

A. DUCHARNE *	LA SEINE EN 2100 ? IMPACTS CROISES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DES PRESSIONS ANTHROPIQUES DIRECTES
* UMR Sisyphe UPMC/CNRS 4 place Jussieu Case 105 75005 PARIS FRANCE	Table des matières : RÉSUMÉ MOTS-CLÉS INTRODUCTION : LE BASSIN DE LA SEINE CHAPITRE 1 : METHODES CHAPITRE 2 : RESULTATS CONCLUSIONS REMERCIEMENTS BIBLIOGRAPHIE

RÉSUMÉ

L'objectif du projet GICC-Seine était d'étudier l'influence du changement climatique (CC) sur l'hydrologie et la qualité de l'eau dans le bassin de la Seine. Pour mieux cerner l'importance de ces impacts quant à l'évolution future du bassin, un élément important de notre démarche fut :

- de les comparer à ceux qui pourraient résulter de changements des principales contraintes anthropiques directes (pollution azotée diffuse d'origine agricole, rejets ponctuels),
- d'évaluer l'incertitude inhérente à l'ensemble de ces changements.

La méthodologie que nous avons développée repose sur le couplage de modèles numériques du milieu et de scénarios prospectifs des principaux facteurs de changement de l'hydrosystème à l'horizon 2100. Les principaux résultats concernent les impacts relatifs de ces facteurs sur l'hydrologie du bassin, sa contamination azotée, et la qualité biogéochimique de l'eau (nutriments, biomasse planctonique, oxygène) et l'impact du CC sur le bassin de la Seine dessiné par l'ensemble de ces résultats n'est pas catastrophique. Cette image prospective ne prétend bien sûr pas être une projection de l'état du bassin, car elle ignore nombre de facteurs de changements, liés ou non au CC, et qui constituent autant de perspectives à notre travail.

MOTS-CLÉS

Changement climatique, Impacts, Modélisation, Qualité de l'eau, Ressource en eau, Seine

INTRODUCTION : LE BASSIN DE LA SEINE

Contexte hydrologique actuel

Le bassin versant de la Seine (Figure 1) couvre 78600 km² (au Havre), soit 14 % de la surface de la France métropolitaine. Il s'inscrit en presque totalité dans le bassin de Paris, bassin sédimentaire comprenant d'importantes formations aquifères. Ces dernières contribuent à réguler le débit des rivières, en association avec une pluviométrie bien répartie au cours de l'année, qui s'explique par un apport assez constant d'humidité par les vents d'ouest (climat océanique). La pluviométrie moyenne sur l'ensemble du bassin est de 750 mm/an (moyenne sur 1931-1960 ; AESN, 1976) et se répartit en 550 mm/an d'évapotranspiration, et 200 mm/an d'écoulement. Cette valeur est faible comparé aux autres fleuves français, qui prennent leur source dans des massifs montagneux plus élevés, donc plus arrosés. Pour les mêmes raisons, le nombre de jours de neige est très faible (à l'exception du Morvan) et l'influence nivale sur le régime hydrologique est négligeable.

Il en résulte un régime hydrologique dit « pluvial océanique », avec un débit maximal en hiver quand l'évapotranspiration est faible, et minimal en été quand elle est forte. A Poses par exemple, qui marque la limite avec le domaine estuarien à l'aval, le débit moyen de la Seine est d'environ 480 m³/s et varie entre 240 m³/s en août et 805 m³/s en février (moyennes sur 1974-2000). Ces

valeurs moyennes sont bien sûr soumises à une importante variabilité inter-annuelle. Les trois dernières crues les plus importantes, en 1910, 1955 et 2001, ont ainsi vu des débits à Poses de 2500, 2300, 2200 m³/s respectivement.

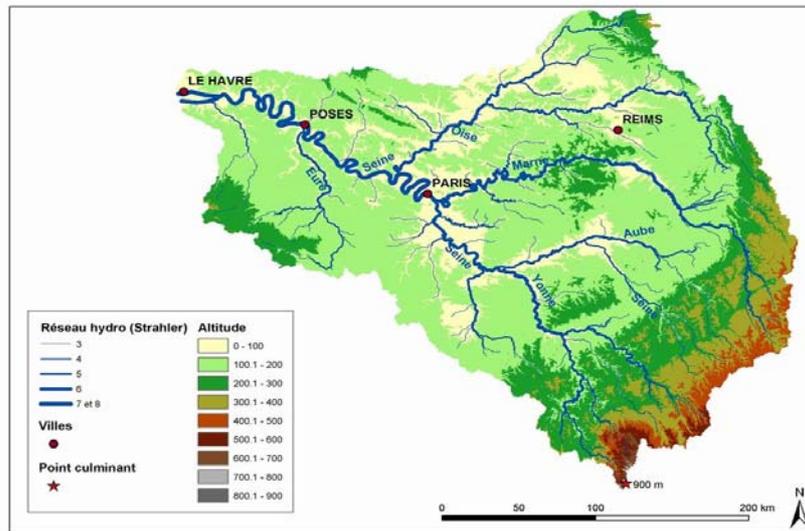


Figure 1 : Topographie et réseau hydrographique du bassin de la Seine.

Enjeux actuels de gestion de l'eau

Le bassin de la Seine bénéficiant d'une pluviométrie suffisante et d'aquifères importants, la ressource en eau n'y est actuellement pas un problème majeur. D'un point de vue quantitatif, ce sont plutôt les crues et leur cortège d'inondations qui suscitent les plus vives craintes. Ainsi, les crues de 1910, 1955 et 2001 ont causé d'importants dommages à Paris, et dès 1910, il fut décidé d'un programme de construction de barrages-réservoirs à l'amont du bassin. Les trois principaux ont été construits en dérivation de la Seine, de la Marne et de l'Aube, sur une auréole argileuse environ 200 km à l'amont de Paris, entre 1966 et 1989. Ils permettent un écrêtement des crues, sensible à l'échelle régionale, mais toutefois limité à Paris étant donné leur éloignement. Là, leur rôle majeur réside dans le soutien du débit d'étiage en fin d'été et en automne, ces trois réservoirs pouvant restituer 60 m³/s, ce qui peut doubler le débit d'étiage à Paris lors des années sèches (Meybeck et al., 1998). Ce soutien permet ainsi d'assurer les prises d'eau nécessaires à la production d'eau potable pour l'agglomération parisienne, et de limiter certains problèmes de qualité de l'eau, menacée par des pressions anthropiques intenses, avec des répercussions tant environnementales que pour l'alimentation en eau potable.

La qualité de l'eau est globalement bonne à l'amont du bassin, à l'exception désormais incontournable d'une pollution de plus en plus marquée par les nitrates d'origine agricole (fertilisants), qui contaminent l'ensemble des aquifères alimentant les rivières. La qualité de l'eau subit en outre une dégradation marquée vers l'aval, en conséquence de l'urbanisation et de l'industrialisation qui font du bassin de la Seine un des plus anthropisés en France. Il concentre 20 millions d'habitants (environ 30 % de la population française), dont plus de 10 millions dans l'agglomération parisienne, ainsi que 40% des activités industrielles nationales. Malgré d'importants efforts de traitement (la station d'épuration d'Achères, à l'aval de Paris, est ainsi la deuxième au monde en terme de volume traité), les rejets associés perturbent la qualité du milieu aquatique : la dégradation de la matière organique et la nitrification de l'ammonium en nitrate nécessitent de l'oxygène, qui peut être déficitaire jusqu'à 100 km à l'aval de Paris (Meybeck et al., 1998) ; l'action combinée des nitrates d'origine agricole et des rejets de phosphates (détergents) favorise en outre l'eutrophisation, qui peut accentuer les déficits en oxygène, jusqu'à parfois affecter la survie des populations piscicoles. Ces problèmes, bien que réduits par l'importante diminution des phosphates dans les produits lessiviels, restent sensibles en été (Billen et al., 2001) quand les faibles débits augmentent les concentrations (rejets dans des volumes moindres) et les temps de résidence dans le milieu (la vitesse des cours d'eau diminuant avec le débit).

