

Les données climatiques du projet GICC-Seine

Version 2

Agnès Ducharne et Eric Gomez

Janvier 2003

1 Introduction

1.1 Projet GICC-Seine

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

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

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

l'ordre de grandeur de impacts du changement climatique par rapport à ceux d'autres tendances d'évolution du système Seine.

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

1.2 Objet de cette note

L'objectif de cette note est de décrire la méthode de construction des scénarios climatiques retenue dans le cadre du projet GICC-Seine, ainsi que l'ensemble des données impliquées.

2 Construction des scénarios climatiques

2.1 Méthode générale

Les MCG constituent le meilleur outil actuellement disponible pour envisager la réponse du climat à l'augmentation des GES, les méthodes alternatives se limitant aux méthodes des analogues temporels ou spatiaux (Arnell, 1994). Ils sont donc largement utilisés pour étudier les impacts du changement climatique, notamment sur les hydrosystèmes continentaux.

Ces MCG 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 CO₂.

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.

2.2 Différentes données pour différents modèles

Plusieurs modèles sont utilisés dans le cadre du projet GICC-Seine pour simuler la dynamique des différents compartiments de l'hydrosystème. Ils diffèrent par leur spatialisation, leur pas de temps de calcul, et la nature de leurs variables météorologiques d'entrée.

2.2.1 Le modèle CaB

Ce modèle est schéma de surface déterministe, qui décrit l'influence du climat sur les écoulements sur des bases physiques (Ducharne et al., 2001a). Ce modèle CaB, pour "Catchment-Based" (Ducharne et al., 2000; Koster et al., 2000), combine une approche de type SVAT ("Soil-Vegetation-Atmosphere Transfers") pour les bilans énergétiques et leur contrôle par la végétation, à une approche basée sur TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979) pour gérer les écoulements superficiels et profonds et la redistribution latérale associée de l'humidité dans le bassin.

Originellement développé pour les modèles de circulation générale (MCG), il est particulièrement adapté pour faire le lien entre hydrologie et climat. En particulier, les variables météorologiques nécessaires en entrée de ce modèle 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. Le pas de temps de calcul du modèle est 20 minutes, mais il suffit de disposer de ces variables toutes les 6 heures. Dans ce cas, il faut réaliser une interpolation du cycles diurne des variables à partir des 4 valeurs de chaque journée (voir section 2.3.1).

Par ailleurs, et comme son nom l'indique, l'unité élémentaire retenue pour le traitement des processus de surface n'est pas une maille régulière mais le bassin versant, tout comme dans le modèle Riverstrahler (section 2.2.2). Pour cette étude, le bassin de la Seine (74.000 km²) est subdivisé en 29 bassins unitaires (Figure 1).

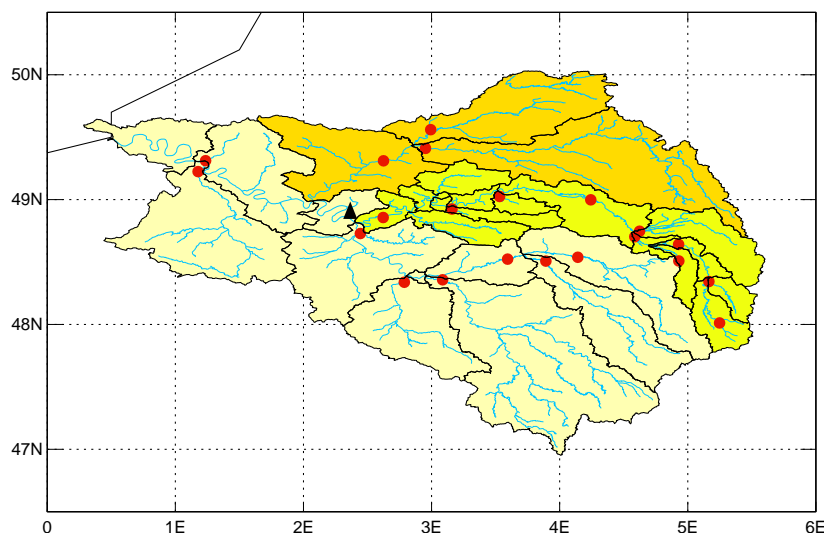


FIG. 1 – Discretisation du bassin de la Seine en 29 bassins unitaires. Les surfaces contributives de l'Oise et de la Marne apparaissent respectivement en orange et jaune citron. Les points rouges sont des stations de mesure du débit, et le triangle noir indique la position de Paris.

