

Couplage de Sénèque avec un modèle hydrologique à bases physiques et perspectives en matière d'impact du changement climatique

Agnès Ducharne (UMR Sisyphe, Paris)

Daniel Brunstein (Laboratoire de Géographie Physique, UMR 8591, Meudon)

Gilles Billen (UMR Sisyphe, Paris)

Josette Garnier (UMR Sisyphe, Paris)

1. Introduction

Le fonctionnement des hydrosystèmes continentaux, sous son double aspect de l'hydrologie et de la biogéochimie (nutriments, carbone, O₂), définit la ressource en eau (en terme de quantité et qualité respectivement). La difficulté que pose son étude est d'intégrer les nombreux processus en jeu le long du continuum aquatique, et de comprendre l'influence respective de leurs différents forçages physico-chimiques. La **modélisation** s'impose comme outil privilégié pour de telles études, et le PIREN-Seine est à la pointe de la recherche dans ce domaine grâce au modèle Sénèque (Billen et al., 1994; Garnier et al., 1995), qui couple un modèle hydrologique au modèle écologique RIVE à l'échelle du bassin de la Seine tout entier.

Ce modèle Sénèque a notamment permis de démontrer l'**importance du régime hydrologique** (débit, vitesse et profondeur du cours d'eau, qui conditionnent la dilution des nutriments, la sédimentation et les temps de rétention, et qui sont fortement contrôlés par le climat et la morphologie du bassin) sur les mécanismes de transfert et transformation des principaux éléments biogènes (C, N, P, Si), en particulier lorsqu'ils sont soumis à de fortes pressions anthropiques directes, comme l'agriculture ou les pollutions urbaines (Billen et al., 1994; Billen & Garnier, 1997).

Le régime hydrologique, directement soumis au climat, est particulièrement important pour le fonctionnement biogéochimique des hydrosystèmes continentaux dans le cadre du **changement climatique**. En effet, la réalité d'un tel changement à la suite de l'augmentation des gaz à effet de serre fait l'objet d'un consensus de plus en plus large (Houghton et al., 1996). Dans ce cadre prospectif, il est important de disposer d'un modèle **transférable** à des conditions climatiques et d'anthropisation variées. La principale faiblesse de Sénèque à ce niveau est sa fonction de production des écoulements, puisque les bilans hydriques y sont contrôlés de manière complètement implicite par quatre paramètres, qui traduisent les effets conjugués du sol, du sous-sol et de la végétation sur les écoulements. Ils doivent donc être calibrés empiriquement, et dépendent notamment du climat considéré.

Le travail présenté ci-dessous consiste donc à **coupler** le modèle Sénèque à un schéma de surface déterministe, qui décrit l'influence du climat sur les écoulements sur des bases physiques (section 2). Les perspectives de ce travail pour étudier l'impact du changement climatique sur l'hydrosystème seront abordées ensuite (section 3).

2. Présentation du schéma de surface « CaB »

On désigne ici par schéma de surface un modèle qui simule l'ensemble des processus régissant les **bilans d'eau et d'énergie** au niveau du sol. Ces différents processus dépendent d'une part des conditions météorologiques, et d'autre part des propriétés de la surface (albédo, rugosité, indice de surface foliaire, physiologie du couvert végétal, propriétés hydriques des sols, etc.).

Le schéma de surface choisi pour être couplé au modèle Sénèque est le modèle « **CaB** », pour « Catchment-Based » (Ducharne et al., 1999; Koster et al., 2000). Originellement développé pour les modèles de circulation générale (MCG, qui simulent le climat et son évolution à l'échelle globale), 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**, comme dans le modèle Sénèque. Cette convergence constitue un atout de choix pour le couplage de ces modèles.

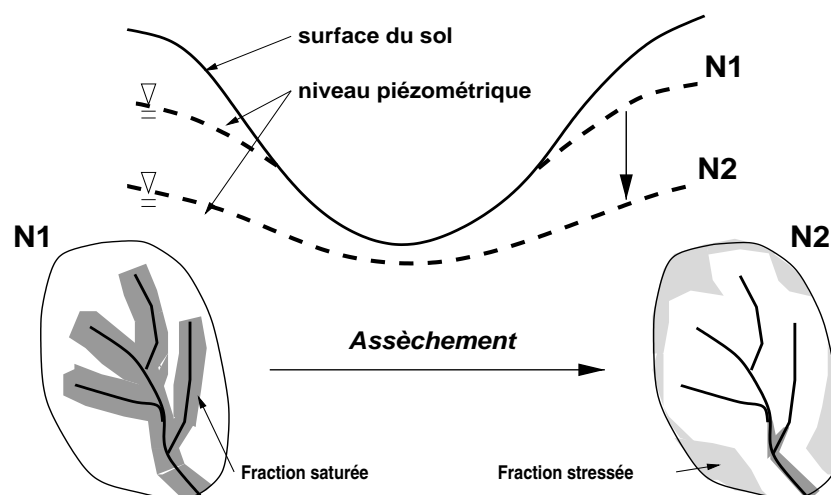


Figure 1: Principe d'utilisation de la topographie pour subdiviser un bassin versant en trois fractions (saturée, stressée, intermédiaire), dont la superficie varie en fonction de l'humidité du bassin.

D'un point de vue hydrologique, cette discrétisation spatiale en bassins versants permet de représenter la **variabilité spatiale** de l'humidité du sol, de l'évaporation et du ruissellement sur des bases physiques, en fonction de la **topographie**. Comme le montre la Figure 1, la topographie entraîne en effet une redistribution latérale de l'humidité dans les bassins versants, le degré de saturation augmentant des crêtes vers les talwegs. Cette variabilité latérale de l'humidité du sol s'accompagne évidemment d'une variabilité latérale du ruissellement et de l'évaporation, qui sont tous deux plus intenses au niveau des talwegs.

Le schéma de surface CaB définit donc une distribution latérale de l'humidité racinaire dans chaque bassin versant élémentaire, en fonction de l'humidité moyenne du sol et de la topographie, décrite en terme d'indice topographique (Beven and Kirkby, 1979; Sivapalan et al., 1987). La distribution de cet indice est caractérisée dans chaque bassin versant à partir d'un modèle numérique d'altitude (MNA) à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). La distribution de l'humidité, qui évolue dans le temps, permet à chaque pas de temps de **subdiviser le bassin en trois fractions, caractérisées par des régimes hydrologiques différents** (saturé, insaturé, stressé). Dans chacune de ces fractions, on peut alors décrire les différents processus de surface avec des paramétrisations adaptées au régime hydrologique.

Les processus considérés dans les bilans d'eau (couplés aux bilans d'énergie, par l'intermédiaire de l'évaporation notamment) sont les suivants:

- **L'évaporation** est composée de l'évaporation de l'eau interceptée par le feuillage, de la sublimation de la neige, de la transpiration et de l'évaporation du sol nu. Ces quatre flux sont décrits en fonction de résistances (Koster et Suarez, 1992), qui dépendent du type de végétation, et de divers stress environnementaux: humidité et température de l'air, et humidité du sol pour les deux derniers. Dans CaB, cette humidité dépend bien évidemment de la fraction considérée. Ainsi, la transpiration et l'évaporation du sol nu ont lieu au taux potentiel dans la fraction saturée. La transpiration reste au taux potentiel dans la fraction intermédiaire, et s'annule dans la fraction stressée où l'humidité est sous le point de flétrissement. L'évaporation du sol nu diminue quant à elle dans les fractions intermédiaire et stressée, mais n'est pas annulée dans cette dernière.
- La **partition entre ruissellement et infiltration** dépend bien sûr de l'humidité de la fraction considérée. Dans la fraction saturée, aucune infiltration n'a lieu, et toute l'eau disponible en surface ruisselle. Dans les deux autres fractions, l'infiltration est possible, et le ruissellement n'a lieu que quand l'intensité des précipitations excède la capacité d'infiltration du sol (qui diminue en fonction de l'humidité des premiers centimètres).
- L'**écoulement profond** correspond au drainage d'une nappe libre, décrite comme dans le modèle hydrologique TOPMODEL. Ce terme, assimilable au débit de base, est calculé pour l'ensemble du bassin unitaire, en fonction de la distribution de l'indice topographique et de l'humidité moyenne dans ce bassin.
- Le modèle CaB est enfin doté d'une représentation sophistiquée de la **neige**, qui permet de simuler de manière réaliste la croissance/fonte du manteau neigeux, ainsi que ses propriétés isolantes (Stieglitz et al., sous presse).