La problématique du changement climatique

La réalité d'un changement climatique (CC) suite à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), fait désormais l'objet d'un consensus bien affirmé (Houghton et al., 2001). Il repose sur la convergence de nombreux éléments de preuve :

- les tendances de la température au cours des derniers siècles,
- la comparaison de ces tendances avec la variabilité naturelle du système climatique,
- les simulations, par des modèles climatiques, du CC qui pourrait résulter d'augmentations variées des GES.

Le troisième rapport de synthèse du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ; Houghton et al., 2001) indique ainsi que la température moyenne de la surface du globe pourrait augmenter de 1.5 à 6°C d'ici à 2100, cette fourchette représentant l'incertitude liée aux modèles climatiques d'une part, et à l'évolution des émissions de GES d'autre part. A l'échelle du globe, ce réchauffement global entraîne une augmentation de l'évaporation et, par suite, des précipitations moyennes, même si les simulations de CC suggèrent une réduction des précipitation dans les tropiques. Les variations de précipitation constituent cependant une des incertitudes majeures quant aux effets potentiels de l'augmentation des GES, à cause notamment de la mauvaise connaissance des mécanismes de rétroaction entre processus radiatifs, convection et couverture nuageuse. Ces incertitudes augmentent en outre à l'échelle régionale, du fait de la représentation simplifiée des processus de petite échelle dans les modèles climatiques.

En Europe, le changement le plus probable correspond à une intensification des contrastes hydrologiques, avec des risques accrus d'inondations en hiver et de sécheresses en été. Il importe donc de préciser régionalement la nature de ces risques, et d'étudier leurs conséquences sur les cours d'eau et les systèmes aquifères, en termes de quantité et de qualité. Ces deux aspects sont en effet complémentaires pour définir la ressource en eau, surtout dans des bassins soumis comme celui de la Seine à une forte anthropisation. Celle-ci se traduit en effet par des pressions importantes sur l'environnement (pollutions, aménagements...) et introduit des facteurs de changement supplémentaires puisqu'elle est soumise à la décision humaine (gestion).

Le projet GICC-Seine

C'est dans ce contexte prospectif que s'inscrit le projet « GICC-Seine » (Ducharne et al., 2005 ; Ducharne et al., 2007), développé dans le cadre du programme « Gestion et Impact du Changement Climatique » du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. L'objectif principal de ce projet était d'étudier l'influence du changement climatique sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine au cours de XXIème siècle, sous son double aspect quantitatif et qualitatif. Le projet visait en outre à intégrer l'analyse des possibles changements climatiques dans le cadre d'une réflexion prospective plus large, prenant en compte d'importants facteurs de changement, ceux induits par l'activité humaine. La question qui est posée ici est de pouvoir comparer l'ordre de grandeur des impacts du CC par rapport à ceux d'autres tendances probables d'évolution du système Seine. Etant donné les enjeux actuels de gestion de l'eau dans le bassin de la Seine, nous nous sommes focalisés sur les changements des contraintes anthropiques directes liées aux apports diffus d'origine agricole et aux apports ponctuels domestiques et industriels.

1. METHODES

1.1. Modèles

Nous avons alors utilisé un ensemble de 4 modèles déterministes, articulés au cours de la dernière décennie dans le cadre du programme PIREN-Seine, pour simuler le fonctionnement hydrologique et biogéochimique de l'hydrosystème Seine. Ces modèles privilégient au maximum la description des processus sur des bases physiques, ce qui justifie, sous réserve de validation bien sûr, d'appliquer ces modèles dans des conditions éloignées de celles qui ont prévalu à leur développement, et constitue un atout majeur dans le cadre prospectif de cette étude. Ces modèles et leur validation individuelle sont détaillés dans Ducharne et al. (2005) et Ducharne et al. (2007).

Le modèle STICS est un modèle de fonctionnement de culture à pas de temps journalier qui simule l'impact du climat, du sol et de la conduite des cultures à la fois sur la production végétale et sur l'environnement (Brisson et al., 2003). Les bilans d'eau, de carbone et d'azote, ainsi que la production agricole, sont calculés de façon dynamique au sein du système sol-plante, à l'échelle de la parcelle, en fonction des conditions météorologiques, de la nature des sols, des successions culturales et des pratiques agricoles associées.

Le modèle MODCOU (Ledoux, 1980) couple une description des écoulements de surface et des écoulements souterrains en aquifère multicouche, afin de simuler, entre autres, les débits simulés en rivière et la piézométrie des aquifères représentés (Craie, Eocène et Oligocène pour cette étude). Ce modèle finement distribué décrit la production des écoulements en fonction de la pluviométrie et de l'ETP, les transferts dans la zone non saturée puis dans les aquifères, les échanges entre nappes et rivières, et les débits résultants dans le réseau hydrographique.

Afin de quantifier le lien existant entre la contamination nitrrique des aquifères ou des cours d'eau et les pratiques agricoles en cours ou à venir, un modèle intégré associant le modèle agronomique STICS (simulation des flux de nitrate à la base de la zone racinaire), le modèle hydrologique MODCOU (simulation des écoulements superficiels et souterrains) et le modèle hydrogéologique NEWSAM (simulation de l'écoulement et du transport d'éléments en solution dans le domaine souterrain) a été développé sur le bassin de la Seine (Gomez, 2002 ; Ledoux et al., 2007). Ce modèle couplé STICS-MODCOU-NEWSAM permet de simuler les transferts d'azote depuis les sols jusqu'aux eaux de surface, en tenant compte de l'inertie conférée par les temps de résidence parfois très longs dans la zone non saturée et les aquifères.

Le modèle CaB (pour « Catchment-Based » ; Koster et al., 2000 ; Ducharne et al., 2000) est un modèle du fonctionnement des surfaces continentales, qui simule sur des bases physiques l'ensemble des processus régissant les bilans d'eau et d'énergie au niveau du sol. Originellement développé pour être couplé à un modèle climatique, il est particulièrement adapté pour faire le lien entre hydrologie et climat. Ce modèle semi-distribué subdivise le bassin de la Seine en 29 sous-bassins versants, au sein desquels il décrit les écoulements latéraux dans une nappe phréatique « conceptuelle ». Celle-ci n'est cependant pas équivalente à un système aquifère multicouche comme celui qui prévaut dans le bassin de la Seine.

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

Dans cette étude, les écoulements superficiels et souterrains requis par Riverstrahler sont simulés par le modèle CaB. La composition de ces deux composantes, qui représente les apports diffus, est renseignée pour chaque bassin à partir de l'usage du sol et de la lithologie du bassin versant, à l'exception de la teneur en nitrates qui est fournie par le modèle STICS/MODCOU/NEWSAM. Avant d'arriver au cours d'eau, ces teneurs en nitrates sont d'abord réduites par dénitrification à travers les zones riveraines. Ce processus est plus intense en été qu'en hiver, avec un abattement moyen, sur le bassin et sur l'année, de 50%. Les apports ponctuels sont également pris en compte, à partir des données fournies par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN).

