

Vers une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine sous changement climatique

Agnès Ducharne¹, Pascal Viennot², Sylvain Théry¹ et Emmanuel Ledoux²

¹ *UMR Sisyphe, UPMC/CNRS, Paris, Agnes.Ducharne@ccr.jussieu.fr*

² *UMR Sisyphe, Centre d'Informatique Géologique, ENSMP, Fontainebleau*

1. Introduction.....	1
2. Deux modèles hydrologiques de complexité différente, validés à l'actuel	2
2.1. Le modèle CaB	2
2.2. Le modèle MODCOU.....	3
3. Prise en compte du changement climatique futur (XXIème siècle).....	4
3.1. Simulations climatiques	4
3.1.1. Trois simulations ARPEGE à haute résolution spatiale.....	5
3.1.2. Neuf simulations complémentaires à résolution plus grossière	6
3.2. Construction de scénarios de changement climatique	8
4. Convergence des modèles CaB et MODCOU sur un échantillon de trois scénarios climatiques.....	9
4.1. Description des simulations hydrologiques	9
4.2. Impact simulé par le modèle CaB	10
4.3. Impact simulé par le modèle MODCOU	11
5. Convergence des impacts simulés par CaB selon douze scénarios climatiques	12
6. Conclusions.....	14
Remerciements.....	16
Références bibliographiques	16

1. Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet GICC-Seine, qui 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 (Poux et al., 2004).

Le travail présenté ici se focalise uniquement sur les impacts directs du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine. Il reprend et complète les résultats de Ducharne et Déqué (2003) dans le but de réduire les incertitudes de la démarche. Ces incertitudes sont inhérentes au contexte prospectif de l'étude, qui impose de recourir à la modélisation.

Ainsi, le changement climatique est appréhendé grâce à des modèles de circulation générale (MCG), qui constituent le meilleur outil actuellement disponible pour envisager la réponse du climat à l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre (GES). Les simulations résultantes sont cependant l'objet de nombreuses incertitudes, qui proviennent des MCG eux-mêmes et des scénarios d'émissions en gaz à effet de serre (Houghton et al., 2001). Pour échantillonner cette incertitude, nous avons donc comparé l'impact sur l'hydrologie de la Seine de douze scénarios de changement climatique. Les modèles hydrologiques étant eux-aussi une source d'incertitude sur les impacts simulés, nous avons également comparé le fonctionnement hydrologique de la Seine simulé par deux modèles très différents, les modèles CaB et MODCOU.

Ces comparaisons montrent des impacts convergents entre les deux modèles, et selon les douze scénarios en été, indiquant une tendance robuste vers des étés plus secs, accompagnés de débits d'étiages plus faibles. L'évolution des débits de crue est beaucoup moins certaine, nos simulations montrant des cas d'augmentation comme de diminution.

2. Deux modèles hydrologiques de complexité différente, validés à l'actuel

2.1. Le modèle CaB

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

- une approche TSVA (« Transferts Sol-Végétation-Atmosphère »), où l'évapotranspiration est couplée au bilan d'énergie, et contrôlée par la végétation et des stresses hydriques,
- une approche basée sur le modèle hydrologique TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) pour gérer les écoulements superficiels et profonds. Selon cette approche, le domaine d'étude est discrétisé en bassins versants élémentaires, toujours pourvus d'une nappe phréatique. Sous l'hypothèse que les gradients topographiques sont une bonne approximation des gradients hydrauliques, on exploite une description à haute résolution de la topographie de chaque bassin élémentaire pour dériver, à chaque pas de temps (20 minutes), une distribution spatiale de la profondeur de la nappe en fonction de l'humidité moyenne du bassin. Cette distribution contrôle les transferts verticaux entre zone racinaire et nappe ainsi que l'écoulement de base (écoulement de la nappe vers les cours d'eau). Il faut cependant noter que cette nappe phréatique « conceptuelle » n'est pas équivalente à un système aquifère multicouche comme celui qui prévaut dans le bassin de la Seine.

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

Le modèle CaB a été validé dans le bassin de l'Arkansas-Red River (Ducharne et al., 2000) et dans le bassin de la Seine, où il a montré des performances satisfaisantes (Figure 1) sur deux périodes au climat contrasté :

- 1987-1988 (température de 9.25°C et précipitations de 760 mm/an en moyenne), avec un forçage météorologique issu des données ISLSCP Initiative I (Sellers et al., 1996),
- 1994-1999 (température de 11.0°C et précipitations de 775 mm/an en moyenne), avec un forçage météorologique interpolé à partir de données d'une centaine de stations de mesure du réseau Météo-France.

Le bassin de la Seine est subdivisé en 29 bassins élémentaires (2600 km² en moyenne), où les paramètres du modèle sont définis à partir d'informations sur la topographie (résolution de 100m), les propriétés des sols et de la couverture végétale. L'acquisition récente de ce dernier jeu de données météorologiques a cependant nécessité la calibration de deux paramètres du modèle, le point de flétrissement et la conductivité hydraulique à saturation. Ces paramètres sont donc différents de ceux utilisés dans Ducharne et Déqué (2003), où ils étaient définis *a priori*.

Notons enfin que l'écart de température entre ces deux périodes est dans la gamme du réchauffement que l'on peut attendre, en moyenne à long-terme (horizon 2050 à 2100), suite à l'augmentation des GES (Tables 1 et 3). Ceci suggère que l'on peut transposer le modèle CaB en situation de changement de climat avec une confiance raisonnable.

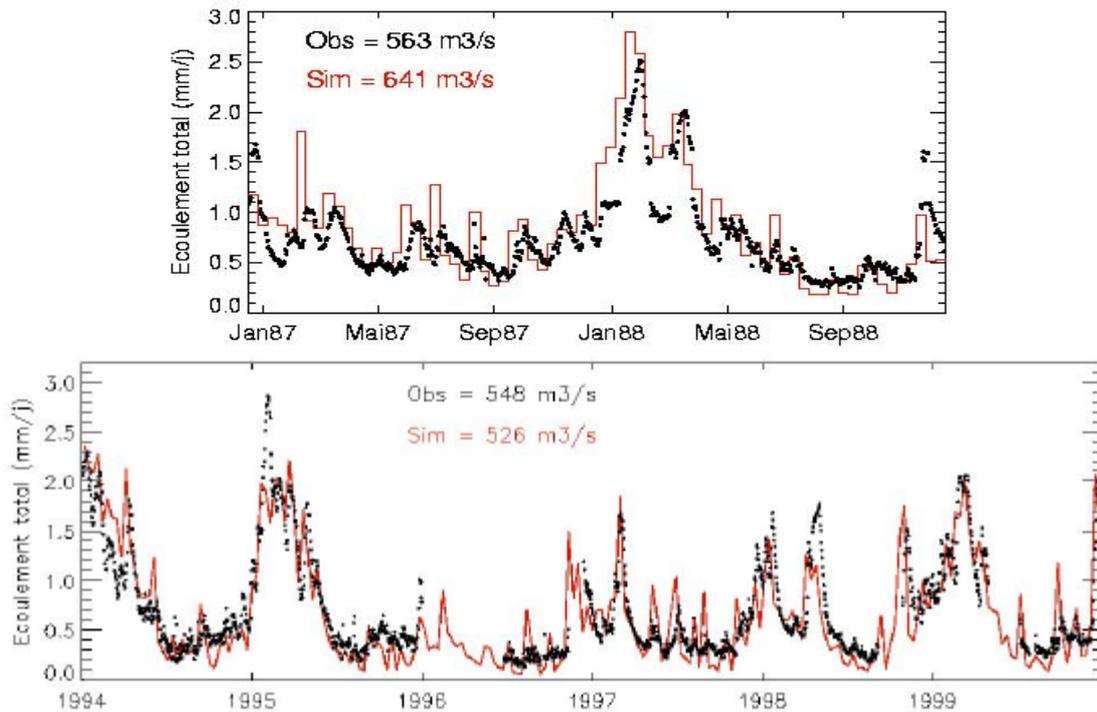


Figure 1 : Comparaison des écoulements observés (valeurs journalières en noir) et simulés par CaB (moyennes décadaires en rouge) à Poses, en 1987-1988 (haut) et 1994-1999 (bas).

