

# Le bassin de la Seine face au Changement Climatique : comparaison de deux scénarios climatiques

Agnès Ducharne<sup>1</sup> et Michel Déqué<sup>2</sup>

<sup>1</sup> UMR Sisyphé, UPMC/CNRS, Paris, Agnes.Ducharne@ccr.jussieu.fr

<sup>2</sup> CNRM, Météo-France / CNRM, Toulouse, michel.deque@meteo.fr

1. Introduction .....	1
2. Construction des scénarios climatiques.....	2
2.1. Principe général.....	2
2.2. Différentes données climatiques pour différents modèles.....	2
2.2.1 Modèle CaB.....	2
2.2.2 Modèle Sénèque .....	3
2.3. Données climatiques actuelles.....	4
2.4. Modèles de circulation générale.....	4
2.5. Constructions des perturbations .....	7
2.5.1 Définitions .....	7
2.5.2 Perturbations choisies pour cette étude .....	7
3. Impact du changement climatique sur l'hydrosystème de surface.....	8
3.1. Comparaison des scénarios « standard » issus de ARPEGE OLD et NEW .....	8
3.1.1 Influence sur l'hydrologie.....	8
3.1.2 Influence sur la qualité biogéochimique.....	10
3.2. Scénarios complémentaires .....	12
3.2.1 Comparaison avec des scénarios non climatiques : changement de couverture végétale ...	12
3.2.2 Variabilité interannuelle .....	15
4. Conclusion.....	18
4.1. Résumé .....	18
4.2. Limites et perspectives de l'étude.....	19
5. Remerciements .....	21
6. Bibliographie.....	21

## 1. Introduction

Le projet GICC-Seine cherche à évaluer l'influence du changement climatique sur la ressource en eau dans le bassin de la Seine, sous son double aspect de l'hydrologie et de la qualité biogéochimique (nutriments, carbone, oxygène). Ce projet ne se limite pas aux impacts directs du changement climatique, mais il vise à les intégrer dans le cadre d'une réflexion plus large, prenant en compte les facteurs de changement induits par l'activité humaine dans le bassin, avec une attention toute particulière à l'agriculture.

Le travail présenté ici se focalise par contre sur les impacts directs du changement climatique sur le bassin de la Seine, et plus particulièrement sur l'hydrosystème superficiel (bassin versant et rivière), dont le fonctionnement est simulé de façon réaliste par les modèles couplés CaB et Sénèque (Ducharne et al., 2001).

Nous commencerons par détailler la construction de scénarios de changement climatique pour ces modèles, à partir de simulations réalisées par des modèles de circulation générale. L'impact de ces scénarios sur les écoulements simulés par CaB, et les conséquences de ces changements hydrologiques sur la qualité

biogéochimique telle qu'elle est simulée par le modèle Sénèque, seront ensuite analysés en section 3.1. Pour mieux cerner l'importance qualitative de ces impacts, ils seront ensuite mis en perspective de ceux d'autres scénarios (des scénarios climatiques plus extrêmes et des scénarios de changement non climatique) en section 3.2.

## 2. Construction des scénarios climatiques

### 2.1. Principe général

Les modèles de circulation générale (MCG) constituent le meilleur outil actuellement disponible pour envisager la réponse du climat à l'augmentation des gaz à effet de serre, les méthodes alternatives se limitant aux méthodes des analogues temporels ou spatiaux (Arnell, 1994). Les projections du changement climatique par les MCG présentent les avantages d'être quantifiées, spatialisées et de prendre en compte la physique du système climatique au mieux des connaissances actuelles. Ces modèles sont donc largement utilisés pour étudier les impacts du changement climatique, notamment sur les hydrosystèmes continentaux. Ils sont cependant loin d'être parfaits, et présentent souvent d'importants biais dans leur simulation du climat actuel, en ce qui concerne les précipitations continentales notamment. En conséquence, l'hydrologie simulée directement à partir du climat d'un MCG est généralement erronée, et souvent de façon importante (Ducharne et al., 2001b).

Dans le cadre d'études d'impact (hydrologique notamment), la stratégie la plus usitée pour construire des scénarios de changement climatique à partir de MCG est donc la **méthode des perturbations**, qui consiste à perturber les données météorologiques « actuelles », c'est-à-dire issues d'observations récentes, par des perturbations représentant le changement climatique, et basées sur les différences de climat simulées par des MCG en cas de doublement de CO<sub>2</sub>.

C'est cette stratégie, déjà adoptée avec succès par le projet GICC-Rhône (Boone et al., 2000), que nous avons retenue dans le cadre du projet GICC-Seine (Ducharne et Gomez, 2002). Elle sera illustrée ici par la construction de scénarios climatiques pour les modèles couplés CaB et Sénèque qui simulent le fonctionnement de l'hydrosystème superficiel de la Seine (bassin versant superficiel et rivière) avec un réalisme satisfaisant (Ducharne et al., 2001). L'impact de ces scénarios sur les écoulements simulés par CaB et les conséquences de ces changements hydrologiques sur la qualité biogéochimique telle qu'elle est simulée par le modèle Sénèque seront ensuite illustrés en section 3.1.

### 2.2. Différentes données climatiques pour différents modèles

#### 2.2.1 Modèle CaB

Le modèle CaB, pour « Catchment-Based » (Koster et al., 2000 ; Ducharne et al., 2000), est un schéma de surface déterministe, qui décrit sur des bases physiques **l'influence du climat sur les écoulements**. Il combine une approche de type SVAT (« Soil-Vegetation-Atmosphere Transfers ») pour les bilans énergétiques (incluant l'évapotranspiration) et leur contrôle par la végétation, à une approche basée sur TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) pour gérer les écoulements superficiels et profonds et la redistribution latérale associée de l'humidité du sol.

Comme l'indique le nom CaB, 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 Sénèque (section 2.2.2), ce qui favorise le couplage entre ces deux modèles. Le bassin de la Seine (74.000 km<sup>2</sup>) est ici subdivisé en 29 bassins unitaires (figure 1), où les paramètres du modèle sont définis à partir d'informations sur la topographie, les propriétés des sols et la couverture végétale. Celle-ci est caractérisée par des cartes d'occupation des sols, et des paramètres morphologiques issus de l'observation satellitaire en 1987-1988 (données ISLSCP, Sellers et al, 1996). Certains paramètres de CaB sont calibrés, dans les rares cas où les informations nécessaires ne sont pas suffisantes (Ducharne et al., 2001).

Originellement développé pour être couplé à un MCG, le modèle CaB est particulièrement adapté pour faire le lien entre hydrologie et climat. En particulier, les variables météorologiques nécessaires en entrée de ce modèle (au pas de temps de 20 minutes) sont toutes simulées par les MCG: précipitation, température et humidité de l'air au niveau de la surface, vitesse du vent et pression atmosphérique à la

surface, rayonnement incident solaire et thermique. Les données climatiques utilisées pour cette étude sont détaillées dans la suite de cette section, qui distingue les données actuelles (section 2.3), les données simulées par les MCG (section 2.4) et les scénarios résultants de changement climatique (section 2.5).

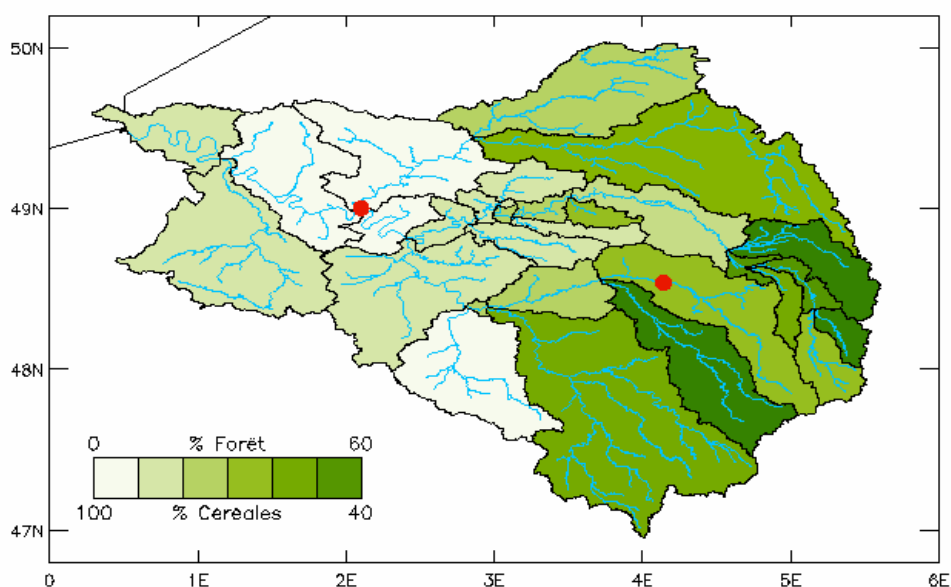


Figure 1: Discretisation spatiale du bassin de la Seine en 29 sous-bassins unitaires. Dans chacun d'eaux, la végétation est uniforme (composite de forêt et graminées selon le pourcentage indiqué par le niveau de vert). Les points rouges indiquent les stations d'Arcis-sur-Aube (à l'est) et de Conflans-Sainte-Honorine (à l'ouest).

### 2.2.2 Modèle Sénèque

Le modèle Riverstrahler (Billen et al, 1994; Garnier et al. 1995) simule la **qualité biogéochimique de l'eau**. Il rend compte des variations saisonnières et géographiques du développement algal, de l'oxygénation et des transformations / transferts de nutriments (N, P, Si), à l'échelle de grands réseaux hydrographiques, en réponse aux contraintes morphologiques, hydrologiques et climatiques, et aux apports ponctuels et diffus résultants de l'activité humaine sur le bassin versant. Dans le bassin de la Seine (on parle alors du modèle Sénèque), nous avons utilisé la même version que dans Ducharme et al. (2001), discretisée selon les mêmes 29 sous-bassins que CaB, et limitée à deux modules:

- un module de transfert qui permet de transformer les écoulements simulés par CaB en débits dans le réseau hydrographique, selon un algorithme lagrangien. Une paramétrisation hydraulique, basée sur la formule de Manning permet alors de définir vitesse et profondeur des écoulements en rivière, à partir du débit 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.
- le modèle écologique RIVE, qui permet de simuler l'évolution de la biomasse planctonique et des concentrations pendant le transfert amont/aval.

L'influence des principales annexes hydrauliques (barrages de navigation, barrages réservoirs, étangs) sur le fonctionnement hydraulique et biogéochimique des cours d'eau est prise en compte dans les deux modules.

Les écoulements superficiels et souterrains étant fournis par le modèle CaB, les variables climatiques nécessaires à Sénèque sont le rayonnement solaire incident (qui contrôle la photosynthèse planctonique) et la température de l'eau. Ces variables sont nécessaires au pas de temps décadaire, à l'échelle des bassins unitaires.

### 2.3. Données climatiques actuelles

Ces données constituent la « baseline » pour la construction des scénarios de changement climatique par la méthode des perturbations. Ces données peuvent bien sûr différer selon les modèles, en fonction notamment du nombre d'années nécessaires à une simulation intéressante (Ducharne et Gomez, 2003).

Pour le modèle CaB, nous avons retenu les données ISLSCP (Sellers et al., 1996), qui couvrent deux années 1987 et 1988. Cette période est un peu courte, mais elle s'inscrit dans la période de référence pour le climat 1xCO<sub>2</sub> simulé par les MCG (section 2.4). De plus, les données ISLSCP comprennent toutes les données météorologiques nécessaires au forçage de CaB, au pas de temps de 6h (description satisfaisante du cycle diurne), et sur l'ensemble du globe (résolution 1°x1°). Il a donc suffi d'interpoler ces données d'abord spatialement vers les bassins unitaires (grâce au SIG ArcInfo), puis temporellement vers le pas de temps de calcul de CaB (20 minutes), selon la procédure déjà développée pour le programme Global Soil Wetness Project (Dirmeyer et al., 1999).