Ce modèle a été **testé en Amérique du Nord**, subdivisée en environ 5000 bassins unitaires (surface moyenne » 3.600 km²) à partir du MNA GTOPO30 à la résolution de 30 secondes d'arc (Ducharne et al., 2000). Un premier test, où tous les bassins étaient soumis aux mêmes forçages météorologiques, a permis de montrer la sensibilité

des flux simulés à la topographie représentée, celle-ci pouvant induire à elle seule des variations de 15% de l'évaporation. Un second test a été réalisé dans les bassins de l'Arkansas et Red River (565.000 km²), grâce aux données de forçage et de validation (1980–1986) rassemblées pour la phase 2c du programme PILPS (Wood et al., 1998). Ce travail montre que le cycle saisonnier de l'évaporation et du ruissellement, ainsi que leur variabilité interannuelle, étaient simulés de manière réaliste par le modèle CaB, avec une calibration minimale (seule l'épaisseur de la couche superficielle du sol est calibrée, à la valeur de 5 cm communément utilisée dans les schémas de surface).

Finalement, outre sa solidité théorique et ses excellentes performances, le modèle CaB offre l'avantage de créer un lien direct entre les modèles de circulation générale et Sénèque. De plus, les processus photosynthétiques et leur influence sur la résistance stomatique sont en train d'être introduits dans ce modèle par l'équipe de Randy Koster (NASA, Washington DC), ce qui est important pour rendre compte de la réponse des végétaux à l'augmentation du dioxyde de carbone.

2.1. Couplage avec le modèle Sénèque dans le bassin de la Seine

2.2. Application du modèle CaB dans le bassin de la Seine

Le couplage entre CaB et Sénèque nécessite d'abord d'appliquer le modèle CaB dans le bassin de la Seine. Pour ce faire, le bassin (74.000 km²) est subdivisé en **29 bassins unitaires** (voir Figure 2), où les distributions d'indices topographiques sont caractérisées à partir du MNA GTOPO30 (résolution d'environ 1 km). Dans chacun des bassins unitaires, les autres paramètres du modèle sont définis à partir d'informations sur la couverture végétale (Figure 2) et les propriétés des sols, ou calibrés dans les rares cas où les informations nécessaires ne sont pas suffisantes. Ces paramètres et leur origine sont récapitulés dans le tableau 1.

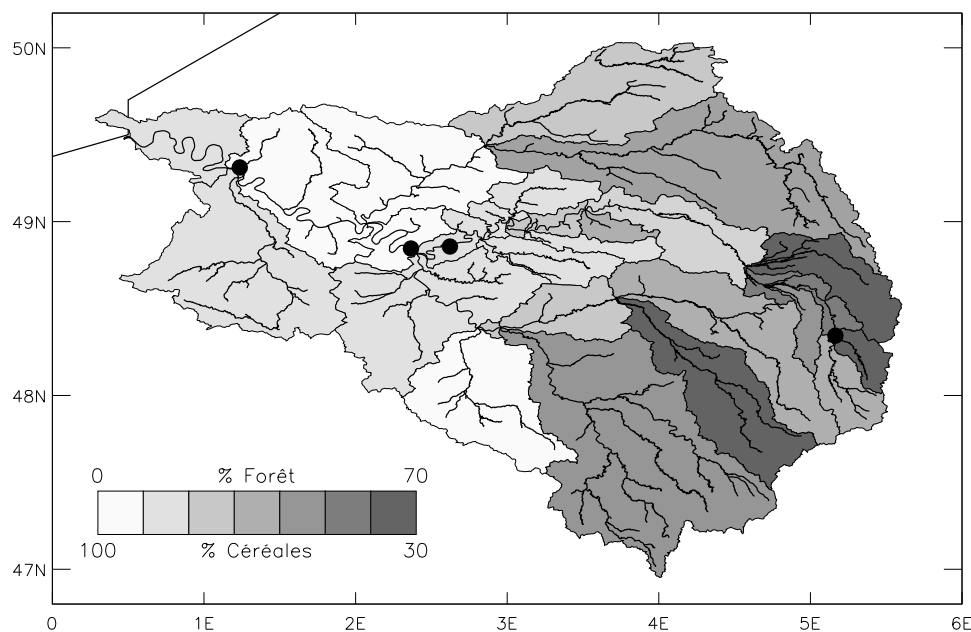


Figure 2: Discretisation spatiale du bassin de la Seine en 29 sous-bassins unitaires. Le niveau de gris indique le pourcentage de forêt/céréales dans les sous-bassins. Les cercles noirs représentent les quatre stations de mesure du débit sélectionnées pour la validation (Figure 3).

Tableau 1: Paramètres de la végétation et du sol intervenant dans les bilans d'eau dans le modèle CaB.

Paramètres	Origine	
Type de végétation (fractionnaire)	Combinaison subjective* des données ISLSCP et Corine Land Cover.	
Albédo, rugosité, indice de surface foliaire, fraction verte	Données ISLSCP (dérivées pour la végétation du NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) estimé à partir des mesures satellitaires AVHRR).	
Autres paramètres végétaux (résistances, morphologie racinaire)	Etablis par Koster et Suarez (1992), assignés à chaque type ci-dessus.	
Porosité	Issue des données ISLSCP (dérivées pour les sols des données FAO).	
Perméabilité	Fonction de la texture, estimée subjectivement à partir des cartes de la BD Sols de l'INRA et des données ISLSCP	
Facteur de décroissance verticale de la perméabilité	3.26 m ⁻¹	Valeurs utilisées dans les bassins de l'Arkansas et de la Red River (Ducharne et al., 2000)
Point de flétrissement	0.26 m ³ /m ³	
Potentiel matriciel à saturation	-0.281 m	
Paramètre <i>b</i> de Clapp et Hornberger (1978)	4	
Profondeur de la couche superficielle du sol	5 cm	
Profondeur jusqu'au premier imperméable	Combinaison subjective* des données ISLSCP et des cartes de la BD INRA.	
Profondeur de la zone racinaire	Min(1 m, 75% de la profondeur totale)	

* La subjectivité dans ces évaluations laisse la place à une part de calibration (dans la gamme des valeurs raisonnables !) pour un meilleur ajustement des débits simulés aux débits observés.

Le **forçage météorologique** réclamé par le modèle comprend: précipitation, température et humidité de l'air au niveau de la surface, vitesse du vent et pression atmosphérique à la surface, et rayonnement incident. Ces données sont en outre nécessaires avec une certaine fréquence (au moins toutes les 6 heures), du fait du pas de temps de 20 minutes utilisé dans CaB. Les données retenues pour cette première application de CaB sur le bassin de la Seine sont les données ISLSCP (Sellers et al., 1996). En effet, elles comprennent toutes les données nécessaires, au pas de temps de 6h, et sur l'ensemble du globe (résolution 1°D1°) pour les deux années 1987 et 1988. Il a donc suffi d'interpoler ces données d'abord spatialement vers les bassins unitaires (grâce au SIG ArcInfo), puis temporellement, selon la procédure déjà développée pour le programme Global Soil Wetness Project (Dirmeyer et al., 1999).

