

APPEL A PROJETS 2007 DE LA VILLE DE PARIS

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR PARIS



Projet **EPICEA**

Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle
de l'Agglomération parisienne



*Rapport sur le volet 2.2
Annexe B : Bilan radiatif*

1. Contexte.....	3
2. Rayonnements incidents	3
3. Rayonnements montants.....	5
4. Bilan net	6
Bibliographie.....	8
Liste des figures	9

1. Contexte

Le Soleil est, pour notre globe, le grand pourvoyeur de cette énergie de rayonnement que transportent à travers l'espace les ondes du rayonnement électromagnétique. Cependant, la surface terrestre et son atmosphère émettent elles aussi beaucoup d'énergie sous forme de rayonnement, quoique celui-ci reste invisible : il est en effet émis dans les longueurs d'onde de l'infrarouge lointain, tandis que le rayonnement d'origine solaire se situe principalement dans le visible et le proche et moyen infrarouge. Le bilan radiatif est l'évaluation du flux de rayonnement « net » pour la surface terrestre, c'est-à-dire de la différence par unité de temps entre le gain d'énergie de rayonnement fourni par l'absorption de tout ou partie du rayonnement incident et la perte de cette même énergie causée par l'émission de rayonnement.

Les composantes du bilan radiatif présentent un intérêt tout particulier : en effet, c'est du fonctionnement de ce bilan « global » que dépend l'évolution énergétique, et donc thermique et dynamique, de l'atmosphère et, le cas échéant, de l'océan.

On présente ici le bilan radiatif sur l'agglomération parisienne lors de la canicule de l'été 2003 dans le cadre du volet 2 du projet EPICEA. La simulation étudiée est effectuée à la résolution de 250 m au moyen du modèle MESO-NH et du système SURFEX sur une zone restreinte qui englobe l'agglomération parisienne (domaine fils : « Paris-Petite Couronne »), sur la période du 08 août à 13 UTC au 14 août à 00 UTC. Elle s'appuie sur la base de données précise du couvert urbain parisien élaborée en collaboration avec l'APUR.

2. Rayonnements incidents

La Figure 1 montre que le rayonnement incident visible (*ie.* courtes longueurs d'onde : short-wave down SWD) est plus élevé sur les arrondissements centraux. Le rayonnement global incident (direct et diffus) en zone urbaine est en effet atténué par la couche limite urbaine. Cependant, les différences sont faibles (quelques W.m^{-2} seulement). Pigeon (2007) précise dans son état des lieux des connaissances sur le micro-climat urbain que cette atténuation du rayonnement reçu en comparaison avec une zone rurale atteint quelques % en zone urbaine (2 à 4.5 % selon la saison) et 1 à 2 % en zone périurbaine. La direction du vent peut par ailleurs influencer cette atténuation, les sites sous le vent de la ville recevant moins de rayonnement que les sites au vent. L'atténuation du rayonnement varie selon le type d'urbanisation et elle est plus forte pour les zones industrielles. Des études (Mallet et al. 2003 et 2006) ont montré que l'extinction lumineuse est principalement due aux aérosols anthropiques qui diminuent fortement le forçage de jour. L'atténuation du rayonnement solaire à la surface par les aérosols est due à la fois à de la réflexion vers l'espace (20 à 25%) – principalement par les particules d'aérosol minéral – et à de l'absorption par l'atmosphère (75 à 80%) – principalement par les particules d'aérosol carboné. Nos simulations ne prennent pas en compte l'émission et la dispersion de ces aérosols. Les différences constatées sont essentiellement pilotées par la couche limite urbaine.

