sur l'ensemble des stations, le nombre de jours moyens annuels passés sous les débits seuil augmente de 75% à 125% et la durée des épisodes de défaillance augmente de 35% à 50%. Notons que localement, l'Oise et l'Aisne, et par conséquent la Seine à Poissy à l'aval de la confluence sont les plus touchées par le changement climatique, comparativement à la situation temps présent.
- La démarche ne permet cependant pas de séparer quelle part de cette augmentation des défaillances est attribuable à la baisse des débits, et quelle part est attribuable aux pressions anthropiques.

V5. Irrigation et ressources en eau souterraines

- Cette étude a été menée dans le bassin de la Seine, avec une analyse plus approfondie en Beauce, qui est une des régions les plus irriguées à l'heure actuelle en Europe, et où les prélèvements sont déjà limités par arrêté préfectoral pour protéger la ressource en eau.
- Le modèle agronomique STICS simule des doses d'irrigation assez réalistes dans les régions irriguées, mais il est insuffisant pour prédire les zones effectivement irriguées, qui ne couvrent actuellement que 2.7% de la surface agricole utile. Les irrigations potentielles simulées par STICS sous changement climatique ne peuvent donc pas être utilisées comme une image de l'irrigation future.
- L'augmentation relative des doses potentielles d'irrigation simulées par STICS, de 50 à 60% selon les deux scénarios de changement climatique examinés, peut néanmoins être utilisée pour modifier l'irrigation actuelle, sous l'hypothèse que les systèmes de cultures restent inchangés.
- Ces besoins supplémentaires pour l'irrigation viendront s'ajouter aux importants déficits d'alimentation des nappes aquifères sous changement climatique, et intensifieront la baisse des niveaux des nappes.
- Ces déficits de recharge dus au seul changement climatique sont en moyenne de 2200 Mm³/s en milieu de siècle et 2700 Mm³/s en fin de siècle sur l'ensemble des aquifères du bassin de la Seine (selon le modèle hydrogéologique MODCOU). Ils sont statistiquement significatifs et représentent environ 30% de la recharge actuelle des formations aquifères. Ils représentent aussi le double environ des prélèvements annuels actuellement effectués en nappe dans le bassin de la Seine.
- A l'échelle de la Beauce, l'intensification de l'irrigation due au changement climatique a un impact nettement plus faible sur les ressources en eau souterraines que la baisse de la recharge. Cet impact direct du changement climatique est à lui seul susceptible de remettre en question la viabilité future de l'irrigation des grandes cultures telle que nous la connaissons actuellement, en regard des autres usages de l'eau.

V6. Transfert aux gestionnaires

- Un atelier destiné aux acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau dans les bassins de la Seine et de la Somme a été organisé le 27 Novembre 2008. Il s'agissait d'établir un dialogue entre scientifiques et gestionnaires qui permette d'initier une expertise socio-économique de la modification des extrêmes hydrologiques et l'élaboration de stratégies d'adaptation.
- Une grande partie des discussions a porté les incertitudes liées aux différents stades de la modélisation, à savoir l'élaboration des scénarios climatiques et les simulations hydrologiques. Ces incertitudes rendent la communication des résultats délicate, mais l'ensemble des gestionnaires présents juge cette communication indispensable.
- Propositions pour améliorer cette communication :
 - valorisation des résultats du programme GICC par le MEEDDM
 - formation permanente sur le sujet
 - diffusion de résultats ciblés, comme des chroniques de débit, avec mode d'emploi
- Perspectives scientifiques intéressantes selon les gestionnaires :
 - impact du changement climatique sur la qualité des milieux aquatiques
 - projets plus ciblés sur l'impact du changement climatique sur les pratiques agricoles, pour apporter des réponses plus locales sur les possibles politiques d'adaptation
 - impact du changement climatique sur l'alimentation en eau potable
 - comparaison avec d'autres études d'impact hydrologique à l'échelle régionale
- Implications opérationnelles des changements présentés :
 - La baisse des débits aura un impact évident sur la politique d'investissement des agences de l'eau
 - Le soutien des hauteurs d'eau dans les canaux pourra-t-il être assuré ?
 - La politique d'aménagement du territoire sur la construction de retenues devra être reconsidérée
 - Les règles de dimensionnement d'ouvrages sont basées sur des valeurs caractéristiques de débits considérées comme fixes, il est donc nécessaire de repenser ces règles et éventuellement de modifier les valeurs caractéristiques dès à présent.

- Politique d'adaptation :
 - Compte tenu des nombreuses implications opérationnelles de l'impact hydrologique du changement climatique, les conflits d'usage sont potentiellement nombreux, et une hiérarchisation des besoins sera nécessaire.
 - La réglementation et la gestion des usages de l'eau devra nécessairement évoluer : la réglementation actuelle est basée sur des variables considérées comme fixes (par exemple le *QMNA5*). Ces seuils devraient être revus en fonction des résultats. Les gestionnaires pourraient avoir ce rôle de déterminer la démarche à suivre, en modifiant les valeurs des seuils actuels et/ou en modifiant les restrictions actuelles. Ces négociations d'usage locales existent déjà localement et devraient donc se généraliser.
 - Sur la question des possibilités d'irrigation dans le futur, il existe des techniques agricoles permettant de réduire la consommation d'eau. Il est possible que les pratiques et les types de culture évoluent spontanément en fonction du climat.

IMPLICATIONS PRATIQUES

La principale vulnérabilité des bassins hydrologiques de la Seine et de la Somme mise en évidence par le projet concerne les périodes de basses eaux, avec une baisse de débits d'étiages, et une augmentation de la fréquence et de la durée des étiages sévères. Ce résultat est associé à une baisse générale des niveaux piézométriques dans les nappes aquifères.

Ce résultat très robuste correspond à une baisse des ressources en eau à la période où elles sont le plus sollicitées. Il a donc de nombreuses implications pratiques pour la gestion sectorielle des eaux, car il s'accompagnera probablement d'une augmentation des conflits d'usages, d'autant plus si la tendance actuelle à une augmentation des prélèvements anthropiques se poursuit.

Les secteurs potentiellement concernés par la baisse des niveaux piézométriques et des débits d'étiages sont :

- le secteur agricole, via l'irrigation. Nous avons montré dans le cas particulier de la Beauce que le changement climatique augmentera vraisemblablement la demande potentielle en irrigation (sauf adaptation possible des variétés et/ou pratiques agricoles), mais que la baisse de la recharge et donc du niveau des nappes y est telle qu'elle remet à elle seule en question la viabilité de l'irrigation de cette région dans le futur ;
- les zones humides, dont certaines présentent déjà un risque élevé de dégradation par déficit d'alimentation des nappes, comme celles qui accompagnent certains petits cours d'eau de la Beauce (Verjus, 2008) ;
- les industries dépendantes des ressources en eau : navigation, alimentation en eau potable, production d'électricité, industries utilisant les cours d'eau pour diluer leurs rejets polluants (ceux-ci seront plus concentrés si les débits sont réduits) ;
- le secteur du bâtiment et des infrastructures peut aussi se retrouver impacté à cause de problèmes de stabilité de terrain suite à la baisse des niveaux piézométriques (et de la diminution de l'humidité des sols qui l'accompagne).

Une autre conclusion importante du projet est 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 l'entachent, comme discuté ci-dessous.

RECOMMANDATIONS ET LIMITES EVENTUELLES

Les résultats du projet RExHySS se limitent à l'impact direct du changement climatique anthropique sur le régime hydrologique, et négligent les autres facteurs d'évolution possibles, comme les changements d'occupation des terres ou d'aménagement / gestion des cours d'eau. L'étude des interactions entre les impacts hydrologiques directs et les activités humaines ne fut qu'ébauchée (volet V4b), mais elle constitue une perspective importante dès que l'on s'intéresse aux possibles politiques d'adaptation et de mitigation.

Dans ce cadre, une question essentielle est celle de la confiance que l'on peut accorder aux résultats de modélisation. Cette notion dépasse les réponses fournies par l'analyse des incertitudes, car il est

impossible de couvrir ces dernières de manière exhaustive, même en multipliant les sources d'incertitudes prises en compte comme dans le projet RexHySS.

La réponse des hautes eaux reste très incertaine, au point que même son signe n'est pas certain. Notre étude se caractérise par une réponse de faible amplitude des crues, mais d'autres études montrent des 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 crue est étroitement liée à la réponse de précipitations annuelles, avec une forte sensibilité (des variations faibles des précipitations entraînant des variations plus importantes des débits).

Les précipitations constituent de fait une des variables les plus difficiles à simuler pour les modèles climatiques, et la dispersion des projections est importante, à quoi se rajoute une dispersion liée aux méthodes de désagrégation. L'incertitude totale reste pour l'instant importante, et interdit d'utiliser les projections hydrologiques comme « prévision ». Néanmoins, la baisse des précipitations annuelles que nous anticipons dans les bassins de la Seine et de la Somme représente la meilleure projection actuellement disponible, car convergente pour de nombreux scénarios de changement climatique correspondant à l'état de l'art (IPCC, 2007), et pour deux méthodes de désagrégation différentes mais validées en climat récent sur le domaine.

La baisse des débits d'étiages est au contraire très robuste, ce qui confère une grande confiance sur ce résultat. Ceci résulte du réchauffement et de l'augmentation associée de la demande évaporative, qui atténue la dispersion liée aux seules précipitations. Le signe de la réponse des étiages est donc très probable, et peut à ce titre être exploité dans des études « aval » ; e.g. impacts sur d'autres systèmes (température de l'eau, écosystèmes, gestion hydraulique, irrigation, etc), pouvant aller jusqu'à la réflexion sur des mesures d'adaptation. L'incertitude générale sur les précipitations limite en revanche la portée de l'amplitude projetée de cette baisse.

Dans ce contexte, deux types de recommandations peuvent être tirées de ce projet, comme l'a bien fait ressortir le volet V6 de dialogue avec les gestionnaires :

- Le premier concerne la diffusion aux gestionnaires de l'information scientifique sur les impacts du changement climatique. Cette diffusion est indispensable, et doit permettre de comprendre la question délicate des incertitudes. S'il incombe aux scientifiques d'être pédagogiques mais rigoureux sur ce point, les participants de l'atelier du volet V6 ont souligné le rôle essentiel que peut jouer le MEEDDM et le programme GICC, vu leur position d'interface entre le monde de la gestion du territoire et celui de la recherche. Cette action pourrait se traduire par l'organisation d'un nouvel atelier, qui rendrait compte des résultats finaux du projet RExHySS mais serait surtout élargi à d'autres bassins versants français (voire européens). Le besoin de formation permanente sur le sujet a aussi été souligné.
- Les autres recommandations 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 usages de l'eau qui en résulterait, la première recommandation consiste en une évaluation hiérarchisée des besoins en eau pour les différents usages, et la seconde concerne la révision des seuils utilisés pour la gestion, comme le *QMNA5* pour l'alerte sécheresse. Les gestionnaires doivent être au cœur de cette démarche, qu'on peut voir comme une généralisation des démarches initiées dans le cadre de Directive Cadre sur l'Eau (e.g. Verjus, 2008).

REALISATIONS PRATIQUES ET VALORISATION

Diffusion des résultats auprès de différentes communautés (scientifiques, décideurs, surtout publics), comme détaillé dans les pages suivantes. Les résultats du projet RExHySS ont notamment été un élément important de la synthèse sur les impacts potentiels du changement climatique sur l'estuaire de la Seine, organisée par le GIP Seine-Aval pour préparer un prochain appel d'offre sur le sujet.

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETES, ENVISAGES

La démarche RExHySS a été retenue pour le programme de recherche « Initiative ligérienne d'adaptation au changement climatique » du Plan Loire Grandeur Nature 2007-2013, dans lequel s'inscrit le projet ICC-HYDROQUAL, coordonné par F. Moatar (Tours), et auquel participent des partenaires de RExHySS (Sisyphé, BRGM, Cemagref).

De nombreux points communs existent aussi avec le projet ANR VULNAR ciblé sur la plaine du Rhin, coordonné par P. Ackerer (Strasbourg) et auquel participent Armines, Sisyphé et le CNRM.

Enfin, le projet Imagine2030, coordonné par E. Sauquet du Cemagref dans le cadre du programme RDT du MEEDDAT, a suivi sur la Garonne une démarche d'analyse de l'évolution des extrêmes de débit sous changement climatique similaire à celle de RexHySS.

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES REFERENCES)

Boé J (2007). [Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France](#), Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 256 pp + annexes.

GIEC, 2007. [Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC](#) [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de)]. Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, Genève, Suisse, 103 pp.

Terray L & Braconnot P, 2007. [Livre blanc ESCRIME - Etude des Simulations Climatiques réalisées par l'IPSL et Météo-France](#), 70 pp.

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT

Publications scientifiques à paraître

Ducharne A et l'équipe RExHySS (2009). Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme, Encadré + Annexe dans le rapport "Ecosystèmes et événements extrêmes" de l'Académie des Sciences, Ed. H. Décamps, in press.

Publications scientifiques prévues

Nous n'avons pour l'instant pas commencé à produire d'article scientifique à partir des résultats du projet RExHySS, qui forment un tout qui ne fut finalisé que récemment. C'est une tâche à laquelle nous allons pouvoir nous attacher à présent, très probablement sous la forme d'un numéro spécial dans une revue scientifique (e.g. Comptes-Rendus de Géosciences, Journal of Hydrology, Physics and Chemistry of the Earth, Hydrological and Earth System Science), qui pourrait contenir une dizaine d'articles (Project overview ; articles correspondants aux volets 1, 2 et 3 ; article sur l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les inondations de la Somme ; article sur l'irrigation en Beauce ; article sur la validation des modèles hydrologiques ; articles invités ciblés sur d'autres bassins en France ou en Europe).

Colloques

Ducharne A, Sauquet E, Habets F, Déqué M, Gascoin S, Hachour A, Martin E, Oudin L, Pagé C, Terray L, Thiéry D, Viennot P. Evolution potentielle du régime des crues de la Seine sous changement climatique. Soumis pour le colloque SHF « Risques d'inondations en Ile de France, 100 ans après les crues de 1910 », SHF, Mars 2010 (Paris, France).

Ducharne A, 2009. Evolution de l'hydrologie continentale au 21ème siècle. Grandes tendances en France. Séminaire "Changement climatique, impacts sur les milieux aquatiques et conséquences pour la gestion", ONEMA et Programme GICC, Juin 2009 (Paris, France)

Pagé C, Boé J, Terray L., Habets F, Ducharne A, Thiéry D, Martin E, 2009. Impacts of climate change on the hydrological cycle - Application to France river basins. Climate Change: Global Risks, Challenges & Decisions, March 2009, Copenhague (Denmark).

Willems P, Ducharne A, Viennot P, Baguis P, Verwaest T, 2008. Impact of climate change on hydrological and hydraulic extremes along the Scheldt and Seine river basins and along the Northern Sea coast. Water and Climate Change Congress, October 2008 (Antwerp, Belgium).

Ducharne A, 2008. Evolution hydro-climatique du bassin de la Seine : quelles hypothèses pour l'analyse des impacts du changement climatique sur l'estuaire ? Atelier de démarrage du projet « expertise collective sur les effets du changement climatique sur l'estuaire de Seine dans le cadre des changements globaux » du GIS Seine-Aval, Juin 2008, Rouen (France).

Pagé C, Boé J, Terray L, Habets F, Martin E, 2008. Impact of climate change on France watersheds in 2050: a comparison of dynamical and multivariate statistical methodologies. 42nd CMOS Congress, 25-29 May 2008, Kelowna, British Columbia, Canada.

Ducharne A, 2008. Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme (RExHySS), Colloque de restitution du programme GICC, Mai 2008, Paris (France).

Habets H, Boé J, Déqué M, Quintana-Segui P, Terray L, Martin E, Viennot P, Boudhraa H, Ducharne A, 2008. Impact du changement climatique sur l'hydrogéologie du bassin de la Seine, Réunion des Sciences de la Terre, Avril 2008, Nancy (France).

Ducharne A, 2007. Changement climatique et ressources en eau dans le bassin de la Seine, Séminaire GMES-France 2007, L'information pour l'adaptation au changement climatique : Besoins des utilisateurs et priorités nationales, Décembre 2007 (La Défense, France).

Thèses (liées au projet RExHySS mais non financées par ce projet)

Julien Boé (2007). Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 256 pp + annexes.

Simon Gascoin (2009). Etude des paramétrisations hydrologiques d'un modèle de surface continentale: importance des aquifères et des premiers centimètres du sol, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 236 pp.

Articles de valorisation-Vulgarisation : Aucun

Autres actions vers les médias : Aucun

Enseignement – Formation

A. Ducharne : cours de 1h30, module Changement Climatique à l'ENGREF (2006-2007, 2007-2008).

Expertises

Mise en place du programme de recherche « Initiative ligérienne d'adaptation au changement climatique » du Plan Loire Grandeur Nature 2007-2013: E. Martin, L. Terray, C. Pagé.

Les effets du changement climatique dans le contexte des changements globaux. Expertise collective sur l'estuaire de Seine, 2008-2009, GIS Seine-Aval : A. Ducharne.

Méthodologies (guides, etc.)

Pagé C, Terray L, Boé J, 2008. Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle: les scénarii SCRATCH08, Technical Report TR/CMGC/08/64, CERFACS, Toulouse, France, 23 pp.

Autres – Site Web

Comme prévu dans le cadre du projet, un site Web a été mis en place pour la valorisation et l'animation du projet : <http://www.sisyphe.jussieu.fr/~agnes/rexhyss>. Ce site est administré par Agnès Ducharne, responsable scientifique du projet, et hébergé par le serveur de l'UMR Sisyphe, à l'UPMC.

Autres – Séminaires auprès d'experts et gestionnaires

Habets F, et al., 2009. Utilisation des scénarios climatiques régionalisés pour l'hydrologie : exemple récent des projets GICC-RExHySS et ACI-Cyprim. Atelier du projet GICC DRIAS, 21/09/2009 (La Défense, France).

Ducharne A, 2008. Impacts du changement climatique sur les régimes hydrologiques : quelle démarche pour quels résultats ? Séminaire au CGEDD, 03/12/2008 (MEEDDAT, La Défense, France).

Ducharne A, 2008. Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme (RExHySS). Séminaire devant le groupe "Ecosystèmes et événements climatiques extrêmes" de l'Académie des Sciences, Octobre 2008, (Paris, France).

Ducharne A, 2008. Le projet RExHySS. Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologique dans les bassins de la Seine et la Somme. Séminaire devant le Groupe de Travail RNACC (Risques Naturels, Assurances et Adaptation au Changement Climatique), Sous-groupe « Inondations », 18/06/2008 (MEEDDAT, Paris).

Martin E, Ducharne A, et al., 2008. Le projet RExHySS. Table ronde sur le choix de scénarios climatiques sur le bassin de la Loire. Paris, 30/04/2008.

Autres – Atelier organisé dans le cadre du projet RExHySS avec les gestionnaires des bassins

Une action de valorisation originale, prévue dès le départ du projet, fut la diffusion de nos résultats aux acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau dans les bassins versants étudiés, au cours d'un atelier organisé le 27 novembre 2008 à Paris.

RÉSUMÉS

En français

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 deux soumis à un climat océanique, avec une influence régulatrice des nappes souterraines sur les débits.

Nous avons commencé par construire des scénarios du changement climatique dans ces bassins à partir des projections de plusieurs modèles climatiques de grande échelle. Pour régionaliser ces scénarios, nous avons bénéficié de deux méthodes de désagrégation développées récemment par la communauté scientifique française (méthodes quantile-quantile et des régimes de temps). Elles permettent de rendre compte des changements de variabilité du climat de l'échelle journalière à interannuelle et d'aborder ainsi l'évolution des extrêmes hydrologiques. Les scénarios régionalisés sur les deux bassins s'accordent sur un réchauffement au cours du 21^{ème} siècle qui s'accompagne d'une baisse importante des précipitations estivales. Si le signe d'évolution des précipitations hivernales n'est pas certain, les cumuls annuels baissent d'ici à 2100, de 11% en moyenne sur l'ensemble des scénarios considérés.

Ces scénarios désagrégés ont été interprétés par 6 modèles hydrologiques qui indiquent tous 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. 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. Les incertitudes les plus faibles sont associées à l'horizon temporel des scénarios climatiques et aux scénarios d'émission, ce qui est cohérent avec le fait que l'essentiel des impacts est acquis dès le milieu de siècle.

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 contrastée. 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 (souvent pris par défaut comme seuil d'alerte sécheresse) augmenterait. Au contraire, les crues extrêmes, identifiées par les quantiles décennaux *QJXA10*, ne changeraient pas significativement. Nous avons aussi montré que l'élévation du niveau marin due au changement climatique en fin de siècle entraînerait des inondations plus importantes de la Somme aval, notamment à Abbeville. En revanche, compte tenu des réaménagements des ouvrages hydrauliques suite à la crue de 2001, cette élévation du niveau marin ne devrait en aucun cas provoquer des inondations aussi importantes que celles de 2001 si une crue comparable venait à survenir une nouvelle fois à la fin du 21^{ème} siècle.

Au vu de ces résultats, les conséquences socio-économiques seront donc probablement dominées par l'intensification des étiages et sécheresses, qui menace l'équilibre des différents usages de l'eau. Un secteur particulièrement sensible est celui de l'agriculture irriguée, que nous avons étudié dans le bassin de la Seine à l'aide d'un modèle hydrogéologique et d'un modèle agronomique. En supposant que les systèmes de cultures restent inchangés, les besoins potentiels d'irrigation pourraient augmenter de 50 à 60% sous l'effet du changement climatique. Cet effet s'ajoutera au déficit de recharge des nappes, qui attendrait en fin de siècle 30% de la recharge actuelle, soit le double des prélèvements annuels actuellement effectués dans l'ensemble des nappes du bassin de la Seine. Ces deux effets concourent à la baisse des nappes et des débits, mais à l'échelle de la Beauce, nous avons montré que l'intensification de l'irrigation influence nettement moins les ressources en eau souterraines que la baisse de la recharge. Cet impact direct du changement climatique est à lui seul susceptible de remettre en question la viabilité future de l'irrigation des grandes cultures telle que nous la connaissons actuellement, en regard des autres usages de l'eau.

Mots-clés : Impacts hydrologiques, désagrégation statistique, événements extrêmes, inondations, étiages, irrigation, impacts socio-économiques, incertitudes.

En anglais

Keywords: Modelling, statistical downscaling, climate variability, hydrological impacts, extreme events, flooding, irrigation, socio-economic impacts.

RAPPORT SCIENTIFIQUE

I. INTRODUCTION

L'objectif de ce projet est de modéliser l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins versants de la Seine (78600 km²) et de la Somme (7400 km²). Ces bassins contigus sont tous deux soumis à un climat océanique, très influencé par la dynamique de grande échelle, et leurs débits sont largement tamponnés par les nappes souterraines.

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 anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols) pour le 21^{ème} siècle. Une étape importante est celle de la régionalisation de ces scénarios climatiques de grande échelle (Von Storch, 1995). On parle aussi de désagrégation ou de descente d'échelle. Il s'agit d'introduire les hétérogénéités spatiales non résolues par les modèles climatiques de grande échelle, tout en corrigeant les distributions spatio-temporelles des défauts statistiques les plus pénalisants, ici pour la simulation hydrologique. Le volet V1 présente les méthodes de désagrégation retenues pour le projet, notamment deux méthodes développées récemment par la communauté scientifique française qui permettent d'aborder l'impact du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques (crues, étiages) en plus des ressources en eau, ce qui constitue une des innovations majeures du projet RExHySS. Le volet V1 présente aussi les différents scénarios de grande échelle désagrégés, la validation des scénarios désagrégés de temps présent, et le changement climatique caractérisé par l'ensemble des scénarios climatiques désagrégés.

L'étape suivante consiste alors à transformer ces estimations climatiques (dont températures atmosphériques, ETP¹ et précipitations) en grandeurs caractéristiques du fonctionnement hydrologique des bassins versants (débits et niveaux des nappes phréatiques). On utilise pour cela des modèles hydrologiques de bassin, qui sont d'abord calés sur les conditions actuelles, puis utilisés pour simuler le fonctionnement du bassin selon les scénarios climatiques désagrégés construits en V1. Les impacts hydrologiques du changement climatique ainsi représentés sont détaillés en distinguant ce qui concerne les bilans hydriques, les régimes hydrologiques et les ressources en eau (V2) et les événements extrêmes, notamment les crues et étiages sévères (V3).

Après avoir analysé les impacts potentiels du changement climatique sur la composante physique des hydrosystèmes (climat, hydrologie), nous nous sommes intéressés aux conséquences possibles de ces changements physiques sur les systèmes socio-économiques, en nous concentrant sur des secteurs particulièrement sensibles aux extrêmes hydrologiques. Au départ du projet, nous avons notamment prévu de caractériser l'évolution des crues inondantes dans les corridors fluviaux des deux bassins. Les résultats du V3 ne montrant que des changements non significatifs de ces crues extrêmes, nous nous sommes limités 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 maritime (V4a). Nous nous sommes davantage intéressés aux situations d'étiage et sécheresse. Nous avons d'abord tenté d'analyser comment le changement climatique pouvait modifier l'influence des pressions anthropiques sur les débits d'étiage (V4b). Une analyse plus approfondie sur l'irrigation (V5) a permis d'évaluer l'évolution des besoins potentiels moyens en irrigation sous changement climatique et leur impact sur les ressources en eau de la Beauce, qui est une des régions les plus irriguées à l'heure actuelle en Europe (EEA, 2009). Le dernier volet du projet visait à diffuser nos résultats aux acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau dans les bassins versants étudiés, pour initier une réflexion sur des stratégies d'adaptation au changement climatique (V6).

