

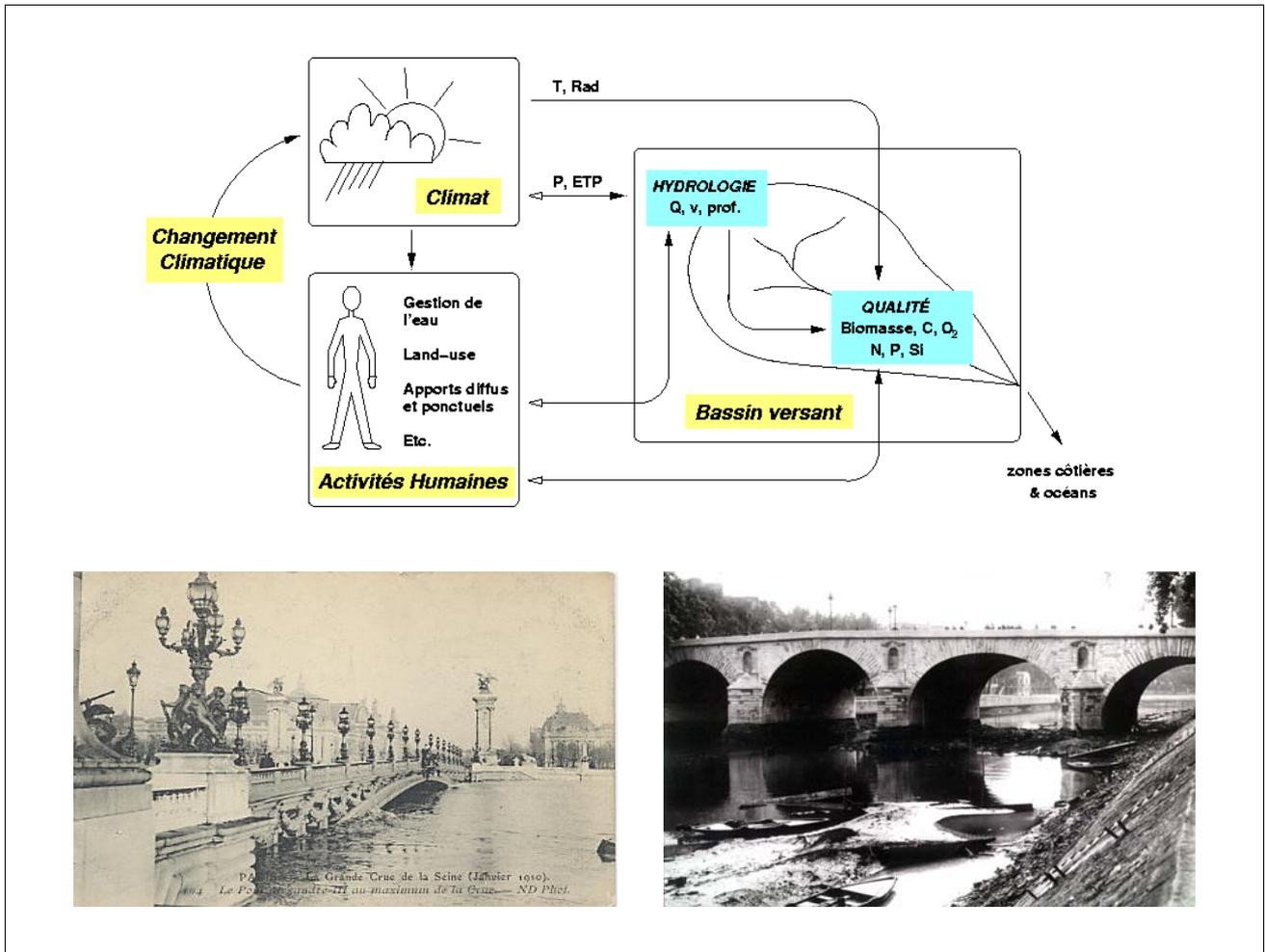
Projet GICC-Seine

Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine

Rapport Final

Novembre 2004

Corrigé en Janvier 2005



Auteurs : Ducharne, Théry, Billen, Benoit, Brisson, Garnier, Kieken, Ledoux, Mary, Mignolet, Mermet, Poux, Sauboua, Schott, Viennot, Abu Alkhair, Baubion, Curie, Ducos, Gomez, Lebonvallet, Olive, Sicart

Table des matières

1. Résumé	2
2. Participants	3
3. Introduction	4
3.1. Le bassin versant de la Seine	4
3.1.1 Contexte hydrologique actuel	4
3.1.2 Enjeux actuels de gestion de l'eau	5
3.2. La problématique du changement climatique	6
3.3. Impacts potentiels sur les hydrosystèmes	6
3.4. Objectifs du projet GICC-Seine	7
4. Méthodologie	8
4.1. Démarche	8
4.2. Modèles : description et validation	9
4.2.1 Le schéma de surface CaB	9
4.2.2 Le modèle agronomique STICS	11
4.2.3 Le modèle hydrogéologique MODCOU	12
4.2.4 La chaîne de modélisation STICS/MODCOU/NEWSAM	13
4.2.5 Le modèle de qualité biogéochimique Riverstrahler	14
4.3. Données de référence « actuelles »	16
4.3.1 Données météorologiques	16
4.3.2 Données agricoles	16
4.3.3 Données de rejets ponctuels	19
4.4. Données mobilisées pour la construction des différents scénarios de changement	19
4.4.1 Les scénarios SRES	19
4.4.2 Simulations de changement climatique	19
4.4.3 Données mobilisées pour la construction des scénarios de rejets ponctuels	22
5. Résultats	23
5.1. Impacts directs du changement climatique sur l'hydrosystème	23
5.1.1 Construction de 12 scénarios de changement climatique	23
5.1.2 Impacts hydrologiques simulés par le modèle CaB selon 12 scénarios de CC	24
5.1.3 Impact sur l'hydrodynamique superficielle et profonde (modèle MODCOU)	26
5.1.4 Impact sur le système agricole actuel selon STICS	27
5.1.5 Impact sur la pollution azotée des nappes selon STICS/MODCOU/ NEWSAM	30
5.2. Prospective agricole : élaboration de scénarios agricoles à l'horizon 2050	31
5.3. Prospective agricole simplifiée : scénario « Agriculture raisonnée »	34
5.3.1 Impacts agro-environnementaux selon STICS	34
5.3.2 Impacts sur la teneur en nitrates des aquifères	35
5.3.3 Impacts croisés à ceux du CC sur la teneur en nitrates des aquifères	37
5.4. Impacts croisés sur la qualité des cours d'eau	38
5.4.1 Scénarios de rejets ponctuels à l'horizon 2050	38
5.4.2 Description des simulations Riverstrahler	40
5.4.3 Analyse des différents impacts simulés à l'horizon 2100	41
6. Conclusions	45
7. Valorisation du projet	49
7.1. Articles	49
7.2. Rapports et notes	49
7.3. Communications	50
7.4. Site Internet	51
7.5. Atelier avec les gestionnaires de l'eau du bassin de la Seine	51
7.6. Disponibilité des données	51
8. Autres références citées	51
9. Annexes	55
9.1. Glossaire	55
9.2. Liste des documents annexés sur CD-Rom	56
9.3. Liste des Tableaux et Figures	58

1. Résumé

L'objectif du projet GICC-Seine est d'étudier l'influence du changement climatique (CC), en relation avec les changements des contraintes anthropiques directes, sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine. Ce projet ne se limite pas aux aspects hydrologiques du CC. Il vise aussi à analyser les conséquences directes et indirectes des modifications climatiques sur la qualité biogéochimique de l'hydrosystème (nutriments dont nitrates, oxygène, eutrophisation...).

Ce travail repose sur une démarche analytique, qui commence par découpler les différentes composantes du système, avant d'analyser leurs réponses croisées. Le seul élément qui fait l'objet d'une modélisation explicite est l'hydrosystème Seine. Nous avons utilisé un ensemble de 4 modèles, 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 (réseau hydrographique de surface, bassin versant hydrologique, système agricole et aquifères). Ces modèles permettent d'explorer et de quantifier l'impact croisé de 3 familles de scénarios portant sur les forçages de l'hydrosystème :

- scénarios de CC, basés sur 12 simulations du CC au cours du XXI^{ème} siècle par des MCG, afin de couvrir une large gamme des incertitudes liées à ces simulations,
- scénarios d'évolution du bassin versant agricole et des rejets ponctuels aux cours d'eau, à l'horizon 2050-2100, par la méthode prospective des scénarios. Nous avons choisi de construire des scénarios contrastés, susceptibles d'avoir des impacts importants sur l'hydrosystème. Leur comparaison avec ceux du CC nous a ainsi permis de mieux cerner l'importance de ces derniers quant à l'évolution future du bassin.

Nous avons d'abord évalué les impacts directs du CC. En ce qui concerne l'hydrologie du bassin, nous avons montré une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine qui se traduit par une diminution très robuste des débits d'étiages. L'évolution des débits de crue est en revanche moins certaine. L'humidité de la zone racinaire diminue de manière systématique, mais les variations de niveau piézométrique des nappes aquifères restent généralement faibles. Nous avons aussi montré que les impacts directs du CC sur la production agricole du bassin de la Seine sont globalement positifs (cycles culturaux réduits, ce qui facilite la maturité complète des cultures ; augmentation du rendement des cultures). Le CC entraîne aussi une minéralisation accrue de l'azote du sol. Celle-ci s'accompagne d'une augmentation (i) du flux de nitrates du sol vers les nappes, et (ii) de la concentration en nitrates dans ces dernières, qui dépasse à l'horizon 2100 la norme de potabilité dans une large fraction des aquifères.

Le scénario d'agriculture raisonnée permet en revanche de réduire notablement la concentration nitrique moyenne de l'eau infiltrée et dans les aquifères à l'horizon 2100. Les impacts de l'agriculture raisonnée et du CC sont du même ordre de grandeur mais opposés, et leur impact croisé indique que le CC annihile en large part l'influence positive de l'agriculture raisonnée sur la pollution azotée des aquifères du bassin.

Nous avons enfin simulé l'impact des 3 familles de scénarios des contraintes de l'hydrosystème (CC, agriculture, rejets ponctuels) sur la qualité biogéochimique de la Seine. L'impact le plus marquant est l'amélioration drastique de la qualité des cours d'eau par la réduction générale des rejets ponctuels dans les 3 scénarios construits à l'horizon 2050. Par son influence sur les apports diffus en nitrates depuis les nappes et le bassin versant agricole, le CC entraîne une augmentation significative de la teneur en nitrates dans les cours d'eau. Cet impact est du même ordre de grandeur (10 mgNO₃/l environ) que celui de l'agriculture raisonnée, mais antagoniste. En ce qui concerne les autres variables de qualité biogéochimique, l'impact du CC est largement dominé par celui du réchauffement de l'eau sur la dynamique spatio-temporelle des populations biologiques. Si les rejets ponctuels sont réduits, cet impact est plutôt positif. 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 donc très marginal par rapport à celui de la réduction générale des rejets selon ces 3 scénarios.

En conclusion, 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.

Mots-clés : Changement Climatique, Bassin de la Seine, Hydrologie, Aquifères, Agriculture, Qualité de l'eau, Nitrates, Pollutions ponctuelles, Gestion de l'eau, Prospective, Scénarios.

2. Participants

Ce projet émane du programme PIREN-Seine, cofinancé par le CNRS et les principaux acteurs de la gestion de l'eau dans le bassin de la Seine. Il a bénéficié à ce titre des acquis de 10 ans de travail et de collaboration, en terme de modélisation et de réflexion prospective notamment. Il a aussi bénéficié du retour d'expérience du projet " GICC Rhône ", auquel les participants du CIG/ENSMP sont également associés.

Sept équipes impliquées dans le programme PIREN-Seine ont ainsi participé en étroite collaboration au projet :

	Équipes	Personnes	Statut	% temps	Mois
1	UMR Sisyphe : UPMC	A. Ducharne G. Billen J. Garnier S. Théry J.E. Sicart F. Curie C. Lavaud	Chargée de recherche Directeur de recherche Directrice de recherche Ingénieur d'étude CDD Post-doctorant CDD Stagiaire DEA Stagiaire EPF (4ème année)	70% / 2 ans 20% / 2 ans 10% / 2 ans 60% / 1 an 100 % / 5mois 30% / 6 mois 100% / 2 mois	17 5 2.5 8 5 2 2
2	UMR Sisyphe: CIG/ENSMP (ARMINES)	E. Ledoux P. Viennot E. Gomez C. Baubion	Directeur de recherche Ingénieur de recherche Post-doctorant CDD Stagiaire DEA	10% / 2 ans 40% / 2 ans 85% / 1 ans 100% / 6 mois	2.5 10 10 6
3	INRA Laon: Unité d'Agronomie	B. Mary N. Beaudoin S. Lebonvallet E. Souboua	Directeur de recherche Ingénieur de recherche Ingénieur CDD Post-doctorante CDD	5% / 2 ans 20% / 2 ans 100% / 8 mois 100% / 4 mois	1 5 8 4
4	INRA Avignon	N. Brisson	Directrice de recherche	15% / 2 ans	3.5
5	INRA Mirecourt: UR Systèmes Agraires et Développement	M. Benoit C. Mignolet C. Schott	Directeur de recherche Ingénieur de recherche Post-doctorante CDD	15% / 2 ans 20% / 2 ans 100% / 1 an	3.5 5 12
6	ENGREF: Equipe RGTE Equipe RGTE	L. Mermet H. Kieken A. Aboualkhair	Professeur Thésitif Stagiaire DEA	5% / 2 ans 60% / 1 an 100% / 6 mois	1 8 6
7	AScA	X. Poux G. Olive G. Ducos	Chef de projet Stagiaire DEA Stagiaire DEA	50% / 2 ans 100% / 6mois 100% / 6mois	12 6 6
	7 équipes		12 chercheurs statutaires 6 CDD 7 étudiants		68 46 28
			24 personnes		143

Les participants sont également impliqués dans plusieurs programmes ou réseaux internationaux concernant le fonctionnement des hydrosystèmes et des agrosystèmes. On relèvera le Nordic Network for Research and Education " Integrated approaches to drainage basins nutrient inputs and coastal eutrophication ", le réseau européen Si-WEBS, les programmes " Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle " (BAHC) et " Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone " (LOICZ) de l'IGBP...

Nos travaux ont enfin bénéficié de plusieurs collaborations extérieures :

- Météo-France :
 - Michel Déqué nous a fourni les sorties de 3 paires de simulations du changement climatique par le modèle ARPEGE
 - données météorologiques SAFRAN-CROCUS
- Projet GICC-BD « Bases de données des simulations du changement climatique à l'usage des études d'impact » coordonné par Jan Polcher (LMD) : résultats d'une paire de simulations du changement climatique par le modèle LMD6.

3. Introduction

3.1. Le bassin versant de la Seine

3.1.1 Contexte hydrologique actuel

Le bassin versant de la Seine 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 séparées par des formations semi-perméables. Leurs affleurements forment des auréoles concentriques dont l'altitude tend à augmenter quand on s'éloigne du centre du bassin, vers l'Est notamment. Le relief de ce bassin est cependant peu marqué (Figure 1), avec des altitudes généralement inférieures à 300 m, culminant à 900 m dans le Morvan. Ces altitudes modérées expliquent les faibles pentes des cours d'eau (0.01 à 0.03 m / 100m) qui coulent globalement vers l'ouest. La Seine se jette dans la Manche au Havre, après un parcours de 776 km, mais le domaine estuarien (eaux saumâtres et influence hydrodynamique de la marée) commence à Poses, à 166 km en amont du Havre. Notons enfin que les aquifères les plus profonds (correspondant aux couches les plus anciennes) sont plus étendus que le bassin versant topographique.

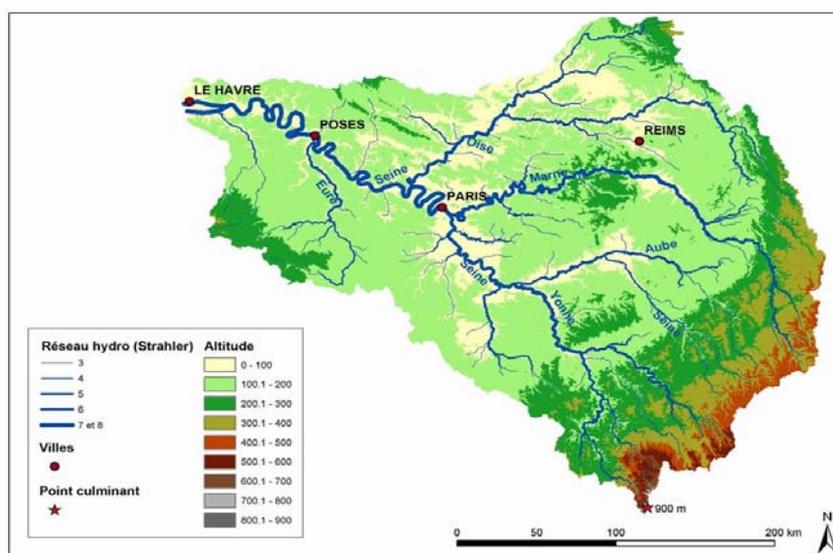


Figure 1 : Topographie et réseau hydrographique du bassin de la Seine.

Les sols présents sur le bassin de la Seine se sont formés à partir d'une couverture de limons et d'argiles quaternaires qui recouvrent les formations géologiques. En général, ils sont pourvus de bonnes capacités de rétention d'eau, qui contribuent à réguler le débit des rivières, en association avec une contribution importante des aquifères (dont le drainage vers les rivières constitue le débit de base de ces dernières) et une pluviométrie bien répartie au cours de l'année.

Celle-ci s'explique par un apport assez constant d'humidité par les vents d'ouest (climat océanique). Cette humidité précipite abondamment sur les régions côtières puis sur les reliefs sud-est (Figure 2). Les plateaux du centre du bassin (plaines de Beauce et de Picardie par exemple) sont moins bien arrosés car les vents d'ouest humides n'y rencontrent pas d'obstacle orographique favorisant la précipitation. 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, la Seine est le fleuve français où l'influence de la neige est la plus faible : le nombre de jours de neige est très faible, à l'exception du Morvan où il peut atteindre 40 jours, et l'influence nivale sur le régime hydrologique des rivières est négligeable.

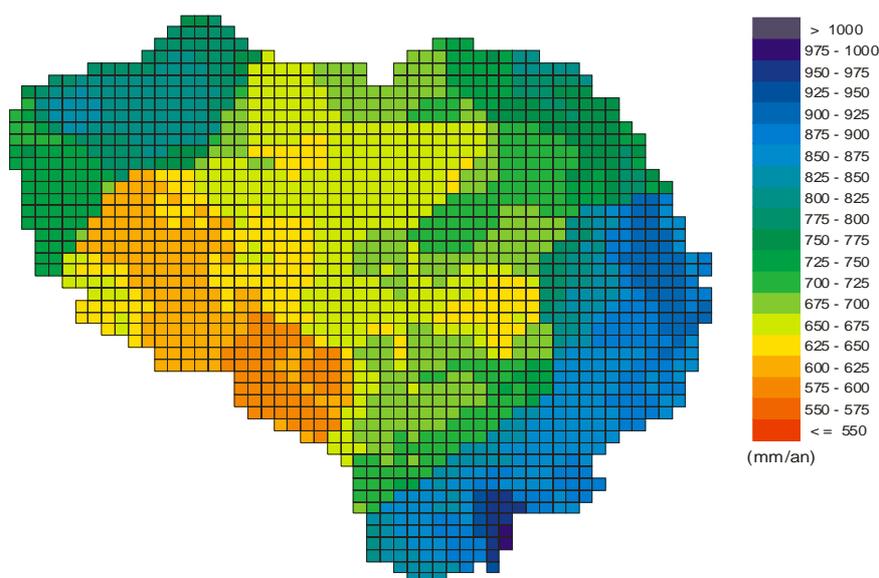


Figure 2 : Répartition spatiale des précipitations annuelles dans le bassin de la Seine (données SAFRAN -CROCUS, moyenne 1970-1990).

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 l'évapotranspiration est forte. A Poses par exemple, 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.

3.1.2 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.

A l'amont du bassin, la principale atteinte à la qualité de l'eau est la pollution croissante et désormais incontournable par les nitrates d'origine agricole (fertilisants), qui contaminent l'ensemble des aquifères alimentant les rivières (Gomez, 2002).

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., 1994) 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).

3.2. La problématique du changement climatique

La réalité d'un changement climatique (CC) suite à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), et notamment du CO₂, fait désormais l'objet d'un consensus bien affirmé (Houghton et al., 2001). Ce consensus repose sur la convergence de nombreux éléments de preuve, relatifs :

- aux tendances de la température au cours des derniers siècles (e.g. Mann et al., 1998),
- à la comparaison de telles tendances avec la variabilité naturelle du système climatique (e.g. Hegerl et al., 1997),
- aux simulations, par des modèles de circulation générale (MCG), du CC qui pourrait résulter d'augmentations variées des GES.

Les études les plus récentes de l'IPCC (International Panel for Climate Change ; Houghton et al., 2001) montrent 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 MCG d'une part, et à l'évolution des émissions de GES d'autre part. Par rapport au cycle de l'eau, ce réchauffement global entraîne une augmentation de l'évaporation et, par suite, des précipitations moyennes à l'échelle du globe, même si les simulations de CC suggèrent une réduction des précipitation dans les tropiques. Les variations de précipitation constituent de fait 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 (Cess et al., 1993). Ces incertitudes augmentent en outre à l'échelle régionale (Kittel et al., 1998). Ainsi, la France est traversée par la limite entre une zone d'augmentation moyenne des précipitations au nord et une zone de diminution moyenne au sud (Giorgi and Francisco, 2000 ; Hulme et al., 2000), mais cette limite, qui varie en latitude selon les simulations de CC, balaye le bassin de la Seine.

3.3. Impacts potentiels sur les hydrosystèmes

La plupart des études de l'impact potentiel du CC sur les hydrosystèmes ont porté sur les débits et les régimes de crue et d'étiage, comme dans le projet GICC-Rhône (Leblois et al., 2004). Les travaux compilés par l'IPCC (Houghton et al., 2001) indiquent que le changement le plus probable en Europe est une intensification des contrastes hydrologiques, avec des risques accrus d'inondations en hiver et de sécheresses en été. Les études concernant l'hydrologie du domaine souterrain sont plus rares (Bourroui et al., 1999), de même que celles relatives à la qualité des eaux, alors que ce sont des éléments essentiels de la ressource en eau.

La qualité des eaux est susceptible d'être affectée par le CC de multiples manières, récapitulées par Arnell (1998). L'augmentation de la température de l'eau peut modifier la cinétique des différents processus biogéochimiques (qui contrôlent les concentrations en carbone, nutriments, oxygène dans les cours d'eau) et les changements de débits et de régime hydrologique agissent sur la dilution, la sédimentation et les temps de rétention. Par exemple, l'eutrophisation, tant fluviale que côtière, est étroitement contrôlée par les rapports entre les flux d'azote, de phosphore et de silice transportés par les cours d'eau. L'origine et la solubilité variable de ces éléments rendent leurs rapports très sensibles aux modifications du régime hydrologique, qui peuvent donc entraîner un basculement complet de leur mode de fonctionnement, au même titre que les changements d'usage du sol ou d'activité humaine sur le bassin versant (Billen et Garnier, 1997).

Il convient enfin de rappeler que le CC est une cause possible d'évolution de l'usage du sol, des pratiques agricoles et de l'activité humaine en général (Harrison et al, 1995; Parry, 2000). L'impact combiné de l'ensemble de ces changements sur les cycles de l'eau, du carbone et de l'azote est particulièrement complexe dans le domaine agricole. La réponse des plantes à l'augmentation de la teneur en CO₂, en interaction avec les modifications du régime hydrique et thermique des sols, peut faire varier les cycles des éléments nutritifs dans les sols, en particulier celui de l'azote (azote minéral prélevé par les plantes, pertes par dénitrification avec libération de N₂O et N₂ dans l'atmosphère, lessivage de nitrates vers les aquifères et les cours d'eau). Par ailleurs, le stress en eau des cultures

pouvant être modifié par le CC, tout comme les flux d'eau vers les aquifères (Bouraoui et al., 1999), il peut résulter un changement des stratégies d'irrigation des cultures.

Ce bref inventaire des effets possibles du CC montre la complexité de la réponse des hydrosystèmes, dès que l'on tente de l'appréhender sous son double aspect de l'hydrologie et de la qualité de l'eau. Ces deux volets sont cependant complémentaires pour définir la ressource en eau, surtout dans des bassins soumis comme celui de la Seine à une forte anthropisation, qui se traduit par des pressions importantes sur l'environnement (pollutions, aménagements...). Cette anthropisation amplifie de plus la complexité de la réponse des hydrosystèmes, puisqu'elle est soumise à la décision humaine (gestion), qui introduit des facteurs de changement supplémentaires. Ils résultent de déterminants à diverses échelles (du local au global), qui ne sont pas nécessairement prévisibles.

3.4. Objectifs du projet GICC-Seine

L'objectif du projet GICC-Seine est d'évaluer l'influence du CC sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine. Ce projet ne se limite pas aux impacts hydrologiques du CC, comme le projet GICC-Rhône, mais il vise aussi à analyser les conséquences directes et indirectes des modifications climatiques sur la qualité biogéochimique de l'hydrosystème.

Cet objectif se décline en trois volets :

1. Nous avons d'abord cherché à explorer de manière extensive les impacts directs du CC sur la ressource en eau dans le bassin. Une problématique importante était ici celle de la régionalisation et des incertitudes du CC. Nous nous sommes cependant limités aux impacts du CC moyen, en négligeant ceux de possibles modifications des extrêmes, que nous avons jugés difficiles à appréhender à partir des simulations de CC dont nous disposions.

Les composantes du système Seine prises en compte dans cette étude sont ses composantes « physiques », qui seules font l'objet de modélisation :

- le bassin versant hydrologique, qui contrôle les volumes écoulés (débits) et le régime hydrologique ;
 - le système agricole (défini par les principales cultures, leur extension spatiale, et les techniques culturales associées) qui contrôle les apports diffus de nitrates ; son influence sur les cycles de certains gaz à effet de serre (séquestration de carbone, dénitrification et flux de N₂O...) n'a pas été abordé dans ce projet ;
 - les formations aquifères, caractérisées par leur niveau piézométrique et la concentration en nitrates de leurs eaux ;
 - le réseau hydrographique de surface (cours d'eau et ses annexes hydrauliques) et sa qualité biogéochimique (nutriments, biomasse, oxygène).
2. Notre projet cherche 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. Une attention particulière est accordée au secteur agricole, qui influence le fonctionnement de l'hydrosystème de nombreuses manières et fait l'objet d'une modélisation explicite. La seconde contrainte anthropique considérée est celle des rejets ponctuels aux cours d'eau, qu'ils soient d'origine domestique ou industrielle. Une réponse importante de ce volet du travail est d'évaluer l'ordre de grandeur des impacts du CC par rapport à ceux d'autres tendances d'évolution du système Seine.
 3. Le dernier volet de notre projet est d'envisager les conséquences du CC en terme de gestion de l'eau, en collaboration avec les professionnels de la gestion de l'eau qui sont partenaires du programme PIREN-Seine.

4. Méthodologie

4.1. Démarche

Notre projet repose sur une démarche analytique, qui commence par découpler les différentes composantes du système Seine, avant d'analyser leurs réponses croisées.

Nous avons ainsi commencé par construire des scénarios pour les forçages de l'hydrosystème dont nous considérons des évolutions :

- **scénarios du CC moyen**, basés sur 12 simulations du CC au cours du XXIème siècle par des MCG, afin de couvrir une large gamme des incertitudes liées à ces simulations (sections 4.4.2 et 5.1.1),
- **scénarios d'évolution du bassin versant agricole et des rejets ponctuels**, par la méthode prospective des scénarios (sections 5.2 et 5.4.1). Nous avons ici choisi de construire des scénarios contrastés, susceptibles d'avoir des impacts importants sur l'hydrosystème. Leur comparaison avec ceux du CC nous a ainsi permis de mieux cerner l'importance de ces derniers quant à l'évolution future du bassin. Ces scénarios des contraintes anthropiques directes, bien que plausibles quant à leurs déterminants socio-économiques, ne prétendent cependant pas constituer une prévision de l'état du bassin. S'ils ont, en grande part, été développés indépendamment du CC simulé dans le bassin de la Seine, ils s'inscrivent néanmoins dans le cadre des scénarios de prospective globale du SRES (Special Report on Emission Scenarios; Nakicenovic and Swart, 2000), qui sous-tendent les simulations climatiques, et constituent donc un élément de cohérence important avec ces dernières.

Afin de maximiser les impacts simulés, et de mieux identifier la sensibilité de l'hydrosystème à ces facteurs de changement, nous avons choisi d'appliquer brutalement tous ces scénarios à partir de 2000 et pendant tout le XXIème siècle.

Le second élément que nous avons individualisé est l'**hydrosystème Seine, qui fait seul l'objet d'une modélisation explicite** dans notre projet. Nous avons utilisé un ensemble de 4 modèles emboîtés et compatibles, développés 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, détaillés en section 4.2, distinguent 4 objets interconnectés (Figure 3), sur la base de leur rôle dans l'hydrosystème et de leur temps caractéristique de réponse, qui conditionne notamment la longueur des simulations à réaliser. Si le réseau hydrographique et le bassin versant hydrologique répondent rapidement au changement des contraintes (une à quelques années), la dynamique du système agricole est plus lente, notamment à cause de l'inertie induite par la matière organique du sol dont le temps de renouvellement est de l'ordre de 10 ans. Quant aux formations aquifères, leur temps de renouvellement peut aller jusqu'à 50 ans et plus, impliquant des simulations sur une période de stabilisation du même ordre.

