

## UNE MEILLEURE CONNAISSANCE ET ESTIMATION DU RISQUE CANICULAIRE EN ZONE URBAINE DENSE

PINSON L. <sup>(1)</sup>, RUAS A. <sup>(1)</sup>, MASSON V. <sup>(2)</sup>, CHANCIBAULT K. <sup>(3)</sup>

(1) IFSTTAR, Laboratoire LISIS, Marne-la-Vallée [laura.pinson@ifsttar.fr, anne.ruas@ifsttar.fr]

(2) CNRS-GAME, Groupe de Météorologie à Moyenne Echelle, Toulouse [valery.masson@meteo.fr]

(3) IFSTTAR, Laboratoire EE, Nantes [katia.chancibault@ifsttar.fr]

**Résumé** – L'îlot de chaleur urbain est étudié à l'échelle de toute une ville, voire de toute une agglomération. Depuis quelques années de nombreux travaux visent à améliorer leur précision en incluant la géométrie urbaine, le rôle de la végétation etc. Or, il reste encore à améliorer la description de ces impacts à l'échelle de la rue. Cet article rappelle le modèle d'estimation (TEB), replonge les données calculées dans l'espace géographique pour visualiser les résultats du modèle puis propose une méthode pour désagréger cette information pour enrichir les prévisions à l'échelle de la rue.

**Mots-clés** : îlot de chaleur urbain, canicule, représentation, modèle TEB.

**Abstract** – The urban heat island is studied on the scale of the whole city, even of the whole urban area. Since a few years, many project aim at improving their precision by including the urban geometry, the role of the vegetation etc. Yet, it still remains to improve the description of these impacts on the scale of individual streets. These articles presents the model of simulation (TEB), dip back the data calculated in the geographical space to visualize the results of the model then proposes a method to disintegrate this information to enrich the forecasts on the scale of the street.

**Keywords**: urban heat island, heat wave, representations, TEB model (Town Energy Balance).

### Introduction

Aujourd'hui la ville doit se positionner face au changement climatique annoncé. La hausse des températures projetée accentuera un problème déjà connu : l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU). Très présent dans Paris et sa périphérie, il est causé par l'importance des surfaces minéralisées et par les formes de tissu urbain gênant la circulation du vent. Il en résulte une hausse des températures et une diminution du rafraîchissement nocturne. Le terme d'ICU caractérise un secteur urbanisé où les températures de l'air et des surfaces sont supérieures à celles de la périphérie rurale. Selon les observations, cette différence de température varie entre 2 et 12°C et s'avère particulièrement menaçante pour la population urbaine (Oke 1987 ; Voogt, 2002). Certaines villes l'ont compris à la suite des épisodes de canicule qui se sont avérés hautement mortelles (Besancenot, 2007). Cet ICU accentue l'impact néfaste des canicules en matière d'inconfort thermique extérieur et intérieur. Il constitue un risque sanitaire. L'étude de l'ICU nécessite l'utilisation de dispositifs expérimentaux mais aussi d'outils de simulation issus eux-mêmes de recherche telle que le modèle TEB (Masson, 2000).

Cet article s'inscrit dans le cadre du projet RepExtrem associant l'IFSTTAR et Météo-France. L'objectif de ce travail est d'améliorer l'estimation des températures en zones urbaines denses en désagrégeant la maille afin d'avoir une meilleure information à l'échelle de la rue. Nous présentons dans ce papier les premiers éléments de notre recherche.