Vu l'envergure de ce projet, ce rapport scientifique n'est qu'une synthèse des nombreux résultats obtenus, qui sont présentés de manière plus exhaustive en annexe de ce document, selon la même organisation en volets.

¹ Evapotranspiration potentielle

II. IMPACTS PHYSIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

V1. Scénarios climatiques et régionalisation

Partenaires impliqués : CERFACS, CNRM, Sisyphe

1. Problématique

L'objectif principal du volet V1 était de fournir un ensemble de scénarios climatiques pour le 21^{ème} siècle, désagrégés dans les bassins versants de la Seine et de la Somme, afin d'y quantifier l'impact hydrologique du changement climatique et les incertitudes liées au climat, y compris sur les extrêmes hydrologiques.

Trois méthodes de désagrégation très différentes ont été implémentées et appliquées dans le cadre du projet RExHySS. Elles appartiennent aux deux grandes familles des techniques de désagrégation, statistique et dynamique (Mearns et al. 1994). Il faut également souligner que ces méthodes ne sont pas uniquement des méthodes de désagrégation mais qu'elles ont toutes une fonction de débiaisage des scénarios climatiques. Remarquons aussi que les hypothèses de stationnarité sous-jacentes aux méthodes statistique et dynamique sont différentes. Les méthodes de désagrégation statistique supposent l'invariance de la liaison grande échelle – petite échelle, qui est une propriété intrinsèque de l'atmosphère, tandis que l'approche dynamique suppose l'invariance des erreurs systématique du modèle climatique (qui peuvent varier d'un modèle à l'autre). En effet, certains des biais des modèles globaux subsistent au sein des modèles régionaux (Déqué et al. 2007). Il est donc nécessaire de corriger les données simulées par désagrégation dynamique avant leur utilisation pour les études d'impact (Déqué 2007). Les méthodes de correction sont basées sur une fonction de transfert entre les données observées et simulées et font également appel à une hypothèse de stationnarité.

Si l'on s'intéresse spécifiquement aux impacts hydrologiques du changement climatique d'origine anthropique sur l'Europe de l'ouest et la France en particulier, on va chercher avec ces méthodes à représenter le mieux possible les modifications éventuelles des régimes pluviométriques en réponse au signal du changement climatique. La question essentielle est alors celle de la capacité des modèles et des méthodes de descente d'échelle à simuler ce signal et les précipitations associées aux échelles régionales et locales.

2. Les scénarios et méthodes de désagrégation utilisées dans RExHySS

2.1 *Les méthodes de désagrégation*

Méthode des anomalies

La méthode des anomalies ou des perturbations mensuelles (Xu, 1999) constitue le « degré 0 » des méthodes de désagrégation statistique. Pour chaque variable climatique, des perturbations sont calculées mensuellement, comme le rapport (ou la différence dans le cas de la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous changement climatique et pour le temps présent, pris comme référence. Ces perturbations mensuelles servent à modifier les séries actuelles observées, en étant appliquées uniformément à tous les pas de temps du mois considéré. Cette stratégie ne rend compte que du changement de climat moyen, et préserve dans les scénarios de climat perturbé la variabilité du climat actuel aux échelles qui ne sont pas celles du mois (journalières et interannuelle notamment). Sa limitation principale est donc qu'elle ne permet pas de rendre compte des changements possibles de la fonction de distribution des variables climatiques à l'échelle journalière. Elle ne considère pas non plus les modifications éventuelles de la variabilité interannuelle. C'est une méthode qui a été très appliquée jusqu'à aujourd'hui, notamment dans le cadre des projets GICC-Rhône (Leblois et al., 2005) et GICC-Seine (Ducharne et al., 2007).

Désagrégation dynamique et débiaisage par la méthode quantile-quantile

La désagrégation dynamique consiste à utiliser des modèles atmosphériques à haute résolution (20-50 km) forcés par des conditions aux limites (atmosphériques et/ou océaniques) provenant des réanalyses et/ou des observations pour le climat actuel, et de modèles climatiques couplés globaux pour le climat

futur. Le modèle global à résolution variable utilisé dans le projet RExHySS est le modèle ARPEGE-VR (Gibelin et Déqué, 2003), selon deux versions différentes, les versions 3 et 4 à une résolution de 60 et 50 km respectivement sur le domaine d'étude.

Les erreurs systématiques des modèles climatiques, y compris à haute résolution, imposent une étape de correction. La technique de correction associée à la désagrégation dynamique dans RExHySS est dite quantile-quantile. L'idée est simplement de corriger les variables simulées par les modèles climatiques à l'aide d'une fonction de correction, construite comme une probabilité conditionnelle sur les données observées. Cette technique a été développée initialement dans le cadre du projet GICC IMFREX (Déqué 2003, Déqué 2007), pour les précipitations et les températures diurnes minimales et maximales, par rapport à des observations quotidiennes dans des stations de référence possédant des données validées sur de longues durées. Plus précisément, les fonctions de correction ramènent les quantiles du modèle climatique temps présent vers les quantiles de l'observation sur une période concomitante, pour chaque variable, saison et points de mesure. Cette méthode paramétrique revient à considérer que le modèle est capable de prédire la distribution des variables climatiques mais pas la valeur exacte de chaque quantile. Moyennant l'hypothèse de stationnarité des erreurs du modèle pour le climat futur, on peut utiliser les fonctions de correction déterminées à partir du climat présent pour les scénarios de changement climatique.

Dans RExHySS, afin de pouvoir correctement alimenter les modèles hydrologiques, nous avons retenu comme jeu d'observations l'analyse SAFRAN, qui offre une résolution spatiale de 8 km (Quintana-Segui et al., 2008), d'où 1662 mailles pour les bassins de la Seine et de la Somme. Sur ce domaine, 7 variables quotidiennes sont disponibles sur la période de référence 1970-2005. La méthode IMFREX a dû être adaptée pour pouvoir s'appliquer à un tel volume de données. Les corrélations entre variables imposent notamment de les traiter conjointement pour éviter des associations physiquement irréalistes (des températures froides et des précipitations abondantes). La solution adoptée dans RExHySS consiste à réduire la dimension du problème pour le rendre statistiquement abordable, comme détaillé en annexe VIa. Soulignons enfin l'importance de l'échantillonnage temporel : effectuer la correction au pas de temps journalier plutôt que toutes les 6 heures améliore la représentation de la persistance des épisodes secs par rapport à SAFRAN (en revanche pas d'effet sur les épisodes pluvieux, voir annexe VIb).

Méthode des régimes de temps

L'idée de régimes de temps a été introduite dans les années 1950 par la climatologie synoptique et repose sur une représentation conceptuelle de la dynamique atmosphérique des moyennes et hautes latitudes. Un régime ou type de temps se caractérise par l'apparition reconnaissable et récurrente, au-dessus d'un territoire géographique donné, d'une situation météorologique associée à des caractéristiques bien déterminées du temps sensible (Michelangeli et al. 1995). Un autre aspect essentiel des régimes de temps est leur capacité à restituer une description fine des variables du climat sensible (température, précipitation, vent de surface, tempêtes ...) aux échelles régionales à locales. Il est alors naturel d'utiliser les changements d'occurrence des régimes pour interpréter les fluctuations climatiques continentales et ceci pour un large spectre d'échelles spatiales et temporelles. C'est l'idée qui est derrière la méthode de désagrégation développée dans le cadre de la thèse de Boé (2007) et du projet RIVAGES (Boé et al. 2006, Boé et al. 2007) et qui a été légèrement modifiée dans RExHySS.

Dans RExHySS, les régimes de temps sont déterminés à l'aide d'une classification conjointe des données journalières de pression de surface au niveau de la mer (P_{mer}) et de précipitation. Cette variante, par rapport à une classification effectuée juste sur la variable de circulation atmosphérique, permet d'obtenir des régimes plus discriminants pour la variable climatique étudiée. La classification optimale donne 9 ou 10 régimes de temps (suivant la saison) qui permettent une bonne séparation des principaux régimes pluviométriques sur la France. La deuxième étape consiste à construire une régression multiple entre les précipitations (variable endogène, à prédire) et les paramètres décrivant la circulation de grande échelle (variables exogènes, prédictives). Ces dernières sont estimées par les distances dans l'espace des phases choisi (ici engendré par les 10 premières composantes principales de P_{mer}) entre le jour j et les centres de gravité ou barycentres des régimes de temps. Les variables endogènes sont les précipitations issues de la base SAFRAN (1981-2005), mais moyennées sur des cercles de 40 km de rayon centrés sur les 220 points de grille du modèle ARPEGE-VR (version 3) qui

sont situés en France. Le troisième ingrédient utilise un index de température défini comme la moyenne des températures du modèle sur le domaine de la variable de circulation atmosphérique.

L'étape finale de l'algorithme de désagrégation utilise les réanalyses NCEP comme référence de grande échelle pour le temps présent. Pour un jour j_0 modélisé dont on connaît la P_{mer} et l'index de température, on cherche d'abord le régime de temps le plus proche de j_0 . Parmi les jours appartenant à ce dernier, on cherche 16 jours j_i qui minimisent conjointement la distance entre les précipitations reconstruites (par régression multiple) ARPEGE et NCEP, et celle entre l'index de température modélisé et celui donné par les réanalyses NCEP. On choisit ensuite aléatoirement un jour j_1 parmi les jours j_i . Toutes les données SAFRAN du jour j_1 sont alors utilisées pour le forçage des modèles hydrologiques. Un traitement spécifique est fait pour la température pour les simulations du climat futur afin de prendre en compte le réchauffement global. Si l'index de température modélisé du jour j_0 est supérieur (en valeur absolue) de plus de 2°C à celui du jour j_1 de les réanalyses NCEP, on ajoute cet écart aux températures de la base SAFRAN pour le jour j_1 , en prenant soin d'ajuster également les autres variables dépendantes (pour une description complète de l'algorithme, voir Pagé et al., 2008).

Pour finir, notons que par construction, la méthode des régimes de temps ne peut produire des extrêmes journaliers supérieurs à ceux observés durant la période de construction. Ce n'est pas le cas de la désagrégation dynamique avec correction même si le problème de l'extrapolation de la correction au-delà des valeurs observées est pour l'instant traité de la manière la plus simple possible.

Tableau 1 - Présentation des scénarios disponibles.

SRES indique le scénario d'émission des gaz à effet de serre ; DESAG le nom de la méthode de désagrégation (ANOM=anomalie ; QQ=Quantile-Quantile ; RT=Régime de temps). PST, MS, et FS indiquent les périodes disponibles pour le temps présent, le milieu de siècle et la fin de siècle respectivement. Chaque scénario est représenté par un acronyme (en gras, après le nom des modèles). Seuls les 12 premiers scénarios (ceux avec un acronyme) ont été utilisés par les modèles hydrologiques du volet V2. Le scénario 16 (IAP_FGOALS) n'a pas été exploité en raison d'un climat irréaliste en temps présent.

	Nom	Acronyme	SRES	DESAG	PST	MS	FS
	SAFRAN				1970-2005	NA	NA
1	AN_ARPV4_A1B	A1	A1B	ANOM	NA	NA	2071-2100
2	AN_ARPV4_A2	A2	A2	ANOM	NA	NA	2071-2100
3	QQ_ARPV4_A1B	RD1	A1B	QQ	1950-2010	NA	2071-2100
4	QQ_ARPV4_A2	RD2	A2	QQ	1950-2010	NA	2071-2100
5	RT_ARP_CONT_A1B	RC1	A1B	RT	1950-2000	2000-2070	2071-2100
6	RT_ARPV4_A2	RC2	A2	RT	1950-2000	NA	2070-2100
7	GFDL_CM2_0	G0	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
8	GFDL_CM2_1	G1	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
9	MPI_ECHAM5	EC	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
10	MRI_CGCM2_3_2A	MR	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
11	GISS_MODEL_E_R	GM	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
12	CCCMA_GCGM3_1	CC	A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
13	CNRM_CM_3		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
14	CSIRO_MK3_0		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
15	GISS_AOM		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
16	IAP_FGOALS1_0		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
17	INGV_ECHAM4		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
18	IPSL_CMA		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
19	MIROC_2_MEDRES		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
20	MIUB_ECHO_G		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100
21	NCAR_CCSM3_0		A1B	RT	1960-2000	2046-2065	2081-2100

2.2 Les scénarios climatiques issus des modèles de circulation générale

Le Tableau 1 donne l'ensemble des caractéristiques des scénarios climatiques (un scénario est constitué ici d'une simulation à l'aide d'un modèle couplé ou forcé ainsi que d'une technique de désagrégation et/ou de correction) qui ont été fournis pour RExHySS. Les six premiers scénarios sont issues de trois simulations réalisées avec différentes versions du modèle ARPEGE Climat à résolution variable, les 15 derniers provenant du jeu de simulations multi-modèle CMIP3 réalisé pour le dernier rapport du GIEC (4^{ème} rapport en 2007). Parmi les 15 scénarios CMIP3, 6 ont été utilisés par l'ensemble des modèles hydrologiques du volet V2. Ils ont été choisis de manière à représenter grossièrement la dispersion de l'ensemble total pour les changements simulés de précipitation et température. Différentes méthodes de désagrégation-corrrection ont été utilisées pour les scénarios basés sur ARPEGE alors que l'ensemble des scénarios CMIP3 ont été traités uniquement par la méthode des régimes de temps.

Les scénarios A2, RD2 et RC2 sont utilisés pour tester l'impact du choix de la méthode de désagrégation. Les couples de simulations A1/A2 et RD1/RD2 peuvent être utilisées pour donner une estimation très grossière de l'incertitude réflexive (celle liée aux scénarios SRES ; Nakicenovic and Swart, 2000) et les différents scénarios issus des simulations du GIEC donnent une estimation de la dispersion associée aux incertitudes structurelles présentes dans les modèles climatiques.

3. Validation des scénarios désagrégés pour le temps présent

Quels sont les ingrédients nécessaires à la validation des outils de désagrégation ? La validation à partir de données de simulations climatiques désagrégées ne peut se faire que statistiquement sur la période de référence choisie et nous avons commencé par les scénarios basés sur ARPEGE, désagrégés par plusieurs méthodes. On s'intéresse ici à la capacité des méthodes de désagrégation à représenter les moments statistiques et les propriétés temporelles des variables climatiques, ici principalement les précipitations. Les comparaisons sont faites sur la période 1971-2000 avec les données SAFRAN.

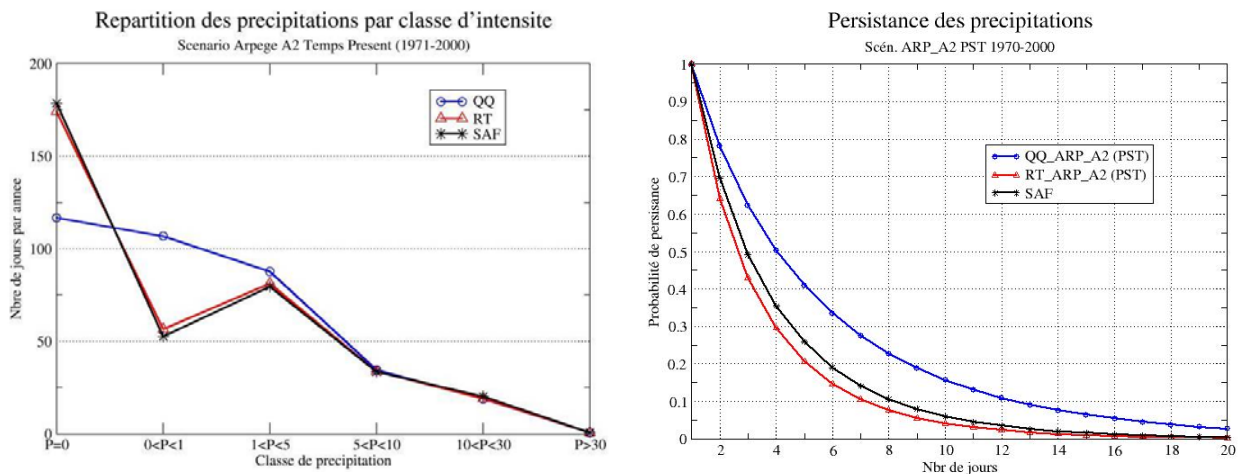


Figure 1 - Comparaison du régime des précipitations sur le temps présent (1971-2000) entre les analyses SAFRAN (noir avec étoiles) et le scénario ARPEGE A2 désagrégé soit par la méthode quantile-quantile (bleu avec cercles), soit par celle des régimes de temps (rouge avec triangles). a) à gauche : répartition des jours de pluie par classe de précipitation (en mm/jour) ; b) à droite : persistance des épisodes pluvieux (une journée est considérée comme pluvieuse si la précipitation totale est supérieure à 0).

La répartition des jours de pluie par classe montre que la méthode quantile-quantile surestime la fréquence d'occurrence des jours à faible précipitation et sous-estime celle des jours secs (Figure 1a). La méthode des régimes de temps donne des résultats similaires à ceux de SAFRAN ce qui suggère que les fréquences d'occurrence des types de temps simulés sont proches des valeurs observées sur la période 1971-2000. Les propriétés de persistance sont analysées en regardant la probabilité de durée d'un événement pluvieux (Figure 1b, un événement pluvieux à 100 % de chance de durer au moins un

jour, et x % de chance de durer au moins n jours). La méthode quantile-quantile a tendance à générer des épisodes de pluie plus longs que ceux de l'analyse SAFRAN. Cela est cohérent avec le fait que cette méthode surestime le nombre de jours de pluie. La méthode des régimes de temps est proche des observations (légère sous-estimation pour les épisodes de durée comprise entre 2 et 10 jours). Notons aussi que la méthode quantile-quantile surestime aussi l'occurrence des épisodes pluvieux d'une longueur supérieure à 20 jours. Pour les épisodes secs, les deux méthodes sous-estiment l'occurrence par rapport à SAFRAN. La mise en œuvre de la correction quantile-quantile à l'échelle journalière (et non pas toutes les 6 heures) permet une amélioration notable (voir annexe V1b).

Pour la méthode des régimes de temps, une deuxième source de validation possible est l'utilisation des données désagrégées à partir des réanalyses atmosphériques (Boé 2007). Dans ce cas, on peut aussi valider la capacité de la méthode à restituer les évolutions temporelles. Ce type de validation ne peut être utilisé pour la désagrégation dynamique et la correction quantile-quantile.

4. Projections climatiques pour les bassins de la Seine et de la Somme

Nous discutons dans un premier temps les projections climatiques issues des modèles climatiques de grande échelle (simulations du GIEC) puis celles qui en résultent après désagrégation par la méthode des régimes de temps (RT), qui a été appliquée à l'essentiel des scénarios climatiques retenus pour RExHySS (Tableau 1). La question des incertitudes liées aux techniques de désagrégation a été abordée avec les simulations ARPEGE-VR version4, ce qui montre des réponses en fin de siècle similaires pour les 3 méthodes (annexe V1b).

4.1 Réponses spatialisées à l'échelle de l'Europe : modèles du GIEC

Avant de montrer les résultats des scénarios de changement climatique désagrégés dans les bassins de la Seine et de la Somme, il est utile de montrer le climat du 21^{ème} siècle projeté par les modèles climatiques à l'échelle du continent Européen. Pour ce faire, nous montrons les changements de précipitation pour le milieu du 21^{ème} siècle simulés par l'ensemble multi-modèle CMIP3 (qui englobe les scénarios du GIEC retenus dans RExHySS) utilisé pour le 4^{ème} rapport du GIEC (Figure 2).

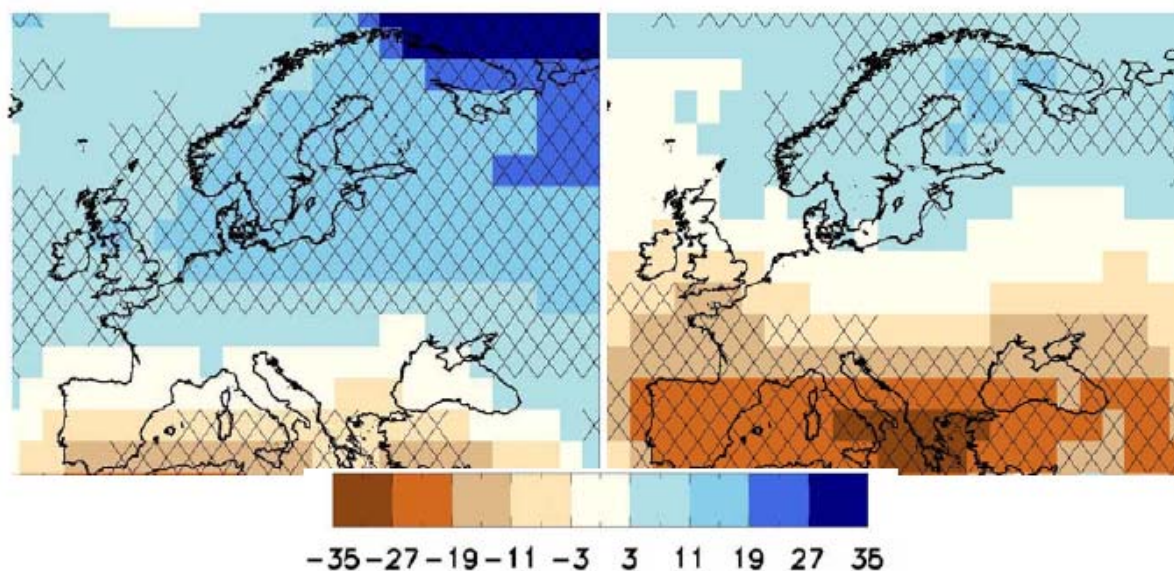


Figure 2 – Europe : changement relatif (par rapport à la période 1971-2000) des précipitations hivernales (à gauche) et estivales (à droite) simulées par le multi-modèle CMIP3 pour la période 2046-2065 et le scénario d'émissions SRES A1B. Les croix indiquent les zones où au moins 85% des signes des réponses des différents modèles sont en accord (source : Boé, 2007).

La grande majorité des scénarios du climat futur réalisés dans ce cadre repose sur les modèles couplés à basse résolution. En hiver, les projections montrent une diminution des précipitations au sud de l'Europe et une augmentation sur le nord de l'Europe. Sur les 3/4 de la France, le signe du changement

en hiver n'est pas cohérent entre les modèles et est donc incertain. En été, les précipitations continentales sont réduites sur une grande partie de l'Europe, sauf les régions les plus au Nord. Il y a une forte cohérence de signe sur une grande partie sud et ouest de la France entre les différents modèles. La zone de transition où il y a incohérence de signe sur la réponse se déplace du sud vers le nord entre l'hiver et l'été. Les incertitudes liées aux modèles de climat indiquent une dispersion en hiver sur la France qui est du même ordre ou supérieure à l'amplitude du signal estimée par la moyenne du multi-modèle. En été en revanche, la dispersion est inférieure à l'amplitude du signal ce qui suggère que la réduction des précipitations estivales est un signal robuste. Dans la suite de ce volet VI, nous allons nous intéresser en premier lieu à la période milieu de siècle (le lecteur intéressé pourra consulter les cartes pour la période fin de siècle dans l'annexe V1b).

4.2 Réponses moyennes et spatialisées à l'échelle des bassins de la Seine et de la Somme

En milieu de siècle, la majorité des scénarios RT (les seuls disponibles à cet horizon) indiquent une réduction des précipitations annuelles comprise entre 5 et 15% par rapport aux scénarios temps présent (moyenne de -6%). Seuls deux scénarios prévoient une très faible augmentation (inférieure à 1%). Cette réduction des précipitations s'accroît en fin de siècle (elle atteint 12% pour la moyenne d'ensemble des scénarios, un seul scénario indique une faible augmentation des précipitations, voir annexe V1b). Elle se traduit par une augmentation des jours sans pluie et une persistance plus importante des épisodes secs. L'augmentation moyenne des températures en milieu de siècle est de 2.2K avec une faible dispersion (le réchauffement atteint 3.1K en fin de siècle avec une dispersion plus importante : un écart-type de 0.7K, un minimum de 1.9K et un maximum de 4.3K).

La Figure 3 montre la distribution spatiale des changements moyens de précipitations et température sur les bassins de la Seine et de la Somme, estimés par la moyenne d'ensemble des scénarios RT. Les changements de précipitation pour 2050 sont de plus forte amplitude sur le nord-ouest du bassin en particulier pour l'été. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Boé et al. (2007) qui montrent que la diminution sur le nord de la France des précipitations estivales et l'incertitude associée dépend essentiellement des changements des fréquences d'occurrence des types de temps zonaux (phases positive et négative de l'oscillation Nord Atlantique – NAO). Notons aussi que la dispersion des scénarios RT est plus forte sur l'est du bassin et qu'elle double en fin de siècle (voir annexe V1b). Le réchauffement est croissant selon une direction nord-ouest/sud-est et donc augmente avec la distance à la côte (cette caractéristique est aussi présente en fin de siècle). La majeure partie du réchauffement est déjà présente au milieu du siècle et la dispersion des scénarios RT est relativement homogène sur le domaine (écart-type de l'ordre de 0.6 K en fin de siècle).