2.2.2 Riverstrahler

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

Il résulte du couplage d'un modèle détaillé des processus microbiologiques responsables du fonctionnement biogéochimique des écosystèmes aquatiques (module RIVE) avec un modèle hydrologique. Celui-ci transforme les écoulements superficiels et souterrains (tels que simulés par CaB) en débit. Les caractéristiques de l'écoulement en rivière (profondeur du lit et vitesse des masses d'eau, indispensables quand on s'intéresse aux processus écologiques) sont simulées en fonction des caractéristiques géomorphologiques du réseau hydrographique, idéalisé selon une arborescence de Strahler (1957) pour les ordres inférieurs (amont du bassin). Riverstrahler simule également les principales annexes du réseau hydrographique, et notamment les grands barrages réservoirs qui ont un impact majeur dans le bassin de la Seine.

Si les écoulements superficiels et souterrains sont fournis par un modèle hydrologique (comme CaB dans le cadre du projet GICC-Seine), les variables climatiques nécessaires au modèle Riverstrahler sont le rayonnement solaire incident (qui contrôle la photosynthèse planctonique) et les variables contrôlant la température de l'eau (notamment la température de l'air). Ces variables sont nécessaires au pas de temps journalier ou décadaire (selon les versions du modèle), à l'échelle des bassins unitaires de CaB.

2.2.3 STICS/MODCOU/NEWSAM

Ce modèle intégré, qui associe le modèle hydrologique couplé MODCOU, le modèle hydrogéologique NEWSAM et le modèle agronomique STICS, permet de modéliser le transfert des nitrates dans les différents compartiments du système hydrologique à l'échelle régionale, depuis les sols agricoles jusqu'aux cours d'eau en passant par la zone non-saturée et les aquifères.

La base de données nécessaire à la mise en oeuvre du modèle intégré regroupe différentes catégories de données :

- les données de forçage : variables météorologiques au pas de temps journalier (précipitation, ETP, Température minimum et maximum, rayonnement globale), pédologiques, agricoles (successions culturales et itinéraires techniques) ;
- les données de paramétrisation : paramètres physiographiques (modèle de drainage déduit du MNT et paramètres des fonctions production), paramètres hydrodynamiques (transmissivités, coefficient d'emménagement, porosité etc.), caractéristiques agronomiques des cultures ;
- les données de validation : évolution des débits en rivières, des piézométries, des concentrations dans les aquifères et des rendements des cultures.

Les résultats de simulations, spatialisées à l'échelle du bassin de la Seine, concernent :

- les écoulements : bilan hydrique, débit d'alimentation des nappes, évolution du débit dans les cours d'eau et de la piézométrie ;
- le transfert des nitrates : évolution des flux de nitrate à la base de la zone sous-racinaire et de la zone non-saturée. Evolution des concentrations en nitrate dans les aquifères et quantification des flux de matière échangés entre la nappe et la rivière.

2.3 Données actuelles

Ces données constituent la "baseline" pour la construction des scénarios de changement climatique par la méthode des perturbations. Ces données peuvent différer selon les modèles, en fonction de leur histoire et du nombre d'années nécessaires à une simulation intéressante.

2.3.1 Données CaB 1987-1988

Les données retenues pour la première application de CaB sur le bassin de la Seine sont les données ISLSCP (Sellers et al., 1996). En effet, elles comprennent toutes les données nécessaires, au pas de temps de 6h, et sur l'ensemble du globe (résolution $1^\circ \times 1^\circ$ pour les deux années 1987 et 1988. Il a donc suffi d'interpoler ces données d'abord spatialement vers les bassins unitaires (grâce au SIG ArcInfo), puis temporellement, selon la procédure déjà développée pour le programme Global Soil Wetness Project (Dirmeyer et al., 1999).

Ces données sont générées à partir des observations synoptiques des réseaux météorologiques classiques. Celles-ci sont interpolées toutes les 6 heures et sur une grille $1^\circ \times 1^\circ$ par assimilation dans un modèle météorologique global. On parle de "réanalyses".

Dans le cas des données ISLSCP, précipitation et rayonnement 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). Pour le modèle CaB, on a rajouté un niveau d'hybridation supplémentaire, par des données Météo-France au pas de temps de décadaire, afin de mieux capturer la dynamique décadaire de la précipitation.

