

## RÉPONSE À L'APR GICC 2001

### A. Récapitulatif du projet

#### Titre du projet:

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

Mots-clés : Bassin de la Seine, Qualité de l'eau, Hydrologie, Aquifères, Agriculture, Polluants diffus, Gestion de l'eau, Eutrophisation.

Thèmes de l'APR concernés: Cette proposition s'intègre dans le thème 3 « Évaluation, impacts et stratégies d'adaptation au risque climatique ». Elle relève plus particulièrement du thème 3.2 « Les hydrosystèmes », mais concerne également le thème 3.3 « L'agriculture ».

#### Responsable scientifique:

**Agnès DUCHARNE**

Chargée de recherche CNRS

UMR Sisyphe, CNRS-Université Pierre et Marie Curie, Paris

Adresse: UMPC Boite 123, 4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

Tél: 01.44.27.51.27 Fax: 01.44.27.51.25

Mèl: ducharne@biogeodis.jussieu.fr

Organisme gestionnaire des crédits : Université Pierre et Marie Curie (pour l'UMR Sisyphe),  
4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05.

Organismes partenaires : UMR Sisyphe  
CIG/ENSMP (par l'intermédiaire d'ARMINES),  
INRA (Stations de Laon et Mirecourt),  
ENGREF (et bureau d'étude AscA)

**Participation demandée à GICC (TTC): 380 415.37 Euros TTC**

Budget prévisionnel total (TTC) : 722 019.18 Euros TTC

Cofinancements assurés prévus (TTC) : 341 603.81 Euros TTC

Durée : 24 mois

### **Résumé du projet de recherche et résultats attendus en termes de gestion:**

Notre objectif est d'étudier l'influence du changement climatique, en relation avec les changements des contraintes anthropiques directes, sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine. Ce projet ne se limite pas aux aspects hydrologiques du changement climatique. Il vise aussi à analyser les conséquences directes et indirectes des modifications climatiques sur les flux biogéochimiques et sur la qualité des écosystèmes aquatiques.

Ce travail repose sur une démarche analytique, qui commence par découpler les différentes composantes du système, avant d'analyser leurs réponses croisées. On séparera ainsi (1) les forçages de l'hydrosystème, dont l'évolution sera appréhendée grâce à des MCG pour le climat, et par des méthodes prospectives originales pour les autres contraintes ; (2) l'hydrosystème lui-même (réseau hydrographique de surface et barrages réservoirs associés, aquifères, et bassin versant agricole), dont le fonctionnement sera simulé par les modèles du PIREN-Seine. Ces modèles permettront notamment d'explorer l'impact d'une large gamme de scénarios croisés de changement du climat et des autres contraintes, et d'identifier les points de rupture du système, afin de caractériser une enveloppe de vulnérabilité de l'hydrosystème Seine.

Ce projet cherche en outre à intégrer l'analyse des conséquences du changement climatique dans le cadre d'une réflexion prospective plus large prenant en compte les autres facteurs de changement induits par l'activité humaine sur ce système déjà très anthropisé. Une attention particulière sera accordée au secteur de l'agriculture (qui fait l'objet d'une modélisation explicite), mais d'autres contraintes anthropiques directes seront aussi étudiées. Parmi celles-ci, on distinguera celles dont l'évolution peut être conditionnée par le changement climatique (climatisation, usage industriel de l'eau pour le refroidissement, traitement de l'eau, loisirs...) de celles qui sont a priori indépendantes de ce dernier (démographie, urbanisation...). Une réponse importante de ce volet du travail est d'évaluer l'ordre de grandeur de impacts du changement climatique par rapport à ceux d'autres tendances d'évolution du système Seine.

Enfin, le dernier volet du projet proposé est d'envisager, au-delà des impacts « physiques » du changement climatique sur l'hydrosystème, les conséquences de celui-ci en terme de gestion de l'eau. Cet aspect, qui vise à fournir des réponses opérationnelles, sera développé en collaboration avec les professionnels de la gestion de l'eau qui sont partenaires du programme PIREN-Seine.

### **Articulation avec des programmes régionaux, nationaux et européens:**

Cette proposition émane du programme PIREN-Seine, co-financé par le CNRS et les principaux acteurs de la gestion de l'eau dans le bassin de la Seine. Elle bénéficiera à ce titre des acquis de 10 ans de travail et de collaborations au sein de ce programme, en terme de modélisation et de réflexion prospective notamment. Ce projet bénéficiera en outre du retour d'expérience du projet « GICC Rhône », auquel les participants du CIG/ENSMP sont également associés.

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

### **Signatures des principaux responsables:**

Agnès Ducharne  
Coordinatrice

Gilles Billen  
Directeur scientifique du GdR PIREN-Seine

Alain Tabbagh  
Directeur de l'UMR Sisyphe

## B. Descriptif du projet

### 1. Justification du projet de recherche

#### *1.1. Le changement climatique et ses conséquences sur les hydrosystèmes*

La réalité d'un **réchauffement global** dû à l'augmentation des gaz à effet de serre (GES), et notamment du CO<sub>2</sub> atmosphérique, fait l'objet d'un consensus de plus en plus affirmé (Houghton et al., 1996; Watson, 2000). Ce consensus repose sur la convergence de nombreux éléments de preuve, relatifs i) aux tendances de la température au cours des derniers siècles (e.g. Mann et al., 1998), ii) à la comparaison de telles tendances avec la variabilité naturelle du système climatique (e.g. Hegerl et al., 1997), et iii) aux simulations, par les modèles de circulation générale (MCG), du changement climatique qui pourrait résulter d'augmentations variées des GES.

Les études les plus récentes de l'**IPCC** (International Panel for Climate Change) 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 (Watson, 2000). Dans tous les modèles, les augmentations les plus fortes sont réalisées dans les régions polaires et subpolaires, du fait des rétroactions positives entre la température, les quantités de neige et de glace, et l'albédo. Les modèles simulent aussi un réchauffement plus important des masses continentales que des océans, et de l'hémisphère Nord que de l'hémisphère Sud.

Par rapport au cycle de l'eau, ce réchauffement global sur le cycle de l'eau entraîne une augmentation de l'évaporation et, par suite, des précipitations moyennes à l'échelle du globe. Les variations de précipitation constituent une des incertitudes majeures quant aux effets potentiels de l'augmentation de CO<sub>2</sub>, à cause notamment de la mauvaise connaissance des mécanismes de rétroaction entre processus radiatifs, convection et couverture nuageuse (Cess et al., 1993). De plus, ces incertitudes augmentent à l'échelle régionale (Kittel et al., 1998). C'est en particulier le cas en Europe, où ces auteurs trouvent que les changements de précipitation moyenne estivale simulée ont des signes différents selon les MCG. Le changement le plus probable en Europe correspond cependant à une **intensification des contrastes hydrologiques**, avec des risques accrus d'inondations en hiver et de sécheresses en été.

Il importe de préciser la nature de ces risques, et d'étudier leur conséquences sur le fonctionnement des hydrosystèmes continentaux, car celui-ci, sous son double aspect de l'hydrologie et de la biogéochimie (nutriments, oxygène, biomasse), définit la **ressource en eau**, en terme de quantité et de qualité respectivement. La plupart des études de l'impact potentiel du changement climatique sur les hydrosystèmes ont porté sur l'hydrologie superficielle, c'est-à-dire sur les débits et les régimes de crue et d'étiage. C'est le cas des travaux de Lettenmaier et al, (1999) et Cohen, (1991) sur des bassins nord-américains, d'Arnell (1996) sur des cours d'eau anglais, ou de Golaz (1999) sur le bassin du Rhône. En revanche, les études concernant l'hydrologie du domaine souterrain sont plus rares (Bouraoui et al., 1999), de même que celles relatives à la **qualité des eaux**.

Celle-ci est pourtant susceptible d'être affectée par le changement climatique de multiples manières, récapitulées par Arnell (1998). Tout d'abord une augmentation de la **température de l'eau**, provoquée par l'augmentation de la température de l'air, peut modifier la cinétique des différents processus biogéochimiques. Cependant, Jenkins et al (1993) ont montré que cet effet était secondaire au Royaume-Uni par rapport à celui des changements de débits et de régime hydrologique.

Ces derniers contrôlent en effet les mécanismes de transfert et de transformation des principaux éléments biogènes par leurs effets sur la dilution, la sédimentation et les temps de rétention. Les travaux relatifs au fonctionnement biogéochimique du continuum aquatique (des petits cours d'eau aux zones estuariennes et côtières en passant par les annexes hydrauliques stagnantes ; Billen et al., 1994 ; Billen & Garnier, 1997) ont ainsi montré que le **régime hydrologique** exerce une influence particulièrement forte sur le fonctionnement écologique des hydrosystèmes quand ceux-ci sont soumis à de fortes pressions anthropiques directes (enrichissement prononcé en nutriments dû à l'agriculture et aux pollutions urbaines, aménagements

hydrauliques). 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 (Conley et al., 1993). L'origine et la solubilité variable de ces éléments rendent leurs rapports très sensibles aux modifications du régime hydrologique. Celui-ci peut donc entraîner un basculement complet du mode de fonctionnement des écosystèmes eutrophisés, au même titre que les changements d'usage du sol ou d'activité humaine sur le bassin versant (Billen & Garnier, 1997), avec lesquels existent en outre des interactions complexes.