2.2. Le modèle MODCOU

Le modèle MODCOU (Ledoux, 1980 ; Ledoux et al., 1989) a pour objectif la simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains dans les aquifères. Le domaine est discrétisé en mailles carrées emboîtées, formant une structure multicouche (une couche de surface et trois couches aquifères dans le bassin de la Seine, Figure 2). Aux mailles sont rattachées les caractéristiques physiques du domaine : direction de drainage, pente, distribution des zones de production, etc. pour les mailles de surface, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, etc. pour les mailles souterraines. Le modèle utilise cinq modules inter-connectés pour représenter les circulations d'eau dans le bassin :

- un module d'entrée (ou de forçage), qui prend en compte les données météorologiques d'entrée (précipitations et évapotranspiration potentielle ou ETP) ; ici, elles ont été fournies par Météo-France sur la période 1970-1989 et sur une grille régulière de huit kilomètres de côté couvrant l'ensemble du bassin,
- un module de production, qui calcule évapotranspiration, infiltration, ruissellement et stockage dans le sol (bilan d'eau) en fonction des précipitations, de l'ETP et de paramètres de structure (types de sol, mode d'occupation) caractérisant des zones de production homogènes,
- un module de transfert en surface, qui achemine en rivière l'eau de ruissellement ainsi que celle issue des échanges avec le domaine souterrain,
- un module de transfert souterrain, qui simule les écoulements dans les aquifères en fonction de l'infiltration depuis la surface et des échanges nappes-rivière,
- un module d'échange surface-souterrain, qui calcule les échanges à double sens entre les deux milieux (aquifères et cours d'eau).

Le calage des données de structure de la couche de surface et des trois couches souterraines représentées (Oligocène, Eocène et Craie) a été effectué pour optimiser la restitution des débits sur 125 stations hydrométriques et celle des charges hydrauliques sur 139 piézomètres (Gomez, 2002). A titre d'exemple, la figure 3 présente la comparaison des débits calculés et mesurés à la station hydrométrique de Poses et les variations piézométriques mesurées et calculées dans la nappe de la Craie (piézomètre de Villeneuve).

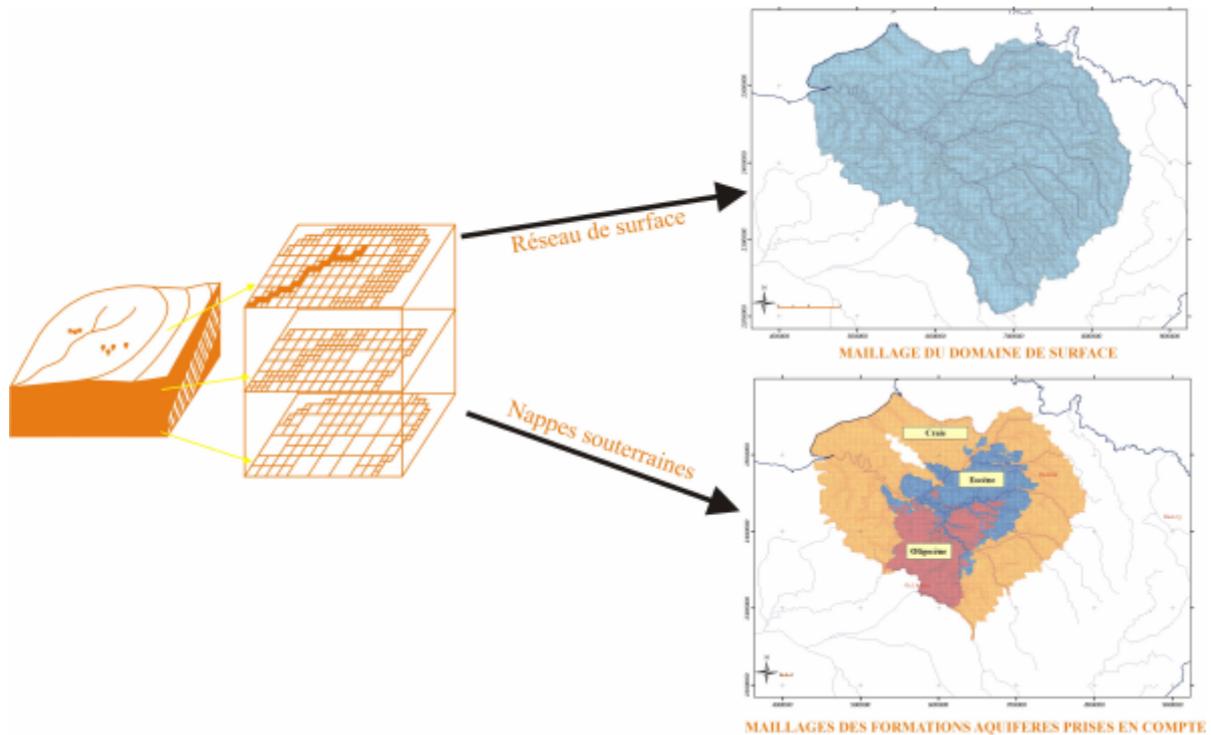


Figure 2 : Conceptualisation hydrogéologique du bassin de la Seine selon le modèle MODCOU.

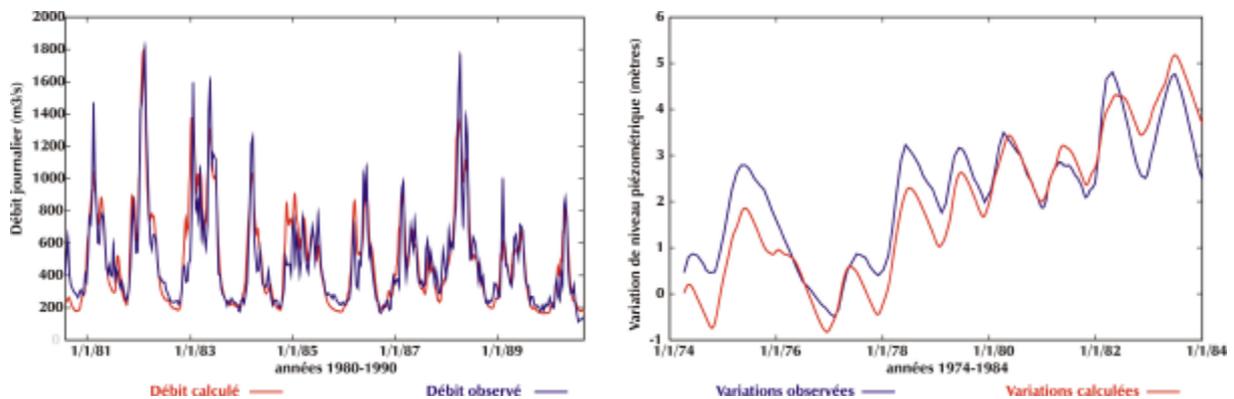


Figure 3 : Évolution comparée du débit de la Seine à Poses et de la piézométrie à Villeneuve (aquifère de la Craie).

3. Prise en compte du changement climatique futur (XXIème siècle)

3.1. Simulations climatiques

Les MCG sont les meilleurs outils actuellement disponibles pour appréhender le probable changement climatique dû à l'augmentation anthropique des GES, 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. Ils sont donc largement utilisés pour étudier les impacts du changement climatique, notamment sur les hydrosystèmes continentaux. Ces modèles, ainsi que leurs paramétrisations des processus physiques, sont cependant sujets à de nombreuses incertitudes, dont l'évaluation est problématique (Planton, 1999), et qui augmentent à l'échelle régionale (e.g. Kittel et al., 1998). Leurs projections du

changement climatique sont aussi soumises aux incertitudes inhérentes aux scénarios d'émissions en GES. Il semble donc fondamental de disposer de plusieurs projections, dont les différences donnent une idée de la marge d'incertitude du changement climatique potentiel.

3.1.1. Trois simulations ARPEGE à haute résolution spatiale

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

Table 1 : Description des différentes simulations ARPEGE. Les quatre dernières lignes donnent les différences CC-REF moyennes de précipitation, température et humidité de l'air à 2 m et rayonnement infra-rouge incident.

