

# Projet GICC-Seine : questions relatives à l'ETP

Agnès Ducharne

Décembre 2002

## 1 Introduction

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

Dans ce cadre, l'évolution du climat est appréhendée grâce à des modèles de circulation générale (MCG), selon la méthode des perturbations décrite dans la note "Les données climatiques du projet GICC-Seine" (Ducharne, 2002). L'objectif de cette deuxième note est de faire le point sur les problèmes liés à l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

## 2 Définition de l'ETP

L'évapotranspiration potentielle (ETP) peut être définie comme l'évapotranspiration maximale d'un gazon non limité par l'eau. Comme il s'agit de transpiration par un gazon, il y a une conductance stomatique (et comme le couvert n'est pas limité par l'eau, on parle de conductance maximale, ou résistance minimale). A ce titre, l'ETP est différente de l'Evaporation Potentielle (on a perdu la transpiration...) qui correspond à l'évaporation de l'eau interceptée par le même gazon de référence (même influence du couvert végétal sur la résistance aérodynamique et le bilan d'énergie, mais pas de limitation par une résistance stomatique car eau libre sur le couvert).

L'ETP est souvent utilisée par les agronomes et les hydrologues. Cependant, l'ETP n'est pas facilement mesurée (elle est différente de l'évaporation mesurée depuis les bacs d'évaporation, ou "pan évaporation"), et n'est pas simulée par les MCG. Il faut donc la calculer à partir des autres variables météorologiques.

Parmi les modèles utilisés dans le cadre du projet GICC-Seine pour simuler la dynamique des différents compartiments de l'hydrosystème, deux ont besoin de données d'ETP en entrée :

- le modèle hydrologique MODCOU, au niveau des fonctions de production du module MOD-SUR
- le modèle STICS dans sa version 4. Dans la version 5, l’ETP n’est plus nécessaire.

### 3 Choix de la formulation de l’ETP

#### 3.1 Les différentes formules comparées

Il existe de nombreuses formules pour calculer l’ETP, 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 (données ISLSCP 1987-1988 ou données de MCG), nous pouvons utiliser des formules basées sur la “combination equation” de Penman (1948). Nous avons comparé plusieurs formulations, toutes au pas de temps journalier :

- la formule de Penman-Monteith (Monteith, 1965), telle que recommandée par la FAO (Allen et al., 1998). Dans cette formule, l’effet de la végétation sur la transpiration est représenté par une résistance minimale de 70 s/m. Le gazon de référence a les propriétés suivantes : gazon de hauteur 0.12 m et d’albédo 0.23. L’ETP correspondante est  $ETP_{FAO}$ .
- la formule de Penman (1948) utilisée par Météo-France. Dans cette formule, la résistance minimale imposée par la végétation n’est pas explicitement incluse. Mais elle l’est implicitement, au niveau des paramètres numériques de la fonction de vent, qui ont été calibrés à partir de mesures d’ETP (Perrier, 1977; Choissnel, 1988). L’ETP correspondante est  $ETP_{MF}$ .
- nous avons aussi testé une modification de la formule FAO-Penman-Monteith, où la résistance minimale est annulée. Cette formule donne donc une Evaporation Potentielle, qui correspond à l’évaporation de l’eau qui peut-être interceptée sur le couvert de référence (pas de résistance stomatique). On nommera ce flux  $EP_{FAO}$ .

#### 3.2 Equations correspondantes

Les deux formules dérivées de FAO-Penman-Monteith sont :

$$ETP_{FAO} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900.}{T + 273.} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

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

La seule différence entre les deux équations est le terme  $(1 + 0.34 U_2)$  en facteur de  $\gamma$  au dénominateur pour  $ETP_{FAO}$ . Dans ce terme,  $0.34 U_2$  correspond au rapport (résistance aérodynamique/résistance stomatique minimale) de la formule de Penman-Monteith, pour les paramètres retenus par la FAO

pour caractériser la végétation de référence. Dans les deux équations, toutes les variables sont des moyennes journalières :