Il convient enfin de rappeler que le changement climatique 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; Rounsevell, 1999; 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 CO<sub>2</sub> (différente pour les plantes en C<sub>3</sub> ou C<sub>4</sub> comme le maïs), est en interaction avec les modifications du régime hydrique et thermique des sols. Ceci fera varier les flux d'éléments biogènes dans les sols, notamment la quantité d'azote minéral mise à disposition des plantes ainsi que les pertes d'azote par dénitrification (avec libération de N<sub>2</sub>O et N<sub>2</sub> dans l'atmosphère) ou lessivage des **nitrates** (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) vers les aquifères et les hydrosystèmes superficiels. Par ailleurs, le stress en eau des cultures pouvant être modifié par le changement climatique, tout comme les flux d'eau vers les aquifères (Bouraoui et al., 1999), il peut résulter un changement des stratégies d'**irrigation** des cultures. L'enjeu principal est d'explicitier la part des évolutions des activités agricoles liée au contexte agricole (Agenda 2000 de la PAC, évolution des marchés et des démographies d'exploitations) et celle liée aux évolutions climatiques.

Ce bref inventaire des effets possibles du changement climatique montre surtout la complexité de la réponse des écosystèmes, dès que l'on tente de l'appréhender sous le double aspect de l'hydrologie et de la biogéochimie. Cette complexité s'accroît encore avec l'anthropisation, et les connaissances actuelles dans ce domaine se limitent de fait à des généralités. Pour dépasser ce stade, et rendre plus opérationnelles les connaissances, il est indispensable de les développer sur des sites d'étude bien ciblés, où les couplages hydrologie-biogéochimie peuvent être abordés de manière concrète. L'**échelle régionale** (50 000 à 100 000 km<sup>2</sup>) s'impose à cet égard, parce qu'elle représente à la fois la limite inférieure de résolution des modèles de prévision climatique et une dimension pour laquelle il est encore possible d'élaborer des outils opérationnels en matière d'hydrologie et de fonctionnement biogéochimique. C'est aussi l'échelle à laquelle peut se concevoir un dialogue efficace entre la recherche et la décision gestionnaire.

## ***1.2. Le programme PIREN-Seine***

Le bassin de la Seine (73 000 km<sup>2</sup>) est un des bassins fluviaux français les plus fortement anthropisés, tant par la présence de la mégapole parisienne, que par l'agriculture céréalière particulièrement intensive qui y est pratiquée. Ce système régional est l'objet du programme PIREN-Seine, initié par le CNRS en 1989. Ce programme est désormais un groupement de recherche (GdR) du CNRS, et il fait partie du réseau de Zones Ateliers du Programme Environnement, Vie et Société du CNRS. Il est de plus soutenu par la plupart des acteurs publics ou privés de la gestion de l'eau dans le bassin de la Seine. Ce sont les acquis de plus de **10 ans de travail et de collaborations** au sein de ce programme qui permettent aujourd'hui d'aborder concrètement l'évaluation de l'impact possible du changement climatique en liaison avec les pressions anthropiques directes.

L'objectif des études menées dans le PIREN-Seine ne s'est en effet pas limité à dresser un constat descriptif de l'état du milieu, et une réalisation majeure fut de développer une **large gamme d'outils** d'analyse et de modélisation du fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine. Les modèles développés ont cherché à établir le lien entre les processus fondamentaux et le fonctionnement macroscopique de l'écosystème, tel qu'il se manifeste par les flux de matière (eau, nutriments, etc.) entre ses principaux constituants et par leurs variations spatio-temporelles. Ainsi, la cinétique des processus biogéochimiques a été étudiée et validée expérimentalement, ce qui a rendu possible une démarche de **modélisation déterministe**, affranchie de la nécessité d'un calage des paramètres sur les observations spatio-temporelles des variables de qualité de l'eau que le modèle vise précisément à expliquer. Le développement des différents modèles hydrologiques a également tendu vers une augmentation de leur déterminisme, en privilégiant la description des processus sur des bases physiques plutôt que par des paramétrisations de type « boîtes noires » devant être calibrées. Cette démarche déterministe permet de pouvoir appliquer ces modèles à des conditions pouvant être

très éloignées de celles qui ont prévalu à leur développement et leur validation, avec une fiabilité *a priori* bien supérieure à celle des modèles ayant recours à une simple calibration. Cette **transférabilité** est un atout majeur dans le cadre de la prospective climatique.

Un ensemble de modèles emboîtés et compatibles, parce qu'utilisant les mêmes variables d'état et la même description des cinétiques biogéochimiques, a ainsi été développé pour simuler le fonctionnement des différents éléments de l'hydrosystème Seine (réseau hydrographique de surface, barrages réservoirs, aquifères). Ces modèles, bien que constamment remaniés et enrichis, sont maintenant **opérationnels et largement validés**. Ils ont de plus déjà fait leurs preuves pour simuler des scénarios précis d'aménagement (projets d'amélioration de l'infrastructure d'assainissement de la région Ile-de-France, application de la directive européenne sur les eaux résiduaires urbaines en zones sensibles, lutte contre l'eutrophisation,...). Nous décrivons ci-dessous les modèles qui sont utiles dans le contexte de la présente proposition (Figure. 1).

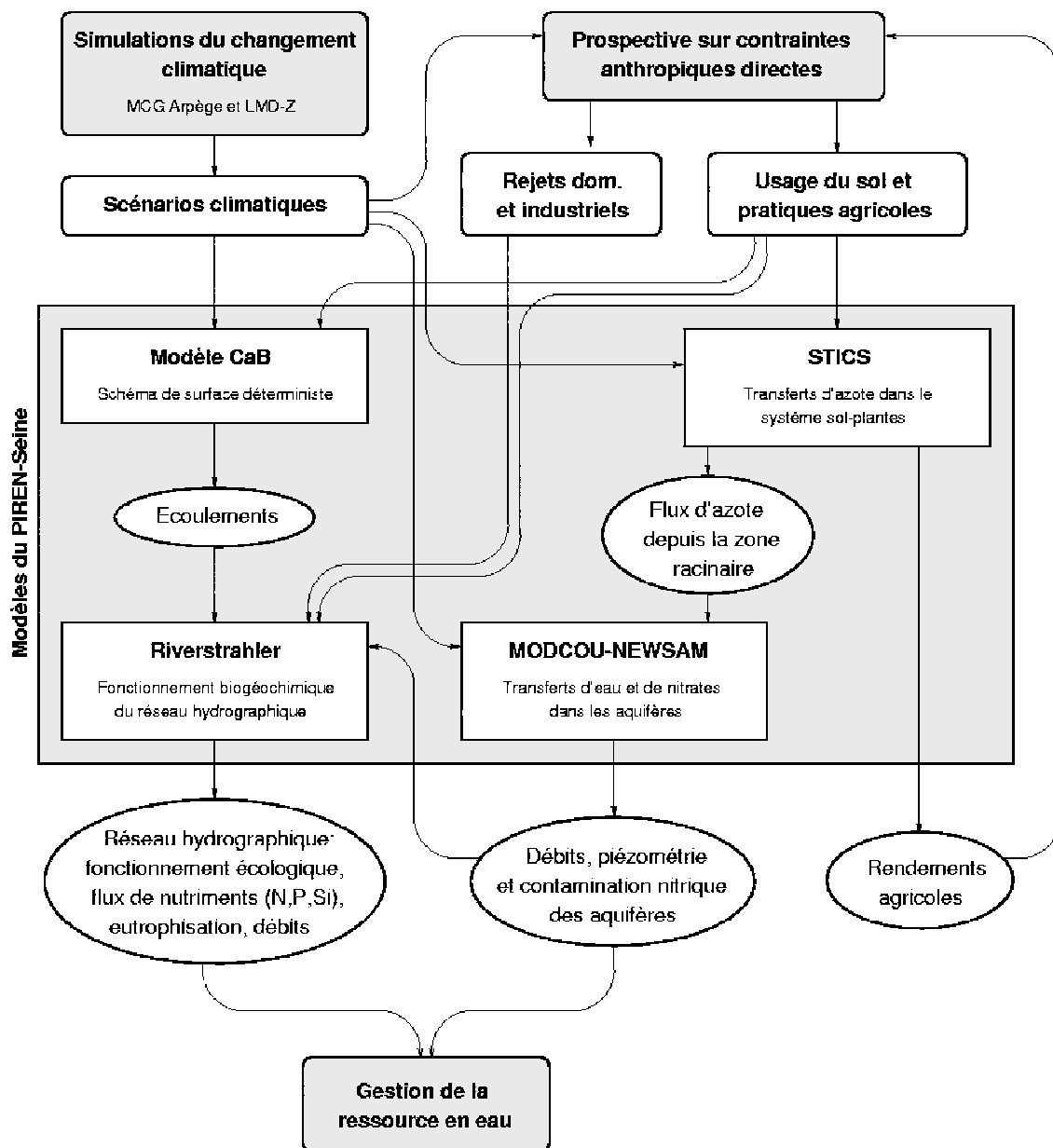


Figure 1 : Dialogue des outils d'analyse et de modélisation de l'hydrosystème Seine dans le cadre du projet GICC.

### 1.2.1. Le modèle Riverstrahler

Il permet de calculer les variations saisonnières et géographiques du développement algal, de l'oxygénation et des transformations et transferts de nutriments (N, P, Si), à l'échelle de **grands réseaux hydrographiques**, en réponse aux contraintes morphologiques, hydrologiques et climatiques, ainsi qu'aux apports ponctuels et diffus résultants de l'activité humaine sur le bassin versant (e.g. Billen et al., 1994; Garnier et al., 1995).