Simulations « CC »	OLD	B2	A2
MCG	ARPEGE « OLD » (Déqué et al., 1998)	ARPEGE « NEW » (Gibelin et Déqué, 2003)	
Résol. Seine	80 x 80 km ²	50 x 50 km ²	
Durée des simul	10 ans	30 ans	
Scénarios d'émissions	CO ₂ + 1% /an depuis 1990 708 ppm en 2060 Sans aérosols	SRES-B2 610 ppm en 2100 Avec aérosols	SRES-A2 850 ppm en 2100 Avec aérosols
TSM ^a « CC »	2054-2064 (HadCM2 ^b)	2070-2099 (Modification des valeurs actuelles selon ARPEGE/OPAG ^c sous émissions SRES-B2)	2070-2099 (Modification des valeurs actuelles selon ARPEGE/OPAG ^c sous émissions SRES-A2)
TSM ^a « REF »	1984-1994 (HadCM2 ^b)	1960-1989 (Observées)	
? Précipitation	+7%	+2%	+12%
? Température	+2.4°C	+2.5°C	+3.4°C
? Hum. air	+11%	+12%	+13%
? Rayt. IR	+5%	+4%	+5%

^a TSM = Températures de surface de la mer

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

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

Trois paires de simulations, représentant le climat sous concentrations de CO₂ actuelles et augmentées ont été réalisées avec ces modèles, et sont résumées en table 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 ces trois simulations de changement climatique 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 du climat au 21^{ème} siècle suite à l'augmentation des GES. Enfin, les concentrations en CO₂ correspondant aux situations de changement climatique sont différentes entre les 3 simulations de changement climatique : elles sont plus optimistes dans NEW-B2 que dans OLD et NEW-A2. Cette dernière simulation, la plus pessimiste

des trois en ce qui concerne les émissions en gaz à effet de serre par l'activité humaine, n'avait pas été analysée dans Ducharme et Déqué (2003).

La table 1 montre dans les trois cas une augmentation du 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, et une augmentation de l'humidité de l'air (car l'air chaud peut contenir plus de vapeur que l'air froid). L'augmentation de ces trois variables est relativement constante tout au long de l'année, et statistiquement significative aux échelles mensuelle et annuelle. Elle est aussi assez convergente entre les trois projections, les différences les plus importantes concernant l'amplitude du changement de température. Les précipitations présentent une réponse radicalement différente. Elles ne changent pas significativement à l'échelle annuelle, ni à l'échelle mensuelle selon la simulation B2. Selon les simulations OLD et A2 en revanche, elles augmentent en hiver, et diminuent en été, mais pas avec la même magnitude (Figure 4). Enfin, les trois dernières variables étudiées (pression atmosphérique en surface, rayonnement solaire incident et vitesse du vent) ne présentent que des modifications négligeables et non statistiquement significatives.

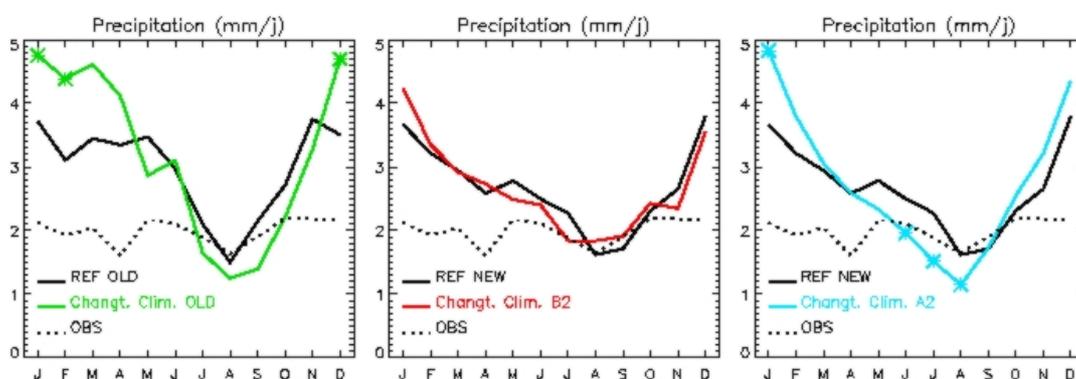


Figure 4 : Cycle annuel moyen des précipitations simulées par le modèle de circulation générale ARPEGE, sous changement climatique : simulations OLD (vert), B2 (rouge) et A2 (bleu) et à l'actuel (noir). Les simulations de référence associées à OLD d'une part et B2 et A2 d'autre part sont différentes car réalisées avec les versions OLD et NEW d'ARPEGE. Les astérisques indiquent quand les différences de moyenne mensuelle entre la simulation de changement climatique et la simulation de référence sont statistiquement significatives. Les tiretés indiquent enfin les précipitations observées en moyenne sur le bassin en 1970-1989 (données Météo-France).

3.1.2. Neuf simulations complémentaires à résolution plus grossière

Comme indiqué en introduction, trois simulations de changement climatique ne suffisent pas à appréhender toutes les incertitudes des simulations de changement climatique, qui proviennent des MCG eux-même et des scénarios d'émissions en gaz à effet de serre (Houghton et al., 2001). L'analyse ci-dessus des trois simulations ARPEGE de changement climatique confirme que les variations de précipitations constituent une des incertitudes majeures quant aux effets potentiels de l'augmentation de CO₂. Ces variations de précipitation contrôlant largement les impacts hydrologiques, il est fondamental de disposer d'autres simulations MCG pour espérer caractériser la marge d'incertitude du changement climatique potentiel.

Nous avons donc exploité neuf autres simulations de changement climatique, par six MCG différents, certains forcés par différents scénarios d'émissions (Table 2). Rappelons que les scénarios de type A2 correspondent à des émissions plus fortes que B2 (avec des teneurs en CO₂ à 2100 d'environ 850 ppm pour A2, 600 ppm pour B2, par rapport à 360 ppm à l'actuel ; Nakicenovic & Swart, 2000).

Huit de ces simulations proviennent du Data Distribution Center de l'IPCC et la neuvième du LMD. Une caractéristique commune de ces neuf simulation est leur résolution beaucoup plus grossière que celles des trois simulations ARPEGE. Dans tous les cas, le bassin de la Seine n'est recouvert que de 4 mailles MCG. En conséquence, nous n'avons pas cherché à régionaliser l'information fournie par

ces MCG, et nous avons au contraire affecté la moyenne spatiale des 4 mailles de manière uniforme à l'ensemble du bassin de la Seine.

Table 2 : Description des neuf simulations complémentaires à résolution grossière.