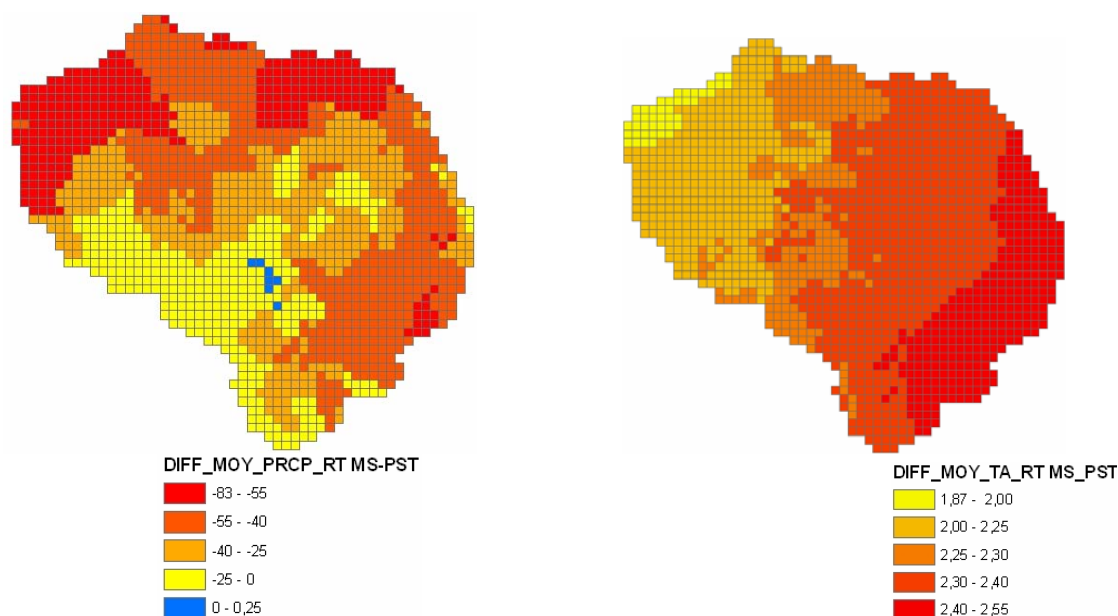


Figure 3 - Domaine RExHySS : changement de précipitations (en mm/an) à gauche et de température (en K) à droite, entre le 2046-2065 et 1970-2000 selon les scénarios RT.

La correction de biais associée à la méthode RT peut être caractérisée par la comparaison des variables désagrégées avec celles directement simulées par les modèles climatiques (Figure 4). En termes d'anomalies de température, on remarque en premier lieu la dispersion importante des 6 modèles du GIEC. La méthode RT donne des températures plus chaudes que les sorties directes en hiver, mais plus froides en été. En moyenne annuelle, les scénarios désagrégés ne sont que légèrement plus chaud que les scénarios de grande échelle. En termes de précipitations, on note une correction très faible par le méthode RT en moyenne annuelle, avec des différences saisonnières qui se compensent. La correction apportée par la méthode RT est cependant plus importante en hiver qu'en été. Finalement, on peut conclure que les différences entre les sorties directes des modèles du GIEC et celles de la méthode RT ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre, ce qui est satisfaisant car la méthode RT ne devrait pas modifier d'une façon trop importante la moyenne du modèle qu'elle désagrège malgré la correction de biais.

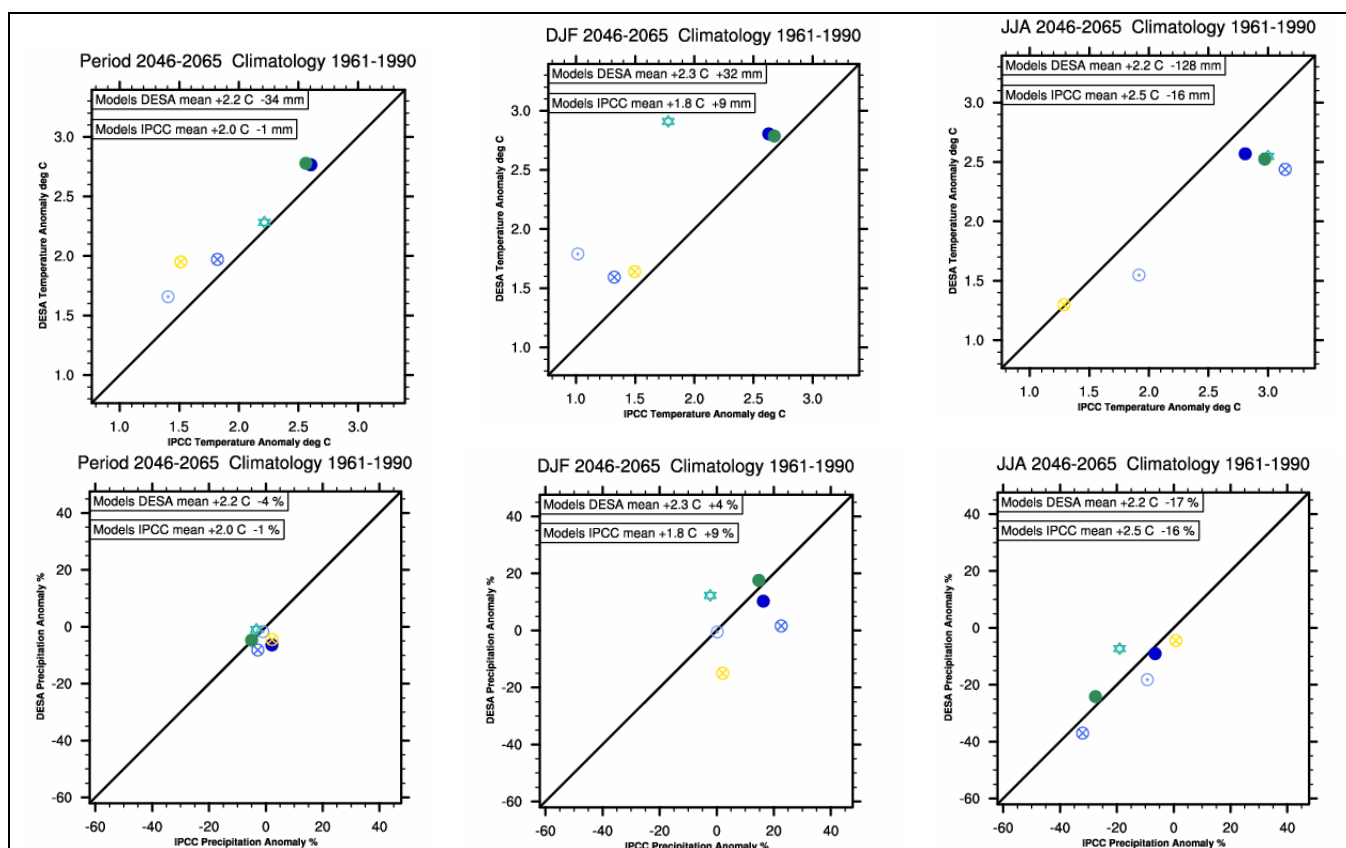


Figure 4 - Comparaison des changements des températures (en haut) et précipitations (en bas) simulés entre les périodes 2046-2065 et 1970-1999 pour le scénario SRES-A1B selon les 6 modèles du GIEC choisis pour le volet V2 : changements directement simulés par les modèles de climat en abscisse vs changements après désagrégation par la méthode RT en ordonnée. De gauche à droite la moyenne annuelle, la saison hivernale (DJF) et estivale (JJA).

5. Les incertitudes

La nature probabiliste des projections climatiques impose d'utiliser une approche ensembliste multi-modèle. Cette approche a été complétée dans le cadre de RExHySS en considérant deux scénarios d'émissions et trois méthodes de désagrégation, ce qui définit une approche multi-scénario. Les 20 scénarios désagrégés ainsi disponibles couvrent une large gamme de possibles, comme illustré par les réponses croisées des températures et précipitations en milieu et fin de siècle (Figure 5). Ils ont permis d'identifier et de hiérarchiser les différentes sources d'incertitude associées à ces scénarios climatiques et aux scénarios hydrologiques qui en découlent. Il apparaît ainsi que la dispersion des scénarios RT pour les différentes variables en fin de siècle est généralement toujours supérieure à celle liée aux différentes méthodes de désagrégation (voir tableaux 3, 7, 8 et 9 de l'annexe V1b). En fin de siècle

pour la température, l'incertitude liée aux scénarios SRES est du même ordre de grandeur ou supérieure à celle des modèles de climat.

Etant donné le souci d'utiliser ces scénarios climatiques en entrée de différents modèles hydrologiques pour appréhender également les incertitudes liées à ces derniers (voir volet V2 ci-dessous), il est vite apparu important de restreindre le nombre des scénarios climatiques pour faciliter le travail d'inter-comparaison des simulations hydrologiques (volets V2 et V3). Nous avons donc sélectionné un échantillon de 12 scénarios climatiques désagrégés (identifiés dans le Tableau 1) qui couvre correctement la dispersion des 20 possibles. A cette fin, nous nous sommes attachés à ce que cet échantillon soit représentatif de la variabilité des types de temps au cours du 21^{ème} siècle et leur résultante en termes d'évolution des précipitations et températures, à l'échelle annuelle et saisonnière (Figure 5).

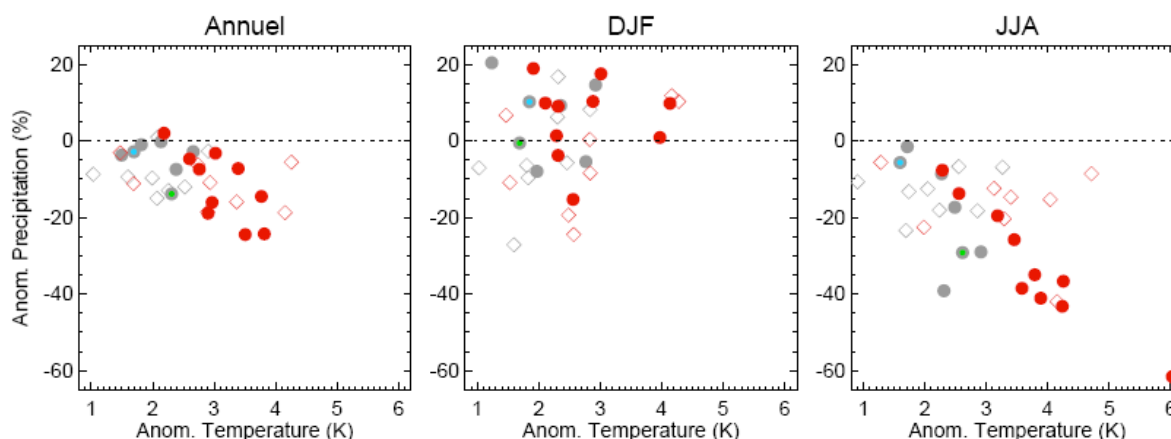


Figure 5 - Représentativité des scénarios désagrégés sélectionnés pour les volets V2, V3 et V4b par rapport à l'ensemble des scénarios désagrégés dans le volet V1. Valeurs moyennes dans le bassin de la Seine, pour tous les scénarios sauf A1 et A2 désagrégés par la méthode des anomalies (Tableau 1). Les symboles rouges / gris représentent les réponses fin / milieu de siècle (différence entre la moyenne 2081-2099 / 2046-2065 et la période récente 1981-1999). Les symboles pleins correspondent aux scénarios analysés par les modèles hydrologiques du V2. Les deux scénarios indiqués par un cœur vert / bleu sont ceux utilisés dans le volet V4b (scénarios milieu de siècle RC1 / GM respectivement).

V2. Modélisation hydrologique et ressources en eau

Partenaires impliqués : Sisyphé, Armines, CNRM, BRGM.

Dans ce volet, nous disposons d'au moins 5 modèles hydrologiques calés dans chacun des bassins de la Seine et de la Somme. Ces modèles hydrologiques, détaillés en annexe V2a, sont relativement différents, et présentent un bon spectre de l'ensemble des stratégies de modélisation possibles (Tableau 2). La capacité des modèles à bien représenter les débits et la piézométrie en temps présent ne fait pas l'objet de cette étude. Cependant, on retrouvera une forme d'évaluation des modèles hydrologique dans l'annexe V2a, dans le volet V3 (analyse des extrêmes), et une analyse plus détaillée dans les articles cités dans le Tableau 2.

A partir des 12 scénarios désagrégés sélectionnés dans le volet V1, nous avons pu analyser les impacts du changement climatique sur la ressource en eau pour les différents modèles hydrologiques, les différentes méthodes de désagrégation, et les différents modèles de climat (ou GCM pour General Circulation Model) sous scénario d'émissions SRES. Ces impacts sont étudiés sous trois niveaux : impact sur les débits, sur la piézométrie et sur les composantes du bilan hydrique. L'analyse de ces impacts est associée à une analyse des incertitudes.

L'utilisation des méthodes quantile-quantile et des régimes de temps, qui visent à une réelle descente d'échelle des scénarios climatiques (V1), induit des changements dans l'analyse des impacts du changement climatique sur la ressource en eau par rapport aux études précédentes reposant sur la méthode des anomalies, comme dans les projets GICC-Rhône et GICC-Seine. En effet, elles permettent de disposer de scénarios climatiques désagrégés, tant pour le temps présent que pour les périodes futures. Cela permet de tester la capacité du couple [simulation GCM sous scénario SRES,

méthode de désagrégation] à bien représenter le temps présent, et de voir quels sont les biais générés par ces scénarios désagrégés lorsqu'ils sont utilisés par les modèles hydrologiques. Cela permet aussi de ne plus raisonner uniquement en termes de différence entre deux périodes, et de regarder les réponses brutes pour chaque période. Une analyse détaillée des résultats est fournie en annexe V2b.

Cependant, il est important de garder à l'esprit que ces résultats sont simulés en supposant que seuls le climat est modifié. Pour tous les modèles, la végétation et les prélèvements ne sont pas modifiés par rapport aux observations du temps présent. Or, il est vraisemblable que l'occupation des terres et l'anthropisation vont évoluer également. Il s'agit donc bien ici d'une étude théorique, toutes choses étant égales par ailleurs.

Tableau 2 - Caractéristiques des modèles hydrologiques utilisés sur les bassins de la Seine et de la Somme.
La couleur associée à chaque modèle est celle que l'on retrouvera dans les autres figures.

Modèle hydrologique	Type de modèle	Spatialisation	Bassin	Références
CLSM	Hydro-météorologique	Semi-distribué	Seine Somme	Ducharne et al., 2007 Gascoïn et al., 2009
EROS	Hydrologique à réservoirs	Semi-distribué	Seine	Thiéry et Moutzopoulos, 1995
GARDENIA	Hydrologique à réservoirs ; estimation possible d'un niveau piézométrique local	Non distribué	Somme	Thiéry, 2003
GR4J	Hydrologique à réservoirs	Non distribué	Seine Somme	Perrin et al., 2003
MARTHE	Hydrogéologique	Distribué	Seine	Thiéry, 1990
MODCOU	Hydrogéologique	Distribué	Seine	Ledoux et al., 2007 Korkmaz et al., 2009
SIM	Hydrogéo-météorologique	Distribué	Seine	Habets et al., 2008

1. Analyse des réponses sur les débits

Pour cette analyse, on se concentre principalement sur les exutoires des bassins, qui correspondent aux stations de Poses (Seine) et d'Abbeville (Somme). On s'intéresse dans un premier temps à l'évolution des débits annuels entre le temps présent, l'horizon 2050 et l'horizon 2100, pour chaque modèle hydrologique et chaque scénario climatique désagrégé disponible. Ainsi, sur la Figure 6, une simulation (l'association d'un modèle hydrologique avec un scénario climatique désagrégé) est représentée par une courbe à trois points. Le premier point représente les débits annuels moyens en temps présent, le deuxième les débits annuels moyens en milieu de siècle, et le troisième les débits annuels moyens en fin de siècle. La Figure 6 présente les résultats sur le bassin de la Seine, mais on a des résultats très similaires sur le bassin de la Somme. Notons que l'on retrouve les débits temps présent simulés à partir des forçages SAFRAN, qui constituent par construction le temps présent des méthodes d'anomalies (labels A1 et A2). Dans tous les cas, les résultats « temps présent » sont proches des observations (trait noir sur la Figure 6), ce qui constitue une validation supplémentaire des scénarios désagrégés pour le temps présent. On constate aussi une assez forte dispersion des résultats pour le temps présent. Ceci vient du fait que les simulations en temps présent sont forcées par des simulations de modèles de climat désagrégés, et non pas par des observations. On a donc la persistance de certains biais des modèles de grande échelle qui ne sont pas corrigés par les méthodes de désagrégation.

Pour mieux estimer les impacts, la Figure 7 présente donc l'impact sur les débits par rapport aux simulations temps présent (la référence varie donc pour chaque simulation). On constate une relative homogénéité des réponses entre les modèles hydrologiques, avec un impact moyen entre 0 et -200 m³/s. Seul le modèle CLSM simule des diminutions de débits beaucoup plus marquées. On constate également que deux scénarios (GM et CC) sont nettement moins pessimistes que les autres, avec des débits annuels moyens en fin de siècle très comparables à ceux du temps présent.

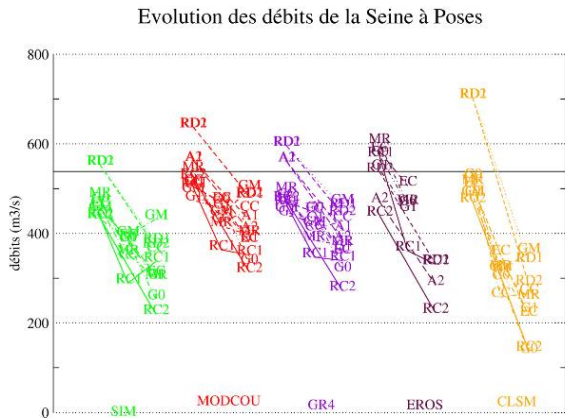


Figure 6 - Evolution des débits annuels moyens à Poses simulés par les modèles hydrologiques (couleurs) pour les différents scénarios climatiques (label). Le trait noir correspond au débit annuel moyen observé (module actuel). Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent, la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle.

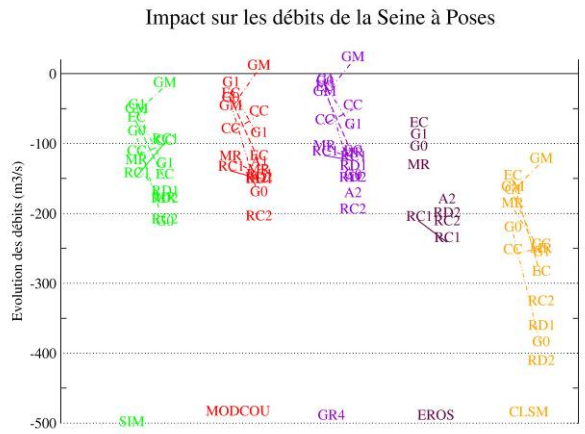


Figure 7 - Evolution des débits annuels moyens à Poses par rapport au temps présent simulé. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux écarts entre milieu de siècle et temps présent, le deuxième entre fin de siècle et temps présent.

La Figure 8 présente l'ensemble des simulations de la Seine à Poses et de la Somme à Abbeville au pas de temps mensuel. On notera que pour le bassin de la Somme, nous n'avons pas pris en compte les résultats du modèle hydrologique CLSM qui présentait une dynamique différente et augmentait de façon importante, et probablement incorrecte, la dispersion en temps présent. Malgré cela, on constate que la dispersion reste importante en temps présent sur les deux bassins. Cependant, la moyenne de l'ensemble est assez proche de la moyenne observée. A l'horizon 2050, la diminution des débits est surtout marquée en l'automne et en hiver. Au printemps et en été, les impacts moyens diffèrent sur les deux bassins : on a une assez bonne stabilité des débits moyens sur la Seine (voir une légère augmentation en Avril), alors que sur le bassin de la Somme, les débits diminuent durant cette période, mais de façon moins accentuée qu'en automne et en hiver. Ces changements correspondent à un décalage de l'hydrogramme, avec un retard de 1 à 2 mois des hautes et des basses eaux, en plus de la baisse moyenne des débits. A l'horizon 2100, la moyenne des débits suit un cycle assez proche de celui simulé en moyenne en 2050, mais ils sont légèrement plus faibles. Cependant, sur le bassin de la Seine, la dispersion augmente nettement en hiver et à l'automne, où les débits minimums peuvent être très faibles. Sur le bassin de la Somme, la dispersion augmente plutôt au printemps et à la fin de l'hiver.

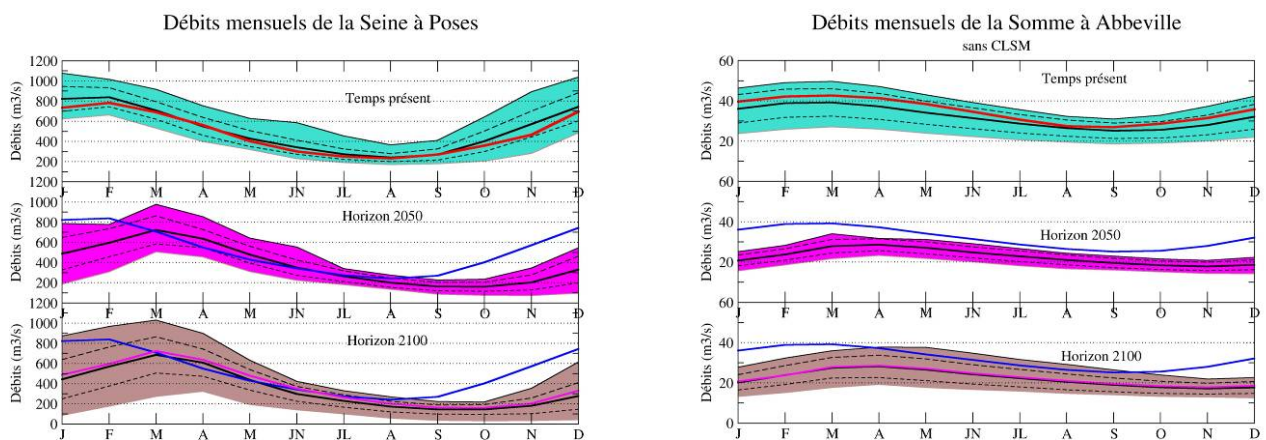


Figure 8 - Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses (à gauche) et la Somme à Abbeville (à droite) par l'ensemble des modèles hydrologiques et sur l'ensemble des scénarios. L'enveloppe représente les min et max simulés, le trait épais la moyenne de l'ensemble, et les pointillés l'enveloppe 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.

2. Analyse des réponses sur la piézométrie

Pour analyser l'impact du changement climatique sur la piézométrie, nous avons choisi de nous intéresser uniquement aux résultats des simulations sur les points correspondant à des piézomètres réels (Figure 9). Seuls deux modèles ont fourni ce type d'information : MODCOU et GARDENIA (sur la Somme uniquement). Cependant, les deux modèles n'ont pas exactement simulé les mêmes piézomètres. L'impact est massivement négatif (baisse du niveau piézométrique), sauf pour quelques scénarios climatiques (notamment le modèle GM). Comme on pouvait s'y attendre, le rabattement est plus important sur les plateaux (où les niveaux piézométriques sont élevés en temps présent) qu'en plaine (faibles niveaux piézométriques en temps présent). Sur les deux bassins, la pente des droites de régression est assez similaire : environ -3% pour l'horizon 2050 et -4% pour l'horizon 2100. Mais, l'ordonnée à l'origine varie sur les 2 bassins : elle est de -1m et -0.85m en milieu de siècle sur la Seine et la Somme respectivement, et atteint -1.12 et -1.31 m en fin de siècle, respectivement. Cela indique donc en première approximation un rabattement de l'ordre d'un mètre proche de l'exutoire et de 5m pour un piézomètre dont le niveau temps présent est à 100m. Cependant, on constate sur le bassin de la Somme que les estimations de GARDENIA sont moins pessimistes que celles de MODCOU. Il est difficile à ce stade de savoir si le fait que le modèle MODCOU soit distribué et pas le modèle GARDENIA puisse être à l'origine de ces écarts.

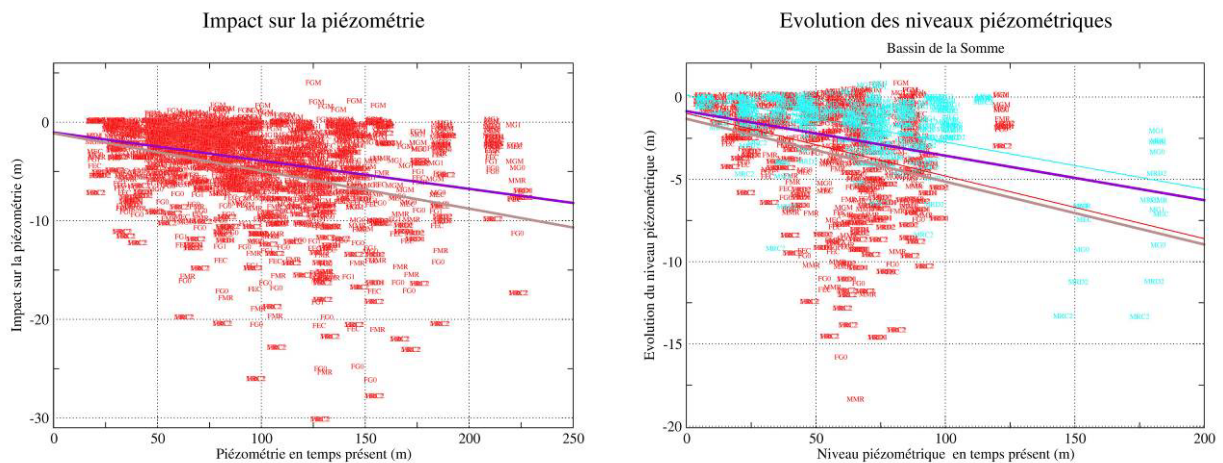


Figure 9 - Evolution de la piézométrie simulée en milieu de siècle (préfixe M) et en fin de siècle (préfixe F) sur la Seine (à gauche, modèle MODCOU) et la Somme (à droite, modèles MODCOU et GARDENIA). Les droites violette et marron représentent les droites de régression des nuages de points correspondant aux horizons 2050 et 2100 respectivement selon le modèle MODCOU. Pour la Somme, on distingue également les droites de régression issues des simulations GARDENIA à l'horizon 2050 (en bleu) et 2100 (en rouge).