Il résulte du couplage d'un modèle détaillé des processus microbiologiques responsables du fonctionnement **biogéochimique** des écosystèmes aquatiques (module RIVE) avec un modèle **hydrologique**. Celui-ci calcule les bilans d'eau en fonction de 4 paramètres, qui traduisent les effets conjugués du sol, du sous-sol et de la végétation sur les écoulements. Les caractéristiques de l'écoulement (profondeur du lit et la vitesse des masses d'eau, indispensables quand on s'intéresse aux processus écologiques) sont ensuite simulées en fonction des caractéristiques géomorphologiques du réseau hydrographique, idéalisé selon une arborescence de Strahler (1957) pour les ordres inférieurs (amont du bassin). Riverstrahler simule également les principales annexes du réseau hydrographique, et notamment les grands **barrages réservoirs** qui ont un impact majeur dans le bassin de la Seine. Enfin, son interfaçage avec une base de données sous SIG<sup>1</sup> rend possible d'automatiser la création des nombreux fichiers d'entrée représentant les contraintes géomorphologiques et celles qui sont liées à l'activité humaine (occupation du sol, pratiques agricoles, rejets des agglomérations urbaines).

Les 4 paramètres du bilan d'eau doivent être calibrés empiriquement, et dépendent notamment du climat considéré. Pour augmenter la **transférabilité** du modèle Riverstrahler à des conditions climatiques variées, il a récemment été couplé à un schéma de surface déterministe, qui décrit l'influence du climat sur les écoulements sur des bases physiques (Ducharne et al., 2001). Ce modèle **CaB**, pour « Catchment-Based » (Ducharne et al., 1999; Koster et al., 2000), combine une approche de type SVAT (« Soil-Vegetation-Atmosphere Transfers ») pour les bilans énergétiques et leur contrôle par la végétation, à une approche basée sur TOPMODEL (Beven, 1979) pour gérer les écoulements superficiels et profonds et la redistribution latérale associée de l'humidité dans le bassin. Originellement développé pour les modèles de circulation générale (MCG), il est particulièrement adapté pour faire le **lien entre hydrologie et climat**. Par ailleurs, et comme son nom l'indique, l'unité élémentaire retenue pour le traitement des processus de surface n'est pas une maille régulière mais le bassin versant, tout comme dans le modèle Riverstrahler. Cette convergence constitue un atout de choix pour le couplage de ces modèles.

Le modèle CaB a montré des performances très satisfaisantes dans les bassins de l'Arkansas et de la Red River (550 000 km<sup>2</sup>) pendant la période 1980-1986 (Ducharne et al., 2000), et sur le bassin de la Seine pour les années 1987-1988 (Ducharne et al., 2001). Son couplage avec Riverstrahler dans ce bassin a donc permis de commencer à explorer la **sensibilité du fonctionnement de l'hydrosystème à des variations climatiques**. Ce travail a notamment montré que l'augmentation de la température de l'eau n'avait pas d'effet majeur sur le fonctionnement biogéochimique de la Seine, en accord avec les résultats de Jenkins et al. (1993). Par rapport à l'intensification possible des contrastes hydrologiques évoquée en introduction, c'est l'intensification des sécheresses estivales (étiages plus sévères) qui représente la menace la plus forte sur la qualité de l'eau (appréhendée en terme d'eutrophisation et d'oxygénation).

### 1.2.2. Modélisation des transferts d'eau et de nitrates dans les aquifères.

Pour appréhender les transferts de nitrates d'origine agricole dans les eaux souterraines, une **démarche interdisciplinaire** a été mise en place au sein du PIREN-Seine. Elle repose sur la mise en oeuvre conjointe :

- 1) d'une méthode d'analyse spatialisée des pratiques agricoles (choix des couverts végétaux et des conduites culturales) et de leur évolution,
- 2) de la simulation du bilan d'eau et d'azote dans les systèmes culturaux par le modèle agronomique STICS,
- 3) du modèle hydrologique MODCOU/NEWSAM, représentant la circulation de l'eau et des nitrates (traités comme des traceurs conservatifs) dans le système multicouche d'aquifères qui caractérise le bassin de la Seine.

---

<sup>1</sup> Système d'Information Géographique

La description spatialisée des **pratiques agricoles** et de leur évolution dans le bassin de la Seine repose sur un important programme d'analyse, basé sur les informations statistiques du SCEES et du Ministère de l'Agriculture ainsi que sur des interviews d'experts. Ce travail a permis de rendre compte de l'évolution depuis 1970 des systèmes de culture (successions culturales et fertilisations), spatialisés en « petites régions agricoles » (PRA), en nombre d'environ 150 sur tout le bassin de la Seine (Benoît et al., 2000; Mignolet et al., 2001).

Le **modèle STICS** (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle agronomique qui simule les flux d'eau, de carbone et d'azote dans le système sol-plante, sur une ou plusieurs années successivement (Brisson et al., 1998). Il calcule à la fois des grandeurs agronomiques, comme la biomasse végétale, les rendements en produits récoltés, le bilan azoté de la culture,... mais aussi des grandeurs environnementales comme les flux d'eau et de nitrates sortant de la zone racinaire. Les forçages climatiques utilisés par le modèle au pas de temps journalier, sont la radiation solaire, la température minimale et maximale, les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Il simule en outre l'effet de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> et de l'irrigation, ce qui est particulièrement intéressant dans le cadre du changement climatique. Le travail engagé dans le cadre du PIREN-Seine a permis d'étendre les capacités du modèle STICS aux cultures dominantes du bassin de la Seine. Le domaine forestier n'a pas encore été traité, mais ce n'est pas déterminant, puisque les fuites de nitrate sont faibles sous forêt et que le bilan hydrique peut être simulé par les autres modèles du PIREN-Seine. Le modèle STICS a de plus été spatialisé de manière compatible avec MODCOU, en vue du couplage de ces deux modèles.

**MODCOU** (Ledoux, 1980 ; Ledoux, 1984 ; Ledoux et al. 1989) est un modèle hydrologique à discrétisation spatiale, qui couple les écoulements superficiels et souterrains. Ce modèle calcule chaque jour des bilans hydriques locaux, à l'aide de fonctions de production à réservoirs. Les lames écoulées en surface et infiltrées dans le domaine souterrain sont transférées au réseau hydrographique, via le système aquifère pour les secondes. Le modèle MODCOU permet donc de calculer les variations piézométriques des aquifères et les débits écoulés dans les cours d'eau, en fonction des forçages atmosphériques (ETP, précipitations). Le couplage récent (Gomez et al., 2001) entre les flux d'eau en entrée du système aquifère calculés par MODCOU et les flux de nitrates simulés par STICS permet enfin d'alimenter la fonction de transfert de solutés implantée dans le programme **NEWSAM**, qui simule les transferts souterrains d'eau et de matière, en parfaite cohérence avec MODCOU (Cabon, 1993, Geng, 1988).

La **chaîne de modélisation** intégrant les modèles ci-dessus sera testée en 2001 dans le cadre du programme PIREN-Seine, à l'échelle du bassin du Grand-Morin tout d'abord, puis sur la Marne et enfin sur le bassin de la Seine tout entier, afin de comprendre la contamination en nitrates des aquifères, en relation avec l'évolution des pratiques agricoles. Ce travail permettra aussi de simuler les flux de nitrates des aquifères vers le réseau hydrographique, flux qui seront transmis au modèle Riverstrahler qui simule le transfert et la transformation des nitrates en rivière.

### 1.2.3. Complémentarité des outils

Les différents modèles présentés ci-dessus forment un ensemble très souple d'outils de prévision et d'analyse, facilement interfaçables car conçus de manière coordonnée. La manière dont ils peuvent « dialoguer » dans le cadre d'une thématique aussi complexe et multiforme que celle de la prospective climatique est illustrée par la figure 1. Riverstrahler est un modèle très maniable, peu exigeant en temps de calcul et en données d'entrées. Il fournit une description très complète du fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes de surface, dont le temps de réponse est de l'ordre de l'année. Il ne prend pas en compte les phénomènes caractérisés par une « mémoire » plus longue, tels que ceux qui gouvernent le devenir de l'azote dans les sols ou dans les aquifères. C'est le modèle STICS qui permet d'aborder la question de la dynamique du système eau-sol-plantes, sous un angle à la fois agronomique et biogéochimique. MODCOU/NEWSAM donne enfin une description rigoureuse des circulations souterraines d'eau et de nitrates sur le long terme, mais il est beaucoup plus lourd à mettre en oeuvre que Riverstrahler.

Le travail entrepris dans le cadre du PIREN-Seine présente un volet rétrospectif important, visant à décrire, à l'aide de cette panoplie d'outils, l'évolution historique du bassin de la Seine, qui éclaire l'état présent du système. L'**aspect prospectif** ne concerne pour l'instant que les influences anthropiques directes. En particulier, l'évolution de l'agriculture et de l'aménagement du territoire font l'objet du développement de méthodes prospectives originales (Duvernoy et al., 1995; Kieken, 1999). L'impact du changement climatique n'est pour l'instant pas considéré, et c'est ce volet que nous proposons de développer dans le cadre du programme GICC.

## 2. Objectifs scientifiques, aspects innovants et résultats attendus

Le but de la présente proposition est d'étudier l'influence du changement climatique, en relation avec les changements des contraintes anthropiques directes, sur la **ressource** en eau dans le bassin de la Seine. Ce projet ne se limite pas aux aspects hydrologiques du changement climatique. Il vise aussi à analyser les conséquences directes et indirectes des modifications climatiques sur les flux biogéochimiques et sur la **qualité** des écosystèmes aquatiques. On distingue trois objectifs principaux:

2. Le premier objectif sera de caractériser une **enveloppe de vulnérabilité** du système, à partir des points de rupture de l'hydrosystème. Ce travail repose en grande partie sur l'exploitation des modèles du PIREN-Seine pour explorer l'impact de divers scénarios croisés de changement climatique et de changement des pressions anthropiques directes sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du système Seine. Les composantes principales du système Seine prises en compte dans cette étude sont celles sur lesquelles portent les outils de modélisation présentés ci-dessus (Figure 1):

- Les différents secteurs du réseau hydrographique de surface, dont la qualité et le fonctionnement seront définis par les variations saisonnières des variables suivantes : débits, oxygène dissous, teneur en nutriments (N, P, Si), biomasse bactérienne, algale et zooplanctonique, production primaire et respiration,
- Les différentes formations aquifères, définies par leur niveau piézométrique moyen et la concentration en nitrates de leurs eaux,
- Le système agricole, défini par les principales cultures, leur extension spatiale, leur rendement et les itinéraires techniques associés.