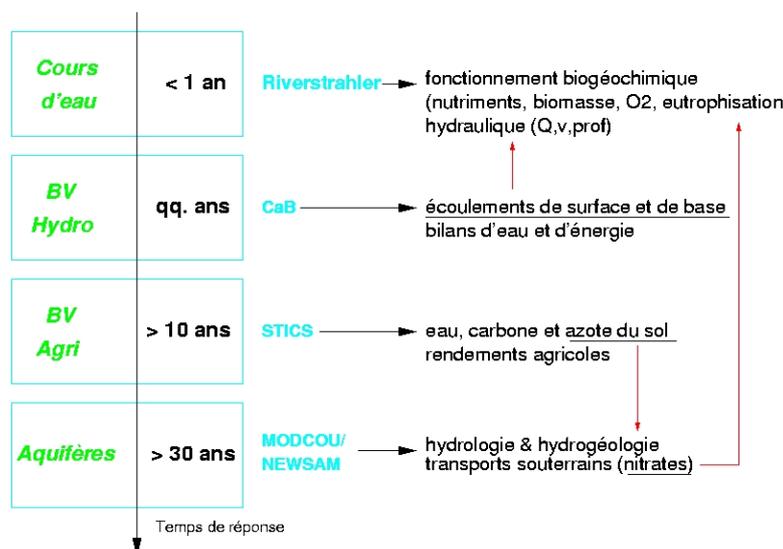


Figure 3 : Caractéristiques des 4 modèles mis en oeuvre et de leurs couplages. Les variables échangées sont soulignées.

Le développement de ces modèles a tendu vers une augmentation de leur déterminisme, en privilégiant au maximum la description des processus sur des bases physiques plutôt que par des paramétrisations de type “boîtes noires” devant être calibrées. Cette démarche déterministe justifie, sous réserve de validation bien sûr, d'appliquer ces modèles dans des conditions éloignées de celles qui ont prévalu à leur développement, ce qui constitue un atout majeur en cadre prospectif. Ils ont ainsi fait leurs preuves pour évaluer des scénarios d'aménagement (amélioration de l'infrastructure d'assainissement en Ile-de-France, lutte contre l'eutrophisation, scénarios de lutte contre la pollution azotée...) et des scénarios prospectifs (à l'horizon 2015) dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau.

Ces modèles nous ont d'abord permis de **quantifier l'impact direct du CC** sur les 4 composantes ci-dessus de l'hydrosystème (section 5.1). Nous avons cherché à réduire la marge d'incertitude de nos résultats en cherchant les convergences entre les impacts de 12 scénarios de CC (incertitudes liées aux MCG et aux scénarios d'émission en GES) et les réponses des deux modèles hydrologiques considérés, CaB et MODCOU, de complexité très différente (incertitudes liées aux modèles d'impact). Notons cependant que seuls quatre scénarios de CC parmi les 12 ont été analysés par les modèles MODCOU et STICS. Ce dernier nous a aussi permis d'évaluer la viabilité sous CC des cultures actuellement présentes dans le bassin de Seine, une information importante pour l'élaboration de scénarios d'évolution de l'agriculture (section 5.2).

Deux autres séries de simulations ont alors été réalisées, en croisant les scénarios de CC et les scénarios d'évolution des contraintes anthropiques directes. La première série, basée sur les modèles MODCOU et STICS, vise à évaluer **l'influence croisée du CC et de l'évolution du système agricole** (scénario “Agriculture raisonnée”, section 5.3) sur l'hydrogéologie du bassin et la contamination de l'hydrosystème par les nitrates, pour déterminer auquel de ces deux facteurs d'évolution ils sont les plus sensibles (section 5.3.3). La seconde série de simulations, basée sur le modèle Rivserstrahler, s'est attachée à la **qualité biogéochimique de l'eau**, qui est l'enjeu de gestion majeur dans le bassin de la Seine à l'heure actuelle (section 5.4). Les contraintes prises en compte sont ici le CC, l'évolution des apports diffus en nitrates telle que simulée par la chaîne de modélisation STICS/MODCOU/NEWSAM, et l'évolution des rejets ponctuels (3 scénarios, section 5.4.1).

Il est important de noter que la multiplication des contraintes ne vise pas à tendre vers une projection réaliste du devenir du bassin de la Seine. Tout au plus pouvons nous prétendre avoir défini des possibles raisonnables. Notre motivation est ici de pouvoir cerner l'importance qualitative du CC, en plaçant son impact en perspective de celui d'autres changements possibles dans le bassin. Il s'agit d'une réponse importante de notre projet, notamment pour l'interprétation opérationnelle des impacts du CC.

Il entre ainsi dans nos objectifs d'envisager les conséquences du CC en terme de gestion de l'eau. Nous avons délibérément écarté l'idée de modéliser cet aspect. Ceci nécessiterait en effet un modèle intégré de toutes les composantes (hydrologiques, biogéochimiques, agricoles, socio-économiques...) de l'hydrosystème, afin de prendre en compte leurs inévitables rétroactions. Le développement d'un tel modèle ne nous semble pas envisageable dans l'état actuel des connaissances, étant donné la complexité du système. En revanche, notre démarche combinant modèles et analyse prospective nous semble permettre d'aborder cette complexité. Notre stratégie fut donc d'organiser un **atelier avec les principaux acteurs de cette gestion dans le bassin** (partenaires du PIREN-Seine) pour enrichir notre réflexion et mieux identifier les principaux enjeux du CC en terme de gestion de l'eau (section 7.5).

4.2. Modèles : description et validation

4.2.1 *Le schéma de surface CaB*

Le modèle CaB (pour « Catchment-Based » ; Koster et al., 2000 ; Ducharme et al., 2000) est un modèle du fonctionnement des surfaces continentales, qui décrit sur des bases physiques l'influence du climat sur les écoulements. Il combine :

- une approche TSVA (« Transferts Sol-Végétation-Atmosphère »), où l'évapotranspiration est couplée au bilan d'énergie, et contrôlée par la végétation et divers facteurs de stress (hydriques notamment),
- une approche basée sur le modèle hydrologique TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) pour gérer les écoulements superficiels et souterrains. Selon cette approche, le domaine d'étude est discrétisé en bassin versants élémentaires, toujours pourvus d'une nappe phréatique. Sous l'hypothèse que les

gradients topographiques sont une bonne approximation des gradients hydrauliques, on exploite une description à haute résolution de la topographie de chaque bassin élémentaire pour dériver, à chaque pas de temps (20 minutes), une distribution spatiale de la profondeur de la nappe en fonction de l'humidité moyenne du bassin. Cette distribution contrôle les transferts verticaux entre zone racinaire et nappe ainsi que l'écoulement de base (écoulement de la nappe vers les cours d'eau). Il faut cependant noter que cette nappe phréatique « conceptuelle » n'est pas équivalente à un système aquifère multicouche comme celui qui prévaut dans le bassin de la Seine.

Originellement développé pour être couplé à un MCG, le modèle CaB est particulièrement adapté pour faire le lien entre hydrologie et climat. En particulier, les variables météorologiques nécessaires en entrée de ce modèle sont toutes simulées par les MCG: précipitations, rayonnement incident (visible et infra-rouge), température et humidité de l'air à 2 m, vitesse du vent à 10 m et pression atmosphérique à la surface.

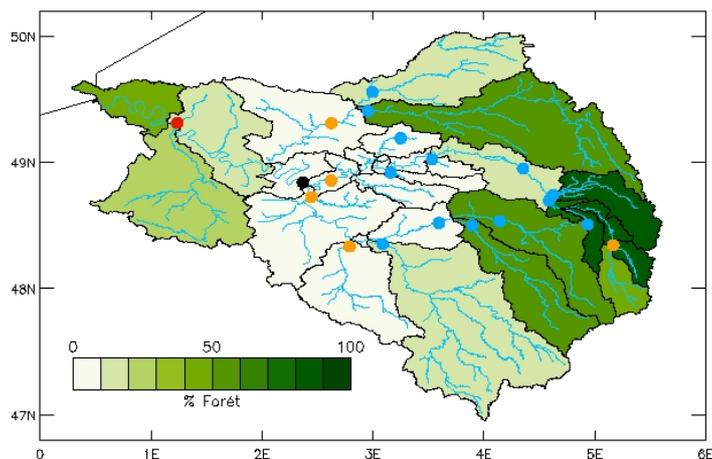


Figure 4 : Discrétisation du bassin versant de la Seine selon CaB, en 29 sous-bassins unitaires. La couleur verte indique le pourcentage de forêt dans notre application. Le réseau hydrographique principal apparaît en bleu, et les points localisent les 20 stations de jaugeage exploitées pour la calibration du modèle (Poses en rouge, Paris en noir).

Dans cette étude, le bassin de la Seine est subdivisé en 29 bassins élémentaires (2600 km² en moyenne, Figure 4). Les paramètres du modèle sont définis à partir d'informations sur :

- la topographie (résolution de 100m),
- la couverture végétale, caractérisée selon les données ISLSCP (Sellers et al., 1996) qui fournissent, à partir d'observations satellitaires réalisées en 1987-1988, l'évolution mensuelle de la morphologie végétale (indice de surface foliaire, hauteur...) et le type de végétation (Figure 4).
- les propriétés des sols : la porosité et la profondeur du sol sont issus de la Base de Données Géographique des Sols de France (1:1,000,000 ; INRA), alors que le point de flétrissement et la conductivité hydraulique à saturation ont été calibrés.

Pour cela, nous avons utilisé 6 ans de données météorologiques fournies par Météo-France au pas de temps horaire et à la résolution de 8 km (données SAFRAN-CROCUS), qui ont été agrégées à la résolution du modèle (29 bassins élémentaires). La période considérée, août 1985 - juillet 1991, sert de référence pour analyser les simulations CaB sous CC et fut sélectionnée selon deux critères : les données SAFRAN horaires ne sont pas disponibles avant août 1985, et les années 1990, probablement les plus chaudes du millénaire à l'échelle globale (Houghton et al., 2001), ont été écartées car on ne peut exclure qu'elles ne traduisent déjà un signal de CC.

La calibration du modèle fut alors réalisée pour optimiser les écoulements simulés, par comparaison avec les débits observés (données Banque Hydro) aux 20 stations de jaugeage de la Figure 4 (Ducharne, 2004). La Figure 5 illustre à Poses que les performances obtenues sont tout à fait satisfaisantes, et que les contrastes entre l'année hydrologique 87-88 très humide (crue très importante) et les années 89-90 et 90-91 sèches (étiages sévères), qui offrent un bon échantillonnage de la variabilité interannuelle du climat récent, sont bien rendus malgré une tendance à surestimer les pics de crue.

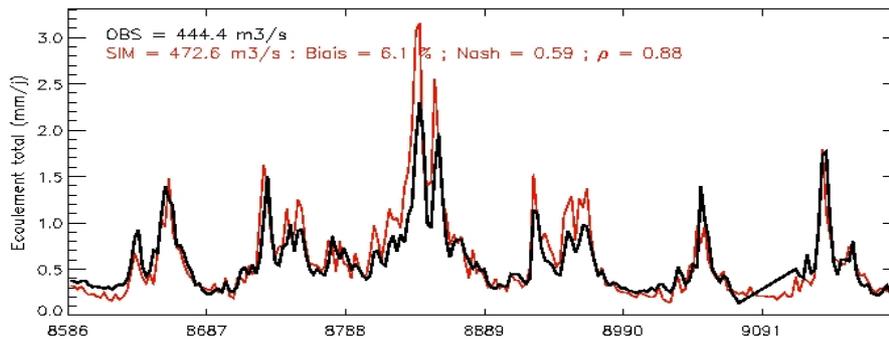


Figure 5 : Comparaison des écoulements observés et simulés par CaB : moyennes décadaires à Poses entre le 1^{er} août 1985 et le 31 juillet 1991.

4.2.2 Le modèle agronomique STICS

Description générale

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., 1998, 2003). Les bilans d'eau, de carbone et d'azote sont calculés de façon dynamique au sein du système sol-plante.

Le sol est décrit comme une succession de couches horizontales dont la limite inférieure est l'interface sol / sous-sol : c'est la limite au-delà de laquelle sont définis les termes de drainage et de lessivage des nitrates vers les nappes. Les transferts d'eau au sein du sol sont calculés par un modèle capacitif monodimensionnel et multicouche. Le transport du nitrate est simulé par convection-dispersion. Les transformations biologiques des différents pools de matière organique (résidus de culture, amendements organiques, biomasse microbienne et humus) sont simulées et déterminent la dynamique du carbone et de l'azote dans le sol.

La culture est appréhendée de façon globale : son développement est piloté par les conditions climatiques du couvert (température et photopériode). Sa croissance est pilotée par la surface foliaire qui conditionne l'interception du rayonnement et la conversion du rayonnement en biomasse végétale. Celle-ci est ensuite répartie vers les organes de récolte en fin de cycle, ce qui détermine le rendement de la culture. Le bilan d'azote est simulé en parallèle à celui du carbone auquel il est lié.

Les interactions entre le sol et la culture sont assurées par le système racinaire qui assure l'absorption d'eau et d'azote en fonction des besoins de la plante et de leur disponibilité dans le sol ; les stress en eau et en azote qui peuvent survenir agissent sur le développement de la culture et surtout sur sa croissance foliaire et en biomasse. Le modèle a principalement été évalué et validé sur les cultures de maïs et de blé (Brisson et al., 2002; Houlès et al., 2004). Son application à d'autres cultures et différentes conditions de sol a été jugée satisfaisante (Beaudoin et al., 2004a; Nicoullaud et al., 2004).

Les conditions de forçage climatique agissent au pas de temps journalier sur la recharge hydrique du sol (précipitations), le développement de la culture et sa croissance (température et rayonnement) et sur la demande en eau (évapotranspiration potentielle ou ETP). De plus, la teneur en CO₂ de l'atmosphère agit à la fois sur l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en biomasse (augmentation avec le taux de CO₂) et sur la transpiration (réduction de la conductance stomatique et donc de la transpiration avec l'augmentation du CO₂).

Les conditions de conduite des cultures (itinéraires techniques) influencent également le fonctionnement du système sol-plante, par la date des interventions (semis, récolte, travail du sol) mais également par la quantité des apports de fertilisants et par l'irrigation.

L'application du modèle STICS dans le cadre du projet GICC-Seine a donc nécessité la caractérisation de situations types définies par les forçages suivants :

- les caractéristiques des successions culturales représentatives du bassin (enchaînement des cultures au sein des parcelles et itinéraires techniques appliqués), en situation actuelle (section 4.3.2) ou prospective (section 5.3),
- les caractéristiques pédologiques représentatives des sols rencontrés sur le bassin de la Seine, à partir de la Base de Données Géographique des Sols de France (1:1,000,000 ; INRA),

- les séquences de climat journalières représentatives du climat actuel (données journalières SAFRAN-CROCUS 1970-1990) ou des changements climatiques (scénarios de CC).

Deux applications différentes dans le bassin de la Seine

Une première application du modèle STICS dans le cadre du projet GICC-Seine est dédiée à l'interprétation agri-environnementale de l'impact du CC et du changement agricole sur le système agricole lui-même (section 5.1.4 et 5.3). Elle est mise en oeuvre sur 12 zones agricoles (caractérisées en section 4.3.2), où seuls sont considérés les 3 successions culturales et les 3 types de sols dominants dans la zone (9 combinaisons par zone), et où le climat est uniforme. Dans ce cadre, toutes les simulations ont été conduites sur 40 ans, mais les résultats ne portent que sur les 20 dernières années, afin d'être proche du nouvel état d'équilibre induit par le CC ou le changement de pratiques agricoles.

Les résultats agronomiques (biomasse végétale, rendement en produits récoltés, bilan azoté de la culture) et environnementaux (flux d'eau et de nitrate sortant du sol) de cette application « STICS 12 zones » seront principalement interprétés par type de culture; quelques résultats spatialisés permettront d'en appréhender la variabilité spatiale. La fréquence des cultures dans les 12 zones du bassin est résumée dans le Tableau 1, qui montre la prédominance du blé, culture présente dans toutes les zones et toutes les successions de cultures annuelles. Vient ensuite la prairie, importante à l'est du Bassin, puis deux autres cultures d'hiver, colza et escourgeon. Parmi les cultures de printemps et d'été, maïs, pois, betterave et orge sont les plus représentées.

Le Tableau 1 compare également les sorties du modèle (sous climat actuel) avec les statistiques agricoles par PRA (obtenues par l'INRA Mirecourt), en termes de rendement aux normes agricoles. Compte tenu des spécifications très différentes pour les protocoles d'acquisition des données d'un côté et de simulation de l'autre, nous obtenons une bonne adéquation entre observations et simulations. Cela indique que la capacité prédictive du modèle est satisfaisante et que l'échantillonnage réalisé pour les simulations est pertinent.

Tableau 1: Représentativité des cultures dans les successions et les 12 zones simulées par STICS et comparaison simulations/statistiques agricoles (rendements aux normes en t/ha)

Culture	Nb de successions où la culture est présente	fréquence dans les successions	Nombre de zones avec la culture	Rendement STICS	Rendement des statistiques agricoles
blé	29	81%	12	7.35	7.25
prairie	7	19%	7	7.26	7.12
colza	14	39%	9	3.77	2.68
escourgeon	12	33%	11	5.01	6.69
maïs	6	17%	5	7.85	8.24
pois	10	28%	7	4.12	3.99
betterave	8	22%	5	58.5	58.5
orge	5	14%	4	4.47	5.60
luzerne	2	6%	2		
avoine	1	3%	1	3.26	3.00
tournesol	2	6%	2	3.23	2.85
pomme de terre	1	3%	1	33.3	38.0
moutarde	1	3%	1		
lin textile	1	3%	1		

La seconde application du modèle STICS est spatialisée beaucoup plus finement et couplée au modèle de transport souterrain MODCOU/NEWSAM (section 4.2.4) pour simuler l'évolution des nitrates dans le bassin.

4.2.3 Le modèle hydrogéologique MODCOU

Le modèle MODCOU (Ledoux, 1980, Ledoux et al, 1989) a pour objectif la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains en aquifère multicouche. Ce modèle utilise cinq fonctions interconnectées pour schématiser le cycle de l'eau :

- une **fonction d'entrée** qui prend en compte les données de forçage météorologiques ;
- une **fonction de production**, qui assure la répartition des précipitations entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration et stockage dans le sol ; ses paramètres varient en fonction des caractéristiques pédologiques (structure et texture) et de l'occupation des sols, au sein de zones de

- production uniformes;
- une **fonction de transfert de surface** qui achemine dans le réseau hydrographique l'eau issue du ruissellement d'une part, et des échanges avec le domaine souterrain d'autre part ;
- une **fonction de transfert souterrain** qui simule les écoulements au sein des aquifères ;
- une **fonction d'échange surface-souterrain** qui calcule les échanges à double sens entre les rivières et les aquifères.

Le modèle est discrétisé en une structure multicouche utilisant des mailles carrées emboîtées. Ces couches représentent la surface du sol où se développent les phénomènes hydrologiques et trois aquifères essentiels du bassin parisien, à savoir, de haut en bas, l'aquifère Oligocène, l'aquifère Eocène et l'aquifère de la Craie. Aux différentes mailles sont rattachées les caractéristiques physiques du domaine. Elles comprennent notamment la direction de drainage et la distribution des zones de production pour les mailles de surface; la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement pour les mailles souterraines. Les données météorologiques d'entrée (précipitations et évapotranspiration potentielle) sous climat actuel ont été fournies par Météo-France sur la période 1970-1999, et sont distribuées par la méthode SAFRAN-CROCUS sur une grille régulière de 8 km de côté couvrant l'ensemble du bassin (Ducharne et Gomez, 2003).

Le calage des paramètres correspondant aux données de structure de la couche de surface et des couches souterraines (Oligocène, Eocène et Craie) a été effectué en comparant la restitution des débits naturalisés sur 125 stations hydrométriques et des charges hydrauliques sur 139 piézomètres et ce, sur les trente ans de la période de calage (Gomez, 2002).

A partir de là, nous avons établi une simulation de référence « climat actuel » sur 20 ans avec les entrées climatiques de 1970-1989 (les années 1990 étant écartées car potentiellement affectées par le CC), le niveau moyen des aquifères ayant été initialisé par le résultat d'un calcul en régime permanent. Cette simulation a servi de base à la comparaison avec les résultats obtenus sous scénarios de CC (section 5.1.3) et les débits d'infiltration calculés ont servi d'entrée, couplés aux concentrations en nitrate calculées par l'application spatialisée de STICS, aux simulations de transport MODCOU/STICS/NEWSAM (section suivante).

4.2.4 La chaîne de modélisation STICS/MODCOU/NEWSAM

Afin de quantifier le lien existant entre la contamination nitrique des aquifères ou des cours d'eau et les pratiques agricoles en cours ou à venir, un modèle intégré associant le modèle agronomique STICS (simulations des flux de nitrates 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). Ce modèle 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 domaine modélisé (le bassin de la Seine) est segmenté à haute résolution en unités spatiales définies par croisement des données climatiques (8 km de résolution) et de 12 zones agricoles (section 4.3.2), où toutes les successions de cultures et tous les sols présents sont considérées (Figure 6).

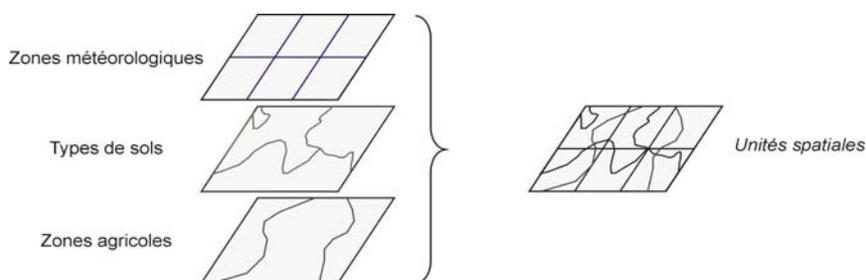


Figure 6 : STICS/MODCOU/NEWSAM : Organisation spatiale des unités de simulation en fonction des données météorologiques, pédologiques et agricoles.

En l'absence de connaissance sur les concentrations effectivement rencontrées avant le développement de l'agriculture intensive et compte tenu également de l'impossibilité de retracer, en toute région du bassin, l'évolution des pratiques agricoles depuis plusieurs décennies, une simulation initiale permet d'approcher au mieux les concentrations en nitrates mesurées à l'actuel dans les grands aquifères régionaux. Cette simulation s'effectue en régime transitoire et en appliquant, pendant 50 ans, un flux sous racinaire moyen par unité spatiale calculé sur 20 ans de pratiques agricoles actuelles et sous climat actuel (période 1970-1990). Les concentrations ainsi calculées sont en adéquation satisfaisante avec celles qui sont effectivement mesurées en 2000 (Figure 7).

A partir de cet « état zéro », censé représenter au mieux la charge en nitrates actuelle dans l'ensemble du système (base du sol, zone non saturée, aquifères), nous avons appliqué les flux d'eau et d'azote ci-dessus, représentatifs de la période 1970-1990, pendant N années supplémentaires (jusqu'à 150 ans) afin de définir une simulation de référence qui servira de base de comparaison avec les différentes simulations intégrant le CC et/ou le changement agricole.

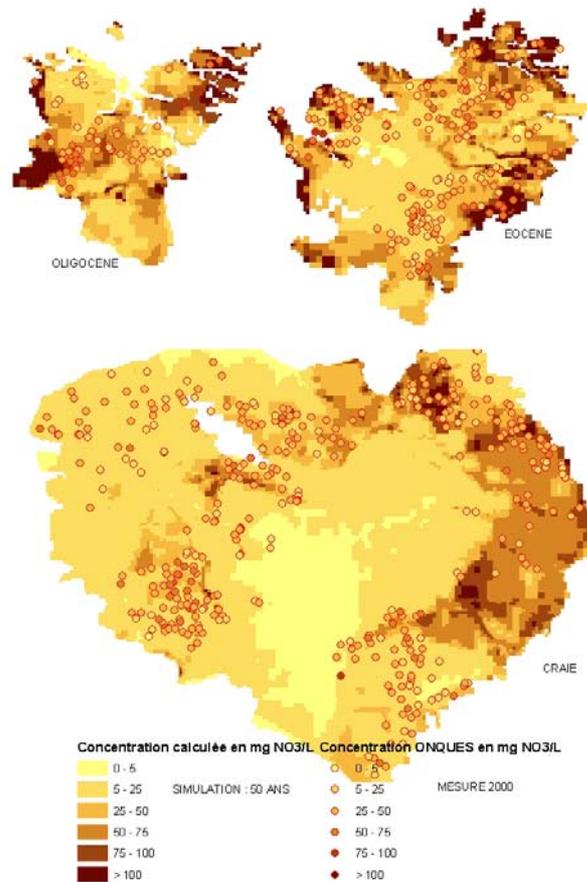


Figure 7 : Concentrations en nitrate calculées (50 années de simulation) et mesurées en 2000.

4.2.5 Le modèle de qualité biogéochimique Riverstrahler

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 et du fonctionnement écologique d'un réseau hydrographique 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.

Contrairement à beaucoup de modèles de tronçons de rivière, Riverstrahler couvre l'ensemble d'un réseau hydrographique et s'affranchit ainsi de la nécessité de renseigner des conditions-limites amont, autres que celles qui définissent les apports diffus depuis le bassin versant. Le réseau hydrographique est décrit comme une combinaison de trois types d'objets : des sous-bassins amont (ou « feuilles »), des axes de rivières (ou « branches ») et des milieux stagnants en connexion (étangs ou réservoirs, Garnier et al., 2000). Dans cette étude, le bassin de la Seine est spatialisé en 29 sous-bassins (en accord avec la spatialisation adoptée pour le modèle CaB, Figure 4), dont 14 sont des axes. Elle prend aussi en compte les trois grands barrages-réservoirs sur la Marne, l'Aube et la Seine amont.

La précision de la description morphologique sur laquelle s'appuie le modèle est très différente pour chacun des types d'objets. Pour les sous-bassins « feuille », on utilise une description idéalisée, basée sur la notion d'ordre hydrologique de Strahler (1957), dans laquelle la complexité du chevelu hydrographique est remplacée par un schéma régulier de confluence de tributaires d'ordre croissant, aux caractéristiques moyennes : seul est donc calculé le comportement moyen des tributaires de chaque ordre. Les axes de rivières sont représentés d'une manière plus fine, permettant la description réaliste de la morphologie du lit avec une résolution longitudinale kilométrique.

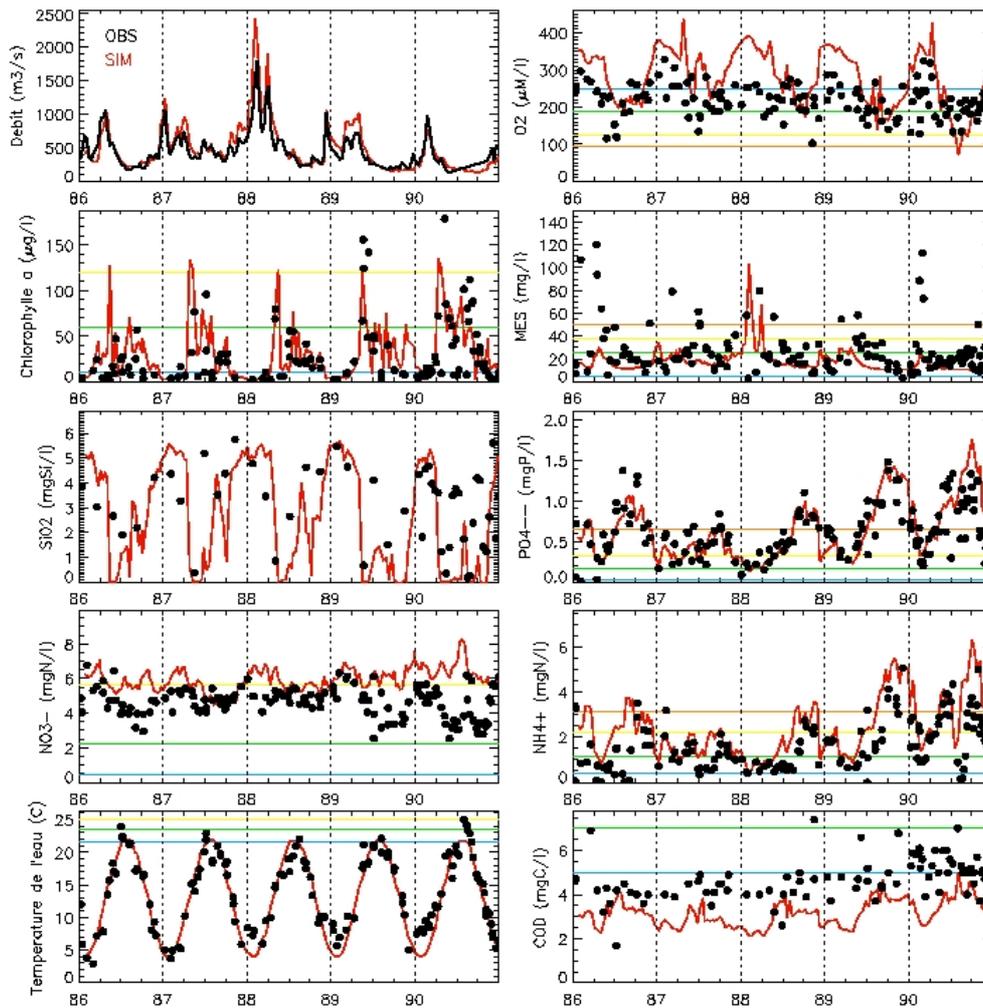


Figure 8 : Comparaison à Poses de la simulation de validation du modèle Riverstrahler avec les données observées disponibles sur la période 1986-1990 (source : RNB) : débits, température de l'eau, biomasse phytoplanctonique (exprimée en concentration de chlorophylle) et concentrations en ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-), ortho-phosphates (PO_4^{2-}), oxygène (O_2), silice (SiO_2), matières en suspension (MES) et carbone organique dissous (COD). Les barres horizontales bleues, vertes, jaunes et oranges marquent les limites entre les classes de qualité Très bonne, Bonne, Passable, Mauvaise et Très mauvaise du SEQ-Eau.

La description de l'hydraulique (débits, vitesse, profondeur) dans cette structure de bassins et d'axes est déduite de la connaissance des écoulements spécifiques (par km^2 de bassin versant), décomposés en deux termes d'écoulement, superficiel et souterrain. Dans cette étude, les variations décennales de ces deux composantes sont directement issues du modèle CaB. La composition de l'eau des 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%.