2.3. Couplage avec le modèle Sénèque

Sénèque est le modèle développé dans le cadre du PIREN-Seine pour simuler le fonctionnement, tant hydrologique que biogéochimique, de l'hydrosystème de surface à l'échelle du bassin de la Seine tout entier. On peut décomposer ce modèle en trois modules:

1. Le premier module commence par calculer les écoulements, superficiels et profonds, dans chacun des sous-bassins unitaires de Sénèque. Comme mentionné en introduction, ce module est contrôlé dans la version originale de Sénèque par 4 paramètres calibrés empiriquement, et il sera remplacé par le schéma de surface CaB pour augmenter le déterminisme physique de Sénèque vis-à-vis du climat.
2. Un module de transfert permet alors de transformer ces écoulements depuis le bassin versant en débits dans le réseau hydrographique, selon un algorithme lagrangien. De plus, une paramétrisation hydraulique, basée sur la formule de Manning permet de définir vitesse et profondeur des écoulements en rivière, à partir du débit ci-dessus, et de la morphologie du réseau hydrographique (pente, largeur, section mouillée). Une caractéristique du modèle Sénèque est d'idéaliser cette morphologie, dans les sous-bassins amont, en fonction des ordres de Strahler. De plus, les aménagements hydrauliques, comme les barrages de navigation ou les barrages réservoirs, sont pris en compte dans ce module de transfert.
3. Le modèle écologique RIVE constitue le troisième module de Sénèque, et permet de simuler l'évolution de la biomasse planctonique et des concentrations pendant le transfert amont/aval. Encore une fois, les principales annexes hydrauliques de surface (notamment les étangs et les barrages réservoirs) sont prises en compte pour le fonctionnement hydraulique, mais aussi biogéochimique, du cours d'eau.

Dans Sénèque, les écoulements constituent donc un *forçage* du module de transfert, c'est-à-dire que les processus régissant transfert et biogéochimie n'influent pas en retour sur la production des écoulements. Ceci justifie pleinement un **couplage dit « faible », ou séquentiel**, entre CaB et Sénèque. Un tel couplage consiste seulement en un transfert unidirectionnel d'information (ici les écoulements moyens au pas de temps décadaire de Sénèque) de CaB vers Sénèque. Ceci a impliqué un remodelage de la gestion des entrées/sorties dans Sénèque, qui s'est accompagné d'un recodage de ce dernier de basic en **fortran**, ce langage étant beaucoup plus puissant et flexible dans ce domaine.

Au terme de ce travail, le modèle CaB–Sénèque a permis de simuler, sur la période 1987–1988:

- les débits dans le réseau hydrographique, à partir des écoulements simulés dans CaB et du module de transfert de Sénèque,
- les caractéristiques biogéochimiques (concentrations en nutriments, oxygène et carbone, charge en MES, et biomasse planctonique) de la masse d'eau pendant ce transfert, en fonction des débits précédents et des forçages d'apports diffus et ponctuels reconstitués pour ces deux ans.

2.4. Validation

La validation de ces résultats s'appuie sur des données de débit et de qualité des eaux répertoriées pour les deux années simulées. La figure 3 montre les **débits** simulés par CaB–Sénèque en quatre stations, qui s'inscrivent de l'amont vers l'aval du bassin. L'augmentation des débits le long de ce continuum reflète simplement l'augmentation des surfaces contributives. Cette figure montre que le modèle représente les débits simulés de manière tout à fait satisfaisante le long de ce continuum, tant pour l'ordre de grandeur moyen de ces débits que pour leur dynamique à court terme. Ceci démontre la validité du modèle CaB pour simuler les écoulements dans le bassin de la Seine.

De plus, les débits à Poses sont mieux simulés par le modèle CaB–Sénèque que par la version originale de Sénèque, avec son module de production des écoulements **Hydrostrahler** régi par seulement 4 paramètres calibrés (section 2.3). Cette différence doit correspondre à une meilleure description des processus physiques dans le modèle CaB, même si la comparaison proposée n'en fournit pas la preuve absolue. En effet, une autre raison à la différence entre les deux modèles réside dans leur discrétisation du bassin, en 29 bassins unitaires pour CaB contre seulement 5 pour Hydrostrahler (Oise, Marne, Eure, et Seine à l'amont et l'aval de Paris).

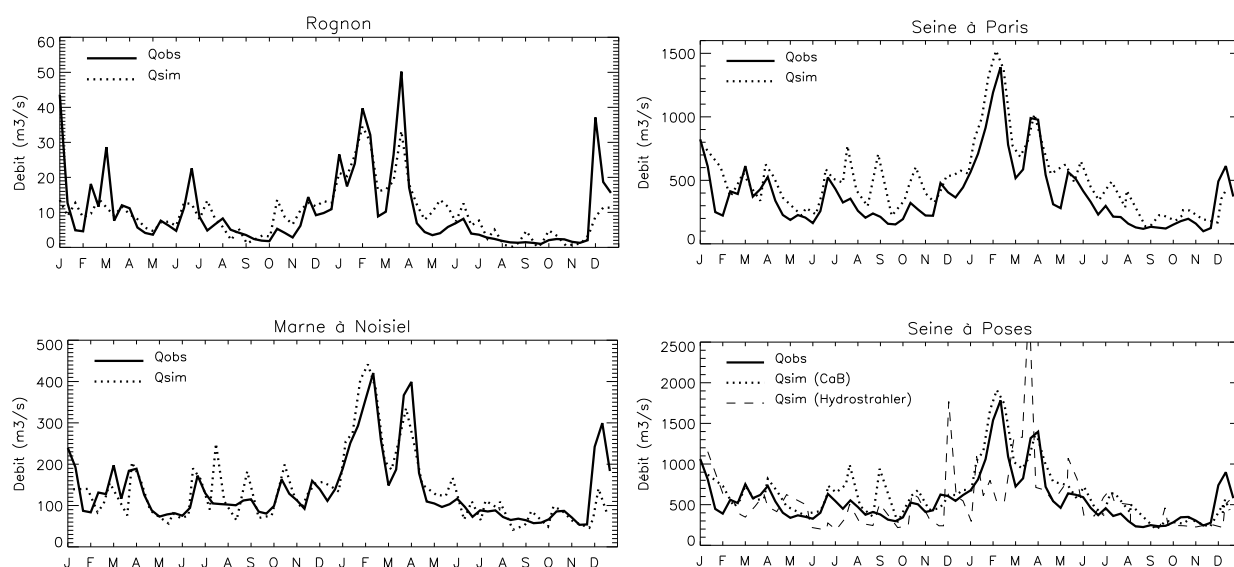
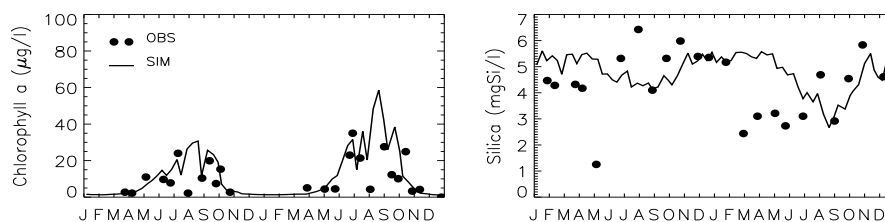
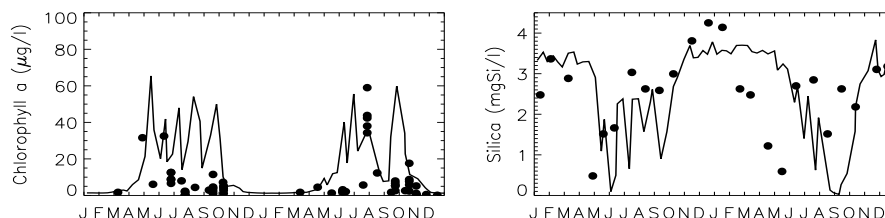


Figure 3: Comparaison des débits de 1987–1988 (en m^3/s), observés et simulés par CaB–Sénèque, aux quatre stations localisées en Figure 1. De l'amont vers l'aval, on trouve: le Rognon, la Marne à Noisiel, la Seine à Paris, et la Seine à Poses. En cette dernière station, la courbe en tirets donne pour comparaison le débit simulé par la version originale de Sénèque, couplée au module de production des écoulements à 4 paramètres (Hydrostrahler).