- $ETP_{FAO}$  et  $EP_{FAO}$  sont en  $[mm\ j^{-1}]$
- $R_n$  est le rayonnement net en surface  $[MJ\ m^{-2}\ day^{-1}]$ ; le calcul de  $R_n$  suppose un albédo  $\alpha = 0.23$  et une émissivité de la surface  $\epsilon = 1$ . Les rayonnements solaire et thermique incidents sont disponibles directement (en particulier, le rayonnement thermique incident n'est pas approximé), et le rayonnement thermique depuis la surface est estimée en fonction de la température de l'air, prise comme proxy pour la température de surface.
- $G$  est le flux de chaleur dans le sol  $[MJ\ m^{-2}\ day^{-1}]$ , négligé ici au pas de temps journalier,
- $T$  est la moyenne de 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  $[kPa]$ ,
- $\Delta$  est la pente de la relation de Clausius-Clapeyron  $[kPa\ C^{-1}]$ , approximée en fonction de la température (Allen et al., 1998),
- $\gamma$  est la constante psychrométrique  $[kPa\ C^{-1}]$ , estimée en fonction de la pression atmosphérique (Allen et al., 1998).

La troisième formule testée est la formule de Penman utilisée par Météo-France :

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

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

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

Encore une fois, 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  $\epsilon = 0.95$ . Comme précédemment, les rayonnements solaire et thermique incidents sont disponibles directement (en particulier, le rayonnement thermique incident n'est pas approximé), et le rayonnement thermique depuis la surface est estimée en fonction de la température de l'air, prise comme proxy pour la température de surface.
- $T$  est la moyenne de 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  $[hPa]$ ,
- $\Delta$  est la pente de la relation de Clausius-Clapeyron  $[Pa\ K^{-1}]$ , obtenue en dérivant cette relation,

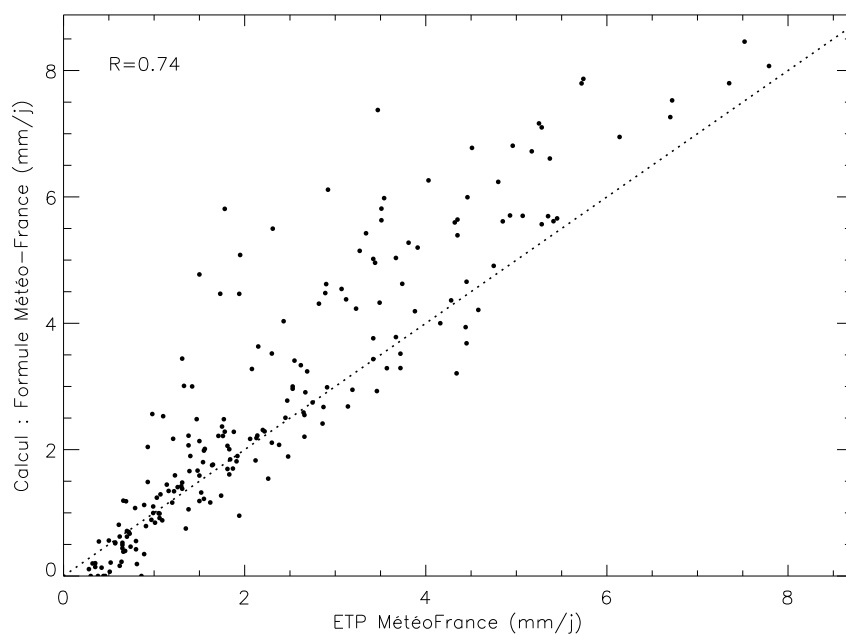
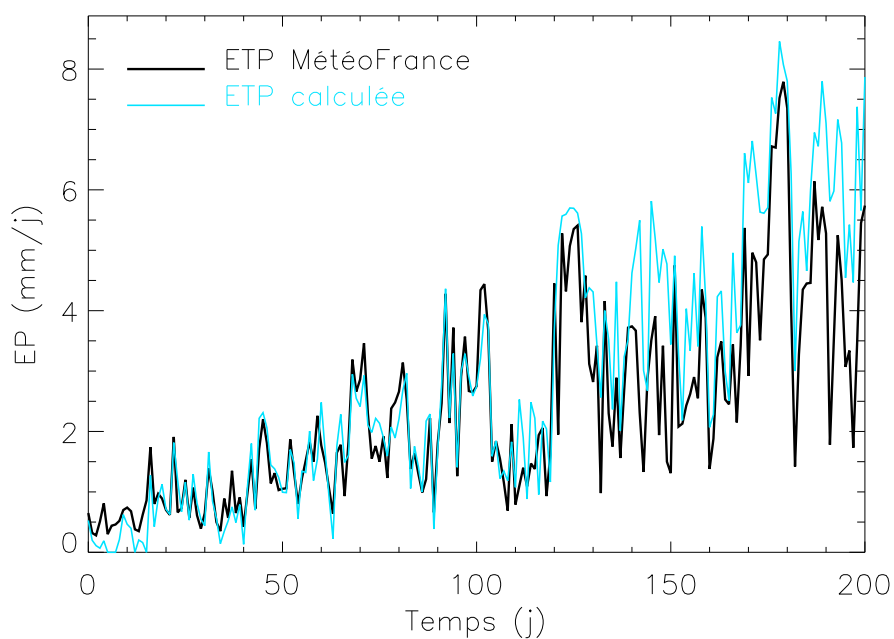