D'après Pigeon (2007), les études s'attachant au rayonnement atmosphérique infrarouge reçu (*ie.* grandes longueurs d'onde : long-wave down LWD) au sommet de la canopée urbaine s'accordent sur le fait que ce terme contribue à un apport énergétique supplémentaire pour les zones urbaines par rapport aux zones rurales aux alentours. Ceci se vérifie sur la journée du 10 août 2003 (Figure 2) avec, sur le domaine « Paris – PC », des variations importantes visibles sur les zones rurales au sud-ouest de Paris ($\text{LWD} < 375 \text{ W.m}^{-2}$) par rapport à la zone fortement urbanisée ($\text{LWD} > 380 \text{ W.m}^{-2}$), avec toutefois une valeur plus faible sur la Seine

(377 à 379 W.m⁻²). Deux processus peuvent a priori expliquer ce surplus : les variations de la composition atmosphérique, qui peuvent modifier l'émissivité, et les variations du profil de température, notamment par le biais de l'ICU dans la couche limite urbaine (Pigeon 2007). Sur le domaine « Paris – PC », le LWD est minimal le jour sur les zones naturelles au sud-ouest de Paris et le long de la Seine et est plus faible sur Paris *intra muros* que sur la PC, notamment sur les zones plus denses. La nuit, le LWD est maximal sur les arrondissements centraux et l'ouest de Paris, et coïncide avec la densité en terme de fraction de ville « réelle » (hors jardins) : coefficient de corrélation R²=0.3351, très significatif selon le test de Pearson.

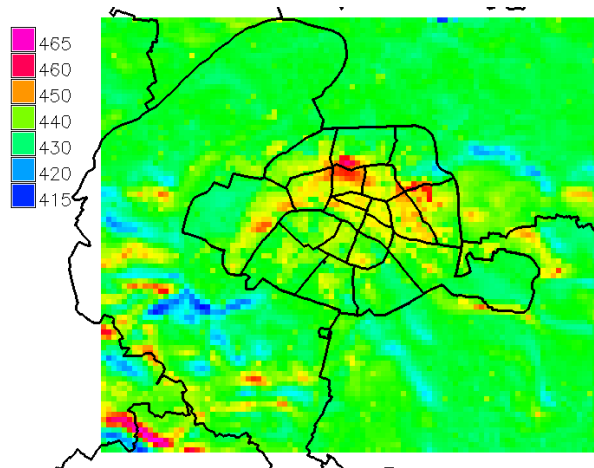
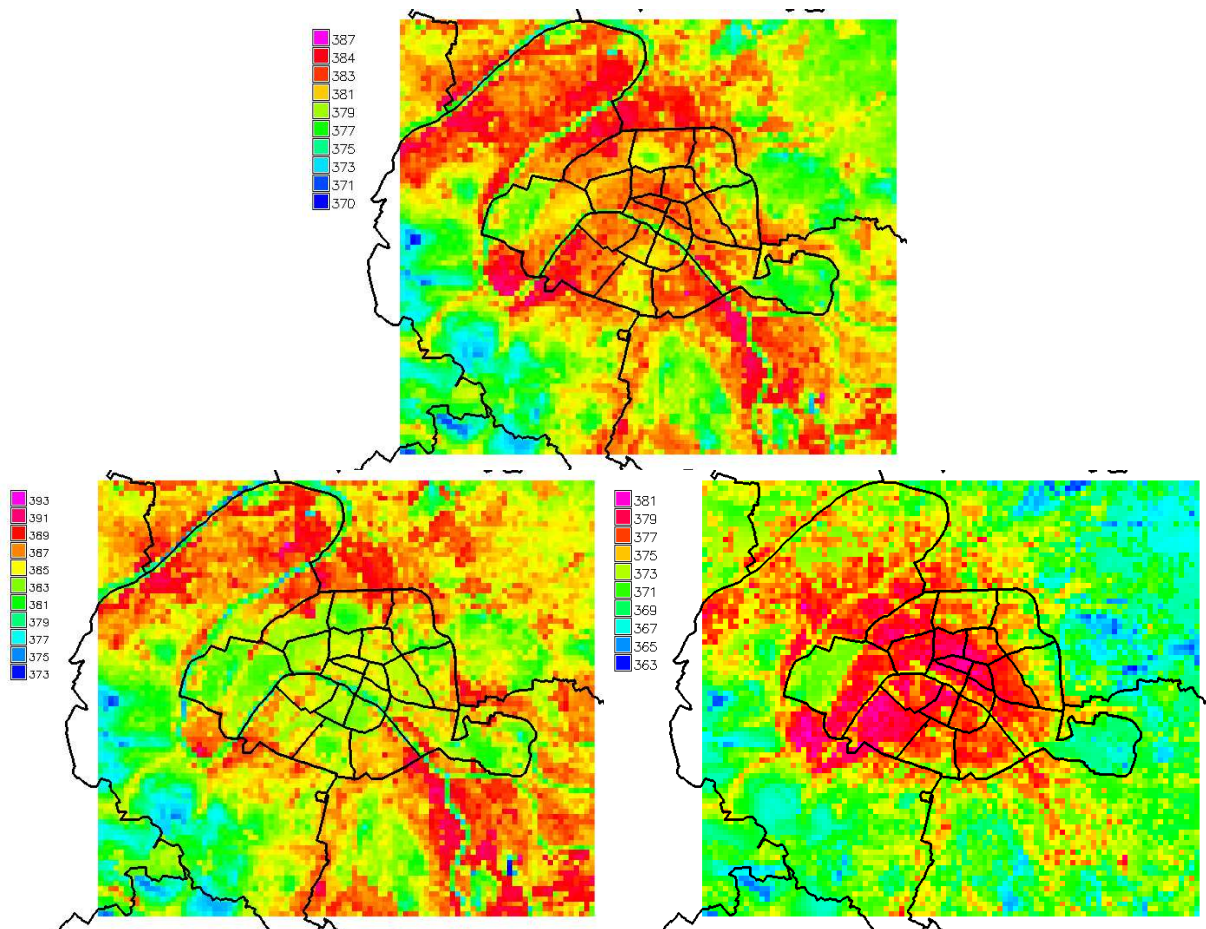