2.3.2 Données CaB 1993-1999

Nous avons acquis auprès de MétéoFrance les données météorologiques nécessaires au forçage de CaB (au pas de temps horaire) pour les années 1993-1999. Ces données sont distribuées en une centaine de stations, qui couvrent les 29 bassins unitaires de manière suffisamment régulière pour pouvoir interpoler leurs valeurs ponctuelles à des valeurs moyennes pour chacun de ces bassins. Ce travail d'interpolation a été réalisé en s'appuyant sur une analyse spatiale par le SIG ArcInfo, et l'analyse de ces données est en cours.

2.3.3 Données d'entrée de MODCOU/STICS

Les données actuelles pour la chaîne de modèles STICS-MODCOU-NEWSAM ont été reconstituées sur les 30 dernières années au pas de temps journalier.

Pour la période 1985-1995, il s'agit d'interpolations de données observées sur un maillage régulier de 8 km x 8 km (correspondant au maillage des modèles), au moyen du système SAFRAN de Météo-France. Ces résultats sont ensuite extrapolés aux autres années pour couvrir la période 1970-2000. La méthode de génération des variables météorologiques consiste à calculer des données journalières en respectant les bilans mensuels.

Dans un premier temps, le bassin est segmenté en 12 zones homogènes iz (polygones de Thiessen) auxquelles sont affectées les données mensuelles $Vmens(iz, mois, an)$ sur la période manquante. Chaque maille "météo" SAFRAN s étant rattachée à une zone météo homogène iz , les variables météorologiques sont définies sur la période manquante de la façon suivante :

$$Vej(s, jour, an) = Vmj(s, jour) \times \frac{Vmens(iz, mois, an)}{Vmmens(s, mois)} \quad (1)$$

avec :

- $Vej(s, jour, an)$: valeur journalière extrapolée sur une maille "météo" s , avec $jour$ variant de 1 à 365 pour l'année an de la période manquante ;
- $Vmj(s, jour)$: valeur journalière moyenne calculée sur chaque maille "météo" s sur la période 1985-1995 ;
- $Vmens(iz, mois, an)$: valeur mensuelle calculée sur la zone météo iz pour le mois et l'année considérés de la période manquante ;
- $Vmmens(s, mois)$: valeur mensuelle moyenne calculée sur chaque maille "météo" s sur la période 1985-1995, avec $mois$ variant de 1 à 12.

Cette méthode présente l'avantage de générer des données météorologiques en gardant une certaine hétérogénéité spatiale grâce aux zones homogènes individualisées par les polygones de Thiessen. De plus, sa mise en oeuvre requiert un nombre relativement restreint de données. Cependant, les données $vj(s, jour)$, calculées en moyennant les données journalières sur la période 1985-1995, ne permettent pas de représenter les évolutions journalières, parfois importantes, des précipitations. Cette méthode sera donc employée pour des variables présentant de faibles évolution journalières, telles que l'ETP.

En revanche, pour générer les précipitations sur la période manquante, nous utiliserons le calcul suivant, en segmentant le bassin en 19 zones homogènes iz :

$$Pej(s, jour, an) = Pj(Paris, jour, an) \times \frac{Pmmens(iz, mois)}{Pmmens(Paris, mois)}$$

avec :

- $Pej(s, jour, an)$: précipitation journalière extrapolée sur une maille "météo" s , avec $jour$ variant de 1 à 365 pour l'année an de la période manquante ;

- $P_j(\text{Paris}, \text{jour}, \text{an})$: précipitation journalière au poste météorologique de Paris sur la période 1970-2000 ;
- $P_{\text{mms}}(iz, \text{mois})$: précipitation mensuelle moyenne sur la période 1970-1999 et sur chaque zone homogène iz , chaque zone étant rattachée à une maille “météo” s ;
- $P_{\text{mms}}(\text{Paris}, \text{mois})$: précipitation mensuelle moyenne à Paris sur la période 1970-2000.

Ici, en appliquant l'évolution journalière des précipitations observées à Paris sur l'ensemble du bassin de la Seine, nous supposons que la variabilité spatiale du régime des précipitations est relativement homogène sur le domaine d'étude (ce qui est sans doute abusif).