### 1. Représentation de la ville selon TEB

#### 1.1. Le modèle TEB

L'ICU peut être simulé soit par un modèle atmosphérique complet soit à partir de considérations énergétiques de la couche limite atmosphérique (Pigeon *et al.*, 2012). Le modèle TEB (Town Energy Balance) a été conçu pour réaliser des études couplant micro-climat et ville. Il a été développé dans la perspective d'améliorer la connaissance des échanges surfaces urbaines-atmosphère. C'est un schéma de surface pour la ville, intégré dans un modèle de prévision du temps (comme par exemple le modèle Meso-NH ou le modèle de prévision opérationnel AROME). Il est centré sur la paramétrisation des échanges d'énergie et

d'eau entre les surfaces bâties et l'atmosphère. TEB prend en compte non seulement les spécificités du milieu bâti mais aussi les interactions et rétroactions de celui-ci sur l'atmosphère (Masson, 2000). Dans ce modèle, l'unité de base est la rue canyon, constituée de trois types de surfaces : une route, deux murs et un toit. Une maille représente l'espace géographique de façon agrégé par une rue canyon type (celle qui est majoritaire) avec son orientation. Cette rue-type possède des murs et toits et le modèle calcule les échanges thermiques entre ces murs, la rue-type et le toit. La maille contient aussi un pourcentage d'autres éléments (végétation, eau, etc) qui sont, eux aussi, agrégés à partir d'une représentation de la réalité. Ce modèle à la maille, bien qu'agrégé permet de prendre en compte les échanges hydriques et thermiques de portions de ville. Ainsi une partie des échanges sont calculés à partir de code de calculs spécifiques (TEB pour la partie urbaine incluant ISBA pour la prise en compte de la végétation (Noilhan et Planton, 1989)). Le modèle est complété par WatFLX pour les surfaces hydriques et SeaFLX pour la mer afin d'estimer un ensemble de paramètres climatiques (températures, humidité, etc.) à différentes altitudes. Une valeur moyenne, tenant compte de la proportion de chacune des surfaces, est donnée, pour chaque maille. Il est important de signaler que chaque surface urbaine est constituée de plusieurs couches qui permettent de calculer les échanges thermiques. L'évolution des températures est calculée pour chacune d'elle, partant de la surface jusqu'à l'intérieur. Par exemple au niveau de l'élément toit, il existe 5 températures différentes (de la température de surface du toit jusqu'à la limite du bâtiment).

Récemment, le calcul de l'UTCI (Universal Thermal Climate Index) a été introduit dans le modèle TEB par Pigeon (2012) dans le cadre du projet VURCA (Vulnérabilité Urbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation). L'indice est calculé à l'extérieur au soleil, à l'ombre et à l'intérieur d'un bâtiment. L'UTCI est particulièrement intéressant pour notre problématique de recherche.

Pour décrire le modèle TEB, on peut donc considérer qu'on part de mailles morphologiques qui représentent une portion d'espace et qu'on obtient des mailles météorologiques caractérisées par un ensemble d'indices. Notre travail de recherche consiste ainsi à récupérer ces informations, à les replonger dans l'espace pour analyser les composantes spatiales et temporelles et d'améliorer la précision spatiale en prenant en compte des hypothèses sur les gradients de températures en période de canicule (figure 1).

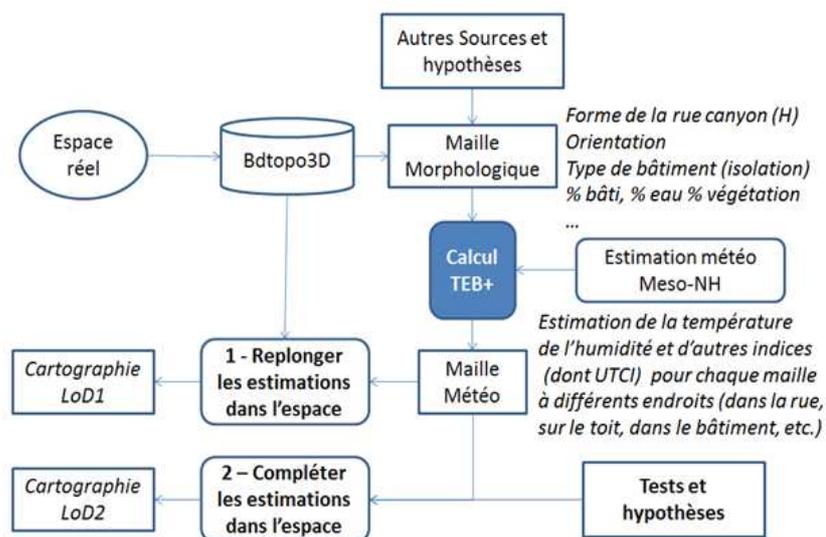


Figure 1 : De TEB à la représentation des estimations à différents niveaux de détails (LoD)