Ces données sont générées à partir des observations synoptiques des réseaux météorologiques classiques. Celles-ci sont interpolées toutes les 6 heures sur une grille de 1°x1° par assimilation dans un modèle météorologique global. On parle de « réanalyses ». Dans le cas des données ISLSCP, précipitation et rayonnement incident (solaire et thermique) subissent un traitement supplémentaire pour assurer le réalisme des totaux mensuels. Ces derniers sont « hybridés » en chaque point de grille avec des observations mensuelles (Global Precipitation Climatology Project et NASA/LaRC Surface Shortwave and Longwave Radiation Fluxes). En d'autres termes, les totaux mensuels simulés sont ajustés aux totaux mensuels observés (le total mensuel est changé, mais la dynamique à plus court pas de temps est inchangée). Sur le bassin de la Seine, nous avons en outre rajouté un niveau d'hybridation supplémentaire sur les précipitations, à partir de données Météo-France au pas de temps de décadaire, afin de mieux capturer la dynamique décadaire de la précipitation.

Pour le modèle Sénèque, outre les écoulements simulés par CaB en 1987-1988, nous disposons dans la base de donnée du PIREN-Seine des forçages de rayonnement solaire et de température de l'eau au pas de temps de temps décadaire pendant 1987-1988.

### 2.4. Modèles de circulation générale

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.

Nous commencerons par exploiter le changement climatique simulé par deux versions différentes d'un même MCG : le modèle ARPEGE (Météo-France). Ces deux versions (Déqué et al., 1998 ; Gibelin et Déqué, 2003) partagent la caractéristique d'un maillage variable, qui 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 (par des modèles régionaux emboîtés), qui s'accompagnent de leurs propres incertitudes, et ne font pas encore l'objet d'un consensus (Hutjes et al., 1998).

Deux paires de simulations, 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 ces modèles, et sont résumées dans le tableau 1. Il s'agit d'intégrations limitées (« time-slices » de 10 ou 30 ans) du MCG atmosphérique ARPEGE. Elles diffèrent par leur résolution en Europe et dans le bassin de la Seine, mais elles correspondent aussi à deux versions profondément différentes du MCG, dont le réalisme a été amélioré entre les versions OLD et NEW. Une autre différence importante entre les deux paires de simulations OLD et NEW concerne les températures de surface de la mer (TSM) qui servent de forçage pour les intégrations du MCG atmosphérique ARPEGE, et qui sont un élément important de la dispersion des projections du changement climatique. Ainsi, ce sont deux modèles couplés océan/atmosphère différents qui ont permis de simuler l'évolution des TSM au cours de l'évolution transitoire du climat suite à l'augmentation des gaz à effet de serre. Enfin, les concentrations en CO<sub>2</sub> correspondant aux situations 2xCO<sub>2</sub> sont différentes, et beaucoup

plus optimistes dans ARPEGE NEW que dans ARPEGE OLD. Cette différence est renforcée par la prise en compte dans ARPEGE NEW d'aérosols, dont l'effet radiatif limite le réchauffement.

Tableau 1 : Présentation des simulations ARPEGE utilisées dans cette étude.

	ARPEGE OLD (Déqué et al., 1998)	ARPEGE NEW (Gibelin et Déqué, 2003)
Résolution (Seine)	80 x 80 km <sup>2</sup>	50 x 50 km <sup>2</sup>
Pas de temps des données	Journalier	Journalier
Durée des simulations	10 ans	30 ans
TSM <sup>a</sup> 1xCO <sub>2</sub>	1984-1994 (HadCM2 <sup>b</sup> )	1960-1989 (Observé)
TSM <sup>a</sup> 2xCO <sub>2</sub>	2054-2064 (HadCM2 <sup>b</sup> )	2070-2099 (ARPEGE OPAG)
Scénarios d'émissions	2xCO <sub>2</sub> = 708 ppm en 2060 <sup>b</sup> sans aérosol	SRES-B2: 2xCO <sub>2</sub> = 610 ppm en 2100 avec aérosols

<sup>a</sup> TSM = 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.

La figure 2 compare les simulations 1xCO<sub>2</sub> et 2xCO<sub>2</sub> par ARPEGE OLD des variables météorologiques nécessaires au forçage de CaB. Elle montre des variations significatives du rayonnement atmosphérique (rayonnement infra-rouge incident), en conséquence directe de l'augmentation de l'effet de serre atmosphérique. Il en résulte une augmentation de la température de l'air (ici à 2 mètres du sol), et une augmentation de l'humidité de l'air, qui sont toutes deux relativement constantes tout au long de l'année. Ainsi, la température de l'air augmente de 2.0°C en moyenne annuelle sur le bassin. Les précipitations sont modifiées elles-aussi par le changement climatique : elles augmentent significativement en hiver, et diminuent en été, même si ce dernier changement n'est pas statistiquement significatif. Enfin, les trois dernières variables (pression atmosphérique en surface, rayonnement solaire incident et vitesse du vent) ne présentent que des modifications négligeables et non statistiquement significatives.

La figure 3 présente la même comparaison pour les deux simulations ARPEGE NEW. La réponse au changement climatique est très similaire, sauf pour les précipitations qui ne changent pas significativement selon ARPEGE NEW. Le rayonnement atmosphérique, l'humidité et la température de l'air présentent des augmentations significatives et du même ordre de grandeur que selon ARPEGE OLD (la température augmente ainsi de 2.1°C en moyenne annuelle sur le bassin). Enfin, les variations des trois dernières variables sont encore une fois négligeables.

**En résumé**, les deux MCG considérés ici convergent vers une augmentation de température d'environ 2°C sur le bassin de la Seine en cas de doublement de CO<sub>2</sub>, mais ils présentent des réponses contrastées des précipitations, qui varient peu selon ARPEGE NEW, alors qu'ARPEGE OLD simule une intensification significative du contraste hiver pluvieux / été peu pluvieux.

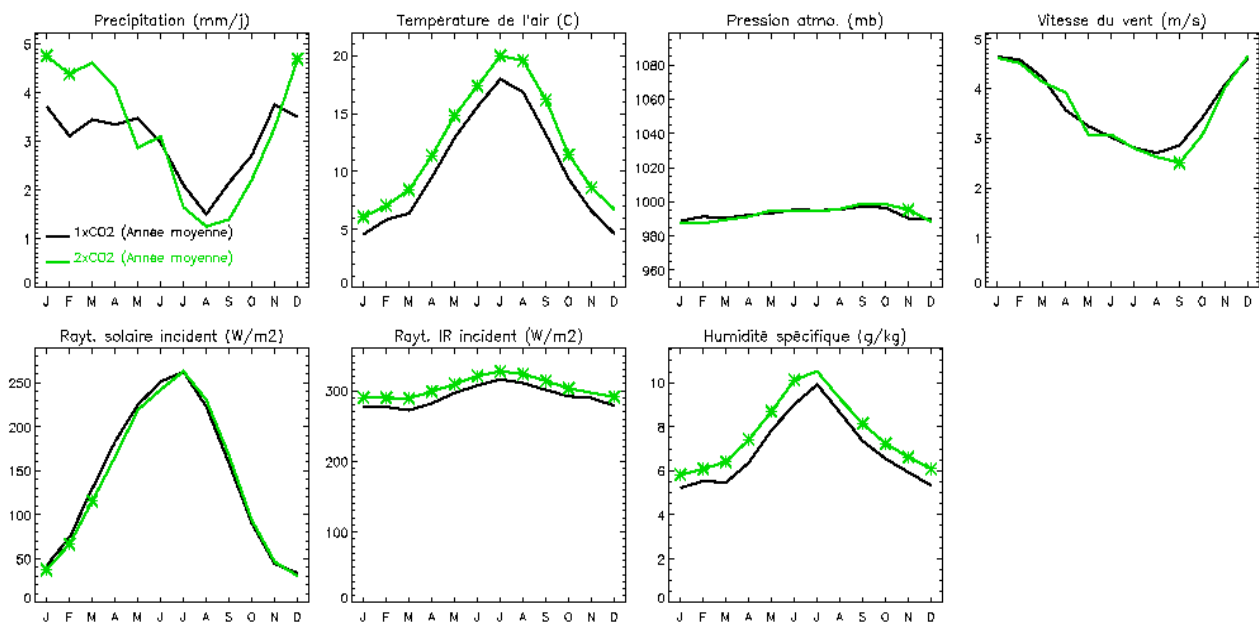


Figure 2: Climat 1xCO2 et 2xCO2 simulé par ARPEGE OLD, en moyenne sur le bassin de la Seine et les 10 années de simulation. Les astérisques indiquent des différences statistiquement significatives entre les 10 moyennes mensuelles 1xCO2 et les 10 moyennes mensuelles 2xCO2 (au risque  $p=0.05$  selon le test de Student).

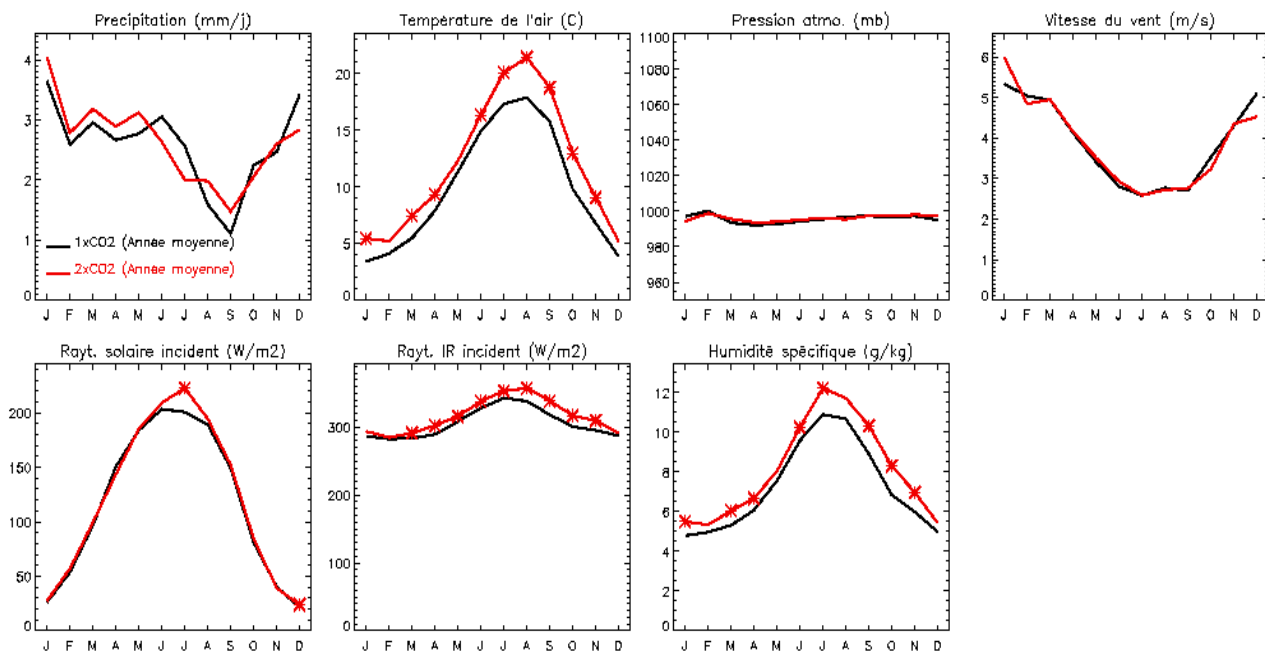


Figure 3: Climat 1xCO2 et 2xCO2 simulé par ARPEGE NEW, en moyenne sur le bassin de la Seine et les 30 années de simulation. Les astérisques indiquent des différences statistiquement significatives entre les 10 moyennes mensuelles 1xCO2 et les 10 moyennes mensuelles 2xCO2 (au risque  $p=0.05$  selon le test de Student).