3. Ce projet cherche en outre à intégrer l'analyse des changements climatiques possibles dans le cadre d'une **réflexion prospective plus large** prenant en compte les autres facteurs de changement induits par l'activité humaine sur ce système déjà très anthropisé. Une attention particulière sera accordée au secteur de l'agriculture, qui fait l'objet d'une modélisation explicite, mais d'autres contraintes anthropiques directes seront aussi étudiées. Parmi celles-ci, on distinguera celles dont l'évolution peut être conditionnée par le changement climatique (climatisation, usage industriel de l'eau pour le refroidissement, traitement de l'eau, loisirs...) de celles qui en sont a priori indépendantes (démographie, urbanisation...). Une réponse importante de ce volet du travail est d'évaluer l'ordre de grandeur des impacts du changement climatique par rapport à ceux d'autres tendances d'évolution du système Seine.

4. Enfin, le dernier volet du projet proposé est d'envisager, au-delà des impacts « physiques » du changement climatique sur l'hydrosystème, les conséquences de celui-ci en terme de **gestion de l'eau**. Cet aspect, qui vise à fournir des réponses opérationnelles, sera développé en collaboration avec les professionnels de la gestion de l'eau qui sont partenaires du programme PIREN-Seine.



### 3. Méthodologie

Ce projet de recherche repose sur une **démarche analytique**, qui commence par découpler les différentes composantes du système, avant d'analyser leurs réponses croisées. On séparera ainsi:

- les forçages de l'hydrosystème, dont l'évolution sera appréhendée grâce à des MCG pour le climat, et par des **méthodes prospectives** originales pour les autres contraintes. Ainsi, nous ne chercherons pas à fournir une prospective globale de l'évolution du système Seine, mais à proposer un jeu de scénarios plausibles, basés bien sûr sur des évolutions des composantes climatiques et socio-économiques à l'échelle du bassin versant, et conduisant à des évolutions particulièrement contrastées de l'hydrosystème. L'objectif sera en effet d'« encadrer » les conséquences possibles du changement climatique sur le bassin de la Seine.
- l'hydrosystème lui-même, qui seul fera l'objet d'une **modélisation** explicite. Cette modélisation détaillée distingue elle-même trois éléments, sur la base de leur temps caractéristique de réponse. Si le réseau hydrographique répond au changement des contraintes en l'espace d'une année, la dynamique du système sol agricole est plus lente, notamment à cause de l'inertie induite par les compartiments de 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 une modélisation conduite sur une période de stabilisation du même ordre. Ces différents temps de réponse déterminent aussi la « maniabilité » des modèles correspondants et la lourdeur des procédures de simulations à mettre en oeuvre.

**Plus concrètement**, le projet comporte plusieurs étapes, dont certaines peuvent faire l'objet d'itérations :

1. Construction de scénarios de changement climatique sur le bassin de la Seine à partir des simulations de deux MCG d'origine différente (LMD et Météo-France).
2. Construction de scénarios d'évolution des contraintes anthropiques directes. Ce volet distingue l'étude des tendances évolutives de l'agriculture, l'évaluation de la viabilité des pratiques résultantes sous changement climatique, et une analyse prospective d'autres contraintes anthropiques directes susceptibles d'influencer l'hydrosystème.
3. Analyse extensive, à l'aide du modèle CaB-Riverstrahler, de la sensibilité de la réponse « rapide » de l'hydrosystème de surface aux changements ci-dessus, permettant une première évaluation de sa vulnérabilité, ainsi qu'une sélection de scénarios contrastés pour le modèle MODCOU, plus coûteux en temps de calcul.
4. Influence de ces scénarios contrastés sur le niveau piézométrique et la contamination en nitrates des nappes à l'aide du modèle STICS/MODCOU/NEWSAM.
5. Couplage de STICS/MODCOU/NEWSAM avec Riverstrahler pour évaluer l'impact sur le l'hydrosystème complet et mieux définir l'enveloppe de vulnérabilité de l'hydrosystème.
6. Rétrocession des différents résultats (modélisation détaillée de l'impact de quelques scénarios contrastés + étude de vulnérabilité) aux professionnels de la gestion de l'eau dans le bassin de la Seine, en vue de d'identifier les principaux enjeux du changement climatique en terme de gestion de l'eau.

Il est important de noter que l'**apparente complexité** de la démarche, qui nécessite un dialogue entre plusieurs modèles, et de fréquents allers-retours entre modèles et recherche prospective (pour la construction des scénarios), est conditionnée par la complexité du système étudié. Elle n'est cependant pas un obstacle dans le cadre de la présente proposition, puisque les équipes aussi bien que les modèles dialoguent déjà de manière efficace au sein du PIREN-Seine.

Ce projet bénéficiera en outre du retour d'expérience du projet « **GICC Rhône** », auquel les participants du CIG/ENSMF sont également associés. Notre proposition n'est cependant pas une simple transposition de la méthodologie développée sur le Rhône. En effet, elle apporte l'originalité d'analyser l'impact du changement climatique sur le fonctionnement non seulement hydrologique, mais aussi biogéochimique et écologique d'un grand hydrosystème régional.

## 4. Programme de travail

### 4.1. Construction des scénarios de forçage de l'hydrosystème

#### 4.1.1. Construction de scénarios de changement climatique

Nous construirons ces scénarios selon la stratégie très usitée qui consiste à **perturber les données météorologiques « actuelles »**, c'est-à-dire issues d'observations récentes, par des perturbations représentant le changement climatique. Les données actuelles pour la chaîne de modèles STICS-MODCOU-NEWSAM ont été reconstituées sur les 30 dernières années au pas de temps journalier. Elles ont été interpolées, pour les 10 dernières années, sur un maillage régulier de 8 km x 8 km correspondant au maillage de ces modèles, au moyen du système SAFRAN, par les soins de Météo-France. Pour le modèle CaB-Riverstrahler, nous venons d'acquérir les données météorologiques nécessaires<sup>2</sup> (au pas de temps horaire) pour les années 1988-1999, qui sont représentatives de la moyenne et de la variabilité du climat observé depuis les années 50 sur le bassin de la Seine. Ces données sont distribuées en 123 stations, qui couvrent les 29 bassins unitaires de manière suffisamment régulière pour pouvoir interpoler leurs valeurs ponctuelles à des valeurs moyennes pour chacun de ces bassins. Ce travail d'interpolation sera réalisé grâce au SIG ArcInfo.

Les perturbations ajoutées aux données « actuelles » seront basées sur les différences de climat simulées par des MCG en cas de doublement de CO<sub>2</sub>. Ces modèles constituent en effet le meilleur outil actuellement disponible pour envisager la réponse du climat à l'augmentation des gaz à effet de serre. Les méthodes alternatives se limitent aux méthodes des analogues temporels ou spatiaux (Arnell, 1994) ou à la construction de scénarios arbitraires. Pour le modèle CaB, les perturbations seront directement constituées par les différences 2xCO<sub>2</sub> – 1xCO<sub>2</sub> pour chacune des variables météorologiques de CaB, qui sont toutes simulées par les MCG. Un forçage important des autres modèles utilisés dans ce projet est l'ETP, qui n'est pas directement simulée par les MCG, mais sera calculée selon la formule de Penman.

##### 4.1.1.a. Définition de deux scénarios de référence

Les MCG, ainsi que leurs paramétrisations des processus physiques, sont 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). Il semble donc fondamental de disposer de plusieurs scénarios, dont les différences donnent une idée de la marge d'incertitude du changement climatique potentiel.

Nos scénarios perturbés seront ainsi basés sur le changement climatique simulé par deux MCG : le modèle Arpège (Météo-France, Déqué et al, 1998) et le modèle LMD-Z (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Ces deux MCG partagent la caractéristique d'un **maillage variable**, qui est plus dense dans une région dite « zoom ». Ceci 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 des MCG à maillage régulier, qui sont elles-mêmes sujettes à incertitudes, et ne font pas encore l'objet d'un consensus (Hutjes et al., 1998).

Deux simulations de 10 ans, représentant le climat en conditions 1xCO<sub>2</sub> et 2xCO<sub>2</sub> (concentrations de CO<sub>2</sub> actuelles et doublées respectivement), ont été réalisées avec chacun de ces modèles, et sont résumées dans le tableau 1. Sur le bassin de la Seine (couvert par 20 à 30 mailles), ces deux MCG s'accordent sur une augmentation de la température de surface moyenne d'environ +2°C. Ils simulent en revanche des **changements opposés de précipitation annuelle moyenne** (augmentation selon Arpège, diminution selon LMDZ). L'utilisation de ces deux modèles permettra donc une première prise en compte des incertitudes du changement climatique simulé.

---

<sup>2</sup>Les données météorologiques requises par le schéma de surface CaB sont la précipitation et le rayonnement incident à la surface, ainsi que la température, l'humidité de l'air et la vitesse du vent à proximité de la surface.

