

Comment Joël Noilhan a influencé la modélisation et les études en climat urbain

Valéry Masson, Aude Lemonsu

Centre national de recherches météorologiques, Météo-France / CNRS, Toulouse

valery.masson@meteo.fr

Les études en climat urbain au CNRM¹ ont commencé en 1998, à la demande du bureau d'études de Météo-France, quai Branly, à Paris. Le modèle TEB² a été développé à ce moment-là par l'un de nous deux (Valéry Masson), alors jeune chercheur ayant tout juste soutenu sa thèse dans l'équipe de Joël Noilhan. Il est vrai que la démarche scientifique pour construire TEB s'est inspirée de celle qui a prévalu dans le modèle de végétation Isba³ : prendre en compte l'ensemble des processus physiques clefs dans la canopée urbaine⁴, mais en simplifiant la géométrie très complexe de la ville afin de limiter les paramètres nécessaires pour décrire la ville.

L'approche en « rue canyon » a été choisie. Elle était alors utilisée par les experts canadiens en climat urbain, en particulier le professeur Tim Oke, pour interpréter les mesures expérimentales et analyser les processus en jeu. TEB a ainsi été le premier modèle de climat urbain au monde développé pour le couplage avec les modèles atmosphériques de méso-échelle. On pourrait également penser que Joël Noilhan a influencé TEB lorsque Aude Lemonsu a intégré la végétation urbaine dans ce modèle de ville (Lemonsu *et al.*, 2012). Mais le rôle de Joël Noilhan dans l'essor de TEB a été bien plus important que l'image que l'on s'en fait habituellement.

Résumé

Bien que ce fait soit peu connu, Joël Noilhan a commencé sa carrière non pas dans l'étude de la végétation, mais dans celle du climat urbain. Ses résultats de thèse sur les échanges radiatifs entre les différentes faces d'un bâtiment, le ciel et le sol sont encore utilisés comme hypothèse dans la plupart des modèles de canopée urbaine, comme celui développé au CNRM, Town Energy Balance (TEB). Joël a contribué dans les années 2000 à l'essor de la météorologie urbaine au CNRM. Il a notamment encouragé les collaborations internationales avec l'équipe canadienne du professeur Tim Oke, spécialiste mondial du climat urbain, et initié un volet expérimental dédié à l'urbain sur la ville de Marseille, lors de la campagne Escompte en 2001.

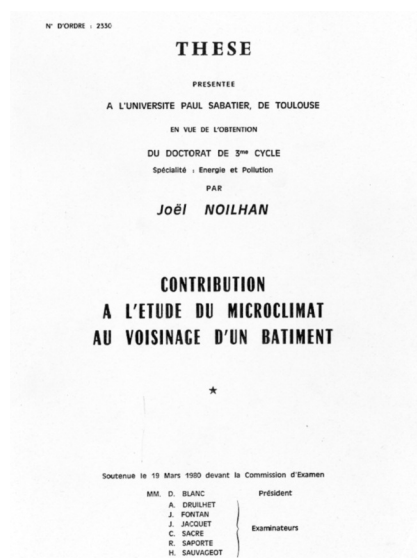


Figure 1. Page de couverture de la thèse de doctorat de Joël Noilhan soutenue le 19 mars 1980.

Un pionnier du climat urbain

Il faut revenir en 1978-1980, bien avant Isba, la campagne de mesures Hapex-Mobilhy⁵ dans le sud-ouest de la France et l'arrivée de Joël au CNRM, ou même l'expérience du Météotron à Lannemezan (Bougeault et André, 2020). Joël était alors étudiant en thèse à Nantes et ses travaux ne portaient nullement sur la végétation. Sa thèse

1. Centre national de recherches météorologiques.
2. Town Energy Balance.
3. Interactions sol-biosphère-atmosphère.
4. Zone comprenant les bâtiments, les routes, l'air entre les bâtiments, éventuellement la végétation urbaine.
5. Hydrologic and Atmospheric Pilot Experiment – Modélisation du bilan hydrique.

Abstract

How Joël Noilhan influenced modelling and studies on urban climate

This is not well known, but Joël Noilhan did not start his career by studying vegetation processes, but rather urban climate. His PhD results on radiative exchanges around a building still form the basis of radiative processes in most urban canopy models such as the Town Energy Balance (TEB) developed at CNRM. In the 2000s, he contributed to the urban climate studies at CNRM. He encouraged an international collaboration with the team of Tim Oke, in Canada, an international expert in urban climate. He also initiated an experimental component dedicated to urban environment over the city of Marseille, during the Escompte campaign in 2001.

était intitulée : « Contribution à l'étude du microclimat au voisinage d'un bâtiment » (figure 1). Alors au Centre scientifique et technique du bâtiment, Joël Noilhan a donc été un précurseur dans l'étude du climat urbain (Noilhan, 1981).