FIG. 1 – Comparaison de l’ETP fournie par Météo-France à Courcy (200 premiers jours de 1995) et de l’ETP calculée à partir de la formule de Météo-France et des données météorologiques fournies par Météo-France à Courcy.

- $\gamma$  est la constante psychrométrique [ $\text{Pa K}^{-1}$ ], posée à  $\gamma = 65 [\text{Pa K}^{-1}]$
- $\lambda$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $2.45 \cdot 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ )
- $\tau$  est une constante de temps ( $\tau = 86400 \text{ s}$ )

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

Il faut noter que cette formule  $ETP_{MF}$  a été vérifiée sur le site de Courcy (dans le département de la Marne), où nous disposons des ETP calculées par Météo-France et des variables requises pour sont calcul (à l'exception du rayonnement thermique incident, inversé à partir des données de température et humidité de l'air). Les ETP calculées par l'équation 3 et les ETP fournies par Météo-France sont proches, et les différences peuvent être attribuées au calcul du rayonnement thermique incident.

### 3.3 Résultats des comparaisons

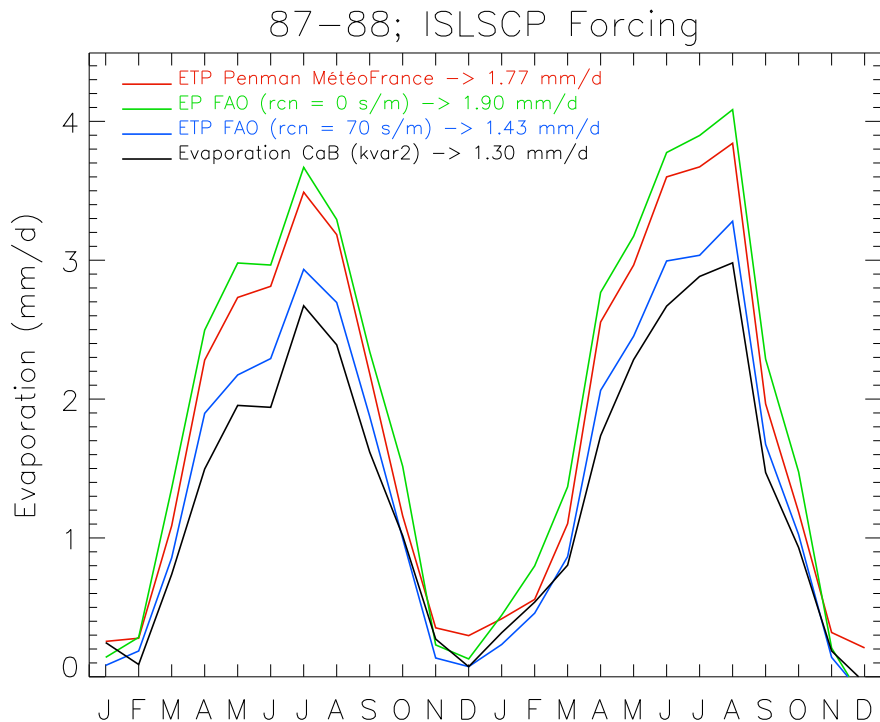


FIG. 2 – Comparaison des différentes ETP et EP calculées (voir texte pour plus d'explications). Les courbes correspondent à la moyenne spatiale dans tout le bassin de la Seine. L'évaporation simulée par le modèle CaB dans les mêmes conditions (noir) est fournie pour référence.