**Tableau 1:** *Caractéristiques principales des simulations Arpège et LMD-Z.*

	<i>Arpège</i>	<i>LMD-Z</i>
Résolution sur le bassin de la Seine	≈ 80 x 80 km <sup>2</sup>	≈ 100 x 100 km <sup>2</sup>
Durée des simulations	10 ans	10 ans
Valeurs des SST <sup>a</sup> « actuelles »	Simulées par HadCM2 <sup>b</sup> pour les années 1984-1994	Climatologiques (pas de variabilité interannuelle)
Valeurs des SST 2xCO <sub>2</sub>	Simulées par HadCM2 pour les années 2054-2064	Climatologiques + moyennes mensuelles des différences simulées par HadCM2 entre
Variations de précipitation annuelle moyenne dans le bassin de la Seine	<i>Augmentation</i>	<i>Diminution</i>

<sup>a</sup> SST = Température de surface de la mer (Sea Surface Temperature).

<sup>b</sup> HadCM2 : MCG couplé océan atmosphère du Hadley Center utilisé pour simuler l'évolution du climat de 1860 à 2100, avec les concentrations observées de CO<sub>2</sub> jusqu'en 1990, et une augmentation de 1% par an à partir de cette date.

#### 4.1.1.b. *Traitement de l'incertitude du changement climatique*

Pour mieux décrire l'espace des possibles changements climatiques, nous proposons de constituer une large gamme de scénarios climatiques. On privilégiera les méthodes basées sur les changements 2xCO<sub>2</sub> – 1xCO<sub>2</sub> simulés par les deux MCG ci-dessus, car ces modèles garantissent une **cohérence physique** entre les différentes variables météorologiques. On pourra ainsi explorer des méthodes basées sur:

- les combinaisons linéaires variées des deux scénarios de référence,
- la sélection d'années extrêmes,
- des perturbations de la forme du cycle saisonnier à partir de l'analyse spectrale de ce dernier.

Nous proposons également d'exploiter les simulations de MCG proposées en accès libre par le Data Distribution Center de l'IPCC, et nous n'excluons pas la construction de scénarios arbitraires, sur une ou plusieurs variables, pour répondre à des questions spécifiques.

#### 4.1.2. **Construction de scénarios d'évolution des contraintes anthropiques directes**

##### 4.1.2.a. *Dynamique agricole, indépendamment du changement climatique*

De l'analyse détaillée de l'évolution et de la spatialisation des pratiques agricoles dans le bassin de la Seine au cours des 30 dernières années, nous tenterons de dégager les tendances lourdes d'évolution future de ces pratiques. Combinées à une réflexion prospective sur les autres aspects de l'anthropisation du système Seine (développement urbain, aménagements hydrauliques..., voir section 4.1.2.c), elles permettront de définir quelques scénarios spatialisés possibles d'évolution des pratiques agricoles à l'horizon d'une cinquantaine d'années. Il faut souligner que ces scénarios seront à ce stade indépendants du possible changement climatique.

La segmentation utilisée pour ces scénarios reprendra le maillage spatial en **Petites Régions Agricoles** qui a prouvé sa robustesse depuis 1947. Ainsi, nous disposerons d'un maillage qui tout en étant compatible avec celui des grands aquifères du bassin de la Seine (Benoit et al., 2000) garde un sens pour étudier les tendances prospectives des activités agricoles.

##### 4.1.2.b. *Viabilité des scénarios agricoles sous changement climatique*

Plusieurs simulations de 10 ans (avec variabilité interannuelle) seront réalisées en forçant le modèle STICS avec d'une part ces scénarios des pratiques agricoles futures, et d'autre part les scénarios climatiques ci-dessus (au moins une sélection parmi les plus représentatifs). Pour chacune de ces simulations seront calculés: i) les flux de nitrates quittant la zone racinaire, et ii) les rendements agricoles réalisés.

La viabilité sous changement climatique des différents scénarios d'évolution des pratiques agricoles sera alors analysée en référence aux rendements simulés : on considérera qu'un scénario croisé est viable si les

rendements simulés sont supérieurs à une valeur seuil. En cas de stress hydrique, on évaluera de plus le possible gain de productivité lié à l'irrigation. Il faut noter l'importance de l'expertise agronomique à ce stade, en ce qui concerne l'interprétation des résultats du modèle notamment.

#### 4.1.2.c. Prospective sur d'autres contraintes anthropiques susceptibles d'influencer l'hydrosystème

Si la complexité de la réponse des écosystèmes au changement climatique en termes d'hydrologie et de biogéochimie nécessite, pour être appréhendée dans sa globalité, le recours aux modèles développés au sein du PIREN-Seine, un travail spécifique s'impose pour envisager de proposer un jeu de scénarios d'étude des impacts potentiels du changement climatique à l'échelle du bassin versant. Il s'agit d'abord d'élaborer des scénarios portant sur des **thèmes socio-économiques précis**, sélectionnés en fonction de leur pertinence en termes d'impact sur l'hydrosystème. Les thématiques agricoles feront l'objet de développements spécifiques (voir section 4.2.2.a). Un autre objectif est de mettre les évolutions liées au changement climatique **en perspective** de l'évolution d'autres contraintes anthropiques, en cherchant à quantifier les réponses aux deux questions suivantes : les changements climatiques envisagés pour l'hydrosystème peuvent-ils avoir des impacts significatifs sur d'autres compartiments socio-économiques ? Les ordres de grandeurs des impacts des scénarios retenus sont-ils significatifs au regard d'autres évolutions des pressions anthropiques ?

Ce travail prospectif très novateur repose sur les actions suivantes:

- (a) Un premier aspect sera d'identifier des scénarios d'évolutions des **contraintes anthropiques directes compatibles avec les scénarios climatiques** utilisés comme forçage des modèles. L'objectif est de compléter les jeux de scénarios que le projet de recherche vise à produire. Une attention particulière sera apportée au secteur de l'agriculture (voir section 4.2.2.a), mais d'autres contraintes anthropiques directes seront également étudiées (climatisation, loisirs, usages industriels de l'eau pour le refroidissement, traitement des eaux...). Il s'agira d'identifier un certain nombre de contraintes au regard de leur pertinence vis-à-vis des impacts du changement climatique sur l'hydrosystème, et d'élaborer, en collaboration avec les modélisateurs et les spécialistes des disciplines concernées, des scénarios d'évolution de ces contraintes.
- (b) On cherchera aussi à identifier des **contraintes anthropiques non influencées par le climat** mais dont les évolutions futures sont susceptibles d'avoir des impacts sur l'hydrosystème du même ordre de grandeur que ceux résultant du changement climatique (ex: démographie, urbanisation...). Comme ci-dessus, le travail consistera à identifier un certain nombre de ces contraintes en fonction de leur pertinence vis-à-vis des impacts du changement climatique sur l'hydrosystème, et à élaborer, en collaboration avec les modélisateurs et les spécialistes des disciplines concernées, des scénarios d'évolutions de ces contraintes. L'objectif de cet axe de recherche est de mettre les impacts possibles du changement climatique sur l'hydrosystème en perspective d'autres évolutions des contraintes anthropiques, indépendantes du climat.
- (c) Il faudra tester la **cohérence globale des différentes hypothèses**, de nature climatique ou socio-économiques. Le but n'est pas ici de proposer des scénarios socio-économiques exhaustifs, mais de s'assurer de la cohérence temporelle des différentes hypothèses et, le cas échéant, de mettre en évidence les contradictions existant entre elles.
- (d) Étant donné le caractère contingent (car souffrant de larges incertitudes) des forçages climatiques qui seront imposés aux modèles du bassin versant, l'objectif final est ici de construire des jeux de scénarios couplés changement climatique / contraintes anthropiques **contrastés par leurs résultats**. Ce critère de résultats rendra nécessaire le recours aux modèles du PIREN-Seine. On tentera en particulier de classer les différentes combinaisons d'hypothèses selon les trois catégories suivantes:
  - Combinaisons « Masque » : l'impact du jeu d'hypothèses sur l'hydrosystème vient amortir ou compenser celui résultant du changement climatique,
  - Combinaison « Amplificatrice » : l'impact du jeu d'hypothèses sur l'hydrosystème amplifie celui résultant du changement climatique,
  - Combinaison « Surdéterminante » : les ordres de grandeur des impacts du jeu d'hypothèses sont significativement plus importants que ceux résultants directement du changement climatique.

## **4.2. Analyse de l'impact des scénarios sur l'hydrosystème à l'aide des modèles du PIREN-Seine**

### **4.2.1. Impacts sur l'hydrosystème de surface: modèles CaB-Riverstrahler**

L'impact du changement climatique sur le fonctionnement de l'hydrosystème de surface sera exploré de manière extensive grâce au modèle Riverstrahler couplé au schéma de surface CaB, qui simule le fonctionnement hydrologique et biogéochimique de ce fleuve pour un faible coût de calcul. Nous privilégierons des simulations courtes (quelques années), suffisantes pour appréhender la réponse de l'hydrosystème aux changements climatiques moyens, ainsi que les relations entre hydrologie et biogéochimie superficielle.

#### *4.2.1.a. Impact du changement climatique seul*

Nous utiliserons dans un premier temps les caractéristiques actuelles du bassin de la Seine en terme d'occupation des sols et d'apports diffus et ponctuels de nutriments (répertoriées dans le cadre du PIREN-Seine). Une simulation de contrôle, représentative des conditions « actuelles », sera forcée dans ce cadre par la moyenne des données 1988-1999 acquises auprès de Météo-France. Ces données seront ensuite perturbées comme détaillé en section 4.1.1 pour créer une large gamme de scénarios climatiques qui forceront autant de simulations du fonctionnement de l'hydrosystème Seine.

Ces simulations seront comparées à la simulation de contrôle, et nous analyserons les modifications du fonctionnement :

- hydrologique : cycle annuel des débits, intensité et fréquence des crues, longueur et sévérité des étiages,
- biogéochimique : flux/stockage des nutriments le long du continuum aquatique jusqu'à la mer, bilans carbonés, rapports auto/hétérotrophie, eutrophisation, oxygénation.