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

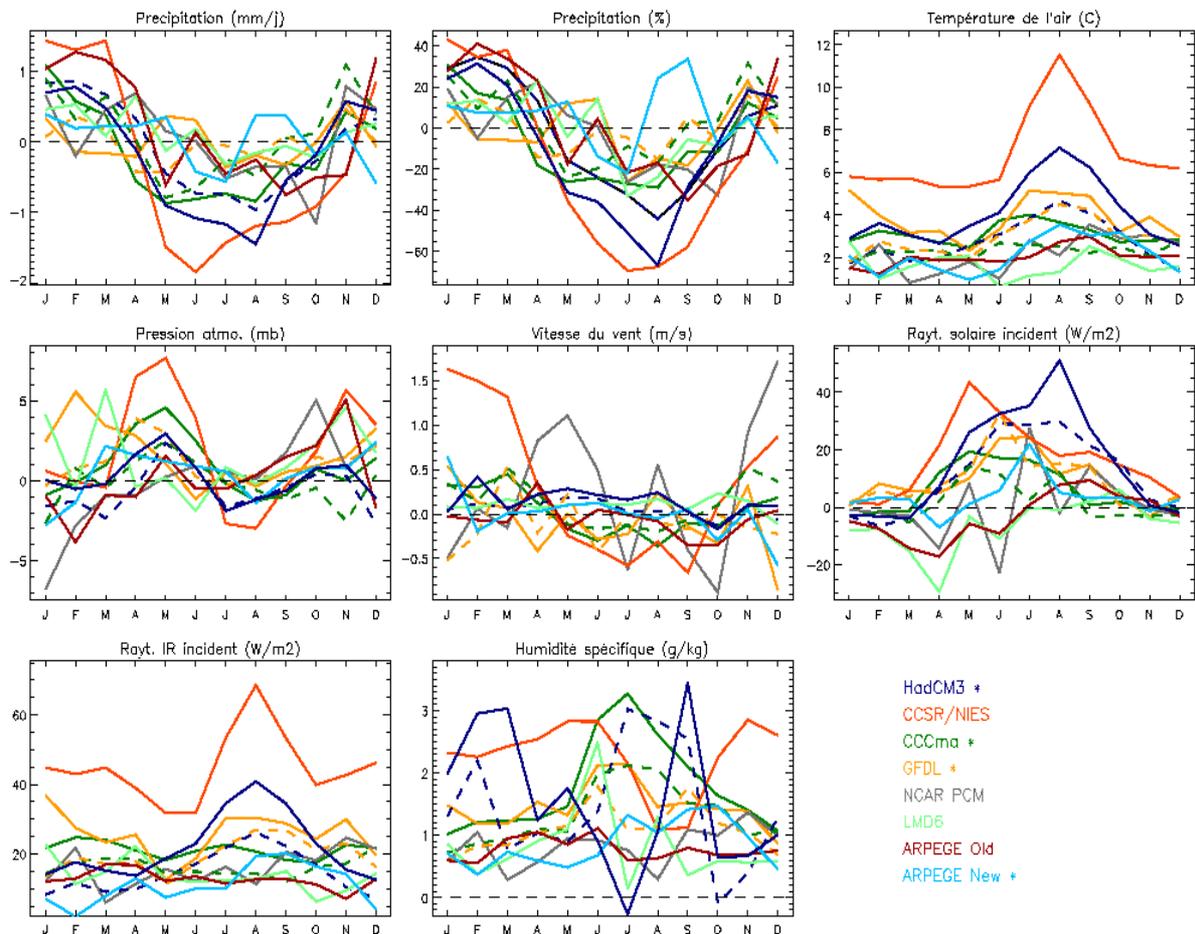


Figure 5 : Variations mensuelles moyennes par rapport à l'actuel (1987-1988) des variables de forçage nécessaires au modèle CaB, selon les 12 simulations de changement climatique exploitées. Les couleurs correspondent aux 8 MCG listés dans la figure. Nous disposons de simulations sous scénarios d'émission A2 et B2 pour 4 MCG, indiqués par une astérisque. Pour ces 4 MCG, les lignes en trait plein correspondent au scénario A2, et les lignes en tireté au scénario B2.

La figure 5 montre que les changements simulés par l'ensemble des 12 combinaisons MCG/scénarios d'émission présentent de fortes similitudes avec les changements simulés par ARPEGE. On observe :

- un réchauffement dans tous les cas, allant de 1.65 à plus de 6°C en moyenne sur l'année, pour un réchauffement moyen de 3.1°C en moyenne sur les douze simulations (Table 3),
- des précipitations plus importantes en hiver et moins importantes en été. Cette tendance est assez générale, même si la dispersion est marquée, avec quelques simulations qui sortent du comportement général (notamment ARPEGE NEW qui simule une augmentation des pluies en été). La table 3 indique par ailleurs que la résultante sur les 12 simulations des ces changements saisonniers est une diminution des précipitations annuelles, alors qu'elles augmentaient selon ARPEGE. Ces changements de moyenne annuelle ne sont néanmoins pas statistiquement significatifs.
- une augmentation de l'humidité spécifique, du rayonnement infra-rouge incident et du rayonnement solaire incident (certainement lié à la diminution des précipitation, et donc de la nébulosité, en particulier en été quand le rayonnement solaire inincident est maximum)
- des variations négligeables des autres variables (pression atmosphérique et vitesse du vent).

Table 3 : Statistiques des 12 simulations de changement climatique exploitées, en terme de température et précipitations.

	Température (°C)	Précipitations (mm/j)
Moyenne annuelle de référence (1987-1988)	9.27	2.08
Moyenne annuelle sous changement climatique (12 scénarios)	12.37	2.00
Impact moyen (moy. 12 scénarios - REF)	3.10	-0.08
Impact minimal (12 scénarios)	1.65 (LMD6)	-0.40 (CCSR/NIES)
Impact maximal (12 scénarios)	6.88 (CCSR/NIES)	+0.03 (CCCma)
Ecart-type de l'impact (12 scénarios)	1.55	0.13

3.2. Construction de scénarios de changement climatique

Les MCG présentent souvent des biais dans leur simulation du climat actuel, tout particulièrement sur les précipitations continentales. C'est ainsi le cas pour les deux versions du modèle ARPEGE qui surestiment significativement les précipitations (sauf estivales) dans le bassin de la Seine (Figure 4). De tels biais se transmettent aux débits simulés (Ducharne et al., 2003), et pour s'affranchir de ce problème, nous avons classiquement choisi de construire des scénarios de changement climatique, en perturbant le climat actuel en fonction du changement climatique simulé par ARPEGE (Ducharne et Déqué, 2003).

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

- 1970-1989 pour le modèle MODCOU (pas de temps journalier),
- 1987-1988 pour le modèle CaB (pas de temps de 20 minutes). Cette période est un peu courte, mais elle s'inscrit dans la période simulée comme référence actuelle par les deux versions d'ARPEGE (Table 1), contrairement à la période 1994-1999, où les données météorologiques nécessaires au modèle CaB sont également disponibles. En effet, les années 1990 ont probablement ont été les plus chaudes du millénaire à l'échelle globale (Houghton et al., 2001). On ne peut donc pas exclure

qu'elles ne traduisent déjà un signal de changement climatique, comme le suggère sur la Seine la forte différence de température entre 1994-1999 et 1987-1988 (1.75°C) par rapport au réchauffement simulé (2.4 à 3.4°C selon Arrpège, 3.1°C en moyenne sur les 12 MCG).

Les perturbations imputées au climat actuel sont alors calculées mensuellement, à partir des moyennes inter-annuelles de chaque variable (moyenne inter-annuelle de janvier... décembre). En effet, les MCG ont une valeur climatologique, c'est à dire qu'ils représentent le climat, défini comme une moyenne sur une longue période (typiquement 10 à 30 ans). La variabilité temporelle des MCG est rarement validée, que ce soit la variabilité inter-annuelle autour du climat moyen (qui requiert des simulations *et* des observations fiables du climat sur plusieurs décennies), ou la variabilité à des échelles de temps plus courtes, comme celle des extrêmes. Quand de telles validations sont entreprises, elles montrent le plus souvent que les extrêmes sont mal capturés par les MCG, parce qu'ils sont associés à des processus à petite échelle spatiale qui ne sont pas résolus explicitement dans les MCG (e.g. Gibelin et Déqué, 2001).

On distingue deux types de perturbations donnant lieu aux variables perturbées X_{add} ou X_{mult} :

- perturbations « additives » : $X_{add}(t,m,y) = X_{act}(t,m,y) + M_{cc}(m) - M_{ref}(m)$
- perturbations « multiplicatives » : $X_{mult}(t,m,y) = X_{act}(t,m,y) \cdot M_{cc}(m) / M_{ref}(m)$

Dans ces formules, $M_{ref}(m)$ et $M_{cc}(m)$ sont les moyennes mensuelles inter-annuelles de la variable considérée, calculées à partir des simulations ARPEGE de référence et de changement climatique respectivement. La perturbation du mois m est imputée à la variable actuelle (i.e. observée) X_{act} , à tous les pas de temps t (1 jour pour MODCOU, 20 minutes pour CaB) du mois, et ce pour toutes les années y . Pour des raisons de cohérence physique et numérique, nous avons appliqué les perturbations suivantes aux différentes variables d'entrée des modèles hydrologiques :

- « additives » pour la température et l'humidité de l'air à 2 m, le rayonnement infra-rouge et la pression atmosphérique en surface,
- « multiplicatives » pour les précipitations, la vitesse du vent, le rayonnement visible incident et l'ETP.

Cette dernière, nécessaire au forçage de MODCOU, mais non simulée par les MCG, fut calculée par la formule de Penman (1948), utilisée par Météo-France pour calculer les ETP actuelles de 1970-1989. Nous avons donc calculé l'ETP à partir du rayonnement visible et infra-rouge incident, de la température et de l'humidité de l'air à 2 m, et de la vitesse du vent à 10 m, simulés par les MCG en situation de référence et de changement climatique. Puis nous avons procédé avec ces séries comme avec celles qui étaient directement simulées par les MCG.

4. Convergence des modèles CaB et MODCOU sur un échantillon de trois scénarios climatiques

4.1. Description des simulations hydrologiques

Avec chacun des deux modèles hydrologiques CaB et MODCOU, nous avons réalisé quatre simulations :

- une simulation de référence sous scénario climatique actuel (i.e. le climat effectivement observé pendant la période de référence),
- trois simulations sous climat modifié ; celles-ci sont forcées par les trois scénarios ARPEGE de changement climatique construits pour le modèle considéré.

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; Ducharme et Laval, 2000). Pour projeter un modèle en climat modifié, il faut donc lui faire oublier l'influence du climat actuel sur l'humidité du bassin. Ceci est particulièrement important pour les simulations réalisées avec le modèle CaB, puisque nous ne disposons que d'une base de deux ans pour construire les scénarios climatique. Nous avons donc réalisé une mise à l'équilibre du modèle CaB avec les quatre climats considérés (y compris le climat actuel, afin de limiter au seul climat les facteurs de différence entre les simulations actuelle et de changement climatique), grâce à 5 répétitions de chacun des scénarios climatiques. Pour la première répétition, les quatre simulations démarrent à partir des mêmes conditions initiales, notamment

l'humidité du sol estimée au 1er janvier 1987. Les simulations se poursuivent ensuite dans la continuité alors que les scénarios climatiques sont répétés 4 fois. A partir de la troisième répétition, les évolutions de l'humidité du bassin sur deux ans deviennent superposables, ce qui indique que la moyenne inter-annuelle de l'humidité simulée est en équilibre avec le climat, et ce quelque soit le scénario climatique considéré. Ce sont donc les résultats de cette troisième répétition qui sont analysés ci-dessous.