La qualité de l'eau dans l'ensemble du réseau hydrographique est décrite par la concentration en oxygène, nutriments (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , PIP, SiO_2), matières en suspension et en carbone organique dissous et particulaire (3 classes de biodégradabilité). Les compartiments biologiques sont représentés par 2 groupes d'algues (Diatomées et Chlorophycées), 2 types d'organismes zooplanctoniques (rotifères à temps de génération court et microcrustacés à temps de génération lent), 2 types de bactéries hétérotrophes (petites bactéries autochtones et grandes bactéries allochtones) ainsi que des bactéries nitrifiantes. Sont également décrits les échanges à l'interface eau-sédiment (N, P et oxygène) et le broutage des espèces planctoniques ci-dessus par les espèces fixées (du type *Dreissène*, moules d'eau douce). Le module RIVE décrit les cinétiques des processus biogéochimiques impliqués, déterminées expérimentalement en laboratoire.

L'approche postule l'identité des processus tout au long du continuum aquatique, et seules leurs manifestations sont modulées par la distribution spatio-temporelle des contraintes (Vannote et al., 1980).

Une simulation de validation fut conduite sur la période 1986-1990 (5ans) avec les forçages suivants :

- écoulements simulés par CaB pour cette période (section 4.2.1),
- 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 : PIREN-Seine),
- apports diffus en nitrates provenant de l'état « zéro » des simulations STICS/MODCOU/NEWSAM, représentatif de l'année 2000 (section 4.2.4).

Cette simulation présente des performances très satisfaisantes à Poses (Figure 8), 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).

Notons enfin que le modèle Riverstrahler, avec des jeux de forçage différents, a aussi permis de reconstituer l'évolution de la qualité de l'eau de la Seine au cours des 50 dernières années (Billen et al., 2001), et qu'il a été validé sur d'autres systèmes fluviaux comme le Danube (Garnier et al., 2002), l'Escaut (Billen et al., in press), la Moselle (Garnier et al., 1999) et le Fleuve Rouge (Garnier et Billen, 2002), qui présentent notamment des caractéristiques climatiques variées.

4.3. Données de référence « actuelles »

4.3.1 Données météorologiques

Ces données diffèrent selon les modèles considérés :

- STICS, MODCOU et STICS/MODCOU/NEWSAM : données journalières SAFRAN-CROCUS (Météo-France) distribuées sur une grille régulière de 8 km de côté, couvrant la période 1970-1989. Les données nécessaires sont les données journalières de pluviométrie et d'ETP pour MODCOU, complétées par des données de rayonnement et de température (minima et maxima journaliers) pour STICS. Les précipitations neigeuses, peu importantes sur le bassin de la Seine, sont intégrées directement sous forme liquide.
- CaB : données SAFRAN-CROCUS (Météo-France), mais au pas de temps horaire et sur la période Août 1985 – Juillet 1991. Ces données ont été interpolées spatialement par simple moyenne, pondérée par les surfaces d'intersection entre les 29 bassins élémentaires composant le bassin de la Seine selon CaB la grille régulière de 8 km de SAFRAN.
- Riverstrahler : étant donné son forçage par les écoulements simulés par le modèle CaB, les seules données météorologiques requises sont les données d'insolation, caractérisées à partir de considérations astronomiques. La température de l'eau est calée sur les observations actuelles.

4.3.2 Données agricoles

Objets de recherche mobilisés et leurs sources :

Concernant l'activité agricole à la surface du bassin de la Seine, la connaissance de la situation de référence (année 2000) repose sur la prise en compte de différents niveaux de description de l'agriculture, qui proviennent tous des statistiques agricoles nationales, mais qui ont été mobilisés différemment selon deux objectifs:

1. **Modélisation de l'impact des pratiques agricoles actuelles sur l'hydrosystème Seine :** les objets mobilisés sont des descripteurs agronomiques de l'activité agricole, qui influent directement sur les mécanismes de pollutions diffuses :
 - Les successions de cultures (« suite ordonnée de cultures implantée sur une même parcelle sur un pas de temps pluriannuel ») : celles-ci ont été reconstituées grâce au logiciel CarottAge qui permet d'extraire des régularités dans les suites d'occupation de sol d'un échantillon constant de points (Mari & al., 2002). Les données mobilisées ici sont issues de l'enquête nationale

Teruti du SCEES qui renseigne sur leur occupation de sol depuis 1992 un échantillon de plus de 555 000 points sur le territoire français, soit près de 70 000 points sur le bassin de la Seine.

- Les séquences techniques (« suite ordonnée des interventions culturales portées sur un couvert végétal pour en tirer une production ») : pour chacune des cultures des successions caractérisant les différentes zones du bassin de la Seine (voir plus loin), nous avons pu définir les pratiques culturales majoritaires influant notamment sur le cycle de l'azote. Ces données sont issues de l'enquête du SCEES « Pratiques culturales sur grandes cultures en 2001 ».

2. Construction de scénarios de prospective agricole à l'horizon 2050 : les objets mobilisés sont ici des descripteurs technico-économiques de l'agriculture :

- Les systèmes de productions (combinaison des productions dans une exploitation) sont représentés par les orientations technico-économiques d'une exploitation ou « OTEX » (ex. : OTEX « bovins-lait » « polyculture-élevage » ou « cultures générales »), qui, agrégés, peuvent devenir les descripteurs de l'agriculture à des échelles plus vastes (cantons, régions, etc...).
- Les systèmes de culture, qui traduisent les systèmes de production en occupation du sol d'un territoire donné, et décrits dans notre étude par l'assolement (somme des occupations agricoles du sol sur une année donnée)

Ces 2 variables sont renseignées à partir du Recensement Général de l'Agriculture (RGA) 2000.

Maillages spatiaux retenus :

Le bassin de la Seine ne peut être considéré comme un ensemble homogène en terme d'activité agricole. En effet, toutes les études précédentes (e.g. Mignolet & al., 2002) montrent une grande hétérogénéité des systèmes de production choisis par les agriculteurs, se traduisant par des assolements également très variables selon les régions agricoles. Cette hétérogénéité résulte à la fois de choix économiques (proximité des marchés, IAA ou consommateurs), des orientations politiques (de la PAC, notamment) et également des contraintes du milieu.

Il a donc été nécessaire d'introduire une certaine variabilité spatiale dans la constitution de bases de données décrivant les pratiques agricoles de la situation de référence, en choisissant un zonage qui schématise les grands ensembles agricoles du bassin de la Seine, sans alourdir inutilement les temps de calculs nécessaires à la modélisation.

Pour réaliser ce zonage, nous nous sommes appuyés sur le maillage le plus pertinent pour l'étude des activités agricoles, à savoir le maillage en Petites Régions Agricoles (PRA). Pour regrouper ces PRA en grandes zones caractéristiques, nous avons choisi comme critères :

- le pourcentage de Surfaces Toujours en Herbe (STH), particulièrement déterminant sur les marges du bassin ;
- les successions de cultures dominantes (issues de l'enquête Teruti de 1992 à 1998).

Dans certains cas, la carte géologique et celle des OTEX (Orientations technico-économiques) dominantes furent utilisées pour confirmer certains regroupements. Le résultat final de cette opération aboutit à un découpage du bassin de la Seine en 12 zones caractéristiques (Figure 9).

Chacune de ces zones est alors renseignée dans une base de données relationnelle indiquant :

- pour chaque zone, le pourcentage de SAU (surface agricole utile) occupé par chaque succession culturale majoritaire
- pour chaque culture, les séquences techniques qui lui sont associées.

Ce sont donc ces données (Tableau 2) qui ont été utilisées pour réaliser les simulations avec le climat et les pratiques actuels et vérifier la viabilité des cultures actuelles sous CC.

Comme illustré par le Tableau 3, chaque zone est alors décrite par une série de variables tirées des statistiques actuelles (RGA 2000) et portant sur :

- les proportions des différentes OTEX présentes sur la zone en surface et en nombre d'exploitations concernée en valeur absolue et en valeur relative par rapport à la SAU et au nombre total d'exploitations ;
- la combinaison des ateliers au sein des différentes OTEX, obtenue en croisant des données socio-économiques (nombre de travailleurs agricoles, surface moyenne des exploitations, etc.), des données sur le cheptel (nombre de têtes de bovins allaitants, etc.) ou sur l'assolement (surface en céréales, maïs, etc.).

Cette série de paramètres socio-économiques constitue l'image de base de l'agriculture de la Seine en 2000 sur laquelle vont porter les jeux d'hypothèses constitutifs des différents scénarios que nous décrirons en section 5.2.

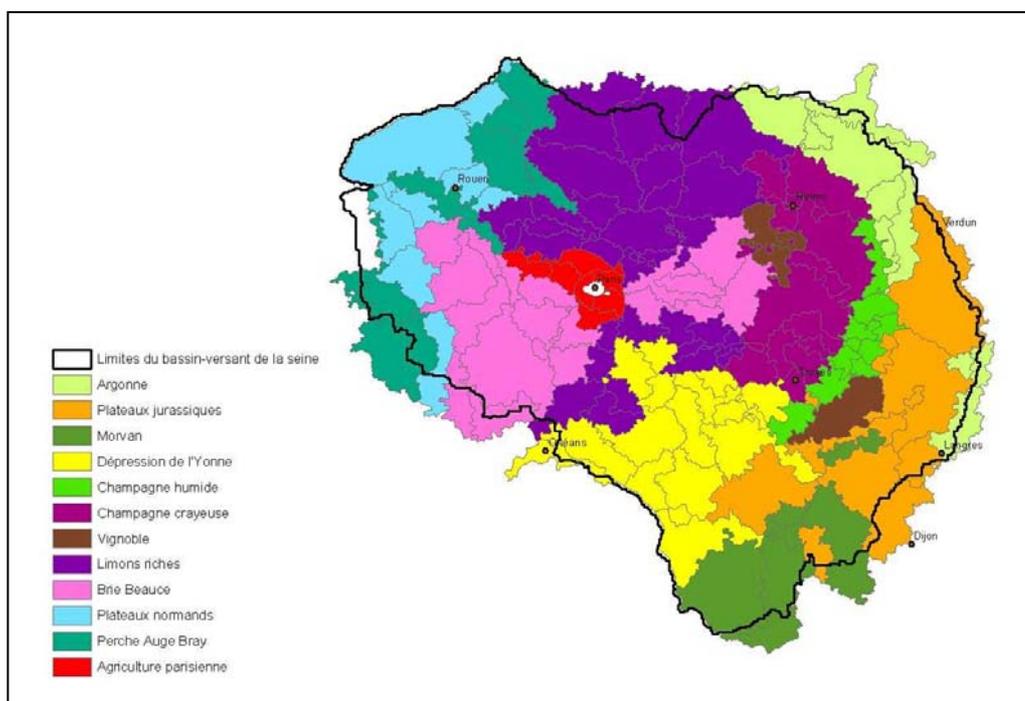


Figure 9 : Segmentation du bassin de la Seine en 12 zones homogènes sur lesquelles se réalisent les simulations STICS et STICS/MODCOU/NEWSAM.

Tableau 2: Exemple de données contenue dans la base de données « pratiques agricoles actuelles » du projet GICC-Seine.

Zone : Argonne			
Succession de culture : Maïs grain - blé = 15 % de la SAU			
Données générales		Fertilisation :	
Date de semis :	15/04 au 15/05	170 U d'azote en 2 apports	15/04 et 31/05
Date de récolte :	01/10 au 15/11	Travail du sol :	
rendement moyen :	87 qx	75% des parcelles : 1 labour + 1 préparation superficielle	16/10 au 30/11
		25% des parcelles : 1 préparation superficielle	16/10 au 30/11

Tableau 3: Traitement des données technico-économiques issues du RGA 2000 permettant de reconstituer la combinaison des ateliers au sein d'une OTEX.

OTEX	atelier animal					atelier végétal					
	nb bovins/UTA	nb VL/EA	nb VA/EA	%SIH/SAU	%SFP/SAU	bovins/SFP	%céréales/TL	%CP/TL	%CI/TL	%MF/TL	%four/TL
grandes cultures et herbivores	58	29	10	30%	46%	2,6	51%	9%	16%	15%	23%

OTEX	structure moyenne de l'exploitation			combinaison atelier animal et végétal	
	UTA/EA	SAU/EA	SAU/UTA	atelier animal	atelier végétal
grandes cultures et herbivores	2	90	49	lait = 30VL; viande = 10VA	45% SAU pour élevage dont 65% en SIH 70% SAU en rotation : fourrage (/ CI) + céréales

4.3.3 *Données de rejets ponctuels*

Outre les apports ponctuels 1991 utilisés pour la simulation de validation de Riverstrahler (section 4.2.5), nous avons exploité les données de rejets 2000 fournies par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) comme référence actuelle dans le cadre de notre projet. Les rejets industriels sont issus d'estimations basées sur la redevance versée à l'Agence par les entreprises. A partir du niveau d'activité déclaré, et en fonction de la branche dans laquelle est classée l'industrie, une valeur de pollution est estimée concernant différents éléments (azote, MES, phosphore, etc). Des mesures ponctuelles sont effectuées sur site afin de valider ces estimations. Il en va de même des données de rejets issus des stations d'épuration (STEP). Les valeurs de matières entrantes et sortantes sont calculées à partir des primes pour épuration versées par l'AESN. Quelques mesures réelles viennent compléter l'ensemble, sans qu'il soit possible de les distinguer des estimations.

4.4. **Données mobilisées pour la construction des différents scénarios de changement**

4.4.1 *Les scénarios SRES*

Le troisième rapport d'évaluation du GIEC (Houghton et al., 2001) a vu une innovation méthodologique majeure : la création d'un groupe de travail sur les scénarios d'émissions dont les travaux ont été publiés dans le cadre d'un rapport spécial (Nakicenovic and al., 2000). Les projections d'émissions de gaz à effet de serre fournies par ces scénarios sont utilisées par les climatologues pour leurs simulations de CC. Les scénarios SRES sont issus de jeux d'hypothèses contrastées sur cinq déterminants des émissions : 1. la démographie, 2. l'économie, 3. la technologie, 4. les modes de production de l'énergie et, 5. l'agriculture.

Ces hypothèses contrastées reposent elles-mêmes sur des prospectives internationales de référence, en particulier les travaux du *Global Scenario Group* (GSG ; Gallopín et al., 1997). Plus généralement, la "philosophie" du SRES réside dans la reconnaissance que ces paramètres ne peuvent faire l'objet de prévisions déterministes sur le long terme, et que leur évolution dépend de facteurs humains qui ne peuvent être envisagés que dans le cadre d'une approche qualitative. Ce constat se traduit par l'existence de quatre grands types de scénarios SRES (A1, A2, B1, B2) habituellement présentés comme des variations autour de deux axes socio-économiques structurants : d'une part le caractère régional ou global de l'économie, et d'autre part le poids donné aux préoccupations environnementales au regard des forces économiques. Malgré les apparences, ces quatre familles de scénarios résultent de visions du monde très contrastées, à l'image de celles développées par le GSG qui les ont inspirées : des évolutions tendanciennes, des ruptures négatives ("échecs de la civilisation") et des ruptures positives ("transitions vers le durable").

La démarche initialement proposée dans le cadre de l'appel d'offre GICC-Seine reposait sur l'hypothèse d'indépendance de trois familles de scénarios : (1) climatiques, (2) agricoles et (3) rejets ponctuels. Cette hypothèse d'indépendance des scénarios n'est pas totalement satisfaisante et nous avons développé une alternative méthodologique basée sur :

- la reconnaissance de l'importance des hypothèses socio-économiques liées à chacune de ces trois familles de scénarios,
- la volonté d'explicitier ces hypothèses implicites et d'en garantir la cohérence.

A cet effet, les scénarios du SRES fournissent un référentiel commun pour les prospectives climatiques et anthropiques : les simulations de CC reposent toutes explicitement sur un scénario SRES, et les scénarios SRES fournissent des éléments de cadrage auxquels il est possible de se référer pour les scénarios socio-économiques généraux. Il est important de noter ici que les scénarios SRES décrivent des évolutions économiques sans politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces scénarios décrivent diverses possibilités de « monde soumis au CC ». Ce cadre est totalement compatible avec l'objectif du projet GICC-Seine d'étude de l'impact des changements climatiques sur le bassin versant de la Seine.

4.4.2 *Simulations de changement climatique*

Les MCG sont les meilleurs outils actuellement disponibles pour appréhender le probable CC dû à l'augmentation anthropique des GES, les méthodes alternatives se limitant aux méthodes des analogues temporels ou spatiaux (Arnell, 1994). Les projections du CC par les MCG présentent les

avantages d'être quantifiées, spatialisées et de prendre en compte la physique du système climatique au mieux des connaissances actuelles. Ces modèles, ainsi que leurs paramétrisations des processus physiques, sont cependant sujets à de nombreuses incertitudes, dont l'évaluation est problématique (Planton, 1999), et qui augmentent à l'échelle régionale (e.g. Kittel et al., 1998). Leurs projections du CC sont aussi soumises aux incertitudes inhérentes aux scénarios d'émissions en GES. Il semble donc fondamental de disposer de plusieurs projections, dont les différences donnent une idée de la marge d'incertitude du CC potentiel.

Nous avons commencé par exploiter le CC simulé par deux versions d'un même MCG : le modèle ARPEGE (Météo-France). Ces deux versions (Déqué et al., 1998 ; Gibelin et Déqué, 2003) partagent la caractéristique d'un maillage variable, qui permet régionalement une résolution plus fine qu'un MCG à maillage régulier (200 km de côté au minimum), tout en maintenant la cohérence de la dynamique de l'atmosphère à grande échelle. C'est un avantage de la méthode « zoom » par rapport aux méthodes de désagrégation vers l'échelle régionale des MCG à maillage régulier (par des modèles régionaux emboîtés ou des méthodes statistiques), qui s'accompagnent de leurs propres incertitudes, et ne font pas encore l'objet d'un consensus (Hutjes et al., 1998).

Trois paires de simulations, représentant le climat sous concentrations de CO₂ actuelles et augmentées ont été réalisées avec ces modèles, et sont résumées en Tableau 4. Elles diffèrent par leur résolution en Europe et dans le bassin de la Seine, mais elles correspondent aussi à deux versions profondément différentes du MCG, dont le réalisme a été amélioré entre les versions OLD et NEW. Une autre différence importante entre ces trois simulations de CC concerne les températures de surface de la mer (TSM) qui servent de forçage pour les intégrations du MCG atmosphérique ARPEGE, et qui sont un élément important de la dispersion des projections du CC. Enfin, les concentrations en CO₂ correspondant aux situations de CC sont différentes entre les 3 simulations de CC : elles sont plus optimistes dans NEW-B2 que dans OLD et NEW-A2, et toutes largement supérieures à la concentration actuelle (354 ppm en 1990).

Tableau 4 : Description des différentes simulations de CC ARPEGE. Les quatre dernières lignes donnent les différences CC-REF moyennes de précipitation, température et humidité de l'air à 2 m et rayonnement infra-rouge incident.

Simulations « CC »	OLD	B2	A2
MCG	ARPEGE « OLD » (Déqué et al., 1998)	ARPEGE « NEW » (Gibelin et Déqué, 2003)	
Résol. Seine	80 x 80 km ²	50 x 50 km ²	
Nb. mailles Seine	28	44	
Durée des simul	10 ans	30 ans	
Scénarios d'émissions	CO ₂ + 1% /an depuis 1990 708 ppm en 2060 Sans aérosols	SRES-B2 610 ppm en 2100 Avec aérosols	SRES-A2 850 ppm en 2100 Avec aérosols
TSM « CC »	2054-2064 (HadCM2 ^a)	2070-2099 (Modification des valeurs actuelles selon ARPEGE/OPAG ^b sous émissions SRES-B2)	2070-2099 (Modification des valeurs actuelles selon ARPEGE/OPAG ^b sous émissions SRES-A2)
TSM « REF »	1984-1994 (HadCM2 ^b)	1960-1989 (Observées)	
Δ Précipitation	+7%	-0%	+3%
Δ Température	+2.0°C	+2.1°C	+3.3°C
Δ Hum. Air	+11%	+12%	+17%
Δ Rayt. IR	+4%	+4%	+6%

^a HadCM2 : MCG couplé océan/atmosphère du Hadley Center utilisé pour simuler l'évolution du climat de 1860 à 2100, avec les concentrations observées de CO₂ jusqu'en 1990, puis une augmentation de 1% par an à partir de cette date.

^b ARPEGE/OPAG : MCG couplé océan/atmosphère utilisé par Météo-France pour simuler l'évolution du climat de 1950 à 2099, avec les concentrations observées de GES et aérosols jusqu'en 1999, puis leurs évolutions selon les scénarios d'émission SRES-B2 ou SRES-A2. La différence moyenne de TSM ainsi simulée entre les périodes 2070-2099 et 1960-1989 est ajoutée en chaque maille océanique aux valeurs mensuelles observées en 1960-1989.

Tableau 5 : Description des neuf simulations de CC complémentaires à résolution grossière.

MCG	Résolution spatiale	Période de référence	Période du CC	Scénarios d'émissions	Références	Source
HadCM3	96x73	1960-1989	2070-2099	A2, B2	Pope et al. (2000) Gordon et al. (2000)	IPCC
GFDL R30	96x80	1961-1990	2071-2100	A2, B2	Delworth et al. (2002)	IPCC
CCCma (CGCM2)	64x32	1960-1989	2070-2099	A2, B2	Flato & Boer (2001)	IPCC
NCAR PCM	128x64	1981-1989	2091-2099	A2	Washington et al. (2000)	IPCC
CCSR/NIES	64x32	1960-1989	2070-2099	A2	Nozawa et al. (2001)	IPCC
LMD6	96x75	1980-1989	2054-2064	+1%/an de CO ₂ depuis 1990	Crossley et al. (2000) Gedney et al. (2000)	LMD

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

Nous avons donc exploité neuf autres simulations de CC, par six MCG différents, certains forcés par différents scénarios d'émissions (Tableau 5). Huit de ces simulations proviennent du Data Distribution Center de l'IPCC et la neuvième du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD). Une caractéristique commune de ces 9 simulations est leur résolution beaucoup plus grossière que celle des trois simulations ARPEGE, si bien que le bassin de la Seine n'est recouvert que de 4 mailles MCG.

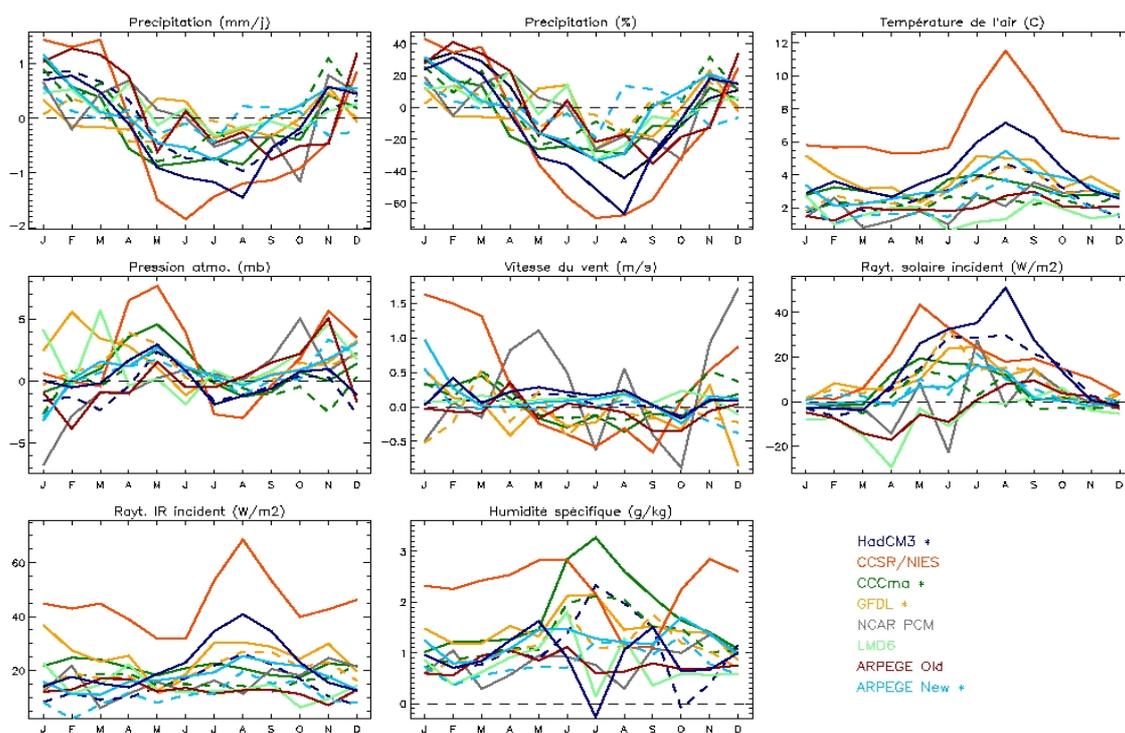


Figure 10 : Variations mensuelles moyennes par rapport à l'actuel (1985-1991) des variables de forçage nécessaires au modèle CaB, selon les 12 simulations de CC exploitées. Les couleurs correspondent aux 8 MCG listés dans la figure. Nous disposons de simulations sous scénarios d'émission A2 et B2 pour 4 MCG, indiqués par un astérisque. Pour ces 4 MCG, les lignes en trait plein correspondent au scénario A2, et les lignes en tireté au scénario B2.

La Figure 10 montre les changements simulés par l'ensemble des 12 combinaisons MCG/scénarios d'émission, qui sont synthétisés en terme de température et précipitation dans le Tableau 6 :

- dans tous les cas, le rayonnement infra-rouge incident augmente significativement, en conséquence directe de l'augmentation de l'effet de serre atmosphérique,
- il en résulte un réchauffement, qui est systématique et toujours statistiquement significatif,
- l'humidité de l'air augmente également dans tous les cas (car l'air chaud peut contenir plus de vapeur que l'air froid), de manière significative,

- les précipitations présentent une réponse radicalement différente, avec une tendance assez générale vers une augmentation en hiver et une diminution en été. La dispersion est cependant marquée, avec quelques simulations qui sortent du comportement général, notamment ARPEGE NEW-B2 en été. La résultante sur les 12 simulations des ces changements saisonniers est une diminution des précipitations annuelles, mais qui n'est pas statistiquement significative,
- le rayonnement solaire incident tend à augmenter en été, car la diminution des précipitations réduit la nébulosité,
- les deux dernières variables considérées (pression atmosphérique et vitesse du vent) présentent des variations faibles et non statistiquement significatives.

Tableau 6 : Statistiques des 12 simulations de CC exploitées, en terme de température et précipitations.

	Température (°C)	Précipitations (mm/j)
Moyenne annuelle de référence (1985-1991)	9.27	2.08
Moyenne annuelle sous CC (12 scénarios)	12.37	2.00
Impact moyen (moy. 12 scénarios - REF)	3.10	-0.08
Ecart-type de l'impact (12 scénarios)	1.55	0.13
Impact minimal (12 scénarios)	1.65 (LMD6)	-0.40 (CCSR/NIES)
Impact maximal (12 scénarios)	6.88 (CCSR/NIES)	+0.03 (CCCma)

4.4.3 Données mobilisées pour la construction des scénarios de rejets ponctuels

Les scénarios de rejets ponctuels en 2050 ont nécessité un travail de construction spécifique (section 5.4.1). Cette construction a mobilisé deux sources de données “publiques” : les projections démographiques de l'INSEE, et les scénarios socio-économiques du SRES.

Dans le cadre des réflexions sur l'avenir du système de retraite français, l'INSEE a étudié des projections démographiques sur les périodes 2000-2030 et 2000-2050 (Omalek 2001; Brutel 2002; Brutel and Omalek 2002). Six scénarios de référence ont ainsi été constitués sur la base de jeux d'hypothèses contrastées en matière de natalité, de mortalité et d'immigration. L'échelle spatiale des scénarios utilisés dans notre recherche était principalement le département. Depuis la fin de notre recherche, ces données ont été rendues disponibles sous format électronique par l'INSEE, accompagnées d'un logiciel facilitant leur exploitation (INSEE 2003).

La construction des données de pollutions en 2050 a également mobilisé les scénarios socio-économiques SRES du GIEC. Les quatre scénarios de référence du GIEC incluent des projections démographiques, économiques ainsi que des hypothèses sur l'innovation technologiques. Ces scénarios mondiaux sont désagrégés par pays, fournissant des données de cadrage nationales pour la France.

5. Résultats

5.1. Impacts directs du changement climatique sur l'hydrosystème

5.1.1 Construction de 12 scénarios de changement climatique

Les MCG présentent souvent des biais dans leur simulation du climat actuel, tout particulièrement sur les précipitations continentales. C'est ainsi le cas des deux versions du modèle ARPEGE qui surestiment significativement les précipitations hivernales dans le bassin de la Seine (Ducharne et al., 2004a). De tels biais se transmettent aux débits simulés (Ducharne et al., 2003), et pour s'affranchir de ce problème, nous avons choisi de construire des scénarios de CC en perturbant le climat actuel en fonction du CC simulé par les MCG. Cette stratégie désormais classique est la même que celle qui fut adoptée par le projet GICC-Rhône.

Le climat actuel choisi comme base de ces scénarios est différent selon le modèle auxquels ils sont destinés :

- 1970-1989 pour les modèles MODCOU et STICS (pas de temps journalier),
- 1985-1991 pour le modèle CaB (pas de temps horaire).