3. Analyse du bilan hydrique

Les Figure 10 et Figure 11 montrent, à l'échelle du bassin versant de la Seine (pour lequel on dispose de plus de simulations), les relations entre les impacts sur les précipitations d'une part et l'évaporation et l'écoulement total d'autre part en moyenne sur les périodes milieu et fin de siècle. En moyenne, l'écoulement total est représentatif du débit à l'exutoire du bassin versant, qui intègre l'ensemble des écoulements amont. Les résultats sur le bassin de la Somme sont comparables (annexe V2b). L'évolution des précipitations annuelles entre le temps présent et les deux périodes futures est comprise entre +2 % et -27% sur l'ensemble du bassin de la Seine pour les scénarios traités dans ce volet (entre 0 et -30% sur le bassin de la Somme). On note cependant que, pour un même scénario climatique désagrégé, les précipitations ne sont pas tout à fait les mêmes pour chaque modèle hydrologique. Cela peut être dû à deux choses: soit le bassin versant simulé n'est pas exactement le même (restriction aux bassins topographiques ou inclusion de l'extension des nappes), soit la période simulée diffère quelque peu d'un modèle à l'autre, du fait des problèmes d'initialisation.

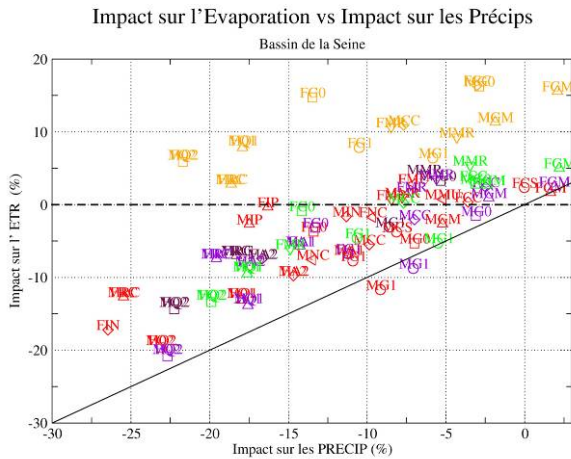


Figure 10 - Relation entre l'évolution de l'évaporation (ETR) et celle des précipitations.

Les valeurs représentent une évolution moyenne sur l'ensemble du bassin versant de la Seine par rapport aux valeurs simulées en temps présent, et sont exprimées en pourcent. La ligne noire correspond à la droite 1:1. Chaque couleur correspond à un modèle hydrologique, et les labels à une simulation climatique désagrégée. La lettre M indique le milieu de siècle et la lettre F la fin de siècle.

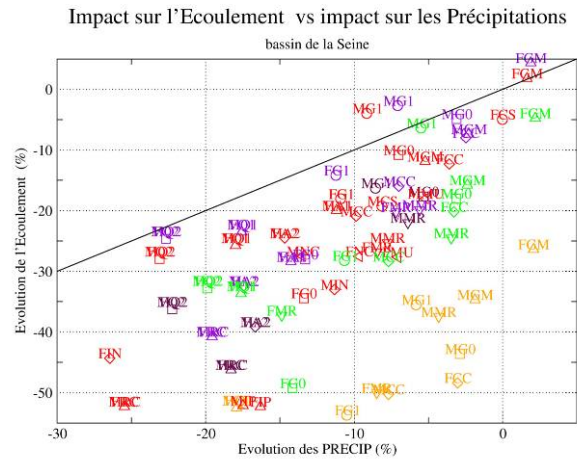


Figure 11 - Relation entre l'évolution de l'écoulement total et celle des précipitations.

L'impact sur l'écoulement (et donc sur les débits) est environ deux fois plus fort que l'impact sur les précipitations (i.e., une réduction des précipitations de 15% induit une diminution des débits de l'ordre de 30%). Cette diminution de l'écoulement total résulte d'une baisse conjointe du ruissellement et du débit de base, associée à une baisse de la recharge des nappes (annexe V2b). Les scénarios G1 milieu de siècle et GM fin de siècle (ce dernier étant le seul à considérer une augmentation des précipitations annuelles par rapport au temps présent) sont les moins pessimistes, avec une faible variation des débits. Le modèle hydrologique CLSM se distingue clairement des autres modèles, avec une diminution des débits de l'ordre de 30 % plus faible (sur la Somme, la diminution des débits simulés par CLSM se distingue encore plus nettement des autres modèles, et est de l'ordre de -80%).

De façon cohérente, le modèle hydrologique CLSM simule une augmentation de l'évaporation pour tous les scénarios climatiques. Cette augmentation, autour de 10%, ne semble pas très liée aux évolutions des précipitations. Pour les autres modèles, il semble y avoir une relation assez linéaire entre l'impact sur l'évaporation et l'impact sur les précipitations, l'impact sur l'évaporation étant environ de 5% inférieur à celui des pluies (i.e. une diminution des précipitations de 15% induit une diminution de l'évaporation de l'ordre de 10%). La demande évaporative étant accrue sous changement climatique (comme le traduit l'augmentation de l'ETP, voir annexe V1b), cette baisse de l'évaporation réelle correspond à une augmentation du stress hydrique sous changement climatique du fait de la diminution des précipitations. Le modèle CLSM semble donc sous-estimer ce stress hydrique accru. Ceci peut être lié au formalisme du modèle qui gère trois types de surface : une fraction stressée où l'humidité du sol trop faible pour permettre la transpiration de la végétation, contrairement aux fractions humide et saturée. Le seuil d'humidité définissant la fraction stressée (point de flétrissement) est peut-être trop faible, comme suggéré par une évaluation du modèle en Alsace pendant la canicule 2003 (Longuevergne et al., 2009), mais sans que ce soit évident en temps présent dans le bassin de la Seine. Une autre particularité de CLSM est qu'il suppose la présence permanente d'une nappe (de type nappe perchée). La profondeur de cette nappe varie, mais, elle reste constamment en contact avec la surface. Ainsi, la nappe peut alimenter le réservoir sol en eau, ce qui limite fortement le stress hydrique, et permet de soutenir l'évaporation en fin d'été. Or, cet apport de la nappe est relativement important par rapport à l'écoulement total, et son rôle augmente nettement en milieu et fin de siècle (annexe V2b). Ce point peut sembler étonnant, car la recharge de la nappe diminue, le niveau piézométrique baisse, si bien que la nappe devrait se trouver plus souvent déconnectée de la surface. Ces arguments nous incitent à prendre les résultats de CLSM avec précautions, et les résultats de ce modèle ne seront donc pas pris en compte dans l'analyse des incertitudes.

4. Analyse des incertitudes

Afin de mieux quantifier les impacts sur les débits, il est nécessaire d'étudier les incertitudes, et d'estimer celles qui sont justifiées et celles qui ne le sont pas. Dans ce contexte, on suppose que les incertitudes sont assimilables aux dispersions que nous avons déjà analysées, mais elles ne représentent que la fraction quantifiable de l'incertitude totale. L'origine de cette dispersion est multiple. Elle provient tout d'abord de la prise en compte de différents scénarios SRES, de l'utilisation de plusieurs modèles de climat et méthodes de désagrégation, et enfin, de plusieurs modèles hydrologiques. Dans cette section, nous essayons d'analyser l'incertitude associée à ces différents éléments.

Sur les deux bassins, nous disposons de 5 modèles hydrologiques, 3 méthodes de désagrégation, 7 modèles de climat, 2 scénarios SRES, et 2 périodes de calcul. L'ensemble des croisements possibles définit un total de $420 = 5 \times 3 \times 7 \times 2 \times 2$ cas, dont seulement 83 cas effectivement simulés sur le bassin de la Seine et 55 sur le bassin de la Somme. Pour analyser les incertitudes, et mieux quantifier les impacts, nous avons utilisé deux méthodes. La première, simpliste, consiste à calculer des moyennes et écart-types sur les simulations ayant un critère commun (exemple : même méthode de désagrégation, ou même modèle de climat). L'inconvénient de cette méthode est que les échantillons que l'on compare ont des tailles très différentes, que l'ensemble des cas possibles n'est pas disponible, et que les interactions entre les sources d'incertitudes ne sont pas prises en compte. La deuxième méthode consiste à reconstituer les données manquantes avant de calculer les moyennes et variances. Pour reconstituer les données, on se base sur la méthode des décompositions de Kendall et Stuart (1977), selon une méthodologie détaillée par Déqué et al. (2007). Cette méthode est brièvement présentée en annexe V2b. Afin de limiter le nombre de variables à reconstituer, nous avons réduit le nombre de cas possibles en supposant que les deux scénarios SRES, explorés dans notre étude par ARPEGE uniquement, ne définissent pas une source d'incertitude indépendante, mais plutôt une nouvelle version de ce modèle de climat. Ceci revient à considérer 8 modèles de climat, et un nombre de cas réduit à $240 = 5 \times 3 \times 8 \times 2$.

La Figure 12 illustre les résultats obtenus avec la méthode simpliste. Sur les deux bassins, les incertitudes les plus élevées (valeurs élevées en ordonnées) sont associées aux modèles de climat en fin de siècle. Les incertitudes les plus faibles sont associées aux scénarios SRES sur le bassin de la Seine, et aux modèles hydrologiques sur le bassin de la Somme.

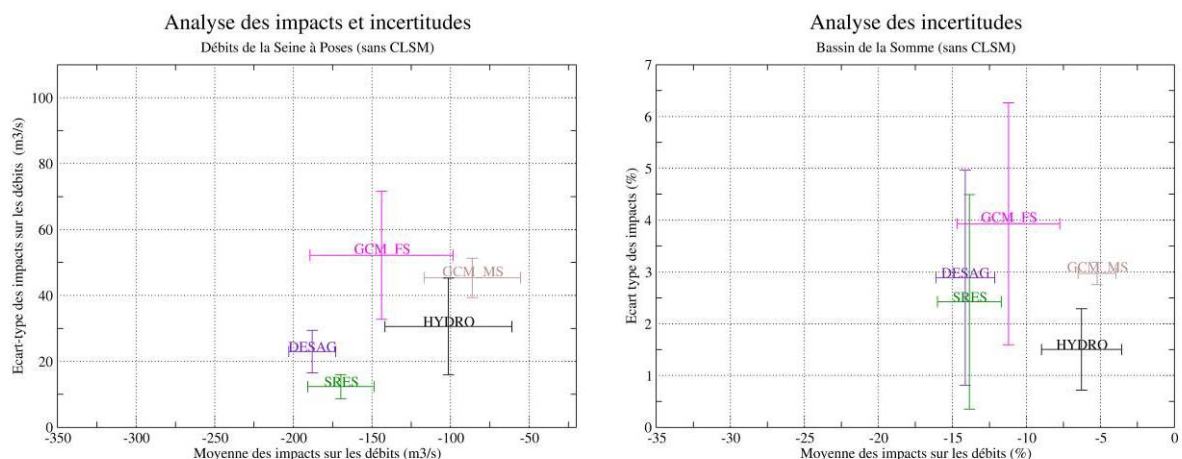


Figure 12 - Analyse des incertitudes sur la réponse des débits de la Seine et de la Somme au changement climatique. Moyennes (en abscisse) et écart-types (en ordonnée) des impacts sur les débits de la Seine à Poses (à gauche) et de la Somme à Abbeville (à droite) en m3/s en fonction des méthodes de désagrégation (DESAG), des scénarios SRES (SRES), des modèles de climat en milieu et fin de siècle (GCM-MS et GCM-FS respectivement), et des modèles hydrologiques (HYDRO). Les barres d'erreurs sont associées aux moyennes sur le sous ensemble des modèles hydrologiques.

Tableau 3 - Variance relative associée aux différentes sources d'incertitudes sur les bassins de la Seine et de la Somme (cf. annexe V2b).

	V(Hydro)	V(Période)	V(désagrégation)	V(GCM)
Seine	48	21	56	78
Somme	67	7	61	78

La deuxième méthode permet d'obtenir des résultats plus quantitatifs (voir annexe V2b). La reconstitution des données manquantes permet d'obtenir les résultats suivants : la diminution des débits sur la Seine atteint -129 ± 45 m³/s à l'horizon 2050 et -152 ± 59 m³/s à l'horizon 2100, soit une diminution de 24 à 28% des débits observés en temps présent. Sur la Somme à Abbeville, l'impact est de -10 ± 5 m³/s à l'horizon 2050 et -10 ± 6 m³/s à l'horizon 2100, soit une diminution de 29% des débits observés en temps présent. Ces résultats sont assez cohérents avec ceux que l'on obtient avec la méthode simpliste.

Le Tableau 3 présente les variances complètes (prenant en compte les interactions entre les différents éléments) associées aux 4 principales sources d'incertitudes qui ont été étudiées. Pour les deux bassins, l'incertitude maximale est associée aux simulations des modèles de climat. Cela semble assez logique, puisqu'on a pu voir dans le volet V1 que les résultats des GCMs sont assez dispersés, ce qui est lié à la grande complexité du système atmosphérique. La source d'incertitude la plus réduite est associée à la période étudiée. Cela est cohérent avec le fait que la majorité des impacts sont déjà subis à l'horizon 2050. Puis, les méthodes de désagrégation et les modèles hydrologiques semblent être à l'origine d'une incertitude relativement comparable. Or les incertitudes associées aux méthodes de désagrégation n'étaient pas prises en compte jusqu'à présent. On voit donc que même si on ne s'intéresse pas spécifiquement aux extrêmes, il est important de prendre en compte l'impact des méthodes de désagrégation pour estimer l'impact du changement climatique sur les débits.

V3. Analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes

Partenaires impliqués : Cemagref, Sisyphe, BRGM, Armines, CNRM.

L'objectif principal de ce volet est d'examiner l'évolution des extrêmes hydrologiques (crues et étiages sévères, et dans une moindre mesure, valeurs extrêmes des niveaux piézométriques) sous l'influence du changement climatique, en particulier pour les seuils à vertu réglementaire pour la gestion opérationnelle des eaux et la prévention des risques.

1. Variables analysées

Dans ce volet, nous avons exploité l'ensemble des simulations des modèles hydrologiques (CLSM ; EROS ; GARDENIA ; GR4J ; MODCOU ; SIM) appliqués sur les bassins de la Seine et de la Somme.

Les variables retenues pour décrire l'évolution des extrêmes ont été sélectionnées en raison de leur pertinence pour la gestion (variables dimensionnantes) et de la facilité de leur caractérisation automatique sur un grand nombre de chroniques. Pour décrire l'évolution de l'hydrologie de surface nous avons ainsi retenu :

- pour les crues : le quantile décennal des débits journaliers Q_{JXA10} obtenu par ajustement de l'échantillon à la loi de Gumbel sur un échantillon de maxima annuels et une durée caractéristique de crue D , estimées sur une forme de crue moyenne (Sauquet et al., 2008) ;
- pour les étiages : le débit mensuel minimal dans l'année de période de retour 5 ans de la branche sèche $QMNA5$, donné ici par la loi log-normale et le nombre moyen de jours par an au-dessus du seuil $QMNA5$, c'est-à-dire la fiabilité F , probabilité d'observer le système dans un état hors crise (Peters et al., 2005).

Les séries de hauteurs piézométriques ont la particularité d'être fortement auto-corrélées dans le temps. L'existence de stocks souterrains engendre un grand effet mémoire qui peut se faire sentir d'une année à l'autre. Les valeurs extraites – y compris les maxima ou minima annuels - sont donc peu adaptées à un traitement statistique classique car elles ne répondent pas à la propriété souhaitée d'indépendance. Nous avons donc choisi de caractériser la piézométrie par des quantiles des courbes des hauteurs classées.

Une des difficultés rencontrées vient de ce que le nombre de bassins simulés varie d'un modèle hydrologique à l'autre, si bien qu'il n'a pas été possible de définir un lot de stations traitées par tous les modèles. Neuf stations ont été traitées par les cinq modèles ; à l'opposé, 73 ont été traitées par un seul modèle. Finalement 160 bassins versants de la Seine et de la Somme ont été étudiés par au moins un modèle. Compte tenu de la diversité des échantillons, une approche régionale est apparue plus adaptée pour quantifier les évolutions. Elle a l'avantage de fournir une vision synthétique des grandes évolutions sur le secteur et les conclusions que l'on pourrait tirer sont, de fait, plus robustes / plus représentatives que celles issues d'une analyse locale isolée. Notons que nous avons regroupé dans les analyses qui suivent, les simulations des stations du bassin de la Somme, réalisées par GARDENIA, et celles de la Seine, obtenues par EROS. En effet, EROS et GARDENIA ont le même algorithme de simulation. EROS est cependant spatialisé. Dans la suite, nous n'avons conservé que les bassins simulés disposant de débits observés référencés dans la base de données HYDRO permettant la comparaison présent-futur (23 pour CLSM ; 46 pour EROS/GARDENIA ; 85 pour GR4J ; 125 pour MODCOU ; 60 pour SIM). Nous exploiterons les sorties de GARDENIA en 57 points pour examiner les évolutions de la piézométrie sur le bassin de la Somme, les autres modèles n'ayant pas fourni de valeurs.

Nous avons enfin choisi de caractériser le futur par fenêtres de 20 ans : nos échantillons seront ainsi formés de valeurs disponibles avant 2010 pour qualifier le temps présent, dans l'intervalle [2046-2065] pour qualifier le milieu de siècle et [2081-2100] pour qualifier la fin de siècle.

2. Analyse des débits restitués sous climat présent à l'échelle du bassin

Avant d'en venir au futur, nous avons examiné la capacité des modèles à reproduire ces variables dans les conditions actuelles. Cette étape est nécessaire pour mesurer la confiance à accorder aux prédictions issues de ces mêmes modèles dans le futur. En effet, il paraît peu probable qu'un modèle peu performant en conditions actuelles puisse fournir des simulations crédibles pour le futur. Cette vérification n'est cependant pas suffisante, et la pertinence des projections repose sur l'hypothèse, invérifiable actuellement, que les processus modélisés resteront dominants dans les conditions futures.

Nous nous sommes appuyés sur des critères d'efficacité dérivés du critère de Nash, calculés sur les débits bruts ou transformés (e.g. Oudin et al., 2006). Nous avons ainsi caractérisé la similitude entre débits observés et débits simulés en temps présent selon deux modalités de forçage météorologique : à partir des analyses SAFRAN afin de valider les modèles hydrologiques, et à partir des scénarios climatiques désagrégés « Temps présent » pour valider la chaîne scénarios + modèles.

Globalement, les débits mensuels moyens sont correctement restitués (l'erreur relative médiane est de l'ordre de 10% en janvier quel que soit le modèle) ; l'été est plus difficile à restituer, du fait notamment des influences anthropiques sur les écoulements. Les modèles finement distribués (MODCOU et SIM) fournissent globalement des reconstitutions un peu moins précises que les modèles semi-distribués ou globaux (GR4J, CLSM, GARDENIA), ce qui s'explique par le fait que des contraintes externes limitent les possibilités d'ajustement. Il s'agit notamment de la cohérence spatiale imposée dans ces modèles, de la nécessité de reproduire simultanément débits et niveaux piézométriques, et du fait également que les stations utilisées pour le calage sont beaucoup moins nombreuses que les mailles de ces modèles. Pour SIM enfin, une contrainte supplémentaire vient de que le bilan hydrique (ou fonction de production) n'est pas calé.

Les performances des modèles sont plus contrastées en ce qui concerne les extrêmes de débit :

- GR4J décrit correctement le régime hydrologique, que ce soit en crue ou en étiage, de par sa nature globale et l'efficacité de sa procédure de calage;
- EROS/GARDENIA a tendance à surestimer les débits d'étiage de l'ordre de 30% en moyenne sous scénarios temps présent, tout en ayant peu de dispersion par rapport aux étiages observés ; il s'agit d'un choix délibéré lors du calage (annexe V3) ;
- les débits simulés à partir des écoulements de CLSM en tenant compte de l'influence des barrages-réservoirs sont comparables aux débits observés et révèlent des difficultés à reproduire les étiages ;
- MODCOU et SIM, fournissent des résultats acceptables même s'ils peinent à reconstituer des étiages soutenus et les crues des bassins très productifs, ce que l'on peut résumer par un comportement un peu trop « tamponné ».

Les modèles proposent enfin des répartitions entre écoulements de base et ruissellement de surface différentes (sur la base du calcul du BFI, base flow index), ce qui présage des réponses différenciées sous changement climatique.

Du fait des différences d'efficacité et de structure des modèles, nous nous attendons à des réponses différentes sous scénarios climatiques. Elles sont en l'état toutes acceptables, et à l'issue de l'analyse sous scénarios « temps présent », il n'y a pas de bonnes ou mauvaises raisons pour éliminer un des modèles hydrologiques sur la seule base des analyses ci-dessus.

3. Analyse des débits restitués sous changement climatique à l'échelle du bassin

Sur l'ensemble des stations des deux bassins, la réponse au changement climatique des valeurs extrêmes du débit (Figure 13) est un peu plus contrastée que celle de l'hydrogramme moyen à l'exutoire (Figure 8), puisque les $QMNA5$ baisseraient fortement, alors que les $QJXA10$ ne changeraient pas significativement.

La tendance à une sévérité accrue et un allongement des étiages est partagée par tous les modèles. Ce dernier se traduit par une baisse de la fiabilité, et il faut donc s'attendre à des restrictions d'usage plus fréquentes qu'aujourd'hui. En fin de siècle, le quantile $QMNA5$ pourrait diminuer de 40 % sous scénario A1B et de plus de 50 % sous scénario A2 (estimations médianes établies à l'échelle régionale tous modèles hydrologiques confondus exceptés CLSM, au comportement jugé « outlier »). Cette réduction est supérieure aux incertitudes actuelles pesant sur ce quantile dues aux seules fluctuations d'échantillonnage.

On note l'absence de tendance significative sur les crues, que ce soit sur la dynamique ou sur l'intensité, avec des changements modérés sans cohérence de signe. Les quantiles $QJXA10$ évoluent entre -10 et +10% en milieu de siècle, ces évolutions étant inférieures ou équivalentes à l'incertitude actuelle (l'intervalle de confiance à 95% autour du $QJXA10$ est entre -12% et +25% de la valeur centrale du seul fait des fluctuations d'échantillonnage). En fin de siècle, le nombre de stations avec des diminutions du $QJXA10$ est plus important qu'en milieu de siècle, mais la dispersion et les incertitudes restent élevées. La durée des crues varie peu sous changement climatique.

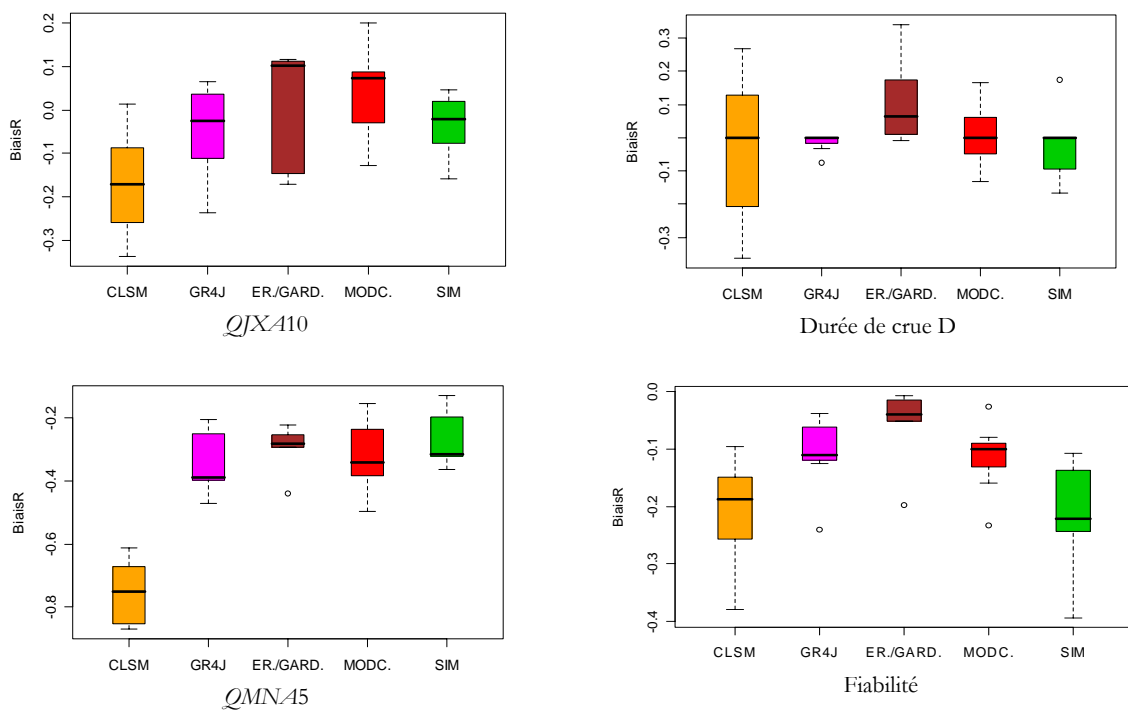


Figure 13 – Ecart relatif médian entre les valeurs temps présent et milieu de siècle des variables retenues pour caractériser des extrêmes du débit dans l'ensemble des stations du domaine RExHySS.