Aisne à Choisy-au-Bac



Seine à Choisy-le-Roi



Seine à Poses

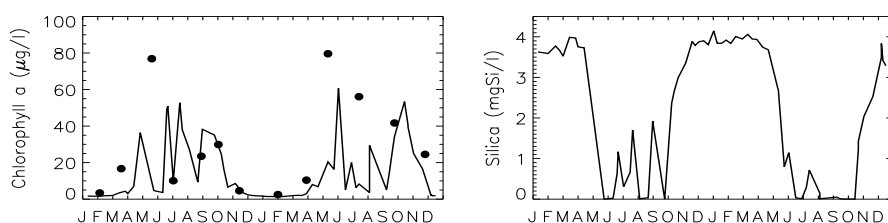


Figure 4: Comparaison de concentrations observées et simulées en trois stations du bassin de la Seine. A gauche: biomasse de phytoplancton, mesurée par la concentration en chlorophylle a, et exprimée en concentration équivalente de carbone phytoplanctonique (Garnier et al., 1995); à droite: concentration en silice dissoute.

En terme de **qualité**, les données de validation sont malheureusement peu nombreuses pour les années 1987–1988, car le programme PIREN–Seine n’était pas encore engagé. La figure 4 montre qu’en trois stations du bassin de la Seine, sur des tributaires d’ordre 5 et plus, les biomasses algales simulées ont les bons ordres de grandeur. Les variations saisonnières de la croissance, et notamment le déclenchement des blooms algaux, sont aussi représentées correctement. De même, les concentrations en silice dissoute, indicateur indirect des Diatomées¹, sont simulées de manière satisfaisante, en terme de concentration moyenne et de dynamique saisonnière.

Cette étude ne constitue cependant pas une validation satisfaisante du modèle, étant donné la pauvreté des données disponibles. Leur échantillonnage est insuffisant du point de vue tant spatial que temporel (faible fréquence), ainsi que pour le nombre de variables mesurées. En particulier, les données de chlorophylle sont trop rares sur la période considérée. Ceci impose une **validation complémentaire**, sur une période couverte par le PIREN–Seine, comme discuté en section 3.

2.5. Résultats préliminaires sur la sensibilité de l’hydrosystème au climat

Dans la perspective d’étudier l’impact du changement climatique sur le fonctionnement de l’hydrosystème de surface, le modèle couplé CaB–Sénèque a déjà permis des études de sensibilité préliminaires, dont l’objectif est de guider une analyse prospective plus complète. Il s’agit ici d’évaluer la sensibilité de l’hydrosystème à des **variations caricaturales des conditions hydro-météorologiques**. Sont considérées ici: une modification de la pluviométrie moyenne sur le bassin (à l’exclusion de tout autre changement) ; et une modification de la température moyenne de l’air et de la température de l’eau, d’abord isolément puis de manière conjuguée.

¹La croissance de ces algues siliceuses appauvrit le stock en silice de la colonne d’eau.

2.5.1. Influence de la pluviométrie moyenne

Trois valeurs de la pluviométrie moyenne sont considérées sur la figure 5. Les courbes en trait plein correspondent à la pluviométrie observée en 1987–1988, avec une moyenne sur l'ensemble du bassin de 760 mm/an. Les deux autres courbes correspondent aux simulations réalisées en multipliant la précipitation des années 1987–1988 par un facteur 0.75 et 1.5, pour chaque bassin et pour chaque pas de temps. Ceci conduit respectivement aux valeurs moyennes sur le bassin de 570 et 1140 mm/an. Dans les deux stations considérées, à l'amont de Paris (Choisy-le-Roi) et en limite du domaine estuarien (Poses), ces variations de précipitation entraînent logiquement des variations dans le même sens des **débits**. Ce comportement est bien sûr observé dans l'ensemble du bassin.

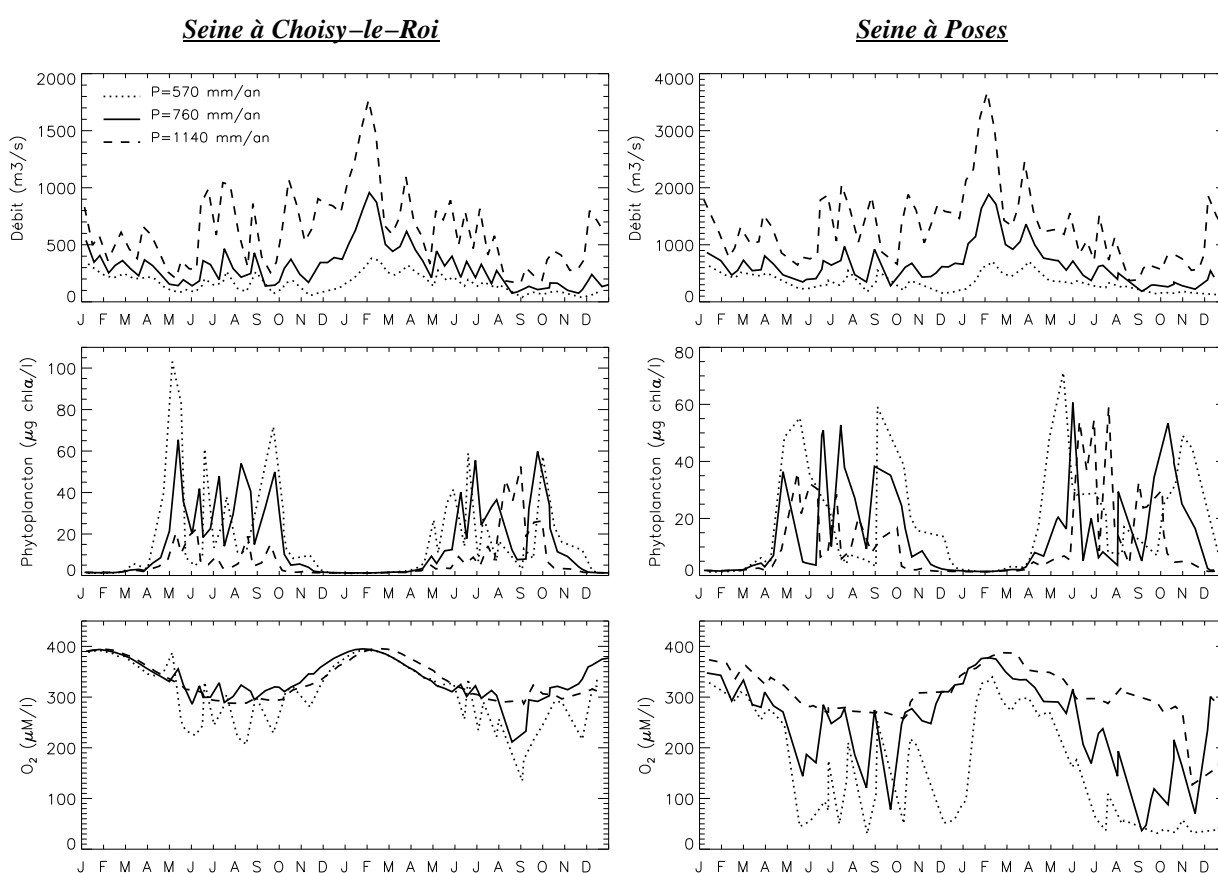


Figure 5: Influence de la pluviométrie moyenne sur les débits, la biomasse algale et la concentration en oxygène simulés par le modèle CaB-Sénèque. Exemple de la Seine à Choisy-le-Roi et à Poses.