Avec le modèle MODCOU, nous avons réalisé des simulations de 40 ans, soit deux répétitions des scénarios climatiques de 20 ans. Les quatre simulations démarrent avec la même humidité (dans le sol et les nappes), qui correspond à l'état d'équilibre avec le climat actuel. Les résultats présentés ci-dessous correspondent à la moyenne de ces 40 ans.

4.2. Impact simulé par le modèle CaB

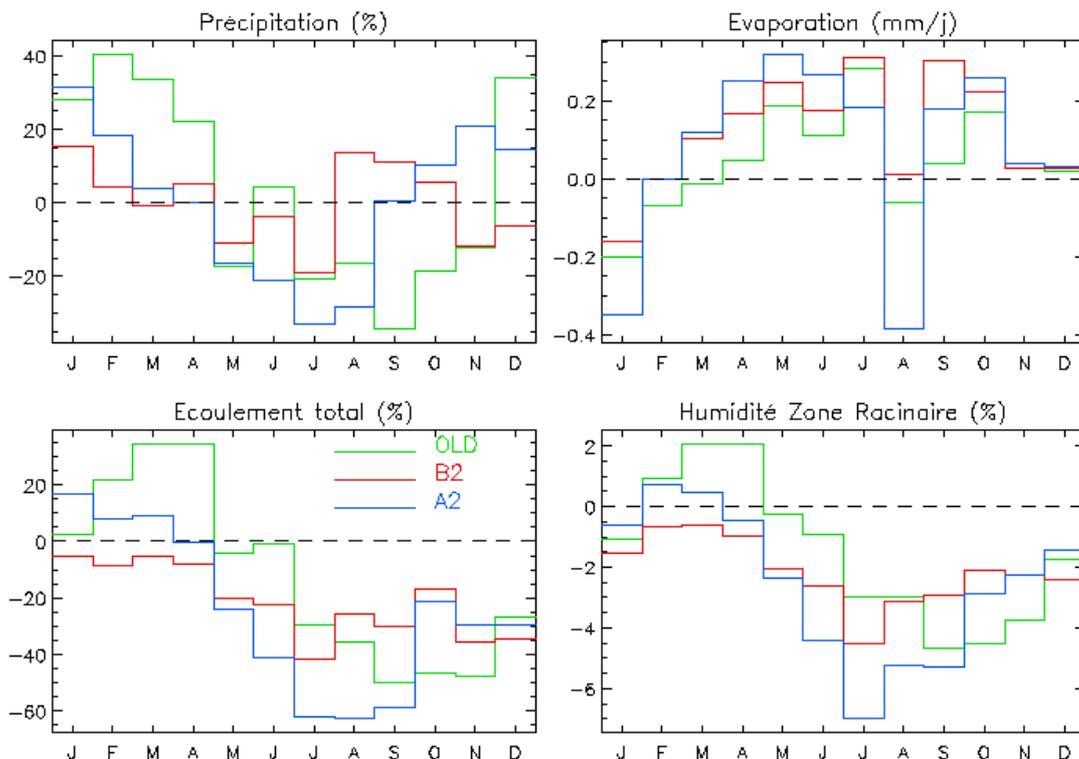


Figure 6 : Impact de trois scénarios de changement climatique sur les bilans d'eau simulés par le modèle CaB dans le bassin de la Seine. Les valeurs représentées sont des différences par rapport au climat actuel.

L'impact sur l'hydrologie du bassin (Figure 6) des trois scénarios ARPEGE de changement climatique, par rapport à une référence 1987-1988, consiste en une augmentation de l'évaporation, en lien avec le réchauffement. En été, elle joue de concert avec une diminution des pluies pour diminuer l'humidité du sol (c'est cette réduction qui entraîne la diminution de l'évaporation en août par flétrissement de la végétation) et les débits (écoulements). En hiver, les différences d'évaporation sont très faibles entre la référence et les simulations sous changement climatique (sauf en janvier où l'évaporation est plus faible sous changement climatique, ce qui traduit en fait une condensation / rosée supérieure car l'air est plus chaud et plus humide). Malgré cela, les débits augmentent en proportion moindre que les pluies, voire même diminuent dans la simulation B2, car une partie des précipitations sert à reconstituer l'humidité du sol perdue en été. En terme de débits, l'impact peut finalement se résumer par :

- des crues plus importantes en hiver qu'à l'actuel,
- des étiages plus sévères en été qu'à l'actuel.

4.3. Impact simulé par le modèle MODCOU

Le modèle MODCOU s'accorde avec le modèle CaB sur cette intensification des contrastes saisonniers de débit de la Seine, qui s'observe selon les trois scénarios de changement climatique (Figure 7). MODCOU montre aussi que les variations de profondeur des nappes aquifères sont généralement faibles (amplitude généralement inférieure à 2 m), sauf dans le cas du scénario B2 (augmentation de température « modérée » de 2.5°C, mais sans changement significatif de précipitation), qui montre localement des baisses plus importantes du niveau piézométrique de la nappe de la Craie (Figure 8).

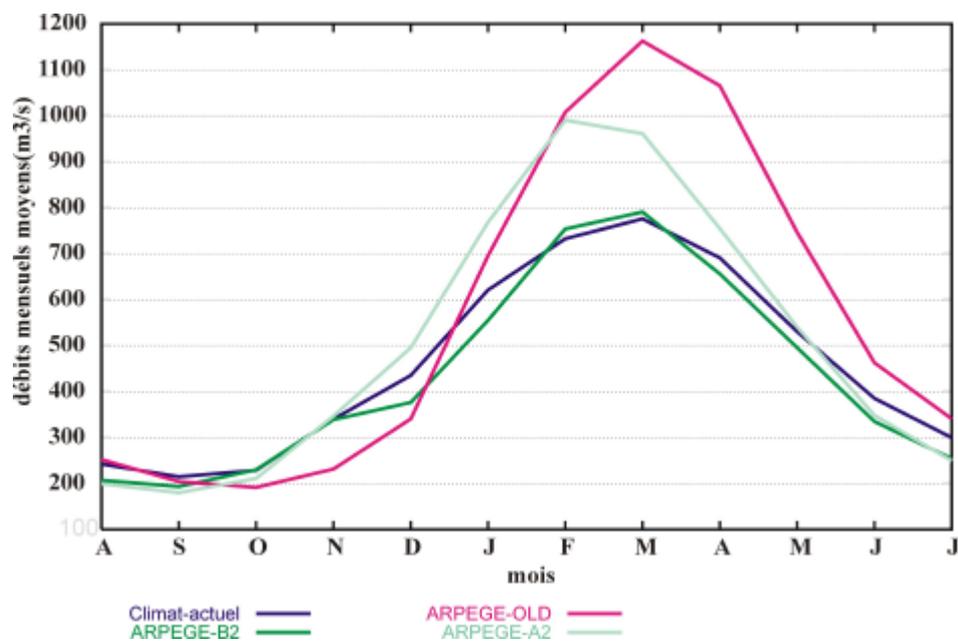


Figure 7 : Impact des trois scénarios de changement climatique sur les débits calculés à Poses par le modèle hydrogéologique MODCOU.