Figure 1 : Moyenne du flux de rayonnement visible descendant SWD (short wave down) en W.m⁻² sur le domaine 3 « Paris – PC » le 10 août 2003.



jour
nuit

Figure 2 : Flux de rayonnement infrarouge descendant LWD (long wave down) en $W.m^{-2}$ sur le domaine 3 « Paris – PC » : moyenne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).

3. Rayonnements montants

Les rayonnements montants sont principalement affectés par la géométrie et les propriétés radiatives des matériaux urbains. Pigeon (2007) explicite l'importance de l'albédo pour le rayonnement global : les réflexions qui peuvent avoir lieu dans le canyon urbain à cause de son agencement tridimensionnel confèrent à la surface urbaine un albédo plus faible que des surfaces planes équivalentes. Des études ont ainsi montré que l'albédo croît radialement depuis le centre ville vers les banlieues (Arnfield 1982). Avec un albédo plus faible, la part de rayonnement solaire réfléchi, notamment dans les courtes longueurs d'onde, est moindre pour les zones urbaines par rapport aux zones rurales. Sur le domaine 3 « Paris – PC » (Figure 3), le rayonnement montant visible (*ie.* courtes longueurs d'onde : short-wave up SWU) est relativement homogène sur l'ensemble du domaine (entre 55 et 100 $W.m^{-2}$) sauf sur les arrondissements centraux et l'ouest de Paris où le SWU est plus élevé (150 à plus de 200 $W.m^{-2}$). Ceci s'explique par le fait que cette zone correspond aux bâtiments avec une toiture zinc (*cf.* rapport, p12). En effet, le zinc a un albédo élevé (0.6) donc réfléchit beaucoup le rayonnement solaire, notamment la partie visible courte longueur d'onde, ce qui entraîne un SWU plus important (coefficient de corrélation $R^2=0.4099$, très fortement significatif selon le test de Pearson).