La figure 5 montre les variations résultantes de deux variables biogéochimiques importantes en terme de qualité de l'eau: la biomasse algale et la concentration en oxygène (O_2) de la colonne d'eau. En amont de Paris, la biomasse diminue quand le débit augmente. Ceci résulte d'une diminution du temps de résidence, qui détermine le temps disponible pour la croissance du phytoplancton. La réponse de la concentration en O_2 est plus complexe. Du débit le plus fort (courbes en tiretés) au débit actuel, la teneur en O_2 augmente avec la biomasse algale, grâce à la photosynthèse réalisée par cette dernière. Quand le débit diminue davantage (courbes en pointillés), on observe une situation complètement opposée: l'oxygénation diminue quand la biomasse algale augmente. Ceci correspond à une situation d'**eutrophisation**, où la biomasse algale devient une charge en matière organique, qui alimente les micro-organismes hétérotrophes dont le métabolisme consomme de l'oxygène (et produit du CO_2).

La situation à **Poses** illustre parfaitement ce dysfonctionnement de l'équilibre autotrophie/hétérotrophie, qui existe même en conditions climatiques normales. Ceci est dû à un fort apport en carbone organique biodégradable au niveau de l'agglomération parisienne, et à une production primaire plus forte qu'en amont. Celle-ci s'explique par la longueur des temps de résidence jusqu'à Poses, et par la richesse en éléments nutritifs (nitrates et phosphates), qui ne deviennent jamais limitant dans l'hydrosystème très anthropisé qu'est la Seine. Dans ce contexte eutrophe, la biomasse algale vivante (donnée par la concentration en chlorophylle *a*) est régulée par

plusieurs facteurs: le broutage par le zooplancton, le filtrage par des mollusques filtreurs comme la *Dreissène*, et des lyses virales massives quand les populations algales dépassent un certain seuil (Garnier et al., 1995). Cette régulation explique pourquoi les concentrations en carbone phytoplanctonique sont similaires dans les trois simulations étudiées, bien que la production primaire totale augmente quand les débits diminuent et les temps de résidence/croissance augmentent. L'intensification des déficits en oxygène quand les débits diminuent s'explique donc simplement par une augmentation de la biomasse algale morte (production primaire totale, qui augmente, moins biomasse algale vivante, à peu près constante) dégradée par les bactéries hétérotrophes.

Finalement, cette étude préliminaire, basée sur des variations constantes dans l'espace et le temps de la pluviométrie, montre que l'augmentation des débits est plutôt bénéfique en terme d'eutrophisation, alors que leur diminution accentue fortement ce problème. Cette accentuation prend deux formes distinctes: (1) un début de l'eutrophisation, et de la désoxygénation associée, déplacé vers l'amont (cas de Choisy-le-Roi), et (2) une intensification de ces problèmes à l'aval du bassin (Poses).

2.5.2. Influence de la température de l'air et de l'eau

L'objectif est ici d'appréhender l'influence, sur le fonctionnement biogéochimique de la Seine, d'un **réchauffement** typique de celui qui pourrait être lié à un doublement du dioxyde de carbone atmosphérique. En accord avec deux simulations du changement climatique réalisées au Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) et à Météo-France (section 3), nous avons imposé une augmentation de la température de l'air de 2°C tout au long des deux ans, sur l'ensemble du bassin de la Seine. Le modèle Sénèque n'inclut pas de description phénoménologique du lien entre la température de l'air et celle de l'eau, et cette dernière est prescrite, sous la forme d'une sinusoïde calée sur les observations. Nous présentons ici l'influence d'une augmentation de 4°C du maximum estival, qui nous semble correspondre à une limite supérieure du réchauffement de l'eau si la température de l'air augmentait de 2°C. Enfin, l'effet conjugué de ces deux changements est examiné. La figure 6 présente cette étude de sensibilité en deux stations : la Marne à Noisiel (amont de Paris) et la Seine à Poses, qui constitue une référence par rapport à l'étude de sensibilité précédente concernant la pluviométrie.

Aux deux stations, l'augmentation de la **température de l'air** se traduit par une diminution des débits, qui est maximale en hiver. Ceci s'explique au niveau du modèle CaB, par une augmentation de l'évapotranspiration (principalement en été), une baisse de la hauteur de la nappe (qui s'inscrit à plus long terme), et une baisse du débit de base, qui a principalement lieu en hiver, quand ce dernier est maximum. Comme expliqué précédemment, la baisse des débits entraîne une diminution des concentrations en oxygène, par l'intermédiaire d'une augmentation de la production primaire. Cette désoxygénation est ici plus faible que quand la pluviométrie est réduite de 25% car les débits diminuent moins en période de croissance du phytoplancton.

L'augmentation de la **température de l'eau** a un effet beaucoup plus modeste. Les variations négatives d'O₂ ont deux causes possibles : la diminution de la solubilité de l'oxygène et l'intensification des réactions d'oxydation (respiration des communautés hétérotrophes) quand la température augmente. Les variations positives s'expliquent au contraire par une augmentation de la photosynthèse avec la température. Il faut noter que l'accélération des cinétiques de photosynthèse (croissance algale) et d'oxydation (croissance du zooplancton et des bactéries hétérotrophes) n'est pas systématique, puisque ces réactions se ralentissent au delà d'une température optimale. Dans Sénèque, les différents taux de croissance $k(T)$ sont modulés de la façon suivante en fonction de la température T :

$$k(T) = k(T_{opt}) \exp\left(-\frac{(T - T_{opt})^2}{dT^2}\right)$$

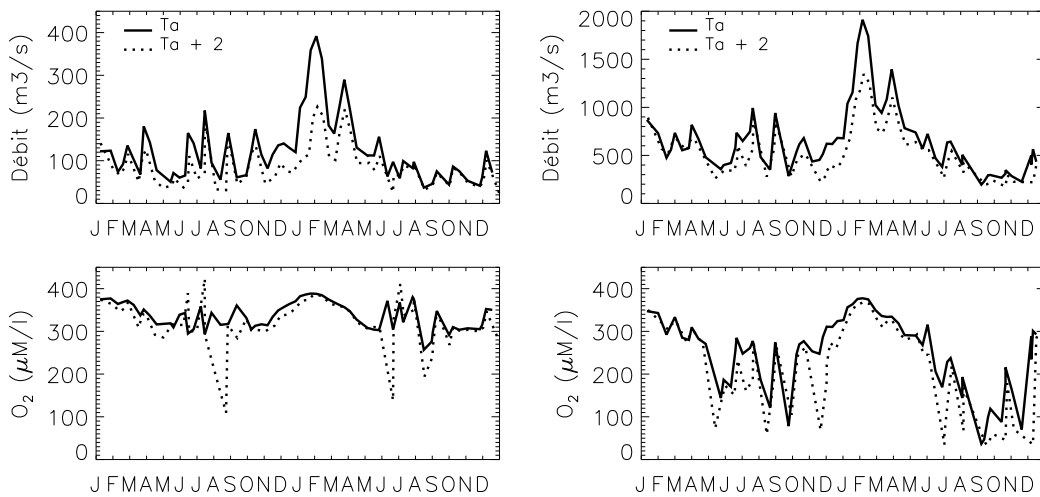
où T_{opt} est la température optimale pour la réaction considérée et où dT décrit la gamme de températures où la réaction est effective. Les valeurs de ces deux paramètres sont telles que, dans la gamme de température des deux simulations ($T_{eau} < 22^\circ\text{C}$), les différentes cinétiques s'accroissent quand la température augmente (Tableau 2).

Considérons maintenant l'**effet conjugué** d'une augmentation simultanée de la température de l'air et de celle de l'eau. L'augmentation de la teneur en oxygène à Noisiel au printemps, observée dans les deux cas précédents, est conservée, sans modification de l'amplitude, qui reste très faible. Si l'on s'intéresse maintenant aux diminutions de la teneur en oxygène, qui dominent la réponse des deux cas élémentaires, l'effet de la température de l'air (qui correspond à une diminution des débits) domine la réponse conjuguée. Cependant, on peut noter une addition des effets, allant parfois jusqu'à une synergie (printemps 1987 à Noisiel), quand les déficits en oxygène des cas élémentaires ne sont pas excessifs.