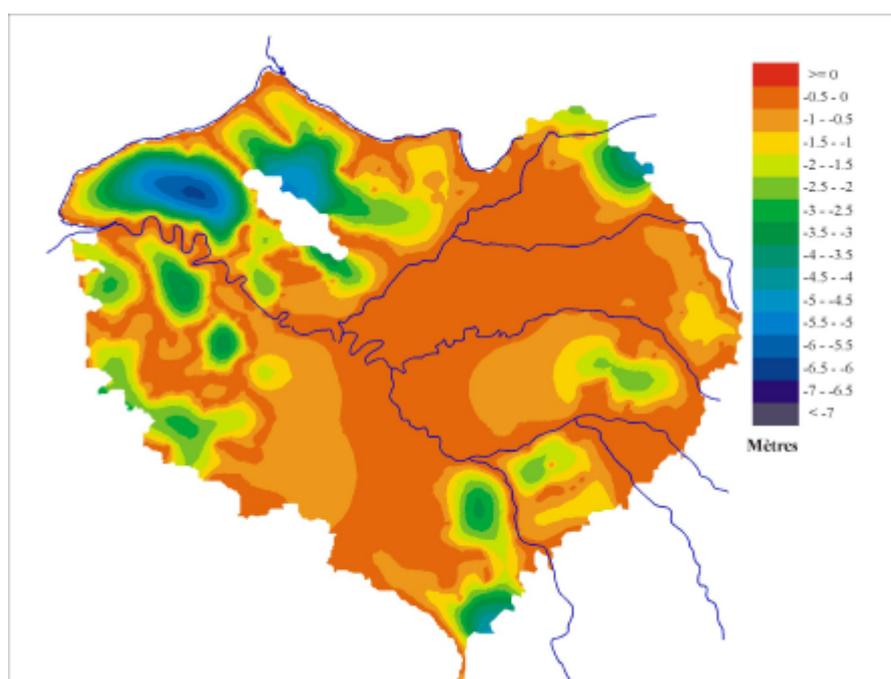


Figure 8 : Variations piézométriques moyennes de la nappe de la Craie calculées par MODCOU sous le scénario B2.

5. Convergence des impacts simulés par CaB selon douze scénarios climatiques

Nous cherchons ici à caractériser une autre source d'incertitude de l'impact du changement climatique simulé, celle qui est liée à la prospective climatique, par l'intermédiaire des MCG et des scénarios d'émission en GES au cours du XXIème siècle. Cette analyse est menée avec le modèle CaB, qui réclame beaucoup moins de temps de calcul que le modèle MODCOU.

La simulation de référence est celle décrite en section 4.1. Les douze simulations d'impact qui lui sont comparées sont les trois simulations sous scénarios ARPEGE décrites dans cette même section, et neuf simulations additionnelles, réalisées selon le protocole de mise à l'équilibre décrit en section 4.1, en forçant le modèle CaB avec les scénarios de changement climatique construits à partir des simulations MCG présentées en section 3.3, selon la méthode détaillée en section 3.4.

La figure 9 récapitule les principaux impacts ainsi simulés sur les bilans d'eau dans le bassin de la Seine, exprimés en pourcentage par rapport à la référence actuelle (1987-1988). Ces impacts sont très convergents avec ceux des trois scénarios haute résolution ARPEGE. L'évaporation totale depuis le bassin tend à augmenter, du fait de l'augmentation conjointe de la température et du rayonnement incident. Cette augmentation entraîne une diminution de l'humidité de la zone racinaire, qui est renforcée par la diminution des pluies estivales, et qui contrecarre en partie l'augmentation d'évaporation. La simulation LMD6 est une exception où la diminution d'évaporation au mois de juin ne s'explique pas par une augmentation du stress hydrique (car l'humidité du sol est alors supérieure à celle de la simulation actuelle), mais par l'augmentation de l'humidité de l'air, qui entraîne des dépôts de rosée (condensation = évaporation négative).

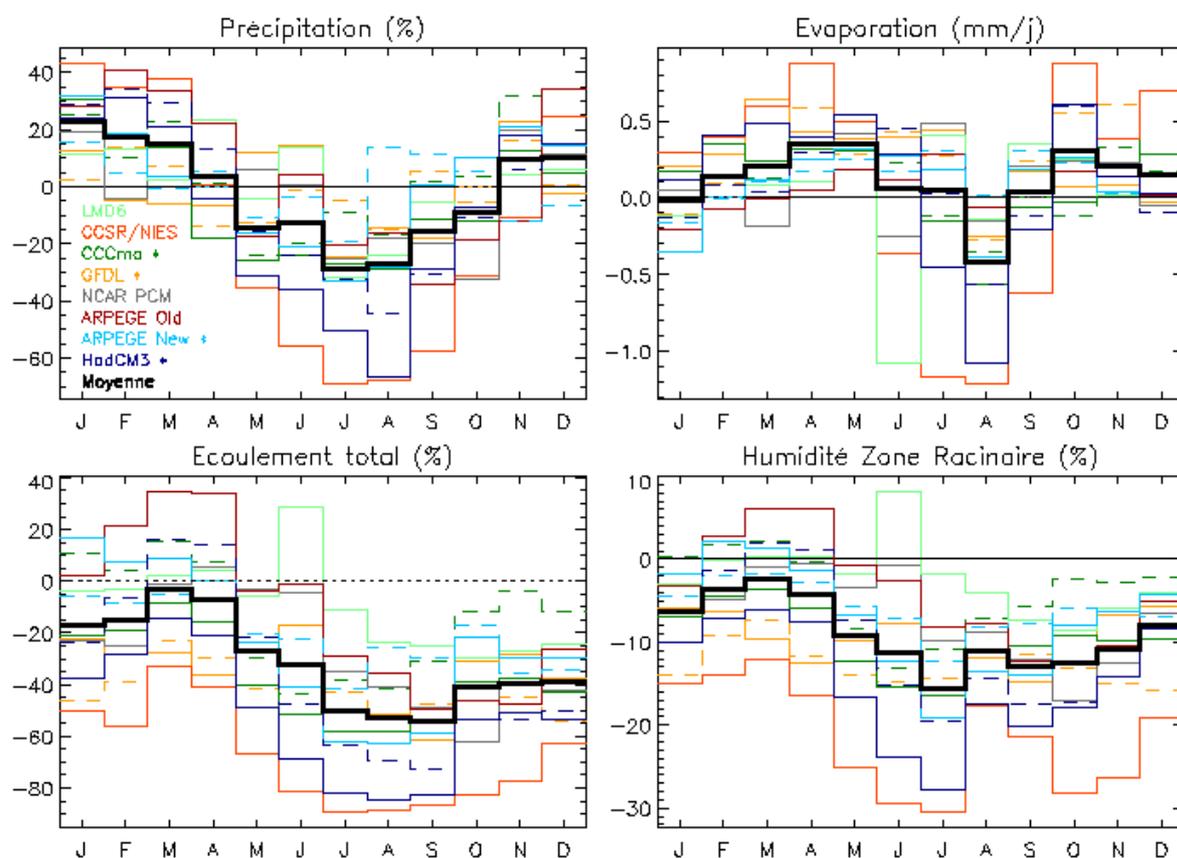


Figure 9 : Impact des 12 scénarios de changement climatique sur les bilans d'eau simulés par le modèle CaB dans le bassin de la Seine. Les valeurs représentées sont des différences par rapport au climat actuel. Nous disposons de simulations sous scénarios d'émission A2 et B2 pour 4 MCG, indiqués par une astérisque dans la figure. Pour ces 4 MCG, les lignes en trait plein correspondent au scénario A2, et les lignes en tireté au scénario B2.

Hormis ce cas particulier, toutes les simulations montrent une diminution de l'humidité du sol en été et automne. Elle entraîne une diminution des écoulements de base, qui se combine à la diminution des écoulements superficiels causée par la diminution des pluies, pour conduire à une diminution systématique de l'écoulement total lors de cette période d'étiage. Les impacts sur l'écoulement total en hiver (crues) sont beaucoup plus dispersés, avec des cas d'augmentation et des cas de diminution. Ceci s'explique par la variabilité importante des changements de précipitation, non seulement en hiver mais aussi en terme de contrastes saisonniers. Comparons par exemple les impacts de 4 scénarios présentant une augmentation importante des pluies en hiver : ARPEGE OLD, HadCM3 B2, CCSR/NIES A2 et HadCM3 A2. Les deux premiers scénarios sont associés à une augmentation des débits hivernaux, contrairement aux deux derniers. Une différence entre ces deux paires est l'amplitude des variations de précipitation au cours de l'année : les contrastes été / hiver sont plus marqués dans le second groupe, si bien que l'augmentation de pluie en hiver ne suffit pas compenser sa diminution en été. Une autre différence concerne les température, qui via l'évaporation, joue dans le même sens que la diminution des pluies estivales.

La figure 10 donne une représentation plus synthétique de la dispersion des différentes simulations, qui caractérise la marge d'incertitude de ces résultats. Elle montre d'abord que les simulations réalisées sous les trois scénarios ARPEGE sont représentatifs de l'ensemble des douze scénarios (à l'exception des écoulements et humidité du sol en hiver, qui dans les trois cas sont supérieurs à l'actuel). Cette figure met aussi particulièrement bien en évidence les différences de robustesse entre les impacts simulés en été et en hiver sur les écoulements et l'humidité racinaire. En été, toutes les simulations d'impact présentent pour ces deux variables des valeurs inférieures aux valeurs de référence (1987-1988). C'est donc avec le maximum de confiance que l'on peut dire que ces simulations traduisent l'impact potentiel du changement climatique sur l'hydrologie estivale du bassin de la Seine. En revanche, elles présentent en hiver un écart-type plus important, accompagné d'une forte dispersion autour des valeurs de référence, ce qui empêche de conclure par une projection raisonnable.