Pour chaque variable climatique, les perturbations sont calculées mensuellement, comme le rapport, (ou la différence dans le cas de la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous CC et à l'actuel. La perturbation mensuelle est alors appliquée uniformément à tous les pas de temps du mois considéré. Cette stratégie préserve sous climat perturbé la variabilité journalière (ou horaire) du climat actuel. Rappelons encore que les scénarios de CC ainsi construits représentent le CC moyen. En effet, les MCG ont une valeur climatologique, c'est à dire qu'ils représentent le climat, défini comme une moyenne sur une longue période (typiquement 10 à 30 ans). La variabilité temporelle des MCG est rarement validée, que ce soit la variabilité interannuelle autour du climat moyen (qui requiert des simulations *et* des observations fiables du climat sur plusieurs décennies), ou la variabilité à des échelles de temps plus courtes, comme celle des extrêmes. Quand de telles validations sont entreprises, elles montrent le plus souvent que les extrêmes sont mal capturés par les MCG, parce qu'ils sont associés à des processus à petite échelle spatiale qui ne sont pas résolus explicitement dans les MCG (e.g. Gibelin et Déqué, 2001).

L'ETP, nécessaire au forçage de MODCOU et STICS, mais non simulée par les MCG, fut calculée par la formule de Penman (1948), utilisée par Météo-France pour calculer les ETP actuelles de 1970-1989. Nous avons calculé cette ETP à partir du rayonnement visible et infra-rouge incident, de la température et de l'humidité de l'air à 2 m, et de la vitesse du vent à 10 m, simulés par les MCG en situation de référence et de CC. Puis nous avons procédé avec ces séries comme avec celles qui sont directement simulées par les MCG. Notons cependant que ces perturbations d'ETP n'intègrent pas l'effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique, qui devrait les réduire. En effet, une concentration supérieure en CO₂ permet d'assurer l'assimilation carbonée par photosynthèse avec une ouverture stomatique, et donc une transpiration, plus faibles. Cet effet fut quantifié à l'aide du modèle STICS (Brisson, 2003), qui a permis de déterminer des coefficients multiplicateurs des perturbations d'ETP (généralement inférieurs à 1) pour les 3 gammes de CO₂ correspondant aux simulations de CC (Tableau 7).

Tableau 7 : Coefficients multiplicateurs des perturbations mensuelles d'ETP, utilisés par les modèles STICS et MODCOU.

CO ₂ (ppm)	Scénarios d'émission	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
610	B2	0.99	0.97	0.94	0.92	0.88	0.88	0.90	0.93	0.93	0.93	1.03	1.02
708	+1%/an depuis 1990	0.99	0.97	0.93	0.88	0.85	0.84	0.88	0.91	0.90	0.90	1.05	1.08
850	A2	0.98	0.96	0.92	0.85	0.82	0.81	0.85	0.88	0.89	0.88	1.02	1.02

En ce qui concerne enfin la résolution spatiale des perturbations, nous avons adopté deux stratégies différentes selon la résolution des simulations MCG. Pour les 9 simulations MCG à résolution grossière (avec seulement 4 mailles recoupant le bassin de la Seine), nous n'avons pas cherché à régionaliser l'information et nous avons construit des perturbations uniformes à partir de la moyenne

spatiale des 4 mailles. Pour les 3 simulations ARPEGE, présentant une bien meilleure résolution (Tableau 4), des jeux de perturbations ont été construits pour chaque modèle, à la résolution des données météorologiques de ceux-ci. Ceci revient à agréger les données simulées par ARPEGE vers le maillage de CaB (29 sous-bassins) et STICS (12 zones), et à désagréger ces mêmes données vers le maillage Safran à 8x8 km² pour les modèles MODCOU et STICS/MODCOU/NEWSAM.

5.1.2 Impacts hydrologiques simulés par le modèle CaB selon 12 scénarios de CC

Un des principaux objectifs de cette action est de caractériser la part d'incertitude des impacts hydrologiques du CC qui est liée à la prospective climatique, par l'intermédiaire des MCG et des scénarios d'émission en GES au cours du XXI^{ème} siècle.

Cette analyse est menée avec le modèle CaB, qui réclame beaucoup moins de temps de calcul que le modèle MODCOU. Nous avons donc réalisé 13 simulations à l'aide de ce modèle :

- une simulation de référence sous climat actuel (période Août 1985-Juillet 1991),
- 12 simulations sous climat perturbé, c'est-à-dire forcées par les 12 scénarios de CC décrits ci-dessus, construits sur la base du climat actuel au pas de temps horaire.

Toutes les simulations démarrent avec l'état initial du sol du 1^{er} août 1985 (en humidité et température). Pour équilibrer le sol avec le climat, et limiter au seul climat les facteurs de différence entre les simulations actuelle et de CC, les 13 simulations ont été menées sur 18 ans, en enchaînant trois répétitions des forçages climatiques. Seule la dernière répétition de 6 ans, identique à la seconde et donc à l'équilibre, est prise en compte dans les analyses ci-dessous.

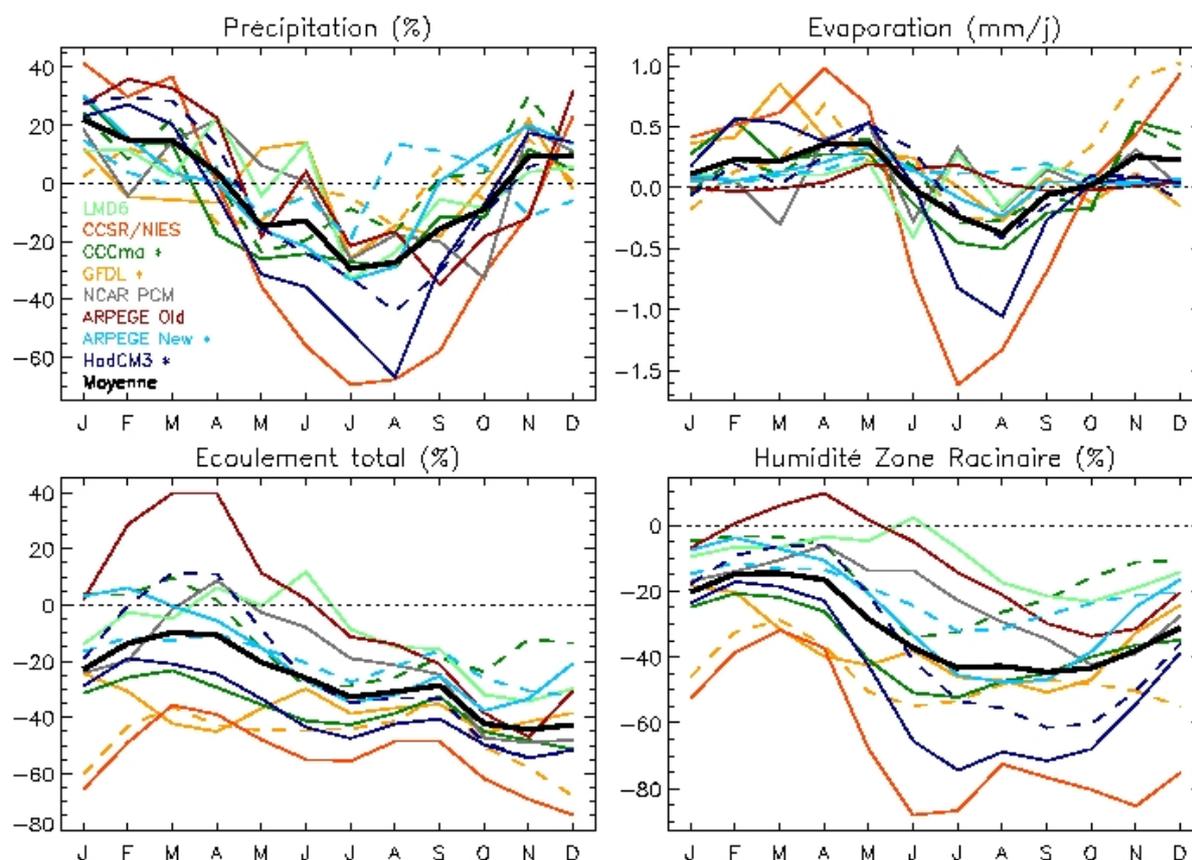


Figure 11 : Impact des 12 scénarios de CC sur les bilans d'eau simulés par le modèle CaB dans le bassin de la Seine. Les valeurs représentées sont des différences par rapport au climat actuel. Nous disposons de simulations sous scénarios d'émission A2 et B2 pour 4 MCG, indiqués par un astérisque dans la figure. Pour ces 4 MCG, les traits pleins correspondent au scénario A2, et les tiretés au scénario B2.

Tableau 8 : Statistiques des impacts simulés par CaB selon les 12 scénarios de CC. La dernière colonne donne la différence des impacts moyens simulés selon les 4 scénarios A2 et les 4 scénarios B2.

Variables	Moyenne annuelle de référence (1985-1991)	Impact moyen (moy. 12 scénarios - REF)	Ecart-type (12 scénarios)	A2-B2 (moy. annuelle sur 4 MCG A2 et B2)
Précipitations (mm/j)	2.00	-0.04	0.10	-0.06
Température (°C)	10.27	3.10	1.41	0.74
Evaporation (mm/j)	1.43	0.09	0.07	-0.04
Ecoulement total (mm/j)	0.57	-0.13	0.10	-0.01
Humidité zone rac. (mm)	346.	-31.	16.5	-3.7
Humidité totale (mm)	-	-79.	50.2	-10.3

La Figure 11 récapitule les principaux impacts ainsi simulés sur les bilans d'eau dans le bassin de la Seine, exprimés par rapport à la référence actuelle (Août 1985-Juillet 1991). Elle rappelle que, sur l'ensemble des 12 simulations de CC, les précipitations tendent à augmenter en hiver et diminuer en été. L'évaporation présente un signal similaire, qui s'explique par l'augmentation de la demande évaporative (due à l'augmentation de la température et du rayonnement incident) et par les variations de précipitation, qui modulent l'eau disponible pour l'évaporation. L'augmentation d'évaporation en hiver est ainsi dominée par l'évaporation de l'eau interceptée par le feuillage, permise par l'augmentation des précipitations hivernales. En été, la demande évaporative accrue est au contraire contrecarrée par l'augmentation du stress hydrique (humidité de la zone racinaire réduite), si bien que l'évaporation diminue. L'augmentation du CO₂ atmosphérique pourrait jouer sur la réponse de l'évaporation au CC, en réduisant la conductance stomatique, et donc la transpiration (section 5.1.1). Cet effet fut vérifié en climat actuel avec une version expérimentale du modèle CaB (Curie et Ducharne, 2003), mais il ne remet pas en cause les résultats ci-dessus car la transpiration est par ailleurs fortement limitée sous CC par stress hydrique.

La résultante annuelle (Tableau 8) est une augmentation de l'évaporation qui, cumulée à la diminution des précipitations, entraîne une diminution de l'humidité de la zone racinaire et de l'humidité totale (qui intègre l'humidité de toute la zone non saturée, depuis la surface du sol jusqu'à la nappe).

La Figure 11 montre aussi que l'écoulement total diminue tout au long de l'année, en moyenne sur les 12 simulations de CC. Cette diminution est systématique en été, quand la diminution des pluies s'ajoute à celle de l'humidité du bassin. Les impacts sur l'écoulement total en hiver (crues) sont beaucoup plus dispersés, la moitié des simulations de CC montrant une augmentation en certains mois. Ceci s'explique par la variabilité importante des changements de précipitation (en hiver mais aussi en terme de contrastes saisonniers), et nous empêche de conclure avec certitude sur l'évolution des crues sous CC. A l'échelle annuelle, voire interannuelle puisque nous raisonnons ici en climat moyen, les impacts semblent assez robustes puisque d'amplitude supérieure à l'écart-type des 12 simulations (Tableau 8).

Pour 4 MCG (ARPEGE NEW, HadCM3, GFDL, CCCma), nous disposons de deux simulations de CC, correspondant aux deux scénarios d'émission en GES A2 et B2 (A2 plus pessimiste que B2). Le Tableau 8 montre que les simulations A2 présentent un signal de CC plus marqué que celui des simulations B2, avec des précipitations légèrement plus faibles, une température plus élevée et un écoulement plus faible. L'évaporation augmente davantage dans les 4 simulations B2 que dans les 4 simulations A2, mais cela s'explique par un stress hydrique accru dans les dernières. Cette analyse suggère donc 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 différence moyenne entre les simulations A2 et B2 est cependant nettement plus faible que l'impact moyen du CC (à l'exception des précipitations, dont la moyenne annuelle ne change pas significativement sous CC) et que l'écart-type entre les 12 scénarios. L'incertitude des simulations climatiques et hydrologiques semble donc davantage liée aux MCG qu'aux scénarios d'émission en GES.

La Figure 12 caractérise en valeur absolue la dispersion des différentes simulations, et donc la marge d'incertitude de nos résultats (alors que la Figure 11 quantifie les impacts relativement au climat actuel). Elle illustre aussi la représentativité des 4 scénarios de CC sélectionnés pour les simulations STICS et MODCOU, à savoir les 3 scénarios ARPEGE et le scénario LMD6. Ils sont tous "plus

humides” que la moyenne des scénarios (écoulements et humidité plus forte, évaporation réduite plus tardivement par stress hydrique comparé à la simulation actuelle). Les 2 scénarios ARPEGE NEW restent cependant représentatifs de l’ensemble des 12 scénarios, en terme de climat et d’impact hydrologique. L’impact hydrologique du scénario ARPEGE NEW A2 est ainsi très proche de l’impact moyen des 12 scénarios. Les scénarios ARPEGE OLD et LMD6 peuvent au contraire être vus comme deux cas particuliers, celui d’une forte intensification des contrastes saisonniers de précipitation pour OLD, et celui d’un réchauffement faible pour LMD6.

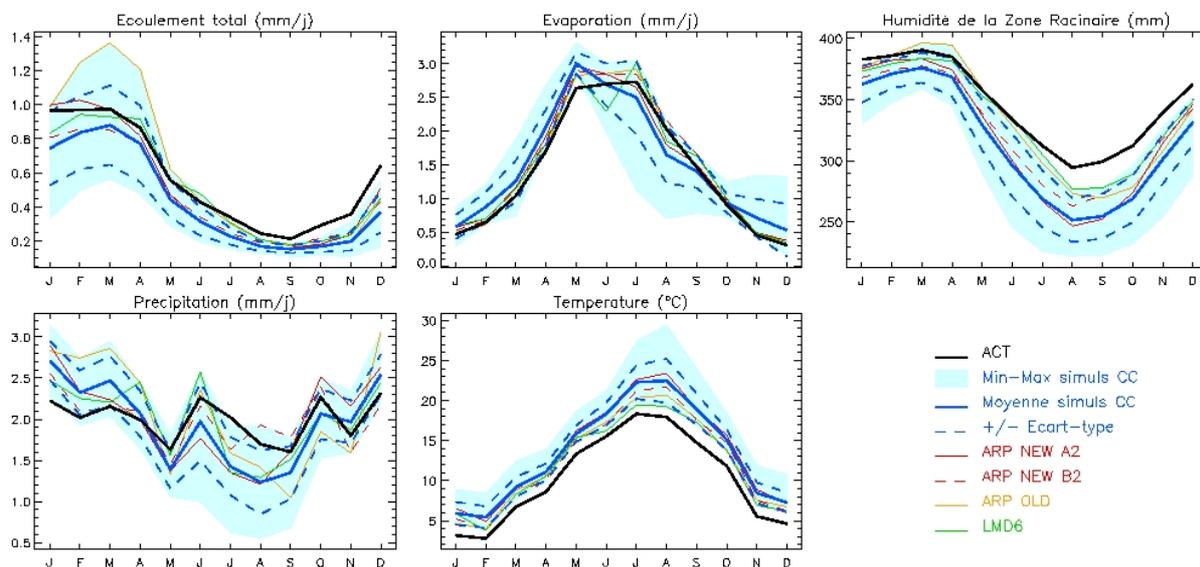


Figure 12 : Synthèse de l’impact des 12 scénarios de CC sur les bilans d’eau simulés par le modèle CaB dans le bassin de la Seine. La courbe noire correspond aux valeurs « actuelles » (Août 1985-Juillet 1991), la courbe bleue à la moyenne des 12 simulations d’impact, et les pointillés à leur écart type autour de cette moyenne. L’enveloppe bleue définit la gamme de variation couverte par l’ensemble des 12 simulations d’impact, où sont distinguées les 4 simulations sous scénario de CC AREGE et LMD6.

5.1.3 Impact sur l’hydrodynamique superficielle et profonde (modèle MODCOU)

Quatre simulations de CC ont été réalisées avec le modèle MODCOU, selon le même principe que la simulation de référence sous climat actuel (section 4.2.3) à laquelle elles sont comparées. Les scénarios climatiques considérés sont :

- les 3 scénarios ARPEGE : OLD, B2 et A2 (basés sur les simulations résumées en Tableau 4)
- le scénario LMD6.

Le modèle fournit les résultats sous forme d’évolution journalière des débits aux stations et d’évolution des niveaux piézométriques des trois grandes formations aquifères représentées. A titre d’exemple, la Figure 13 montre, sous scénario ARPEGE-A2, l’évolution relative du débit moyen annuel calculé sous ce scénario sur l’ensemble des stations hydrométriques prises en compte sur le bassin, avec des disparités notables entre l’amont et l’aval du bassin. La Figure 14 présente les débits moyens mensuels calculés à la station hydrométrique de Poses (la plus en aval du bassin) sur les 20 années de simulation et pour l’ensemble des scénarios effectués ainsi que l’enveloppe des variations relatives calculées par rapport à la simulation de référence. L’ensemble des résultats obtenus selon les 4 scénarios de CC étudiés est détaillé en annexe, dans Viennot et al. (2004).

Ces résultats s’accordent avec ceux obtenus par le modèle CaB à partir des mêmes scénarios climatiques, avec notamment une intensification des contrastes saisonniers de débit de la Seine : étiages plus sévères en été et débit pouvant être nettement plus important en fin d’hiver (jusqu’à une augmentation maximale de près de 50% par rapport à l’actuel). MODCOU montre également que les variations de niveau piézométrique des nappes aquifères restent faibles (amplitude généralement inférieure à 2 mètres) excepté dans le cas du scénario ARPEGE-B2 qui montre localement des baisses plus importantes dans l’aquifère de la Craie.

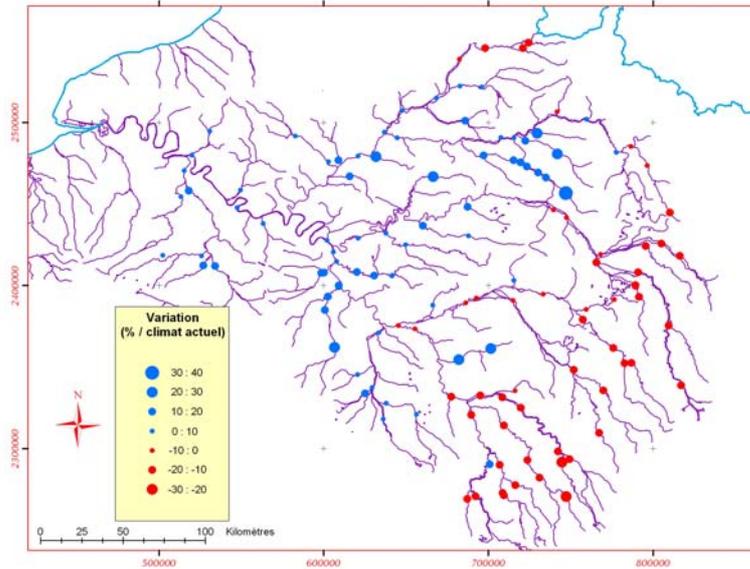


Figure 13 : Evolution du débit moyen annuel calculé sous scénario ARPEGE-A2

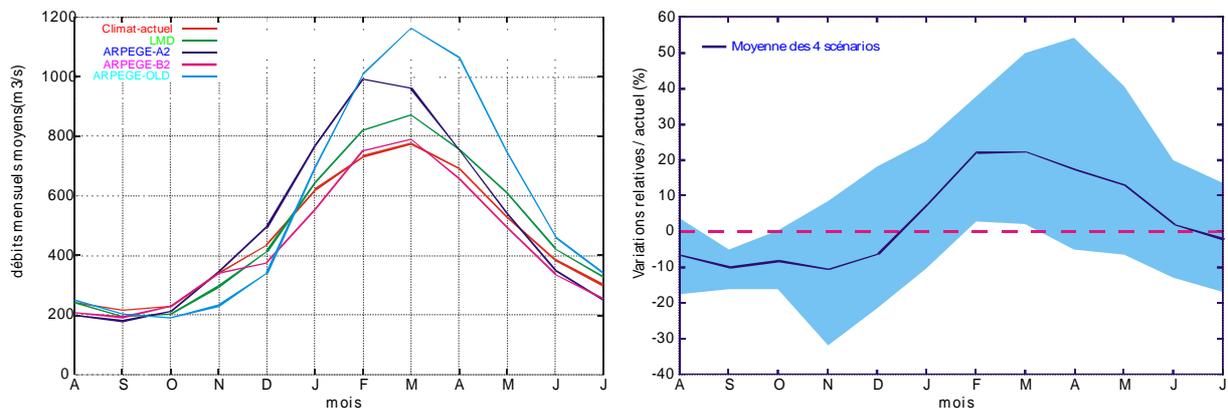


Figure 14 : Evolution mensuelle comparée du débit moyen de la Seine calculé à Poses et plage de variation relative par rapport au débit moyen actuel selon les 4 scénarios de CC étudiés.

5.1.4 Impact sur le système agricole actuel selon STICS

Résultats agricoles

Les simulations analysées ici sont menées avec l'agriculture actuelle du bassin de la Seine, et sous 4 scénarios climatiques : le scénario actuel, qui sert de référence, et les 3 scénarios de CC construits à partir des simulations ARPEGE (Tableau 4).

Le Tableau 9 met en évidence que les cultures actuellement présentes dans le bassin de la Seine seront moins risquées sous CC car l'élévation de température permet de réduire la durée effective du cycle, qui réussit alors beaucoup plus souvent à être inférieure à la durée maximale autorisée. Celle-ci est imposée par l'itinéraire technique de chaque culture, comme la différence entre la date de semis et une date de récolte butoir contrôlée par des considérations techniques (portance des sols pour les engins de récolte), phytosanitaires (risque de maladies fongiques), agricoles (implantation de la culture suivante) ou sociales (organisation des chantiers de récolte sur l'exploitation). Cette durée maximale peut être insuffisante pour permettre à la culture d'accomplir son cycle et aux grains d'assurer leur maturité complète, ce qu'exprime la notion de « non réussite », qui diminue fortement sous CC (Tableau 9).

Ainsi des cultures peu représentées comme le tournesol ou le maïs grain (l'essentiel du maïs est actuellement cultivé pour l'ensilage) pourraient se développer. En corollaire, les dates réelles de récolte seront avancées. Le modèle prédit une avance de 10 à 20 jours pour les cultures d'hiver et de printemps et de 20 à 35 jours pour les cultures d'été (selon les scénarios de CC). Même si ce décalage

n'autorise pas une culture commerciale supplémentaire, il peut faciliter l'implantation de cultures intermédiaires (CI) en augmentant la fenêtre calendaire disponible. Nous ne pouvons cependant pas exclure que cet impact positif puisse être remis en cause par un possible impact du CC sur les itinéraires techniques, ce que nous n'avons pas abordé. Par exemple, en cas d'augmentation importante des précipitations au moment du semis, celui-ci pourrait devoir être retardé pour assurer une portance suffisante pour les engins agricoles.

Tableau 9: Taux de réussite (1^{ère} colonne) et dates moyennes de récolte (2^{ème} colonne) des cultures. Les valeurs entre parenthèses indiquent le nombre de jours d'avance par rapport au climat actuel.

Culture	Actuel (365 ppm)		NEW B2 (610 ppm)		OLD (708 ppm)		NEW A2 (850 ppm)	
blé	96%	24/7	100%	11/7 (13)	100%	10/7 (14)	100%	4/7 (20)
colza	92%	15/7	100%	5/7 (10)	100%	3/7 (12)	100%	29/6 (17)
escourgeon	54%	15/7	94%	6/7 (10)	94%	5/7 (11)	100%	29/6 (16)
maïs	14%	15/10	76%	26/9 (19)	70%	29/9 (16)	98%	12/9 (33)
orge	74%	2/8	100%	22/7 (11)	100%	24/7 (9)	100%	16/7 (17)
pois	100%	20/7	100%	9/7 (10)	100%	8/7 (12)	100%	3/7 (17)
tournesol	25%	29/9	100%	6/9 (23)	94%	12/9 (17)	100%	23/8 (37)

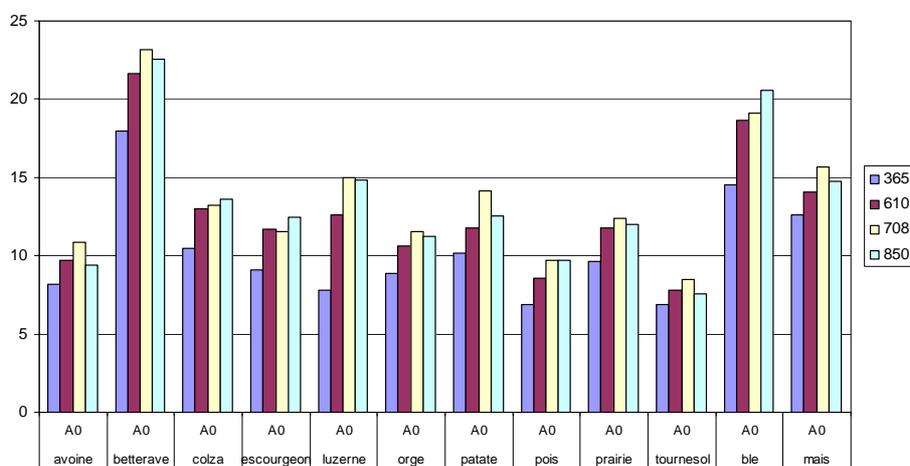


Figure 15 : Production totale de biomasse aérienne par culture (t MS ha⁻¹) sous les différents climats considérés : Actuel (365ppm), ARPEGE NEW B2 (610 ppm) et A2 (850 ppm), ARPEGE OLD (708 ppm).

Tableau 10 : Variations relatives de biomasse et rendement induites par le CC par rapport au climat actuel.

Culture	Biomasse			Rendement		
	NEW B2	OLD	NEW A2	NEW B2	OLD	NEW A2
betterave	20%	29%	26%	13%	16%	12%
blé	28%	31%	41%	21%	27%	29%
colza	24%	27%	30%	15%	22%	13%
escourgeon	28%	27%	37%	25%	27%	34%
maïs	12%	24%	17%	19%	34%	10%
orge	21%	30%	27%	-13%	12%	-30%
pomme de terre	15%	39%	23%	26%	41%	34%
pois	24%	41%	41%	13%	28%	25%
tournesol	13%	22%	10%	8%	20%	1%
Moyenne	21%	30%	28%	14%	25%	14%

En ce qui concerne la production végétale, le modèle STICS prévoit une augmentation de biomasse générale sous CC (Figure 15), qui recouvre bien sûr quelques disparités régionales. L'augmentation est de l'ordre de 20-30 % pour les cultures d'hiver et de printemps en C3, non légumineuses. Elle est plus faible pour le maïs (C4) et le tournesol à cause des fortes réductions de la durée des cycles. Les légumineuses (comme la luzerne) sont nettement avantagées car la fixation symbiotique de l'azote de l'air s'ajuste aux besoins en azote et permet de valoriser au maximum la fertilisation carbonée

atmosphérique, comme le montre l'augmentation de la quantité d'azote accumulé par la luzerne à la récolte, de 258 kg ha⁻¹ à l'actuel à 368 (NEW B2), 408 (OLD) et 536 (NEW A2). Une augmentation est aussi simulée pour le pois, mais dans une bien moindre mesure (de 182 kg ha⁻¹ à l'actuel à 225 sous scénario OLD). En plus de la teneur en CO₂, le comportement différentiel des scénarios de CC s'explique par les modifications de pluviométrie et température que nous retrouvons sur les données de bilan hydrique (Tableau 11). Ainsi le scénario ARPEGE OLD étant plus pluvieux, il avantage les cultures d'été et de printemps (maïs, pois, betterave, orge, pomme de terre).

Le rendement des cultures (grains ou produits récoltés) s'accroît également en moyenne, mais l'augmentation est inférieure à celle de la biomasse totale (Tableau 10). Les cultures réagissent différemment selon le positionnement des deux grandes phases du cycle (élaboration du nombre de grains et remplissage) par rapport aux modifications climatiques majeures. On peut même observer des diminutions pour l'orge, culture de printemps cultivée en conditions d'azote limitant. La contrainte hydrique en fin de cycle explique une part importante de ces résultats, par effet direct sur les plantes ou par induction d'une contrainte azotée liée à son indisponibilité dans le sol (le scénario « OLD » provoque moins de contrainte de fin de cycle).

Ces simulations ne prennent pas en compte les probables adaptations des décisions de l'agriculteur, en particulier en ce qui concerne la fertilisation azotée. Indépendamment des préoccupations environnementales ces ajustements ne seront pas faciles à cause de la sécheresse de fin de cycle qui rend indisponible l'azote du sol, même si celui-ci est présent de façon plus abondante à cause de l'augmentation de la minéralisation.

Résultats environnementaux

Rappelons que les résultats présentés concernent uniquement les zones cultivées; ils sont la moyenne arithmétique des résultats obtenus par zone, par succession culturale et par type de sol (la fréquence de chaque facteur est prise en compte dans l'étude spatialisée STICS/MODCOU/NEWSAM, section 5.1.5), et sont résumés en Tableau 11. Le modèle STICS simule de faibles modifications des flux d'eau sous l'effet du CC. Seul le scénario OLD, plus humide, conduit à un flux d'eau nettement accru sous la zone racinaire (appelé drainage). L'augmentation du drainage est plus forte que celle de la pluviométrie, car celle-ci est surtout accrue en période hivernale.

Tableau 11: Valeurs moyennes annuelles du bilan d'eau, du bilan d'azote, de la concentration nitrique de l'eau drainée en zone agricole et du stock de carbone organique du sol, simulés par STICS en fonction du climat.