La figure 2 compare les résultats des 3 formules ci-dessus, à partir des forçages météorologiques ISLSCP 1987-1988 (Ducharne, 2002). Ces résultats sont donnés en moyenne spatiale sur tout le bassin de la Seine (où les contrastes spatiaux sont assez faibles sur l'ETP). Pour information, l'évapotranspiration totale simulée par le modèle CaB (schéma de surface calculant l'évapotranspiration au

pas de temps de 20 min indépendamment de l'ETP) est également représentée.

Logiquement, les ETP et EP sont toutes supérieures à l'évapotranspiration simulée par CaB (qui représente l'évapotranspiration réelle des agronomes). Logiquement toujours, l'évaporation potentielle ( $EP_{FAO}$  en vert) est supérieure aux deux ETP (sauf en hiver, ce qui s'explique par le fait que Météo-France ne permet pas aux deux termes  $ETP_1$  et  $ETP_2$  d'être négatifs, condition qui n'est pas imposée dans les formules FAO).

Par contre, les résultats des deux formules d'ETP sont assez différents. En moyenne annuelle,  $ETP_{FAO} = 1.43$  mm/j et  $ETP_{MF} = 1.77$  mm/j, soit une différence de 20% par rapport à  $ETP_{MF}$  et 33% par rapport à  $ETP_{FAO}$ . Sachant que les ETP calculées doivent 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.

Cependant, il est surprenant que l'ETP Penman de Météo-France soit nettement plus proche de l'EP FAO-Penman-Monteith (résistance minimale nulle) que de l'ETP FAO-Penman-Monteith (résistance minimale = 70 s/m). Cela veut-il dire que l'ETP Penman est en fait une Evaporation Potentielle ? ou bien que la résistance minimale préconisée par la FAO est trop forte ?

## 4 Construction des perturbations

### 4.1 Méthode générale

La méthode des perturbations consiste à perturber les données météorologiques "actuelles" ou "baseline" (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  $CO_2$ . On distingue alors deux types de perturbations :

- "additives" :  $X^{add} = X^{act} + (X_{2 \times CO_2} - X_{1 \times CO_2})$
- "multiplicatives" :  $X^{mult} = X^{act} \frac{X_{2 \times CO_2}}{X_{1 \times CO_2}}$

La construction de ces perturbations implique plusieurs choix :

- le choix de l'année, parmi les N années des 2 simulations  $1 \times CO_2$  et  $2 \times CO_2$  (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  $1 \times CO_2$  et  $2 \times CO_2$  (pour l'année considérée), et on applique ces perturbations à tous les pas de temps de calcul (1 jour pour MODCOU et STICS) du mois considéré dans la série "actuelle".
  - décadaire (ou hebdomadaire)

- journalier, si les simulations MCG  $1 \times \text{CO}_2$  et  $2 \times \text{CO}_2$  sont disponibles à ce pas de temps (c'est le cas pour Arpège "OLD" et Arpège "NEW")

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 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,

## 4.2 Application à l'ETP

Le projet GICC-Rhône calcule des ETP perturbées à partir de la formule de Penman Météo-France (equation 3), dans laquelle ce sont les différentes variables d'entrée (rayonnement net, température, vitesse du vent et pression de vapeur) qui sont perturbées à partir des simulations MCG  $1 \times \text{CO}_2$  et  $2 \times \text{CO}_2$ .

Conformément à cette méthode, la note "Les données climatiques du projet GICC-Seine" (Ducharme, 2002) montre une ETP perturbée, calculée à partir de la formule de Penman de Météo-France forcée par les variables météorologiques perturbées. Pour cette démonstration, les données actuelles qui servent de baseline aux perturbations sont les données ISLSCP 1987-1988, où les variables d'entrée de la formule de Penman sont disponibles.

Pour le forçage de MODCOU et STICS en climat modifié, cette stratégie n'est pas possible car les données de rayonnement, humidité et température de l'air ne sont pas disponibles en 1970-1990, qui constituera la baseline "actuelle" pour les modèles STICS et MODCOU. Et les extrapoler serait long et compliqué, et peut-être pas vraiment justifiable.

Pour pallier ce problème, nous avons comparé plusieurs stratégies pour déterminer l'ETP modifiée (celle qui correspond au climat perturbé). Plusieurs ETP ont été calculées (toutes avec la formule de Penman de Météo-France) :

- ETP\_A1 : les variables météorologiques viennent de la simulation "Arpège OLD"  $1 \times \text{CO}_2$
- ETP\_A2 : les variables météorologiques viennent de la simulation "Arpège OLD"  $2 \times \text{CO}_2$
- ETP\_Base : les variables météorologiques viennent des données ISLSCP 1987-1988
- ETP\_Perturb : les variables météorologiques sont les données ISLSCP 1987-1988 perturbées selon la méthode définie en section 4.1 ; c'est l'ETP perturbée illustrée dans la note "Les données climatiques du projet GICC-Seine".