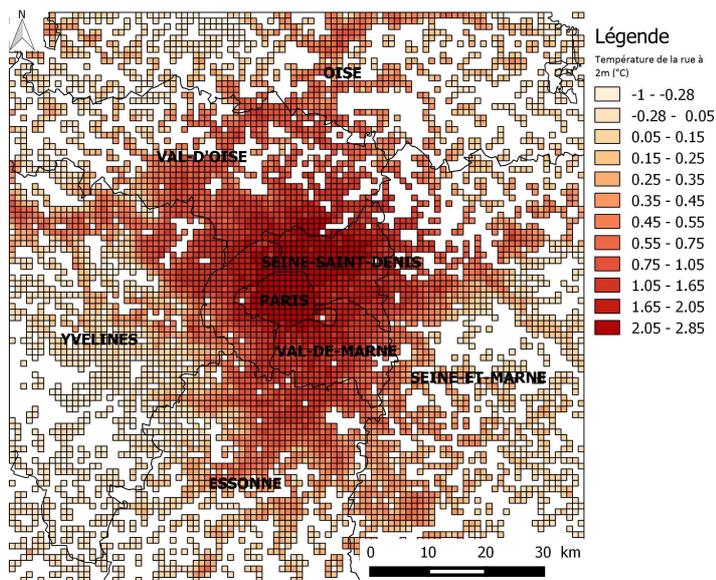
## 1.2. Plonger les sorties du modèle dans l'espace géographique

Le traitement de ces données via un Système d'Information Géographique (SIG) permet d'établir une cartographie précise des températures dans la région IDF (maille de 1 km<sup>2</sup>) et

d'intégrer ces informations à la BD Topographique de l'IGN ©. Nous pouvons commencer par représenter simplement les températures et indices puis les croiser avec les objets qui décrivent l'espace (figure 3).

Pour cela nous commençons par structurer l'information avec un SGBD-Géo (Système de Gestion de Bases de Données géographiques), analyser le phénomène et ses interactions avec l'espace via un SIG. Il convient de définir le niveau de détail (ou LoD en anglais) le plus pertinent pour visualiser au mieux les températures moyennes dans chaque maille (figure 1).

En figure 2, nous représentons la température moyenne de la rue à 2 m le 1<sup>er</sup> janvier 2004 à minuit (simulation réalisée en période non caniculaire). On constate une faible différence de température à l'intérieur même de la ville de Paris et au sein de sa périphérie. En effet, Paris, dans sa globalité, a sa température comprise entre 2,05°C et 2,85°C. Dans la périphérie proche de Paris, moins de 10km, la température reste assez proche du centre urbain de Paris. Il faut aller dans la périphérie lointaine (plus de 20km) pour commencer à voir des variations de températures entre les zones urbaines et rurales de plus de 2°C. Cette information est essentielle, mais elle ne traduit pas toutes les variations. En effet, une des particularités du climat urbain est que les variations spatiales sont très importantes. La température évolue d'une partie de la ville à l'autre, d'un quartier à l'autre, voire d'une rue à l'autre (Hufty, 2001).