		Actuel (365 ppm)	NEW B2 (610 ppm)	OLD (708 ppm)	NEW A2 (850 ppm)
Pluviométrie	mm/an	734	728	760	745
Evapotranspiration	mm/an	529	535	494	515
Drainage	mm/an	205	193	266	231
Minéralisation N sol	kg N ha ⁻¹	94	103	98	104
Lessivage N vers nappes	kg N ha ⁻¹	31	33	37	37
Concentration NO ₃	mg NO ₃ l ⁻¹	68	76	62	71
Stock de C	t C ha ⁻¹	48.7	47.4	47.6	47.6

La minéralisation nette annuelle d'azote par le sol augmente modérément sous l'effet du CC. Elle passe de 94 (actuel) à 104 kg ha⁻¹ an⁻¹ (NEW A2). La variation (+10%) est plus modérée que ce que l'on peut attendre du seul effet température (+32%) : le facteur compensateur est une plus forte production de biomasse, donc de résidus de culture enfouis au sol qui immobilisent de l'azote au cours de leur décomposition. Le lessivage de nitrate sous la zone racinaire est également favorisé par le CC: il passe de 31 à 37 kg ha⁻¹ an⁻¹. Ceci résulte à la fois d'une plus forte minéralisation de l'azote du sol, d'une plus forte quantité résiduelle d'azote minéral à la récolte et d'une période d'interculture un peu plus longue.

Le rapport entre le lessivage cumulé et le drainage cumulé donne la concentration nitrique moyenne de l'eau drainée, qui varie différemment selon le scénario climatique: elle augmente avec les scénarios B2 et A2, et diminue avec le scénario OLD. On voit qu'une plus forte pluviométrie entraîne une dilution de l'eau, qui fait plus que compenser l'augmentation liée à l'augmentation de température.

Le CC semble enfin avoir un effet négligeable sur le stockage de carbone dans le sol : le modèle prévoit seulement une faible diminution (-2%) du stock de carbone organique des sols. Ce résultat s'explique par une compensation entre une destruction plus importante du stock de C par minéralisation et une formation accrue d'humus liée aux plus fortes restitutions de résidus de culture.

5.1.5 Impact sur la pollution azotée des nappes selon STICS/MODCOU/ NEWSAM

Le principe général des simulations de pollution azotée est le suivant : dans la continuité du calcul d'initialisation en régime transitoire sur 50 ans (section 4.2.4) permettant de reproduire au mieux les concentrations mesurées dans les aquifères de l'année 2000 (« état zéro »), un calcul sur 150 ans supplémentaires est effectué en conservant les pratiques agricoles des années 1990 et en tenant compte du climat perturbé. Un calcul préalable sur 20 ans sous climat perturbé fournit des flux d'eau et de nitrates moyens interannuels qui sont ensuite introduits dans les nappes pendant un transitoire de 150 ans. Les résultats obtenus sont ensuite comparés à la simulation de référence qui suppose le maintien des flux initiaux (situation 2000) pendant 150 ans sous climat actuel.

Nous présentons à titre d'exemple les résultats de la simulation STICS/MODCOU/NEWSAM sous climat perturbé ARPEGE NEW A2, qui est très proche de la moyenne des 12 scénarios de CC (Figure 12). Cette analyse est cohérente avec celle des résultats obtenus dans les trois autres scénarios considérés (AREPEGE NEW B2 et OLD, LMD6 ; Viennot et al., 2004).

Le scénario de CC ARPEGE NEW A2 entraîne une augmentation généralisée des flux d'azote sous-racinaires simulés par STICS (par une minéralisation accrue de l'azote du sol), qui se répercute sur la concentration en nitrates de l'eau infiltrée vers les nappes (Figure 16). Dans ce scénario ARPEGE NEWA2, la concentration en nitrate des eaux d'infiltration devient ainsi supérieure à 50 mg/l sur la quasi-totalité du bassin.

Cette augmentation est modulée par la régionalisation en zones agricoles et par l'augmentation du drainage sous-racinaire, conséquence directe de l'augmentation de l'infiltration en période d'épandage des fertilisations azotées. En effet, les variations relatives les plus importantes sont obtenues dans les zones où les précipitations augmentent le plus en début d'année calendaire (plateaux normands à l'ouest, Argonne, dépression de l'Yonne et Morvan à l'est), qui sont aussi celles où les valeurs absolues sont les plus faibles. Cette simulation spatialisée confirme donc que l'augmentation du flux de nitrates sous-racinaire causé par le réchauffement climatique est modulée par les changements de pluviométrie qui accompagnent le CC et par l'activité agricole (section 5.1.4).

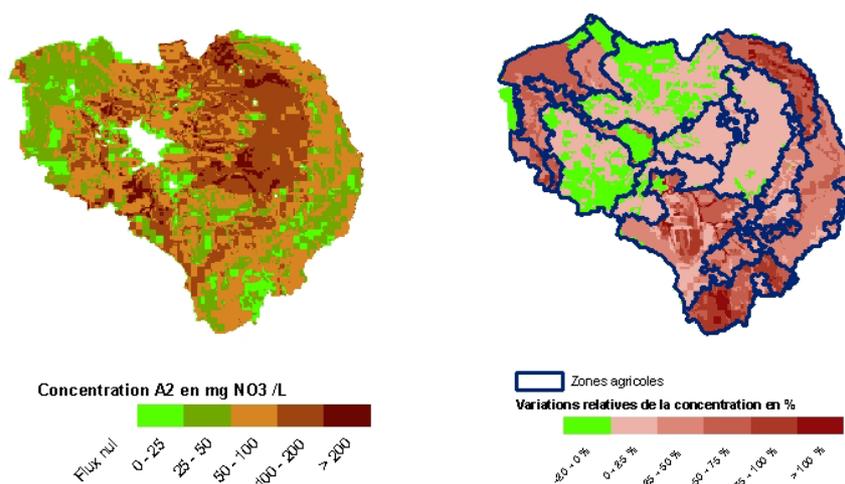


Figure 16 : Scénario ARPEGE-A2 : Carte des concentrations en nitrates à la base de la zone sous-racinaire ; les variations relatives sont rapportées à la simulation de référence sous climat actuel.

Il en résulte une augmentation générale de la concentration de nitrates dans les aquifères (Figure 17), qui s'intensifie avec le temps (2050 vs. 2100), et qui présente elle aussi d'importants contrastes régionaux. Ceux-ci sont liés aux contrastes des concentrations sous-racinaires et des flux associés, 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.

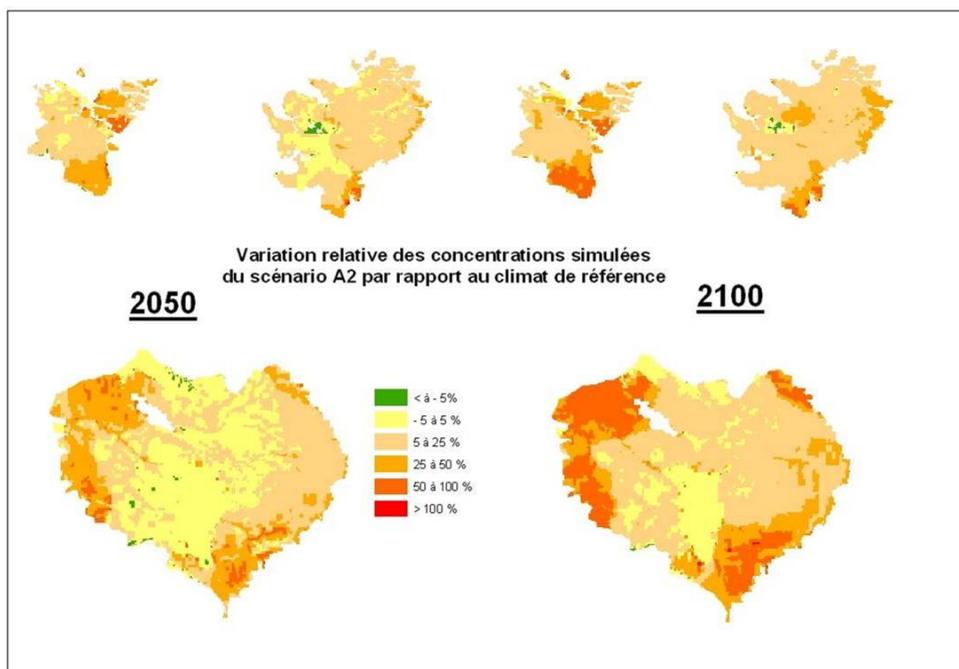


Figure 17 : Variations relatives des concentrations simulées sous scénario ARPEGE NEW A2 par rapport au climat de référence après 50 et 100 ans de simulation.

5.2. Prospective agricole : élaboration de scénarios agricoles à l'horizon 2050

L'approche adoptée ici vise à décrire les évolutions possibles, en tendances lourdes, de l'agriculture du bassin de la Seine à l'horizon 2050 et à les traduire en paramètres techniques précis permettant d'analyser et simuler (en ce qui concerne les flux de nitrates) l'impact du CC sur l'hydrosystème Seine sur la qualité des eaux.

La première phase d'analyse relative à la construction de scénarios agricoles a consisté à décliner cette problématique d'évolution à long terme de l'agriculture en fonction de facteurs climatiques et non climatiques à une échelle globale, appréhendant le bassin de la Seine comme un sous-ensemble géographique intégrant l'Europe et les relations internationales en particulier. Ce cadrage apparaissait justifié par le fait que l'agriculture du bassin est particulièrement ouverte sur les marchés européens et mondiaux et que son évolution dépend et dépendra fortement de celles qui conditionnent ces marchés.

La question centrale dans l'analyse des impacts croisés du CC et de l'agriculture est alors: dans quelle mesure le climat amplifie-t-il ou atténue-t-il les évolutions de l'agriculture en cours sur le bassin ? La section 5.1.4 a montré que l'effet du CC sur l'agriculture actuelle du bassin de la Seine est assez faible, et qu'il serait agronomique viable de maintenir sous CC toutes les cultures actuellement présentes. Le CC n'apparaît donc pas comme un facteur d'évolution économique de premier ordre pour l'agriculture du bassin. Plus précisément, il ne semble pas de nature à impacter directement le champ des possibles des systèmes de production à l'échelle du bassin.

Ce résultat nous a amené à construire des scénarios qui reposent sur d'autres prémisses que ceux du CC et considèrent que :

1. Le CC, du fait des impacts sur la production qu'il peut avoir dans d'autres grandes régions de production agricole aura des impacts indirects sur l'agriculture du bassin de par la modification des marchés agricoles mondiaux qui en résultera (Fischer et al., 2002).
2. Il peut également avoir un impact considérant les politiques publiques et engagements internationaux qui peuvent être pris au plan international.
3. Mais, d'autres considérants non liés au CC continueront d'agir de manière centrale.

L'ensemble de ces points peut être mis en liaison avec les analyses développées par le *Global Scenario Group* (Gallopain et al., 1997) et reprises dans les travaux du SRES. Ainsi, les grandes

hypothèses de cadrage des scénarios agricoles recourent celles qui ont alimenté les scénarios d'émissions (A1, A2, B1, B2).

L'approche retenue pour construire les scénarios de cadrage a consisté à croiser deux ordres de variables, (1) économiques (céréalisation et bioénergie, diversification...) et (2) environnementales (agriculture raisonnée, de conservation...voir définitions en annexe 9.1). Ces variables ont été restituées dans un cadre d'analyse plus large, distinguant des facteurs d'évolution agricoles et non agricoles et ceux dépendant du CC ou non.

Six scénarios de cadrage ont ainsi été déclinés et décrits à l'échelle globale, considérant le bassin de la Seine comme une entité (Tableau 12). Ils font ressortir des enjeux d'évolution contrastés en termes politiques, économiques et sociaux (Poux et Olive, 2003).

Tableau 12 : Scénarios de cadrage retenus pour la prospective agricole du bassin de la Seine.

	Agriculture raisonnée	Agriculture de conservation	Infrastructures écologiques
Céréalisation et bioénergie (céréales et oléagineux)	Scénario 1 : « produire des molécules » [proche A2 (A1) SRES]	Scénario 2 : « Le Middle-West » [proche A1 (A2) SRES]	Non traité
Diversification par les cultures industrielles	Scénario 3 : « Maintien d'une valeur ajoutée professionnelle » [proche A2 SRES]	Non traité	Scénario 4 : « Partage dual du territoire » [proche A2 (A1) SRES]
Agriculture biologique à grande échelle	Scénario 5 : « Agriculture biologique industrielle » [proche B1 (A2) SRES]	Non traité	Scénario 6 : « Agriculture biologique locale » [proche B2 SRES]

La deuxième phase du travail de construction des scénarios fut de décliner ces scénarios macro-économiques dans chacune des 12 zones décrites en section 4.3.2, en termes de variables d'entrée agronomiques du modèle STICS : successions culturales mises en œuvre, et séquences techniques pour chaque culture présente dans ces successions.

Nous nous sommes appuyés sur un modèle général des relations entre les facteurs d'évolution de l'agriculture au sein de l'hydrosystème Seine (Figure 18) pour décliner les scénarios de cadrage en scénarios agricoles du bassin. Le résultat est illustré par le Tableau 13, qui résume les principales hypothèses retenues à l'échelle du bassin, au regard de leur pertinence pour les problématiques de gestion de l'hydrosystème.

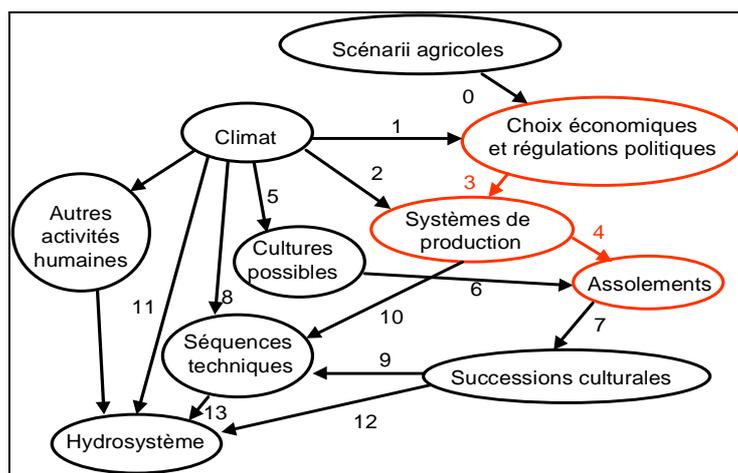


Figure 18 : Modèle général des relations entre objets de recherche de la prospective.

Tableau 13 : Déclinaison des hypothèses des scénarios de cadrage pour les systèmes agricoles du bassin

Scénario	Hypothèses générales
1	Le bassin pousse ses avantages comparatifs en matière pédo-climatique Les céréales constituent la grande majorité de l'assolement. Oléagineux pour filière biocarburants Protéines importées des Etats-Unis. Élevage en grande partie hors-sol valorisant biomasse La SAU du bassin diminue.
2	Idem scénario 1 + hypothèse de conversion progressive des exploitations à une agriculture de conservation. L'élevage de volailles développé près des zones portuaires. La SAU du bassin diminue.
3	Le bassin de la Seine pousse la diversité des terroirs et les organisations professionnelles. Élevages très présents et menés industriellement. L'élevage laitier s'intensifie (disparition des quotas laitiers) et la viande ne trouve pas de débouchés à la consommation, l'élevage allaitant extensif est relancé. Les régions sans avantage comparatif sur les cultures à forte valeur ajoutée s'orientent vers les productions de masse avec des cultures céréalières, ou oléoprotéagineuses. Le foncier dans cette région devient très cher et représente un enjeu pour la régionalisation des activités agricoles.
4	Idem scénario 3 mais partage du territoire dual : d'un côté développement des cultures et des animaux, de l'autre « surfaces de compensation écologiques » pour limiter les impacts de l'agriculture (cf. approche USA).
5	Développement d'une agriculture biologique gérée industriellement, le machinisme est très développé. Les systèmes développés sont très diversifiés même si les céréales dominent. Le maraîchage connaît un grand déploiement. Consommation vers les viandes blanches, et développement d'élevages laitiers extensifs fournissent une viande de bonne qualité. Terres agricoles très rares, les surfaces sont uniquement destinées à la production alimentaire.
6	Conditions de productions plus strictes que dans le scénario précédent dans des cahiers des charges de l'agriculture biologique. La fertilisation des cultures doit être assurée par les assolements de légumineuses, du compost certifié ou les déjections animales. La complémentarité culture/ élevage est donc encouragée. Cette conversion préserve néanmoins les importantes différences régionales liées aux conditions pédoclimatiques et économiques.

Les tendances lourdes de l'agriculture décrites dans ce tableau ont alors été utilisées pour faire varier quantitativement les paramètres socio-économiques caractérisant les 12 zones agricoles du bassin de la Seine en 2000. Pour chacune de ces zones et pour chacun des scénarios, nous avons donc obtenu un nouveau jeu de données issues des hypothèses d'évolution du scénario et décrivant en 2050 (1) la nouvelle répartition des OTEX au sein du bassin, (2) la nouvelle combinaison des ateliers au sein des OTEX (Tableau 14).

Chacune de ces zones étant alors décrite par un certain nombre de paramètres socio-économiques en 2050, la dernière étape fut de dériver les paramètres techniques (successions culturales, séquences techniques) utilisables par le modèle STICS. Car en terme de simulation de l'impact des scénarios agricoles sur la qualité de l'hydrosystème de la Seine, ce sont les successions culturales (déterminées par l'assolement) et les séquences techniques (travail du sol, fertilisation, date de semis...) qui leur sont associées qui seront utilisées par les modèles.

Ce travail s'est déroulé en deux étapes :

- élaborer les successions qui seraient pratiquées par scénarios et par grande région, en recherchant les cohérences techniques : temps de retour des cultures sur elles-mêmes, alimentation des cheptels présents, etc.
- pour chaque culture de la succession, construire la séquence technique correspondante : celles-ci sont considérées comme influencées à la fois par les scénarios macro-économiques (par le biais de l'orientation des systèmes de production) et par les scénarios climatiques. Les travaux du sol, par exemple, peuvent être modifiés à la fois pour des raisons économiques (non-labour pour économiser du carburant) ou pour des raisons climatiques (décaler les dates de semis pour faciliter les travaux d'implantation). Nous avons donc construit ces séquences techniques en recherchant les cohérences techniques propres à chaque scénario (exemple : aucun intrant de synthèse en scénario Bio), les cohérences internes aux systèmes de production (exemple : épandage des effluents de volailles), et les modifications climatiques possibles.

Tableau 14 : Hypothèses d'évolution des systèmes de production sous trois scénarios (1, 3, 6).
 Abréviations : Bett : betterave ; Oprot : oléoprotéagineux ; CI : cultures industrielles ; Four.Cult. :
 Cultures fourragères ; B : bovins ; VA : vache allaitante ; VL : vache laitière

	OTEX	Zones	SAU	assolement	cheptel
Scénario 1	Céréales et oléagineux	tout le bassin	400 à 700 ha (selon zones)	zones bet.: 60% céréales; 20% Oprot; 20% bett. autres zones: 80% céréales; 20% Oprot	
	Bovins viande	1,2,3,10,11	300 à 400 ha (selon zones)	100% STH	petite str. : 300 Bovins 10,11 grande str. 360 Bovins : 1,2,3
	Grandes cultures et granivores	3,4,6,9,10,11	400 à 700 ha (selon zones)	80% céréales; 20% Oprot	230000 Volailles
	Viticulture d'appellation	7	20ha	100% culture permanentes	
Scénario 3	Bovins lait	1,2,5,10,11	160 à 200 ha (selon zones)	Variable selon structure et intensité : grandes structures avec davantage de maïs ensilage et fraction céréales plus élevée	125 bovins dont 100 VL
	Grandes cultures et herbivores	2,3,4,5,6,8,9,10,11	200 à 250 ha (selon zones)	même logique que supra, mais selon des modalités différentes	125 bovins dont 100 VL
	Céréales et oléagineux	tout le bassin	400 à 700 ha (selon zones)	80% céréales; 20% Oprot	
	Bovins viande	1,2,3,10,11	300 à 400 ha (selon zones)	100% STH	petite str. : 300 B 10,11 grande str. 360 B : 1,2,3
	Cultures générales	4,5,6,7,8,9,10,12	300 à 600 ha (selon zones, sauf proche Paris 100 ha)	Equilibre variable entre céréales et cultures industrielles	
	Grandes cultures et granivores	3,4,6,9,10,11	400 à 700 ha (selon zones)	80% céréales; 20% Oprot	230000 Volailles
	Viticulture d'appellation	7	20ha	100% culture permanentes	
Scénario 6	Grandes cultures et granivores	3,4,6,8,9,10,11	300ha	50% céréales; 38% prot; 12% CI	200000 Volailles
	Herbivores	1,2,3,5,10,11	400ha	100% STH	180 bovins (90 VA) ou 1200 ovins
	Élevage polyculture	tout le bassin	200ha	17% céréales; 25% Oprot; 8% Four.Cult.; 50% STH	100 bovins dont 80 VL
	Légumes plein champs et granivores	4,6,8,9	50ha	100% maraichage plein champs	12000 porcs ou 120000 volailles
	Grandes cultures	6,8	300ha	50% céréales; 35% Oprot; 15% CI	
	Viticulture d'appellation	7	20ha	100% culture permanentes	

5.3. Prospective agricole simplifiée : scénario « Agriculture raisonnée »

Bien que particulièrement intéressants, les scénarios ci-dessus se sont avérés trop complexes pour pouvoir être simulés par le modèle STICS, dans sa version actuelle. Nous proposons un scénario plus simple d'évolution de l'agriculture, le scénario « Agriculture raisonnée » (AR). C'est un scénario d'évolution tendancielle, qui préserve les successions culturales actuelles, mais introduit des pratiques plus respectueuses de l'environnement qu'à l'actuel, dans la logique du décret de janvier 2004 sur l'agriculture raisonnée.

5.3.1 Impacts agro-environnementaux selon STICS

Ce scénario fut décliné de la façon suivante pour STICS « 12 zones » : réduction de la fertilisation azotée (-20%) et introduction de cultures intermédiaires pour limiter les fuites de nitrate en hiver. Elles sont implantées lorsque le semis est possible avant le 5 septembre et qu'une durée minimale de 50 jours est possible. Elles sont détruites à la fin novembre. Avec ces contraintes, la fréquence des cultures intermédiaires dans le scénario AR est de 27% (soit en moyenne une année sur 4).

Tableau 15 : Biomasse produite et quantité d'azote prélevée par les cultures intermédiaires avec le scénario agricole "raisonné" (AR) en fonction du climat.

Scénario agricole	Biomasse (t MS ha ⁻¹)				N prélevé (kg N ha ⁻¹)			
	Climat actuel	Climat NEW B2	Climat OLD	Climat NEWA2	Climat actuel	Climat NEW B2	Climat OLD	Climat NEWA2
AR	1.5	2.9	2.8	1.9	57	87	84	54

Tableau 16 : Biomasse et rendement simulés pour les cultures principales (moyenne de toutes les cultures) en croisant les scénarios climatique et agricoles.

Scénario agricole	Biomasse (t MS ha ⁻¹)				Rendement (t MS ha ⁻¹)			
	Climat actuel	Climat NEW B2	Climat OLD	Climat NEWA2	Climat actuel	Climat NEW B2	Climat OLD	Climat NEWA2
Actuel	11.0	14.0	14.5	15.2	5.84	7.08	7.60	7.53
AR	10.6	13.4	13.9	14.6	5.56	6.62	7.09	7.05
AR/Actuel	-4%	-4%	-4%	-4%	-5%	-6%	-7%	-6%

Tableau 17 : Quantité d'azote lessivé vers les nappes et concentration moyenne de l'eau drainée en croisant les scénarios climatique et agricoles.

Scénario agricole	N lessivé (kg N ha ⁻¹)				Concentration de l'eau (mg NO ₃ l ⁻¹)			
	Climat actuel	Climat NEW B2	Climat OLD	Climat NEWA2	Climat actuel	Climat NEW B2	Climat OLD	Climat NEWA2
Actuel	31.3	33.0	37.3	37.1	68	76	62	71
AR	21.4	23.7	26.7	25.8	46	54	44	49
AR/Actuel	-32%	-28%	-28%	-31%	-32%	-28%	-28%	-31%

Les impacts agro-environnementaux de ce scénario ont été simulés grâce au modèle STICS spatialisé en 12 zones (sections 4.2.2 et 5.1.4). La réussite des cultures intermédiaires est évaluée au Tableau 15. Leur biomasse simulée sous climat actuel (1.5 t MS ha⁻¹, en matière sèche MS) est un peu plus forte que ce qui peut être observé chez des agriculteurs volontaires (Beaudoin *et al.*, 2004b), mais reste tout à fait atteignable. Le CC stimule fortement leur croissance et leur prélèvement d'azote.

Le scénario AR entraîne une légère réduction du niveau de production agricole (Tableau 16), qui s'explique essentiellement par la réduction de la fertilisation azotée. La biomasse totale produite, toutes cultures confondues, diminue de 4%, et le rendement diminue de 6%. Cette réduction est faible, bien que non négligeable pour le revenu agricole. Elle est en accord avec les observations faites à Bruyères (Beaudoin *et al.*, 2004b).

Le scénario AR présente un réel intérêt du point de vue environnemental, car il permet de réduire notablement la quantité de nitrate lessivée sous la zone racinaire (Tableau 17). Il n'affecte pas la quantité d'eau drainée, car la production végétale reste limitée. Il permet donc de réduire très significativement la concentration nitrique moyenne de l'eau drainée, de 28 à 32% selon le climat considéré, et d'obtenir une concentration inférieure à la norme (50 mg l⁻¹) en zone cultivée. On constate aussi que le bénéfice de ces pratiques varie selon les zones: il est d'autant plus grand que la concentration résultant des pratiques conventionnelles est plus forte. Ces résultats sont cohérents avec les mesures et simulations faites à Bruyères (Beaudoin *et al.*, 2002, 2004b), en Champagne (Mary *et al.*, 2002) ou en Picardie (Normand *et al.*, 2004). Le Tableau 17 montre enfin que l'agriculture « raisonnée » entraîne une baisse de la teneur en nitrates dans l'eau drainée vers les nappes et du flux associé (variable de couplage avec le modèle MODCOU/NEWSAM) nettement plus importante que l'augmentation de ces termes par le CC, sans interaction entre ces facteurs.

5.3.2 Impacts sur la teneur en nitrates des aquifères

Le scénario d'agriculture raisonnée fut aussi intégré dans la chaîne de modélisation spatialisée STICS/MODCOU/NEWSAM, selon le principe suivant :

- diminution systématique de 20% des fumures azotées minérales sur l'ensemble des cultures présentes dans les successions agricoles du bassin ;
- ajout d'une culture intermédiaire (moutarde) dans les successions dès lors que ces dernières disposent d'un laps de temps inter-cultures disponible en sol nu de plus de 50 jours. Le semis

de la culture intermédiaire est alors effectué dès le lendemain de la récolte de la culture qui précède et sa destruction la veille du semis de la culture suivante.

La simulation est menée selon le principe décrit en section 5.1.5, sur 150 ans à partir des concentrations en nitrates des aquifères de l'« état zéro » (section 4.2.4). Les pratiques sont celles du scénario d'agriculture raisonnée ci-dessus, et le climat dérive du climat actuel par enchaînement de séquences de 20 ans (données SAFRAN 1970-1989). Les résultats sont ensuite comparés à la simulation de référence (section 5.1.5) sous climat et pratiques agricoles actuels.

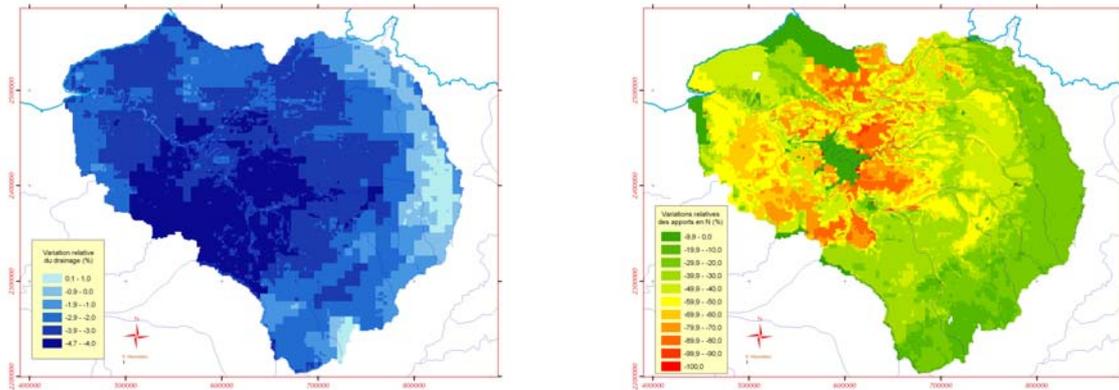


Figure 19 : Variation relative des flux d'eau drainés vers les nappes et des flux de nitrates : rapport agriculture raisonnée / agriculture actuelle, sous climat actuel (moyenne sur 1970-1989).

La Figure 19 présente l'influence relative de ce scénario sur les résultats obtenus, sous climat actuel, en terme de flux d'eau et d'azote moyens annuels vers les nappes. On remarque une modification très faible des quantités d'eau drainée. En effet, deux effets se contrebalancent : la présence d'une culture intermédiaire favorise la rétention d'azote dans le sol, et accroît donc le rendement des cultures suivantes, qui absorbent donc plus d'eau, ce qui limite le drainage ; la diminution des fumures azotées tend au contraire à limiter les rendements et favorise donc le drainage. Elle limite en revanche les flux d'azote vers les nappes, et donc la concentration en nitrates des eaux d'infiltration.

En conséquence, le scénario d'agriculture raisonnée entraîne une diminution de la concentration en nitrates dans les aquifères modélisés, pouvant atteindre plus de 50% en 2100 par rapport à la simulation de référence sans modification des pratiques agricoles (les deux simulations comparées sont conduites jusqu'en 2100 sous scénario climatique actuel). A titre d'exemple, la Figure 20 présente les résultats calculés à l'horizon 2100 dans la nappe de la Craie. L'ensemble des résultats simulés est présenté dans Viennot et al. (2004).