L'articulation des ces différents modèles fut validée sur la période 1986-1990 (5 ans) avec les forçages suivants :

- données météorologiques SAFRAN fournies par Météo-France à la résolution de 8 km pour tous les modèles
- écoulements simulés par le modèle hydrologique CaB pour cette période,
- température de l'eau et insolation représentative de cette période,
- gestion des barrages effectivement réalisée pendant cette période (source : IIBRBS),
- apports ponctuels (stations d'épuration et industries) de 1991 (source : AESN),

- apports diffus en nitrates définis par les concentrations des simulations STICS-MODCOU-NEWSAM, calées pour être représentatives de l'année 2000, à partir des successions culturales et des pratiques recensées dans le bassin sur 1990-2000 (Mignolet et al., 2007)

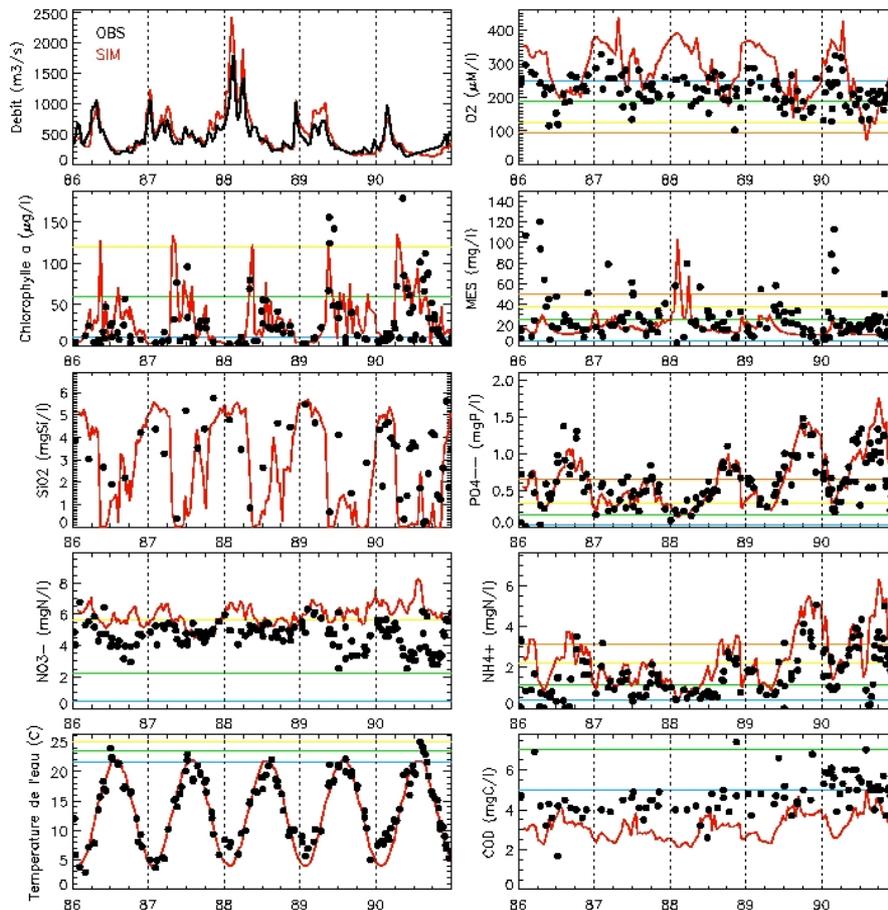


Figure 2 : Comparaison à Poses de la simulation de validation du modèle Riverstrahler avec les données observées disponibles sur la période 1986-1990 (source : RNB) : débits, température de l'eau, biomasse phytoplanctonique (exprimée en concentration de chlorophylle) et concentrations en ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-), ortho-phosphates (PO_4^{2-}), oxygène (O_2), silice dissoute (SiO_2), matières en suspension (MES) et carbone organique dissous (COD). Les barres horizontales bleues, vertes, jaunes et orange marquent les limites entre les classes de qualité Très bonne, Bonne, Passable, Mauvaise et Très mauvaise du SEQ-Eau.

Cette simulation présente des performances très satisfaisantes à Poses (Figure 2), comme aux 22 stations que nous avons également considérées pour cette validation et qui sont distribuées dans l'ensemble du réseau hydrographique amont. On peut remarquer une surestimation de la concentration en nitrates, mais elle peut s'expliquer par l'utilisation des apports diffus simulés par STICS/MODCOU/NEWSAM pour l'année 2000 et non 1991. Elle est en effet cohérente avec l'augmentation moyenne de $4 \text{ mgNO}_3^-/\text{l}$ (0.9 mgN/l) tous les 10 ans constatée dans les nappes lors des 30 dernières années (Gomez, 2002).

1.2. Scénarios prospectifs

Scénarios de changement climatique

Pour caractériser les nombreuses incertitudes sur le changement climatique, nous avons construit 12 scénarios du CC moyen, basés sur des simulations réalisées avec 8 modèles climatiques différents, forcés par un ou deux scénarios d'émissions en GES (parmi 3 possibilités : scénarios A2 et B2 du SRES, et scénario d'augmentation du CO_2 au taux de 1% par an depuis 1990). Ces

scénarios sont détaillés Ducharne et al. (2005). Tous ces scénarios (Figure 3) s'accordent sur un réchauffement significatif (de 3.1°C en moyenne, avec un écart type de 1.55°C sur l'ensemble des 12 scénarios), qui est lié à l'augmentation du rayonnement infrarouge incident (conséquence directe de l'augmentation de l'effet de serre atmosphérique) et qui entraîne une augmentation significative de l'humidité de l'air. Les précipitations présentent une réponse radicalement différente, selon une tendance assez générale vers une augmentation en hiver et une diminution en été, mais avec une forte dispersion, et un changement non significatif en moyenne annuelle. Le rayonnement solaire incident tend à augmenter en été, car la diminution des précipitations réduit la nébulosité, alors que pression atmosphérique et vitesse du vent ne présentent pas de variations statistiquement significatives. En conséquence de ces changements météorologiques, l'ETP augmente, mais cet effet a été modérée par des coefficients multiplicateurs calculés grâce au modèle agronomique STICS, pour rendre compte de la réduction de ce terme quand l'effet de la teneur en CO₂ augmente.