## 2.5. Constructions des perturbations

### 2.5.1 Définitions

Pour chaque variable météorologique  $X$ , la méthode des perturbations permet de créer des scénarios synthétiques de changement climatique, à partir des valeurs actuelles ( $X_{act}$ ) et des valeurs simulées par un MCG sous  $1xCO_2$  et  $2xCO_2$  ( $X_{1co2}$  et  $X_{2co2}$ ). On distingue essentiellement deux types de perturbations, donnant lieu aux variables perturbées  $X_{add}$  ou  $X_{mult}$ :

- perturbations « additives »:  $X_{add} = X_{act} + (X_{2co2} - X_{1co2})$
- perturbations « multiplicatives » :  $X_{mult} = X_{act} \cdot X_{2co2} / X_{1co2}$
- 

La construction de ces perturbations implique plusieurs choix:

- le choix d'une année, parmi les  $N$  années des 2 simulations  $1xCO_2$  et  $2xCO_2$  (même longueur pour ces deux simulations); on peut aussi choisir de travailler avec la moyenne des  $N$  années. Les perturbations calculées à partir de l'année choisie seront imputées à toutes les années de climat actuel.
- le choix d'un pas de temps de calcul pour les perturbations. Ce pas de temps peut être:
  - mensuel: on calcule la perturbation à partir des moyennes mensuelles  $1xCO_2$  et  $2xCO_2$  (pour l'année considérée), et on applique ces perturbations à tous les pas de temps de calcul (20 minutes pour CaB) du mois considéré dans la série « actuelle » (si perturbations mensuelles de janvier, application à tous les mois de janvier de la série actuelle),
  - décadaire ou journalier, si les simulations MCG  $1xCO_2$  et  $2xCO_2$  sont disponibles à ce pas de temps (c'est le cas pour ARPEGE OLD et ARPEGE NEW)

### 2.5.2 Perturbations choisies pour cette étude

Nous avons conduit une étude détaillée de l'influence des différentes perturbations que l'on peut construire (à partir du MCG ARPEGE OLD et de la « baseline » ISLSCP 1987-1988) sur le climat perturbé et les bilans d'eau simulés par CaB. Nous avons ainsi montré qu'il était préférable d'utiliser des perturbations mensuelles (Ducharne, 2002).

Ce travail a aussi montré que le type de perturbation (additive vs. multiplicative) ne crée de différence que pour les précipitations, en raison du biais des précipitations  $1xCO_2$  simulées par ARPEGE OLD. Les différences résultant du type de perturbation des précipitations sont inférieures à 10% pour la précipitation perturbée et le ruissellement simulé par CaB. Nous préférons donc des perturbations multiplicatives de la précipitation, qui préservent le coefficient de variation ( $C_v$ ) de cette variable.

En ce qui concerne le choix de l'année, l'année moyenne s'impose car le climat se définit par des moyennes à long terme, si bien que les années individuelles n'ont pas de sens si on les étudie de façon isolée, hors d'un contexte de variabilité interannuelle. On peut cependant, pour des objectifs de sensibilité à des variations climatiques plus marquées, travailler avec des années isolées (section 3.2.2). Dans ce cas, les perturbations multiplicatives de la précipitation peuvent être très importantes, et il peut s'avérer plus judicieux d'utiliser des perturbations additives pour cette variable, voire des perturbations « hydrides » (elles sont construites en prenant à chaque pas de temps la perturbation la plus proche de  $X_{act}$  parmi  $X_{mult}$  et  $X_{add}$ ; en d'autres termes, c'est la perturbation qui minimise l'écart au climat actuel).

Finalement, les **scénarios standards**, dont l'impact sera analysé en section 3.1, sont définis par les perturbations suivantes, basées sur l'année moyenne, et calculées au pas de temps mensuel (figure 4) :

- « additives » pour température et humidité de l'air au niveau de la surface, pression atmosphérique à la surface et rayonnement thermique incident,
- « multiplicatives » pour précipitation, vitesse du vent et rayonnement solaire incident.

Le climat correspondant aux scénarios standards OLD et NEW est détaillé dans Ducharne et Gomez (2003).

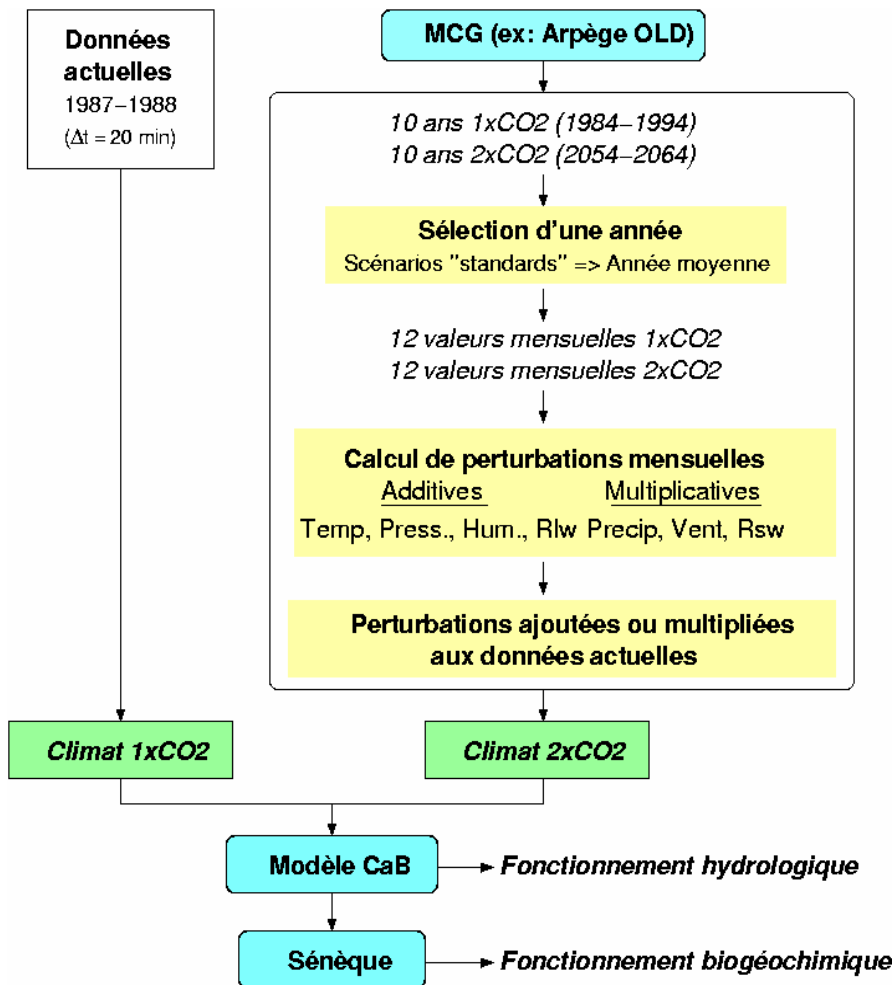


Figure 4: Illustration de la construction du scénario de changement climatique standard à partir des simulations ARPEGE OLD.

### 3. Impact du changement climatique sur l'hydrosystème de surface

L'objectif de cette section est d'analyser l'impact du changement climatique simulé par le modèle ARPEGE OLD et NEW sur le fonctionnement de l'hydrosystème superficiel (bassin versant et rivière), tel qu'il est simulé par les modèles couplés CaB (fonctionnement hydrologique) et Sénèque (fonctionnement biogéochimique). Nous commencerons par comparer les impacts correspondant aux scénarios standards (basés sur le changement climatique moyen) issus de ARPEGE OLD et NEW (section 3.1). Pour mieux évaluer l'importance de ces impacts, ils seront ensuite mis en perspective de ceux d'autres scénarios (des scénarios climatiques plus extrêmes et des scénarios de changement non climatique) en section 3.2.

#### 3.1. Comparaison des scénarios « standard » issus de ARPEGE OLD et NEW

##### 3.1.1 Influence sur l'hydrologie

Il s'agit ici de comparer les bilans d'eau simulés par le modèle CaB, sous climat actuel (1987-1988, *simulation REF*) et sous climat modifié, selon les scénarios standards OLD et NEW (*simulations OLD et NEW*).

Avant d'aller plus loin, il faut se rappeler que le sol a une mémoire, à travers son humidité notamment (e.g. Delworth et Manabe, 1988; Ducharne et Laval, 2000). Pour projeter CaB en climat modifié, il faut donc lui faire oublier l'influence du climat actuel sur l'humidité du bassin. Nous avons donc réalisé une **mise à l'équilibre** du modèle CaB avec les trois climats considérés, grâce à 5 répétitions de chacun des scénarios climatiques. Pour la première répétition, les trois simulations démarrent à partir des mêmes



conditions initiales, notamment l'humidité du sol du 1er janvier 1987 (Ducharne et al., 2001). Les simulations se poursuivent ensuite dans la continuité alors que les scénarios climatiques sont répétés 4 fois.

La figure 5 montre l'évolution au cours de ces 10 ans de l'écoulement total et de l'humidité de la zone racinaire (dont les évolutions sont représentatives de celles de l'humidité totale du bassin), en moyenne sur le bassin de la Seine. Si l'on fait abstraction du cycle saisonnier, l'humidité de la zone racinaire commence par diminuer, très légèrement pour la simulation REF (à cause de la variabilité interannuelle autour du climat moyen), beaucoup plus pour les simulations OLD et NEW, ce qui traduit la mise à l'équilibre vers un nouveau climat plus sec. En parallèle, l'écoulement total diminue, ce qui est particulièrement visible sur les pics de crue. A partir de la troisième répétition, les évolutions sur deux ans deviennent superposables, ce qui indique que la moyenne interannuelle de l'humidité simulée est en équilibre avec le climat, quelque soit le scénario climatique considéré.

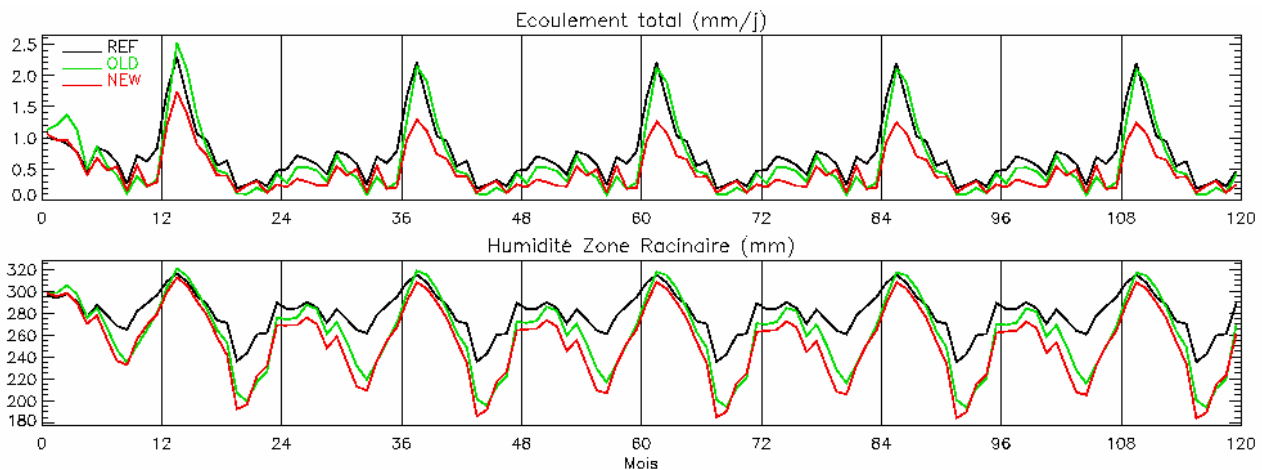


Figure 5: Evolution de l'écoulement total et de l'humidité de la zone racinaire simulés par CaB (moyenne spatiale sur le bassin de la Seine) au cours des 5 répétitions des scénarios climatiques, actuel (REF) ou perturbés (scénarios standards OLD et NEW).

La figure 6 présente donc un zoom sur cette troisième répétition, pendant laquelle les différences entre les simulations sont uniquement liées au climat, et ne sont notamment pas atténuées par des conditions initiales artificiellement égales. Les différences de précipitation entre les scénarios perturbés et le scénario de référence sont bien sûr conformes aux différences correspondantes simulées par ARPEGE OLD et NEW (section 2.4) : par rapport à REF, les précipitations augmentent en hiver et diminuent en été selon OLD, alors qu'elles varient très peu selon NEW.

Selon les deux scénarios de changement climatique, l'évaporation depuis le bassin de la Seine augmente, ce qui s'explique par :

- l'augmentation du rayonnement incident (notamment de sa composante atmosphérique) : le sol reçoit plus d'énergie, qui doit être dissipée, sous forme d'évaporation (chaleur latente) notamment.,
- l'augmentation de la température, qui s'accompagne d'une plus forte demande évaporative de l'air (plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau).