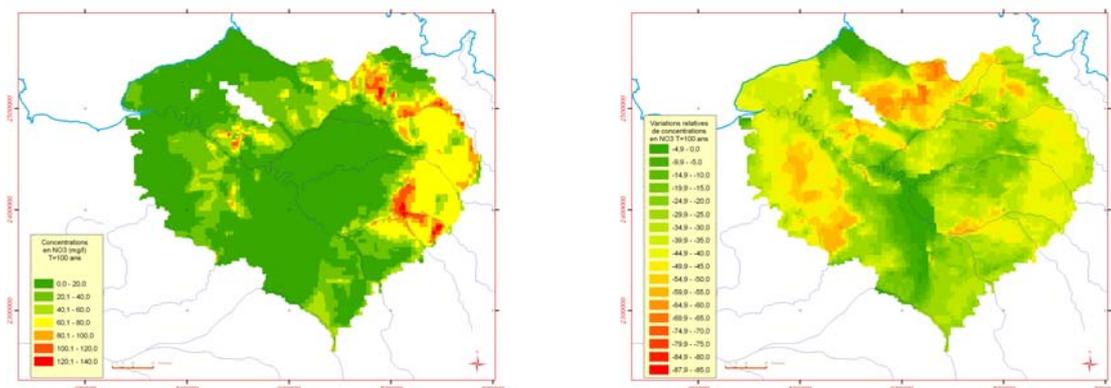


Figure 20 : Concentration en nitrates simulée dans la nappe de la Craie à l'horizon 2100 par STICS/MODCOU/NEWSAM sous agriculture raisonnée et poursuite du climat actuel ; valeurs absolues (à gauche), variations relatives par rapport à la simulation de référence sous climat et pratiques agricoles actuelles (à droite).

5.3.3 Impacts croisés à ceux du CC sur la teneur en nitrates des aquifères

Le scénario d'agriculture raisonnée présenté au paragraphe précédent est ici croisé au scénario de CC ARPEGE-A2 (par enchaînement sur 150 ans de séquences de données météorologiques 1970-1989 perturbées). Les résultats sont toujours comparés en 2100 à la même simulation de référence, sous climat et pratiques agricoles actuels.

Le scénario d'agriculture raisonnée sous climat actuel entraîne une diminution sensible et générale des flux et concentrations en nitrate sous racinaire, plus marquée au centre du bassin, alors que le scénario de CC sous pratiques actuelles entraîne une augmentation de ces termes, plus marquée en bordure du bassin. L'impact du croisement des 2 scénarios de changement (agriculture raisonnée et CC) se déduit des précédents, la concentration en nitrates de l'eau drainée vers les nappes augmentant en bordure de bassin et diminuant au centre, avec des amplitudes moindres que celles résultant de chaque changement pris isolément (Figure 21). Ces disparités géographiques se retrouvent dans les concentrations calculées dans les aquifères à l'horizon 2100 comme l'illustre l'exemple de l'aquifère de la Craie (Figure 22).

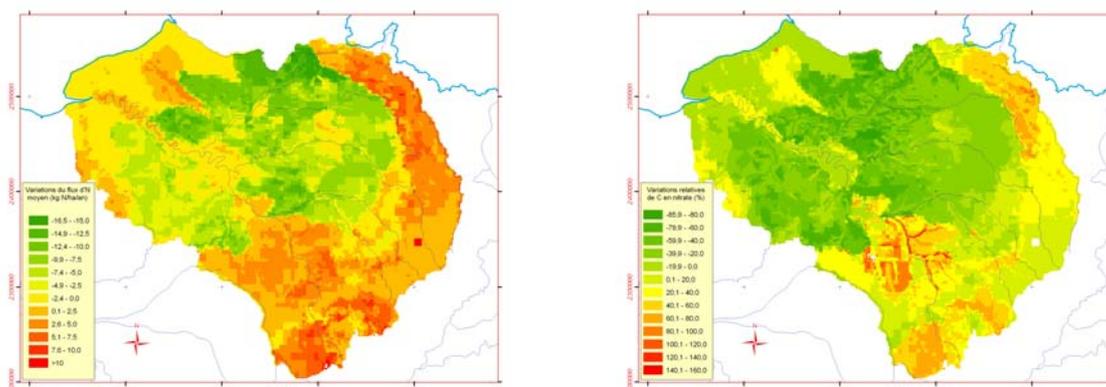


Figure 21 : Croisement des scénarios « agriculture raisonnée » et ARPEGE NEW A2 : variations absolues des flux de nitrates sous racinaire (à gauche) et relatives des concentrations en nitrates dans les eaux d'infiltration (à droite), par rapport à la simulation de référence.

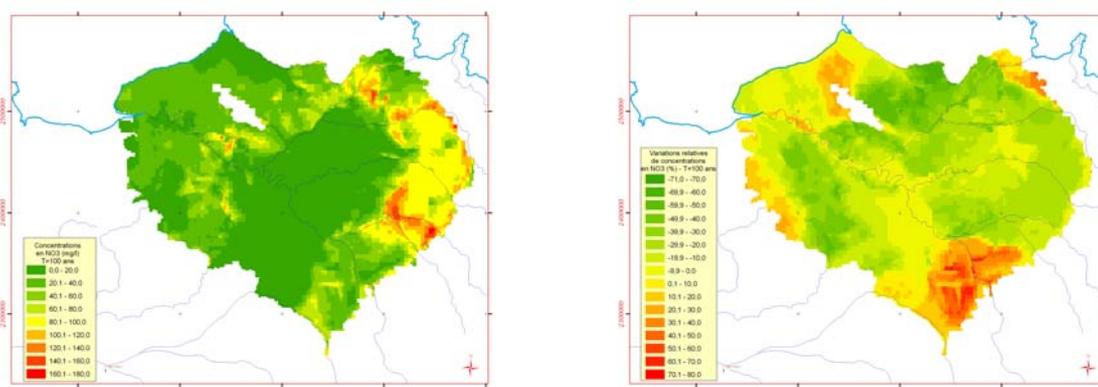


Figure 22 : Impact croisé des scénarios « agriculture raisonnée » et ARPEGE NEW A2 sur la nappe de la Craie : concentrations en nitrate calculés à l'horizon 2100 et leurs variations relatives par rapport à la simulation de référence (climat et pratiques agricoles actuels).

Ces résultats montrent que le CC, appréhendé ici grâce au scénario ARPEGE NEW A2 (dont l'impact sur les écoulements est représentatif de l'impact moyen des 12 scénarios de CC) limite fortement l'impact bénéfique de l'agriculture raisonnée sur la pollution azotée des aquifères du bassin.

Ce résultat est confirmé par le Tableau 18 qui résume l'ensemble des simulations STICS/MODCOU/NEWSAM de la contamination des nappes en nitrates. Il montre que, si le climat reste inchangé, la mise en place de l'agriculture raisonnée dès aujourd'hui permet un *statu quo* de la teneur en nitrates à l'horizon 2100, mais que cet effet est fortement contrecarré par le CC. Nous n'avons réalisé qu'une simulation croisée de l'agriculture raisonnée et du CC, sous scénario ARPEGE NEW A2. Les effets opposés du CC et de l'agriculture raisonnée s'additionnant dans ce cas, on peut postuler que seuls les

scénarios ARPEGE NEW B2 (avec de faibles changements de pluviométrie à l'échelle mensuelle) et LMD6 (faible réchauffement) permettraient à l'effet bénéfique de l'agriculture raisonnée de s'exprimer à l'horizon 2100.

L'impact du CC sur la concentration en nitrates est finalement beaucoup plus marqué dans les nappes que dans les eaux d'infiltration, comme le montre par exemple la comparaison du Tableau 18 avec le Tableau 17, qui présente une synthèse analogue sur les concentrations des ces dernières simulées par STICS « 12 zones ». Ceci peut s'expliquer par la spatialisation plus fine de la variabilité des précipitations et des sols dans STICS/MODCOU/NEWSAM, et par l'inertie des nappes et de la zone non saturée.

Tableau 18 : Synthèse des simulations STICS/MODCOU/NEWSAM en terme de pollution nitrique des aquifères. Les résultats sont relatifs aux aquifères modélisés les plus proches de la surface et donc les plus accessibles par forage (Craie sauf où recouvert par Eocène sauf où recouvert par Oligocène). Les chiffres en italiques sont les différences avec la simulation de référence.

Simulations STICS/MODCOU/ NEWSAM	Caractéristiques des simulations			Concentration moyenne en nitrates (mg/l)	Fraction (%) où la concentration dépasse 50mg/l		
	climat	agriculture	horizon				
« Etat zéro »	Actuel	Actuelle	2000	39	<i>-21</i>	30	<i>-18</i>
Référence	Actuel	Actuelle	2100	60	-	48	-
CC A2	ARP NEW A2	Actuelle	2100	77	<i>+17</i>	65	<i>+17</i>
CC B2	ARP NEW B2	Actuelle	2100	67	<i>+7</i>	57	<i>+9</i>
CC OLD	ARPEGE OLD	Actuelle	2100	80	<i>+20</i>	65	<i>+17</i>
CC LMD6	LMD6	Actuelle	2100	60	<i>+0</i>	48	<i>+0</i>
AR	Actuel	Raisonnée	2100	38	<i>-22</i>	28	<i>-20</i>
AR + CC A2	ARP NEW A2	Raisonnée	2100	53	<i>-7</i>	47	<i>-1</i>

5.4. Impacts croisés sur la qualité des cours d'eau

Cette partie repose sur le modèle Riverstrahler (section 4.2.5), qui permet d'intégrer le croisement des changements de climat, de pratiques agricoles, et ceux des apports ponctuels à l'hydrosystème, à travers leur impact sur la qualité biogéochimique de la Seine. Il est important de noter que notre objectif n'est pas ici de tendre vers une projection réaliste du devenir du bassin de la Seine. Tout au plus pourrions nous prétendre avoir défini des possibles raisonnables. Mais ce qui nous intéresse particulièrement à travers cette étude, c'est de pouvoir cerner l'importance qualitative du CC, en plaçant son impact en perspective de celui d'autres changements attendus dans le bassin.

5.4.1 Scénarios de rejets ponctuels à l'horizon 2050

Les scénarios de contraintes anthropiques non agricoles en 2050 ont pour objet de fournir les données de rejets ponctuels nécessaires en entrée du modèle Riverstrahler. Ce travail est détaillé dans deux rapports de recherche (Abu Alkhair, 2003; Kieken and Abu Alkhair, 2004).

Tableau 19 : Principaux déterminants des rejets ponctuels de pollutions.

Type de pollutions	Déterminants (facteurs explicatifs)
Pollutions domestiques	Démographie spatialisée Pollution unitaire (inclus type d'habitats) Technologies d'épuration Taux de raccordement à l'épuration
Pollutions industrielles	Pollutions unitaires par industrie Croissance des secteurs industriels Mobilité géographique des industries Technologie de dépollution

Cadre méthodologique

Pour construire des scénarios de pollutions ponctuelles domestiques et industrielles, nous avons retenu les déterminants détaillés en Tableau 19. Le cadre méthodologique que nous avons développé repose sur la combinaison d'hypothèses d'évolutions de ces "déterminants" qui soient compatibles avec les hypothèses des scénarios SRES. L'approche retenue pour la construction des scénarios de rejets en

2050 repose sur une analyse différentielle des facteurs qui composent les niveaux de pollutions (i.e. évolution 2000-2050). Le choix de ces hypothèses repose sur une revue bibliographique de perspectives thématiques (ex. démographie, techniques d'épuration, etc.) et des interviews d'experts.

Rejets ponctuels de pollutions domestiques

Les scénarios de rejets ponctuels domestiques en 2050 reposent sur les hypothèses suivantes :

- Les données démographiques sont issues de projections INSEE pour les périodes 2000-2030 et 2000-2050 (section 4.4.3), mises en cohérence avec les hypothèses démographiques des scénarios SRES ;
- Les rejets unitaires par habitants ont été supposés inchangés entre 2000 et 2050 ;
- Les évolutions prospectives des taux de raccordement ont été construites en distinguant les zones à faible et forte densité humaine, et en intégrant des hypothèses contrastées sur l'ampleur des investissements futurs - hypothèses compatibles avec les scénarios SRES
- Les progrès technologiques en matière d'épuration ont été étudiés par types de polluants. Trois types de scénarios ont été considérés, correspondant à des hypothèses de « basse », « moyenne » et « haute technologie » - scénarios compatibles avec, respectivement, les scénarios A2, B2 et A1/B1 du SRES. A l'échelle du bassin versant, deux types de zones ont été distingués, avec des taux d'épuration supérieurs dans les zones "sensibles", définies par le SDAGE (Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux) du bassin Seine-Normandie.

Rejets ponctuels de pollutions industriels

Les prospectives de rejets industriels sont sensiblement plus complexes à construire que les projections de rejets domestiques. Les projections de la "démographie" et de la "localisation" des activités industrielles dans 50 ans sont inexistantes. La prise en compte des nouvelles activités industrielles qui émergeront nécessairement dans les 5 prochaines décennies est par ailleurs extrêmement complexe. Pour contourner ces difficultés, nous avons adopté une alternative visant à décrire trois scénarios contrastés de rejets de pollutions bruts, basés sur les hypothèses suivantes, en partie arbitraires :

- a) Disparition de certains secteurs industriels (traduisant les effets combinés des délocalisations internationales et des migrations des industries vers les zones côtières en Europe).
- b) Rejets de pollutions bruts des autres secteurs industriels inchangés (la tendance actuelle est une baisse modérée des rejets, mais les réductions fortes et contrastées résultant de a) « disparition de secteurs » font que d'autres hypothèses pour b) seraient de second ordre).
- c) Du point de vue des technologies d'épuration, trois types d'hypothèses ont été retenus, correspondant à des scénarios de "haute", "moyenne" et "basse technologies". Comme dans le cas des pollutions domestiques, des contraintes supplémentaires ont été intégrées dans les zones dites "sensibles".

A nouveau, les combinaisons retenues d'hypothèses technologiques et de fermeture de secteurs industriels ont été guidées par le souci de cohérence avec les scénarios du SRES.

Synthèse des rejets ponctuels de pollutions en 2050

Tableau 20 : Rejets totaux de pollutions en 2050

Polluants	Rejets 2000*	Rejets 2050					
		Basse Technologie (SRES A2)		Moyenne Technologie (SRES B2)		Haute Technologie (SRES A1/B1)	
MES	346 595	549 518	58,5%	240 590	-30,6%	28 579	-91,8%
MO	382 477	488 997	27,8%	206 856	-45,9%	28 801	-92,5%
Azote	110 490	58 550	-47,0%	26 904	-75,7%	3 402	-96,9%
Phosphore	24 095	19 087	-20,8%	8 557	-64,5%	654	-97,3%

Le Tableau 20 présente les résultats des trois scénarios de rejets totaux (industriels et domestiques) en 2050, agrégés à l'échelle du bassin versant. L'analyse de sensibilité des résultats montre que :

- Au niveau du bassin versant, le paramètre le plus sensible est le paramètre de progrès des technologies d'épuration pour 2050 ;
- Au niveau local, les variations démographiques et/ou de fermeture de sites industriels peuvent également jouer des rôles très significatifs.

5.4.2 Description des simulations Riverstrahler

Les différentes simulations Riverstrahler réalisées pour évaluer la part relative des différents facteurs d'évolution de l'hydrosystème Seine (CC, évolution des pratiques agricoles et des rejets ponctuels) sont présentées dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Description des 31 simulations Riverstrahler réalisées dans le cadre du projet GICC-Seine. Pour une lecture simplifiée, les simulations sont regroupées en familles. Les cases jaunes indiquent les facteurs de différence au sein de chaque famille, dont on analyse l'impact par comparaison avec une simulation de référence judicieusement choisie.

Simulations Riverstrahler	Ecoulements simulés sous scénario climatique :	Apports diffus en nitrates simulés sous scénarios			Scénario d'apports ponctuels	Variation de Température de l'eau
		climatique	agricole	horizon		
Validation et impact de l'évolution récente des rejets ponctuels						
modapp91	Actuel	Actuel	Actuel	2000 *	1991	0
modapp00	Actuel	Actuel	Actuel	2000 *	2000	0
Effet de l'inertie des nappes via les apports diffus en nitrates						
ref2000	Actuel	Actuel	Actuel	2000 *	2000	0
ref2100	Actuel	Actuel	Actuel	2100	2000	0
Impact des scénarios prospectifs sur les rejets ponctuels						
2100caBT	Actuel	Actuel	Actuel	2100	2050 BT	0
2100caMT	Actuel	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	0
2100caHT	Actuel	Actuel	Actuel	2100	2050 HT	0
Impact du CC via les écoulements et la température de l'eau (apports diffus non influencés)						
2100ca_a2MT	ARP NEW A2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+3.3
2100ca_b2MT	ARP NEW B2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+2.1
2100ca_oldMT	ARPEGE OLD	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+2.0
2100ca_lmdMT	LMD6	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+1.65
2100ca_ca2MT	CCCma A2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+3.1
2100ca_cb2MT	CCCma B2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+2.35
2100ca_ga2MT	GFDL A2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+3.85
2100ca_gb2MT	GFDL B2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+2.95
2100ca_ha2MT	HadCM3 A2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+4.1
2100ca_ha2MT	HadCM3 B2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+2.75
2100ca_na2MT	NCAR PCM A2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+2.15
2100ca_ja2MT	CCSR/NIES A2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	+6.9
Impact du CC via les écoulements seulement (sans influence de la température de l'eau)						
2100ca_a2MT_Tact	ARP NEW A2	Actuel	Actuel	2100	2050 MT	0
Impact total du CC (y compris sur les apports diffus en nitrates)						
2000ca_a2MT	ARP NEW A2	Actuel	Actuel	2000 *	2050 MT	+3.3
2100a2MT	ARP NEW A2	ARP NEW A2	Actuel	2100	2050 MT	+3.3
2100b2MT	ARP NEW B2	ARP NEW B2	Actuel	2100	2050 MT	+2.1
2100oldMT	ARPEGE OLD	ARPEGE OLD	Actuel	2100	2050 MT	+2.0
2100lmdMT	LMD6	LMD6	Actuel	2100	2050 MT	+1.65
Impacts croisés à ceux des scénarios de rejets ponctuels						
2100a2BT	ARP NEW A2	ARP NEW A2	Actuel	2100	2050 BT	+3.3
2100oldHT	ARPEGE OLD	ARPEGE OLD	Actuel	2100	2050 HT	+2.0
2100lmdHT	LMD6	LMD6	Actuel	2100	2050HT	+1.65
Impacts croisés à ceux de l'agriculture raisonnée						
2100caARMT	Actuel	Actuel	AR	2100	2050MT	0
2100a2ARMT	ARP NEW A2	ARP NEW A2	AR	2100	2050MT	+3.3
2100a2ARB	ARP NEW A2	ARP NEW A2	AR	2100	2050BT	+3.3

* Les teneurs en nitrates dans les aquifères à l'horizon 2000, sous climat et pratiques agricoles actuels, correspondent à l' « état zéro » des simulations STICS/MODCOU/NEWSAM (section 4.2.4).

Les forçages soumis à des évolutions sont les suivants :

- apports ponctuels de 1991 (source : PIREN-Seine), 2000 (section 4.3.3) ou issus des scénarios d'évolution des rejets ponctuels à l'horizon 2050 (Basse Technologie BT, Moyenne Technologie MT, Haute Technologie HT, voir section 5.4.1),
- 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 et agricoles, à l'horizon 2000 ou 2100,
- température de l'eau actuelle ou interpolée en fonction du CC.

Cette interpolation est basée sur une analyse statistique des relations entre la température de l'air et celle de l'eau, mesurée sur la période 1993-1999 en plus de 100 points qui échantillonnent toute la variété des cours d'eau du bassin de la Seine (Latu, 2003). Cette étude a montré que dans l'ensemble du bassin, on peut définir une relation linéaire entre la température de l'eau journalière et la température de l'air au voisinage, moyennée sur les jours précédents. Cette relation explique l'essentiel de la variance de la température de l'eau (R^2 supérieur à 0.88 aux petits ordres de Strahler, i.e. à l'amont du bassin, et atteignant 0.95 à partir de l'ordre 4). A partir de l'ordre 6, i.e. dans les principaux axes (Seine jusqu'à l'aval de l'Yonne, Marne jusqu'à la confluence à la Saulx, Oise jusqu'à la confluence à l'Aisne), la pente de la relation est très proche de 1, si bien qu'une augmentation de la température de l'air se reporte directement sur celle de l'eau. Par souci de simplicité, nous avons extrapolé ce résultat à l'ensemble du bassin. Nous avons aussi négligé la saisonnalité du réchauffement climatique et déduit les températures de l'eau sous CC en ajoutant à ses valeurs actuelles la moyenne annuelle sur l'ensemble du bassin de l'augmentation de température de l'air simulée par les MCG sous CC.

D'autres forçages sont inchangés dans toutes nos 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. Vus les changements de débit sous CC (sections 5.1.2 et 5.1.3), on peut cependant postuler que ce dernier ne remet pas en cause le fonctionnement de ces ouvrages, même s'il peut en moduler la gestion ;
- 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.

5.4.3 Analyse des différents impacts simulés à l'horizon 2100

Ces impacts sont illustrés à Poses, qui intègre l'ensemble du bassin, dans l'ordre du Tableau 21. Les simulations qui y sont décrites sont appelées dans le texte en italique.

Effet de l'inertie des nappes via les apports diffus en nitrates

Le premier facteur qui influence l'évolution de la qualité des cours d'eau à l'horizon 2100 est le temps de réponse des aquifères et de la zone non saturée aux apports en nitrates depuis le bassin versant (agricole principalement). Leur concentration en nitrates n'est actuellement pas stabilisée (Gomez, 2002) et continuera à augmenter même si les pratiques agricoles et le climat restent inchangés (Tableau 18). Cette augmentation se répercute sur la concentration en nitrates dans les cours d'eau, modulée par le mélange avec les nitrates des écoulements superficiels, la rétention riparienne, et les apports ponctuels de nitrates. Sous climat, agriculture et rejets ponctuels actuels, il en résulte une augmentation de la concentration moyenne simulée à Poses, de 34 mgNO₃/l en 2000 (*ref2000*) à 41 mgNO₃/l à l'horizon 2100 (*ref2100*).

Impact des rejets ponctuels

La poursuite de la politique de réduction des rejets et de l'amélioration des techniques d'épuration projeté à l'horizon 2050 entraîne une amélioration drastique de la qualité des cours d'eau (Figure 23). Cet effet est beaucoup plus marqué que celui qui résulte de l'évolution des rejets entre 1991 et 2000, appréhendé en comparant simulations *modapp91* et *modapp00* (non présenté). Dans tous les cas, la réduction de l'ammonium des effluents est obtenue par nitrification ce qui augmente d'autant la teneur

en nitrates, sensible entre 1991 et 2000. Les scénarios 2050 rajoutent une étape de dénitrification, si bien que les nitrates sont également fortement abattus.

L'effet global est aussi significativement plus fort que les différences entre les 3 scénarios. Il permet une limitation de la croissance phytoplanctonique, essentiellement permise par la réduction des phosphates qui deviennent limitants. Cette baisse de l'eutrophisation, conjuguée à celle de la teneur en ammonium, améliore sensiblement la teneur en oxygène de l'eau. La moindre croissance des algues siliceuses (*Diatomées*) empêche aussi l'épuisement de la silice dissoute (sauf en Basse Technologie), ce qui est susceptible de réduire l'eutrophisation côtière (Conley et al., 1993).

Notons enfin que les scénarios de rejets ponctuels ont été construits à l'horizon 2050, parce qu'il n'a pas semblé raisonnable de postuler d'évolution des politiques au-delà. Nous nous sommes permis de les projeter tels quels à l'horizon 2100, et la Figure 23 montre que cette hypothèse est vraisemblable, vu la faiblesse de ces rejets.

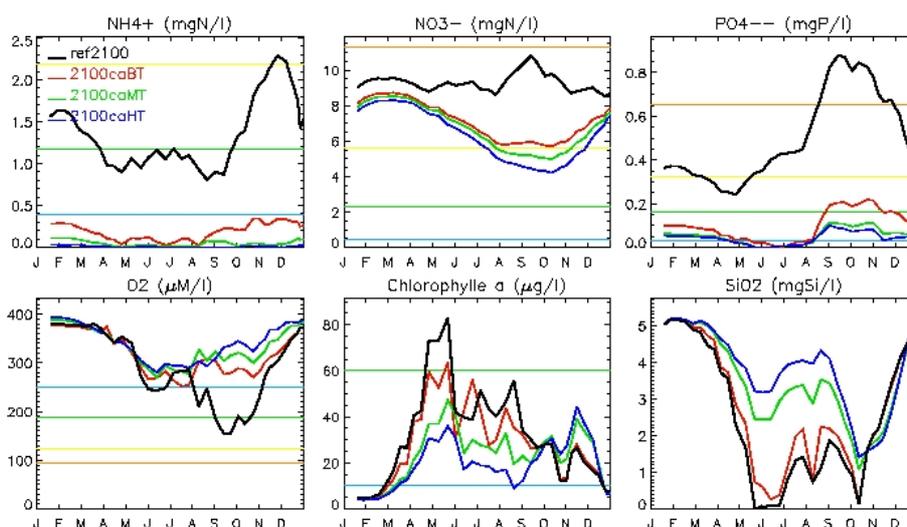


Figure 23 : Impact des scénarios de l'évolution des rejets ponctuels sur la qualité de l'eau simulée à Poses par le modèle Riverstrahler. Les simulations sont décrites en Tableau 21. Les variables de qualité présentées sont les concentrations en ammonium (NH_4^+), nitrates (NO_3^-), ortho-phosphates (PO_4^{2-}), oxygène (O_2), silice (SiO_2) et la biomasse phytoplanctonique (exprimée en concentration de chlorophylle). Les barres horizontales bleues, vertes, jaunes et oranges marquent les limites entre les classes de qualité Très bonne, Bonne, Passable, Mauvaise et Très mauvaise du SEQ-Eau.

Impact du CC mais sans intégrer son effet sur la teneur en nitrates des nappes

Cet impact est illustré par la Figure 24, qui montre l'effet relatif sur la qualité de l'eau du changement des débits et du réchauffement de l'eau provoqués par le scénario de CC ARPEGE NEW A2.

Le principal impact du scénario de CC ARPEGE NEW A2 sur les débits est leur diminution en période d'étiage, qui s'accompagne d'une diminution de la vitesse de l'eau. Celle-ci entraîne une diminution des matières en suspension dans l'eau (MES), car elle favorise la sédimentation et limite la remise en suspension.

Pour toutes les autres variables de qualité de l'eau, l'effet du réchauffement est nettement dominant, comme le montrent les faibles différences entre les simulations 2100caMT (en noir) et 2100ca_a2MT_Tact (en vert), qui ne diffèrent que par les écoulements. Le réchauffement de l'eau permet une croissance plus précoce du phytoplancton, visible à Poses mais aussi dans tout le réseau hydrographique. Une manifestation importante de cette précocité est donc spatiale (Garnier et al., 1995), avec des blooms algaux qui apparaissent plus en amont que sous climat actuel. Ceci favorise un développement plus amont des consommateurs hétérotrophes (zooplancton et brouteurs benthiques), et entraîne une diminution accrue du phytoplancton à l'aval du bassin. A Poses, cet effet est visible en automne sur la biomasse algale, et pendant toute la saison de croissance sur la silice dissoute, car elle intègre la croissance des Diatomées sur l'ensemble du chevelu amont.

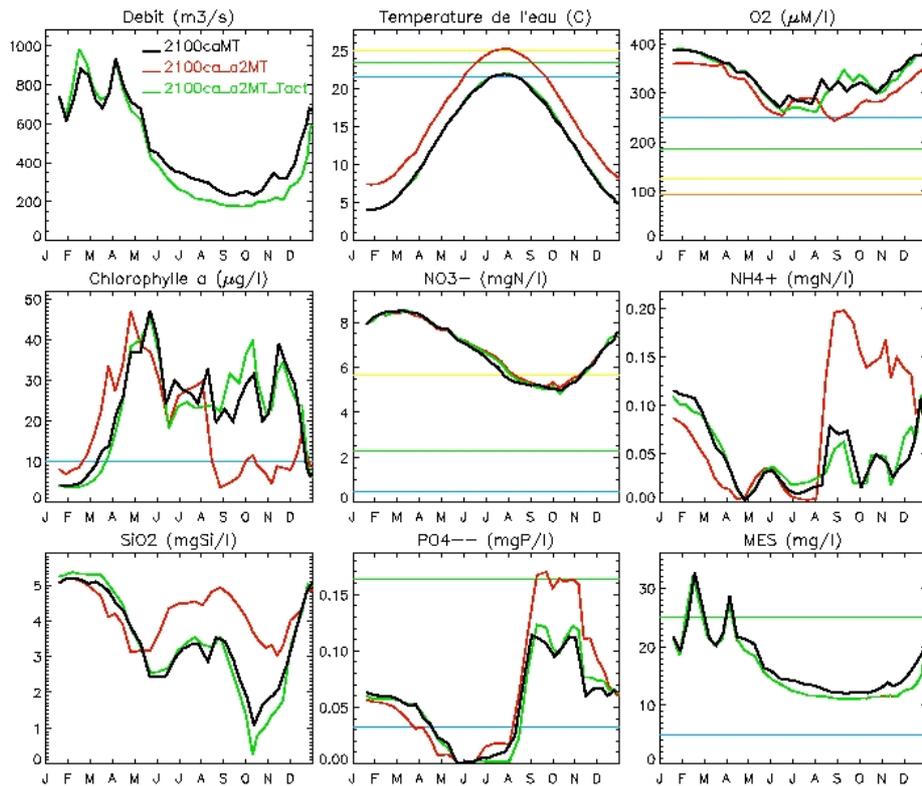


Figure 24 : Impact du CC ARPEGE NEW A2, sans intégrer son effet sur la teneur en nitrates des aquifères, sur la qualité de l'eau simulée à Poses par le modèle Riverstrahler. Les simulations sont décrites en Tableau 21, les autres détails sont expliqués en Figure 23.