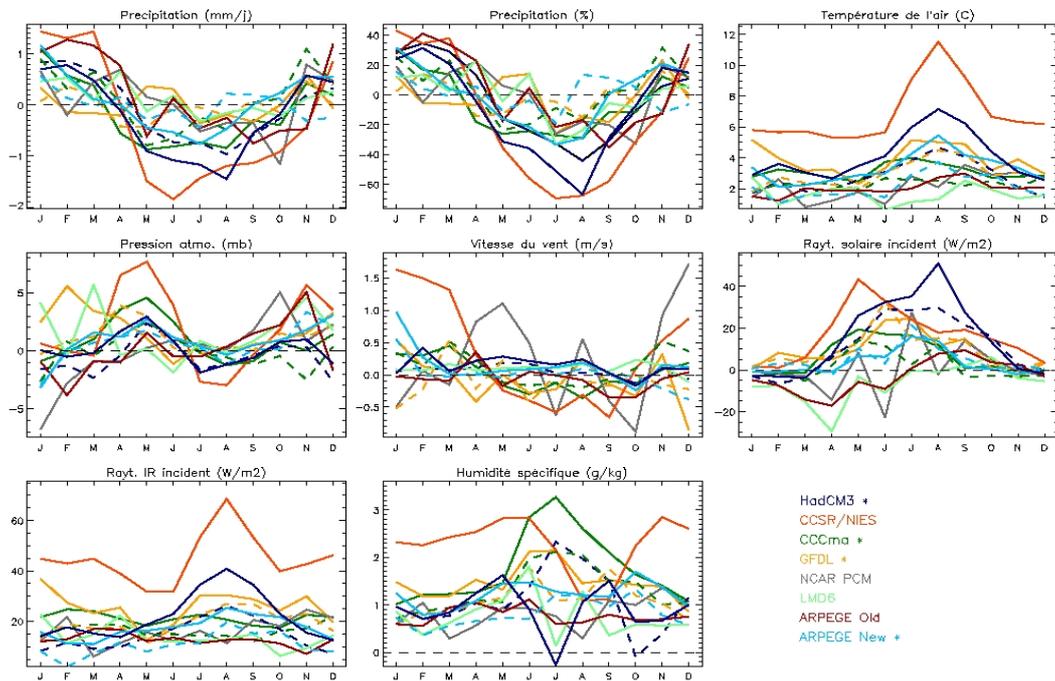


Figure 3 : Variations mensuelles moyennes par rapport à l'actuel (1985-1991) des variables de forçage nécessaires au modèle CaB, selon les 12 simulations de CC exploitées. Les couleurs correspondent aux 8 MCG listés dans la figure. Nous disposons de simulations sous scénarios d'émission A2 et B2 pour 4 MCG, indiqués par un astérisque. Pour ces 4 MCG, les lignes en trait plein correspondent au scénario A2, et les lignes en tiretés au scénario B2.

Scénario d'évolution du système agricole

Nous nous sommes limités à un unique scénario d'« Agriculture raisonnée », qui préserve les successions culturales actuelles, mais introduit des pratiques plus respectueuses de l'environnement, en extrapolation tendancielle du décret de janvier 2004 sur l'agriculture raisonnée : réduction de la fertilisation azotée minérale de 20% et introduction de cultures intermédiaires pour limiter les fuites de nitrate en hiver (Ducharne et al., 2007). Il a été démontré expérimentalement que ces pratiques permettaient une diminution significative des flux de nitrate à la base du sol avec une diminution limitée de la production agricole (Beaudoin et al., 2005).

Scénarios d'évolution des rejets ponctuels

Trois scénarios de rejets ponctuels, d'origine industrielle et domestique, ont été développés à l'horizon 2050, parce qu'il n'a pas semblé raisonnable de postuler d'évolution des politiques au-delà. La méthodologie de construction de ces scénarios est détaillée dans Ducharne et al. (2005). Ils intègrent des hypothèses sur l'évolution de la démographie, des taux de raccordement, du secteur industriel et du progrès technologique d'épuration et de dépollution. Les scénarios du

SRES (Nakicenovic and Swart, 2000), développés pour contraindre les simulations du changement climatique, fournissent des éléments de cadrage socio-économique pour ces hypothèses d'évolution, qui ont été déclinées dans le bassin de la Seine à partir d'une revue bibliographique de la prospective spécialisée (e.g. démographie, INSEE, 2003; techniques d'épuration, etc.) et d'interviews d'experts. A l'échelle du bassin versant (Tableau 1), le facteur le plus sensible sur les rejets ponctuels en 2050 est le progrès des technologies d'épuration pour 2050, d'où les noms de Basse, Moyenne et Haute Technologie pour ces scénarios. Au niveau local, les variations démographiques et/ou de fermeture de sites industriels peuvent également jouer des rôles très significatifs.

Tableau 1 : Rejets ponctuels totaux en 2050, agrégés à l'échelle du bassin versant de la Seine.

Polluants	Rejets 2000*	Rejets 2050					
		Basse Technologie (SRES A2)		Moyenne Technologie (SRES B2)		Haute Technologie (SRES A1/B1)	
MES	346595	549518	58,5%	240590	-30,6%	28579	-91,8%
MO	382477	488997	27,8%	206886	-45,9%	28801	-92,5%
Azote	110490	58550	-47,0%	26904	-75,7%	3402	-96,9%
Phosphore	24095	19087	-20,8%	8557	-64,5%	654	-97,3%

1.3. Simulations prospectives

Les forçages suivants sont soumis à des évolutions dans les simulations étudiées pour analyser l'influence relative des possibles facteurs de changements dans le bassin de la Seine au cours du XXIème siècle sont caractérisées par les suivants :

- apports ponctuels de 1991 ou 2000 (source : PIREN-Seine), ou issus des scénarios d'évolution des rejets ponctuels à l'horizon 2050 (Basse Technologie BT, Moyenne Technologie MT, Haute Technologie HT, voir section précédente **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**),
- écoulements simulés par CaB sous climat actuel (années calendaires 1986-1990) ou perturbé sur cette base par les 12 scénarios de CC,
- apports diffus en nitrates simulés par le modèle STICS/MODCOU/NEWSAM sous différentes combinaisons de scénarios climatiques (actuels ou changement climatique) et agricoles (agricoles ou agriculture raisonnée), à l'horizon 2000 ou 2100,
- température de l'eau, prescrite à partir d'observations actuelles, ou modifiées pour rendre compte du réchauffement climatique : sur la base d'une analyse statistique des relations entre la température de l'air et celle de l'eau, sur la période 1993-1999 et sur plus de 100 points qui échantillonnent toute la variété des cours d'eau du bassin de la Seine, nous avons déduit les températures de l'eau sous CC en ajoutant l'augmentation moyenne de température de l'air donnée par les scénarios de CC à ses valeurs actuelles.

D'autres forçages sont inchangés dans toutes les simulations :

- les apports diffus hors nitrates (incluant donc la silice et les apports diffus de phosphates et d'ammonium) sont déduits de l'usage du sol et de la lithologie actuels du bassin versant ;
- la gestion des barrages reste sous CC celle des années 1986-1990 (source : IIBRBS), faute de prospective spécifique.
- les variations de rayonnement solaire incident dues au CC et leur influence sur le phytoplancton sont négligées, étant donné la forte extinction de la lumière par l'eau.

Parmi l'ensemble des simulations réalisées dans le cadre du projet GICC-Seine, cet article présente l'analyse de l'impact direct du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et ses incertitudes, basée sur 12 simulations avec le modèle CaB assorties de leur simulation de référence (1986-1985), et 4 simulations avec le modèle MODCOU, elles aussi assorties de leur simulation de référence (1970-1989). Pour illustrer l'impact relatif des différents facteurs de changement sélectionnés, nous avons réduit le nombre des simulations analysées à celles construites en croisant un scénario prospectif représentatif de chaque facteur, à savoir, comme dans Ducharne et al. (2007), le scénario de changement climatique construit à partir de la simulation par le modèle

ARPEGE de Météo-France sous scénario d'émissions A2, le scénario de rejets ponctuels « Moyenne Technologie » et le scénario d'Agriculture Raisonnée (« Good Agricultural Practices » dans le Tableau 2).