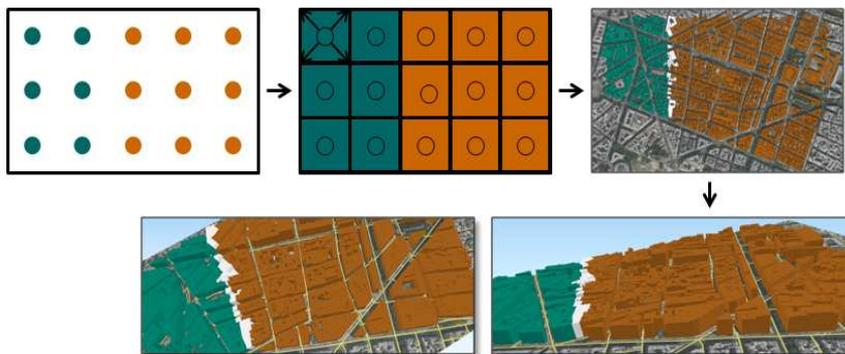


**Figure 2 :** Représentation de la simulation TEB pour la température de la rue à 2m du sol au 1.01.04 en IDF (maille de 1km<sup>2</sup>)

Les valeurs représentées en figure 2 sont essentielles pour distinguer les variations moyennes entre la ville et sa périphérie mais ne décrivent pas les variations locales. Pour cela, il faut compléter l'information et désagréger les valeurs (section 2).

### 1.3. Cartographeur pour recontextualiser et mettre en valeur les sorties du modèle

Afin de contextualiser les données en sortie de TEB, nous sommes partis des données ponctuelles TEB que nous avons restructurées autour de la maille. Chaque maille météo est décrite par un ensemble de descripteurs météo dont certains représentent la température dans la rue à 2 m du sol, la température dans les bâtiments, sur les toits. Après création d'une grille, nous avons affecté à chaque maille la valeur de la donnée. Puis nous



**Figure 3 :** Processus de recontextualiser les données des sorties TEB

avons affecté aux objets géographiques les valeurs de ces mailles. Nous avons donc plaqué les données de la grille aux différents objets constituant la « ville ». Si un objet (un bâtiment) se localise à l'intersection de deux mailles, alors on lui affecte la moyenne pondérée par la surface de la valeur des deux mailles. La figure 3 permet ainsi de mettre en valeur les sorties TEB via une représentation cartographique par élément (ici les bâtiments et la route) en 2D ou 3D. Ce type de représentation permet de mettre en valeur l'information calculée par TEB. Cela permet la conception d'un ensemble de cartes. Ainsi, les recherches actuelles visent à projeter les informations TEB pour mieux donner à voir la richesse des sorties de ce modèle (comparaison face Nord et Sud) et de représenter graphiquement les indices UTCI en intégrant la durée.

## 2. Aller vers une estimation spatialement plus détaillée

Nous souhaitons désagréger les valeurs grâce à des hypothèses et des connaissances en se focalisant sur les périodes de grande chaleur. Pour cela un premier test a été réalisé en août 2014 sur un bâtiment afin d'étudier les écarts de température entre l'intérieur et l'extérieur mais aussi sur les faces Nord et Sud sur les différents étages du bâtiment. On notera bien que ce test est uniquement valable pour les périodes estivales et pour des appartements non climatisés. On verra aussi que la ventilation joue un rôle (Jentsch *et al.*, 2008). La température de l'air (moyenne, minimale et maximale) a été enregistrée toutes les 30 minutes. Ce type de mesures représente les conditions de l'air ambiant auxquelles sont exposées la population et ses variations d'une journée à l'autre. L'analyse des températures de ces 14 capteurs posés sur un bâtiment au centre de Paris entre le 9 août et le 14 août (non période caniculaire) nous permet d'avoir des premières informations que nous compléterons par mesures *in situ*.