Notons ici que l'effet de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique sur l'évaporation est négligé, alors qu'il devrait limiter l'augmentation de l'évaporation. En effet, la transpiration des plantes est contrôlée par l'ouverture des stomates, qui dépend elle-même de l'assimilation du CO<sub>2</sub> par photosynthèse : une concentration supérieure en CO<sub>2</sub> permet une ouverture stomatique, et donc une transpiration, plus faibles, sans réduire l'assimilation carbonée (source d'énergie pour le métabolisme). Cet effet ne peut pas être représenté avec le modèle CaB, mais il a été évalué à l'aide d'une version améliorée (Curie et Ducharne, 2003; dans ce rapport) : il est du même ordre de grandeur que la différence d'évaporation entre OLD et NEW, soit 3 à 4 fois plus faible que l'effet du climat sur l'évaporation, qu'il ne remet donc pas en cause.

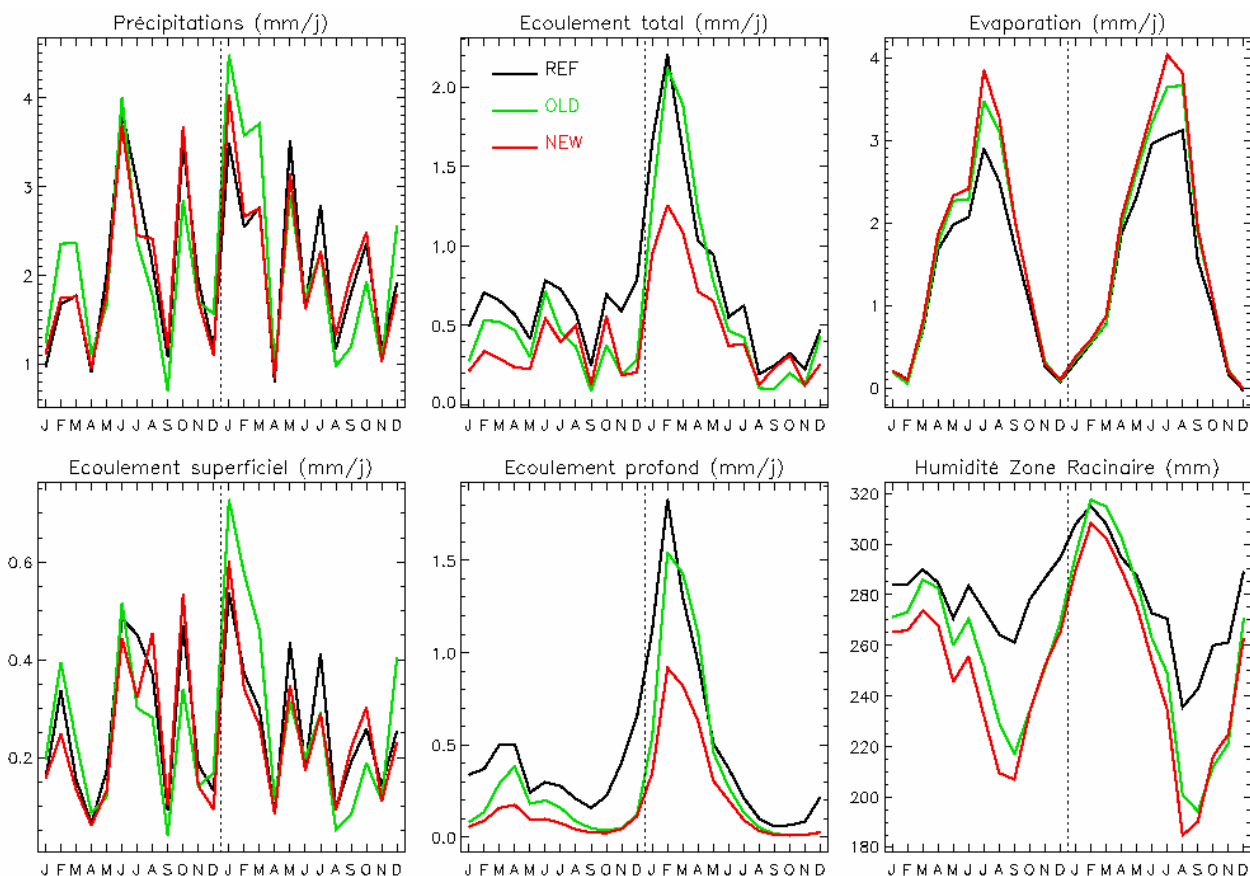


Figure 6: Comparaison des principaux termes du bilan d'eau simulés par CaB (en moyenne spatiale sur la bassin de la Seine) sous les scénarios REF, OLD et NEW, en conditions d'équilibre climatique.

Du fait de l'augmentation de l'évaporation, le sol s'assèche, notamment en été. En hiver sous le scénario OLD, l'humidité de la zone racinaire atteint, voire dépasse, les valeurs simulées par REF, du fait de l'augmentation importante des précipitations. Ce n'est pas le cas selon le scénario NEW. L'écoulement de base (profond) suit l'humidité et donc diminue dans les deux cas. Cette diminution est particulièrement marquée en fin d'été, et elle se poursuit en hiver avec le scénario NEW, selon lequel la recharge hivernale n'est pas augmentée puisque les précipitation n'augmentent pas. Les écoulements superficiels suivent quant à eux les précipitations : faibles variations selon NEW, augmentation hivernale et diminution estivale selon OLD.

**Au final**, l'écoulement total, qui est la somme des deux termes précédents, diminue dans les deux cas de changement climatique. Cette réponse est cependant bien individualisée : l'écoulement total diminue beaucoup plus selon NEW que selon OLD (-77 mm/an et -33 mm/an respectivement, à comparer à un écoulement moyen de 263 mm/an selon REF, correspondant à un débit de 615 m<sup>3</sup>/s à Poses en moyenne sur les deux ans). Ceci s'accompagne d'une diminution très forte de l'écoulement total en hiver selon NEW (crues nettement plus faibles qu'à l'actuel en moyenne). C'est par contre avec OLD que l'écoulement total est le plus faible en été, quand la réduction des précipitations, et donc des écoulements superficiels, se rajoute à la diminution de l'humidité et de l'écoulement de base.

### 3.1.2 Influence sur la qualité biogéochimique

Les écoulements ci-dessus, simulés par CaB à partir des scénarios climatiques REF, OLD et NEW, ont été transmis au modèle Sénèque, afin d'évaluer l'influence du changement climatique sur la qualité biogéochimique des cours d'eau (en terme de concentrations en nutriments, carbone, oxygène dissous et de biomasse phytoplanctonique). **Ce changement hydrologique est le seul que nous ayons imposé en entrée de Sénèque.** Les variations de rayonnement solaire (qui influencent la photosynthèse du phytoplancton) simulées par ARPEGE OLD et NEW sont négligeables (section 2.4) et ont donc été négligées. Quant au

probable réchauffement de l'eau, il a aussi été négligé. En effet, nous ne disposons pas encore d'une paramétrisation permettant de l'estimer. Des études préliminaires indiquent cependant que le réchauffement de l'eau est sans doute inférieur ou égal au réchauffement de l'air (L'Heureux, 2002), et nous avons précédemment montré que l'effet d'un réchauffement de l'eau de 2°C sur le fonctionnement biogéochimique de la Seine était très modeste, et négligeable au premier ordre face à celui de la réduction des écoulements due à un réchauffement de l'air de 2°C (Ducharme et al., 2001). Est enfin négligée l'influence du changement climatique sur les apports diffus (ex: concentrations souterraines en nitrates, modification des intrants agricoles) et sur la gestion des barrages réservoirs (les prises et rejets d'eau depuis les grands réservoirs de la Seine sont ceux de 1987-1988 pour toutes les simulations).

Nous avons analysé l'impact des scénarios OLD et NEW sur la qualité de l'eau en une vingtaine de stations dans le bassin de la Seine. Nous ne présenterons dans la suite que les résultats de deux stations (figure 7), Arcis-sur-Aube (à l'aval de l'Aube) et Conflans-Sainte-Honorine (sur la Seine, à l'aval de Paris et des rejets de la station d'épuration d'Achères), qui sont localisées sur la figure 1. Aux deux stations, les variations de débit liées aux scénarios standard de changement climatique correspondent aux variations de l'écoulement total en moyenne sur la bassin (figure 6), modulées bien sûr par des caractéristiques « locales » (superficie du bassin amont, distribution spatiale du climat et de ses perturbations).

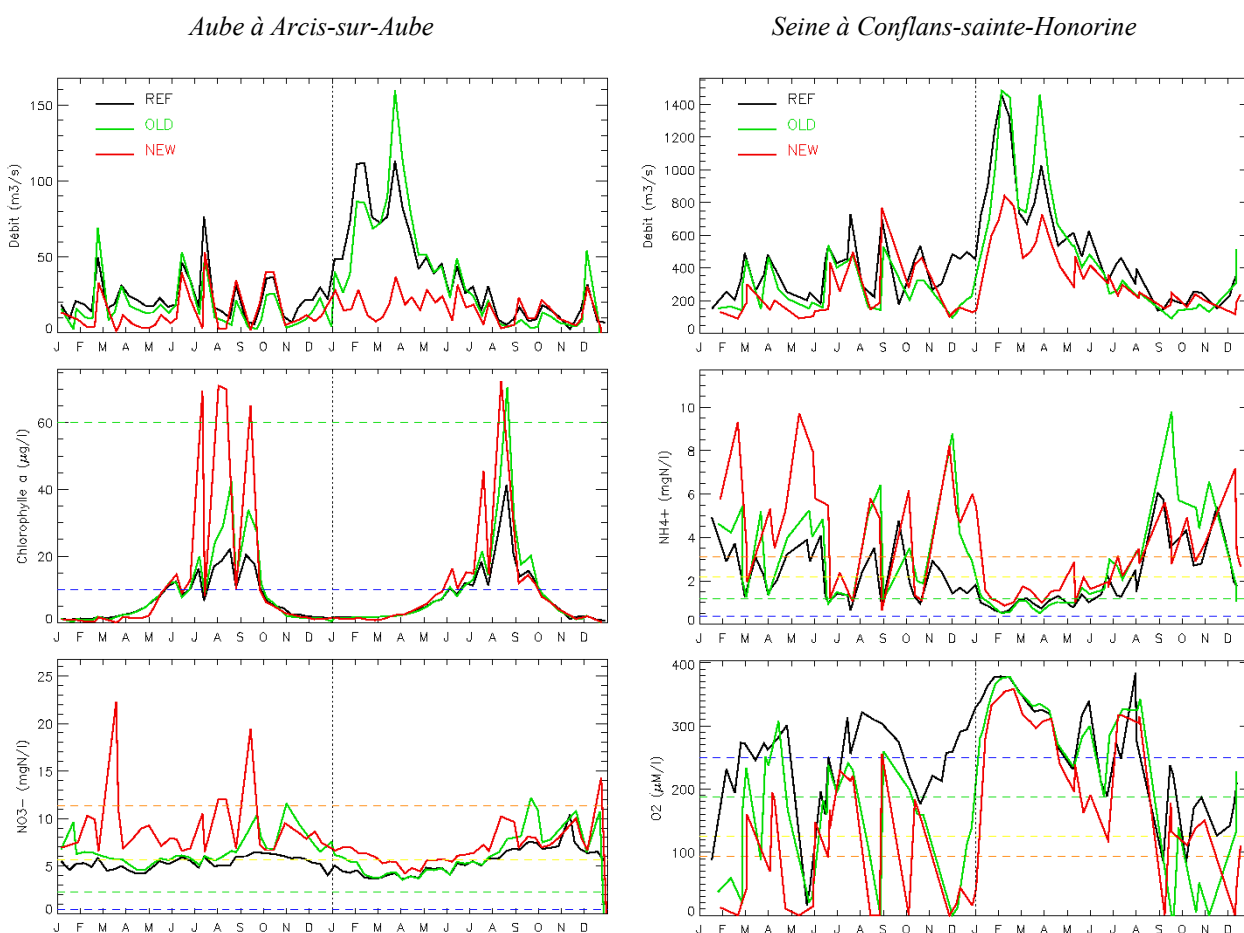


Figure 7: Influence des scénarios standards OLD et NEW de changement climatique sur le débit et certains paramètres clés de la qualité biogéochimique simulés par Sènèque. Les tiretés horizontaux en bleu/vert/jaune/orange donnent les limites supérieures des classes correspondantes du SEQ-Eau.