Tableau 2 : Description des simulations retenues pour analyser l'impact croisé des 3 facteurs de changement du bassin de la Seine au cours du XXIème siècle : le changement climatique, illustré par le scénario ARPEGE A2 ; la réduction des rejets ponctuels, illustrée par le scénario « Moyenne Technologie » ; le changement du système agricole, illustré par le scénario d'agriculture raisonnée (« Good Agricultural Practices »).

		Rejets ponctuels	Climat	Température de l'eau	Pratiques agricoles	Horizon temporel
VAL	Validation	1991	Actuel	Actuelle	Actuelles (1990-2000)	2000
SAT	« Same as Today »	2000	Actuel	Actuelle	Actuelles (1990-2000)	2100
REF	Référence Prospective (Rejets 2050)	2050 MT	Actuel	Actuelle	Actuelles (1990-2000)	2100
GAP	« Good Agricultural Practices »	2050 MT	Actuel	Actuelle	Agriculture Raisonnée	2100
A2+GAP	GAP + changement climatique	2050 MT	ARPEGE A2	Modifiée selon ARPEGE A2	Agriculture Raisonnée	2100
A2	Changement climatique	2050 MT	ARPEGE A2	Modifiée selon ARPEGE A2	Actuelles (1990-2000)	2100
A2-Tw	CC sans effet sur la température de l'eau	2050 MTS	ARPEGE A2	Actuelle	Actuelles (1990-2000)	2100

2. Résultats

2.1. Impacts sur l'hydrologie du bassin de la Seine

Les 12 simulations réalisées avec le modèle hydrologique CaB montrent une augmentation de l'évaporation en hiver et au printemps, l'augmentation des précipitations permettant d'alimenter la demande évaporative accrue. En été, celle-ci est au contraire contrecarrée par l'augmentation du stress hydrique (humidité de la zone racinaire réduite), si bien que l'évaporation diminue. La résultante annuelle est une augmentation de l'évaporation qui, cumulée à la diminution des précipitations, entraîne une diminution de l'humidité de la zone racinaire, et une diminution des écoulements (Figure 4).

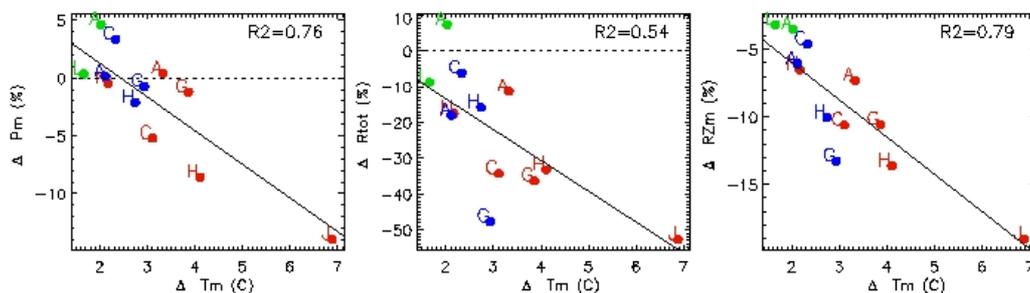


Figure 4 : Moyennes interannuelles sur le bassin de la Seine : Relations entre les variations moyennes de température sous CC et les variations associées de précipitations, d'écoulement total et d'humidité de la zone racinaire par rapport au climat actuel, selon le modèle CaB. Les lettres réfèrent aux modèles climatiques utilisés pour les simulations de CC (A : ARPEGE, C : CCCma, G : GFDL, H : HadCM3, J : CCSR/NIES, L : LMD6, N : NCAR PCM) et les points rouges, bleus et verts correspondent aux scénarios d'émission A2, B2 et +1% CO₂/an.

On note aussi une tendance à la diminution des précipitations moyennes avec le réchauffement climatique. Cet effet régional dans le bassin de la Seine s'oppose aux tendances reportées à l'échelle globale dans le cadre de l'IPCC (Le Treut et MacAveney, 2000). La Figure 4 montre aussi que les impacts hydrologiques sont plus marqués sous scénarios d'émissions A2 que B2. Les émissions étant plus fortes selon A2 que B2, ceci suggère qu'une limitation des émissions en GES (à l'échelle globale) peut limiter les impacts du CC sur l'hydrologie du bassin de la Seine.

La Figure 5 montre une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine, conforme avec les études d'impact synthétisées par l'IPCC (Houghton et al., 2001). Elle se traduit par une diminution très robuste des débits d'étiages, systématique sur les 12 simulations réalisées avec le modèle CaB et les 4 simulations réalisées avec MODCOU. L'évolution des débits de crue est en revanche beaucoup moins certaine, nos simulations montrant des cas d'augmentation comme de diminution, quelque soit le modèle hydrologique considéré. Ceci s'explique par la variabilité importante des changements de précipitation (en hiver mais aussi en termes de contrastes saisonniers), et nous empêche de conclure avec certitude sur l'évolution des crues sous CC.

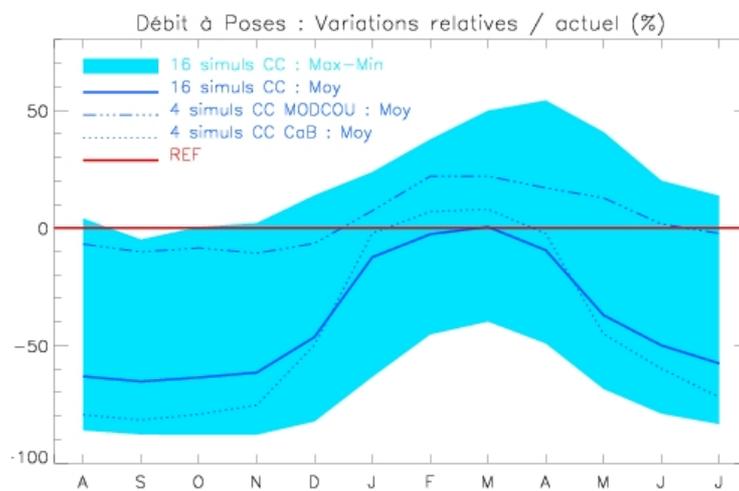


Figure 5 : Variations relatives du débit mensuel moyen simulé à Poses sous CC par rapport à la simulation de référence actuelle représentée par la ligne rouge pour les modèles CaB et MODCOU. L'enveloppe bleue définit la gamme de variation couverte par les 16 simulations d'impact par les deux modèles hydrologiques et la courbe bleue correspond à leur moyenne. Les tiretés montrent la moyenne des 4 simulations réalisées avec le modèle MODCOU, et les pointillés celle des simulations réalisées avec selon les mêmes 4 scénarios de CC.

Simulés par CaB, les 4 scénarios de CC qui ont été exploités par MODCOU entraînent des débits plus forts que la moyenne des 12 scénarios, et parmi ces 4, le scénario ARPEGE A2 donne des débits très proches de la moyenne des 12 scénarios. La Figure 5 montre surtout que les deux modèles ont des réponses très différentes au CC, avec des débits sous CC beaucoup plus forts selon MODCOU que selon CaB. Ceci s'explique par le fait que la nappe conceptuelle du modèle CaB peut se vider par évapotranspiration, contrairement aux aquifères plus profonds simulés par MODCOU, uniquement drainés par le débit de base. Sur les 4 scénarios analysés, le modèle hydrogéologique MODCOU montre ainsi que les variations de niveau piézométrique des nappes aquifères restent faibles (amplitude généralement inférieure à 2 mètres). Le comportement du modèle est certainement moins réaliste, mais peut être vu comme l'illustration d'une irrigation optimale (Ducharne et al., 2007).