A partir de ETP\_A1 et ETP\_A2, on peut définir les perturbations d'ETP additives ( $\text{ETP\_A2} - \text{ETP\_A1}$ ) et multiplicatives ( $\text{ETP\_A2} / \text{ETP\_A1}$ ), que l'on peut soit ajouter soit multiplier à ETP\_Base pour définir de nouvelles ETP modifiées : ETP\_Add et ETP\_Mult.

La figure 3 donne les résultats bruts de ces comparaisons. Elle montre d'abord que les ETP calculées à partir du climat actuel simulé par Arpège (ETP\_A1) est du même ordre de grandeur que l'ETP calculée à partir des données ISLSCP 1987-1988 (avec des moyennes annuelles de 1.69 mm/j pour ETP\_A1

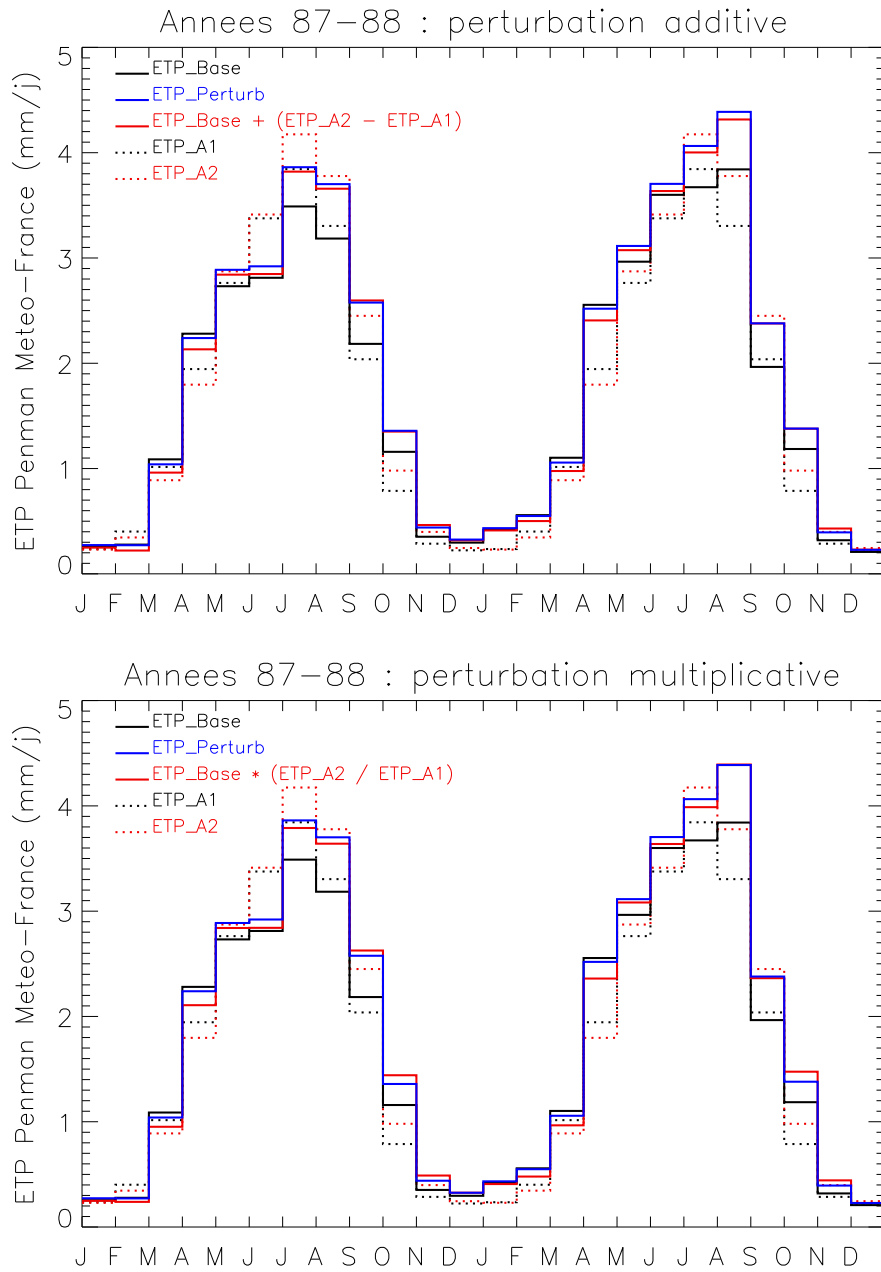


FIG. 3 – Comparaison des différentes ETP : ETP\_A1, ETP\_A2, ETP\_Base, ETP\_Perturb. ETP\_Add et ETP\_Mult apparaissent en bleu, dans la figure du haut et du bas respectivement. Les courbes correspondent à la moyenne spatiale dans tout le bassin de la Seine.



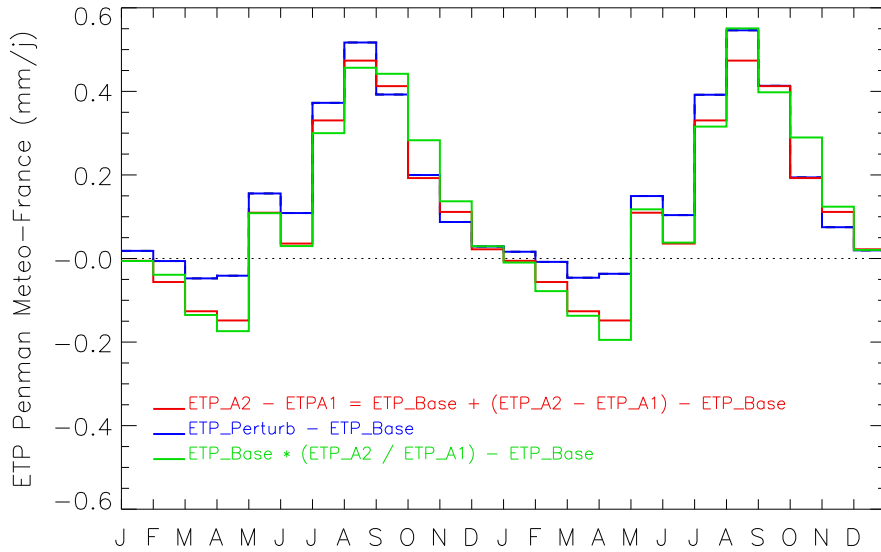


FIG. 4 – Comparaison des différences entre les ETP modifiées (ETP\_Add en rouge, ETP\_Perturb en bleu et ETP\_Mult en vert) et ETP\_Base. Les courbes correspondent à la moyenne spatiale dans tout le bassin de la Seine.

et 1.77 mm/j pour ETP\_Base). Elle montre aussi que le MCG Arpège OLD simule une augmentation de l'ETP dans le bassin de la Seine pour un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