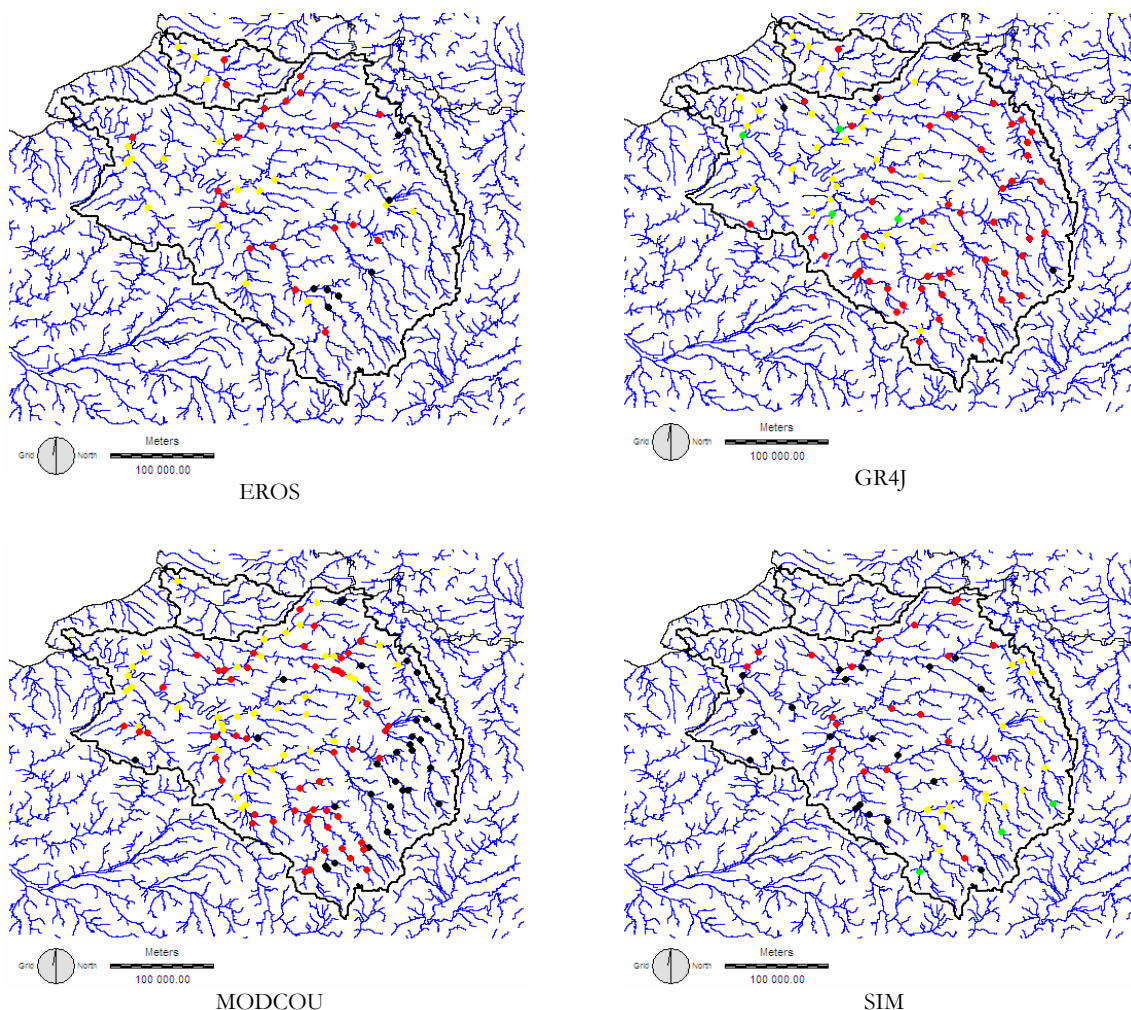


Figure 14 - Carte des évolutions du $QMNA5$ médian des scénarios A1B milieu de siècle en relatif par rapport au $QMNA5$ médian des scénarios correspondants sous temps présent (● supérieure à -10% ; ● entre -10 et -25% ; ● entre -25 et -50% ; ● inférieure à -50%). CLSM est exclu à cause du faible nombre de stations traitée et de son biais sur les étiages.

La spatialisation des résultats fait apparaître des évolutions différenciées des étiages selon le secteur (Figure 14). On retrouve une organisation concentrique qui rappelle les fonctionnements hydrogéologiques actuels, lesquels sont pris en compte différemment par les modèles d'où des réponses différentes pas forcément cohérentes.

Ces tendances sur les très faibles débits sont conformes aux évolutions analysées sur les régimes hydrologiques (V2), notamment sur les intensités des changements qui restent encore incertaines (fonction du modèle hydrologique et du scénario). Parmi les modèles hydrologiques, CLSM fournit des résultats extrêmes, sujets à caution. Les scénarios A2 semblent malgré tout plus extrêmes que les scénarios A1B en fin de siècle, bien que cette analyse soit limitée par le nombre de scénarios A2 plus faible que celui des A1B.

Il convient enfin de rappeler que cette étude reste malgré tout un exercice théorique. Nous n'avons pas inséré d'évolution d'occupation du sol, des usages... Nous accédons ici à la réponse hydrologique aux évolutions du climat toutes choses égales par ailleurs. La part d'anthropisation est non négligeable en période d'étiage lorsque les modifications dues aux actions humaines représentent une proportion non négligeable des écoulements. Nous savons que la manière dont évolueront les pressions conditionnera certainement fortement le devenir des étiages. Cela reste une part non négligeable des incertitudes sur cet aspect du régime hydrologique (en partie traité dans les volets V4b et V5).

4. Analyse des débits futurs de la Seine à Paris et de la Somme à Abbeville

En complément des analyses menées à l'échelle régionale, les évolutions des extrêmes hydrologiques de la Seine à Paris et de la Somme à Abbeville ont été examinées en détail. Cinq (resp. trois) modèles ont simulé les débits de la Seine à Paris (resp. de la Somme à Abbeville).

La variable $QMNA5$ présente une évolution à la baisse au cours du siècle (Figure 15). A Paris, elle serait de l'ordre de -30% à l'horizon 2080-2100, quel que soit le modèle hydrologique (hors CLSM, Figure 15a), les prévisions les plus pessimistes affichant une réduction de -45% (elles concernent un des scénarios A2). Cette évolution du $QMNA5$ de la Seine à Paris est similaire à celle observée sur le débit annuel moyen plus en aval à Poses (V2.4), indiquant qu'il n'y a pas d'amplification nette sur les étiages sévères à ce niveau du réseau hydrographique. Le bassin de la Seine à Paris est intégrateur (il couvre 43 800 km² sur les 80 000 km² des deux bassins examinés). Il est donc un bon témoin du comportement observé à l'échelle globale du secteur. Nous y retrouvons des tendances équivalentes aux médianes calculées sur l'ensemble des stations.

A Abbeville, les évolutions possibles du $QMNA5$ de la Somme sont très cohérentes entre les modèles en milieu de siècle, entre -30% et 0 (Figure 15b). Les modèles diffèrent davantage en fin de siècle avec des réponses un peu plus extrêmes par GR4J. Selon ce modèle, les effets du changement climatique seraient plus accentués sur les étiages sévères que sur les débits annuels.

Notons enfin que le scénario GM suggère en fin de siècle une absence de changement à ces stations. Ce scénario est atypique (le seul à anticiper une augmentation des précipitations annuelles en fin de siècle) et se démarque de la tendance centrale sur les résultats de SIM, MODCOU, GR4J et CLSM.

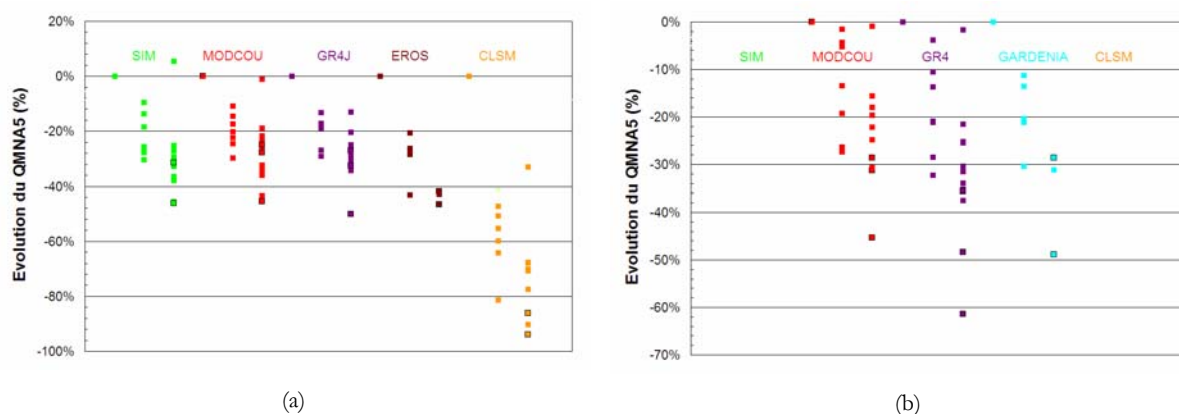


Figure 15 - Evolution du $QMNA5$ simulé pour la Seine à Paris (a) et pour la Somme à Abbeville (b). Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés sous scénarios désagrégés temps présent. Les points entourés en noir correspondent aux scénarios A2. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent (0% de changement relatif quel que soit le scénario), la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle.

Pour le quantile de crue décennale $QJXA10$, il n'y a pas d'évolution significative sur la Seine à Paris (Figure 16a). En milieu de siècle, nous dénombrons autant de scénarios annonçant une augmentation que de scénarios suggérant une baisse. Une légère réduction du $QJXA10$ est perceptible en fin de siècle, où les crues décennales seraient semblables aux crues ayant actuellement une période entre 3 et 8 ans. En parallèle, la valeur actuelle de $QJXA10$ serait donc plus rarement dépassée en fin de siècle. Les conclusions sont similaires pour la Somme à Abbeville (Figure 16b), même si le risque d'accroissement des crues décennales y semble plus faible, tant en milieu qu'en fin de siècle.

La différence d'évolution des crues de la Seine à Paris et des crues de la Somme à Abbeville est la conséquence d'une typologie des crues fortes différenciée. L'essentiel des crues de la Seine à Paris se forme sur les affluents Yonne, Aube, Marne et Seine en amont, conséquences de pluies intenses sur le Morvan. Les crues de la Somme sont des crues de nappes ; c'est l'évolution de ces dernières qui pilote la réponse hydrologique future (voir ci-dessous).

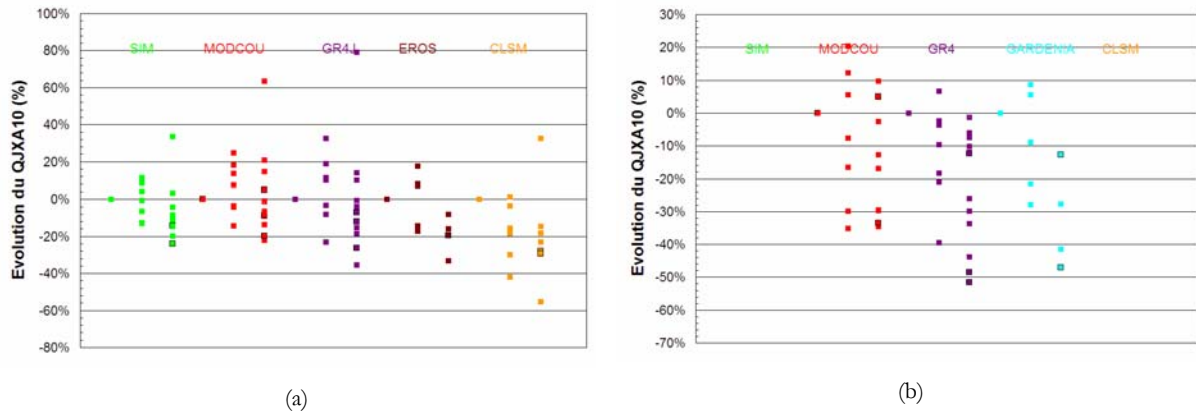


Figure 16 - Evolution du $QJXA10$ simulé pour la Seine à Paris (a) et pour la Somme à Abbeville (b). Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés sous scénarios désagrégés temps présent. Les points entourés en noir correspondent aux scénarios A2. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent (0% de changement relatif quel que soit le scénario), la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle.

5. Devenir de la piézométrie sur le bassin de la Somme

Nous n'avons disposé que des hauteurs piézométriques simulées par le modèle GARDENIA. Nous avons d'abord vérifié que ce modèle reproduisait de manière satisfaisante les hauteurs piézométriques observées. Notons que les séries d'observations comportent beaucoup de lacunes et donc la vérification ne concerne qu'une partie de la variabilité du signal. Les boîtes à moustache de la Figure 17 montrent la réponse piézométrique au changement climatique pour l'ensemble des scénarios disponibles (A1B milieu de siècle et A2 fin de siècle), sur les hauteurs Q05, Q20, Q80 et Q95, dépassées 5%, 20%, 80% et 95% du temps. Q05 et Q20 sont représentatifs des hauts niveaux et Q80 et Q95 des bas niveaux atteints par les nappes.

La Figure 17 montre une baisse significative des hauteurs piézométriques sous changement climatique. Elle apparaît au milieu du siècle sur les scénarios A1B et s'accroît en fin de siècle sur les scénarios A2. Les valeurs hautes des piézomètres (Q05) sont plus affectées que les valeurs basses (Q95), avec une incertitude (matérialisée par les extrémités des boîtes à moustache) plus importante pour ces valeurs plus élevées. Conformément aux résultats du volet V2.2, ces Q05 se retrouvent dans les piézomètres dont le niveau moyen actuel est élevé, localisés sur les plateaux crayeux, par opposition au fond des vallées.

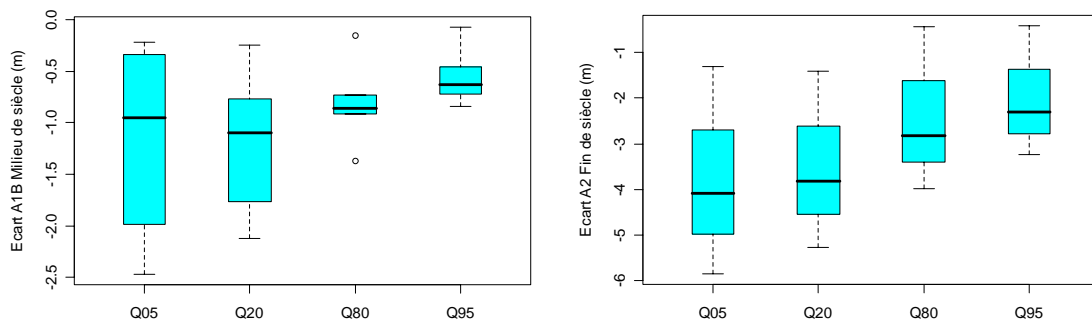


Figure 17 - Evolution des quantiles de niveaux piézométriques dans le bassin de la Somme selon GARDENIA. Les écarts sont évalués par rapport aux résultats sous scénarios désagrégés temps présent. Les scénarios A1B fin de siècle n'ont pas été simulés par ce modèle.

III. CONSEQUENCES SUR LES ACTIVITES SOCIO-ECONOMIQUES

A l'origine du projet, nous anticipions que le changement climatique pourrait augmenter les débits de référence associés aux crues sévères, et le volet V4 était ciblé sur une analyse de l'impact du changement climatique sur l'extension des inondations dans des zones clés des bassins à l'aide de modèles hydrauliques dédiés (vallée de la Somme en amont d'Abbeville ; corridor fluvial de la Seine, incluant Paris et plaine alluviale de la Bassée).

L'analyse des extrêmes du débit dans le volet V3 a cependant montré que, dans le cadre des hypothèses faites (scénarios désagrégés et modèles hydrologiques), les changements des crues « décennales » (sur la base de l'analyse du *QJXA10*) étaient modérés 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 (voir ci-dessus et annexe V3).

La cartographie de l'extension de crues nécessite un effort important qui a paru inutile en regard de ces résultats. Pour répondre à la problématique initiale de mieux comprendre la vulnérabilité des activités humaines aux impacts physiques des changements climatiques analysés dans la partie II, nous avons plutôt choisi de réorienter les objectifs de ce volet V4 :

- sur la vallée de la Somme (V4a), nous sommes restés focalisés sur les inondations, mais l'étude a porté sur l'impact de l'augmentation du niveau moyen de la mer liée au changement climatique;
- sur le bassin de la Seine (V4b), l'étude a porté sur les conséquences potentielles du changement climatique sur les défaillances des débits d'étiages. Celles-ci correspondent aux situations où les débits tombent sous une valeur seuil (souvent le *QMNA5* actuel) et révèlent des périodes de tension entre les différents usages de l'eau (y compris les usages « naturels », associés au maintien de débits réservés). On parle aussi de situations de stress hydrique, au sens de Falkenmark et al. (1989). Ces défaillances ont été analysées dans le volet V3 en régime naturel et le volet V4b abordera l'impact du changement climatique sur les défaillances des débits influencés par les activités humaines.

L'étude sur la Seine s'intéresse donc principalement aux étiages et présente de fortes connexions avec le volet V5 du projet traitant des impacts du changement climatique sur l'irrigation. Pour une meilleure cohérence, les volets V4 et V5 ont donc été fusionnés, ce qui permet de donner un aperçu de quelques conséquences potentielles du changement climatique sur les activités humaines. Il faut cependant souligner que dans tous les cas étudiés, la capacité d'adaptation humaine (i.e. la stratégie de réponse des acteurs et des gestionnaires, que ce soit en anticipant ou en réagissant) est ignorée ou extrêmement simplifiée. Ainsi, les études proposées suivent une approche de premier ordre « toutes choses égales par ailleurs », comme c'est souvent le cas dans ce type d'étude d'impact (Tol et al., 1998).

V4a. Inondations de la Somme aval

Partenaires impliqués : SOGREAH, Sisyphe.

1. Problématique et démarche

Dans la vallée de la Somme, le niveau marin a un impact fort sur les hauteurs d'eau dans la rivière et donc sur les inondations. En effet, l'exutoire du canal maritime de la Somme se trouve au niveau de l'écluse de Saint-Valéry-sur-Somme, en Baie de Somme. En fonctionnement normal, les ouvrages supérieurs et inférieurs de l'écluse sont manœuvrés afin d'éviter une vidange trop importante du canal à marée basse d'une part, et l'intrusion d'eau dans le canal maritime à marée haute d'autre part. Cette obligation de fermer l'écluse à marée haute peut ainsi conduire à limiter l'évacuation des eaux du canal maritime en période de crue de la Somme, et ce d'autant plus que le niveau moyen de la Manche en Baie de Somme est élevé.

Or, le niveau moyen global de la mer devrait augmenter de 0,18 à 0,59 mètres entre 1990 et 2100 selon les projections basées sur la gamme complète des scénarios d'émissions anthropiques du SRES

(GIEC, 2007). Ce relèvement sera principalement dû à la dilatation thermique des océans et à la perte de masse des glaciers et des calottes glaciaires. Comme la fourchette d'élévation en témoigne, il existe beaucoup d'incertitudes sur ce relèvement, tant sur son ampleur que sur sa distribution géographique. Sur la base des conclusions du GIEC (2007) pour les scénarios d'émissions anthropiques retenus dans les volets V1 à V3 (scénarios A1B et A2), nous avons défini deux scénarios d'élévation du niveau moyen de la Manche à l'horizon 2100 :

- Scénario optimiste, avec +0,20 m d'exhaussement du niveau marin;
- Scénario pessimiste, avec +0,51 m d'exhaussement du niveau marin.

Ces deux scénarios sont analysés par comparaison avec un scénario de référence qui correspond au niveau marin actuel. Pour chacun de ces scénarios maritimes, deux hydrogrammes ont été utilisés : celui de la crue de 2001 (crue historique, centennale à Abbeville) et celui de la crue de 1994 (crue décennale à Abbeville). Dans un souci de simplicité, ces crues historiques ont été préférées à des crues décennale ou centennale simulées sous scénarios de changement climatique, étant donné l'évolution très modérée du régime des crues révélée par le volet V3. Dans ce cadre, six simulations ont donc été réalisées et assorties de rendus cartographiques pour analyser l'impact du relèvement marin sur l'extension des zones inondées en vallée de Somme.

Le modèle hydraulique utilisé est le modèle numérique CARIMA-1D réalisé par SOGREAH (2005) pour le compte du Syndicat mixte d'aménagement hydraulique du bassin versant de la Somme. Les conditions limites imposées au modèle sont détaillées dans le rapport en annexe V4a. Notons que les travaux réalisés entre 2001 et 2005 à la suite des inondations de 2001 sont intégrés dans le modèle. Il s'agit soit de réfections ou de créations d'ouvrages (y compris sur l'écluse de Saint-Valéry, comme discuté ci-dessous), soit de modifications du lit de la Somme (rehausse de berges, modifications de profils en travers dans le lit mineur...).

2. Résultats

Pour les deux hydrogrammes testés, l'élévation du niveau marin conduit à un exhaussement de la ligne d'eau dans le lit mineur de la Somme sur 23 km entre Saint-Valéry-sur-Somme et Eaucourt-sur-Somme. La Figure 18 montre l'impact de cet exhaussement sur l'extension des zones inondées pour la crue de 2001. L'augmentation des niveaux d'eau touche des zones à enjeux du lit majeur (carte d'ensemble en annexe V4a):

- en rive gauche de la Somme, au droit de la gare d'Abbeville, de Rouvroy et des Planches, elle est de l'ordre de 2,5 cm (scénario optimiste) à 5 cm (scénario pessimiste) ;
- en rive droite de la Somme, au droit du marais St Gilles et du quartier St Gilles (sud d'Abbeville), elle atteint 5-10 cm (scénario optimiste) à 25 cm (scénario pessimiste) ;
- l'emprise des débordements sur le lit majeur le long du canal maritime et du contre-canal est également accentuée sous l'effet de l'élévation du niveau marin dû au changement climatique.

Pour la crue de 1994, l'augmentation des niveaux d'eau touche également des zones à enjeux du lit majeur, mais dans une moindre mesure que pour la crue de 2001 (cf. cartes en annexe V4a) :

- en rive droite de la Somme, au droit d'Abbeville, et notamment dans le quartier St Gilles, elle est de l'ordre de 2,5 cm (scénario optimiste) à 5 cm (scénario pessimiste) ;
- le long de la Somme au droit d'Epagne-Epagnette et d'Eaucourt-sur-Somme, avec une élévation de 1 à 5 cm, pour le scénario pessimiste uniquement.

Si une crue comparable à celle de 2001 (crue de nappe de longue durée) venait à survenir une nouvelle fois à la fin du 21^{ème} siècle, l'élévation du niveau marin, sous les hypothèses utilisées dans cette étude, conduirait donc à aggraver les inondations dans la ville d'Abbeville. Ce résultat repose sur la configuration actuelle de dimensionnement et de fonctionnement de l'écluse de Saint-Valéry-sur-Somme, qui n'est pas celle de la vraie crue de 2001.

En effet, d'importants aménagements ont été réalisés entre 2001 et 2005 sur les ouvrages hydrauliques de la vallée de la Somme afin d'améliorer l'évacuation des crues, avec notamment la création d'une passe supplémentaire sur l'ouvrage de Saint-Valéry-sur-Somme. Ces aménagements conduisent, sur la base du niveau marin actuel, à une baisse des volumes inondant sur les zones dites à enjeu qui sont de l'ordre de 890.10^3 m^3 pour la crue de 2001 et de 98.10^3 m^3 pour la crue de 1994. En comparaison,

l'augmentation de volume inondant sur ces zones à enjeu dû à l'élévation du niveau marin sous changement climatique selon l'hypothèse pessimiste retenue est de l'ordre de 91.10^3 m^3 pour la crue de 2001, soit 10 % du volume total gagné suite aux aménagements de 2001 ; et de 22.10^3 m^3 pour la crue de 1994, soit 22 % du volume total gagné suite aux aménagements de 2001. L'élévation du niveau marin dû au changement climatique, même selon l'hypothèse pessimiste retenue dans ce projet (+0,51 m), est donc loin de conduire à des inondations comparables à celles de 2001 et 1994 pour leurs conditions hydrologiques respectives.

Notons enfin que hors période de crue, l'élévation du niveau marin pourrait également conduire à revoir le fonctionnement de l'écluse de Saint-Valéry-sur-Somme et augmenter ainsi le temps de fermeture des ouvrages à marée haute et le nombre de manœuvres par an, mais cet impact n'a pas été évalué.