La thèse de Joël a porté sur l'étude d'un quartier de Nantes, en particulier sur un bâtiment de Saint-Herblain (figure 2). Il a principalement étudié les échanges radiatifs à l'extérieur, entre les différentes faces du bâtiment (construit selon une géométrie en U) et son environnement. Il a réalisé des mesures en laboratoire (figure 3), ainsi qu'une campagne de mesures expérimentales sur site avec des capteurs de rayonnement placés dans la cour à plusieurs endroits et selon diverses orientations (figure 2). Il s'agit donc de la première campagne de mesures *in situ* de Joël Noilhan !

Au cours de sa thèse, Joël a modélisé les échanges radiatifs avec une approche en facteurs de forme. Il en a déduit des formulations applicables à

son bâtiment. Un facteur de forme particulier est le facteur de vue du ciel, qui permet de représenter les échanges radiatifs entre une paroi et le ciel (voir encadré). C'est en quelque sorte la proportion de ciel que voit un élément de surface, et en particulier le sol (ou la route), en tenant compte des effets d'obstruction des obstacles environnants. Le facteur de vue du ciel, illustré par la photographie hémisphérique de la figure 4, est un paramètre critique pour simuler les processus thermo-radiatifs en milieu urbain. En effet, la fraction de vue du ciel influence directement les échanges radiatifs, mais traduit aussi la compacité du tissu urbain. Elle permet donc d'expliquer l'influence de la morphologie urbaine sur les phénomènes de stockage de chaleur et les flux de chaleur vers l'atmosphère (Oke *et al.*, 2017). C'est encore un paramètre utilisé aujourd'hui dans de nombreux modèles, qu'ils soient conceptuels, statistiques ou numériques à base physique, comme ceux ayant participé au projet de comparaison décrit dans Grimmond *et al.* (2010).

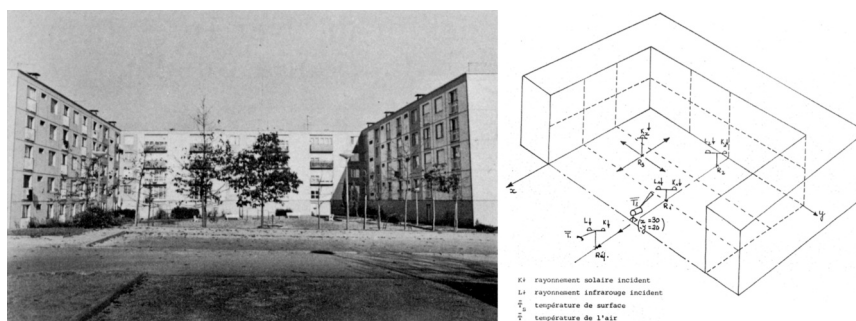


Figure 2. À gauche : photographie de l'immeuble étudié ; à droite, représentation du protocole expérimental (documents extraits du manuscrit de thèse de Joël Noilhan, 1980).

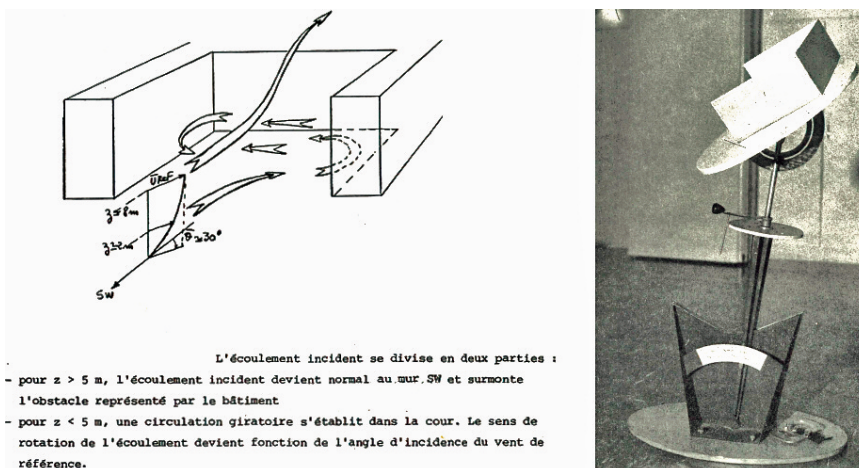


Figure 3. À gauche : représentation conceptuelle du vent au voisinage du bâtiment ; à droite : photographie de la maquette construite pour les mesures radiatives en laboratoire (documents extraits du manuscrit de thèse de Joël Noilhan, 1980).

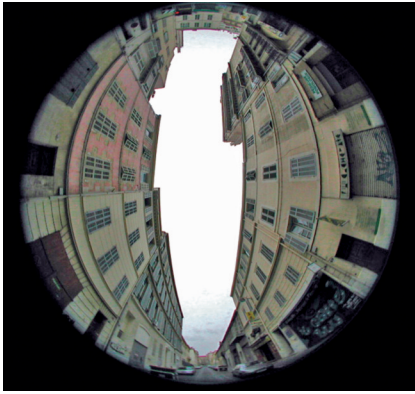


Figure 4. Photographie hémisphérique du ciel prise depuis le centre d'une rue-canyon de Marseille pour caractériser le facteur de vue du ciel visible depuis le milieu du canyon urbain (le centre de la route). Marseille, campagne expérimentale Escompte, 2001.