Comparons maintenant cette augmentation de l'ETP selon les méthodes utilisées pour l'estimer. ETP\_Add est proche de ETP\_Perturb, et les différences entre ces deux grandeurs sont plus faibles que les différences qu'elles présentent avec ETP\_Base. Il en est de même si l'on compare ETP\_Perturb avec ETP\_Mult (Figure 3, graphique du bas).

La figure 4 affine cette comparaison, en montrant justement les différences des 3 ETP modifiées avec ETP\_Base. Elle indique que l'augmentation moyenne d'ETP quand la teneur en CO<sub>2</sub> double se décompose en fait en une diminution en février-mars-avril, et une augmentation le reste du temps. Les 3 méthodes convergent sur ce résultat. De plus les écarts sont assez faibles entre les 3 différences avec ETP\_Base. Comme mentionné ci-dessus, ces écarts sont généralement plus faibles que l'amplitude de la différence avec ETP\_Base, à l'exception des trois mois d'hiver.

Si l'on admet que ETP\_Perturb est la meilleure représentation de l'ETP modifiée par le doublement de CO<sub>2</sub> (car non entachée de biais liés au MCG), c'est donc pendant ces trois mois d'hiver que les méthodes ETP\_Add et ETP\_Mult sont les moins bien adaptées à remplacer ETP\_Perturb. Ce problème est sûrement réduit par le fait que l'ETP n'est pas à son maximum lors de ces mois (même si elle est déjà supérieure à 2 mm/j en avril).