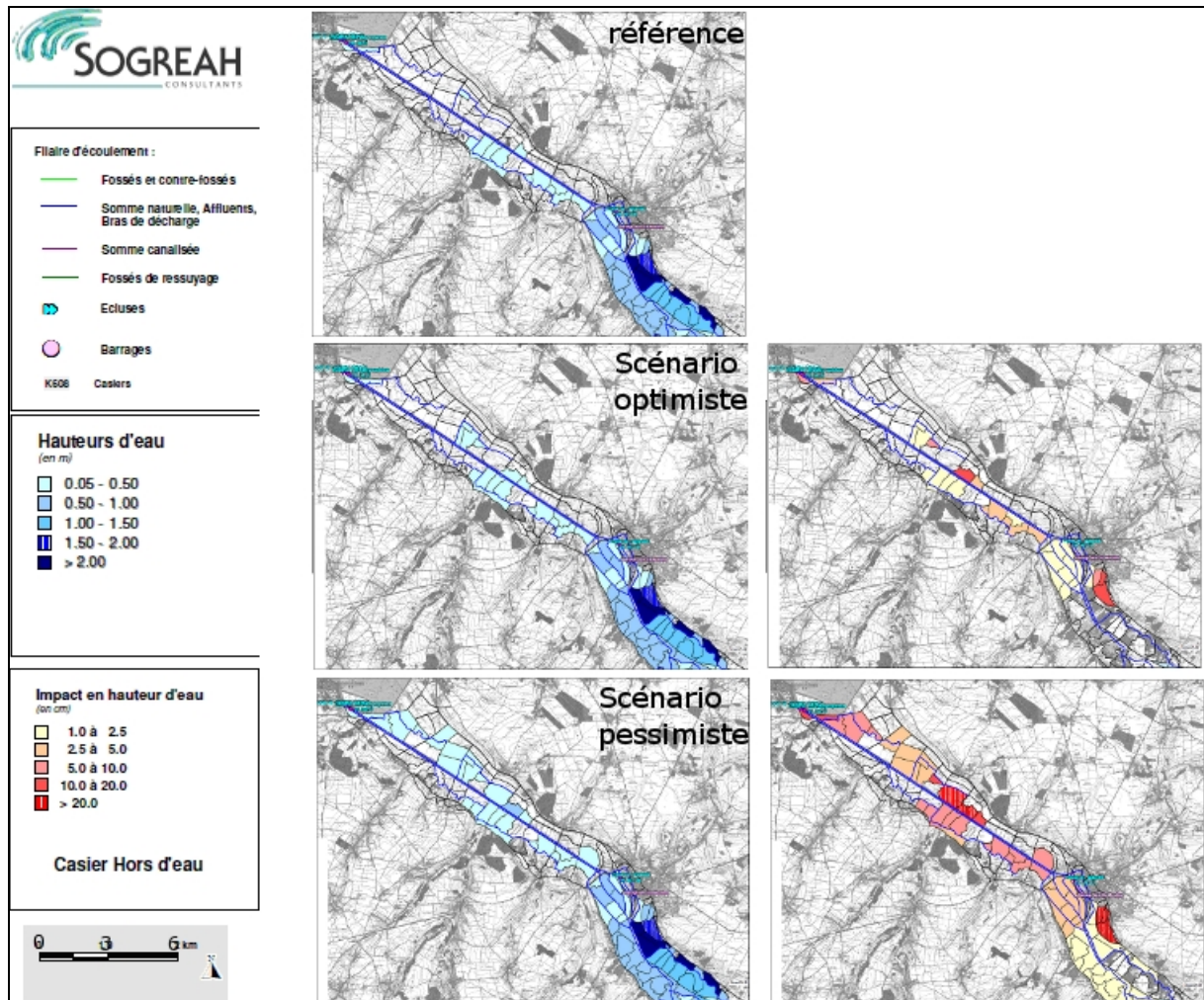


Figure 18 - Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de 2001 et impact en hauteur d'eau entre les scénarios de relèvement du niveau marin et la situation de référence.

V4b. Défaillances des débits d'étiage anthropisés

Partenaires impliqués : Hydratec, Armines, Sisyphe.

1. Problématique et démarche

Le bassin de la Seine se caractérise par une importante vulnérabilité aux extrêmes et à leurs changements, du fait de la forte emprise des activités humaines sur les corridors fluviaux. L'équilibre entre les différents usages de la ressource en eau est de ce fait fragile et l'augmentation de la fréquence d'étiages sévères, ou défaillance, sous l'effet du changement climatique (identifiée dans le volet V3) est susceptible de menacer cet équilibre. En parallèle, l'évolution des prélèvements et consommations (i.e. la

part des prélèvements qui n'est pas restituée à l'hydrosystème, en surface ou en souterrain) fait craindre une augmentation accrue de la fréquence des situations de défaillance. L'objectif de ce volet est de donner des éléments de réponse quant à l'influence du changement climatique sur l'évolution des défaillances, en combinant ses influences indirectes sur certaines pressions anthropiques à son influence directe sur les débits et ressources en eau souterraines.

La méthodologie s'appuie sur l'approche développée par Hydratec en 2007 pour le compte de l'Agence de l'eau Seine-Normandie (Maurel et al., 2008). Elle a été modifiée pour tenir compte du contexte de changement climatique, comme détaillé en annexe V4b.

Nous avons commencé par construire des chroniques de débits « anthropisés » sous scénarios climatiques. On part des débits simulés par le modèle hydrogéologique MODCOU, qui sont assimilables à des débits « non influencés ». Nous avons retenu les débits simulés sous deux scénarios milieu de siècle, qui sont assez représentatifs des évolutions possibles des précipitations à cet horizon, que nous avons préféré à l'horizon fin de siècle pour rester le plus cohérent possible avec l'absence d'évolution de certaines influences anthropiques. Le scénario RC1 correspond à une baisse importante des précipitations annuelles et estivales, alors que le scénario GM décrit au contraire des précipitations annuelles et estivales proches des valeurs temps présent et une augmentation des précipitations hivernales (Figure 5).

On distingue ensuite deux types d'influences anthropiques, celles qui dépendent du changement climatique et celles qui n'en dépendent pas, ou plutôt dont il est difficile de quantifier l'évolution, qu'elle soit liée au climat ou pas. Nous avons ainsi supposés inchangés :

- les règles de gestion des barrages-réservoirs de l'IIBRBS², après concertation avec les gestionnaires de cet organisme. Notons cependant que ces règles sont appliquées à des débits simulés sous scénarios de changement climatique, et que les prélèvements et restitutions correspondants ont donc des statistiques différentes des prélèvements et restitutions actuels ;
- les prélèvements pour les usages industriels et l'alimentation en eau potable (AEP), en nappe et en surface, estimés aux valeurs renseignées dans la base de données de redevances de l'Agence de l'Eau Seine Normandie pour 2004. L'influence prise en compte est celle des consommations, déduite des prélèvements par des coefficients sectoriels (Maurel et al., 2008).

En revanche, nous avons fait dépendre du climat :

- le volume des prélèvements agricoles pour l'irrigation. Comme dans le volet V5, la surface irriguée est supposée inchangée par rapport à 2004, mais les prélèvements, supposés égaux aux consommations, évoluent en fonction des besoins des cultures, qui sont approximés au pas de temps mensuel par le déficit ETP-pluie (voir annexe V4b pour les détails) ;
- l'impact des prélèvements dans les nappes, que ces prélèvements dépendent ou pas du climat futur. On se base sur la notion de ressource disponible, qui correspond à la part de la ressource souterraine qui peut être exploitée sans affecter l'étiage des cours d'eau exutoires. Au contraire, tout prélèvement au delà de cette limite se répercute sur les débits de ces cours d'eau. Comme justifié dans Maurel et al. (2008), cette ressource disponible est estimée à 20 % de la recharge annuelle (ici simulée par le modèle MODCOU pour les différents scénarios climatiques) pour les nappes intensément exploitées (représentées en couleur sur la Figure 19). On la suppose nulle dans les nappes alluviales (i.e. tout prélèvement dans ces nappes étroitement connectées aux cours d'eau influence les débits) et infinie ailleurs (pas d'impact des prélèvements en nappe).

² Les trois principaux barrages-réservoirs ont été construits en dérivation de la Seine, de la Marne et de l'Aube, sur une auréole argileuse imperméable (la formation géologique du Gault), à environ 200 km à l'amont de Paris, entre 1966 et 1990. Le quatrième, le barrage réservoir de Pannecière, achevé en 1949, est situé sur la haute vallée de l'Yonne. Le volume global pouvant être stocké dans ces lacs-réservoirs et géré par l'IIBRBS (Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine) est de près de 805 millions de m³ (Viennot et al., 2009). Si ces lacs et barrages permettent un écrêtement des crues, sensible à l'échelle régionale, celui-ci reste toutefois limité en Seine Aval étant donné leur éloignement. Là, leur rôle majeur est le soutien du débit d'étiage en fin d'été et en automne, avec des restitutions pouvant dépasser 60 m³/s, ce qui revient par exemple à doubler le débit d'étiage à Paris lors des périodes d'étiage sévère (Meybeck et al., 1998).

Dans ce cadre, l'impact du changement climatique passe par la baisse de la ressource disponible (volets V2 et V5) ce qui entraîne une influence accrue des prélèvements en nappe sur les débits. Cette méthode est beaucoup plus simple que celle réalisée dans le volet V5 grâce au modèle MODCOU, où la ressource souterraine et ses modifications par l'irrigation sont traitées explicitement. En revanche, on aborde ici l'ensemble des influences anthropiques sur les débits.

Cette démarche a été déclinée pour les scénarios GM et RC1 en temps présent (1961-2000) et milieu de siècle (2045-2065). Nous avons ensuite caractérisé les situations de défaillances pour ces quatre chroniques de débit en certains points clé du réseau hydrographique (Tableau 4). Les défaillances sont définies par la baisse du débit sous un seuil de référence Q_{seuil} , défini comme le $QMNA5$ associé aux débits actuels anthropisés (débits de la Banque Hydro avec reconstitution des lacune et homogénéisation par rapport à l'anthropisation, c.f. Maurel et al., 2008). Le principal indicateur est la moyenne annuelle des jours de défaillance, analysé ci-dessous, et complété en annexe V4b par les moyennes annuelles de fréquence et durée des épisodes de défaillance.

2. Résultats

L'analyse en temps présent (1961-2000) permet d'évaluer les incertitudes affectant la méthodologie générale. Le Tableau 4 montre d'abord que les Q_{seuil} ($QMNA5$ déduits des débits anthropisés reconstitués) sont logiquement très proches des $QMNA5$ directement fournis par la Banque HYDRO (débits observés). Le Tableau 4 montre ensuite une surestimation du nombre de jours de défaillance calculés à partir des débits anthropisés sous scénarios climatiques temps présent par rapport aux débits anthropisés reconstitués, particulièrement nette aux stations exutoires de « petits » bassins versants. Ces erreurs proviennent probablement des imperfections inévitables des simulations MODCOU, telles qu'analysées sur les étiages temps présent, qu'ils soient simulés à partir des forçages SAFRAN ou des scénarios temps présent (annexe V3). La hiérarchie des stations en fonction du nombre de jours de défaillance est cependant bien rendue, et les secteurs les plus touchés par les défaillances sont correctement identifiés. La Seine et l'Yonne amont (à Méry/Seine et Croully) et les affluents rive gauche de la Seine aval (à Louviers et Pont-Authou) présentent un nombre de jours moyen annuel de défaillance déjà très important en temps présent, avec des périodes de défaillance occasionnelles mais très longues (jusqu'à 2 mois pour le scénario RC1). A contrario, sur l'Eure et la Risle, le stress est plus dû à la fréquence élevée des situations de défaillance qu'à leur durée (10 à 15 jours). Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux obtenus lors de l'étude réalisée pour le compte de l'Agence de l'Eau Seine Normandie (Maurel et al., 2008).

Cette analyse montre qu'il convient de rester prudent quant aux interprétations sur les défaillances de certaines stations sous scénarios climatiques. En conséquence, l'analyse de l'évolution des défaillances sous changement climatique a été effectuée en relatif par rapport à la situation en temps présent, pour chacune des stations et des simulations climatiques, ce qui permet de débiaiser dans une certaine mesure les résultats.

Dans ce cadre, le changement climatique de milieu de siècle se caractérise par des défaillances plus longues et plus fréquentes qu'en temps présent pour la plupart des stations (Figure 19), ce qui correspond à un stress hydrique accru pour les activités humaines. Cet impact est particulièrement fort sur l'Aisne à Soissons, tant au niveau du nombre de jours moyen de défaillance (+900% à +1600%), qu'au niveau de la durée moyenne des épisodes de crise (+900% à +750%), et ce pour les deux hypothèses climatiques. D'une manière générale, l'Oise et l'Aisne, et donc la Seine à Poissy à l'aval de la confluence sont les plus touchées par le changement climatique, comparativement au temps présent.

Malgré leur convergence sur ces résultats, les deux scénarios climatiques fournissent des réponses sensiblement différentes. L'évolution climatique prévue par RC1 est ainsi plus sévère que celle prévue par GM en ce qui concerne le nombre de jours moyens annuels passés sous les débits seuil : il est plus que doublé selon RC1 (+125%), mais moins que doublé selon GM (+75%). Ces différences s'expliquent logiquement par les différences de réponse des précipitations entre ces deux scénarios de changement climatique, délibérément contrastés sur ce point. La durée moyenne des épisodes de stress hydrique est en revanche plus impactée selon le scénario GM (+50%) que selon RC1 (+35%). Schématiquement et globalement, l'augmentation du stress hydrique prévu par RC1 se traduit donc

plutôt par une augmentation de la fréquence des défaillances, alors que pour GM, c'est plus la durée des épisodes de crise qui est allongée.

En conclusion, cette analyse montre une augmentation des défaillances calculées sur les débits anthropisés sous l'influence du changement climatique du milieu de siècle, et ceci même sous un scénario optimiste (GM avec une baisse minimale des précipitations annuelles et estivales et une augmentation des précipitations hivernales, voir Figure 5). La démarche ne permet cependant pas de séparer quelle part de cette augmentation est attribuable à la baisse des débits, et quelle part est attribuable aux pressions anthropiques. La comparaison avec les résultats du volet V3 ne renseigne pas davantage sur cette question, car les défaillances ne sont pas caractérisées par rapport aux mêmes seuils (il s'agit des débits anthropisés reconstitués à partir des débits observés dans ce volet V4b, mais des débits simulés sous scénarios temps présent en V3, et assimilables à des débits naturels).

Tableau 4 - Stations sélectionnées, débits de référence associés, et défaillances identifiées en temps présent pour différentes sources de débit (observés selon la Banque HYDRO, simulés sous scénarios RC1 et GM en tenant compte de l'influence anthropique).

Grand Bassin	Station	Cours d'eau	Débit de référence (m ³ /s)		Nb de jours annuels de défaillance (débit < Qseuil)		
			QMNA5 HYDRO	Qseuil	Débits observés	Scénario RC1	Scénario GM
OISE AISNE	Soissons	Aisne	NA	12	8	3	1
	Sempigny	Oise	9	9	22	38	33
	Creil	Oise	31	39	41	31	26
MARNE	Châlons-en-Champagne	Marne	10	16	35	37	35
	Ferté-sous-Jouarre	Marne	11	21	6	37	36
	Gournay-sur-Marne	Marne	32	28	10	42	41
SEINE AMONT	Arcis-sur-Aube	Aube	5	5	15	2	0
	Méry-sur-Seine	Seine	7	6	15	86	68
	Pont-sur-Seine	Seine	24	18	3	56	44
	Courlon	Yonne	23	26	33	119	104
SEINE MOYENNE	Épisy	Loing	5	5	25	0	0
	Sainte-Assise	Seine	NA	60	4	56	40
	Alfortville	Seine	64	70	31	74	54
	Paris	Seine	80	86	24	47	35
SEINE AVAL	Poissy	Seine	170	168	22	46	35
	Pont-Authou	Risle	6	6	34	108	101
	Louviers	Eure	14	15	41	96	89
Moyenne sur les 17 stations			32	34	21	41	51

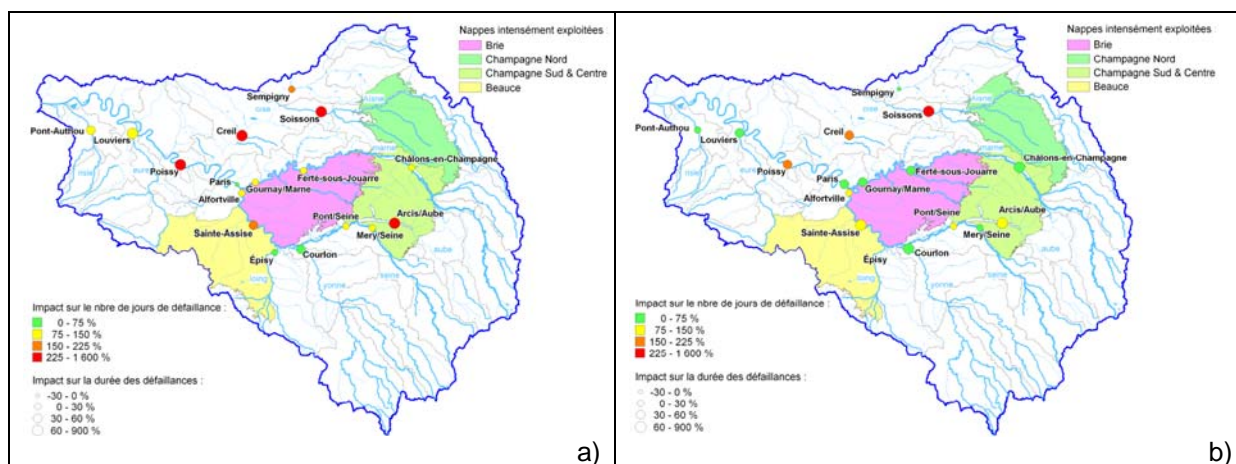


Figure 19 - Impact du changement climatique milieu de siècle sur les défaillances des débits anthropisés selon les scénarios de changement climatique RC1 (a) et GM (b). Augmentations relatives par rapport aux scénarios temps présent correspondants.

V5. Irrigation et ressources en eau souterraines

Partenaires impliqués : Armines, Sisyphe.

1. Problématique et démarche

Actuellement, plus de 90% des prélèvements pour l'irrigation dans le bassin de la Seine s'effectuent en formations aquifères (Tableau 5), qui contribuent largement au débit des cours du bassin (80% en hiver et 40% en été sur l'ensemble du bassin selon Rousset et al., 2004), et qui sont également exploitées pour d'autres usages, comme l'alimentation en eau potable (AEP) ou les activités industrielles.

Cette ressource partagée est directement menacée par le changement climatique, comme le montre la baisse des niveaux piézométriques dans le bassin (V2.2, Figure 9), et l'irrigation peut être un facteur amplificateur, en particulier dans les zones les plus irriguées comme la Beauce, où les prélèvements sont déjà limités par arrêté préfectoral pour protéger la ressource en eau. Le changement climatique se traduit en effet dans le bassin de la Seine par une augmentation du stress hydrique de la végétation (V2.3) susceptible d'accroître les prélèvements pour l'irrigation. Notons que l'analyse conduite en V2 néglige tout changement de la végétation dû au changement climatique (baisse de la résistance stomatique et augmentation de la surface foliaire sous teneur atmosphérique accrue en CO₂ ; raccourcissement des cycles culturaux suite au réchauffement) dont la résultante à l'échelle des parcelles et des bassins versants est complexe et probablement faible (e.g. Kergoat et al., 2002).

En millions de m ³ (2001)	Eau de surface	Eau souterraine	Total
Collectivités locales (AEP)	788	900	1688
Centrales thermiques	537	-	537
Industries	493	220	713
Irrigation	7	150 *	157
Volume global	1825	1270	3095

Tableau 5 – Prélèvements d'eau par secteur et par origine (eaux de surface et eaux souterraines) dans le bassin de la Seine. Valeurs de 2001, en Mm³/an, selon l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. * Valeur estimée, entre la valeur sans doute sous-estimée de 80 Mm³/an en 2001 et celle de 200 Mm³/an en 2003. L'ensemble est cohérent avec les données pour 2004 (Maurel et al., 2008) utilisées dans le volet V4b.

Dans ce contexte, des questions importantes en ce qui concerne la vulnérabilité et l'adaptation du secteur agricole au changement sont d'estimer si un accroissement des prélèvements pour l'irrigation (passant éventuellement par la création de nouveaux forages) resterait compatible avec la préservation du débit de base des rivières et les autres usages de l'eau, ou si, au contraire, les effets directs du changement climatique sur la recharge pourraient à eux seuls remettre en cause la viabilité de l'irrigation.

Nous avons abordé ces questions à l'échelle du bassin de la Seine, en privilégiant la région de la Beauce, où ces questions se posent de manière exacerbée par l'importance actuelle de l'irrigation, et nous nous sommes appuyés sur le couplage d'un modèle agronomique et d'un modèle hydrogéologique (Gomez, 2002). Le modèle agronomique STICS, développé par l'INRA (Brisson et al., 2009), permet de calculer les doses optimales d'irrigation pour assurer un certain rendement à l'ensemble des cultures présentes sur le bassin. Notons qu'il prend en compte les diverses influences du changement climatique sur la végétation négligées par les modèles hydrologique du volet V2. Le modèle hydrogéologique MODCOU, développé à l'Ecole des Mines de Paris (Ledoux et al., 1980), permet de simuler le comportement hydrodynamique du bassin dans tous les compartiments souterrains (bilan hydrique du sol, zone non saturée, formations aquifères).

2. Capacités du modèle STICS pour évaluer les besoins en irrigation

Nous avons commencé par analyser les volumes d'irrigation calculés par STICS sous climat actuel, en supposant que toutes les cultures à l'exception de la vigne et de la prairie sont susceptibles d'être irriguées. Les doses potentielles d'irrigation ainsi calculées sont du même ordre de grandeur que celles

réellement observées sur le bassin de la Seine (de 50 à 200 mm par an selon les secteurs et les cultures, voir détails en annexe V5a). Ces résultats valident donc les performances du modèle STICS pour estimer l'irrigation potentielle moyenne à l'échelle d'une parcelle effectivement irriguée.

Cependant, la modalité du calcul entraîne, même sous climat actuel, une irrigation potentielle généralisée sur l'ensemble du bassin de la Seine (le modèle agronomique n'ayant aucune notion d'accessibilité à la ressource, de contraintes économiques, géographiques, sociologiques...). En réalité, l'irrigation actuellement recensée sur le bassin de la Seine ne couvre que 2,7% de la Surface Agricole Utile (160 000 hectares irriguées pour une SAU globale de près de 6 millions d'hectares, source AESN). Les volumes annuels moyens prélevés sont de l'ordre de 150 Mm³/an (Tableau 5), soit environ 10% de prélèvements globaux effectués en nappe.

Pour aller plus loin, une comparaison avec les volumes réellement mis en jeu a été effectuée sur la région la Beauce. Un mode de calcul plus réaliste a été défini, consistant principalement à limiter l'irrigation aux cultures les plus fréquemment irriguées (pommes de terre, maïs, betteraves, tournesol), pendant une période limitée (de 2 mois et demi à 4 mois selon les cultures) et l'appliquer aux surfaces effectivement irriguées en Beauce. Ce calcul permet d'approcher les volumes prélevés (57 Mm³ calculés soit plus de 75% du volume réellement apporté sur le secteur étudié, voir aussi Figure 20). Cette légère sous-estimation peut s'expliquer par les différences entre les périodes simulées mais également par le fait que les agriculteurs beaucerons irriguent de plus en plus le blé, non irrigué dans le modèle ou encore par une description localement faussée des assolements pratiqués sur certaines parcelles.

En conclusion, le modèle STICS simule des doses d'irrigation assez réalistes dans les régions irriguées, mais il est insuffisant pour prédire les zones effectivement irriguées. Celles-ci se caractérisent en effet par un besoin en irrigation, qui peut être approché par STICS, mais aussi par l'existence d'infrastructures dédiées (forages, matériel) qui dépendent de nombreux facteurs, comme le potentiel hydrogéologique de la zone ou l'histoire des incitations à l'irrigation (PAC, contrats avec les industries agro-alimentaires, etc.). En conséquence, les irrigations potentielles simulées par STICS ne peuvent pas être utilisées comme une image de l'irrigation future, même en supposant que les systèmes de cultures puissent rester inchangés. Sous cette hypothèse, on peut cependant utiliser les changements relatifs d'irrigation simulés par STICS pour modifier l'irrigation actuelle.

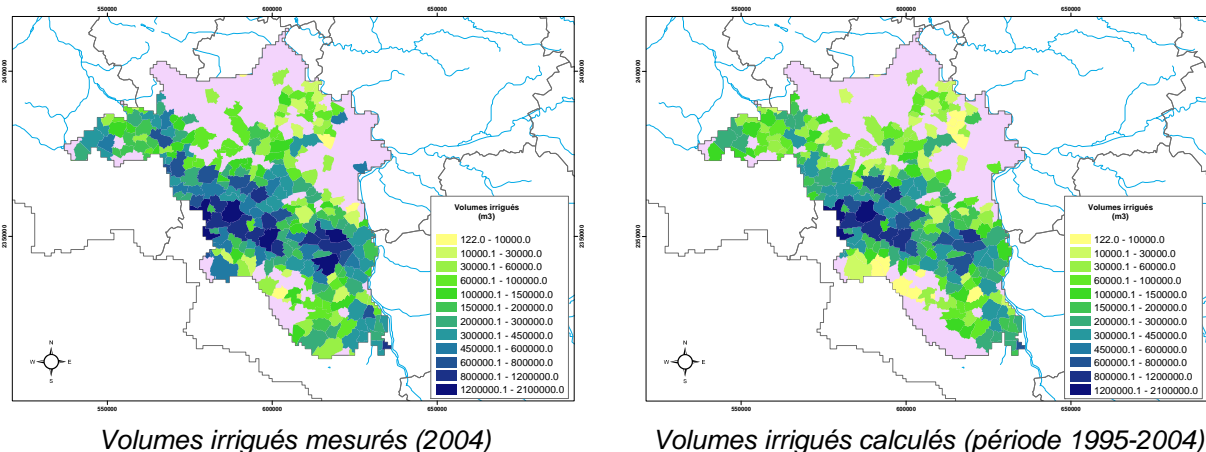


Figure 20 - Comparaison des volumes irrigués mesurés et ceux calculés par le modèle agronomique STICS sur la région de la Beauce.