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 exposer le changement climatique simulé par deux MCG : le modèle Arpège (Météo-France, Déqué et al., 1998) et le modèle LMD-Z (Laboratoire de Météorologie Dynamique). Ces deux MCG partagent la caractéristique d'un maillage variable, qui est plus dense dans une région dite “zoom”. Ceci permet régionalement une résolution plus fine qu'un MCG à maillage régulier (200 km de côté au minimum), tout en maintenant la cohérence de la dynamique de l'atmosphère à grande échelle. C'est un avantage de la méthode “zoom” par rapport aux méthodes de désagrégation des MCG à maillage régulier, qui sont elles-mêmes sujettes à incertitudes, et ne font pas encore l'objet d'un consensus (Hutjes et al., 1998). Trois paires de simulations, représentant le climat en conditions $1\times\text{CO}_2$ et $2\times\text{CO}_2$ (concentrations de CO_2 actuelles et doublées respectivement), ont été réalisées ces modèles, et sont résumées dans le tableau 1.

Finalement les tableaux 2 et 3 présentent d'autres simulations MCG du changement climatique qui pourraient être utilisées ultérieurement pour compléter l'enveloppe d'incertitude de l'impact simulé.

2.5 Construction des perturbations

2.5.1 Définitions

On distingue essentiellement deux types de perturbations :

- “additives” : $X^{\text{add}} = X^{\text{act}} + (X_{2\times\text{CO}_2} - X_{1\times\text{CO}_2})$
- “multiplicatives” : $X^{\text{mult}} = X^{\text{act}} \frac{X_{2\times\text{CO}_2}}{X_{1\times\text{CO}_2}}$

La construction de ces perturbations implique plusieurs choix :

TAB. 1 – Présentation des trois paires de simulations du changement climatique actuellement disponibles pour le projet GICC-Seine.

MCG	Arpège OLD (Déqué et al., 1998)	LMD-Z	Arpège NEW (Gibelin and Déqué, 2001)
Résolution (Seine)	≈ 80 x 80 km ²	≈ 100 x 100 km ²	≈ 50 x 50 km ²
Pas de temps des données	Journalier	Mensuel	Journalier
Durée des simulations	10 ans	10 ans	30 ans
SST 1×CO ₂	1984-1994 (HadCM2 [†])	1984-1994 (HadCM2)	1960-1989 (Observé)
SST 2×CO ₂	2054-2064 (HadCM2 [†])	2054-2064 (HadCM2)	2070-2099 (Arpège/OPAG)
Scénarios d'émissions	708=354× ppm CO ₂ (total GES equiv. 954 ppm CO ₂)		2×CO ₂ : fin 21ème siècle

[†] HadCM2 : MCG couplé océan/atmosphère du Hadley Center utilisé pour simuler le climat de 1860 à 2100, avec les [CO₂] observées jusqu'en 1990, puis une augmentation de 1% par an.

TAB. 2 – Présentation des simulations du changement climatique disponibles par l'intermédiaire du projet GICC de Jan Polcher.

MCG	Résolution	Durée	Commentaire
LMD6	96x75 Grille en sinus de latitude	10 ans (time-slice)	2x2 simulations : LSM = Bucket ou Sechiba
Arpège	96x48 (sans zoom)	10 ans (time-slice)	2 simulations 2xCO ₂ : conductance réduite ou non

TAB. 3 – Présentation des simulations du changement climatique disponibles sur l'IPCC Data Distribution Centre.

Centre	Pays	Mcg	Scénario SRES			
			A1	A2	B1	B2
MPIfM	All.	ECHAM4/OPYC3		A2		B2
HCCPR	G.-B.	HADCM3		A2		B2
CSIRO	Australie	CSIRO-Mk2	A1	A2	B1	B2
NCAR	USA	NCAR-CSM		A2		
		NCAR-PCM		A2		B2
GFDL	USA	R30		A2		B2
CCCma	Canada	CGCM2		A2		B2
CCSR	Canada	CCSR/NIES AGCM	A1	A2	B1	B2
NIES	Japon	+ CCSR OGCM				

- le choix de l'année, parmi les N années des 2 simulations 1xCO₂ et 2xCO₂ (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 1xCO₂ et 2xCO₂ (pour l'année considérée), et on applique ces perturbations à tous les pas de temps de calcul (20 minutes pour CaB, 1 jour pour MODCOU) 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 hebdomadaire)
 - journalier, si les simulations MCG 1xCO₂ et 2xCO₂ sont disponibles à ce pas de temps (c'est le cas pour Arpège OLD et Arpège NEW)

2.5.2 Perturbations choisies pour le projet GICC-Seine

Nous avons conduit une étude détaillée de l'influence des différentes perturbations (Ducharne, 2002a), à partir du MCG Arpège OLD et de la "baseline" ISLSCP 1987-1988. Nous avons ainsi montré qu'il était préférable d'utiliser des perturbations mensuelles (Ducharne, 2002a).