Notons enfin qu'à l'échelle annuelle, voire interannuelle puisque nous raisonnons ici en climat moyen, l'impact sur l'hydrologie du bassin consiste en une diminution des débits et de l'humidité du bassin, qui semble elle aussi assez robuste puisque d'amplitude largement inférieure à l'écart-type des 12 simulations (Table 4). Pour finir, nous disposons pour quatre MCG (ARPEGE New, HadCM3, GFDL, CCCma) de deux simulations de changement climatique, correspondant aux deux scénarios d'émission en GES A2 et B2 (A2 plus pessimiste que B2). La table 4 montre que les simulations A2 présentent un signal de changement climatique plus marqué que celui des simulations B2 (avec des précipitations légèrement plus faibles, une température plus élevée et un écoulement plus faible). La différence moyenne entre les simulation A2 et B2 est cependant nettement plus faible que l'impact moyen du changement climatique (à la seule exception des précipitations, mais elles ne changent pas significativement en moyenne annuelle sous changement climatique). On peut donc en conclure que la variabilité des simulations (i) climatiques et (ii) d'impact hydrologique s'explique davantage par les différences de MCG que celles de scénarios d'émission en GES.

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

Variabes	Moyenne annuelle (12 scénarios)	Impact moyen (moy. 12 scénarios - REF)	Ecart-type (12 scénarios)	A2-B2 (moy. annuelle sur 4 MCG A2 et B2)
Précipitations (mm/j)	2.00	-0.08	0.12	-0.08
Température (°C)	12.37	3.10	1.41	1.06
Evaporation (mm/j)	1.40	0.12	0.08	-0.02
Écoulement total (mm/j)	0.60	-0.20	0.14	-0.06
Humidité zone rac. (mm)	271.7	-8.0	4.7	-1.8

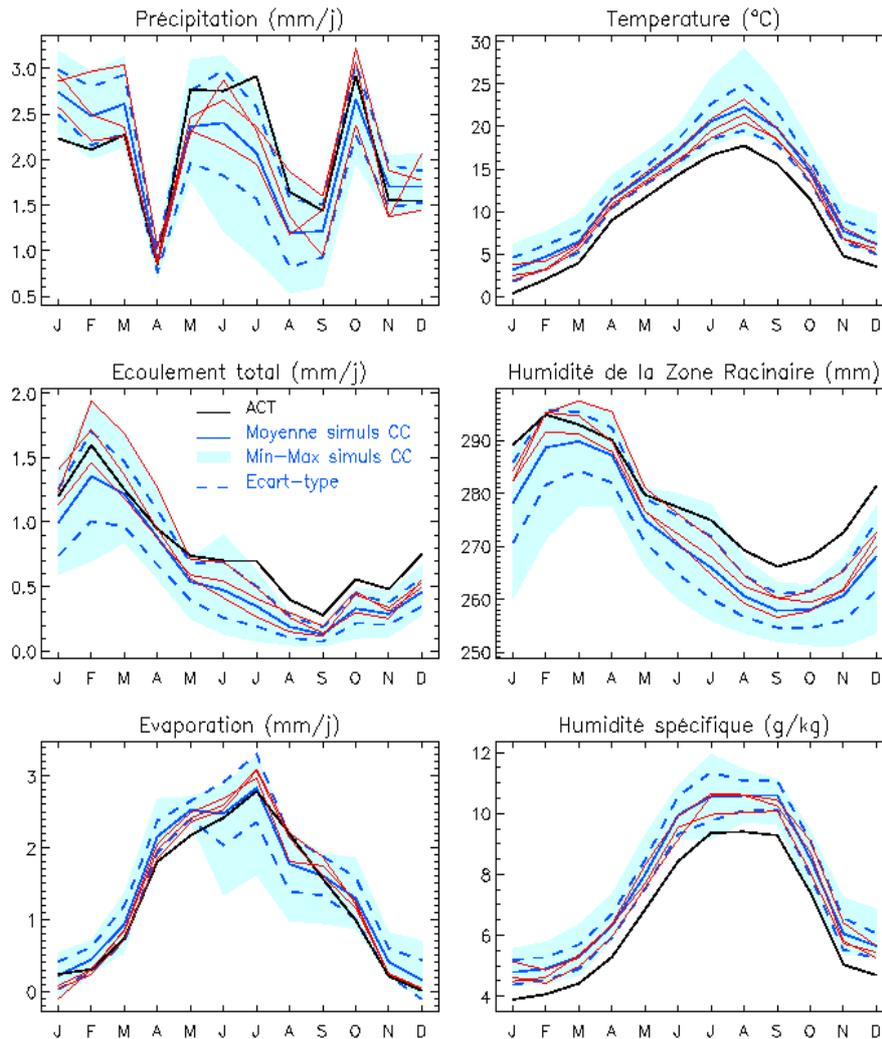


Figure 10 : Synthèse de l'impact des 12 scénarios de changement climatique sur les bilans d'eau simulés par le modèle CaB dans le bassin de la Seine. La courbe noire correspond aux valeurs « actuelles » (1987-1988), la courbe bleue correspond à la moyenne des 12 simulations d'impact, et les pointillés à l'écart type des 12 simulations autour de cette moyenne. L'enveloppe bleue définit la gamme de variation couverte par l'ensemble des 12 simulations d'impact.

6. Conclusions

Le but de cette étude était de définir les impacts directs du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, et d'en caractériser la marge d'incertitude. Celle-ci est en effet inhérente au contexte prospectif de l'étude, qui impose de recourir à la modélisation, en ce qui concerne le changement climatique lui-même (incertitudes liées aux MCG et aux scénarios d'émissions en GES au cours du XXIème siècle) et son impact hydrologique (incertitudes liées aux modèles hydrologiques).

A l'aide d'un premier modèle hydrologique, le modèle CaB, nous avons analysé l'impact de douze scénarios de changement climatique, basés sur des simulations réalisées avec 8 MCG différents, forcés par un ou deux scénarios d'émissions en GES (parmi 3 possibilités : scénarios A2 et B2 du SRES, et scénario d'augmentation du CO₂ au taux de 1% par an depuis 1990). Tous ces scénarios s'accordent sur un réchauffement significatif (de 3.1°C en moyenne, avec un écart type de 1.4°C sur l'ensemble des 12 scénarios) et montrent une tendance à des précipitations plus fortes en hiver et plus faibles en été, mais avec une forte dispersion. L'impact simulé par le modèle CaB peut se résumer par une tendance très générale l'assèchement du bassin de la Seine par rapport à une situation de référence 1987-1988. Ce signal est très robuste en été, avec présente une diminution importante des écoulements et de l'humidité racinaire, dont la marge d'incertitude est inférieure au signal moyen.

L'évolution des débits de crue (hiver) est beaucoup moins certaine, nos simulations montrant des cas d'augmentation comme de diminution, en lien avec une dispersion importante des changements de précipitation (positifs ou négatifs selon les simulations climatiques).

Nous avons également comparé le fonctionnement hydrologique de la Seine simulé par deux modèles très différents, les modèles CaB et MODCOU. Cette étude fut réalisée avec un échantillon de trois scénarios de changement climatique, basés sur trois simulations par le MCG ARPEGE à haute résolution sur le bassin de la Seine. Les impacts de ces trois scénarios selon les deux modèles sont très convergents, vers une intensification des contrastes saisonniers du débit de la Seine (augmentation des crues hivernales, étiages estivaux plus sévères). Les réponses des deux modèles à ces scénarios présentent bien sûr des différences, mais elles ne remettent pas en cause la conclusion, et s'expliquent par une référence actuelle différente : 1970-1989 pour MODCOU contre 1987-1988 pour CaB, ainsi que par le rôle régulateur des nappes dans MODCOU, qui limite l'assèchement par rapport à CaB. Cependant, la simulation MODCOU, représentant 40 années de climat modifié à partir de l'état du bassin en 2000, n'exprime peut-être pas les changements qui pourraient se développer à plus long-terme, étant donné le temps de réponse de plusieurs décennies du système aquifère du bassin de la Seine. C'est un point qu'il nous reste à vérifier.