Le rayonnement infrarouge émis au sommet de la canopée urbaine (*ie.* grandes longueurs d'onde : long-wave up LWU) est généralement plus élevé que pour les surfaces rurales. Ce constat est relevé par Pigeon (2007) au travers de nombreuses études. Cela tient, en premier lieu, à des températures de surface qui sont plus élevées en ville. L'albédo plus faible conduit à une plus grande absorption de rayonnement visible qui pourra ensuite être réémis en rayonnement infrarouge. Ainsi, le LWU en journée est corrélé avec le type de toit (coefficient de corrélation $R^2=0.4128$, très fortement significatif selon le test de Pearson). D'autre part, ces résultats s'expliquent par la géométrie du canyon et les facteurs de vue de chacune des surfaces urbaines (Pigeon 2007) : coefficient de corrélation avec le rapport d'aspect $R^2=0.3185$, très fortement significatif selon le test de Pearson. Cependant, sur le domaine 3 « Paris – PC » (Figure 4), le LWU est minimal sur les arrondissements centraux et l'ouest de Paris. L'effet mentionné ci-dessus n'a pas lieu au-dessus des toitures zinc, il est contrecarré par les propriétés radiatives de ce matériau : l'albédo est élevé (0.6) et l'émissivité est très faible (0.1) ; seulement très peu de rayonnement infrarouge peut être émis. Cette différence est bien visible le jour, mais s'estompe partiellement la nuit.

Le domaine 3 « Paris – PC » est paramétré avec la base de données du couvert urbain parisien. Les résultats seront donc pilotés par les caractéristiques radiatives et thermiques spécifiques de Paris, fonction de la morphologie de la ville et du bâti et des matériaux utilisés.

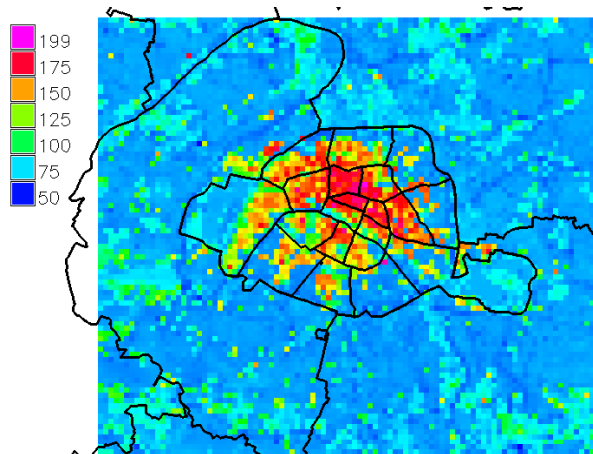


Figure 3 : Moyenne du flux de rayonnement visible descendant SWU (short wave up) en $W.m^{-2}$ sur le domaine 3 « Paris – PC » le 10 août 2003.