**Dans l'Aube**, Sènèque simule une augmentation de la biomasse phytoplanctonique (quantifiée par la concentration en chlorophylle *a*, selon Garnier et al., 1995) pendant toute la période de croissance (centrée en été). Elle est assez faible selon OLD, mais beaucoup plus spectaculaire selon NEW, et s'explique par la réduction du débit. Celui-ci augmente en effet le temps de résidence dans le cours d'eau, c'est à dire le temps

disponible pour la croissance du phytoplancton. Un autre effet de la diminution du débit, quoi que sans doute secondaire par rapport au précédent, est la diminution de la profondeur du cours d'eau, ce qui augmente la pénétration moyenne de lumière dans la colonne d'eau et favorise la photosynthèse donc la croissance du phytoplancton.

La figure 7 montre aussi une augmentation sous changement climatique de la concentration en nitrates dans l'Aube. Dans Sénèque, les apports diffus sont caractérisés par des concentrations prescrites pour les écoulements superficiels et profonds (e.g. Billen et al., 1994). Dans notre étude, ces concentrations ne changent pas quand le climat change, mais la concentration en rivière, qui résulte du mélange des eaux profondes et souterraines varie avec le poids relatif des écoulements superficiels et souterrains. Elle augmente dans l'Aube parce que les écoulements profonds diminuent alors que leur concentration en nitrates est inférieure à celle des écoulements superficiels (571 vs. 495  $\mu\text{mol/l}$ ). En conséquence, la concentration en nitrates, qui varie pour l'actuel entre les classes passable/jaune et mauvaise/orange du SEQ-Eau, est résolument mauvaise/orange sous le scénario OLD, et rentre épisodiquement sous le scénario NEW dans la classe très mauvaise/rouge, dans laquelle les concentrations en nitrates dépassent le seuil de potabilité de 50  $\text{mgNO}_3/\text{l}$ .

Parmi tous les **bassins amont**, l'Aube présente la réponse la plus marquée aux deux scénarios de changement climatique. En particulier, l'augmentation de biomasse phytoplanctonique est rare dans les bassins amont, car les temps de résidence restent courts. Les concentrations en nutriments varient plus fréquemment, mais n'augmentent pas forcément (voir ci-dessus). Dans tous les cas, ces concentrations restent fortes, et n'atteignent jamais des valeurs qui pourraient limiter la croissance phytoplanctonique.

**A Conflans-Sainte-Honorine**, l'effet le plus marquant du changement climatique est l'augmentation de la concentration en ammonium, toujours à cause de la diminution du débits, qui limite la dilution des effluents de la station d'épuration d'Achères. Cet effet est donc logiquement plus marqué selon le scénario NEW. La concentration en carbone organique présente une augmentation analogue, et il en résulte une très forte diminution de la teneur en oxygène dissous, sur une grande partie de l'année, pouvant aller jusqu'à l'anoxie complète. En effet, tant la nitrification de l'ammonium supplémentaire par les bactéries nitrifiantes que la dégradation de la matière organique supplémentaire par les bactéries hétérotrophes consomment de l'oxygène.

Ces effets se résorbent partiellement lors du transfert vers l'aval, mais la qualité y reste plus mauvaise sous changement climatique qu'à l'actuel. **A l'aval des grands affluents de la Seine** (Oise, Marne et Seine Amont), le changement climatique est également associé à une réduction de la teneur en oxygène dissous, par limitation de la dilution des rejets ponctuels. Cet impact est cependant beaucoup moins marqué, car les rejets ponctuels correspondants sont beaucoup plus réduits que ceux d'Achères, qui épure les rejets de plusieurs millions d'habitants de l'agglomération parisienne. Sénèque simule aussi une augmentation de la biomasse phytoplanctonique, à cause de l'augmentation du temps de résidence dans le cours d'eau quand le débit diminue sous changement climatique. Cet impact est cependant moins marqué que sur l'Aube, à cause de régulations top-down qui limitent la biomasse : broutage par le zooplancton, filtrage par des mollusques filtreurs comme *Dreissena* (Akopian et al., 2001), lyses virales massives au delà d'une biomasse seuil (Garnier et al., 1995).

### 3.2. Scénarios complémentaires

Cette section présente les résultats de plusieurs études de sensibilité, réalisées pour mieux cerner l'importance qualitative des impacts du changement climatique selon les scénarios standards OLD et NEW, en les replaçant dans un contexte plus large.

#### 3.2.1 Comparaison avec des scénarios non climatiques : changement de couverture végétale

La première question que l'on peut se poser est « comment se placent les impacts des deux scénarios standards OLD et NEW par rapport à ceux d'autres changements possibles dans le bassin de la Seine » ? A titre d'exemple, nous avons comparé l'impact des deux scénarios standards à celui d'un changement radical de la couverture végétale dans le bassin de la Seine. Nous avons donc réalisé deux nouvelles simulations avec le modèle CaB, toutes deux sous climat actuel (forçage météorologique ISLSCP 1987-1988). Elles ne diffèrent entre elles et avec la simulation REF que par leur couverture végétale:

- *simulation REF* : dans chacun des 29 sous-bassins unitaires, la végétation est uniforme mais définie comme un composite de forêt et de graminées, selon la figure 1. Dans ce cadre, tous les paramètres qui dépendent du type de végétation, notamment ceux qui contrôlent la résistance stomatique, sont définis comme la moyenne des paramètres de la forêt caducifoliée et des graminées, au prorata de la surface occupée par chacun de ces deux types. Échappent à cette moyenne les paramètres morphologiques qui sont accessibles par observation satellitaire (indice de surface foliaire, hauteur et rugosité ; données ISLSCP, Sellers et al, 1996), laquelle intègre déjà les hétérogénéités au sein des sous-bassins unitaires.
- *simulation Forêt* : la végétation est toujours uniforme dans chacun des 29 sous-bassins, mais elle est composée à 100% du type forêt caducifoliée. Pour rendre compte de l'effet de la morphologie du couvert sur les bilans d'eau et d'énergie, les paramètres morphologiques issus de l'observation satellitaire pour la simulation REF ont ici des valeurs pré-établies pour la forêt caducifoliée (Koster et Suarez, 1996).
- *simulation Prairie* : comme la simulation Forêt, mais la végétation est ici à 100% des graminées, dans les 29 sous-bassins unitaires.

Comme pour les simulations REF, OLD et NEW, nous avons réalisé pour les simulations Forêt et Prairie une mise à l'équilibre du modèle CaB (avec son climat et sa nouvelle végétation), grâce à 5 itérations du forçage climatique actuel à partir des mêmes conditions initiales que pour les trois autres simulations. L'équilibre est atteint à la troisième répétition, au sein de laquelle les différences entre les 5 simulations ne sont donc liées qu'au climat ou à la couverture végétale.

Sur les figures 8 et 9, qui présentent un zoom sur cette troisième répétition, l'enveloppe bleue représente la différence entre les simulations Forêt et Prairie. Elle couvre donc toute la diversité possible des « mélanges » forêt caducifoliée / graminées au sein du bassin de la Seine, selon le modèle CaB. Ainsi, il est normal que la courbe noire de la simulation REF se retrouve dans cette enveloppe bleue. On retrouve aussi sur ces figures les courbes verte et rouge des simulations OLD et NEW (forcées par les scénarios climatiques standards OLD et NEW).

Sur la figure 8, les courbes verte et rouge sortent nettement de l'enveloppe bleue. Plus important, les différences entre ces courbes et la courbe noire sont en général plus larges que l'enveloppe bleue (et sinon de largeur équivalente). Ceci indique que l'impact hydrologique du changement climatique moyen simulé par les MCG ARPEGE OLD et ARPEGE NEW est supérieur à celui du changement drastique de végétation appréhendé ici par le modèle CaB.

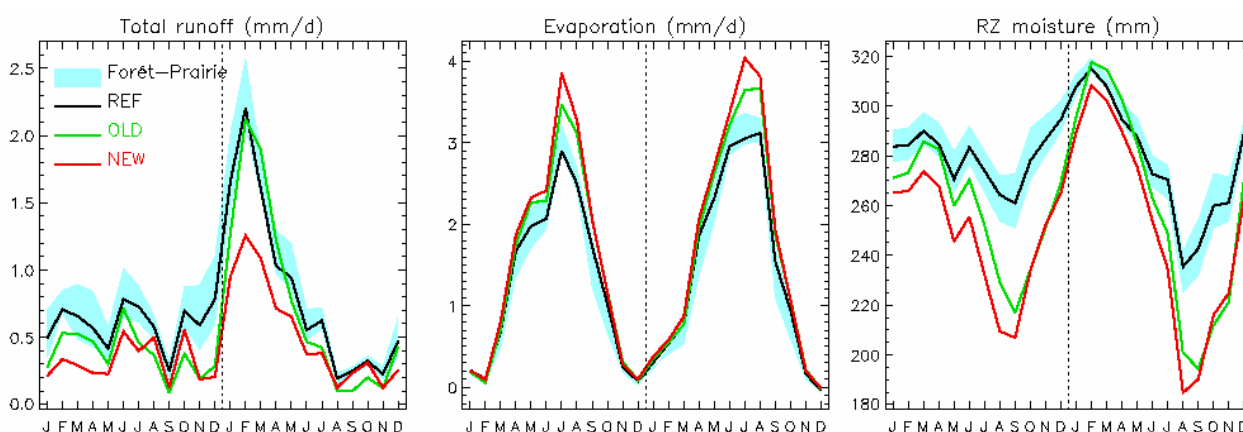


Figure 8: Comparaison de l'impact du changement climatique selon OLD et NEW avec l'impact d'un changement drastique de végétation (enveloppe bleue) : principaux termes du bilan d'eau simulés par CaB en moyenne spatiale sur le bassin de la Seine (après mise à l'équilibre avec le climat et la végétation).

La figure 9 présente le même type de comparaison pour le débit et la qualité biogéochimique en rivière, aux deux stations précédemment sélectionnées pour un impact important du changement climatique (figure 7). Là encore, les impacts des scénarios OLD et NEW sont supérieurs à ceux du changement de végétation simulé. Cette conclusion, très systématique pour le changement climatique du scénario NEW, l'est un peu moins selon le scénario OLD, dont l'impact est plus faible que celui du scénario NEW, et qui peut localement être du même ordre de grandeur que l'impact du changement de végétation (comme à Arcis-sur-Aube). Notons enfin que, même dans les bassins amont où l'effet du changement climatique sur la qualité de l'eau est faible, cet effet reste plus fort que celui du changement de végétation, comme illustré en figure 10 dans le cas de l'Yonne.