3. Impact du changement climatique sur les doses d'irrigation

En moyenne sur le bassin de la Seine, les calculs effectués par le modèle agronomique STICS montrent une augmentation générale des doses ou volumes d'eau nécessaires à l'irrigation. Le Tableau 6 présente les volumes globaux calculés sur le bassin et leur évolution relative en fin de siècle par rapport à l'actuel pour les trois scénarios traités (simulés avec la même version du modèle climatique ARPEGE selon deux scénarios d'émissions A1B pour RD1 et A2 pour RD2 et RC2 – et désagrégés par deux méthodes différentes, Tableau 1). Ces résultats signifient qu'à assolement identique, un agriculteur

devra prélever entre 50 et 60% de plus d'eau pour irriguer ses cultures sous changement climatique. Si l'on se limite à la seule Beauce et pour les quatre cultures sélectionnées, l'accroissement des besoins en irrigation calculés par STICS est similaire, entre + 47 et + 54% (avec les mêmes scénarios).

En fonction des années, les volumes prélevés pour l'irrigation dans l'ensemble du bassin de la Seine ne représentent que 7 à 15 % des prélèvements totaux en nappe (entre 80 Mm³ en 2001 et 200 Mm³ en 2003, Tableau 5). Une augmentation de 50 à 60% de ces volumes sous l'effet du changement climatique peut alors paraître négligeable, mais elle recouvre des réalités régionales très contrastées puisque l'irrigation actuellement recensée ne couvre que 2,7% de la surface agricole utile (SAU) du bassin.

Nous avons donc analysé les conséquences de cette augmentation des besoins sur les ressources en eau souterraines de la Beauce, en supposant que les prélèvements augmentaient comme les besoins. Cette hypothèse est simplificatrice, car une lame d'eau prélevée pour l'irrigation dans une nappe phréatique ne représente pas un déficit net pour la formation aquifère du fait de la modification du cycle de l'eau interannuel à l'échelle des parcelles irriguées (Bruand et al., 1997 ; et voir détail en annexe V5b). Grâce au modèle hydrodynamique MODCOU, nous avons alors estimé les rabattements induits dans la nappe de Beauce par la seule augmentation de 60% des prélèvements (obtenue sous scénario climatique RC2 en fin de siècle), à surface irriguée constante par rapport à l'actuel (Figure 21). Ces rabattements dépassent localement 3 m, mais restent nettement inférieurs aux rabattements induits directement par ce scénario de changement climatique sans modification des prélèvements (Figure 24).

Tableau 6 - Volumes et variations relatives de l'irrigation potentielle simulée sur le bassin de la Seine en temps présent et sous changements climatiques (fin de siècle), en supposant une irrigation généralisée sur l'ensemble du bassin. Les 3 scénarios sont définis en Tableau 1, et leurs valeurs temps présent sont identiques.

Scénario	Temps présent	RD1	RD2	RC2
Irrigation potentielle globale (Mm ³ /an)	3440	5211	5435	5508
Variation relative des doses d'irrigation	-	+ 51 %	+ 58 %	+ 60 %

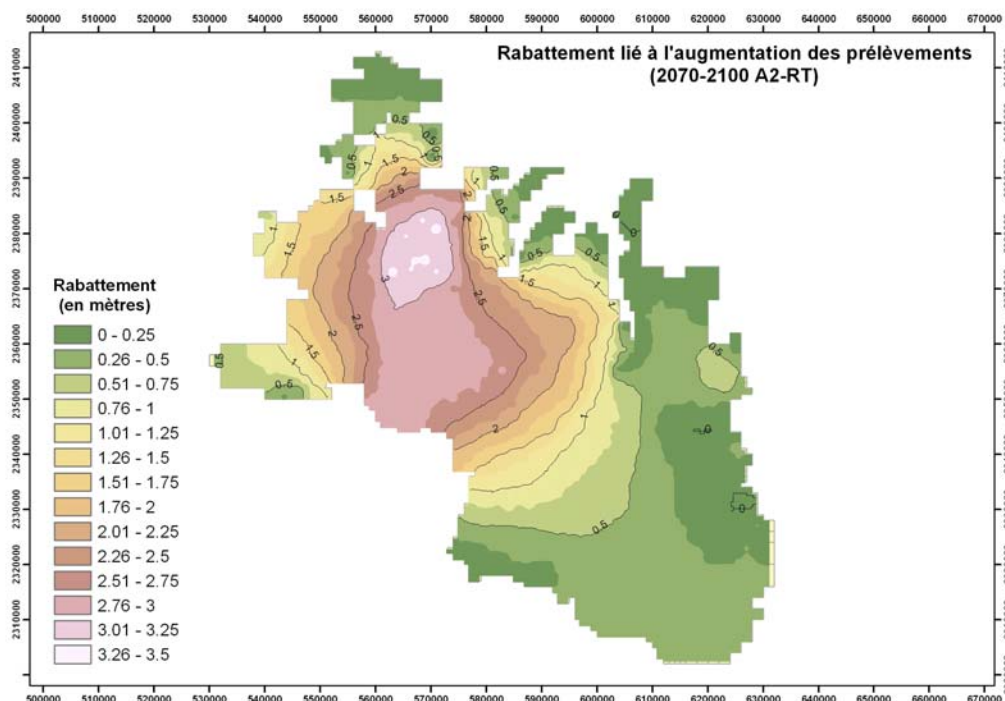


Figure 21 - Rabattements calculés dans la nappe des calcaires de Beauce suite à l'augmentation des doses d'irrigation potentiellement due au changement climatique (scénario RC2 en fin de siècle). La moyenne de ces rabattements sur le domaine est de -1m.

4. Déficits d'alimentation des formations aquifères sous changement climatique

Si, comme on vient de le voir, le changement climatique induit une augmentation sensible des quantités d'eau à prélever dans les aquifères à des fins d'irrigation, ce dernier modifie également singulièrement la recharge des formations aquifères. La Figure 22 présente la recharge annuelle moyenne calculée par le modèle hydrogéologique MODCOU pour un ensemble de 19 scénarios climatiques (les 21 scénarios du Tableau 1 moins les deux scénarios A1 et A2 désagrégés par la méthode des anomalies), en moyenne sur les principales formations aquifères du bassin de la Seine (de la formation de la Craie aux formations du Tertiaire, dont les affleurements couvrent 65,8000 km²). Cette recharge annuelle moyenne diminue au cours du 21^{ème} siècle, ce qui définit un déficit annuel de recharge entre les horizons milieu et fin de siècle d'une part, et le temps présent d'autre part, comme résumé en Tableau 7. Ces déficits annuels de recharge sont statistiquement significatifs et représentent environ 30% de la recharge actuelle des formations aquifères, ce qui est cohérent avec les résultats de l'annexe V2b sur l'ensemble des modèles hydrologiques. Ces déficits de recharge représentent aussi le double environ des prélèvements annuels actuellement effectués en nappe dans le bassin de la Seine (Tableau 5).

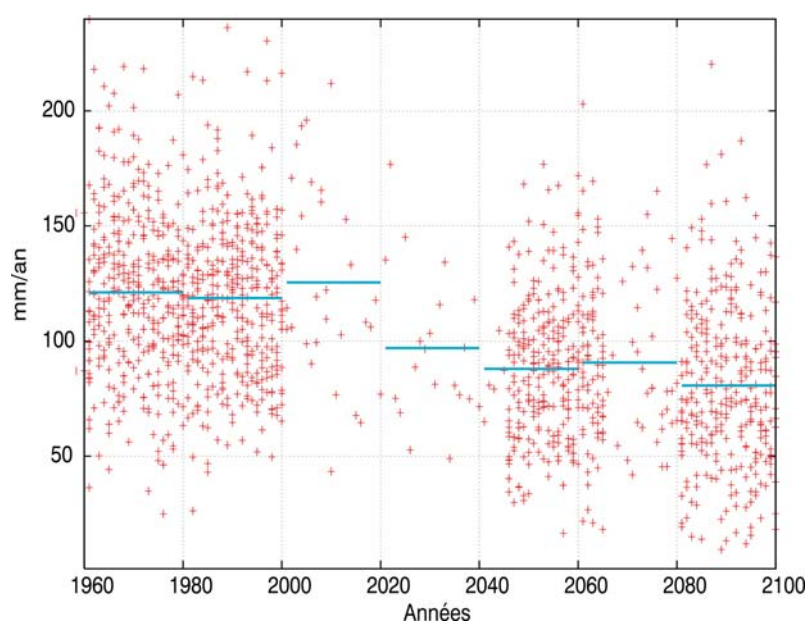


Figure 22 - Recharge annuelle moyenne des principaux aquifères du bassin de la Seine (en mm/an) selon les 19 scénarios climatiques traités (un point par couple année/scénario).

Tableau 7 - Déficit annuel moyen d'alimentation des principaux aquifères du bassin de la Seine. Moyennes et écart-type sur les scénarios traités, valeurs exprimées en millions de m³ par an. Ces déficits sont statistiquement significatifs selon le test de Student au risque $\alpha = 2\%$.

Période		1980-2000	2040-2060	2080-2100
Nb de scénarios		19	16	19
Alimentation totale des aquifères (Mm ³ /an)	moy	8000	5800	5300
	std	2250	2100	2300
Déficit d'alimentation (Mm ³ /an)	moy		2200	2700
	std		3070	3200
Déficit relatif par rapport au TP			27.6 %	33.6 %

Si l'on spatialise ces déficits en fonction des principales masses d'eau du bassin (Figure 23), il apparaît notamment que le déficit d'alimentation annuel de la masse d'eau Beauce du bassin Seine-Normandie est de l'ordre de 220 Mm³, très proche donc des valeurs de prélèvement pour irrigation actuellement autorisées par arrêté préfectoral pour l'ensemble de la nappe de Beauce (236 Mm³ en 2008) qui s'étend également sur le bassin de la Loire.

Cette diminution de la recharge sous changement climatique entraîne bien sûr une baisse sensible des niveaux piézométriques dans l'ensemble des formations aquifères du bassin de la Seine. Cet impact est illustré en Beauce (Figure 24), où le rabattement dû directement au changement climatique en FS est nettement supérieur à celui qui serait dû au seul effet de l'intensification de l'irrigation (Figure 21).

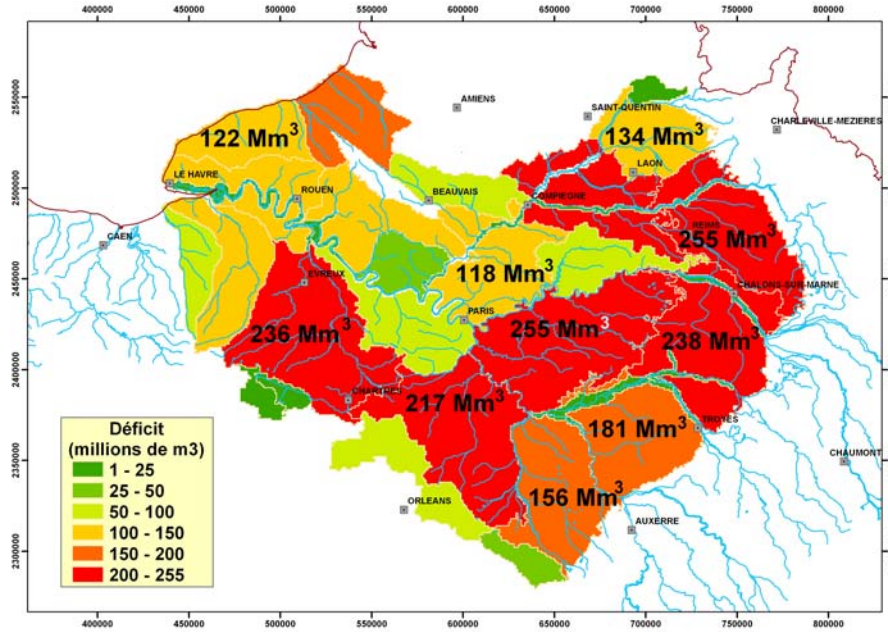


Figure 23 - Déficit annuel d'alimentation des grandes masses d'eau du bassin de la Seine en fin de siècle (moyenne Fin de siècle par rapport au Temps présent sur l'ensemble des scénarios RD1, RD2 et RC2).

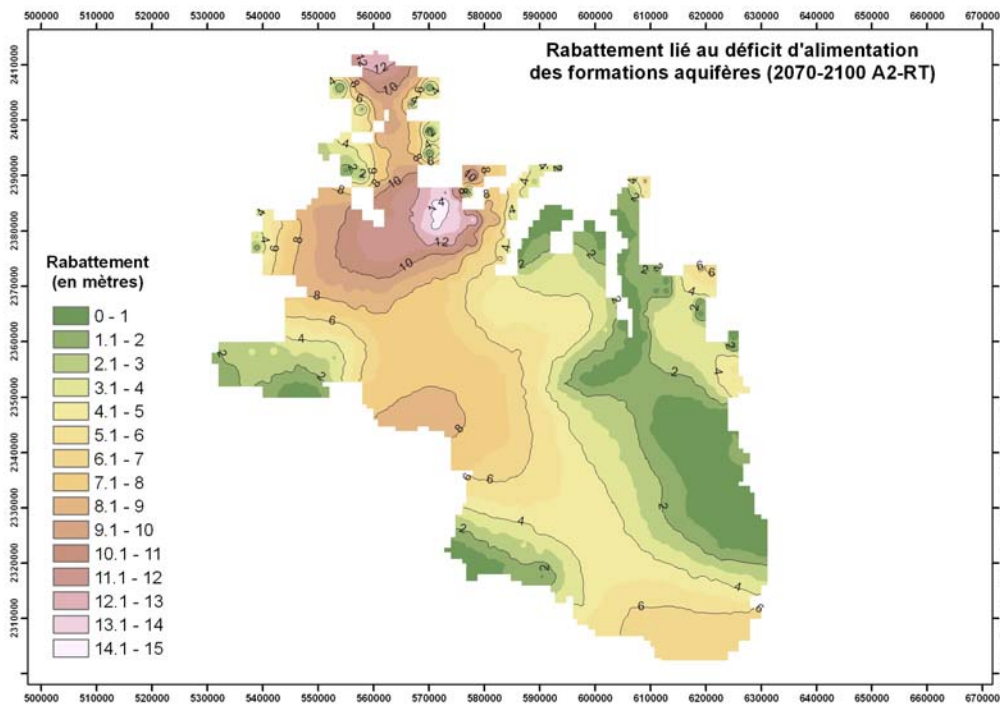


Figure 24 - Rabattements de la nappe des calcaires de Beauce calculés pour la fin de siècle sous scénario RC2. La moyenne de ces rabattements sur le domaine est de -4.6m.

5. Impact croisé du déficit de recharge et de l'augmentation de l'irrigation

Le double impact du changement climatique sur les ressources en eau de la Beauce est illustré par l'évolution du débit minimum moyen mensuel de retour 5 ans ($QMNA5$), en différents points des rivières de trois principaux bassins versants de la Beauce (Le Loing, l'Essonne et la Juine). La Figure 25 montre que ce débit $QMNA5$ calculé baisse dans toutes les rivières considérées, ce qui est principalement liée à la diminution de la recharge des formations aquifères. L'irrigation ne fait

qu'accentuer cette baisse du débit de base des cours d'eau du bassin, et localement de manière significative, comme pour l'Essonne.

De manière générale, l'impact du changement climatique sur l'irrigation est entaché de fortes incertitudes, en particulier sur l'évolution spatiale de cette pratique. Le cas particulier de la Beauce est intéressant dans ce cadre car l'irrigation y est déjà intensive, ce qui limite les incertitudes précédentes. Nos résultats y montrent que l'intensification de l'irrigation due au changement climatique a un impact nettement plus faible sur les ressources en eau souterraines que la baisse de la recharge. Cet impact direct du changement climatique est à lui seul susceptible de remettre en question la viabilité future de l'irrigation des grandes cultures telle que nous la connaissons actuellement, en regard des autres usages de l'eau.

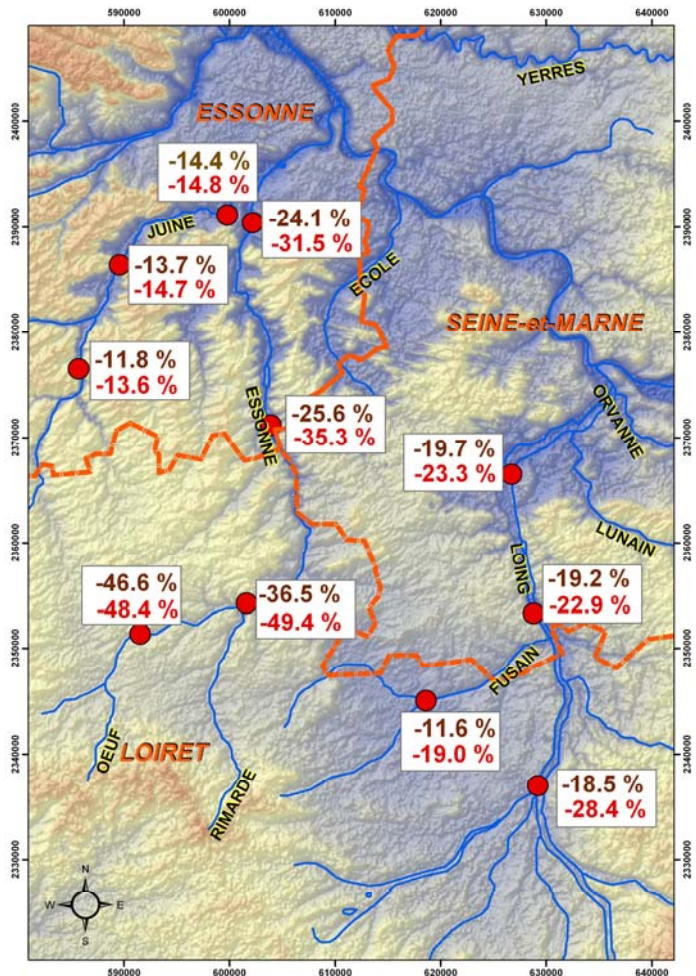


Figure 25 - Évolution relative du QMNA5 calculé en fin de siècle (période 2070/2100) sous scénario climatique A2-RT sur les rivières des principaux sous bassins du Loing, de l'Essonne et de la Juine. Les valeurs en noir précisent l'effet direct lié à la seule diminution de la recharge des formations aquifères et les valeurs en rouge l'effet conjugué de la diminution de la recharge associé aux prélèvements agricoles pour l'irrigation (à surface irriguée et assolement constant par rapport à l'actuel).

V6. Transfert aux gestionnaires

Partenaires impliqués : Tous.

Ce volet a pour objectif de diffuser les résultats du projet aux acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau dans les bassins versants étudiés, sous une forme adaptée pour leur permettre une expertise socio-économique de la modification des extrêmes hydrologiques, et définie avec eux. Ce type d'analyse, même qualitative, est important pour étayer des stratégies d'adaptation au changement climatique.

Dans ce cadre, nous avons organisé un atelier le 27 novembre 2008 à Paris pour présenter les premiers résultats du projet, initier le dialogue et répondre aux questions. Plus de cinquante personnes ont participé à cet atelier, dont les représentants de la plupart des services opérationnels intervenant dans les bassins de la Seine et de la Somme. La liste des participants est jointe (annexe V6). Lors de cette journée, quatre exposés de synthèse ont abordé les scénarios climatiques et les méthodes de

désagrégation, la caractérisation des incertitudes dans les impacts sur la ressource en eau, le traitement des extrêmes hydrologiques (crues et étiages) et les conséquences pour l'agriculture et l'irrigation. Les présentations ont soulevé un certain nombre de questions qui ont ensuite été discutées lors d'une table ronde. Les discussions ont porté sur :

- Les incertitudes associées aux simulations climatiques et hydrologiques
- La communication des résultats et des incertitudes
- Les implications opérationnelles et les politiques d'adaptation
- Les perspectives

Ces différents points sont évoqués ci-dessous en mettant en perspective les discussions de la table ronde du 28 novembre et les résultats finaux du projet RExHySS présentés dans ce rapport.

1. Incertitudes associées aux simulations climatiques et hydrologiques

Une grande partie des discussions de l'atelier de novembre 2008 a porté sur les incertitudes liées à la prise en compte de différents scénarios d'émission, de plusieurs modèles de climat, de différentes méthodes de désagrégation, de plusieurs modèles hydrologiques.

La question des incertitudes est abordée en détail dans les volets V1 et V2. Le volet V2 montre que l'incertitude maximale est associée aux modèles climatiques, mais les améliorations attendues des modèles climatiques seront moins importantes qu'au cours des quinze dernières années, compte tenu de la croissance moins rapide de la puissance des calculateurs. Les progrès escomptés résident principalement dans la prise en compte de nouveaux processus mais il est difficile d'envisager un resserrement spectaculaire des projections climatiques, même en négligeant la part d'incertitude liée aux émissions en gaz à effet de serre.

Le volet V2 montre aussi que les méthodes de désagrégation et les modèles hydrologiques sont à l'origine d'incertitudes relativement comparables, et non négligeables, alors que ces incertitudes sont encore rarement prises en compte dans les études d'impact.

Ceci soulève un point important. Plus on considère de sources d'incertitudes, plus celles-ci seront grandes, mais il serait trompeur de faire le contraire (en considérant les projections d'un seul modèle climatique par exemple). Il faut cependant veiller à ne pas surestimer les incertitudes en tenant compte de modèles/hypothèses qui ne représentent pas le système étudié de manière réaliste. C'est ce qui nous a amené à disqualifier le modèle CLSM dans le volet V2.

2. Communication des résultats et des incertitudes

Ces incertitudes rendent la communication des résultats délicate, mais l'ensemble des gestionnaires présents juge cette communication indispensable.

De manière générale, la confiance dans les résultats augmente si des réponses systématiques sont obtenues malgré un échantillonnage visant à couvrir le plus largement possible les incertitudes. Ceci distingue les évolutions robustes, comme la baisse des débits moyens et d'étiage dans le projet RExHySS, des évolutions qui ne le sont pas, comme celles des caractéristiques de crues. Dans tous les cas, il faut garder en tête qu'il est impossible de couvrir l'ensemble des incertitudes de manière exhaustive. Un autre niveau d'analyse, plus qualitatif, est alors celui du degré de confiance sur les projections. Celui-ci reste plus faible sur les précipitations que sur les autres variables météorologiques, ce qui renvoie à la forte incertitude épistémologique sur les précipitations simulées (connaissance imparfaite et limites techniques, pour décrire l'ensemble des échelles impliquées par exemple).

Pour bien valoriser un projet comme RExHySS, il est donc essentiel de réfléchir au rôle des chercheurs dans la communication des résultats, et à l'interprétation faite par les gestionnaires des résultats obtenus par les scientifiques. Les principales recommandations exprimées lors de l'atelier sont :

- formation permanente sur le sujet ;
- diffusion de résultats ciblés, comme des chroniques de débit, avec mode d'emploi ;
- le MEEDDM est le bon intermédiaire entre scientifiques et gestionnaires pour valoriser les résultats du programme GICC, par exemple via le Service de la Recherche et la Direction Générale de Prévention des Risques.

3. Implications opérationnelles et politiques d'adaptation

Les implications opérationnelles de l'impact hydrologique du changement climatique dans les bassins étudiés sont nombreuses :

- La baisse des débits aura un impact évident sur la politique d'investissement des agences de l'eau.
- La question du soutien des hauteurs d'eau dans les canaux est posée.
- La politique d'aménagement du territoire sur la construction de retenues devra être reconsidérée.
- Les règles de dimensionnement d'ouvrages étant basées sur des valeurs caractéristiques de débits considérées comme fixes (par exemple le *QMNA5*), il est nécessaire de repenser ces règles et éventuellement de modifier les valeurs caractéristiques dès à présent. Cependant, il sera difficile de justifier aujourd'hui de telles décisions liées à un état de crise dans 50 ou 100 ans.

Compte tenu de ces nombreuses implications opérationnelles, les conflits d'usage seront potentiellement nombreux dans le futur, et une adaptation constructive devra passer par une hiérarchisation des besoins. Les gestionnaires pourraient jouer un rôle important dans l'adaptation des règles de dimensionnement, en modifiant les valeurs des seuils et/ou les restrictions actuelles. De telles négociations d'usage existent déjà localement, et devraient se généraliser. Enfin, sur la question des possibilités d'irrigation dans le futur, il existe des techniques agricoles permettant de réduire la consommation d'eau. Il est possible que les pratiques évoluent naturellement en fonction du climat mais il faut prévoir une adaptation des types de culture et des types de pratiques agricoles.

4. Perspectives du projet

Le transfert des résultats aux gestionnaires de bassins devrait être poursuivie, par exemple dans le cadre d'un atelier à l'initiative du Ministère pour aborder plus en détail les politiques d'adaptation éventuelles à envisager. Des sessions de formation permanente sont aussi envisageables pour approfondir le sujet.

Les projections hydrologiques obtenues avec RExHySS pourraient aussi être utilisées dans d'autres projets de recherche :

- La perspective d'étudier l'impact du changement climatique sur la qualité des milieux aquatiques est tout à fait envisageable et impliquerait de nouveaux partenaires, notamment des biologistes. Sur la qualité des cours d'eau, des conclusions déjà assez claires peuvent être tirées compte tenu de la quasi-certitude de la hausse des températures de l'eau et de la baisse des débits en été et en automne.
- Des projets plus ciblés sur l'impact du changement climatique sur les pratiques agricoles ont aussi été évoqués et permettraient d'apporter des réponses plus locales sur les possibles politiques d'adaptation.
- L'impact du changement climatique sur l'alimentation en eau potable est aussi une perspective importante du projet compte tenu de la baisse possible du niveau des nappes sous le niveau des captages actuels.
- La comparaison avec d'autres études en cours sur l'impact hydrologique du changement climatique, par exemple sur la Meuse, la Loire, la Gironde.