2.2. Impacts sur la production agricole et la pollution azotée

Ces impacts sont résumés en Figure 6 par des moyennes sur l'ensemble du bassin de la Seine. Le modèle STICS nous a permis d'évaluer les impacts directs du CC sur la production agricole du bassin de la Seine. Le réchauffement permet d'avancer les dates de récolte, de 10 à 35 jours selon les cultures et les scénarios de CC. Ceci facilite la maturité complète des cultures, si bien que les cultures actuellement présentes dans le bassin de la Seine devraient être moins risquées sous CC.

Un autre impact positif est l'augmentation du rendement des cultures (de 14 à 25% en moyenne), sous l'effet conjugué du CC et de l'augmentation de la teneur en CO₂ (fertilisation carbonée). Ces résultats ont bien entendu alimenté la construction des scénarios agricoles et justifient de maintenir les successions culturales actuelles dans le scénario simplifié « Agriculture raisonnée ».

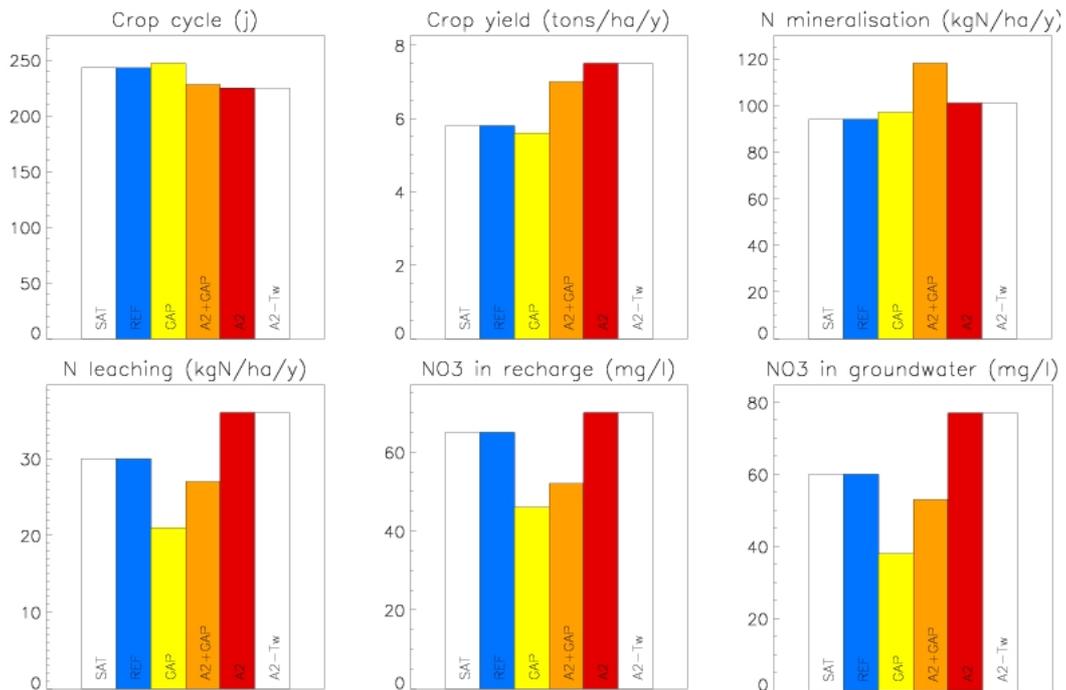


Figure 6 : Impacts agro-environnementaux simulés par les modèles STICS et STICS-MODCOU-NEWSAM : moyennes interannuelles sur 20 ans dans le bassin de la Seine. Les concentrations souterraines en nitrate correspondent aux fractions libres des aquifères simulés. Les noms des simulations et les couleurs renvoient au Tableau 2.

Le CC entraîne aussi une minéralisation accrue de l'azote du sol en nitrates (+10%), qui contribue à l'augmentation des rendements, et qui s'accompagne d'une augmentation du flux de nitrates du sol vers les nappes, modulée par les changements de pluviométrie qui accompagnent le CC et par l'activité agricole. Il en résulte une augmentation générale de la concentration de nitrates dans les aquifères (Figure 7), qui s'intensifie avec le temps (2050 vs. 2100), et qui présente des contrastes régionaux marqués. Ceux-ci sont liés aux contrastes des concentrations sous-racinaires et des flux associés (Ducharne et al., 2005), mais sont aussi modulés par la structure du système aquifère. L'augmentation est globalement plus marquée quand la nappe est libre, i.e. non recouverte d'une autre formation aquifère, comme l'illustre bien le cas de l'aquifère de la Craie, dont le centre est recouvert par les aquifères de l'Oligocène et de l'Eocène.

Cet impact du CC fut comparé à celui du scénario d'agriculture raisonnée (Figure 6). Celui-ci présente un réel intérêt du point de vue environnemental, car il permet de réduire notablement la concentration nitrique moyenne de l'eau infiltrée (-32% en climat actuel), et donc celle des aquifères à l'horizon 2100. Les impacts de l'agriculture raisonnée et du CC ARPEGE A2 sont donc opposés et de même ordre de grandeur. L'analyse de leurs impacts croisés montre ainsi que le scénario d'Agriculture Raisonnée permet de contrebalancer l'augmentation de la pollution azotée due au scénario de changement climatique A2, tout en préservant l'impact positif de ce dernier sur les rendements agricoles.

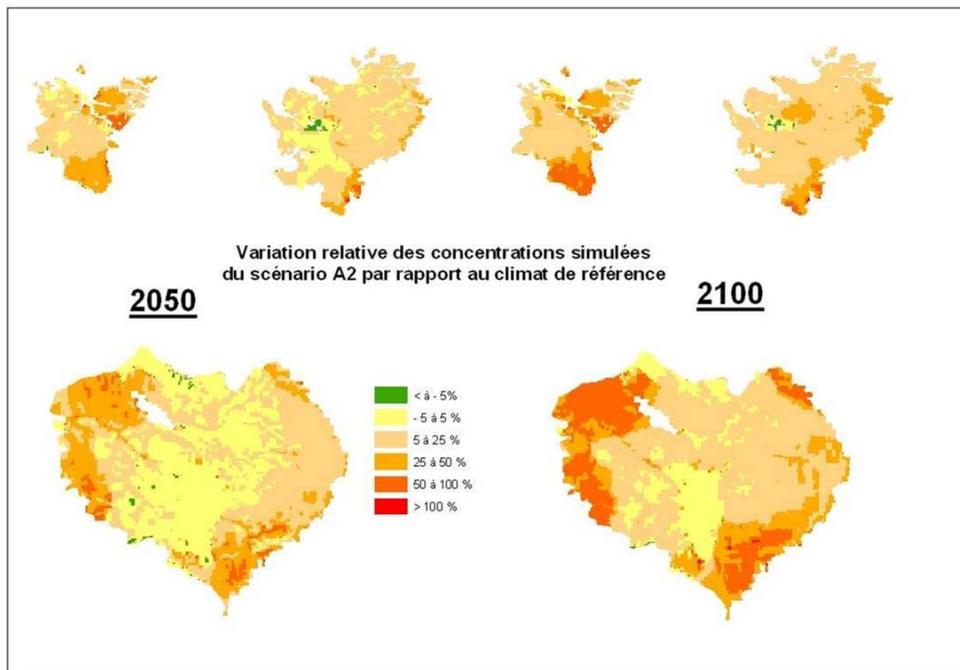


Figure 7 : Variations relatives des concentrations simulées par le modèle couplé STICS-MODCOU-NEWSAM sous scénario ARPEGE A2 par rapport au climat de référence après 50 et 100 ans de simulation.