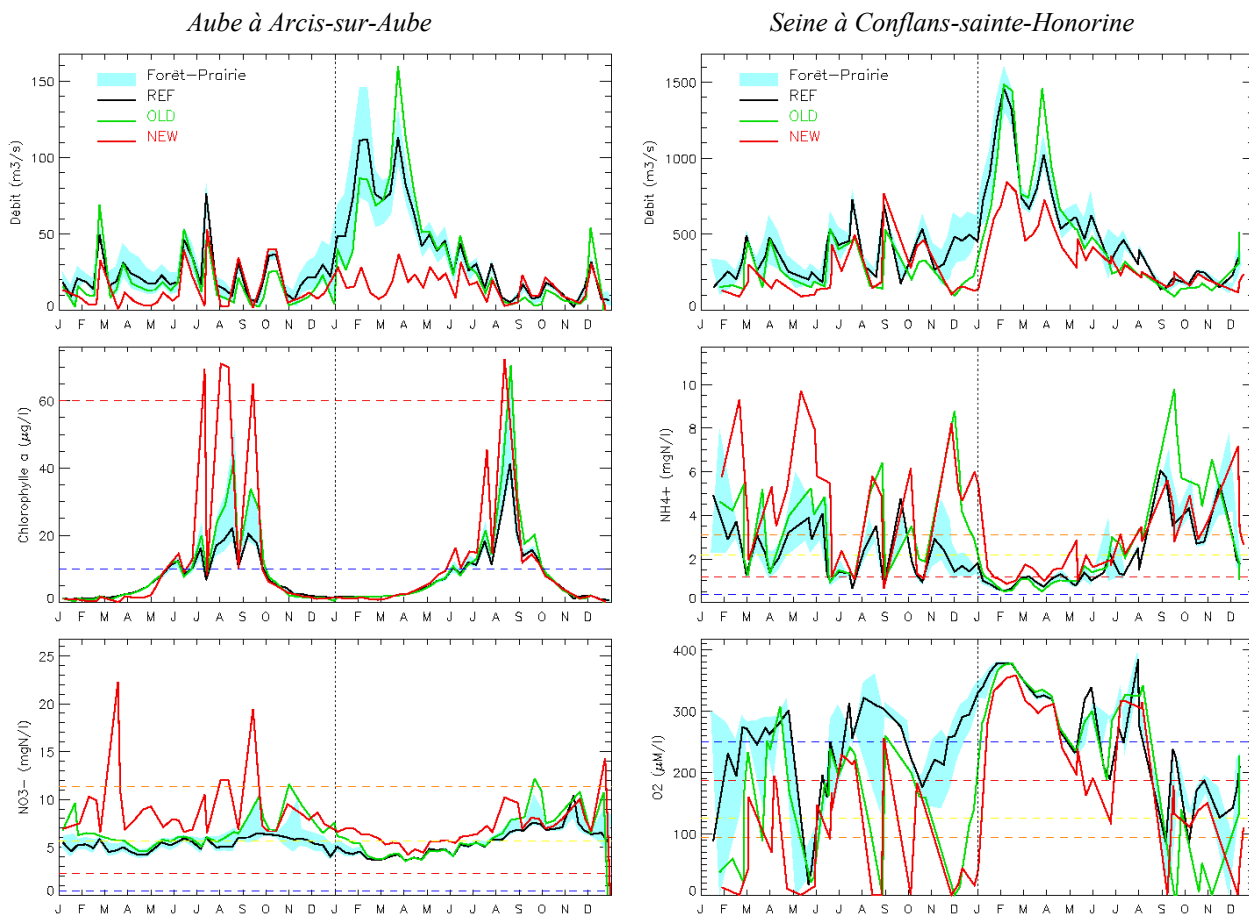


Figure 9: Comparaison de l'impact du changement climatique selon OLD et NEW avec l'impact d'un changement drastique de végétation (enveloppe bleue) : débit et certains paramètres clés de la qualité biogéochimique simulés par Sénèque. Les tiretés horizontaux en bleu/vert/jaune/orange donnent les limites supérieures des classes correspondantes du SEQ-Eau.

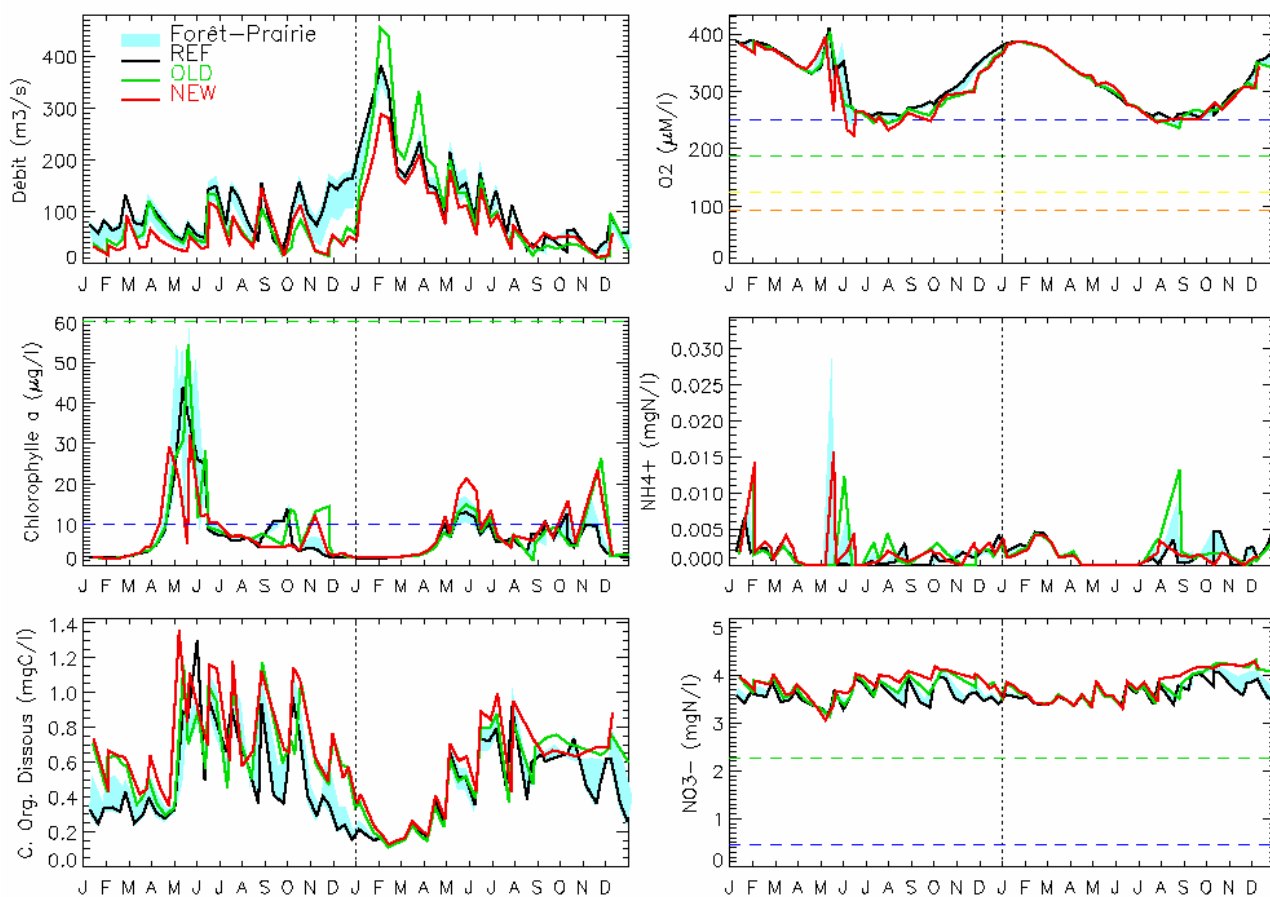


Figure 10: comme la figure 9 mais à Courlon-sur-Yonne.

### 3.2.2 Variabilité interannuelle

Nous avons aussi cherché à savoir si l'on pouvait aboutir à des impacts plus contrastés que ceux du changement climatique moyen, en exploitant la variabilité interannuelle des simulations ARPEGE. Pour ces tests, nous nous sommes basés sur les simulations ARPEGE OLD, longues de 10 ans. Alors que le scénario standard analysé dans les sections précédentes est basé sur la moyenne des 10 ans, nous avons construit ici 10 perturbations, au pas de temps mensuel, à partir de chacune des 10 années individuelles : une première perturbation est construite à partir de la première année des simulations 1xCO<sub>2</sub> et 2xCO<sub>2</sub>, et ainsi de suite. Pour toutes les variables de forçage de CaB, nous avons conservé le même type de perturbation (additive ou multiplicative) que pour le scénario standard, à l'exception des précipitations pour lesquelles nous avons préféré des perturbations « hybrides » (section 2.5.2), qui sont plus faibles, mais surtout plus stables, que les perturbations multiplicatives ou additives.

Nous avons donc réalisé **10 nouvelles simulations** de 2 ans à partir de chacun des 10 nouveaux scénarios (climat actuel 1987-1988 perturbé par les 10 nouvelles perturbations). Ces simulations ont démarré aux conditions initiales de la simulation OLD (sous scénario standard) au début de la troisième répétition. En effet, les nouveaux scénarios ne représentent que des variations transitoires autour du climat moyen de ARPEGE OLD. Ils n'ont donc pas de valeur climatologique s'ils sont isolés du climat moyen, et il n'y aurait pas de sens à équilibrer le modèle CaB avec les scénarios correspondants.

Notons enfin que la variabilité temporelle des modèles de circulation générale est rarement validée, que ce soit la variabilité interannuelle autour du climat moyen (qui requiert des simulations *et* des observations fiables du climat sur plusieurs décennies), ou la variabilité des extrêmes, qui se réalisent à des échelles de temps beaucoup plus courtes, mais qui influencent bien sûr la variabilité interannuelle. Quand de telles validations sont entreprises, elles montrent le plus souvent que les extrêmes sont mal capturés par les MCG, parce qu'ils sont associés à des processus à petite échelle spatiale qui ne sont pas résolus explicitement dans les MCG (e.g. Gibelin et Déqué, 2001). Par conséquent, il serait trompeur d'accorder la moindre

confiance aux 10 nouveaux scénarios en terme de fréquence des années extrêmes ; le seul intérêt de ces scénarios est d'illustrer la gamme des possibles.

La figure 11 montre une large dispersion des 10 nouveaux scénarios autour du scénario moyen OLD Hybride (basé lui aussi sur des perturbations hybrides des précipitations). Cette dispersion s'observe sur les variables de forçage météorologique (exemples des précipitations, de la température et de l'humidité de l'air) ainsi que sur l'hydrologie simulée par le modèle CaB. On peut notamment distinguer 7 années qui sont plus « sèches » que la moyenne (évaporation plus forte, écoulements et humidité de la zone racinaire plus faibles) et 3 années qui sont plus « humides ».

Nous avons alors sélectionné les deux scénarios individuels qui maximisent les différences d'écoulement total (en positif et en négatif) avec le scénario moyen. Il s'agit des scénarios Y3H (« sec ») et Y4H (« humide »), dont l'impact sur les principaux termes du bilan d'eau est comparé en figure 12 avec celui des scénarios standards OLD et NEW, identifiés par une enveloppe verte.

Cette figure confirme des impacts hydrologiques amplifiés : le **scénario Y3H (« sec »)** correspond à un bassin nettement plus sec que sous les deux scénarios standard OLD et NEW. En terme d'écoulement, c'est en hiver que la différence est la plus forte. En été en effet, l'écoulement de base est trop faible pour varier beaucoup (voir les différences négligeables d'écoulement de base entre les simulations OLD et NEW en figure 6), et les précipitations sont beaucoup moins éloignées des précipitations actuelles qu'en hiver (figure 11), ce qui est cohérent avec le fait que les différences de précipitations moyennes entre les simulations ARPEGE OLD 1xCO2 et 2xCO2 ne sont pas statistiquement significatives en été (figure 2).