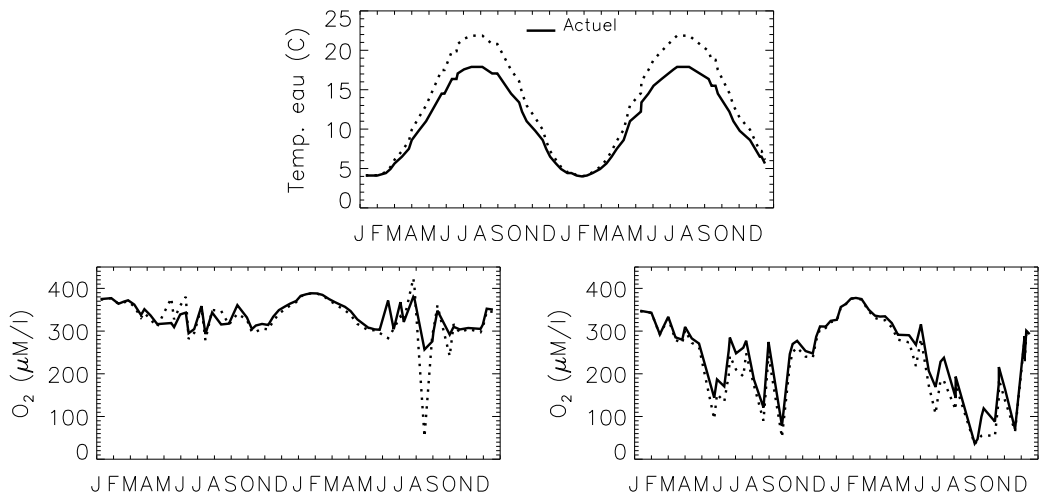
Marne à Noisiel

Seine à Poses

(a) Influence de la température de l'air uniquement



(b) Influence de la température de l'eau uniquement



(c) Influence conjointe de la température de l'air et de l'eau

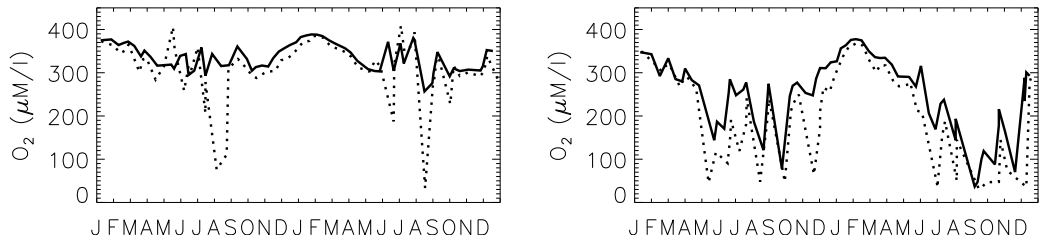


Figure 6: Influence de la température de l'air et de l'eau sur les débits et la concentration en oxygène simulés par le modèle CaB–Sénèque. Exemple de la Marne à Noisiel et de la Seine à Poses.

Tableau 2: Valeurs dans Sénèque des paramètres contrôlant la dépendance à la température des processus liés à la photosynthèse et à l'oxydation.

Processus	T _{opt}	dT
Croissance des Diatomées (Photosynthèse)	21°C	13°C
Croissance des Chlorophycées (Photosynthèse)	37°C	17°C
Croissance du Zooplancton (Oxydation)	25°C	10°C
Croissance des Bactéries Hétérotrophes et Nitrifiantes (Oxydation)	22°C	12°C

3. Perspectives

Comme indiqué en introduction, le travail qui vient d'être décrit a été engagé afin de pouvoir étudier l'influence du changement climatique sur le fonctionnement de l'hydrosystème Seine. Les principes de cette étude sont brièvement présentés ci-dessous.

3.1. Validation rigoureuse du modèle couplé CaB-Sénèque

Le modèle couplé CaB-Sénèque a été testé sur seulement deux ans (1987-1988, voir section 2.4), mais cet exercice reste très limité en terme de validation. Tout d'abord, un certain nombre de paramètres de CaB ont été ajustés pour bien reproduire les débits de ces deux années, si bien que la qualité des débits simulés sur cette période ne suffit pas à valider le modèle. De plus, les données de validation de la qualité de l'eau sont très insuffisantes en 1987-1988, parce que le programme PIREN-Seine n'était pas encore lancé.

Par ailleurs, il est important de vérifier que le modèle couplé CaB-Sénèque capture bien la **variabilité interannuelle et saisonnière** (incluant les extrêmes) du débit et de la qualité de l'eau. Ce travail, qui impose une validation sur une période significativement plus longue, constitue un préalable fondamental pour utiliser ce modèle avec confiance dans un climat modifié.

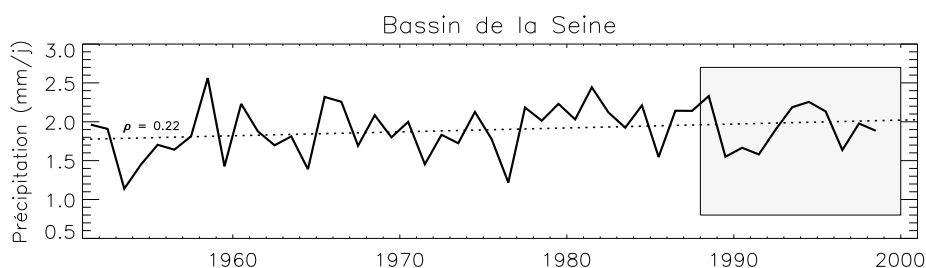


Figure 7: Variations de la précipitation annuelle moyenne sur le bassin de la Seine de 1951 à 1998 (d'après Billen et al., soumis). La courbe en tirets montre la tendance de ce signal, qui n'est pas statistiquement significative.

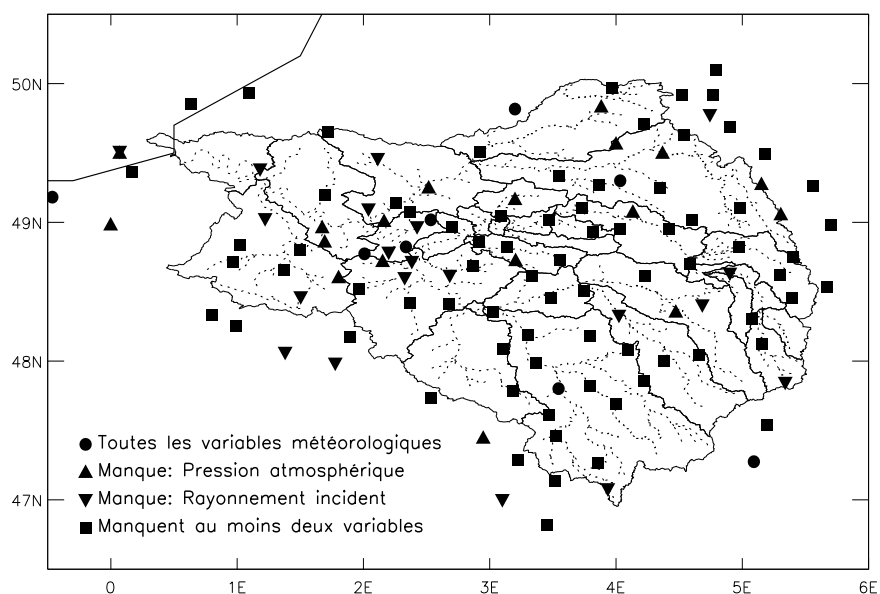


Figure 8: Localisation des 123 stations météorologiques sélectionnées pour caractériser le forçage météorologique du modèle CaB sur la période 1988-1999.

Pour toutes ces raisons, la validation du modèle couplé CaB–Sénèque sera étendue à la **période 1988–1999**, pour laquelle les données météorologiques nécessaires (au pas de temps horaire) viennent d’être acquises auprès de Météo–France. Comme le montre la figure 7 (pour la pluviométrie), les 12 ans choisis pour cette validation approfondie sont représentatifs de la moyenne et de la variabilité du climat observé depuis 1951 sur le bassin de la Seine. La figure 8 montre l’emplacement des 123 stations sélectionnées pour caractériser le forçage météorologique du modèle CaB sur cette période. Elle 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.