Ce travail a aussi montré que le type de perturbation (additive vs. multiplicative) ne crée de différence que pour la précipitation, du fait des erreurs des précipitations 1xCO₂ simulées par le MCG Arpège. Les différences résultant du type de perturbation des précipitations sont inférieures à 10% pour la précipitation et le ruissellement simulé par CaB (A VÉRIFIER). 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, et 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. 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, nous avons retenu pour les analyses standard les perturbations suivantes, basées sur l'année moyenne, et calculées au pas de temps mensuel :

- "additives" pour température (y compris ses minima et maxima journaliers quand ils sont disponibles) 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,

2.6 Cas particulier de l'ETP

L'évapotranspiration potentielle est souvent utilisée par les agronomes et les hydrologues (elle intervient notamment en forçage des modèles MODCOU et STICS). Cependant, cette variable n'est ni mesurée (l'ETP est différente de l'évaporation mesurée depuis les bacs d'évaporation, ou "pan évaporation"), ni simulée par les MCG.

Il faut donc la calculer à partir des autres variables météorologiques. Il existe de nombreuses formules pour ce faire, qui présentent un niveau de complexité variable, et nécessitent parallèlement un nombre variable de données météorologiques. Etant donné la richesse des informations météorologiques dont nous disposons, nous avons pu utiliser la formule de Penman (1948), recommandée par la FAO (Allen et al., 1998). Cette formule donne une Évaporation Potentielle, qui correspond à l'évaporation de l'eau qui peut-être interceptée sur un couvert de référence (gazon de hauteur 0.12 m et d'albédo 0.23 selon la FAO). Il s'agit donc bien d'Évaporation (pas de résistance de canopée) Potentielle (eau libre / pas de stress hydrique).

Nous avons comparé deux formules de Penman applicables au pas de temps journalier. La première est dérivée de la formule FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998) :

$$ETP_{FAO} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad (2)$$

Dans cette équation, toutes les variables sont des moyennes journalières :

- ETP_{FAO} est l'Évaporation Potentielle calculée [mm j^{-1}]
- R_n est le rayonnement net en surface [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]; le calcul de R_n suppose un albédo $\alpha = 0.23$ et une émissivité de la surface $\epsilon = 1$.
- G est le flux de chaleur dans le sol [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$], négligé ici au pas de temps journalier,
- T est la température de l'air à 2 m [C],
- U_2 est la vitesse du vent à 2 m [m s^{-1}], extrapolée de la vitesse à 10 m (Allen et al., 1998)
- e_s est la pression de vapeur d'eau à saturation [kPa], donnée à partir de la température par la relation de Clausius-Clapeyron,
- e_a est la pression de vapeur d'eau à 2 m [kPa],
- Δ est la pente de la relation de Clausius-Clapeyron [kPa C^{-1}], approximée en fonction de la température (Allen et al., 1998),
- γ est la constante psychrométrique [kPa C^{-1}], estimée en fonction de la pression atmosphérique (Allen et al., 1998).

La deuxième formule testée est celle utilisée par Météo-France :

$$ETP_{MF} = ETP_1 + ETP_2 \quad (3)$$

$$ETP_1 = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \frac{R_n}{\lambda} \quad (4)$$

$$ETP_2 = \frac{\gamma}{(\Delta + \gamma)} \frac{0.26 (1. + 0.4 U_{10}) (e_s - e_a)}{\tau} \quad (5)$$

Dans ces équations, toutes les variables sont des moyennes journalières :

- ETP_{MF} est l'Evaporation Potentielle calculée [mm s^{-1}]
- R_n est le rayonnement net en surface [W m^{-2}]; le calcul de R_n suppose un albédo $\alpha = 0.2$ et une émissivité de la surface $\epsilon = 0.95$
- T est la température de l'air à 2 m [K],
- U_{10} est la vitesse du vent à 10 m [m s^{-1}]
- e_s est la pression de vapeur d'eau à saturation [hPa], donnée à partir de la température par la relation de Clausius-Clapeyron,
- e_a est la pression de vapeur d'eau à 2 m [hPa],
- Δ est la pente de la relation de Clausius-Clapeyron [Pa K^{-1}],
- γ est la constante psychrométrique [Pa K^{-1}], posée à $\gamma = 65$. [Pa K^{-1}]
- λ est la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($2.45 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$)
- τ est une constante de temps ($\tau = 86400 \text{ s}$)

Enfin, Météo-France applique les limitations suivantes (J.-F. Martins, communication personnelle) : $EP_1 \geq 0$, $EP_2 \geq 0$, $EP_{MF} \leq 9 \text{ mm j}^{-1}$.