L'extensivité de l'étude de sensibilité proposée permettra d'aborder le problème de l'impact du changement climatique par une démarche inverse, et de s'affranchir au maximum des incertitudes liées à ce dernier. Elle permettra d'abord de déterminer à quels facteurs (ou combinaison de facteurs climatiques) le fonctionnement de l'hydrosystème Seine est le plus **sensible**. Elle permettra surtout de déterminer l'amplitude de variation de ces facteurs qui devient pénalisante pour le système. Cet aspect reposera sur la recherche de « points de rupture » (en association avec les organismes gestionnaires du bassin) afin de caractériser une enveloppe de **vulnérabilité** du système. Celle-ci pourra être traduite en terme de risques quand des probabilités de vraisemblance deviendront disponibles pour les différents scénarios considérés.

#### *4.2.1.b. Impact des contraintes anthropiques directes et des scénarios croisés*

Le modèle CaB-Riverstrahler, du fait de son faible coût en temps de calcul, permettra une première analyse de l'ensemble des scénarios anthropiques, indépendamment du changement climatique et croisés avec celui-ci. L'objectif principal de ce travail préliminaire sera de sélectionner des scénarios climatiques et anthropiques contrastés pour aborder le domaine souterrain, qui nécessite des modèles plus coûteux en temps de calcul. Les résultats obtenus permettront aussi d'alimenter la réflexion prospective détaillée en section 4.1.2.c.

### **4.2.2. Impacts sur le domaine souterrain: modèles STICS-MODCOU-NEWSAM**

Les étapes précédentes du travail conduiront à sélectionner un nombre réduit de scénarios de changements climatiques et anthropiques pour une analyse croisée détaillée, incluant la prise en compte de la dynamique à long terme des systèmes aquifères. Cette analyse sera menée sur une période plus longue à l'aide du couplage des modèles STICS, MODCOU et NEWSAM.

Sont prévues 9 simulations, croisant 3 scénarios climatiques (conditions actuelles + 2 scénarios contrastés de changement climatique) et 3 scénarios des contraintes anthropiques directes (« business as usual » + 2 scénarios contrastés d'évolution agricole). Ces simulations seront réalisées sur une période de 30 ans correspondant au temps de réponse escompté des aquifères, en utilisant l'état actuel des nappes comme condition initiale. La paramétrisation de cet état actuel sera directement issu des résultats du modèle sur les 30

années passées, selon la démarche rétrospective du PIREN-Seine. Dans tous les cas, la variabilité climatique interannuelle sera celle des 30 années passées, et le changement climatique sera défini en ajoutant le cycle annuel moyen du scénario climatique retenu aux variables météorologiques des ces 30 années. Les flux de nitrates transférés depuis la zone racinaire seront fournis en forçant le modèle STICS par les mêmes scénarios.

Les neuf simulations seront analysées en terme de qualité des eaux (contamination azotée des nappes, apports diffus au bassin) et de ressources en eau (niveau piézométrique, débits dans le réseau de drainage superficiel).

#### **4.2.3. Impacts des scénarios croisés sur l'hydrosystème complet: couplage avec Riverstrahler**

Les concentrations moyennes en nitrates des aquifères calculées ci-dessus seront utilisées dans de nouvelles simulations de la qualité de l'eau et des flux biogéochimiques dans l'hydrosystème Seine par le modèle Riverstrahler. Tout d'abord, la comparaison de ces simulations avec leurs analogues du point de vue des scénarios climatiques et anthropiques, mais sans influence des nappes aquifères sur les flux de nitrates au bassin, éclairera l'**influence à long terme des nappes sur la qualité des eaux** (et notamment le fonctionnement écologique) dans le réseau hydrographique, mais aussi au niveau des zones côtières adjacentes de la Manche.

De plus, ce couplage permettra de faire la **synthèse** des différents impacts possibles du changement climatique (directs, ou indirects via les contraintes anthropiques) sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique de l'hydrosystème. On s'attachera plus spécifiquement aux points suivants, qui répondent aux objectifs définis en section 2:

- Les neuf simulations « complètes » permettront de mieux définir l'**enveloppe de vulnérabilité** de l'hydrosystème, car elles permettront d'aborder des réponses de l'hydrosystème dominées par des rétroactions entre climat et contraintes anthropiques.
- Les résultats des différentes simulations (complètes et incomplètes) permettront aussi de classer les combinaisons d'hypothèses correspondantes parmi les catégories « Masque », « Amplificatrice » et « Surdéterminante » définies en section 4.1.2.c. Ce travail permettra alors de mettre les impacts du changement climatique en perspective de ceux de possibles évolutions du contexte socio-économique du bassin versant, dont l'ordre de grandeur peut-être au moins équivalent. Cette **mise en perspective** est nécessaire pour aborder rigoureusement les conséquences du changement climatique sur la gestion de l'eau.

#### **4.3. Conséquences sur la gestion de l'eau: rétrocession des résultats aux gestionnaires du bassin**

Il entre dans les objectifs de la présente proposition de fournir une évaluation des impacts ci-dessus en terme de gestion de l'eau dans le bassin. 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 les rétroactions inévitables entre ces différentes composantes. 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 de manière opérationnelle. Dans le cadre de cette stratégie, nous proposons donc d'aborder les problèmes liés à la gestion de l'eau grâce à un atelier de réflexion, organisé avec les principaux acteurs de cette gestion dans le bassin (AESN, GLS, MATE...).

## **5. Tâches dévolues et calendrier d'exécution**

Cinq équipes participeront en étroite collaboration au projet :

	<i>Équipes</i>	<i>Personnes</i>	<i>Statut</i>	<i>% temps</i>	<i>Total en mois</i>
1.	UMR Sisyphe: UPMC	A. Ducharne G. Billen J. Garnier M. Meybeck X.	Chargée de recherche Directeur de recherche Directrice de recherche Directeur de recherche CDD niveau ingénieur	70% / 2 ans 20% / 2 ans 20% / 2 ans 5% / 2 ans 50% / 2 ans	17 5 5 1 12
2	UMR Sisyphe: CIG/ENSMP (ARMINES)	E. Ledoux P. Viennot E. Gomez	Directeur de recherche Ingénieur de recherche Post-doctorant	10% / 2 ans 20% / 2 ans 85% / 2 ans	2.5 5 20
3	INRA Laon: Unité d'Agonomie	B. Mary N. Beaudoïn X.	Directeur de recherche Ingénieur de recherche Post-doctorant	5% / 2 ans 20% / 2 ans 100% / 1 an	1 5 12
4	INRA Mirecourt: UR Systèmes Agraires et Développement	M. Benoit C. Mignolet X.	Directeur de recherche Ingénieur de recherche Post-doctorant	15% / 2 ans 20% / 2 ans 100% / 1 an	3.5 5 12
5.	ENGREF: Equipe RGTE (et AsCA)	L. Mermet X. Poux H. Kieken X.	Professeur Chercheur associé (AsCA) Thésitif CDD niveau ingénieur	10% / 2 ans 20% / 2 ans 50% / 2 ans 100% / 8 mois	2.5 5 12 8
	<b>5 équipes</b> (4 laboratoires)	<b>18 personnes</b>			<b>≈ 133 mois</b>

La répartition des tâches et leur calendrier d'exécution sont résumés dans le tableau suivant :

Tâches	Équipes	Année 1		Année 2	
		Semestre 1	Semestre 2	Semestre 1	Semestre 2
<i>Construction des scénarios de forçage</i>					
1. Scénarios de changement climatique sur le bassin de la Seine	<b>1</b>	\u'			
2. Scénarios des tendances lourdes de l'agriculture	<b>4, 5</b>	\u'	\u'		
3. Viabilité des scénarios agricoles sous changement climatique	<b>2, 3</b>		\u'	\u'	
4. Prospective et scénarios sur d'autres contraintes anthropiques directes	<b>5</b>	\u'	\u'	\u'	
<i>Modélisation</i>					
5. Impacts des différents scénarios sur l'hydrosystème de surface	<b>1</b>		\u'	\u'	
6. Impacts sur le domaine souterrain	<b>2, 3</b>		\u'	\u'	
7. Impacts « physiques » sur l'hydrosystème complet	<b>1, 2, 3</b>			\u'	\u'
<i>Analyse des résultats</i>					
8. Caractérisation d'une enveloppe de vulnérabilité de l'hydrosystème	<b>1, 2, 3, 4, 5</b>			\u'	\u'
9. Mise en perspective de l'impact du changement climatique	<b>1, 2, 3, 4, 5</b>				\u'
10. Impacts en terme de gestion de l'eau: rétrocession aux gestionnaires du bassin	<b>1, 2, 3, 4, 5</b>				\u'

Outre les cinq équipes ci-dessus qui feront l'objet d'un financement dans le cadre du projet proposé, on peut noter plusieurs partenaires associés:

- les gestionnaires du bassin de la Seine associés au programme PIREN-Seine (Agence de l'Eau Seine-Normandie, Conseil Général d'Ile de France, DIREN Ile de France, EDF, Grands Lacs de Seine, Lyonnaise des Eaux, SAGEP, SIAAP, Syndicat des Eaux d'Ile de France, Voies Navigables de France),
- les laboratoires qui fourniront les simulations du changement climatique (Groupe de Météorologie à Moyenne Échelle du Centre National de Recherches Météorologiques / Météo-France, et Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS).

## 6. Valorisation

Outre les rapports contractuels établis pour le MATE, les résultats de cette recherche feront l'objet :

- de rapports d'avancement intégrés à l'ensemble des présentations annuelles des résultats du programme PIREN-Seine, et disponibles sur le site Web du programme,
- de présentation des résultats dans des colloques, et de publications dans des revues internationales de haut niveau.