### 2.1. Les températures diurnes

L'analyse jour par jour de la température montre une variabilité spatiale. D'après les graphiques (figure 4), on remarque une grande différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. La température extérieure varie plus que celle intérieure. Elle a une plus grande amplitude thermique, entre 5°C à plus de 10°C contrairement à celle intérieure variant entre 1°C et 3°C. Cependant, il y a très peu de différence thermique entre le côté Sud et le côté Nord à l'intérieur du bâtiment. Ces éléments sont déjà très importants pour analyser les phénomènes de canicule. On observe plus de variations côté Sud que côté Nord à l'extérieur du bâtiment et avec une plus grande amplitude thermique (8°C maximum au Nord et 12°C maximum au Sud). En effet, le bâtiment reçoit plus de rayonnements côté Sud. De plus, on constate que dès qu'il y a une variation de température extérieure, celle-ci est visible

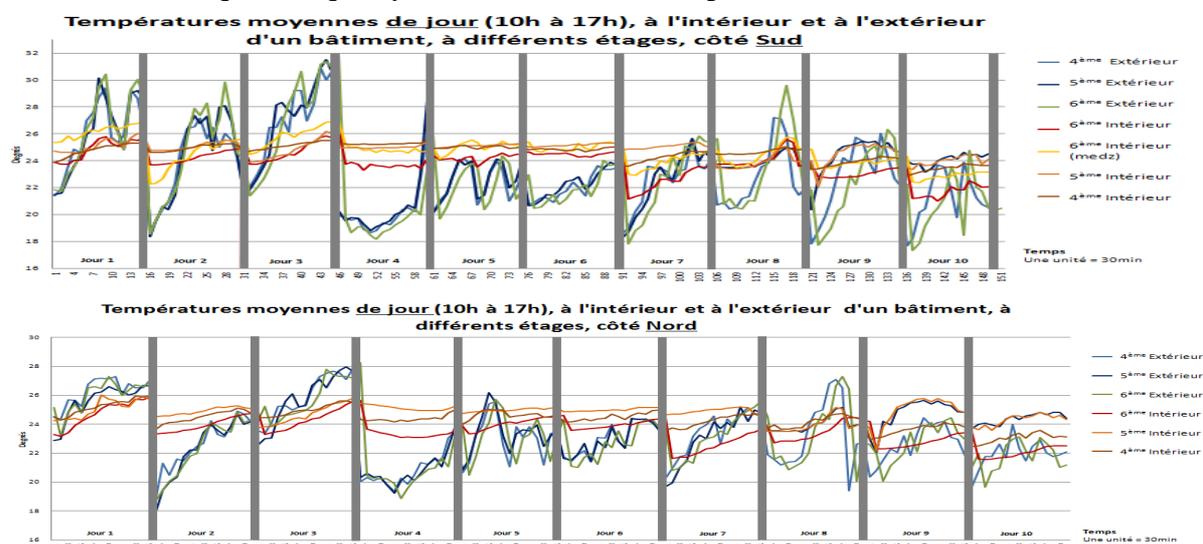


Figure 4 : Températures moyennes diurnes (intérieures et extérieures) pour la période du 9 au 14 août 2014

aussi à l'intérieur du bâtiment mais de façon atténuée. Le bâtiment joue un rôle de capacité thermique. Le climat intérieur est dépendant des conditions extérieures. De jour, le 6<sup>ème</sup> étage et la mezzanine sont les étages légèrement les plus frais à l'intérieur mais les plus chauds à l'extérieur et vice-versa (figure 6), ce que l'on ne s'attendait pas à trouver a priori. Le 4<sup>ème</sup> étage est plus chaud à l'intérieur mais plus froid à l'extérieur contrairement au dernier étage. Nous émettons l'hypothèse que la ventilation joue un rôle dans les trois appartements. En effet, le processus d'aération entre la rue et la cour est très intéressant. Il suppose que les gens ouvrent les fenêtres, ce qui peut dépend du type de rue et où se situe l'immeuble (à cause du bruit, par exemple). Cela restera à valider lors de nos prochaines campagnes de mesures. De plus, ces mêmes étages (6<sup>ème</sup> étage et la mezzanine) sont les lieux où l'on retrouve la plus forte variation de température, c'est à dire la plus grande amplitude thermique (à l'intérieur comme à l'extérieur) et ceux qui évoluent (croissent et décroissent) le plus rapidement.