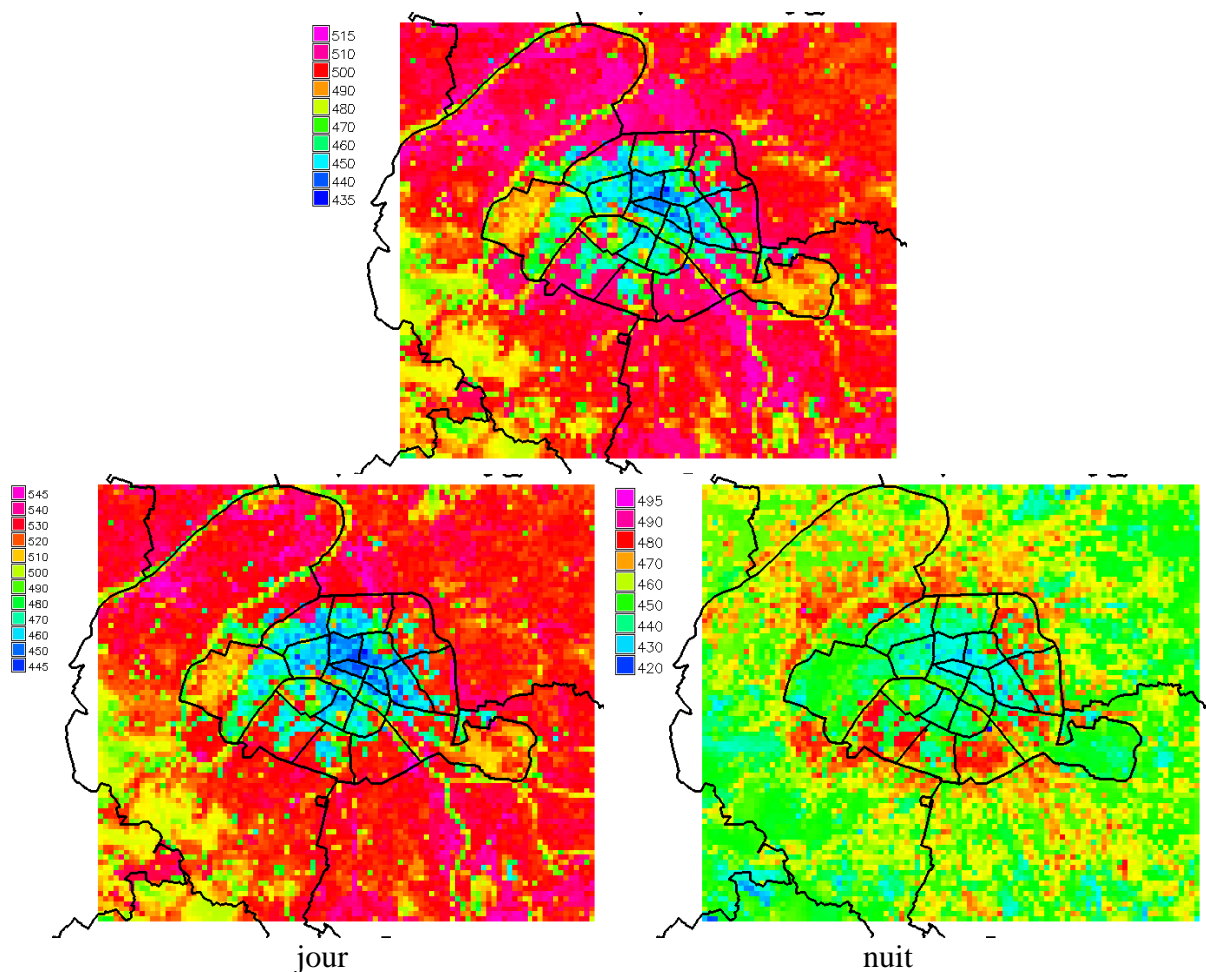


Figure 4 : Flux de rayonnement infrarouge ascendant LWU (long wave up) en $W.m^{-2}$ et sur le domaine 3 « Paris – PC » : moyenne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).

4. Bilan net

Si on s'intéresse à l'évolution temporelle du bilan radiatif en moyennant spatialement l'ensemble des points (Figure 5), on retrouve un bilan radiatif standard. Le rayonnement

visible descendant est le plus important (maximum de 850 W.m^{-2} à 12 UTC) et est nettement plus élevé que le rayonnement visible montant (maximum de 150 W.m^{-2} à 12 UTC) en raison des propriétés même du rayonnement solaire, majoritairement dans le visible, et des propriétés des corps qui émettent principalement dans les grandes longueurs d'onde, mais également des albédos moyennement élevés. Le rayonnement visible est maximum en milieu de journée-début d'après-midi lorsque le soleil est au zénith. C'est l'inverse pour le rayonnement infrarouge : le rayonnement infrarouge montant est plus élevé que le rayonnement infrarouge descendant (maximum de 550 W.m^{-2} pour le montant et maximum de 400 W.m^{-2} pour le descendant). Le rayonnement infrarouge montant est maximum dans l'après-midi (vers 14 UTC) et diminue légèrement la nuit. Le rayonnement infrarouge descendant ne présente quasiment pas de cycle diurne et oscille autour des $350\text{-}400 \text{ W.m}^{-2}$.