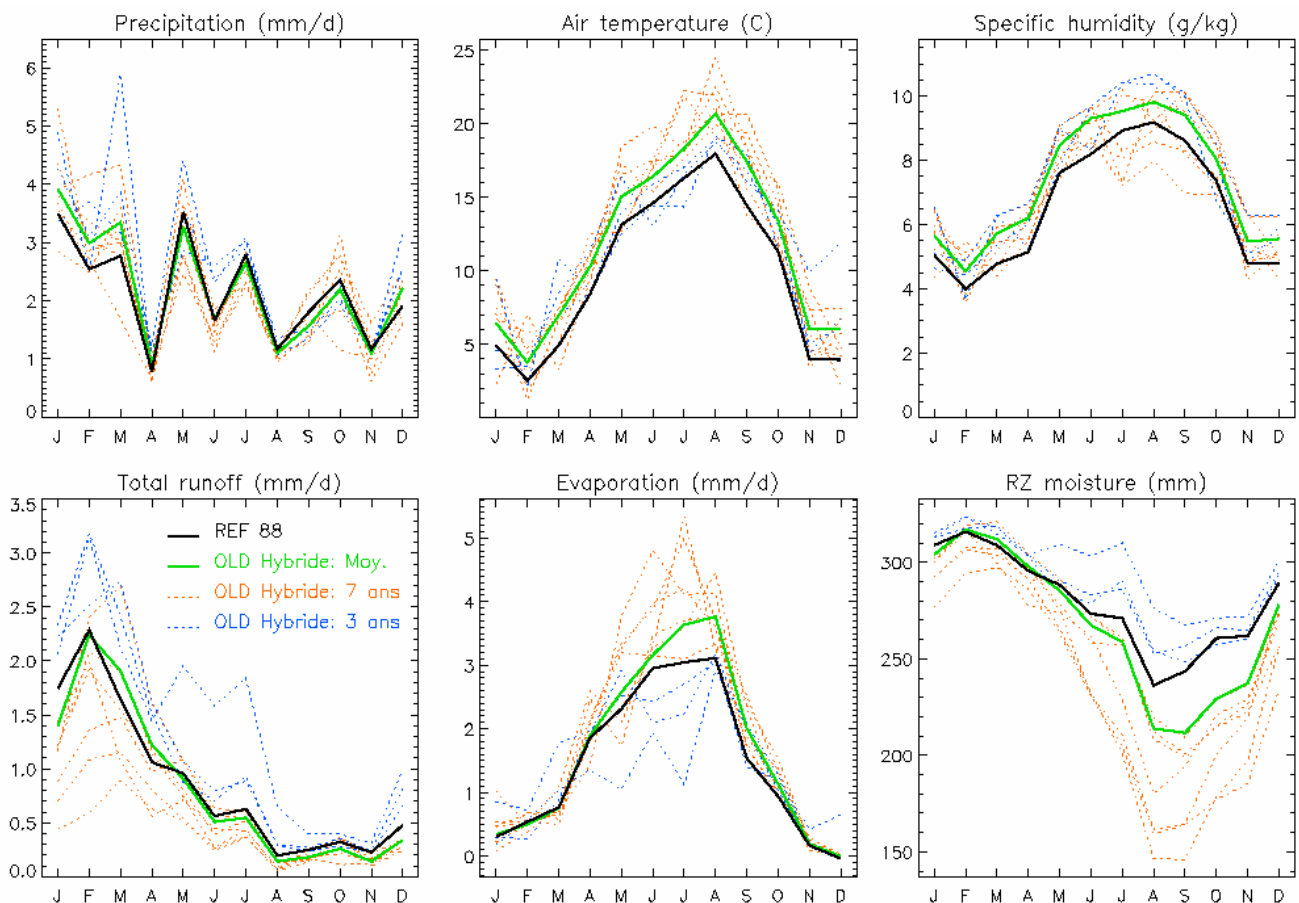


Figure 11: Comparaison du changement climatique moyen avec celui de chacune des années individuelles (10 ici pour la simulation ARPEGE OLD) : dispersion des forçages climatiques (exemple des précipitations, température et humidité de l'air) et des principaux termes du bilan d'eau simulés par CaB.



Le **scénario Y4H (« humide »)** montre par contre qu'en dépit d'un climat moyen plus « sec », des années très « humides » restent possibles. Elles se caractérisent notamment par des crues importantes en été, avec des écoulements qui peuvent atteindre les valeurs hivernales actuelles. Ces situations s'expliquent par la conjonction de deux effets, qui tendent tous deux à augmenter la recharge des nappes (et donc l'écoulement de base) et l'humidité du sol (qui favorise les écoulements superficiels). Ces deux effets sont : (i) une augmentation hivernale des pluies, et donc de l'humidité du sol et de la recharge des nappes, et (ii) une diminution de l'évaporation estivale, à cause d'une humidité de l'air plus élevée, ce qui limite le gradient d'humidité entre la surface et l'atmosphère, ainsi que le rayonnement solaire incident, par une nébulosité accrue.

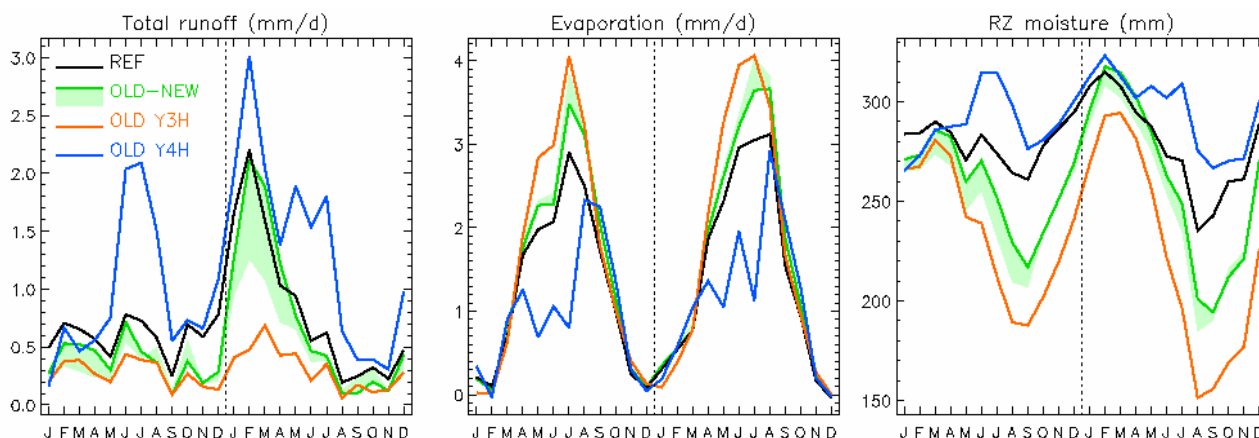


Figure 12: Comparaison de la dispersion entre les scénarios standards OLD et NEW (enveloppe verte) et la dispersion maximale liée à la variabilité interannuelle du changement climatique simulés par ARPEGE OLD (courbes orange et bleue) : principaux termes du bilan d'eau simulés par CaB en moyenne spatiale sur le bassin de la Seine.

La figure 13 présente le même type de comparaisons pour le débit et la **qualité biogéochimique en rivière**, aux deux stations précédemment sélectionnées. Encore une fois, la seule source de différence entre les simulations Sénèque est le changement des écoulements simulés par CaB sous les différents scénarios de changement climatique, puisque tous les autres impacts possibles du changement climatique sur le fonctionnement biogéochimique de la Seine sont ignorés (section 3.1.2). Aux deux stations, le scénario Y4H (« humide ») améliore considérablement la qualité de l'eau (qui est même meilleure qu'à l'actuel). En effet, l'augmentation du débit agit à l'inverse de sa diminution, en particulier en été : les temps de résidence sont réduits, ce qui limite la biomasse phytoplanctonique (y compris à Conflans), et la dilution des apports ponctuels augmente, ce qui limite spectaculairement le déficit en oxygène dissous, en particulier à l'aval de la station d'épuration d'Achères (station de Conflans-Sainte-Honorine). Ne perdons pas de vue cependant que la crue estivale peut en elle-même être problématique.

Pour les raisons inverses, le scénario Y3H (« sec ») empire logiquement la situation par rapport au changement climatique moyen, selon OLD et selon NEW. Les exemples les plus marquants sont les suivants :

- à Arcis-sur Aube, l'augmentation de la biomasse phytoplanctonique devient une charge en matière organique, qui alimente le métabolisme des micro-organismes hétérotrophes, ce qui consomme de l'oxygène (sa teneur diminue). Ceci caractérise une situation d'eutrophisation..
- à Conflans-Sainte-Honorine, les débits sont très faibles tout au long de l'hiver, si bien que les déficits en oxygène sont critiques tout au long de l'année, à cause de la moindre dilution des effluents d'Achères.

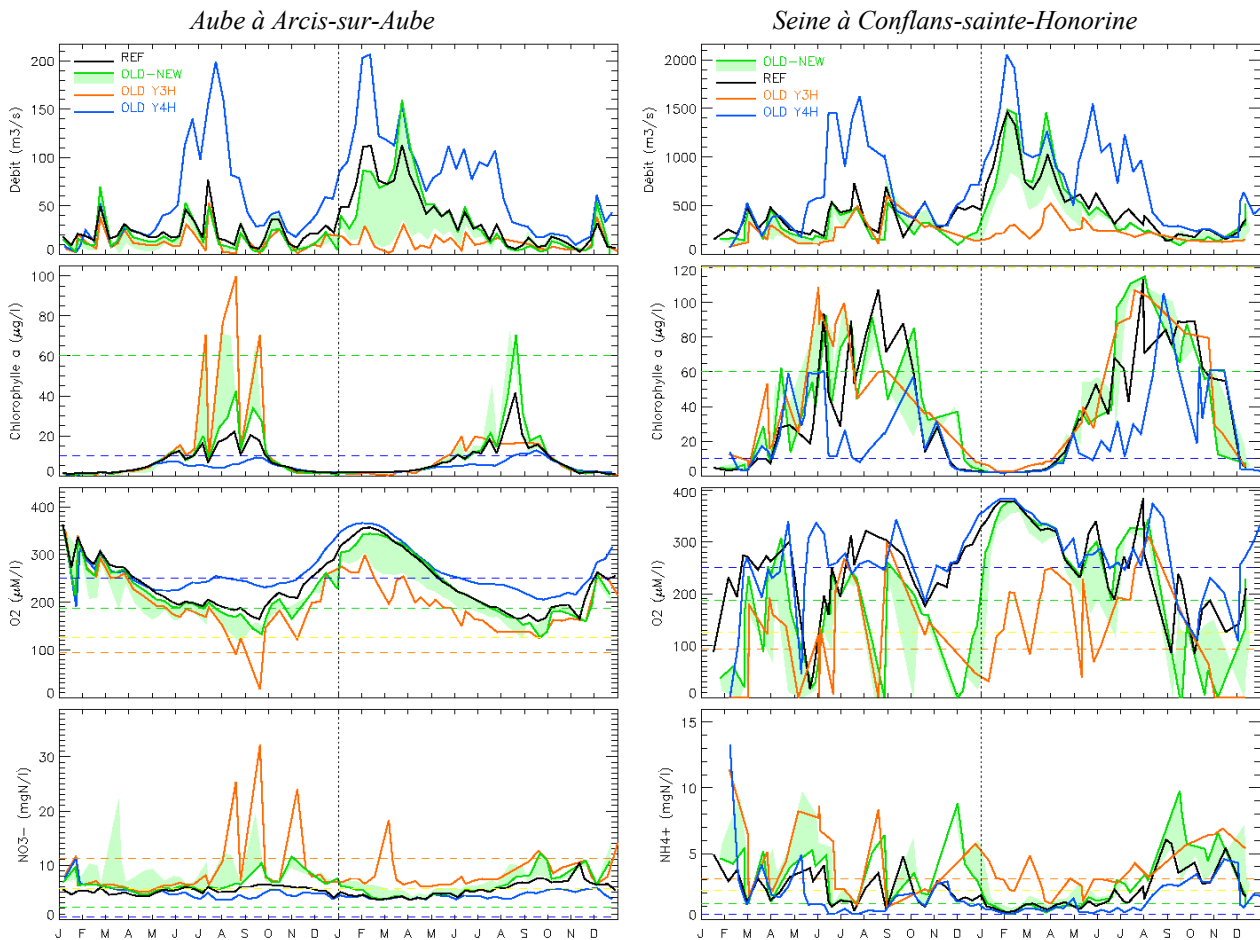


Figure 13: Comparaison de la dispersion entre les scénarios standards OLD et NEW (enveloppe verte) et la dispersion maximale liée à la variabilité interannuelle du changement climatique simulés par ARPEGE OLD (courbes orange et bleue) : débit et certains paramètres clés de la qualité biogéochimique simulés par Sénèque. Les tiretés horizontaux en bleu/vert/jaune/orange donnent les limites supérieures des classes correspondantes du SEQ-Eau.

## 4. Conclusion

### 4.1. Résumé

L'objectif de cette étude était d'analyser l'impact sur l'hydrosystème superficiel de la Seine (bassin versant et rivière) du changement climatique qui pourrait résulter de l'augmentation anthropique des gaz à effet de serre.

Pour ce faire, nous avons construit, par la méthode des perturbations, deux scénarios du changement climatique moyen, à partir de simulations par les MCG ARPEGE OLD et ARPEGE NEW du changement climatique dû à un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Ces deux MCG s'accordent sur une augmentation de température d'environ 2°C sur le bassin de la Seine, mais ils présentent des réponses contrastées des précipitations, qui varient peu selon ARPEGE NEW, alors qu'ARPEGE OLD simule une augmentation significative des précipitations hivernales, accompagnée d'une diminution (mais non significative) des précipitations estivales (section 2.4).

L'impact hydrologique de ces changements du climat moyen (scénarios standards OLD et NEW, section 2.5.2) a été analysé grâce au modèle CaB (section 2.2.1). Il a montré une tendance générale à l'assèchement du bassin de la Seine, avec en particulier des étiages estivaux plus sévères qu'à l'actuel. Selon le scénario NEW, cet effet est dominant car les variations de précipitation sont faibles. Ainsi, le débit diminue non seulement en été mais il diminue aussi fortement en hiver. Selon le scénario OLD, les variations

de précipitation accentuent la sévérité des étiages estivaux, mais elles limitent grandement la diminution des débits hivernaux, qui sont restés du même ordre de grandeur qu'à l'actuel (section 3.1.1).