## 2.2. Les températures nocturnes

L'analyse des températures nocturnes (figure 5) montre une très grande variabilité spatiale entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. L'intérieur est environ 4 à 6°C plus chaud qu'à l'extérieur, sauf durant les pics de chaleur où la différence est inférieure à 1.5°C. Les étages intermédiaires sont plus stables que le dernier. Durant la nuit, le 3<sup>ème</sup> étage est plus chaud que le dernier étage (de 1°C à presque 3°C). Ce constat est plus marqué côté Nord que côté Sud.

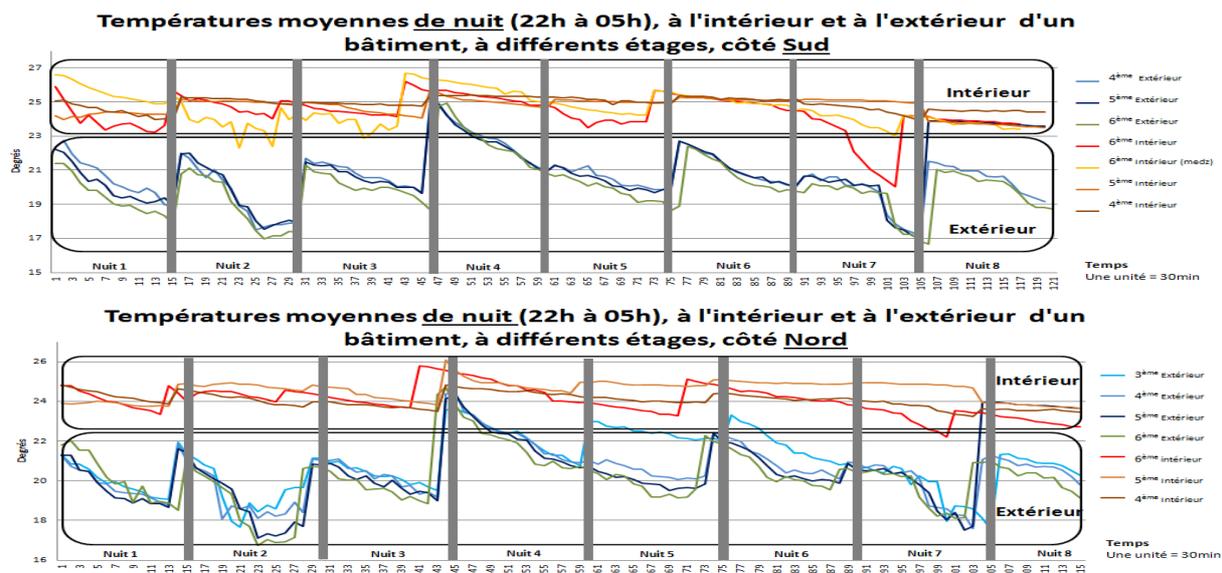


Figure 5 : Températures moyennes nocturnes (intérieures et extérieures) pour la période du 9 au 14 août 2014

De plus, on observe qu'il y a plus de variations côté Sud que Nord à l'intérieur du bâtiment avec une plus grande amplitude thermique. Dès que se forme un pic de chaleur à l'extérieur, il se répercute automatiquement à l'intérieur ; idem pour les baisses de températures (pour une hausse allant de 6°C à 3°C à l'intérieur). Le 6<sup>ème</sup> étage et la mezzanine sont les lieux où on retrouve la plus forte variation de température (hausse et baisse (à l'intérieur comme à l'extérieur)). Ce sont ceux qui croissent et décroissent le plus rapidement. Enfin, on peut remarquer que la température extérieure la plus fraîche est celle du 6<sup>ème</sup> étage puis 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup>. En moyenne, le 6<sup>ème</sup> étage est légèrement plus frais que le 4<sup>ème</sup> qui est plus frais que le 5<sup>ème</sup> (figure 6). Le processus d'aération joue donc un rôle très important dans la compréhension et la cohésion des résultats présentés.