Enfin, il est notable que ETP\_Add est plus proche de ETP\_Perturb que ne l'est ETP\_Mult. En conséquence, il semble possible de remplacer pour MODCOU et STICS le calcul d'une ETP perturbée (à partir de variables météorologiques perturbées en entrée de la formule de Penman) par la prescription d'une perturbation additive d'ETP calculée à partir des seules simulations 1×CO<sub>2</sub> et

$2 \times \text{CO}_2$ .

### 4.3 Effet du $\text{CO}_2$ sur la conductance stomatique et l'ETP

Il est reconnu que la conductance stomatique diminue en général quand la teneur atmosphérique en  $\text{CO}_2$  augmente. En effet, la conductance stomatique est contrôlée par l'ouverture des stomates, qui dépend elle-même de l'assimilation de carbone par photosynthèse. Une concentration en  $\text{CO}_2$  supérieure permet une ouverture stomatique plus faible sans diminuer le flux de  $\text{CO}_2$  pour l'assimilation du carbone par photosynthèse. La diminution associée de l'ouverture stomatique réduit les pertes en eau par transpiration (diminution de la conductance stomatique), et augmente donc l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE) des plantes (définie comme le rapport assimilation/transpiration).

Comme précisé en section 2, l'ETP de Penman (formule utilisée par Météo-France) représente l'évapotranspiration maximale d'un gazon non limité par l'eau. Comme il s'agit de transpiration par un gazon, il y a une conductance stomatique (et comme le couvert n'est pas limité par l'eau, on parle de conductance maximale). La formule contient des paramètres numériques (au niveau de la fonction de vent  $0.26 (1. + 0.4 U_{10})$ ) qui ont été calibrés à partir de mesures de l'ETP. Ces paramètres correspondent donc implicitement à une conductance maximale. Mais si la teneur en  $\text{CO}_2$  augmente, cette conductance maximale devrait baisser, diminuant l'ETP.

Nadine Brisson propose de calculer un facteur correctif à l'ETP Penman (qui correspond à des teneurs en  $\text{CO}_2$  récentes) en vue des études de changement climatique ( $2 \times \text{CO}_2$ ) du GICC-Seine. Elle utilisera pour cela STICS-Prairie, avec des paramètres correspondant à un gazon, et un sol saturé en eau. Le rapport entre les ETP aux teneurs en  $\text{CO}_2$  de 708 et 354 ppm (les valeurs de Arpège OLD) donnera le facteur correctif correspondant à la réduction de la conductance stomatique.

Dans ce cadre, les données requises sont-elles bien les données de température, rayonnement net (ou global ?), vitesse du vent et pression de vapeur, dans deux sites contrastés du point de vue de l'ETP. Sauf contre-ordre, ce seront des données ISLSCP 1987-1988 (est-ce que l'année 1988 suffira ?). Faut-il autre chose ?

La figure 2 soulève cependant une question par rapport à l'interprétation de l'ETP Penman, puisque l'ETP calculée par la formule de Penman de Météo-France est plus proche de l'EP que de l'ETP calculée selon la formule de Penman-Monteith préconisée par la FAO (section 3.3).

Un dernier problème se pose par rapport au modèle CaB, qui n'utilise pas d'ETP, mais directement les données météorologiques pour calculer l'évapotranspiration réelle. En effet, dans ce modèle, la paramétrisation des résistances stomatiques ne dépend pas du  $\text{CO}_2$  atmosphérique, si bien que l'effet physiologique du doublement de  $\text{CO}_2$  sur le bilan d'eau ne pourra être représenté.

## 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>).
- Choisnel, E. (1988). Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques. *La Météorologie*, VIIème Série(23) :19–26.
- Ducharne, A. (2002). Les données climatiques du projet gicc-seine. Note technique du projet GICC-Seine, disponible sur <http://www.sisyphes.jussieu.fr/Internet/gicc/rapports.html>.
- Monteith, J. (1965). Evaporation and environment. In *The state and movement of water in living organisms*, pages 205–234. Cambridge University Press. XIXth Symposia of the Soc. for Exp. Biol.
- Penman, H., L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193 :120–146.
- Perrier, A. (1977). Etude des variations de l'évapotranspiration à partir d'un modèle analytique prenant en compte les variations verticales des densités de surface foliaire et des résistances stomatiques. *La Météorologie*, VIème Série(11) :41–46.