2.3. Impacts sur la qualité de l'eau

L'impact le plus marquant est celui de la réduction générale des rejets ponctuels, qui entraîne une amélioration drastique de la qualité des cours d'eau, comme le montre la comparaison des simulations SAT et REF en Figure 8, et qui s'exprime de manière voisine pour les 3 scénarios de rejets ponctuels à l'horizon 2050. La diminution des rejets en ammonium, ainsi qu'en carbone organique, permet de d'augmenter l'oxygénation de l'eau, ce qui est particulièrement sensible en période de basses eaux. La diminution des phosphates, qui deviennent limitants, permet elle une baisse de la biomasse algale (proportionnelle à la teneur en chlorophylle), qui s'accompagne d'une augmentation en silice dissoute puisque le phytoplancton est dominé par des algues siliceuses.

Les autres simulations, visant à évaluer l'impact du CC et de l'agriculture raisonnée, intègrent cette réduction des rejets car elle est hautement probable. En ce qui concerne la teneur en nitrates dans les cours d'eau, le CC exerce son impact via les apports diffus depuis les nappes et le bassin versant agricole (modulés par la rétention dans les zones ripariennes). L'impact du CC se traduit donc par une augmentation de la concentration, mais moindre que dans les aquifères. A l'horizon 2100, le scénario de CC entraîne ainsi une augmentation de la teneur en nitrates, qui passe de 31 à 40 mgNO_3/l en moyenne annuelle à Poses, et atteint 50 mgNO_3/l , i.e. la norme de potabilité, en hiver. Cette augmentation est supérieure à celle qui résulte de la simple inertie des aquifères et de la zone saturée entre 2000 et 2100 (+7 mgNO_3/l , non représenté). L'agriculture raisonnée et la réduction des rejets ponctuels ont un impact du même ordre de grandeur (10 mgNO_3/l environ), mais opposé, et comme dans les aquifères, l'impact du CC (scénario ARPEGE A2) limite fortement celui de l'agriculture raisonnée.

Dans aucun des cas, les nitrates ne sont limitant pour la croissance phytoplanctonique, si bien que les variations de leur concentration n'ont pas de répercussions sur les autres variables biogéochimiques (autres nutriments, i.e. phosphates, ammonium et silice, biomasse, oxygène). L'impact du CC sur ces dernières ne peut donc résulter dans nos simulations que des variations du débit (jouant sur les temps de résidence et la dilution) ou de la température de l'eau (jouant sur la

cinétique des processus biogéochimiques). La comparaison des simulations REF, A2 et A2-Tw montre qu'il est largement dominé par le réchauffement de l'eau, qui augmente la croissance algale au printemps, mais surtout augmente en été les facteurs de mortalité (zooplancton, virus, Dreissènes). La biomasse algale réduite s'accompagne d'une augmentation de la silice dissoute, susceptible de réduire l'eutrophisation côtière. La teneur en oxygène diminue légèrement par réduction de la photosynthèse, mais cet effet n'altère pas significativement la qualité de l'eau.

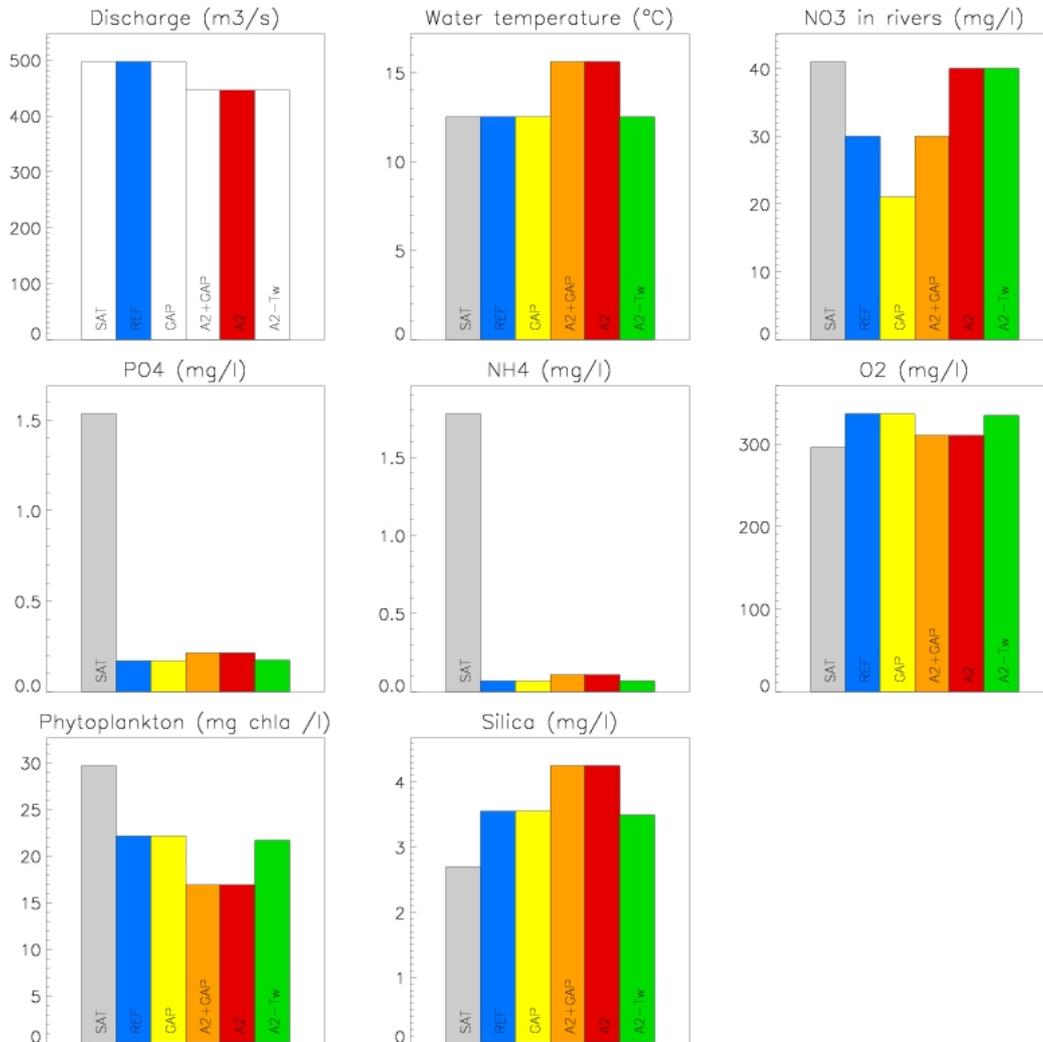


Figure 8 : Qualité de l'eau simulée à Poses par le modèle Riverstrahler : moyennes interannuelles sur 5 ans. Les noms des simulations et les couleurs renvoient au Tableau 2.