### 2.3. En résumé

Les températures relevées montrent une variabilité récurrente journalière et une intensité plus forte la nuit que le jour. Les températures intérieures varient nettement moins que les extérieures, même en période non caniculaire (une amplitude moyenne jour-nuit de 16°C environ pour les températures extérieures et de 4.1°C pour celles intérieures). Elles sont plus stables et plus hautes la nuit et entraînent par conséquent un risque aggravant pour les habitants. Les températures les plus fraîches sont celles du 6<sup>ème</sup> étage (moyenne totale jour/nuit, figure 6). Ce dernier est, aussi, celui qui a les plus grandes amplitudes thermiques. La différence de température entre la rue et la cour, moins exposée au soleil, entraîne une ventilation naturelle des logements la nuit et donc un rafraîchissement. De plus, la ventilation naturelle et son fonctionnement sont corrélés aux conditions climatiques extérieures du bâtiment, à son orientation, à sa conception mais aussi par l'ouverture des fenêtres. Des expérimentations plus complètes auront lieu en été 2015 pour préciser ces phénomènes (Jentsch *et al.*, 2008).

	4ème inté	5ème inté	6ème inté	Medzantine	3ème Exté	4ème Exté	5ème Exté	6ème Exté
Jour Nord	24,3	24,8	23,6			23,3	23,7	23,2
Jour Sud	24,6	24,8	23,8	24,7		23,1	23,8	23,17
Nuit Nord	24,1	24,5	24,1	24,6	20,9	20,5	20,7	20,19
Nuit Sud	24,9	24,7	24,4			20,7	21	20,05

Généralité	5ème inté	4ème inté	Medzantine	Généralité	5ème inté	4ème inté	Généralité	5ème Exté	4ème Exté	3ème Exté	Généralité	5ème Exté	4ème Exté
Nrd	Nrd	Nrd	IntéSud	Sud	Sud	Nrd	Sud	Nrd	Sud	Nrd	Sud	Sud	Sud
24	248	244	249	243	25	249	217	217	219	219	216	219	218

**Figure 6 :** Températures moyennes (jour/nuit – Nord/Sud) et températures moyennes globales pour la période du 9 au 14 août 2014

### Conclusion

A partir du modèle TEB, nous proposons d'une part de mettre en valeur les résultats en les cartographiant sur l'espace géographique (figure 3) puis nous proposons d'étudier les variations de température dans des configurations spécifiques pour mieux appréhender l'inconfort en période estivale. Les premières expérimentations montrent bien les écarts intérieur/extérieur et les écarts jour/nuit, par contre les variations entre étages sont intéressantes et restent à analyser. D'autres tests seront réalisés pour construire des règles permettant de désagréger spatialement l'information et d'identifier des plages de valeurs possibles.

### Références bibliographiques

- Besancenot J.-P., 2007 : Santé et changement climatique : la montée de l'inquiétude. *Delachaux*, **44**, 256 p.
- Hufty A., 2001 : Introduction à la climatologie. Liège *De boeck Université*, 540 p.
- Jentsch M.-F., Bahaj A.-S., James P.-A.-B., 2008 : Climate change future proofing of buildings – Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, **40**, 2148-2168.
- Masson V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, **94**, 357-397.
- Noilhan J., Planton S., 1989 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Weather Rev.*, **117**, 536-549.
- Oke T.R., 1987 : Boundary layer climates. *London : Methuen*, Second edition, 435 p.
- Pigeon G., Zibouche K., Bueno B., 2012 : Development and evaluation of a comprehensive energy model in teb. *8th International conference on Urban climate*, ICUC 8, Dublin, IRL.
- Voogt J.-A., 2002 : Urban heat island. *Encyclopedia of global environmental change*, **3**, 660-666.