L'atelier organisé avec les principaux gestionnaires des ressources des bassins (AESN, GLS, MATE...) sera aussi un outil de valorisation original. Il est en effet susceptible de permettre une anticipation de la réponse de ces gestionnaires au changement climatique, ce qui prend une importance nouvelle dans le contexte de la Directive Cadre récemment adoptée par les différents pays membres de l'Union Européenne.

## 7. Publications antérieures des équipes proposant

### 1. UMR Sisyphe / Paris VI : A. Ducharne, G. Billen, J. Garnier, D. Brunstein, M. Meybeck

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.

Billen, G. & Garnier, J., 1996: Les modifications historiques du cycle de l'azote aux échelles régionale et globale. *Nouvelles de la Science et des Technologies*, 14: 129-140.

Billen G. & Garnier J., 1997: The Phison River Plume: coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. *Aqu. Microb. Ecol.*, 13: 3-17.

Billen, G. & Garnier, J., 1999: Nitrogen transfer through the Seine drainage network: a budget based on the application of the RIVERSTRAHLER model. *Hydrobiologia*, 410: 139-150.

Billen, G., Garnier, J., Deligne, C. & Billen, C., 1999: Estimates of early-industrial inputs of nutrients to river systems: implications for coastal eutrophication. *The Science of the Total Environment*, 243/244: 43-52.

Billen, G., Garnier, J., Ficht, A. & Cun, C., 2001: Modelling water quality in the Seine river estuary in response to changes in human activity in the watershed over the last 50 years. Soumis à *Estuaries*.

Ducharne, A., Laval, K. & Polcher J., 1998: Sensitivity of the hydrological cycle to the parameterization of soil hydrology in a GCM, *Clim. Dyn.*, 14: 307-327.

Ducharne, A., Koster, R. D., Suarez, M. J. & Kumar, P., 1999: A catchment-based land surface model for GCMs and the framework for its evaluation. *Physics and Chemistry of the Earth*, B24:769-773.

Ducharne, A., Koster, R. D., Suarez, M. J., Stieglitz, M. & Praveen, K., 2000: A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part II: Parameter estimation and model validation. *J. Geophys. Res.*, 105 (D20): 24,823-24,838.

Ducharne, A. & Laval, K., 2000: Influence of the realistic description of soil water-holding capacity on the global water cycle in a GCM. *J. Climate*, 13: 4393-4413.



Ducharne, A., Brunstein, D., Billen, G. & Garnier, J., 2001: Couplage de Sénèque avec un modèle hydrologique à bases physiques et perspectives en matière d'impact du changement climatique. *Programme PIREN-Seine*, Rapport d'activité 2000, 14 pp.

Garnier J., Billen G. & Coste M., 1995: Seasonal succession of diatoms and chlorophyceae in the drainage network of the River Seine : Observations and modelling. *Limnol. & Oceanogr.*, 40: 750-765.

Garnier J., Billen G. & Palfner L., 1999: Understanding the oxygen budget and related ecological processes in the Mosel drainage network: the Riverstrahler approach. *Hydrobiologia*, 410: 151-166.

Garnier J., Leporcq B. Sanchez N. & Philippon, X., 1999: Biogeochemical budgets in three large reservoirs of the Seine basin. *Biogeochemistry*, 47: 119-146.

Garnier J., Billen G., Sanchez N., & Leporcq, B., 2000: Ecological functioning of the Marne reservoir (upper Seine basin, France). *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, 16: 51-71.

Garnier J., Billen G., Hannon E., Fonbonne S., Videnina Y. & Soulie, 2000: Modeling transfer and retention of nutrients in the drainage network of the Danube River. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, sous presse.

Howarth R.W., Billen G, Swaney D., Townsend A., Jaworski N., Lajtha K., Downing J.A., Elmgren R., Caraco N., Jordan T., Berendse F., Freney J., Kudeyarov V., Murdoch P., & Zhao-Liang Z., 1996: Regional nitrogen budgets and riverine N and P fluxes for the drainages to the North Atlantic ocean: natural and human influences. *Biogeochemistry*, 35: 75-139.

Koster, R. D., Suarez, M. J., Ducharne, A., Stieglitz, M. & Praveen, K., 2000: A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part I: Philosophy and model structure. *J. Geophys. Res.*, 105(D20): 24,809-24,822.

Lancelot, C., Rousseau, V., Billen, G. & Van Eeckhout, D., 1997: Coastal eutrophication of the Southern Bight of the North Sea: assesment and modelling. In: *Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to anthropogenic and climatic changes*. NATO-ASI Series, 2: Environment, Vol 27. Springer Verlag, Berlin. pp. 439-453.

Meybeck, M., 1998: The IGBP Water Group: a response to a growing global concern. *IGBP-News*, 388:12-12.

Meybeck, M., Marsily, G. & Fustec, E., 1998: *La Seine en son bassin : Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier.

## 2. UMR Sisyphe / CIG EMP (Fontainebleau)

Cabon F., Girard G., Ledoux E., 1991: Modelling of the nitrogen cycle in farm land areas, *Fertilizer Research*, 27: 161-169.

Cabon F., 1993: Modélisation du cycle de l'azote dans le système sol-eau-plante du lysimètre au bassin hydrologique. *Thèse de Doctorat*, Université Pierre et Marie Curie.

Doussan C., Ledoux E., Detay M., 1998: River groundwater exchanges, bank filtration and groundwater quality : ammonium behavior, *J. Environ. Qual.*, 27: 1418-1427.

Geng Q. Z., 1988: Modélisation conjointe du cycle de l'eau et du transfert des nitrates dans un système hydrologique. *Thèse de Doctorat*, Ecole de Doctorat des Mines de Paris.

Golaz C., 1999: Modélisation hydrologique à l'échelle régionale appliquée au bassin du Rhône. Comparaison de deux modes de calcul des bilans hydriques de surface et étude de sensibilité à une perturbation des forçages climatiques. *Thèse de Doctorat*, Ecole de Doctorat des Mines de Paris.

Gomez, E., Ledoux, E., Mary, B., Ponsardin, G., Brunstein, D. Lebas, C. & Arrouays, D., 2001: Modélisation intégrée du transfert des nitrates sur le bassin de la Seine. *Programme PIREN-Seine*, Rapport d'activité 2000, 24 pp.

Guérin C., Ottlé C., Vidal-Madjar D., Golaz C., Ledoux E., Habets F., Lacarrère P., Noilhan J. & Martin E., 1996: The Rhône project. *Second International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle (GEWEX)*, 17-21 Juin 1996, Washington (USA).

Habets, F., Artinian, E., Etchevers, P., Golaz, C., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Noilhan, J., Ottlé, C. & Vidal-Madjar, D., 1998: Hydrological study of the Rhone watershed, *XXIIIth EGS General Assembly*, 20-24 Avril 1998, Nice (France).

Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J. P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Otlé, C. & Vidal-Madjar, D., 1999: The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I : model and data base, *Journal of Hydrology*, 217: 75-96.

Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J. P., Lacarrère, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Otlé, C. & Vidal-Madjar, D., 1999: The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part II: simulation of streamflows and annual water budget, *Journal of Hydrology*, 217: 75-96.

Ledoux E., 1980: Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et Université Paris VI.

Ledoux E, Girard G. & Villeneuve J. P., 1984: Proposition d'un modèle couplé pour la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique. *La Houille Blanche*, 1/2: 101-110.

Ledoux, E., Girard, G. & de Marsily, G., 1989: Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In : *Unsaturated flow in hydrologic modeling, Theory and practice*, Kluwer Academic Publishers, pp. 435-454.

### 3. INRA (Laon) :

Beaudoin, N., Mary, B. & Parnaudeau, V., 1999: Impact of agricultural scenarios on nitrate pollution at the catchment scale. Présentation orale, *10th Nitrogen Workshop*, 23-26 août 1999, Copenhague (DK).

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoulaud, 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, F., Nicoulaud, B., Tayot, X., Plénet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B. & Justes E.: STICS : un modèle générique pour simuler les cultures et leurs bilans hydrique et azoté. II. Evaluation par comparaison à la réalité expérimentale. Soumis à *Agronomie*.

Czernichowski, I., Bazerque, M.F., Groell, F., Beaudoin, N., Mary, B., Normand, B. & Mouvet, C., 2000: Transferts de nitrates et de pesticides à l'échelle d'un bassin versant : synthèse des suivis réalisés au niveau de la zone racinaire, de la zone non saturée, de la nappe et de la rivière dans le bassin pilote de l'Hallue (Somme). *Colloque ESRA*, 12-15 septembre 2000, Poitiers.

Garnier, P., Néel, C., Mary, B. & Lafolie, F., 2001: Evaluation of a nitrogen transport and transformation model in a bare soil. *European Journal of Soil Science*, sous presse.

Justes, E., Mary, B. & Nicolardot, B. (1999) Comparing the effectiveness of radish cover crop, oilseed rape volunteers and oilseed rape residues incorporation for reducing nitrate leaching. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55: 207-220.

Lafolie, F., Mary, B., Bruckler, L. & Ruy S., 2000: Modelling the agricultural and environmental consequences of non-uniform irrigation on a maize crop. 2. Nitrogen balance. *Agronomie*, 20: 625-642.

Lafolie, F., Mary, B., de Cockborne, A.M., Sevenier, G. & Mohrath, D.: Water application rate consequences on crop growth, water and nitrogen balances: experiments and modeling. Soumis à *Soil Science Society of America Journal*.