Une comparaison du bilan radiatif entre zone rurale et zone urbaine (figure non présentée) montre que le rayonnement visible est plus élevé en zone rurale qu'en zone urbaine (car atténué par la couche limite urbaine) et cette différence est plus marquée pour le rayonnement visible ascendant (en raison des propriétés des surfaces urbaines). Au contraire, le rayonnement infrarouge est plus élevé en zone urbaine qu'en zone rurale. Ceci est marqué pour le rayonnement infrarouge ascendant, mais très peu marqué pour le rayonnement infrarouge descendant.

Malgré les perturbations observées sur chacune des composantes du bilan net, on obtient un rayonnement net légèrement plus faible en zone urbaine qu'en zone rurale, ce qui est confirmé par les différentes études citées par Pigeon (2007).

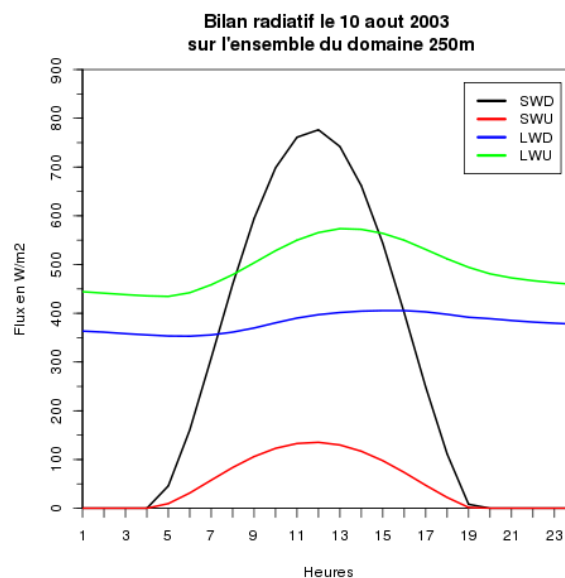


Figure 5 : Bilan radiatif le 10 août 2003 simulé par le modèle et moyenné sur le domaine 3 « Paris – PC » : rayonnement visible descendant SWD, rayonnement visible ascendant SWU, rayonnement infrarouge descendant LWD et rayonnement infrarouge ascendant LWU.

Bibliographie

- Arnfield, A. (1982), An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities, *Phys. Geogr.*, 3, 97–122.
- Mallet, M., J. Roger, S. Despiau, O. Dubovik, et J. Putaud (2003), Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during ESCOMPTE, *Atmos. Res.*, 69, 73–97. 34
- Mallet, M., V. Pont, C. Lioussé, J. C. Roger, et P. Dubuisson (2006), Simulation of aerosol radiative properties with the ORISAM-RAD model during a pollution event (ESCOMPTE 2001), *Atmos. Environ.*, 40, 7696–7705. 34
- Pigeon G., 2007, *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL*, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 170 pp.

Liste des figures

<i>Figure 1 : Moyenne du flux de rayonnement visible descendant SWD (short wave down) en $W.m^{-2}$ sur le domaine 3 « Paris – PC » le 10 août 2003.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2 : Flux de rayonnement infrarouge descendant LWD (long wave down) en $W.m^{-2}$ sur le domaine 3 « Paris – PC » : moyenne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 3 : Moyenne du flux de rayonnement visible descendant SWU (short wave up) en $W.m^{-2}$ sur le domaine 3 « Paris – PC » le 10 août 2003.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4 : Flux de rayonnement infrarouge ascendant LWU (long wave up) en $W.m^{-2}$ et sur le domaine 3 « Paris – PC » : moyenne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 5 : Bilan radiatif le 10 août 2003 simulé par le modèle et moyenné sur le domaine 3 « Paris – PC »: rayonnement visible descendant SWD, rayonnement visible ascendant SWU, rayonnement infrarouge descendant LWD et rayonnement infrarouge ascendant LWU.....</i>	<i>7</i>