Pour les deux méthodes, comme recommandé par la FAO, la température journalière est estimée comme la moyenne de la température minimale et maximale de la journée. Il en est de même pour la pression de vapeur saturante e_s , qui dépend non linéairement (relation exponentielle) de la température. Les applications actuelles décrites dans cette note sont basées sur les données ISLSCP 1987-1988, qui sont fournies à un pas de temps de 6h (section 2.3.1). Les températures minimum et maximum sont donc évaluées chaque jour à partir 5 valeurs (00Z, 06Z, 12Z, 18Z, 00Z), ce qui entraîne très certainement une sous-estimation de l'amplitude diurne. Enfin, R_n , U_{10} et e_a sont des moyennes journalières.

Les deux équations donnent des résultats qualitativement similaires (Figure 2). Sachant que cette ETP doit servir en entrée de MODCOU et STICS, qui ont été calés à l'actuel avec des ETP Météo-France, c'est la formule de Penman de Météo-France (équation 3) qui a été retenue pour le projet GICC Seine.

Les perturbations d'ETP sont calculées avec la même formule, en appliquant à chaque variable nécessaire la perturbation décrite en section 2.5.2. Pour ces calculs, nous avons fait l'hypothèse que l'amplitude du cycle diurne n'était pas modifiée par le changement climatique, si bien que les minima et maxima journaliers sont modifiés comme la température moyenne journalière. Cette hypothèse est confirmée par l'analyse des perturbations des minima et maxima journaliers selon Arpège NEW (Annexe 3).

Enfin, il faut noter que l'augmentation du CO_2 est elle aussi capable de modifier l'ETP. Ce point n'est pas traité ici (l'ETP perturbée ne tient pas compte d'un possible changement de la conductance stomatique). Il est discuté plus en détail dans une autre note GICC-Seine (Ducharne, 2002b).

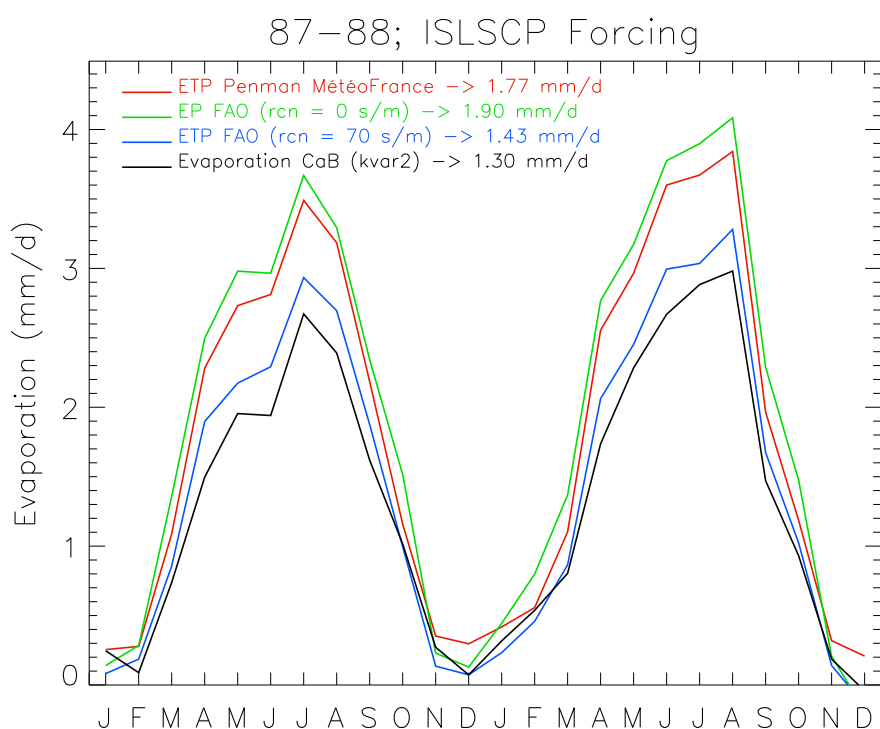


FIG. 2 – Comparaison de l’ETP calculée avec les formules de Penman de la FAO (vert) et de Météo-France (rouge). Les courbes correspondent à la moyenne spatiale dans tout le bassin de la Seine. L’évaporation simulée par le modèle CaB dans les mêmes conditions (noir) est fournie pour référence.