A l'exception notable des nitrates, l'impact du CC est du même ordre de grandeur que celui des différences entre les 3 scénarios de rejets ponctuels, et très marginal par rapport à celui de la réduction générale des rejets selon ces 3 scénarios à l'horizon 2050. Les tendances illustrées à Poses en Figure 8 sont vérifiées dans l'ensemble du réseau hydrographique, bien que dans une moindre mesure puisque les apports ponctuels et comme le développement planctonique sont moindres à l'amont de Paris.

CONCLUSIONS

L'impact du CC sur le bassin de la Seine, dessiné à l'horizon 2100 par l'ensemble de ces résultats, est loin d'être catastrophique. Cette image ne prétend bien sûr pas être une projection de l'état du bassin, car elle ignore nombre de facteurs de changements, liés ou non au CC, et qui constituent autant de perspectives à notre travail.

La première est une meilleure prise en compte de l'évolution du système agricole, dont on a vu qu'il était le facteur principal de l'évolution des teneurs en nitrates. Outre les changements qui se développeront indépendamment du changement climatique, comme ceux liés à la mondialisation à la PAC à l'échelle européenne, il serait particulièrement intéressant d'évaluer l'impact du CC sur certaines pratiques agricoles susceptibles de faire l'objet de mesures d'adaptation au CC :

- l'irrigation et le drainage agricole sont fortement susceptibles d'être adaptées aux nouvelles conditions climatiques, et de modifier en retour l'hydrodynamique et le cycle de l'azote dans le bassin ;
- il en va de même pour des pratiques qui découleraient de nouvelles problématiques phytosanitaires (apparition de nouvelles maladies des cultures sous CC) ;
- on peut enfin anticiper des adaptations des décisions de l'agriculteur (donc des itinéraires techniques) au CC. Un exemple est celui de la fertilisation azotée, car la sécheresse en fin de cycle rend l'azote du sol indisponible, même si celui-ci est présent de façon plus abondante à cause de l'augmentation de la minéralisation ; un autre concerne l'impact des changements de précipitation sur la portance des engins agricoles, et le calendrier de leurs interventions.

Une seconde perspective est plus hydrologique, avec deux volets principaux :

- la modification des débits est susceptible d'affecter la gestion des grands barrages réservoirs de la Seine et mériterait donc une prospective spécifique ;
- toute modification de la variabilité du climat peut influencer les extrêmes (crues et étiages), en amplitude, en fréquence et en durée. Cet impact potentiel du CC est essentiel en termes de risques, mais il ne peut pas être appréhendé avec les simulations de CC que nous avons exploitées.

Ces deux derniers points seront abordés dans le cadre d'un nouveau projet financé par le programme « Gestion et Impact du Changement Climatique » du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Ce projet RexHySS (Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme) bénéficiera de deux nouvelles méthodes de désagrégation des simulations de changement climatique (méthode des régimes de temps et méthode de la correction variable) qui permettent de rendre compte des changements de variabilité du climat, de l'échelle journalière à interannuelle, en plus du changement de climat moyen auquel s'était limité le projet GICC-Seine. Cette caractéristique est essentielle pour aborder l'impact du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques, qui déterminent en grande part la vulnérabilité des systèmes socio-économiques.

Nous chercherons d'abord à caractériser comment le changement climatique est susceptible de modifier la distribution de ces extrêmes, en terme de crues, d'étiages et de sécheresse (analyse fréquentielle et prédétermination). Ces analyses seront alimentées par les débits, humidités du sol et niveaux piézométriques simulés par plusieurs modèles hydrologiques. Nous nous intéresserons ensuite à certaines manifestations de ces extrêmes particulièrement sensibles pour la société. Concernant les inondations, nous déterminerons les modifications de leur extension dans des zones clés des bassins (vallée de la Somme en amont d'Abbeville, corridor fluvial de la Seine, incluant Paris et plaine alluviale de la Bassée) pour certaines périodes de retour. Nous nous intéresserons aussi aux relations entre l'agriculture et les hydrosystèmes continentaux, en ce qui concerne les besoins en irrigation, leur impact sur la ressource en eau et la production agricole, et la pollution diffuse par les nitrates, qui peuvent être simulés dans le bassin de la Seine grâce au modèle couplé STICS/MODCOU. Nous évaluerons comment ces processus et leurs interactions peuvent être modifiés sous l'effet du changement climatique, en distinguant l'effet du changement de climat moyen et celui du changement de variabilité.

Le dernier volet du projet RExHySS sera dédié aux rétroactions entre les changements de l'hydrosystème et les systèmes sociaux. Cet aspect sera abordé par des ateliers avec les acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau dans les bassins versants étudiés. Nos résultats y seront diffusés sous une forme adaptée pour leur permettre une expertise socio-économique de la modification des extrêmes hydrologiques, et définie avec eux. Parmi les questions sensibles dans ce cadre, on trouve les rejets urbains de temps de pluie et l'influence des inondations sur les infrastructures, les transports ou la production d'énergie.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier l'ensemble des collaborateurs du projet GICC-Seine, ainsi que les programmes « Gestion et Impact du Changement Climatique » du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et PIREN-Seine pour leur financier.

BIBLIOGRAPHIE

AESN, 1976, *Les bassins de la Seine et des cours d'eau normands – Hydrologie générale et conclusions*. Agence de l'Eau Seine-Normandie, Nanterre, tome 1, fasc. 6.

BEAUDOIN N, J. SAAD J, VAN LAETHEM C, MACHET JM, MAUCORPS J, MARY B, 2005, Nitrate leaching in intensive arable agriculture in France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 111: 292-310.

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

BILLEN G., J. GARNIER, A. FICHT, C. CUN, 2001, Modelling the response of water quality in the Seine Estuary to human activity in its watershed over the last 50 years. *Estuaries*, 24: 977-993

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

BRISSON N, GARY C, JUSTES E, ROCHE R, MARY B, RIPOCHE D, ZIMMER D, SIERRA J, BERTUZZI P, BURGER P, BUSSIÈRE F, CABIDOUCHE YM, CELLIER P, DEBAEKE P, GAUDILLÈRE JP, HÉNAULT C, MARAUX F, SEGUIN B, SINOQUET H, 2003, An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18: 309-332.

DUCHARNE, A., KOSTER, R.D., SUAREZ, M., STIEGLITZ, M., KUMAR, P., 2000, A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2: Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.*, 105(D20): 24823-24838.

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, THERY S, 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

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

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 l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 287 pp.

HOUGHTON, J., DING, Y., GRIGGS, D., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P., DAI, X., MASKELL, K., JOHNSON, C. , 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC*. Cambridge University Press. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm

INSEE, 2003, Projections démographiques pour la France, ses régions et ses départements (Horizon 2030/2050), INSEE.

KOSTER, R.D., SUAREZ, M., DUCHARNE, A., STIEGLITZ, M., KUMAR, P., 2000, A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 1: Model structure. *J. Geophys. Res.*, 105(D20): 24809—24822.

LEDoux, E., 1980, Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

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.

LE TREUT, H., MACAVENEY, B.J., 2000, A model intercomparison of equilibrium climate change in response to CO2 doubling. Note du Pôle de Modélisation de l'IPSL, Number 18, Institut Pierre Simon Laplace, Paris, France.

MEYBECK, M., DE MARSILY, G., FUSTEC, E., 1998, La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé. Elsevier.

MIGNOLET, C., SCHOTT C. AND M. BENOÎT, M., 2007, Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Science of the Total Environment*, 375, 13-32, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.004.

NAKICENOVIC, N., SWART, R., 2000, IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, UK.