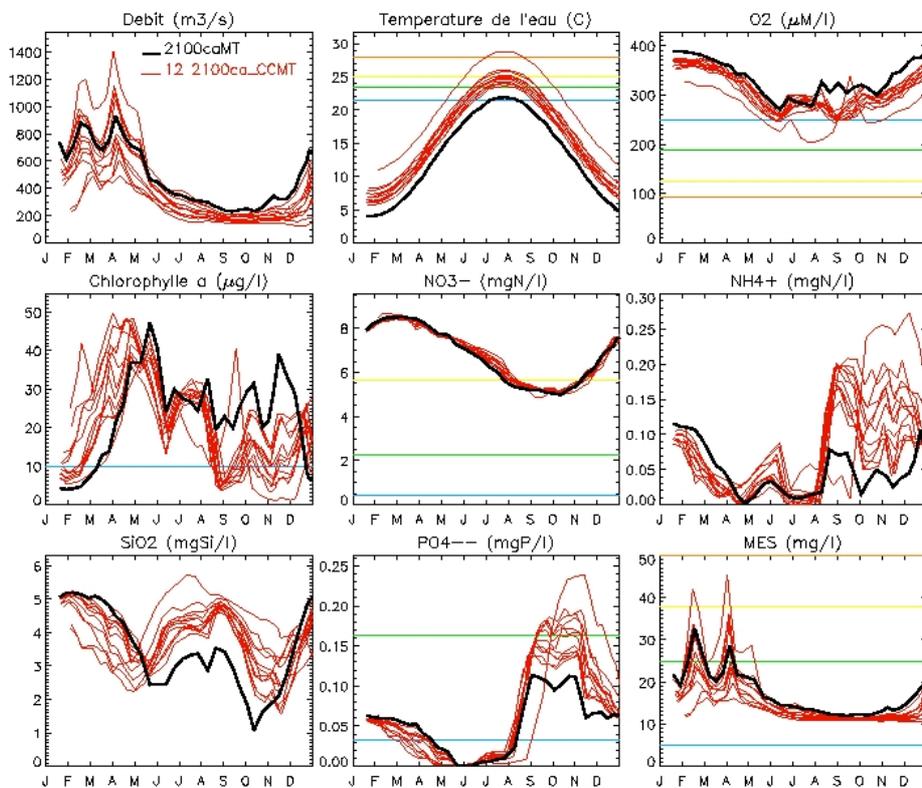


Figure 25 : Impact des 12 scénarios de CC, sans intégrer son effet sur la teneur en nitrates des aquifères, sur la qualité de l'eau simulée à Poses par le modèle Riverstrahler. Les simulations sont décrites en Tableau 21, les autres détails sont expliqués en Figure 23.

La moindre croissance du phytoplancton s'accompagne d'une augmentation des teneurs en nutriments, insensible pour les nitrates déjà largement excédentaires, mais significative pour les phosphates et l'ammonium, grâce à leurs faibles concentrations dans les simulations analysées (scénario de rejets Moyenne Technologie). Enfin, la teneur en oxygène de l'eau tend à diminuer un peu sous l'effet du réchauffement de l'eau, ce qui résulte de rejets moindres par photosynthèse (moins phytoplancton) et de prélèvements accrus par respiration (davantage d'organismes hétérotrophes).

La Figure 25 compare l'impact du CC (hors effet sur la teneur en nitrates des aquifères) simulé selon les 12 scénarios de CC du projet GICC-Seine (sections 4.4.2 et 5.1.2). Elle montre que l'impact moyen du CC (écart moyen à la simulation de référence *2100caMT*) est supérieur aux incertitudes liées aux MCG et aux scénarios d'émission en GES (différences entre les 12 simulations de CC). On peut aussi noter que les teneurs en oxygène, ammonium et phosphates restent dans la gamme Bonne à Très Bonne du SEQ-Eau (voir légende de la Figure 23), ce qui montre que l'impact de l'abatement des rejets est très dominant sur celui du réchauffement de l'eau sous CC.

Impact total du CC y compris sur les apports diffus en nitrates

Le CC augmente aussi les apports diffus de nitrates depuis les aquifères et le bassin versant agricole (section 5.1.5). Cet effet se retrouve dans les cours d'eau, mais à un degré moindre, du fait de la rétention riparienne. Notons aussi qu'il ne joue que sur la concentration en nitrates, car celle-ci est suffisamment forte pour ne jamais être limitante vis-à-vis de la dynamique planctonique.

A titre d'exemple, sous scénario de rejets ponctuels « Moyenne Technologie », la teneur moyenne en nitrates à Poses est de 31 mgNO₃/l avec les apports diffus simulés en 2100 sous climat inchangé (*2100ca_a2MT*). Si l'on intègre les effets du scénario de CC climatique ARPEGE NEW A2 sur ces apports diffus (*2100a2MT*), la teneur moyenne en nitrates à Poses augmente à 40.0 mgNO₃/l, et atteint 50 mgNO₃/l, i.e. la norme de potabilité, en hiver, quand la dénitrification riparienne, qui augmente avec la température, est moins efficace.

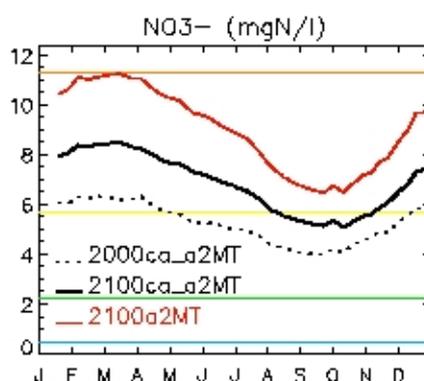


Figure 26 : Impact du CC ARPEGE NEW A2 sur la teneur en nitrates simulée à Poses à l'horizon 2100 par Riverstrahler, en intégrant son effet sur la teneur en nitrates des aquifères. Les simulations sont décrites en Tableau 21, les autres détails sont expliqués en Figure 23.

Cet effet est légèrement supérieur à l'augmentation de la teneur en nitrates entre 2000 et 2100 par la seule inertie des aquifères et de la zone non saturée (+7.1 mgNO₃/l entre *2000ca_a2MT* et *2100ca_a2MT*).

Impacts croisés du CC, de l'agriculture raisonnée et des scénarios de rejets ponctuels

Le scénario d'agriculture raisonnée ne joue que sur les apports diffus en nitrates, associés aux écoulements souterrains (depuis les aquifères) et superficiels (depuis le bassin versant agricole). L'introduction des cultures intermédiaires ayant une influence très faible sur les écoulements (section 5.3.1 et 5.3.2), elles n'ont pas été prises en compte dans le modèle CaB qui simule ces écoulements pour Riverstrahler.

La Figure 27 montre que les impacts de l'agriculture raisonnée et du CC sur la concentration en nitrates des aquifères (Tableau 18) se répercutent dans les cours d'eau. L'effet de l'agriculture raisonnée est très positif à l'horizon 2100 (18.8 mgNO₃/l à Poses dans *2100caARMT* contre 30.2 mgNO₃/l dans *2100caMT* sous pratiques actuelles), mais il est presque annulé par le scénario de CC ARPEGE NEW A2 (27.5 mgNO₃/l dans *2100a2ARMT*), dont l'impact est représentatif de la moyenne des 12 scénarios de CC analysés en section 5.1.2.

L'impact du CC sur les autres termes de la qualité biogéochimique de l'eau est conforme à l'analyse précédente (Figure 24), et dominé par l'effet du réchauffement de l'eau sur la dynamique spatio-temporelle des populations biologiques.

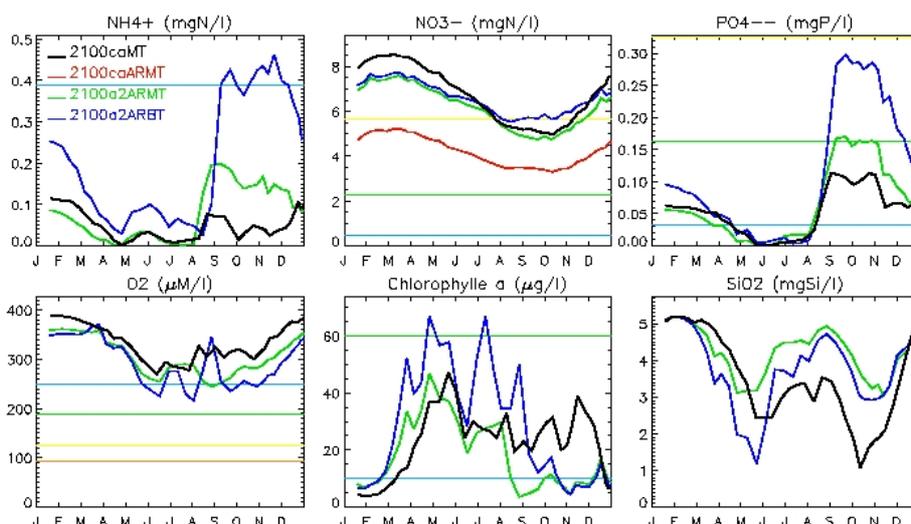


Figure 27 : Impacts croisés de l'agriculture raisonnée, du scénario de CC ARPEGE NEW A2 et de la technologie d'épuration des rejets sur la qualité de l'eau simulée à Poses à l'horizon 2100 par Riverstrahler. Les simulations sont décrites en Tableau 21, les détails sont expliqués en Figure 23.

La Figure 27 compare aussi l'impact du CC et de l'agriculture raisonnée à celui des différences entre les scénarios de rejets ponctuels. Elle détaille les différences entre le scénario de rejets ponctuels MT (2100a2ARMT) et le scénario de rejets BT (2100a2ARBT). Celui-ci est en effet plus cohérent avec les hypothèses SRES sur le progrès technologique dans la famille de scénarios A2 (émissions élevées), mais cet exemple est représentatif des différences entre les 3 scénarios. Rappelons cependant que l'impact de ces différences est très marginal par rapport à celui de la réduction générale des rejets selon les 3 scénarios à l'horizon 2050 (Figure 23).

L'impact des différences entre les scénarios MT et BT est dominant sur les nutriments provenant majoritairement des rejets ponctuels (ammonium et phosphates). Il est également dominant en début de saison de croissance sur la biomasse phytoplanctonique (car la teneur en phosphates est moins limitante sous scénario de rejets ponctuels BT) donc sur la concentration de silice dissoute. L'effet du réchauffement de l'eau dû au CC est par contre dominant sur ces termes en fin de saison de croissance, quand les consommateurs hétérotrophes sont suffisamment développés. Enfin, la réponse de la teneur en nitrates dans les cours d'eau est dominée par les impacts du CC et de l'agriculture raisonnée, qui sont du même ordre de grandeur.

6. Conclusions

Nous avons d'abord construit des scénarios d'évolution de 3 contraintes importantes de l'hydrosystème Seine au cours du XXIème siècle :

- **12 scénarios du CC moyen**, basés sur des simulations réalisées avec 8 MCG 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 CO₂ au taux de 1% par an depuis 1990). Tous ces scénarios 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) et montrent une tendance à des précipitations plus fortes en hiver et plus faibles en été, mais avec une forte dispersion. L'augmentation de l'ETP par le seul effet du CC a été modérée par des coefficients multiplicateurs calculés grâce au modèle agricole STICS, pour rendre compte de la réduction de ce terme quand l'effet de la teneur en CO₂ augmente.
- **7 scénarios d'évolution du système agricole** : 6 scénarios contrastés furent d'abord développés à l'horizon 2050 en croisant deux types de déterminants, (1) économiques (céréalisation et bioénergie, diversification, agriculture biologique à grande échelle) et (2) environnementaux (agriculture raisonnée, de conservation et infrastructures écologiques). Ils ont été spatialisés en 12 zones agricoles caractérisées par leur homogénéité actuelle. Ces scénarios s'étant avérés trop complexes pour être exploités par la version actuelle du modèle STICS, nous avons conçu un scénario plus simple d'évolution de l'agriculture, le scénario « Agriculture raisonnée ». Il préserve les successions culturales actuelles, mais introduit des pratiques plus respectueuses de

l'environnement qu'à l'actuel, en extrapolation tendancielle du décret de janvier 2004 sur l'agriculture raisonnée : réduction de la fertilisation azotée et introduction de cultures intermédiaires pour limiter les fuites de nitrate en hiver. C'est ce scénario qui fut exploité dans nos simulations.

- **3 scénarios d'évolution des rejets ponctuels**, d'origine industrielle et domestique, développés à l'horizon 2050 en intégrant notamment des hypothèses sur l'évolution de la démographie, du secteur industriel, et du progrès technologique d'épuration et de dépollution (ce dernier facteur étant nettement dominant).

Il convient de rappeler que ces trois types de scénarios n'ont pas le même horizon temporel : 2050 pour les scénarios des contraintes anthropiques (agriculture et rejets ponctuels) et 2050 ou 2100 pour les scénarios de CC. Nous ne pensons pas que ce soit un problème important, étant donné les incertitudes sur ces échéances, les incertitudes aussi sur les scénarios des contraintes anthropiques (qui ne prétendent pas être des prévisions), et vu les modalités de nos simulations d'impact qui n'ont pas le caractère transitoire de certaines simulations du CC, mais qui appliquent brutalement les scénarios de changement (non transitoires mais figés) sur toute la période simulée.

Nous avons alors utilisé un ensemble de 4 modèles, articulés au cours de la dernière décennie dans le cadre du programme PIREN-Seine, pour simuler l'impact de ces 3 familles de scénarios sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique de l'hydrosystème Seine.

Nous avons d'abord évalué les **impacts directs du CC**. En ce qui concerne **l'hydrologie du bassin**, un important travail fut de caractériser leur marge d'incertitude. Celle-ci est en effet inhérente au contexte prospectif de l'étude, qui impose de recourir à la modélisation. Les incertitudes liées au CC lui-même, associées aux MCG et aux scénarios d'émissions en GES au cours du XXIème siècle, furent évaluées en comparant les impacts des 12 scénarios de CC ; les incertitudes liées aux modèles d'impact furent évaluées en comparant les impacts simulés par les modèles hydrologiques CaB et MODCOU, de complexité très différente.

Nous avons ainsi montré 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'étiage (atteignant -40% en automne par rapport aux débits actuels). L'évolution des débits de crue est en revanche beaucoup moins certaine, nos simulations montrant des cas d'augmentation comme de diminution, en lien avec la dispersion importante des changements de précipitations entre les différents scénarios de CC. Nous avons aussi montré une **diminution systématique de l'humidité de la zone racinaire** (-31 mm soit -9%, en moyenne annuelle sur les 12 scénarios), qui est plus prononcée en été.

L'analyse de ces impacts en fonction des scénarios d'émission considérés (A2 plus pessimiste que B2) suggère aussi 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.

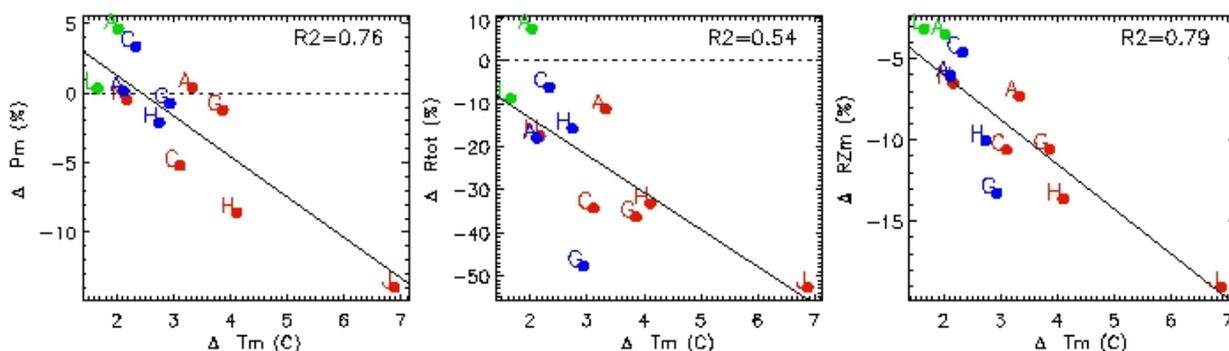


Figure 28 : Relations entre les variations moyennes de température sous CC et les variations associées de précipitations, d'écoulement total et d'humidité de la zone racinaire par rapport au climat actuel. Les lettres réfèrent aux MCG utilisés pour les simulations de CC (A : ARPEGE, C : CCCma, G : GFDL, 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.

Ces résultats sont synthétisés en Figure 28, qui montre aussi une tendance très nette 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).

Nous avons aussi sélectionné 4 scénarios de CC (3 scénarios ARPEGE et scénario LMD6) pour les simulations d'impact impliquant les modèles STICS et MODCOU/NEWSAM. Ils sont tous "plus humides" que la moyenne des 12 scénarios, mais les 2 scénarios ARPEGE NEW restent représentatifs de l'ensemble des 12 scénarios. En particulier, l'impact hydrologique du scénario A2 est proche de l'impact moyen des 12 scénarios.

Sur ces 4 scénarios, le modèle hydrogéologique MODCOU montre que les variations de niveau piézométrique des nappes aquifères restent faibles (amplitude généralement inférieure à 2 mètres) à l'exception du scénario ARPEGE NEW B2 qui entraîne localement des baisses plus importantes dans l'aquifère de la Craie.

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 ».

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. Le couplage du modèle STICS spatialisé avec le modèle de transport souterrain MODCOU/NEWSAM nous a permis de quantifier l'influence de ces changements sur la **concentration en nitrates dans les nappes**. En moyenne sur les nappes libres, **celle-ci augmente à l'horizon 2100**, de 0 à 33% par rapport à l'actuel selon les scénarios de CC. Sous scénario ARPEGE NEW A2, la concentration moyenne atteint 77 mgNO₃/l en moyenne sur les nappes libres, où elle excède 50 mgNO₃/l (norme de potabilité) sur une fraction de 65%.

Cet impact du CC fut comparé à celui du **scénario d'agriculture raisonnée**. 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 d'obtenir une concentration inférieure à la norme (50 mg l⁻¹) en zone cultivée. Il entraîne donc une **diminution de la concentration en nitrates dans les aquifères à l'horizon 2100**, de 37% en moyenne sur les nappes libres, pouvant localement atteindre plus de 50% par rapport à la simulation de référence en 2100 ans modification des pratiques agricoles ni du climat.

Les impacts de l'agriculture raisonnée et du CC ARPEGE NEW A2 sont donc opposés et de même ordre de grandeur. Leur **impact croisé** fut simulé par la chaîne de modèles STICS/MODCOU/NEWSAM, qui montre que ce **scénario de CC annihile en grande part l'influence positive de l'agriculture sur la pollution azotée des aquifères du bassin** (elle n'est plus réduite que de 12% par rapport à la simulation de référence à l'horizon 2100, qui présente une concentration moyenne dans les nappes libres de 60 mgNO₃/l donc largement supérieure à la norme).

Le modèle Riverstrahler nous a enfin permis d'intégrer **l'impact des 3 familles de scénarios d'évolution des contraintes de l'hydrosystème (CC, agriculture, rejets ponctuels) sur la qualité biogéochimique de la Seine**.

L'impact le plus marquant est celui de la réduction générale des rejets ponctuels dans les 3 scénarios de rejets à l'horizon 2050, qui entraîne une amélioration drastique de la qualité des cours d'eau. Cette réduction des rejets est très probable, et tous les résultats ci-dessous intègrent l'effet du scénario de rejets Moyenne Technologie.

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 mgNO₃/l en moyenne annuelle à Poses, et atteint 50 mgNO₃/l, i.e. la norme de potabilité, en hiver. Cette augmentation est supérieure à celle qui résulte de l'inertie des aquifères et de la zone saturée entre 2000 et 2100 (+7 mgNO₃/l). **L'agriculture raisonnée et la réduction des rejets ponctuels ont un impact du même ordre de grandeur** (10 mgNO₃/l environ), **mais opposé**, et comme dans les aquifères, l'impact du CC (scénario ARPEGE NEW A2) limite fortement celui de l'agriculture raisonnée.

En ce qui concerne les **autres variables de qualité** (autres nutriments, i.e. phosphates et ammonium, silice, biomasse, oxygène), **l'impact du CC est largement dominé par celui du réchauffement de l'eau** sur la dynamique spatio-temporelle des populations biologiques. Ce résultat s'oppose à celui de Jenkins et al. (1993), qui ont montré que cet effet était secondaire au Royaume-Uni par rapport à celui des changements de débits et de régime hydrologique, qui agissent sur la dilution, la sédimentation et les temps de rétention. Les rejets ponctuels étant réduits, **cet impact est plutôt positif**, avec une limitation de la biomasse phytoplanctonique par une croissance accrue des consommateurs hétérotrophes. Elle s'accompagne d'une augmentation de la silice dissoute, susceptible de réduire l'eutrophisation côtière. La teneur en oxygène diminue légèrement, mais cet effet n'altère pas significativement la qualité de l'eau. 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 donc **très marginal par rapport à celui de la réduction générale des rejets selon ces 3 scénarios à l'horizon 2050**.

En conclusion, 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. Dans ce cadre, il serait souhaitable de pouvoir exploiter les six scénarios contrastés de l'agriculture que nous avons construit à l'horizon 2050. Il serait aussi particulièrement intéressant d'évaluer l'impact du CC sur certaines pratiques agricoles :

- 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.

Nous ne pouvons pas encore aborder ces questions avec nos outils de modélisation, et ceci réclamerait donc un important travail de recherche.

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 terme de risques, mais il ne peut pas être appréhendé avec les simulations de CC que nous avons exploitées.

Enfin, un volet important de notre projet d'envisager les conséquences du CC en terme de gestion de l'eau, en collaboration avec les professionnels de ce secteur. Nous avons ainsi organisé en juin 2003 un atelier avec les principaux acteurs de la gestion de l'eau dans le bassin. Cet atelier ayant été jugé très productif de part et d'autre, il serait souhaitable de réitérer ce type d'action pour présenter l'intégralité de nos résultats. Ce pourrait être le forum pour discuter d'un impact que nous n'avons pas encore abordé, à savoir le réchauffement de l'eau, et de ses répercussions possibles sur des secteurs comme la production d'électricité.

7. Valorisation du projet

7.1. Articles

- Ducharne, A. Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E. Gomez, E., Déqué, M. (2004a). Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *VertigO* : Vol. 4, No. 3.
- Ducharne, A. (2004). Adaptation d'un schéma de surface à vocation hydrologique au contexte hydrogéologique du bassin de la Seine. *Actes des Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 2004*, 4 pp.
- Gomez E., Ledoux E, Viennot P, Mignolet C, Benoit M, Bornerand C, Schott C, Mary B, Billen G, Ducharne A, Brunstein D. (2003) : Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche* : No. 3/2003 .
- Mignolet C., Schott C., Benoît M. Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory : a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. *Agronomie*, 24 : 219-236.
- Poux, X. et Olive, G. (2003). Agriculture et changement climatique : quelle analyse du scénario tendanciel en matière de lutte contre les GES ? Les enseignements d'une recherche prospective sur le bassin de la Seine. *Responsabilité et Environnement*, Octobre 2003 : 45-61.

7.2. Rapports et notes

- Abu Alkhair, A. (2003). Prospective et scénarios de la pollution de l'eau « domestique et industrielle » à l'horizon 2050 dans le bassin de la Seine : les contraintes anthropiques. Rapport de stage effectué dans le cadre du DEA Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles (EERN), Ecole des Hautes Etudes en Science Sociale (EHESS).
- Baubion, C. (2004). Impact du changement climatique sur le bassin de la Seine, *Mémoire du DEA "Hydrologie, Hydrogéologie, Géochimie et Géostatistiques"*, Université Paris VI, 74 pp.
- Brisson, N. (2003). Influence de l'augmentation du CO₂ sur les perturbations d'ETP, *Note technique du projet GICC-Seine*.
- Curie F. (2002). Influence du Mais (graminée C4) sur l'hydrologie du bassin de la Seine simulée par un modèle de type SVAT, *Rapport du DEA "Hydrologie, Hydrogéologie, Géochimie et Géostatistiques"*, Université Paris VI, 45 pp.
- Curie, F. et Ducharne, A. (2003). Perfectionnement du modèle CaB: paramétrisation de la résistance stomatique en relation avec la photosynthèse, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 25 pp.
- Ducharne, A. (2002). Projet GICC-Seine : questions relatives à l'ETP, *Note technique du projet GICC-Seine*.
- Ducharne, A. (2003). Axe transversal Prospective - Introduction, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 3 pp.
- Ducharne, A. et Déqué M. (2003). Le bassin de la Seine face au changement climatique : comparaison de deux scénarios climatiques, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 22 pp.
- Ducharne, A. et Gomez, E. (2003). Les données climatiques du projet GICC-Seine, *Note technique du projet GICC-Seine*.
- Ducharne, A., Viennot, P., Théry, S. et Ledoux, E. (2004b). Vers une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine sous changement climatique, *Rapport d'activité 2003 du programme PIREN-Seine*.
- Ducos, G. (2003). Prospective et changement climatique : six images des systèmes agricoles du bassin de la Seine en 2050, *Rapport du DEA "Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles"*, Université Paris X Nanterre, Paris, 92 pp.

- Gomez, E., Viennot, P. et Ledoux, E. (2003). Influence du changement climatique sur le transfert d'azote dans les sols et les aquifères, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 4 pp.
- Kieken, H. and A. Abu Alkhair (2004). Prospective non climatique du bassin versant de la Seine : préparation des données de flux de pollution pour les simulations réalisées dans le cadre du projet GICC-Seine, GICC-Seine: 14.
- Lavaud, C. (2003). Etude des incertitudes du changement climatique simulé par des modèles de circulation générale et de leur impact sur l'hydrologie du bassin de la Seine, *Rapport de Stage de quatrième année de l'Ecole Polytechnique Féminine*.
- Mignolet, C., Schott, C., Mari, J.-F. et Benoit, M. (2003). Typologie des successions de cultures et des techniques culturales dans le bassin de la Seine. *Rapport d'activité 2002*, Programme PIREN-Seine.
- Mignolet, C., Schott, C. et Benoit, M. (2004). Dynamique des pratiques agricoles, *Rapport d'activité 2003 du programme PIREN-Seine*.
- Olive G. (2002). Prospective et changement climatique: six scénarios pour l'agriculture du bassin de la Seine à l'horizon 2050, *Rapport du DEA "Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles"*, INA P-G, Paris, 110 pp.
- Poux, X. et Olive, G. (2003). Prospective agricole sur le bassin de la Seine, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 23 pp.
- Poux, X., Ducos, G., Benoit, M. et Schott, C. (2004). Simulation prospective des pertes nitriques dans l'hydrosystème Seine en 2050 : traduction de scénarios macro-économiques de l'agriculture en images spatialisées des systèmes agraires du bassin de la Seine, *Rapport d'activité 2003 du programme PIREN-Seine*.
- Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E. et Baubion, C. (2004). Modélisations hydrogéologiques effectuées au moyen du logiciel MODCOU et de la chaîne de modélisation STICS/MODCOU/NEWSAM (EMP/CIG) : Impact sur l'hydrodynamique superficielle et profonde, impact sur la qualité des eaux souterraines, Note technique, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 74 pp.

7.3. Communications

- Ducharne, A. (2002). GICC-Seine : Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, *Colloque de restitution du programme GICC*, 25-26 Avril 2002 (Toulouse, France).
- Ducharne, A., Billen, G., Garnier, J. et Brunstein, D. (2002). Biogeochemical functioning of the Seine river and its sensitivity to climate change. *27ème Assemblée Générale de l'EGS*, Avril 2002 (Nice, France).
- Ducharne, A. (2002). Influence of temporal variability on the hydrological response to climate change. *27ème Assemblée Générale de l'EGS*, Avril 2002 (Nice, France).
- Ducharne A., Beaudoin N., Benoit M., Billen G., Brisson N., Garnier J., Gomez E., Kieken H., Ledoux E., Mary B., Mermet L., Mignolet C., Olive G., Poux X., Schott C., Théry S. et Viennot P. (2002). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, *Colloque "Regards Croisés sur les Changements Globaux"*, Novembre 2002 (Arles, France).
- Ducharne, A. et Déqué, M. (2003). Le bassin de la Seine face au changement climatique : comparaison de deux scénarios climatiques, *Colloque annuel du programme PIREN-Seine*, Février 2003 (Paris, France).
- Ducharne, A. (2004). Adaptation d'un schéma de surface à vocation hydrologique au contexte hydrogéologique du bassin de la Seine, *Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 2004*, Novembre 2004 (Toulouse, France).

- Ducharne, A. (2004). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, Présentation au Groupe de Travail « Eaux Continentales » de l'Académie des Sciences, Décembre 2004 (Paris, France).
- Ducos, G., Poux, X., Schott, C., Mignolet, C., Benoit, M., Lebonvalet, S., Mary, B. et Ducharne, A. (2004). Scénarios spatialisés de l'agriculture du bassin de la Seine: scénarios construits et simulations des flux de nitrate, *Colloque annuel du programme PIREN-Seine*, Janvier 2004 (Paris, France).
- Poux, X. et Olive, G. (2003). L'Agriculture face au changement climatique : un exercice de prospective sur le bassin de la Seine, *Colloque annuel du programme PIREN-Seine*, Février 2003 (Paris, France).
- Schott, C., Mignolet, C., Bazin, M., Piantoni, F., Koerner, W. et Benoit, M. (2004). Dynamique des activités agricoles à plusieurs échelles de temps et d'espace, *Colloque annuel du programme PIREN-Seine*, Janvier 2004 (Paris, France).
- Viennot, P. (2004). Impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin de la Seine, *Séminaire « Evaluer les risques climatiques : enjeux pour la décision, enjeux pour la recherche »*, IDDRI, Mars 2004 (Ecole Normale Supérieure, Paris, France).

7.4. Site Internet

Le site URL <http://www.sisyphe.jussieu.fr/Internet/gicc/index.html> comprend une partie publique, contenant une présentation du projet, ses actualités, ainsi que les publications et communications détaillées ci-dessous. Une partie privée permet le transfert de données et documents non finalisés entre les participants.