3 Résultats

3.1 Définition des diagnostics préliminaires

Lors de la réunion de lancement du projet GICC-Seine (11 avril 2002), il a été convenu d’une “shopping list” de diagnostics climatiques nécessaires au travail de réflexion sur la prospective agricole du bassin de la Seine. Ces diagnostics comprennent :

- Cycle saisonnier moyen, avec valeurs mensuelles, pour précipitation, température, ETP, et humidité du sol + Tmin et Tmax (minima et maxima journaliers de la température)
- Cartes trimestrielles pour ces 4 champs
- Débits : hydrogramme moyen à Poses, à Paris, à l’aval de la Marne et de l’Oise, et sur la Seine à l’amont de la confluence avec la Marne.

On peut distinguer là des données “brutes” (précipitation, température, ETP) et des données qui nécessitent le recours à la simulation (humidité du sol et débits).

L’écoulement total, et l’humidité du sol seront ici simulés avec le modèle CaB, qui permet aussi de donner une fraction saturée pour chaque sous-bassin (en fonction de l’humidité et de la topographie). Il est évident que les résultats obtenus sont dépendants du modèle, et des valeurs choisies

pour ses paramètres, concernant notamment la végétation et les propriétés des sols. Pour les résultats présentés ci-dessous, CaB utilise les paramètres de Ducharne et al. (2001a). On peut noter qu'une application de Cab est en cours avec les données actuelles fournies par Météo-France pour 1993-1999 (section 2.3.2). Les analyses préliminaires semblent indiquer que les paramètres retenus pour 1987-1988 (Ducharne et al., 2001a) ne permettent pas de reproduire correctement les débits observés de 1993-1999 (pointes de crues largement sous-estimées). Ces résultats doivent encore être confirmés, et s'ils le sont, ils devront surtout être approfondis...

Les débits en différentes stations sont simulés par le modèle Sénèque à partir de l'écoulement total simulé par CaB. Ces débits dépendent fortement de CaB d'une part, et de Sénèque d'autre part (pas de temps décadaire, rugosité de Manning...).

3.2 Résultats

Plusieurs scénarios ont été construits et comparés au climat actuel 1987-1988. Les diagnostics préliminaires sont présentés en annexe :

- Annexe 1 (document séparé annexe1.pdf) : résultat des diagnostics préliminaires du climat perturbé construit en surimposant au climat actuel 1987-1988 les perturbations standard basées sur les simulations Arpège OLD (section 2.5.2). Tmin et Tmax ne sont pas analysés car non disponibles pour les simulations Arpège OLD. En ce qui concerne les variables simulées par CaB, les conditions initiales suivantes sont utilisées :
 - actuel : les conditions initiales d'humidité sont calées pour reproduire les débits de l'hiver 1987 (simulation décrite dans Ducharne et al., 2001).
 - perturbé : on part de conditions initiales d'humidité proche de la saturation, et on laisse évoluer cette humidité au cours de 2 répétitions de l'année 1987. Cette procédure permet de définir un nouvel état initial (humidité du sol, température de la surface...), plus conforme au climat modifié, à partir duquel démarre la simulation perturbée proprement dite (avec succession de 1987 perturbé et 1988 perturbé). Notons cependant que l'on ne converge pas vers un cycle annuel stationnaire car l'année 1987 entraîne un déficit d'humidité du 1er janvier au 31 décembre.
- Annexe 2 (document séparé annexe2.pdf) : mêmes perturbations Arpège OLD que pour l'annexe 1. La seule différence concerne les grandeurs simulées par CaB, basées sur des conditions initiales différentes, afin de mieux prendre en compte la mise à l'équilibre du climat perturbé :
 - actuel : on part ici des mêmes conditions initiales d'humidité que pour l'annexe 1, mais on enchaîne 3 fois les années 1987-1988, et ce sont les diagnostics correspondant à la dernière série de 2 ans qui sont présentés (si l'on répète encore 1987-1988, les résultats sont très proches ce qui indique qu'on est proche d'un état stationnaire).
 - perturbé : on part des mêmes conditions initiales d'humidité que pour la simulation actuelle, et de même, on répète 3 fois les années 1987-1988, mais perturbées cette fois avec