Il est important de noter que les trois scénarios ARPEGE, ainsi que leurs impacts selon le modèle CaB, étaient représentatifs de l'ensemble des 12 scénarios (à l'exception cependant des écoulements et humidité du sol en hiver, qui dans les trois cas sont supérieurs à l'actuel). En croisant les deux volets de notre étude, on peut donc conclure avec un maximum de confiance que l'humidité du sol et les débits, qui sont importants pour de nombreux secteurs économiques (agriculture, navigation, industries de l'eau...), devraient diminuer en été sous changement climatique (horizon 2050 à 2100). L'évolution des débits de crue est beaucoup moins certaine, nos simulations montrant des cas d'augmentation comme de diminution, en lien avec une dispersion importante des changements de précipitation (positifs ou négatifs selon les simulations climatiques).

La portée de ces conclusions présente encore quelques limites, dans ce qu'ils ignorent la réponse au changement climatique de nombreux facteurs clés du système, pouvant modifier en retour l'impact du changement climatique sur l'hydrologie de la Seine :

- l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique a des conséquences directes sur la transpiration des couverts végétaux. Cet effet fut testé dans les deux modèles CaB (Curie et Ducharne, 2003) et MODCOU (non publié), mais il est du second ordre par rapport à celui du changement climatique.
- 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.
- 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 sont susceptibles de modifier les bilans d'eau. Une étude de sensibilité préliminaire avec le modèle CaB (Ducharne et Déqué, 2003) a ce pendant montré que les impacts hydrologiques du changement climatique moyen (selon deux scénarios ARPEGE, OLD et NewA2) 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). Pour une étude plus approfondie, nous avons développé, dans le cadre du projet GICC-Seine, des scénarios contrastés d'évolution du système agricole dans le bassin de la Seine à l'horizon 2050 (Poux et al., 2004). Leurs répercussions sur le fonctionnement de l'hydrosystème (hydrodynamique mais aussi transferts d'azote) sont en cours d'évaluation, grâce au modèle agronomique STICS (Brisson et al., 1998 ; Gomez, 2002) .

Ce travail se concrétisera par une étude des impacts croisés sur la qualité biogéochimique de la Seine des changements possibles de climat, du système agricoles, et de ceux des apports ponctuels à l'hydrosystème (Aboualkhair, 2003). Il est important de noter que notre objectif n'est pas là de tendre vers une projection réaliste du devenir du bassin de la Seine. Tout au plus pourrons nous prétendre à terme avoir défini des possibles raisonnables. Mais ce qui nous intéresse particulièrement à travers ces travaux, c'est de pouvoir cerner l'importance qualitative du changement climatique, en plaçant son impact en perspective de celui d'autres changements attendus dans le bassin.

Remerciements

Ce travail a bénéficié d'un soutien par le programme Gestion et Impact du Changement Climatique du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable (France). Nous remercions également Météo-France pour les données météorologiques actuelles mises à notre disposition (données SAFRAN 1970-1989 et données de stations sur 1994-1999).

Références bibliographiques

- Aboualkhair, A. (2003). *Prospective et scénarios de la pollution de l'eau « domestique et industrielle » à l'horizon 2050 dans le bassin de la seine : les contraintes anthropiques*. Rapport de stage effectué dans le cadre du DEA Economie de l'Environnement et des Ressources Naturelles (EERN), Ecole des Hautes Etudes en Science Sociale (EHES).
- 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.
- Beven, K. & Kirkby, M.J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, **24**: 43-69.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoulaud, B., Gate, P., Devienne, F., Antonioletti, R., Dürr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plénet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M. & Delécolle, R. (1998). STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, **18**: 311-346.
- Crossley, J.F., Polcher, J., Cox, P.M., Gedney, N. & Planton S. (2000). Uncertainties linked to land-surface processes in climate change simulations. *Clim. Dyn.*, Vol. 16 : 949-961.
- Curie, F. & 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. & Manabe, S. (1988). The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate. *Journal of Climate*, **1**: 523-547.
- Delworth, T.L., Stouffer, R., Dixon, K., Spelman, M., Knutson, T., Broccoli, A., Kushner, P., & Wetherald, R. (2002). Review of simulations of climate variability and change with the GFDL R30 coupled climate model. *Clim. Dyn.*, **19**: 555-574.
- Déqué, M., Marquet, P. & Jones, R. (1998). Simulation of of climate change over Europe using a global resolution general circulation model. *Clim. Dyn.*, **14**: 173—189.
- Ducharne, A. & Déqué M. (2003) : Le bassin de la Seine face au changement climatique : comparaison de deux scénarios climatiques, *Rapport d'activité 2002 du programme PIREN-Seine* , 22 pp.
- Ducharne, A., Koster, R.D., Suarez, M., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2: Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.*, **105**(D20): 24823-24838.
- Ducharne, A. & 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.
- Ducharne, A., Golaz, C., Leblois, E., Laval, K., Polcher, J., Ledoux, E. & de Marsily, G. (2003). Development of a high resolution runoff routing model, calibration and application to assess runoff from the LMD GCM. *J. Hydrol.*, **280**: 207-228.
- Flato, G.M. & Boer, G.J. (2001). Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophys. Res. Lett.* , **28**: 195-198.
- Gedney, N., Cox, P.M., Douville, H. Polcher, J. & Valdes, P.J. (2000). Characterising GCM land surface schemes to understanding their responses to climate change. *J. Clim.*, Vol. 13(17) : 3066-3079.
- Gibelin, A.-L. and Déqué, M. (2001). Un scénario à l'échelle de l'Europe pour le climat de la fin du XXIème siècle, *Note du groupe de météorologie à grande échelle* No. 79, Météo-France/CNRM.
- Gibelin, A.-L. & Déqué, M. (2003). Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Clim. Dyn.*, **20**: 327-339.

- Gomez, E. (2002). *Modélisation intégrée du transfert de nitrate à l'échelle régionale dans un système hydrologique. Application au bassin de la Seine*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 287 pp.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T., J.F.B., M., & Wood, R. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.*, 16: 147-168.
- Houghton, J., Ding, Y., Griggs, D., Noguer, M., van der Linden, P., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C. (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of IPCC*. Cambridge University Press.
http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm
- Hutjes, R., Kabat, P., Running, S., Shuttleworth, W., Field, C., Bass, B. & 28 coll. (1998). Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle. *J. Hydrol.*, **212-213**:1-21.
- Kittel, T.G.F., Giorgi, F. & Meehl, G.A. (1998). Intercomparison of regional biases and doubled-CO2 sensitivity of coupled atmosphere-ocean general circulation model experiments. *Clim. Dyn.*, 14: 1-15.
- Koster, R.D., Suarez, M., Ducharne, A., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 1: Model structure. *J. Geophys. Res.*, 105(D20): 24809—24822.
- Ledoux, E. (1980). *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Ledoux, E., G. Girard, & G. de Marsily (1989). Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater. In : *Unsaturated flow in hydrologic modeling - Theory and Practice*, Morel-Seytoux, H. J. Ed. p.435-454. Kluwer Academic.
- Nakicenovic, N. & Swart, R., editors (2000). *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, UK.
- Nozawa, T., Emori, S., Numaguti, A., Tsushima, Y., Takemura, T., Nakajima, T., Abe-Ouchi, A., & Kimoto, M. (2001). Projections of future climate change in the 21st century simulated by the CCSR/NIES CGCM under the IPCC SRES Scenarios. In Matsuno, T. and Kida, H., editors, *Present and Future of Modeling Global Environmental Change : Toward Integrated Modeling*, pages 15-28. TERRAPUB.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193 : 120-146.
- Planton, S (1999). Incertitudes sur la détermination des changements climatiques. Papier présenté à l'Ecole Thématique du CNRS « *Risques et incertitudes: le cas du changement climatique* », Les Houches, 17-22 novembre 1999.
- Pope, V.D., Gallani, M., R., R.P., & Stratton, R. (2000). The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model – HadCM3. *Clim. Dyn.*, 16: 123-146.
- Poux, X. & Olive, G. (2003). Prospective agricole sur le bassin de la Seine. *Rapport d'activité 2002*, Programme PIREN-Seine.
- Poux, X., Ducos, G. , Benoit, M. & Schott, C. (2004). La prospective spatialisée de l'agriculture du bassin de la Seine. Méthodologie et résultats. *Rapport d'activité 2003*, 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. & 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.
- Washington, W., Weatherly, J., Meehl, G., Semtner, A., Bettge, T., Craig, A., Strand, W., Arblaster, J., Wayland, V., James, R., & Zhang, Y. (2000). Parallel climate model (PCM) control and transient simulations. *Clim. Dyn.*, 16: 755-774.