Les écoulements simulés par CaB sous scénarios de changement climatique ont ensuite été transmis au modèle Sénèque (section 2.2.2), qui simule la qualité biogéochimique des cours d'eau. Ces impacts sont souvent assez faibles dans les sous-bassins amont (nous avons détaillé la réponse maximale dans ces sous-bassins, celle de l'Aube), mais ils sont plus marqués dans les axes principaux (Seine Amont, Marne, Oise et Seine Aval). Dans tous les cas, cette réponse consiste en une aggravation de la qualité biogéochimique, qui s'explique par la diminution des débits. Son effet le plus néfaste est de limiter la dilution des apports ponctuels aux cours d'eau, ce qui diminue la teneur en oxygène, et entraîne des déficits en oxygène très importants à l'aval de Paris (à cause des effluents de la station d'épuration d'Achères). Les autres manifestations de la diminution des débits sont l'augmentation de la croissance phytoplanctonique (par augmentation du temps de résidence dans les cours d'eau), et des variations des concentrations en nutriments (N, P, Si). Celles-ci sont soit positives soit négatives selon les conditions locales, mais elles n'amènent jamais les concentrations en nitrates et phosphates à devenir limitantes pour la croissance phytoplanctonique (section 3.1.2).

Nous avons ensuite réalisé plusieurs études de sensibilité, afin de mieux cerner l'importance qualitative des impacts ci-dessus, en les replaçant dans un contexte plus large (section 3.2). Ce travail a montré que les impacts hydrologiques et biogéochimiques du changement climatique moyen sont plus importants que ceux d'un changement radical de la couverture végétale (passage d'un bassin entièrement recouvert de graminées à un bassin entièrement recouvert de forêt, selon le modèle CaB). De plus, la variabilité interannuelle du climat simulé par ARPEGE peut aboutir à des situations beaucoup plus contrastées que celles résultant du changement climatique moyen, avec des années plus sèches et plus humides, ces dernières pouvant même être plus humides qu'à l'actuel. Ces effets sont cependant ponctuels, ils ne représentent que des variations transitoires autour de l'état moyen (sans que l'on puisse se prononcer sur leur fréquence) et ne remettent pas en cause la tendance à un bassin plus sec en moyenne selon les deux MCG ARPEGE OLD et ARPEGE NEW (section 3.2.2).

## **4.2. Limites et perspectives de l'étude**

Deux MCG ne suffisent pas à appréhender toutes les incertitudes des simulations de changement climatique, qui proviennent des MCG eux-mêmes et des scénarios d'émissions en gaz à effet de serre (Houghton et al., 2001). Comme indiqué par la comparaison des scénarios ARPEGE OLD et ARPEGE NEW, 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). Ces variations de précipitation contrôlant largement les impacts hydrologiques, et par suite les impacts biogéochimiques, il est donc fondamental de disposer d'autres simulations MCG pour espérer caractériser la marge d'incertitude du changement climatique potentiel. Au cours de l'année 2003, nous généraliserons donc l'étude présentée ci-dessus, en exploitant le plus grand nombre possible de simulations du changement climatique parmi celles qui sont disponibles au Laboratoire de Météorologie Dynamique (tableau 2) et par le biais de l'International Panel on Climate Change (tableau 3). Nous analyserons aussi une deuxième simulation ARPEGE NEW, mais sous scénario d'émission SRES-A2, plus pessimiste en terme de concentrations en CO<sub>2</sub> à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.

Tableau 2 : Simulations de changement climatique disponibles au LMD.

MCG	Schéma de surface	Résolution	Durée	TSM <sup>a</sup> 1xCO <sub>2</sub>	TSM <sup>a</sup> 2xCO <sub>2</sub>
LMD-Z	Bucket	100x100 km <sup>2</sup> sur Seine (zoom)	10 ans	Climatologiques (pas de variabilité interannuelle)	Climatologiques perturbées selon HadCM2 <sup>b</sup>
LMD6	Bucket	96x75 points de grilles	10 ans	1979-1989 (observées)	1979-1989 perturbées selon HadCM2 <sup>b</sup>
LMD6	SECHIBA	96x75 points de grilles	10 ans	1979-1989 (observées)	1979-1989 perturbées selon HadCM2 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> TSM = 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.

Tableau 3 : Présentation des simulations de changement climatique disponibles sur l'IPCC Data Distribution Center.

Centre	Pays	MCG	Scénario SRES			
MPIfM	All.	ECHAM4/OPYC3		A2		B2
HCCPR	G.-B.	HadCM3		A2		B2
CSIRO	Australie	CSIRO-Mk2	A1	A2	B1	B2
NCAR	USA	NCAR-CSM NCAR-PCM		A2		B2
GFDL	USA	R30		A2		B2
CCCma	Canada	CGCM2		A2		B2
CCSR NIES	Canada Japon	CCSR/NIES AGCM + CCSR OGCM	A1	A2	B1	B2

Par ailleurs, notre étude reste très restrictive puisqu'elle ignore la réponse au changement climatique de nombreux facteurs clés du système. Notre objectif en 2003 est de progresser dans l'intégration de ces différents aspects :

- la modification des débits affectera certainement la gestion des grands barrages réservoirs de la Seine, c'est à dire le volume et le timing des prélèvements et rejets aux cours d'eau qui alimentent ces ouvrages. Nous espérons aborder cette question en collaboration avec l'IIBRBS (Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine).
- la température de l'eau devrait augmenter avec celle de l'air, ce qui peut modifier les processus biogéochimiques. Même si cet effet semble être du second ordre (Ducharne et al., 2001), des études sont engagées pour en affiner la compréhension.
- l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique a des conséquences directes sur la transpiration des couverts végétaux. Cet effet, qui atténue les impacts hydrologiques simulés par le modèle CaB (section 3.1.1), devra être intégré grâce à une version améliorée de ce modèle (Curie et Ducharne, 2003; dans ce rapport).
- d'une manière plus générale, l'agriculture continuera d'évoluer au cours des 50 prochaines années, en réponse au changement climatique, mais aussi selon sa propre dynamique socio-économique. Les modifications résultantes des cultures et des pratiques agricoles auront probablement des répercussions sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique de l'hydrosystème Seine, en modifiant notamment les bilans d'eau ainsi que le cycle de l'azote dans le sol et son lessivage vers les nappes (et donc les apports diffus au cours d'eau). Nous disposons dans le cadre du projet GICC-Seine de scénarios contrastés d'évolution du système agricole dans le bassin de la Seine à l'horizon 2050 (Poux et Olive, 2003 ; dans ce rapport), et leurs répercussions sur le fonctionnement de l'hydrosystème seront évaluée au cours de l'année qui vient grâce aux modèles du PIREN-Seine, et plus particulièrement grâce au modèle agronomique STICS (Brisson et al., 1998 ; Gomez, 2002)
- les aquifères aussi répondront au changement climatique, par des modifications de charge hydraulique, qui pourra se répercuter sur le débit de base des rivières, mais aussi par des modifications de concentration (en nitrates notamment) suite aux modifications possibles de recharge et d'apport en nitrates depuis les sols agricoles. Ces aspects seront évalués grâce au modèle hydrogéologique MODCOU/NEWSAM, couplé au modèle STICS (Gomez et al., 2003 ; dans ce rapport).

## 5. Remerciements

Ce travail n'aurait pu être réalisé sans le soutien du programme « Gestion et Impact du Changement Climatique » du Ministère de l'Écologie et de l'Environnement Durable.

## 6. Bibliographie

- Akopian, M., Garnier, J., Testard, P., and Ficht, A. (2001). Estimating the benthic population of *Dreissena polymorpha* and its impact in the lower Seine river, France. *Estuaries*, **24**(6B):1003--1014.
- Beven, K. and Kirkby, M.-J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sci. Bull.*, **24**:43--69.
- 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.
- 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.
- Boone, A., Noilhan, J., and Etchevers, P. (2000). GICC-Rhône Climate Scenarios. *Rapport intermédiaire du programme GICC-Rhône*, CNRM+CEN, 55 pp.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne, F., Antonioletti, R., Dürr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plénet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M. & Delécolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18**: 311-346.
- Cess, R., Zhang, M., Potter, G. & others (1993). Uncertainties in carbon dioxide radiative forcing in atmospheric general circulation models. *Science*, **262**: 1252-1255.
- Curie, F. and Ducharne, A. (2003). Perfectionnement du modèle CaB: paramétrisation de la résistance stomatique en relation avec la photosynthèse. *Rapport d'activité 2002*, Programme PIREN-Seine, 25 pp.
- Delworth, T.L. and Manabe, S. (1988) The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate. *Journal of Climate*, **1** : 523-547.
- Déqué, M., Marquet, P., and Jones, R. (1998). Simulation of of climate change over Europe using a global resolution general circulation model. *Clim. Dyn.*, **14**:173--189.
- Dirmeyer, P., Dolman, A., and Sato, N. (1999). The Global Soil Wetness Project: A pilot project for global land surface modeling and validation. *Bull. of the Am. Met. Soc.*, **80**:851--878.
- Ducharne, A. (2002). Influence of temporal variability on the hydrological response to climate change. *Abstracts of the EGS 27th General Assembly* (April 2002, Nice, France).
- Ducharne, A., Brunstein, D., Billen, G., and Garnier, J. (2001). Couplage du modèle biogéochimique Sénèque avec un modèle hydrologique à bases physiques. *Rapport d'activité 2000*, Programme PIREN-Seine.
- Ducharne, A., Golaz, C., Leblois, E., Laval, K., Ledoux, E., and de-Marsily, G. (2001b). RiTHM (River Transfer Hydrological Model), a Runoff Routing Scheme for GCMs. *Note scientifique du pôle de modélisation de l'IPSL*, No. 20, Institut Pierre et Simon Laplace.
- Ducharne, A. and Gomez, E. (2002). Les données climatiques du projet GICC-Seine Version 2. Note technique No. 1 du projet GICC-Seine, disponible sur <http://www.sisyphes.jussieu.fr/Internet/gicc/rapports.html>, 15 pp. + annexes.
- Ducharne, A. And Laval. K (2000). Influence of the realistic description of soil water-holding capacity on the global water cycle in a GCM. *Journal of Climate*, **13** : 4393-4413.
- Garnier, J., Billen, G., and Coste, M. (1995). Seasonal succession of Diatoms and Chlorophyceae in the drainage network of the Seine River: observations and modeling. *Limnol. Oceanogr.*, **40**:750—765.
- Gibelin, A.-L. and Déqué, M. (2001). Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXIème siècle, *Note du groupe de météorologie à grande échelle* No. 79, Météo-France/CNRM.
- Gibelin, A.-L. and Déqué, M. (2003). Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, **20**: 327-339
- Gomez, E. (2002). Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine. *Thèse ENSMP*, 287 pp.

- Gomez, E., Viennot, P., and Ledoux, E. (2003). Influence du changement climatique sur le transfert d'azote dans les sols et dans les aquifères. *Rapport d'activité 2002*, Programme PIREN-Seine, 4 pp.
- Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguier, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC*. Cambridge University Press.
- Hutjes, R., Kabat, P., Running, S., Shuttleworth, W., 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. and Meehl, G.A. (1998). Intercomparison of regional biases and doubled-CO<sub>2</sub> 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--24822.
- Koster, R.D. and Suarez, M.J. (1996). Energy and water balance calculations in the Mosaic LSM. *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, No. 9, NASA, GSFC, Hydrological Sciences Branch.
- L'Heureux, J. (2002) Paramétrisation stochastique de la température de l'eau en fonction de la température de l'air dans le bassin de la Seine. *Mémoire de Maîtrise de Sciences de la Terre*, Université Paris 6. Disponible sur [http://www.sisyphes.jussieu.fr/internet/web\\_perso/agnes/etudiants.html](http://www.sisyphes.jussieu.fr/internet/web_perso/agnes/etudiants.html).
- 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.
- Poux, X. et Olive, G. (2003). Prospective agricole sur le bassin de la Seine. *Rapport d'activité 2002*, Programme PIREN-Seine.
- 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**.