7.5. Atelier avec les gestionnaires de l'eau du bassin de la Seine

Une action de valorisation originale fut l'organisation d'un atelier de réflexion autour des principaux enjeux du CC en terme de gestion de l'eau. Cet atelier s'est tenu le 4 juin 2003 au MEDD, et a rassemblé:

- 19 gestionnaires (MEDD, Ministère de l'Équipement, MEDIAS-France, DIREN, AESN, SIAAP, IIBRBS, Conseil Général des Hauts de Seine, Mairie de Paris)
- 10 scientifiques du projet GICC-Seine
- 7 scientifiques invités

Nous avons présenté nos résultats au cours de la matinée, et l'après-midi a permis une discussion avec les gestionnaires sur les enjeux de gestion de l'eau soulevés par ces résultats. Un compte-rendu de la journée est disponible sur le site Web du projet GICC-Seine. Cet atelier ayant été jugé très productif de part et d'autre, nous souhaitons réitérer ce type de valorisation à l'issue du projet.

7.6. Disponibilité des données

Nous n'avons pas développé de base de donnée organisée à l'issue du projet. Les données produites par le projet sont cependant disponibles, par demande à la coordinatrice (Agnes.Ducharne@ccr.jussieu.fr).

8. Autres références citées

- 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.
- Arnell, N.W. (1994) Scenarios for hydrological climate change impact studies. In: Oliver, H.R. and Oliver, S.A. (Eds) *The role of water and the hydrological cycle in global change*. NATO ASI Series I: Global Environmental Change, Vol 31. Springer-Verlag, pp 389-407.
- Arnell, N.W., 1998: Climate change and water resources in Britain. *Clim. Change*, 39: 83-110.
- Beven, K. and Kirkby, M. J. (1979) A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.* 24:43-69.

- Beaudoin N, Coquet Y, Mary B (2002) Estimation des pertes de nitrate et de pesticides en zone de grande culture. Etude à l'échelle du bassin hydrologique de Bruyères-et-Montbérault. Compte-rendu final de contrat ADEME, n°9701001, 68 pp.
- Beaudoin N., Parnaudeau V., Mary B., Makowski D., Meynard J.M. (2004a) Simulation de l'impact de différents scénarios agronomiques sur les pertes de nitrate à l'échelle d'un bassin hydrologique In: *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, P. Monestiez, S. Lardon & B. Seguin (eds.), INRA Editions, 117-141.
- Beaudoin N, J. Saad J, Van Laethem C, Machet JM, Maucorps J, Mary B (2004b). Nitrate leaching in intensive arable agriculture in France: effect of farming practices, soils and crop rotations. Soumis à *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Billen, G. and 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. and J. Garnier (1997). The Physon River Plume : coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. *Aquat. Microb. Ecol.*, 13: 3-17.
- Billen G., J. Garnier, A.Ficht and 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., J. Garnier and V. Rousseau. (in press). Nutrient fluxes and water quality in the drainage network of the Scheldt basin over the last 50 years. *Hydrobiologia* (in press).
- 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.
- Bouraoui, F., Vachaud, G., Li, L.Z.X. & Le Treut, H., 1999: Evaluation of the impact of climate change on water storage and groundwater recharge at the watershed scale. *Clim. Dyn.*, 15: 153-161.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne, F., Antonioletti, R., Dürr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plénet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M. & Delécolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18: 311-346.
- Brisson N, Ruget F, Gate P, Lorgeou J, Nicoullaud B, Tayot X, Plénet D, Jeuffroy MH, Bouthier A, Ripoche D, Mary B, Justes E (2002) STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balance. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22: 69-92.
- Brisson N, Gary C, Justes E, Roche R, Mary B, Ripoche D, Zimmer D, Sierra J, Bertuzzi P, Burger P, Bussièrre F, Cabidoche 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.
- Brutel, C. (2002). La population de la France métropolitaine en 2050 : un vieillissement inéluctable. *Économie et Statistique* (355-356): 57-71.
- Brutel, C. and L. Omalek (2002). Projections démographiques pour la France, ses régions et ses départements à l'horizon 2030, INSEE: 12.
- Cess, R., Zhang, M., Potter, G. & others, 1993: Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general circulation models. *Science*, 262: 1252-1255.
- Conley, D., Schelske, C.L. & Stoermer, E., 1993: Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 101: 179-192.
- Crossley, J.F., Polcher, J., Cox, P.M., Gedney, N. & Planton S. (2000). Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations. *Clim. Dyn.*, Vol. 16 : 949-961.
- Delworth, T.L. & Manabe, S. (1988). The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate. *Journal of Climate*, 1: 523-547.
- Delworth, T.L., Stouffer, R., Dixon, K., Spelman, M., Knutson, T., Broccoli, A., Kushner, P., & Wetherald, R. (2002). Review of simulations of climate variability and change with the GFDL R30 coupled climate model. *Clim. Dyn.*, 19: 555-574.
- Déqué, M., Marquet, P. and Jones, R.G. (1998) Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Clim. Dyn.* 14: 173-189.
- 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., Golaz, C., Leblois, E., Laval, K., Polcher, J., Ledoux, E. & de Marsily, G. (2003). Development of a high resolution runoff routing model, calibration and application to assess runoff from the LMD GCM. *J. Hydrol.*, 280: 207-228.
- Fischer G., Shah M., Velthuizen (van) H. (2002) *Climate Change and Agricultural Vulnerability*, IIASA. Vienna, 152 pp.
- Flato, G.M. & Boer, G.J. (2001). Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 195-198.
- Gallopin G., Hammond A., Raskin P., Swart R. (1997) *Branch Points : Global Scenarios and Human Choice*, Stockholm Environment Institute, PoleStar Series Report n°7.
- Garnier J., G. Billen and 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.
- Garnier, J., G. Billen and L. Palfner. (1999). Understanding the oxygen budget and related ecological processes in the river Mosel: the RIVERSTRAHLER approach. *Hydrobiologia*, 410: 151-166.
- Garnier J., Billen G., Sanchez N. & Leporcq B. (2000). Ecological functioning of the Marne Reservoir (Upper Seine Basin, France). *Regulated Rivers: Research & Management*, 16: 51-71.
- Garnier J., G. Billen, E. Hannon, S. Fonbonne, Y. Videnina and M. Soulie. (2002). Modeling transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube River. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 285-308.
- Garnier J. and G. Billen (2002). The Riverstrahler Modelling approach applied to a tropical case study (The Red(Hong) River, Vietnam): Nutrient transfer and impact on the coastal zone.(2002) Coll. Of Marine Research Works, 2002, XII, Suppl issue. Proceedings of a SCOPE Workshop on Land-Ocean Nutrient Fluxes: The Silica Cycle. pp. 51-65.
- Gedney, N., Cox, P.M., Douville, H. Polcher, J. & Valdes, P.J. (2000). Characterising GCM land surface schemes to understanding their responses to climate change. *J. Clim.*, Vol. 13(17) : 3066-3079.
- Gibelin, A.-L. and Déqué, M. (2001). Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXIème siècle, *Note du groupe de météorologie à grande échelle* No. 79, Météo-France/CNRM.
- Gibelin, A.-L. & Déqué, M. (2003). Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dyn.*, 20: 327-339.
- Giorgi, F. and R. Francisco, 2000b: Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1295-1298.
- 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.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T., J.F.B., M., & Wood, R. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 16: 147-168.
- Harrison P.A, Butterfield R.E. et Downing T.E., 1995: *Climate change and agriculture in Europe ; assessment of impacts and adaptation*. Research report N°9, Environmental Change Unit, University of Oxford.
- Hegerl, G.C., Hasselmann, K., Cubash, U., Mitchell, J.F.B. Roeckner, E., Voss, R. & Waszkewitz, J., 1997: Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gases, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. *Clim. Dyn.*, 13: 613-634.
- 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
- Houlès V, Mary B, Guérif M, Makowski D, Justes E (2004) Evaluation of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie*, sous presse.
- Hulme, M., J. Crossley, D. Lister, K.R. Briffa and P.D. Jones, 2000: Climate observations and GCM validation Interim Annual Report to the Department of the Environment, Transport and the Regions, April 1999 to March 2000, CRU, Norwich, UK.
- Hutjes, R., Kabat, P., Running, S.W., Shuttleworth, W.J., Field, C, Bass, B and 28 others (1998) Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle. *J. Hydrol.*, 212-213: 1-21.

- INSEE (2003). *Projections démographiques pour la France, ses régions et ses départements (Horizon 2030/2050)*, INSEE.
- Jenkins, A., McCartney, M. & Sefton, C., 1993: Impacts of climate change on river water quality in the United Kingdom, *Institute of Hydrology*, Wallingford, Report to the Department of Environment, 39 pp.
- Kittel, T.G.F., Giorgi, F. & Meehl, G.A., 1998: Intercomparison of regional biases and doubled-CO₂ sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments. *Clim. Dyn.*, 14: 1-15.
- 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.
- Latu, M. (2003). Vers une modélisation des relations entre température de l'eau et température de l'air. *Mémoire de Maîtrise de l'Université Pierre et Marie Curie*, 32 pp.
- Leblois et al. (2004). Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion, *Rapport final*, Programme GICC1 2/00.
- 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., G. Girard, & G. de Marsily (1989). Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In : *Unsaturated flow in hydrologic modeling - Theory and Practice*, Morel-Seytoux, H. J. Ed. p.435-454. Kluwer Academic.
- 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.
- Mann, M., Bradley, R. & Hughes, M., 1998: Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392: 779-787.
- Mary B, Laurent F, Beaudoin N (2002) La gestion durable de la fertilisation azotée. Proc. of the 65th IIRB Congress, février 2002, Bruxelles (BEL), 59-65.
- Meybeck, M., de Marsily, G. & Fustec, E. (1998). *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier.
- Nakicenovic, N. & Swart, R., editors (2000). *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, UK.
- Nicoullaud B., Couturier A., Beaudoin N., Parnaudeau V., Mary B., Coutadeur C., King D. (2004) Modélisation spatiale à l'échelle parcellaire des effets de la variabilité des sols et des pratiques culturales sur la pollution nitrique agricole. In: *Organisation spatiale des activités agricoles et processus environnementaux*, P. Monestiez, S. Lardon & B. Seguin (eds.), INRA Editions, 143-161.
- Normand B., Mary B., Czernichowski I., Beaudoin N., Mouvet C., Bazerque M.F., Groell F. (2004) Programme expérimental de suivi de la qualité de l'eau sur trois bassins versants de Picardie faisant l'objet de mesures agri-environnementales. Rapport de synthèse. Compte-rendu de contrat Région Picardie, 67 pp.
- Nozawa, T., Emori, S., Numaguti, A., Tsushima, Y., Takemura, T., Nakajima, T., Abe-Ouchi, A., & Kimoto, M. (2001). Projections of future climate change in the 21st century simulated by the CCSR/NIES CGCM under the IPCC SRES Scenarios. In Matsuno, T. and Kida, H., editors, *Present and Future of Modeling Global Environmental Change : Toward Integrated Modeling*, pages 15-28. TERRAPUB.
- Omalek, L. (2001). "Projections régionales de population pour 2030 : l'impact des migrations." *Insee première*(805): 4.
- Parry, M.L., 2000: *Assessment of potential effects and adaptations for climate change in Europe: Summary and Conclusions*. Jackson Environment Institute, University of East Anglia, Norwich, UK, 24pp.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193 : 120-146.
- Planton, S (1999). Incertitudes sur la détermination des changements climatiques. Papier présenté à l'Ecole Thématique du CNRS " *Risques et incertitudes: le cas du changement climatique* ", Les Houches, 17-22 novembre 1999.
- Pope, V.D., Gallani, M., R., R.P., & Stratton, R. (2000). The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model – HadCM3. *Clim. Dyn.*, 16: 123-146.

- Rounsevell, D.A., 1999: Spatial modelling of the response and adaptation of soils and land use systems to climate change - an integrated model to predict European land use (IMPEL). Project Summary DG XII.
- Sellers, P., Meeson, B.W., Closs, J., Collatz, J., Corprew, F., Dazlich, D., Hall, F.G., Kerr, Y., Koster, R., Los, S., Mitchell, K., McManus, J., Myers, D., Sun, K.J. & Try, P. (1996). The ISLSCP Initiative I global data sets: surface boundary conditions and atmospheric forcings for land-atmosphere studies. *Bull. Am. Met. Soc.*, 77: 1987-2006.
- Strahler A.H. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Geophys. Union Trans.* 38: 913-920.
- Vannote, R., Minshall, G., Cummins, K., Sedell, J. & Cushing, C. (1980). The River Continuum Concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 37: 130-137.
- Washington, W., Weatherly, J., Meehl, G., Semtner, A., Bettge, T., Craig, A., Strand, W., Arblaster, J., Wayland, V., James, R., & Zhang, Y. (2000). Parallel climate model (PCM) control and transient simulations. *Clim. Dyn.*, 16: 755-774.

9. Annexes

9.1. Glossaire

AESN	Agence de l'Eau Seine Normandie
BT	Basse Technologie (concernant l'évolution des rejets ponctuels à l'horizon 2050)
CC	Changement Climatique
CI	Cultures Intermédiaires
CIG	Centre d'Informatique Géologique
COD	Carbone Organique Dissous
ENSMSP	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
ETP	Evapotranspiration Potentielle
GES	Gaz à Effet de Serre
GICC	Gestion et Impact du Changement Climatique
GIEC	Groupe International d'Experts sur le Climat (= IPCC)
GSG	Global Scenario Group
HT	Haute Technologie (concernant l'évolution des rejets ponctuels à l'horizon 2050)
IAA	Industries Agro-Alimentaires
IIBRBS	Institution Interdépartementale des Barrages Réservoirs du Bassin de la Seine
IGBP	International Geosphere-Biosphere Program
IPCC	International Panel for Climate Change (= GIEC)
ISLSCP	International Satellite Land Surface Climatology Project
MCG	Modèle de Circulation Générale
MES	Matières En Suspension
MS	Matière Sèche
MT	Moyenne Technologie (concernant l'évolution des rejets ponctuels à l'horizon 2050)
OTEX	Orientations Technico-économiques des Exploitations agricoles
PAC	Politique Agricole Commune
PRA	Petites Régions Agricoles
RGA	Recensement Général de l'Agriculture
RNB	Réseau National de Bassin (données observées de qualité de l'eau)
SCEES	Service Central des Enquêtes et Etudes Statistiques (Ministère de l'Agriculture)
SDAGE	Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SEQ-Eau	Système d'évaluation de la qualité de l'eau officialisé par le MATE en 1999
SRES	Synthesis Report on Emission Scenarios
STEP	STation d'EPuration
STH	Surface Toujours en Herbe
TSM	Température de Surface de la Mer
TSVA	Transferts Sol-Végétation-Atmosphère
UMR	Unité Mixte de Recherche

Agriculture biologique	Mode de culture basé sur l'observation et le respect des lois de la vie, qui consiste à nourrir les plantes non pas directement avec des engrais solubles, mais par les êtres vivants du sol qui élaborent et fournissent aux plantes tous les éléments dont elles ont besoin.
Agriculture de conservation	Son objectif est de conserver, d'améliorer et de mieux utiliser les ressources naturelles liées à la gestion des sols, de l'eau et de l'activité biologique par différentes pratiques qui visent à diminuer la dégradation des sols : <ul style="list-style-type: none"> - absence de retournement profond du sol et implantation des cultures en semis direct ; - maintien d'un couvert végétal permanent (mort ou vivant) ; - adoption judicieuse de cultures dans une rotation longue.
Agriculture raisonnée	Mode de production d'une exploitation agricole qui vise à concilier le respect de l'environnement, la sécurité sanitaire et la rentabilité économique.
Assolement	Somme des occupations agricoles du sol sur une année donnée
Ordre de Strahler	Descripteur de la position d'un tributaire dans le réseau hydrographique : les tributaires du premier ordre sont ceux qui n'ont pas d'affluents (en tête de bassin); deux tributaires du premier ordre forment un tributaire du second ordre, lequel ne peut recevoir latéralement que des affluents du premier ordre ; un tributaire du troisième ordre est formé par la confluence de deux affluents du deuxième ordre, etc.
Séquences techniques	Suite ordonnée des interventions culturales portées sur un couvert végétal pour en tirer une production
Succession de culture	Suite ordonnée de cultures implantée sur une même parcelle sur un pas de temps pluri-annuel
Système de production	Combinaison des productions dans une exploitation

9.2. Liste des documents annexés sur CD-Rom

9.2.1 Notes techniques du projet

- Brisson, N. (2003). Influence de l'augmentation du CO₂ sur les perturbations d'ETP, *Note technique du projet GICC-Seine*.
- Ducharne, A. (2002). Projet GICC-Seine : questions relatives à l'ETP, *Note technique du projet GICC-Seine*.
- Ducharne, A. et Gomez, E. (2003). Les données climatiques du projet GICC-Seine, *Note technique du projet GICC-Seine*.
- Viennot, P., Ledoux, E., Gomez, E. et Baubion, C. (2004). Modélisations hydrogéologiques effectuées au moyen du logiciel MODCOU et de la chaîne de modélisation STICS/MODCOU/NEWSAM (EMP/CIG) : Impact sur l'hydrodynamique superficielle et profonde, impact sur la qualité des eaux souterraines, Note technique, Centre d'Informatique Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 74 pp.

9.2.2 Rapports

- Abu Alkhair, A. (2003). Prospective et scénarios de la pollution de l'eau " domestique et industrielle " à l'horizon 2050 dans le bassin de la seine : les contraintes anthropiques, ENGREF: 61.
- Baubion, C. (2004). Impact du changement climatique sur le bassin de la Seine, *Mémoire du DEA "Hydrologie, Hydrogéologie, Géochimie et Géostatistiques"*, Université Paris VI, 74 pp.
- Curie, F. et Ducharne, A. (2003). Perfectionnement du modèle CaB: paramétrisation de la résistance stomatique en relation avec la photosynthèse, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 25 pp.

- Ducharne, A. et Déqué M. (2003). Le bassin de la Seine face au changement climatique : comparaison de deux scénarios climatiques, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 22 pp.
- Ducharne, A., Viennot, P., Théry, S. et Ledoux, E. (2004b). Vers une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine sous changement climatique, *Rapport d'activité 2003 du programme PIREN-Seine*.
- Ducos, G. (2003). Prospective et changement climatique : six images des systèmes agricoles du bassin de la Seine en 2050, *Rapport du DEA "Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles"*, Université Paris X Nanterre, Paris, 92 pp.
- Gomez, E., Viennot, P. et Ledoux, E. (2003). Influence du changement climatique sur le transfert d'azote dans les sols et les aquifères, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 4 pp.
- Kieken, H. and A. Abu Alkhair (2004). Prospective non climatique du bassin versant de la Seine : préparation des données de flux de pollution pour les simulations réalisées dans le cadre du projet GICC-Seine, GICC-Seine: 14.
- Latu, M. (2003). Vers une modélisation des relations entre température de l'eau et température de l'air. *Mémoire de Maîtrise de l'Université Pierre et Marie Curie*, 32 pp.
- Mignolet, C., Schott, C., Mari, J.-F. et Benoit, M. (2003). Typologie des successions de cultures et des techniques culturales dans le bassin de la Seine. *Rapport d'activité 2002*, Programme PIREN-Seine.
- Mignolet, C., Schott, C. et Benoit, M. (2004). Dynamique des pratiques agricoles, *Rapport d'activité 2003 du programme PIREN-Seine*.
- Olive G. (2002). Prospective et changement climatique: six scénarios pour l'agriculture du bassin de la Seine à l'horizon 2050, *Rapport du DEA "Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles"*, INA P-G, Paris, 110 pp.
- Poux, X. et Olive, G. (2003). Prospective agricole sur le bassin de la Seine, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine*, 23 pp.
- Poux, X., Ducos, G., Benoit, M. et Schott, C. (2004). Simulation prospective des pertes nitriques dans l'hydrosystème Seine en 2050 : traduction de scénarios macro-économiques de l'agriculture en images spatialisées des systèmes agraires du bassin de la Seine, *Rapport d'activité 2003 du programme PIREN-Seine*.

9.2.3 Articles

- Ducharne, A. Théry, S., Viennot, P., Ledoux, E. Gomez, E., Déqué, M. (2004a). Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. *VertigO* : Vol. 4, No. 3.
- Ducharne, A. (2004). Adaptation d'un schéma de surface à vocation hydrologique au contexte hydrogéologique du bassin de la Seine. *Actes des Ateliers de Modélisation de l'Atmosphère 2004*, 4 pp.
- Gomez E., Ledoux E, Viennot P, Mignolet C, Benoit M, Bornerand C, Schott C, Mary B, Billen G, Ducharne A, Brunstein D. (2003) : Un outil de modélisation intégrée du transfert des nitrates sur un système hydrologique: application au bassin de la Seine. *La Houille Blanche* : No. 3/2003 .
- Mignolet C., Schott C., Benoît M. Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory : a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. *Agronomie*, 24 : 219-236.
- Poux, X. et Olive, G. (2003). Agriculture et changement climatique : quelle analyse du scénario tendanciel en matière de lutte contre les GES ? Les enseignements d'une recherche prospective sur le bassin de la Seine. *Responsabilité et Environnement*, Octobre 2003 : 45-61.

9.3. Liste des Tableaux et Figures

Figure 1 : Topographie et réseau hydrographique du bassin de la Seine.....	4
Figure 2 : Répartition spatiale des précipitations annuelles dans le bassin de la Seine (données SAFRAN -CROCUS, moyenne 1970-1990).....	5
Figure 3 : Caractéristiques des 4 modèles mis en oeuvre et de leurs couplages.....	8
Figure 4 : Discrétisation du bassin versant de la Seine selon CaB, en 29 sous-bassins unitaires. La couleur verte indique le pourcentage de forêt dans notre application. Le réseau hydrographique principal apparaît en bleu, et les points localisent les 20 stations de jaugeage exploitées pour la calibration du modèle (Poses en rouge, Paris en noir).....	10
Figure 5 : Comparaison des écoulements observés et simulés par CaB : moyennes décennales à Poses entre le 1 ^{er} août 1985 et le 31 juillet 1991.....	11
Figure 6 : STICS/MODCOU/NEWSAM : Organisation spatiale des unités de simulation en fonction des données météorologiques, pédologiques et agricoles.....	13
Figure 7 : Concentrations en nitrate calculées (50 années de simulation) et mesurées en 2000.....	14
Figure 8 : Comparaison à Poses de la simulation de validation du modèle Riverstrahler avec les données observées disponibles sur la période 1986-1990 (source : RNB). Les barres horizontales bleues, vertes, jaunes et oranges marquent les limites entre les classes de qualité Très bonne, Bonne, Passable, Mauvaise et Très mauvaise du SEQ-Eau.....	15
Figure 9 : Segmentation du bassin de la Seine en 12 zones homogènes sur lesquelles se réalisent les simulations STICS et STICS/MODCOU/NEWSAM.....	18
Figure 10 : 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.....	21
Figure 11 : Impact des 12 scénarios de CC sur les bilans d'eau simulés par le modèle CaB dans le bassin de la Seine. Les valeurs représentées sont des différences par rapport au climat actuel.....	24
Figure 12 : Synthèse de l'impact des 12 scénarios de CC sur les bilans d'eau simulés par le modèle CaB dans le bassin de la Seine. La courbe noir correspond aux valeurs « actuelles » (Août 1985-Juillet 1991), la courbe bleue à la moyenne des 12 simulations d'impact, et les pointillés à leur écart type autour de cette moyenne. L'enveloppe bleue définit la gamme de variation couverte par les 12 simulations d'impact, où sont distinguées les 4 simulations sous scénario de CC AREGE et LMD6...	26
Figure 13 : Evolution du débit moyen annuel calculé sous scénario ARPEGE NEWA2.....	27
Figure 14 : Evolution mensuelle comparée du débit moyen de la Seine calculé à Poses et plage de variation relative par rapport au débit moyen actuel selon les 4 scénarios de CC étudiés.....	27
Figure 15 : Production totale de biomasse aérienne par culture (t MS ha ⁻¹) sous les différents climats considérés : Actuel (365ppm), ARPEGE NEW B2 (610 ppm) et A2 (850 ppm), ARPEGE OLD (708 ppm).....	28
Figure 16 : Scénario ARPEGE-A2 : Carte des concentrations en nitrates à la base de la zone sous-racinaire ; les variations relatives sont rapportées à la simulation de référence sous climat actuel.....	30
Figure 17 : Variations relatives des concentrations simulées sous scénario ARPEGE NEW A2 par rapport au climat de référence après 50 et 100 ans de simulation.....	31
Figure 18 : Modèle général des relations entre objets de recherche de la prospective.....	32
Figure 19 : Variation relative des flux d'eau drainés vers les nappes et des flux de nitrates : rapport agriculture raisonnée / agriculture actuelle, sous climat actuel (moyenne sur 1970-1989).....	36
Figure 20 : Concentration en nitrates simulée dans la nappe de la Craie à l'horizon 2100 par STICS/MODCOU/ NEWSAM sous agriculture raisonnée et poursuite du climat actuel ; valeurs absolues (à gauche), variations relatives par rapport à la simulation de référence sous climat et pratiques agricoles actuelles (à droite).....	36

Figure 21 : Croisement des scénarios « agriculture raisonnée » et ARPEGE NEW A2 : variations absolues des flux de nitrates sous racinaire (à gauche) et relatives des concentrations en nitrates dans les eaux d'infiltration (à droite), par rapport à la simulation de référence.....	37
Figure 22 : Impact croisé des scénarios « agriculture raisonnée » et ARPEGE NEW A2 sur la nappe de la Craie : concentrations en nitrate calculés à l'horizon 2100 et leurs variations relatives par rapport à la simulation de référence (climat et pratiques agricoles actuels).....	37
Figure 23 : Impact des scénarios de l'évolution des rejets ponctuels sur la qualité de l'eau simulée à Poses par le modèle Riverstrahler.	42
Figure 24 : Impact du CC ARPEGE NEW A2, sans intégrer son effet sur la teneur en nitrates des aquifères, sur la qualité de l'eau simulée à Poses par le modèle Riverstrahler.....	43
Figure 25 : Impact des 12 scénarios de CC, sans intégrer son effet sur la teneur en nitrates des aquifères, sur la qualité de l'eau simulée à Poses par le modèle Riverstrahler.....	43
Figure 26 : Impact du CC ARPEGE NEW A2 sur la teneur en nitrates simulée à Poses à l'horizon 2100 par Riverstrahler, en intégrant son effet sur la teneur en nitrates des aquifères.....	44
Figure 27 : Impacts croisés de l'agriculture raisonnée, du scénario de CC ARPEGE NEW A2 et de la technologie d'épuration des rejets sur la qualité de l'eau simulée à Poses à l'horizon 2100 par Riverstrahler.....	45
Figure 28 : 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. Les lettres réfèrent aux MCG 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% CO ₂ /an.....	46
Tableau 1: Représentativité des cultures dans les successions et les 12 zones simulées par STICS et comparaison simulations/statistiques agricoles (rendements aux normes en t/ha).....	12
Tableau 2: Exemple de données contenue dans la base de données « pratiques agricoles actuelles» du projet GICC-Seine.....	18
Tableau 3: Traitement des données technico-économiques issues du RGA 2000 permettant de reconstituer la combinaison des ateliers au sein d'une OTEX.....	18
Tableau 4 : Description des différentes simulations de CC ARPEGE. Les quatre dernières lignes donnent les différences CC-REF moyennes de précipitation, température et humidité de l'air à 2 m et rayonnement infra-rouge incident.....	20
Tableau 5 : Description des neuf simulations de CC complémentaires à résolution grossière.....	21
Tableau 6 : Statistiques des 12 simulations de CC exploitées, en terme de température et précipitations.....	22
Tableau 7 : Coefficients multiplicateurs des perturbations mensuelles d'ETP, utilisés par les modèles STICS et MODCOU.....	23
Tableau 8 : Statistiques des impacts simulés par CaB selon les 12 scénarios de CC. La dernière colonne donne la différence des impacts moyens simulés selon les 4 scénarios A2 et les 4 scénarios B2.....	25
Tableau 9: Taux de réussite (1 ^{ère} colonne) et dates moyennes de récolte (2 ^{ème} colonne) des cultures. Les valeurs entre parenthèses indiquent le nombre de jours d'avance par rapport au climat actuel....	28
Tableau 10 : Variations relatives de biomasse et de rendement induites par le CC par rapport au climat actuel.....	28
Tableau 11: Valeurs moyennes annuelles du bilan d'eau , du bilan d'azote, de la concentration nitrique de l'eau drainée en zone agricole et du stock de carbone organique du sol, simulés par STICS en fonction du climat.....	29

Tableau 12 : Scénarios de cadrage retenus pour la prospective agricole du bassin de la Seine.....	32
Tableau 13 : Déclinaison des hypothèses des scénarios de cadrage pour les systèmes agricoles du bassin.....	33
Tableau 14 : Hypothèses d'évolution des systèmes de production sous trois scénarios (1, 3, 6). Abréviations : Bett : betterave ; Oprot : oléoprotéagineux ; CI : cultures industrielles ; Four.Cult. : Cultures fourragères ; B : bovins ; VA : vache allaitante ; VL : vache laitière.....	34
Tableau 15 : Biomasse produite et quantité d'azote prélevée par les cultures intermédiaires avec le scénario agricole "raisonné" (AR) en fonction du climat.....	35
Tableau 16 : Biomasse et rendement simulés pour les cultures principales (moyenne de toutes les cultures) en croisant les scénarios climatique et agricoles.....	35
Tableau 17: Quantité d'azote lessivé vers les nappes et concentration moyenne de l'eau drainée en croisant les scénarios climatique et agricoles.....	35
Tableau 18 : Synthèse des simulations STICS/MODCOU/NEWSAM en terme de pollution nitrique des aquifères. Les résultats sont relatifs aux aquifères modélisés les plus proches de la surface et donc les plus accessibles par forage (Craie sauf où recouvert par Eocène sauf où recouvert par Oligocène). Les chiffres en italiques sont les différences avec la simulation de référence.....	38
Tableau 19 : Principaux déterminants des rejets ponctuels de pollutions.....	38
Tableau 20 : Rejets totaux de pollutions en 2050.....	39
Tableau 21 : Description des 31 simulations Riverstrahler réalisées dans le cadre du projet GICC- Seine.....	40