3.2. Impact du changement climatique

Le changement climatique simulé par les MCG est beaucoup plus complexe que les variations très simples de pluviométrie et de température envisagées en section 2.5. Cette complexité est révélée par la figure 9, qui montre les différences de température et de précipitation entre deux simulations réalisées au LMD: $2\text{CO}_2 - 1\text{CO}_2$. La simulation 1CO_2 correspond aux conditions actuelles, et 2CO_2 correspond au climat qui pourrait régner si la concentration en CO_2 atmosphérique doublait.

Cette figure montre que le **MCG du LMD** simule une augmentation de la température d’environ 2°C pour un doublement de la teneur en CO_2 atmosphérique. Cette augmentation de la température se retrouve tout au long de l’année. Les variations de précipitation montrent au contraire des contrastes saisonniers importants. En effet, les précipitations varient très peu en moyenne annuelle à l’échelle du bassin (très faible diminution), mais elles augmentent en hiver et diminuent en été. Ceci correspond à une accentuation des contrastes saisonniers.

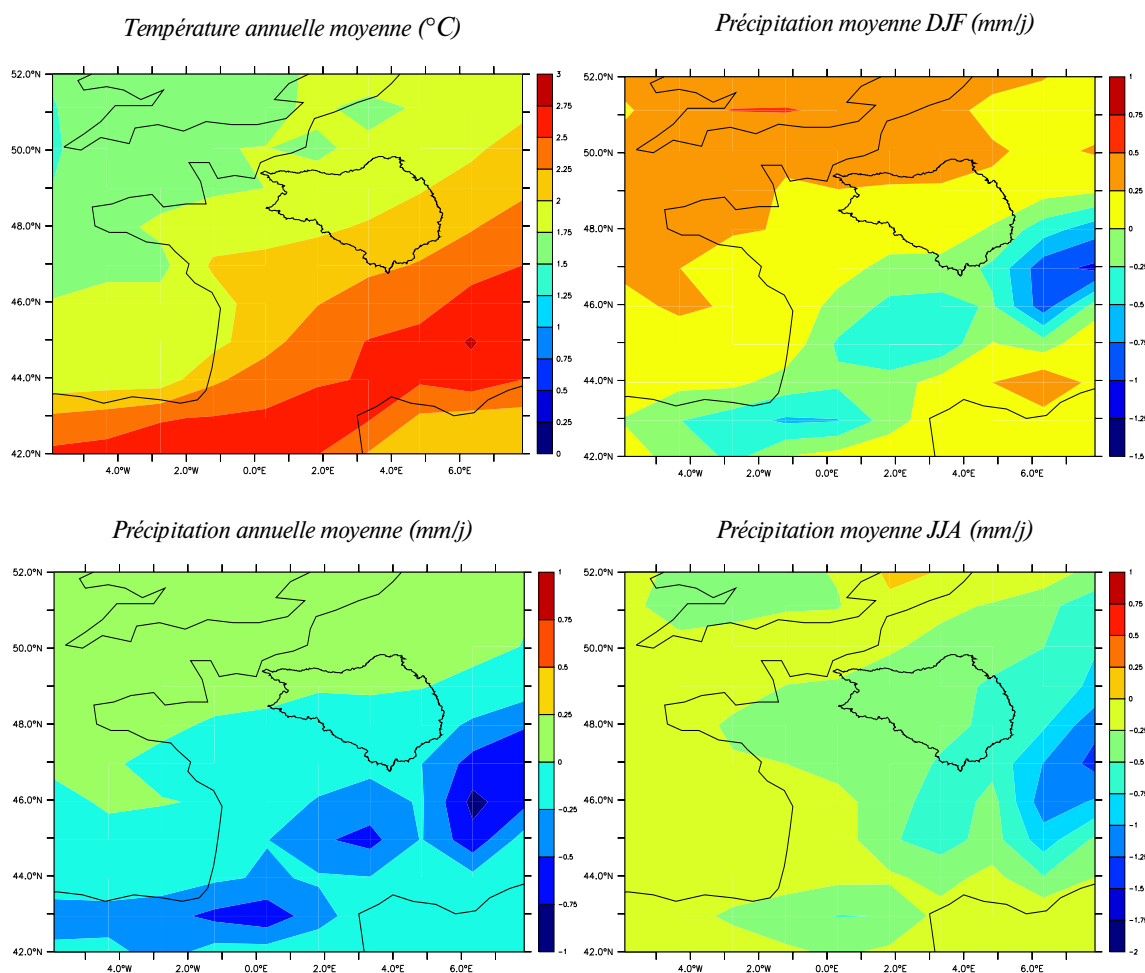


Figure 9: Différences de température et précipitation $2\times\text{CO}_2 - 1\times\text{CO}_2$ simulées par le MCG LMD-Z du LMD: différence de température moyenne annuelle ($^\circ\text{C}$), et différences de précipitation (mm/j), en moyenne sur l’année, sur Décembre-Janvier-Février, et sur Juin-Juillet-Août. Données fournies par Laurent Li (LMD).

Tableau 3: Caractéristiques principales des simulations Arpège (Météo-France, Déqué et al., 1998) et LMD-Z du LMD (voir figure 9).

	<i>Arpège</i>	<i>LMD-Z</i>
Résolution sur le bassin de la Seine	Y 80 D 80 km ²	Y 100 D100 km ²
Durée des simulations	10 ans	10 ans
Valeurs mensuelles des SST ^a « actuelles »	Simulées par HadCM2 ^b pour les années 1984–1994	Climatologiques (pas de variabilité interannuelle)
Valeurs mensuelles des SST 2DCO ₂	Simulées par HadCM2 pour les années 2054–2064	Climatologiques + valeurs mensuelles moyennes des différences simulées par HadCM2 entre 2054–2064 et 1984–1994
Variations de précipitation annuelle moyenne dans le bassin de la Seine	<i>Augmentation</i>	<i>Diminution</i>

^a SST = Température de surface de la mer (Sea Surface Temperature).

^b 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, et une augmentation de 1% par an à partir de cette date.

Cependant, s'ils constituent le meilleur outil actuellement disponible pour envisager la réponse du climat² à l'augmentation du CO₂, les MCG sont sujets à de nombreuses **incertitudes**, dont l'évaluation est problématique (Planton, 1999). Les variations de précipitation constituent une des incertitudes majeures car les mécanismes de rétroaction entre processus radiatifs, convection et couverture nuageuse sont encore mal compris. D'autres incertitudes sont liées à la nature même des perturbations radiatives anthropiques : méconnaissance de la concentration future en CO₂ et autres gaz à effet de serre, et de leurs interactions avec les aérosols. Enfin, les incertitudes du changement climatique simulé augmentent à l'échelle régionale (e.g. Kittel et al. 1998).

Une solution est d'étudier la sensibilité du fonctionnement hydrologique et biogéochimique de la Seine à une **large gamme de scénarios climatiques** censés représenter la marge d'incertitude du changement climatique. Ces scénarios seront construits en perturbant les données météorologiques actuelles (issues d'observations récentes) par des perturbations représentant le changement climatique. Celles-ci seront construites à partir des anomalies simulées par deux MCG, qui simulent des variations opposées de la précipitation annuelle moyenne dans le bassin de la Seine (tableau 3).

Ces scénarios permettront l'exploration extensive de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement de l'**hydrosystème de surface**, simulé par le modèle couplé CaB-Sénèque pour un coût de calcul réduit. Ces simulations seront réalisées avec les caractéristiques actuelles du bassin de la Seine en terme d'occupation des sols (donc de type de végétation) et d'apports diffus et ponctuels de nutriments, c'est-à-dire sous l'hypothèse (abusive !) que ces facteurs n'évolueront pas, ni en réponse au changement climatique, ni même indépendamment de ce dernier.