IV. CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Les scénarios hydrologiques construits dans le projet RExHySS peuvent se résumer par un assèchement généralisé des bassins versants de la Seine et de la Somme, avec baisse des nappes et des débits en moyenne annuelle. Cette baisse 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 avec une incertitude associée assez comparable. Ce résultat nouveau, permis la démarche du projet RExHySS, 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. Les sources d'incertitude les plus faibles sont associées à l'horizon temporel auquel les impacts sont analysés et aux scénarios d'émission anthropiques, ce qui est cohérent avec le fait que l'essentiel des impacts est acquis dès le milieu de siècle.

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. Grâce aux deux méthodes de désagrégation récentes exploitées dans le projet (méthodes quantile-quantile et des régimes de temps), qui visent à une réelle descente d'échelle spatiale et temporelle, nous avons aussi pu évaluer les impacts associés sur les extrêmes hydrologiques, dont l'évolution est déterminante pour les activités humaines. 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 (souvent pris par défaut comme seuil d'alerte sécheresse) augmenterait. Au contraire, les crues extrêmes, identifiées dans cette étude par les quantiles décennaux *QJXA10*, ne changeraient pas significativement. Dans le cadre de ces impacts physiques du changement climatique, les conséquences socio-économiques sont donc dominées par l'intensification des étiages et sécheresses, susceptible notamment de remettre en cause l'agriculture irriguée telle qu'elle est actuellement pratiquée en Beauce.

Ces résultats se limitent à l'impact direct du changement climatique anthropique sur le régime hydrologique, et négligent les autres facteurs d'évolution possibles, comme les changements d'occupation des terres ou d'aménagement / gestion des cours d'eau. L'étude des interactions entre les impacts hydrologiques directs et les activités humaines ne fut qu'ébauchée dans ce projet (V4b), mais elle constitue une perspective importante dès que l'on s'intéresse aux possibles politiques d'adaptation et de mitigation. Dans ce cadre, une des principales recommandations formulées à l'issue de l'atelier que nous avons organisé pour renforcer le dialogue entre scientifiques et gestionnaires des bassins consiste en une évaluation hiérarchisée des besoins en eau pour les différents usages, étant donné les tensions accrues qui devraient accompagner la baisse de la ressource en eau.

Une autre question essentielle dès qu'on aborde la sphère de la gestion et de la décision, qui est au cœur de l'adaptation *a priori* aux changements projetés (par opposition à la réaction *a posteriori* à ces changements), est celle de la confiance que l'on peut accorder aux résultats de modélisation. Cette notion dépasse les réponses fournies par l'analyse des incertitudes, car il est impossible de couvrir ces dernières de manière exhaustive, même en multipliant les sources d'incertitudes prises en compte comme dans le projet RexHySS. Il est en particulier impossible de caractériser parfaitement les incertitudes liées à l'évolution des émissions anthropiques (dites incertitudes réflexives car la société fait à la fois partie du problème et de la solution), et les incertitudes épistémiques, liées à la connaissance imparfaite des phénomènes et à leur représentation approximative (Pagé et al., 2008).

Dans ce cadre, l'évolution des précipitations est certainement l'élément le plus incertain des projections du changement climatique, et elle explique l'essentiel des différences de réponse hydrologique avec les autres études d'impact menées dans la zone de transition à laquelle appartient le domaine RexHySS, entre l'Europe du Nord où les précipitations annuelles devraient augmenter, et l'Europe du Sud, où elles devraient diminuer. Dans toutes ces études, la baisse des débits d'étiages est très robuste, ce qui confère une grande confiance sur ce résultat. Ceci résulte du réchauffement et de l'augmentation associée de la demande évaporative, qui atténue la dispersion liée aux seules précipitations. Les principales différences concernent les hautes eaux :

- Deux projets sur des bassins versants belges montrent des résultats très convergents avec ceux de REXHySS, en se basant sur plusieurs scénarios climatiques générés pour le projet européen PRUDENCE (Christensen and Christensen, 2007), qui sont désagrégés/débiaisés avant d'être analysés par un modèle hydrologique. Goderniaux et al. (2007) utilisent la méthode de désagrégation quantile-quantile et montrent une baisse des précipitations annuelles et une baisse non significative des débits moyens de hautes eaux dès le milieu de siècle. Boukhris et al. (2008) s'intéressent à l'évolution des extrêmes hydrologiques à partir d'une méthode de désagrégation inspirée de la méthode des anomalies. Ils concluent à des changements non significatifs des crues extrêmes en fin de siècle.
- Le projet GICC-Seine (Ducharme et al., 2007) avait conclu à des changements non significatifs des débits moyens de hautes eaux à l'exutoire de la Seine, sur la base des simulations par deux modèles hydrologiques à partir de 12 scénarios climatiques plus anciens que ceux du REXHySS et désagrégés par la méthode des anomalies. Ces scénarios indiquaient une stabilité des précipitations annuelles.
- Dankers and Feyen (2008), dans une étude reprise par l'European Environmental Agency, indiquent enfin une augmentation importante des crues extrêmes dans le bassin de la Seine (période

de retour centennale), associée à une augmentation des précipitations annuelles. Il faut cependant noter que cette étude repose sur un unique scénario climatique régional, sans étape de débiaisage, ce qui limite considérablement la portée de ce résultat en regard des incertitudes révélées par les autres études.

Cette comparaison montre que la réponse des débits de crue est étroitement liée à la réponse de précipitations annuelles, avec une forte sensibilité (des variations faibles des précipitations entraînant des variations relativement plus importantes des débits). La baisse des précipitations annuelles que nous anticipons dans les bassins de la Seine et de la Somme représente dans ce cadre la meilleure projection actuellement disponible, car convergente pour de nombreux scénarios de changement climatique correspondant à l'état de l'art (IPCC, 2007), et pour deux méthodes de désagrégation différentes mais validées en climat récent sur le domaine.

Le travail sur les incertitudes initié dans REXHySS devra néanmoins être poursuivi dans de futurs projets. Il faudra dans un premier temps affiner la hiérarchisation des différentes sources d'incertitude en fonction des échelles de temps considérées. Pour les prochaines décennies, les principales sources d'origine climatique sont l'incertitude épistémique liée aux modèles et la variabilité interne du système climatique. Cette dernière va être explicitement abordée dans le cadre du prochain exercice décennal CMIP5 (Climate Model Intercomparison Project) qui servira de support au 5^{ème} rapport du GIEC. Une autre direction à poursuivre est celle de la réduction de l'incertitude épistémique. Au-delà de la nécessaire amélioration des modèles, une autre question centrale et difficile est alors celle de la relation entre les biais des modèles climatiques et les incertitudes, qui n'a pas été tentée dans le projet REXHySS (Boé et Terray 2008). Seule la mise en place de nouvelles analyses et protocoles de simulation permettra d'avancer sur la hiérarchisation et la quantification/réduction des incertitudes climatiques et hydrologiques.

V. REFERENCES CITEES

- Boé J., Terray L., Habets F., Martin E. (2006). A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. Geophys. Res.*, 111, D23106.
- Boé J. (2007). Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 256 pp + annexes.
- Boé J., Terray L., Habets F., Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, 7 (12), 1643–1655. URL <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1602>
- Boé J., Terray L. (2008). Uncertainties in summer evapotranspiration changes over Europe and implications for regional climate change. *Geophys. Res. Lett.*
- Boukhris O, Willems P, Vanneville W (2008). The impact of climate change on the hydrology in highly urbanised Belgian areas, pp 271-276. In: *Water and Urban Development Paradigms*, Feyen, Shannon & Neville (eds), Taylor & Francis Group, London, 712 pp.
- Brisson N, Launay M, Mary B, Beaudoin N (2009). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model, éditions QUAE.
- Bruand A. et al. (1997). Variabilité de la recharge de la nappe de la Beauce. Rôle de l'irrigation et des caractéristiques du sol, *Etude et Gestion des Sols*, 4, 4, 1997, pages 229-245.
- Christensen J.H., Christensen O.B. (2007). A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Clim. Change*, 81, 7-30, doi: 10.1007/s10584-006-9210-7
- Dankers R. and Feyen L. (2008). Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *J. Geophys. Res.*, 113, D19105, doi:10.1029/2007JD009719
- Déqué M. (2003). Température et précipitations extrêmes sur la France dans un scénario de changement climatique. *Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Varsovie, 2003, 4 pp.
- Déqué M. (2007). Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values, *Global and Planetary Change*, 57,16-26, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030
- Déqué M, Rowell DP, Lüthi D, Giorgi F, Christensen JH, Rockel B, Jacob D, Kjellström E, de Castro M, van den Hurk B (2007). An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Clim Change*, doi:10.1007/s10584-006-9228-x

- Ducharne A., Baubion C., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Kieken H., Lebonvallet S., Ledoux E., Mary B., Mignolet C., Poux X., Sauboua E., Schott C., Théry S. and Viennot P. (2007). Long term prospective of the Seine river system: Confronting climatic and direct anthropogenic changes. *Science of the Total Environment*, 375, 292-311, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.011
- EEA (2009). Water resources across Europe - Confronting water scarcity and drought. Report 2/2009, 60 pp., European Environment Agency, Copenhagen.
- Falkenmark M., Lundqvist J, Widstrand C (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches; Aspects of vulnerability in semi-arid development, *Nat. Resour. Forum*, 14, 258–267.
- Gascoïn S, Ducharne A, Ribstein P, Carli M, Habets F. Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France), *J. Hydrol.*, 368(1-4), 105-116, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.01.039.
- Gibelin A. L. and Déqué M. (2003). Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dyn.*, 20, 327-339.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC, Genève, Suisse, 103 pages.
- Goderniaux P, Serge Brouyère S, HJ Fowler, S Blenkinsop, R Therrien, P Orban and A Dassargues (2009). Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves, *J. Hydrol.*, 373, 122-138, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.017
- Gomez, E. (2002). Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, France, 287 pp.
- Habets F., A. Boone, J.L Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E.Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P.Quintana Segui F. Rousset-Regimbeau, P. Viennot (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *Journal of Geophysical Research (D: Atmospheres)*, 113, D06113(2008)18.
- Hubert P. (2005). La prédétermination des crues. *Comptes Rendus Geosciences*, 337, 219-227.
- Kendall M, Stuart A, Ord JK (1977). The advanced theory of statistics. Vol 3: design and analysis, and time series, 4th edition, Charles Griffin and Co Ltd, 780 pp.
- Kergoat L., Lafont S., Douville H., Berthelot B., Dedieu G., Planton S., Royer J-F. (2002). Impact of 2xCO₂ on global scale leaf area index and evapotranspiration : Conflicting stomatal and LAI responses, *J. Geophys. Res.*, 10.1029/2001JD001245
- Korkmaz S, Ledoux E, Önder H (2009). Application of the coupled model to the Somme river basin, *Journal of Hydrology*, 366, 21-34.
- IPCC, Working Group I (2007). Climate change 2007: the physical science basis. 4th Assessment Report, Genève.
- Longuevergne L, Gascoïn S, Boy JP, Rinaldi S, Ducharne A, Florsch A, Hinderer J (2009). Superconducting Gravimeter Measurements for Land Surface Model assessment. Submitted to GRL.
- Leblois et al. (2005). Projet GICC-Rhône, Rapport final révisé, Version courte. Programme GICC, 23 pp., <http://www.gip-ecofor.org/docs/38/apr2000/2-00LebloisRF.pdf>
- Ledoux E. (1980). Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Paris.
- Ledoux E., Girard G., de Marsily G. (1989). Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In : *Unsaturated flow in hydrologic modeling, Theory and practice*, Kluwer Academic Publishers, pp. 435-454.
- Ledoux E, Gomez E, Monget JM, Viavattene C, Viennot P, Ducharne A, Benoit M, Mignolet C, Schott C, Mary B (2007). Agriculture and Groundwater Nitrate Contamination in the Seine Basin. The STICS-MODCOU modelling chain. *Science of the Total Environment*, 375, 33-47, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.002
- Maurel F, Lepelletier T, Moreau J, Noeueglise C et Lancelot B (2008). Bilan prospectif besoins-ressources en Seine-Normandie (partie hydrologique), *La Houille Blanche*, vol. 5, 45-52.
- Mearns L. O., Bogardi I., Giorgi F., Matyasovszky I., Palecki M. (1994). Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling. *J. Geophys. Res.*, 104, 6603-6621, doi:10.1029/1998JD200042.
- Michelangeli P., Vautard R., Legras B. (1995). Weather regime occurrence and quasi stationarity. *J. Atmos. Sci.*,

- Nakicenovic N., Swart R., editors (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, UK.
- Oudin L., Andréassian V., Mathevet T., Perrin C., Michel C. (2006). Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations, *Water Resour. Res.*, 42, W07410, doi:10.1029/2005WR004636.
- Pagé C., Terray L., Boé J. (2008). Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08. Technical Report TR/CMGC/08/64, CERFACS, Toulouse, France.
- Perrin C., Michel C., Andréassian V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4): 275-289.
- Peters E., van Lanen H.A.J., Torfs P.J.J.F., Bier G. (2005). Drought in groundwater - drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology*, 306: 302–317.
- Quintana-Seguí P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Franchisteguy L., Morel S., Noilhan J. (2008). The SAFRAN atmospheric analysis: Description and validation. *J. Applied Meteorol. and Climatology*, 47, 92–107.
- Rousset F., Habets F., Gomez E., Le Moigne P., Morel S., Noilhan J., Ledoux E. (2004). Hydrometeorological modeling of the Seine basin using the SAFRAN-ISBA-MODCOU system, *J. Geophys. Res.*, 109, D14105, doi:10.1029/2003JD004403.
- Sauquet E., Ramos M.H., Chapel L., Bernardara P. (2008). Stream flow scaling properties: investigating characteristic scales from different statistical approaches. *Hydrol. Processes*, 22(17): 3462-3475. DOI: 10.1002/hyp.6952 and Erratum DOI: 10.1002/hyp.7192
- SOGREAH (2005). Etude de modélisation hydraulique de la vallée de la Somme, pour le compte AMEVA - Syndicat mixte d'aménagement hydraulique du bassin versant de la somme, n° 2740122, rapports - R0 à R6.
- Tol R.S.J., Fankhauser S., Smith J.B. (1998). The scope for adaptation to climate change. What can we learn from the impact literature ?, *Global Environmental Change*, vol. 8, n° 2, 109-123.
- Thiéry D. (1990). MARTHE. Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements. Version 4.3. Rapport BRGM 4S/EAU n° R32210.
- Thiéry D., Moutzopoulos, C. (1995). Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. *VIIIèmes journées hydrologiques de l'ORSTOM "Régionalisation en hydrologie, application au développement"*. In *Le Barbé et E. Servat (Ed.) ORSTOM Editions*, pp. 285-295.
- Thiéry D. (2003). Logiciel GARDÉNIA version 6.0. Guide d'utilisation. *Rapport BRGM n° RP 52832*.
- Thiéry D. (2004). Simulation d'une grappe de bassins versants du Doubs et de la Loue avec le modèle ÉROS - Prise en compte d'exportations et d'importations. *Note technique NT EAU 2004/23*.
- Verjus P. (2008). Elaboration du SDAGE du bassin Seine Normandie relatif à la gestion de la rareté de la ressource en eau. Actes du colloque « Gestion active des eaux », Paris, Juin 2007. *La Houille Blanche*, 3, 45-50, doi :10.1051/2008026
- Viennot P., Ducharme A., Habets F., Lamy F., Ledoux E (2009). Fonctionnement hydrodynamique du bassin de la Seine, Plaquette du programme PIREN-Seine, sous presse.
- Von Storch H. (1995). Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. *Meteor. Zeit.*, 4, 72-80.
- Xu C.Y. (1999). From GCMs to river flow: a review of downscaling methods and hydrologic modelling approaches. *Prog. Phys. Geog.*, 23(2), 229-249.

LISTE DES TABLES ET FIGURES

Tableau 1 - Présentation des scénarios disponibles (V1)	23
Tableau 2 - Caractéristiques des modèles hydrologiques utilisés sur les bassins de la Seine et de la Somme (V2).....	29
Tableau 3 - Variance relative associée aux différentes sources d’incertitudes sur les bassins de la Seine et de la Somme (V2).....	34
Tableau 4 - Stations sélectionnées, débits de référence associés, et défaillances identifiées en temps présent pour différentes sources de débit (V4b)	45
Tableau 5 - Prélèvements d’eau par secteur et par origine (eaux de surface et eaux souterraines) dans le bassin de la Seine (V5).....	46
Tableau 6 - Volumes et variations relatives de l’irrigation potentielle simulée sur le bassin de la Seine en temps présent et sous changements climatiques (fin de siècle), en supposant une irrigation généralisée sur l’ensemble du bassin (V5).....	48
Tableau 7 - Déficit annuel moyen d’alimentation des principaux aquifères du bassin de la Seine. Moyennes et écart-type sur les scénarios traités (V5).....	49
Figure 1 - Comparaison du régime des précipitations sur le temps présent (1971-2000) entre les analyses SAFRAN et le scénario ARPEGE A2 désagrégé soit par la méthode quantile-quantile, soit par celle des régimes de temps. a) répartition des jours de pluie par classe de précipitation (en mm/jour) ; b) persistance des épisodes pluvieux (V1).....	24
Figure 2 - Europe : changement relatif (par rapport à la période 1971-2000) des précipitations hivernales et estivales simulées par le multi-modèle CMIP3 pour la période 2046-2065 et le scénario d’émissions SRES A1B. Les croix indiquent les zones où au moins 85% des signes des réponses des différents modèles sont en accord (source : Boé, 2007) (V1).....	25
Figure 3 - Domaine RExHySS : changement de précipitations (en mm/an) et de température (en K), entre 2046-2065 et 1970-2000 selon les scénarios RT (V1).....	26
Figure 4 - Comparaison des changements des températures et précipitations simulés entre les périodes 2046-2065 et 1970-1999 pour le scénario SRES-A1B selon les 6 modèles du GIEC choisis pour le volet V2 : changements directement simulés par les modèles de climat vs changements après désagrégation par la méthode RT. De gauche à droite la moyenne annuelle, la saison hivernale et estivale (V1).....	27
Figure 5 - Représentativité des scénarios désagrégés sélectionnés pour les volets V2, V3 et V4b par rapport à l’ensemble des scénarios désagrégés dans le volet V1 (V1).....	28
Figure 6 - Evolution des débits annuels moyens à Poses simulés par les modèles hydrologiques pour les différents scénarios climatiques. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent, la deuxième au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle (V2).....	30
Figure 7 - Evolution des débits annuels moyens à Poses par rapport au temps présent simulé. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux écarts entre milieu de siècle et temps présent, le deuxième entre fin de siècle et temps présent (V2).....	30
Figure 8 - Evolution des débits mensuels simulés pour la Seine à Poses et la Somme à Abbeville 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 ; au milieu : horizon 2050 ; en bas : horizon 2100 (V2).....	30
Figure 9 - Evolution de la piézométrie simulée en milieu et fin de siècle sur la Seine (modèle MODCOU) et la Somme (modèles MODCOU et GARDENIA). Les droites représentent les droites de régression des nuages de points correspondant aux horizons 2050 et 2100 pour les différents modèles (V2).....	31
Figure 10 - Relation entre l’évolution de l’évaporation et celle des précipitations (V2).....	32
Figure 11 - Relation entre l’évolution de l’écoulement total et celle des précipitations (V2)	32
Figure 12 - Analyse des incertitudes sur la réponse des débits de la Seine et de la Somme au changement climatique. Moyennes (en abscisse) et écart-types (en ordonnée) des impacts	

	sur les débits de la Seine à Poses et de la Somme à Abbeville en m ³ /s en fonction des méthodes de désagrégation, des scénarios SRES, des modèles de climat en milieu et fin de siècle et des modèles hydrologiques (V2).	33
Figure 13 -	Ecart relatif médian entre les valeurs temps présent et milieu de siècle des variables retenues pour caractériser des extrêmes du débit dans l'ensemble des stations du domaine RExHySS (V3)	36
Figure 14 -	Carte des évolutions du <i>QMNA5</i> médian des scénarios A1B milieu de siècle en relatif par rapport au <i>QMNA5</i> médian des scénarios correspondants sous temps présent (V3)	37
Figure 15 -	Evolution du <i>QMNA5</i> simulé pour la Seine à Paris (a) et pour la Somme à Abbeville (b). Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés sous scénarios désagrégés temps présent. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent, la deuxième au milieu de siècle et la troisième à la fin de siècle (V3).....	38
Figure 16 -	Evolution du <i>QJXA10</i> simulé pour la Seine à Paris (a) et pour la Somme à Abbeville (b). Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés sous scénarios désagrégés temps présent. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent, la deuxième au milieu de siècle et la troisième à la fin de siècle (V3).....	39
Figure 17 -	Evolution des quantiles de niveaux piézométriques dans le bassin de la Somme selon GARDENIA. Les écarts sont évalués par rapport aux résultats sous scénarios désagrégés temps présent (V3).....	39
Figure 18 -	Cartographie des hauteurs d'eau pour la crue de 2001 et impact en hauteur d'eau entre les scénarios de relèvement du niveau marin et la situation de référence (V4a).....	42
Figure 19 -	Impact du changement climatique milieu de siècle sur les défaillances des débits anthropisés selon les scénarios de changement climatique RC1 et GM (V4b).....	45
Figure 20 -	Comparaison des volumes irrigués mesurés et ceux calculés par le modèle agronomique STICS sur la région de la Beauce (V5).....	47
Figure 21 -	Rabattements calculés dans la nappe des calcaires de Beauce suite à l'augmentation des doses d'irrigation potentiellement due au changement climatique (V5)	48
Figure 22 -	Recharge annuelle moyenne des principaux aquifères du bassin de la Seine (en mm/an) selon les 19 scénarios climatiques traités (V5).....	49
Figure 23 -	Déficit annuel d'alimentation des grandes masses d'eau du bassin de la Seine en fin de siècle (V5).....	50
Figure 24 -	Rabattements de la nappe des calcaires de Beauce calculés pour la fin de siècle sous scénario RC2 (V5).....	50
Figure 25 -	Évolution relative du <i>QMNA5</i> calculé en fin de siècle (période 2070/2100) sous scénario climatique A2-RT sur les rivières des principaux sous-bassins du Loing, de l'Essonne et de la Juine. Les valeurs en noir précisent l'effet direct lié à la seule diminution de la recharge des formations aquifères et les valeurs en rouge l'effet conjugué de la diminution de la recharge associé aux prélèvements agricoles pour l'irrigation (V5).....	51

ANNEXES

Les liens ci-dessous renvoient aux PDF des différents documents annexés.

TIRES A PART DES PUBLICATIONS

Ducharme A et l'équipe RExHySS (2009). Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. [Encadré + Annexe dans le rapport "Ecosystèmes et événements extrêmes" de l'Académie des Sciences](#), Ed. H. Décamps, in press.

COMPLEMENTS SUR LES DIFFERENTS VOILETS DU PROJET (NON CONFIDENTIEL)

[**aV1a. Méthode de désagrégation quantile-quantile**](#)

[**aV1b. Analyse des scénarios désagrégés**](#)

[**aV2a. Description des modèles hydrologiques**](#)

[**aV2b. Impacts du changement climatique sur la ressource en eau**](#)

[**aV3. Analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes**](#)

[**aV4a. Inondations de la Somme aval**](#)

[**aV4b. Défaillances des débits d'été anthropisés**](#)

[**aV5a. Vers une construction de scénarios d'irrigation à l'aide du modèle STICS**](#)

[**aV5b. Rétroaction des prélèvements par irrigation sur les nappes**](#)

[**aV6. Participants à l'atelier du 27 novembre 2008**](#)

ACRONYMES

AEP	Alimentation en eau potable
AESN	Agence de l'Eau Seine Normandie
ANOM	Anomalies (Méthode de désagrégation)
CC	Changement Climatique
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
ENSMSP	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
GCM	General Circulation Model
ETP	Evapotranspiration potentielle
ETR	Evapotranspiration réelle
FS	Fin du 21ème siècle (2070-2100 ou 2080-2100)
GES	Gaz à Effet de Serre
GICC	Gestion et Impact du Changement Climatique
GIEC	Groupe International d'Experts sur le Climat (= IPCC)
IIBRBS	Institution Interdépartementale des Barrages Réservoirs du Bassin de la Seine
IPCC	International Panel for Climate Change (= GIEC)
MS	Milieu du 21ème siècle (2045-2065)
NCEP	National Centers for Environmental Prediction (USA)
PAC	Politique Agricole Commune
RT	Régimes de temps (Méthode de désagrégation)
SAFRAN	Analyse des données météorologiques observées (Quintana-Segui et al., 2008)
SAU	Surface Agricole Utile
SRES	Synthesis Report on Emission Scenarios (Nakicenovic and Swart, 2000).
TP	Temps présent
<i>QMNA5</i>	Débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale (débit mensuel ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être sous-passé)
<i>QJXA10</i>	Débit journalier maximal annuel de fréquence décennale (débit journalier ayant une probabilité 1/10 chaque année d'être surpassé)
QQ	Quantile-quantile (Méthode de désagrégation)
UMR	Unité Mixte de Recherche