Leviel, B., Gabrielle, B., Justes, E., Mary, B. & Gosse, G., 1998: Water and nitrate budgets in an oilseed rape cropped rendzina soil with different amounts of fertilizer. *European Journal of Soil Science*, 49: 37-51.

Mary, B., 1997: Concluding remarks : N hazards to crops and environment. In: *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, G. Lemaire, Ed. Springer-Verlag, Chapter 13, pp. 229-236.

Mary, B., Beaudoin, N. & Benoît, M., 1997: Prévention de la pollution nitrique à l'échelle du bassin d'alimentation en eau. In : *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, G. Lemaire & B. Nicolardot, Eds. Les Colloques de l'INRA, 83: 289-312.

Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E. & Machet, J.M., 1999: Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soils using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50: 1-18.

Mary, B., Wylleman, R. & Guérif, J., 1999: Evolution des stocks de matière organique dans les sols cultivés: caractérisation et modélisation. Colloque *Nature et Fonctions des Matières Organiques dans l'Environnement*, 2-3 juin 1999, Versailles.

Nicolardot, B., Recous, S. & Mary, B., 2000: Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant and Soil*, 228, 83-103.

Nicoulaud, B., Couturier, A., Beaudoin, N., Mary, B., Coutadeur, C. & King, D., 1999: Modélisation spatiale à l'échelle parcellaire des effets de la variabilité des sols et des pratiques culturales sur la pollution nitrique agricole. *CR AIP Ecospace*, Les Colloques de l'INRA.

Parnaudeau, V., Beaudoin, N., Mary, B., Makowski, D. & Meynard, J.M., 1999: Simulation de l'impact de différents scénarios agronomiques sur les pertes de nitrate à l'échelle d'un bassin hydrologique. *CR AIP Ecospace*, Les Colloques de l'INRA.

Ter Steege, M.W., Stulen, I. & Mary B., 2001: Nitrogen in the Environment. In: *Plant Nitrogen*, P.J. Lea & J.F. Morot-Gaudry, Eds., INRA-Springer ISBN3-540-67799-2, pp.379-397.

#### 4. INRA (Mirecourt) :

Anfrue, M.-N., Benoit, M., Diot, F., Koerner, W., Mignolet, C., 1996: Regional guidelines to support sustainable landuse by E.U. Agrienvironmental programmes. *EU Research Programme*, French team 1996 report, pp. 58-72.

Benoit, M., 1994: Environmental issues: use of farming systems research/extension to resolve environmental and spatial problems. In: *Rural and farming systems analysis*, Dent, J.-B. & Mc Gregor, M.J., Eds. CAB International, pp. 167-177.

Benoit, M., Le Ber, F. & Bachacou J., 1994: Aerospace surveys and on farm research to manage groundwater resources. In: *Future of the land*, Fresco et al., Eds. John Wiley, pp. 345-346.

Benoit, M. & Muhar, M.C., 1994: Farmers, land use and groundwater quality: an interdisciplinary approach. In: *Future of the land*, Fresco et al., Eds. John Wiley, pp. 347-348.

Benoit, M., Saintot, D. & Gaury, F., 1995: Mesures en parcelles d'agriculteurs des pertes de nitrates. Variabilité sous divers systèmes de culture et modélisation de la qualité de l'eau d'un bassin d'alimentation. *CR Académie de l'Agriculture de France*, vol. 81, n° 4 : 175-188.

Benoit, M., Bonneau, M. & Dambrinne, E., 1997: Influence du sol et de sa mise en valeur sur la qualité des eaux infiltrées et superficielles. *L'Eurobiologiste*, Tome XXXI, n°230 : 53-58.

Benoit, M., Deffontaines, J.-P., Gras, F., Bienaimé, E. & Riéla-Cosserat, R., 1997: Agriculture et qualité de l'eau. Une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation. *Cahiers Agricultures*, 6 : 97-105.

Benoît, M., Chicoisne, G., Deffontaines, J.-P., Hervé, D., Lardon, S., Le Ber, F., Mullon, C., Papy, F., Souchère, V., Thinon, P., Tichit, M. & Treuil, J.-P., 1998: Coordonner des choix de cultures sous contraintes environnementales : des jeux de rôle aux modèles multi-agents. In : *Actes du colloque SMAGET-CEMAGREF*, Clermont-Ferrand, Octobre 1998 : 133-141.

Benoît, M. & Fizaine, G., 1999: Qualité des eaux en bassins forestiers d'alimentation. *Revue Forestière Française*, 2 : 162-172.

Benoît, M., Bornerand, C. & Mignolet, C. (avec la collaboration de Bienaimé E., Cosserat-Mangeot R., Mari J.F., Trommschlagel J.M.), 2000: *Rapport scientifique d'étape - Contrat de recherche INRA/CNRS - Programme PIREN Seine 1998-2001 : Evolution des pratiques agricoles dans l'est du bassin de la Seine de 1970 à nos jours*. Document de travail n°5 : 10 pages + annexes.

Duvernoy, I., Lardon, S., Albaladejo, C., Benoit, M., Langlet, A., Muhar, M.C. & Triboulet, P., 1994: Approche spatiale et fonctionnelle des relations entre activités agricoles et territoires. Construction d'une méthode de diagnostic. In: *Recherches-systèmes en Agriculture et Développement Rural*, Sébillotte, M. Ed. Symposium International, 21-25 novembre 1994, Montpellier. CIRAD, pp. 230-235.

Heydel, L., Benoît, M. & Schiavon, M., 1999: Reducing atrazine leaching by integrating reduced herbicide use with mechanical weeding in corn (zea mays). *European Journal of Agronomy*, 11 : 217-225.

Koerner, W., Cinotti, B., Jussy, J.H. & Benoît M., 2000: Evolution des surfaces boisées en France. Depuis le début du XIX<sup>ème</sup> siècle : identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue Forestière Française*, vol. LII, 3 : 249-269.

Le Ber, F. & Benoît, M., 1998: Modelling the spatial organisation of land use in a farming territory. Example of a village in the « Plateau Lorrain ». *Agronomie*, 18 (2) : 103-115.

Mignolet, C., Thenard, V. & Benoit, M., 1997: Livestock farming systems and sustainable drinking water production : proposition of risk indicators at different organisational levels. *EAAP 45th Annual Meeting*, 25-28 août 1997, Vienne, p. 202.

Mignolet, C., Thénard, V., Benoît, M., Anfrie, M.N., Foissy, D., Grosse, M. & Trommenschlager, J.M., 1999: Livestock farming systems and sustainable drinking water production : proposition of risk indicators at different organisational levels. *Livestock Production Science*, 61 : 307-313.

Mignolet, C., Benoît, M., Bornerand, C. & Mari, J.F., 2001: Méthodes de modélisation des dynamiques spatio-temporelles des activités agricoles dans le bassin de la Seine (soumis aux C. R. de l'Académie d'Agriculture).

## **5. ENGREF (équipe RGTE de Recherche en Gestion des Territoires et de l'Environnement) :**

Kieken, H., 1999: *Prospective Seine*, Mémoire de DEA, ENGREF / PIREN Seine.

Mermet, L., 1991: Policy exercises on Global Environmental Problems. In: *Global Interdependence Simulation and Gaming Perspectives*. Proceedings of the 22nd Interconference of the ISAGA, 15-19 juillet 1991, Kyoto, Japan, pp. 216 à 222.

Mermet, L., 1992: Une méthode de prospective : les exercices de simulation de politiques. *Natures, Sciences, Sociétés*, Vol. 1, n°1.

Mermet L. & Piveteau V., 1997: Pratiques et méthodes prospectives : quelle place dans les recherches sur l'environnement. In: *Les temps de l'environnement*, Actes des journées du PIREVS 1997, Toulouse.

Poux, X., Piveteau, V., Urien, R. & Mermet, L., 1997: Prospective des technologies agricoles et gestion du milieu - contributions et limites pour le débat sur la gestion de l'environnement. *Ingénieries EAT*, numéro spécial « Prospective et Environnement ».

Poux X., Mermet L., Bouni C., Dubien I. & Narcy J.B., 2000: *Méthodologie de prospective des zones humides à l'échelle micro-régionale - problématique de mise en œuvre et d'agrégation des résultats*. Rapport AscA/PNRZH, 101 pp. + annexes.

Poux, X., Piveteau, V., Urien, R. & Mermet, L., 2000: Prospective des technologies agricoles et gestion du milieu. In: *L'environnement au XXI<sup>ème</sup> siècle*, vol.II. GERMES.

## **8. Autres références bibliographiques**

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. & Reynard, N.S., 1996: The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *J. Hydrol.*, 183: 397-424.

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.

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.

Cess, R., Zhang, M., Potter, G. & others, 1993: Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general circulation models. *Science*, 262: 1252-1255.

- Cohen, S.J., 1991: Possible impacts of climatic warming scenarios on water resources in the Saskatchewan River sub-basin, Canada. *Clim. Change*, 19: 291-317.
- Conley, D., Schelske, C.L. & Stoermer, E., 1993: Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 101: 179-192.
- 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.
- 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.T., Meira Filho, L.G. & Callendar, B.A., 1996: *Climate Change 1995: The Second IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lettenmaier, D.P., Wood, A.W., Palmer, R.N., Wood, E.F. & Stakhiv, E.Z., 1999: Water resources implications of global warming: a U.S. regional perspective. *Clim. Change*, 43: 537-579.
- Mann, M., Bradley, R. & Hughes, M., 1998: Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392: 779-787.
- 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.
- 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.
- 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.
- Strahler, A. H. (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Geophys. Union Trans.* 38:913-920.
- Watson, T.R. (2000) Presentation of Robert T. Watson, Chair of the IPCC, at the *Sixth Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. November 13, 2000, The Hague, The Netherlands.