les perturbations standard basées sur Arpège OLD. Comme pour la simulation actuelle, ce sont les diagnostics correspondant à la dernière série de 2 ans qui sont présentés. De même, si l'on répète encore 1987-1988 perturbés, les résultats changent très peu, indiquant une convergence vers un état stationnaire. Cette convergence est rendue possible par l'utilisation de l'année 1988, plus humide que l'année 1987, dans la mise à l'équilibre.

Les conditions initiales des simulations actuelle et perturbée étant construites de la même manière, cela favorise leur comparaison par rapport aux simulations de l'annexe 1.

- Annexe 3 (document séparé annexe3.pdf) : même méthode que pour Annexe 2, mais avec les perturbations standards basées sur Arpège NEW. Pour ce MCG, les perturbations de T_{min} et T_{max} sont disponibles, et donc analysées.

Pour synthétiser l'information, toutes les cartes indiquent la moyenne spatiale sur l'ensemble des 29 sous-bassins, et la moyenne annuelle de l'écoulement total moyenné sur l'ensemble du bassin est donnée avec son cycle saisonnier. Il faut faire attention en lisant les cartes aux échelles de couleurs, qui sont identiques pour les cartes en climat actuel et perturbé d'une même période (moyenne annuelle ou trimestrielle), mais qui varient d'une période à l'autre, pour mieux capturer les contrastes spatiaux entre les sous-bassins.

Rappelons enfin la dépendance entre données simulées (humidité du sol, fraction saturée, débits), modèles (section 3.1) et conditions initiales.

4 Autres informations utiles

Pour la prospective du secteur agricole dans le bassin de la Seine, il faut prendre en compte l'évolution de l'agriculture à l'échelle mondiale. Dans ce cadre, il serait utile de disposer de projections climatiques sur de grandes boîtes (sub-)continentales (une dizaine) comme la Chine, les US, etc.

Dans ce cadre, il est envisageable de réaliser des cartes annuelles et trimestrielles globales des champs de la "shopping list" (section 3.1) à partir d'une simulation de changement climatique non zoomée réalisée par le LMD (simulations LMD6, 1xCO₂ et 2xCO₂, avec LSM Sechiba, cf. Tableau 2). Il faut bien garder en tête les incertitudes de tous ces modèles, notamment dans la zone Tropicale. L'analyse ci-dessus doit donc être complétée, et les cartes fournies par l'IPCC Data Distribution Center (http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/asres/scenario_home.html) pour les différentes simulations du Tableau 3 semblent toutes indiquées dans ce cadre.

Références

- Allen, R., G., Periera, L., S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. (<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>).
- Beven, K. and Kirkby, M. J. (1979). A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24 :43–69.
- Billen, G., 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.
- 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.
- Ducharne, A. (2002a). Influence of temporal variability on the hydrological response to climate change. Abstracts of the EGS 27th General Assembly (April 2002, Nice, France).
- Ducharne, A. (2002b). Projet GICC-Seine : questions relatives à l’ETP. Note technique n°2 du projet GICC-Seine, disponible sur <http://www.sisyph.jussieu.fr/Internet/gicc/rapports.html>, 11 pp.
- Ducharne, A., Brunstein, D., Billen, G., and Garnier, J. (2001a). Couplage du modèle biogéochimique Sénèque avec un modèle hydrologique à bases physiques (Coupling the biogeochemical model Sénèque with a physically-based hydrological model). Rapport d’activité 2000, Programme PIREN-Seine. In french.
- 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 20, Institut Pierre et Simon Laplace.
- Ducharne, A., Koster, R. D., Suarez, M., Stieglitz, M., and Kumar, P. (2000). A catchment-based approach to modeling land surface processes in a GCM - Part 2 : Parameter estimation and model demonstration. *J. Geophys. Res.*, 105(D20) :24823–24838.
- Garnier, J., Billen, G., and Coste, M. (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 n°79, Météo France, CNRM.
- 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.
- Penman, H., L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193 :120–146.
- Strahler, A. H. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Geophys. Union Trans.*, 38 :913–920.