L'extensivité de cette étude de sensibilité permettra 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 » 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.

Ce travail reste très restrictif puisqu'il ignore la réponse de facteurs clés du système, comme le bassin versant agricole et les aquifères profonds, qui sont caractérisés par une évolution plus lente, fortement soumise à l'anthropisation. Les travaux menés sur ces compartiments dans le cadre du PIREN-Seine doivent permettre d'aborder efficacement l'**influence croisée des changements climatiques et anthropiques** sur le fonctionnement de l'hydrosystème. Ce travail reposera sur des scénarios d'évolution des systèmes agricoles, comme ceux que l'INRA-Mirecourt propose de réaliser sur la base des tendances lourdes identifiées rétrospectivement (Benoît et al, 2000). La viabilité sous changement climatique de ces scénarios agricoles pourra être examinée grâce au modèle agronomique STICS (Mary et al., 1999). Dans ce cadre, on considérera qu'un scénario croisé climatique/agricole est viable si les rendements agricoles simulés sont suffisants. Ces simulations permettront aussi d'appréhender l'influence du changement climatique sur le cycle de l'azote et du carbone dans le sol. Le modèle MODCOU/NEWSAM (Gomez et Ledoux, 2000) permettra alors de simuler l'évolution à long terme des aquifères et de leur contamination azotée. Enfin, le modèle Sénèque permettra d'intégrer l'ensemble des changements envisagés, et de simuler leur impact en terme de qualité.

² Ils sont en particulier le gage de la cohérence physique entre les différentes variables météorologiques.

4. Conclusion

Le modèle CaB représente sur des bases physiques l'influence du climat sur les écoulements. Son couplage avec le modèle Sénèque, en remplacement du module empirique Hydrostrahler, procède du gain de déterminisme qui a guidé jusqu'alors le développement de la « boîte à outils » du PIREN-Seine. Comme le schématise la figure 10, celle-ci comprend plusieurs modèles que l'on peut articuler au choix en fonction de la question posée. Ainsi, le développement de la chaîne de modèles STICS/MODCOU/NEWSAM, qui sera prochainement complétée par un couplage avec Sénèque, permettra d'analyser l'évolution des teneurs en nitrates dans le milieu. Le modèle CaB renforce quant à lui cette boîte à outils dans la perspective d'explorer l'impact du changement sur le fonctionnement de l'hydrosystème.

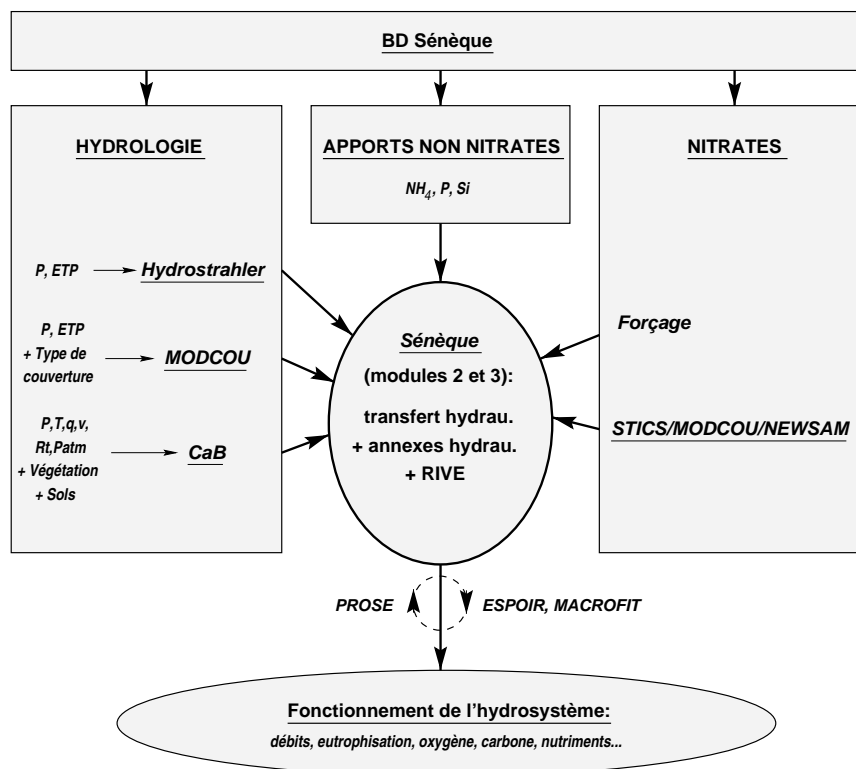


Figure 10: Articulation autour de Sénèque des différents modèles et bases de données composant la « boîte à outils » du PIREN-Seine.

5. Références bibliographiques

Benoît, M., Bienaimé, E., LeBer, F., Mari, J.F., Mignolet, C. and Riela-Cossera, R. (2000). Spatialisation de la dynamique des activités agricoles dans le bassin de la Seine. Rapport d'activité 1999 du programme PIREN-Seine, pp. 1.16—1.35.

Beven, K. and Kirkby, M. J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24:43—69.

Billen, G. and Garnier, J. (1997). The PHISON River Plume: coastal eutrophication in response to changes in land use and water management in the watershed. *Aquatic Microbial Ecology*, 13:3—17.

Billen, G., Garnier, J., and 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., Ficht, A., and Cun, C. (soumis). Modelling water quality in the Seine River Estuary in response to changes in human activity in the watershed over the last 50 years. *Estuaries*.

Clapp, R.B. and Hornberger, G.M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour.*

Res., 14(4), 601—604.

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.

Dirmeyer, P., Dolman, A.J., and Sato, N. (1999). The Global Soil Wetness Project: A pilot project for global land surface modeling and validation. *Bull. Am. Met. Soc.*, 80: 851—878.

Ducharne, A., Koster, R. D., Suarez, M., and Kumar, P. (1999). A catchment-based land surface model for GCMs and the framework for its evaluation. *Phys. Chem. Earth*, 24B:769—773.

Ducharne, A., Koster, R. D., Suarez, M., Stieglitz, M., and 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.

Garnier, J., Billen, G., and Coste, M. (1995a). Seasonal succession of Diatoms and Chlorophyceae in the drainage network of the Seine River: observations and modeling. *Limnol. Oceanogr.*, 40:750—765.

Gomez, E. and Ledoux, E. (2000). Modélisation intégrée des écoulements et du transfert de nitrates sur le bassin de la Seine. Rapport d'activité 1999 du programme PIREN-Seine, pp. 1.4—1.15.

Houghton, J., Meira Filho, L., and Callendar, B. (1996). *Climate Change 1995: The Second IPCC Scientific Assessment*. Cambridge University Press.

Kittel, T.G.F., Giorgi, F. and 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., and 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—24823.

Koster, R. D. and Suarez, M. J. (1992). Modeling the land surface boundary in climate models as a composite of independent vegetation stands. *J. Geophys. Res.*, 97(D3):2697—2715.

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

Planton, S. (1999). Incertitudes sur la détermination du changement climatique. Papier présenté à l'Ecole Thématique du CNRS « Risques et incertitudes: le cas du changement climatique ». Les Houches, Septembre 1999.

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., and 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.

Sivapalan, M., Beven, K., and Wood, E. F. (1987). On hydrologic similarity : 2. A scaled model of storm runoff production. *Water Resour. Res.*, 23(12):2266—2278.

Stieglitz, M., Ducharne, A., Koster, R.D. and Suarez, M. (sous presse). The impact of detailed snow physics on the simulation of snow cover and subsurface thermodynamics at continental scales. *Journal of Hydrometeorology*.

Wood, E., Lettenmaier, D., Liang, X., Lohmann, D., and 22 co-authors (1998). The Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes (PILPS) Phase-2(c) Red-Arkansas River Experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons. *Global and Planetary Change*, 19:115—135.