Vers les collaborations internationales

Une fois le modèle développé, il s'agissait de le valider. Joël a encouragé la prise de contact avec le professeur Tim Oke, le spécialiste mondial du climat urbain de l'université de British Columbia (Vancouver, Canada), qui avait mené diverses campagnes de mesures de flux turbulents en ville. TEB a ainsi été évalué pour la première fois sur la base de comparaison à des mesures de flux collectées sur deux quartiers très différents : une zone d'activités composée de hangars à Vancouver et le centre-ville de Mexico-City, très dense et comparable à ceux des villes européennes (Masson *et al.*, 2002). Ceci a été le début d'une collaboration durable avec Tim Oke, Sue Grimmond (alors à l'université de Bloomington, aux États-Unis, aujourd'hui à l'université de Reading, au Royaume-Uni) et James Voogt (université de Western Ontario, London, Canada).

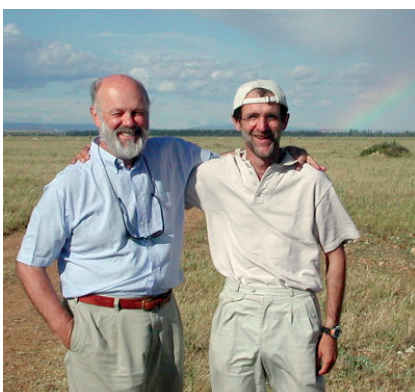


Figure 5. Joël Noilhan (à droite) aux côtés de Tim Oke (université de British Columbia, Vancouver, Canada) lors de la campagne de mesures Escompte sur Marseille.

Formulation des facteurs de vue vers le ciel et les murs

Le facteur de vue entre deux surfaces est donné par l'équation (1) (G , p et q sont définis dans la figure) :

$$F_{XY \rightarrow X'Y'} = \frac{2q}{\pi p} \left(G \left(\frac{q}{\sqrt{p^2 + 1}} \right) - G(q) \right) + \frac{2q}{\pi p} \left(G \left(\frac{q}{\sqrt{p^2 + 1}} \right) - G(q) \right) \quad (\text{éq. 1})$$

Dans cette équation, XY et $X'Y'$ se rapportent à deux surfaces rectangulaires de côté $X (= X')$ et $Y (= Y')$ face à face à une distance Z l'une de l'autre dont on calcule le facteur de vue relatif de l'une à l'autre (figure 4). De plus, $p = X/Z$, $q = Y/Z$, et

$$G(k) = \frac{1}{k} \arctan(k) = \frac{k^2 - 1}{4k^2} \ln(1 + k^2) - \frac{1}{2} \ln(k) \quad (\text{éq. 2})$$

Le facteur de vue du ciel pour un canyon urbain de longueur infinie comme dans TEB se déduit de cette équation pour p fini et q tendant vers l'infini. Le terme p est alors égal au rapport entre la largeur de la route (w) et la hauteur des bâtiments (h). L'équation 3 présente les facteurs de vue de la route (Ψ_r)

et du mur (Ψ_w). Par construction dans l'hypothèse de la rue canyon, le ciel et les deux murs recouvrent l'ensemble de la demi-sphère vue depuis la route ; on a donc $\Psi_r + 2 \Psi_w = 1$. Ces formules sont à la base de la modélisation du rayonnement infrarouge dans TEB (Masson, 2000). Mais bien que les idées de Joël Noilhan aient façonné la genèse de TEB, il a jugé qu'elles ne justifiaient pas qu'il soit co-auteur de l'article décrivant le modèle. Ceci montre à la fois l'humilité et la droiture scientifique de Joël Noilhan.

$$\Psi_r = \sqrt{(h/w)^2 + 1} - h/w \quad (\text{éq. 3})$$

$$\Psi_w = \frac{1}{2} \left(h/w + 1 - \sqrt{(h/w)^2 + 1} \right) (h/w)$$

Les fonctions d'échanges $N_{A \rightarrow B}$ entre les différentes faces A et B de ce parallélépipède s'écrivent :

On pose : $p = \frac{X}{Z}$, $q = \frac{Y}{Z}$

$$N_{XY \rightarrow ZY} = Y^2 \left[G(p) + G(q/p) - G\left(\frac{q}{\sqrt{p^2 + 1}}\right) \right] = F_4 \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right)$$

$$N_{XY \rightarrow X'Y'} = Y^2 \left[G\left(\frac{q}{\sqrt{p^2 + 1}}\right) - G(q) \right] + X^2 \left[G\left(\frac{p}{\sqrt{q^2 + 1}}\right) - G(p) \right] = F_6 \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right)$$

On remarque que :

$$N_{XY \rightarrow ZY} = N_{ZY \rightarrow XY}$$

$$N_{XY \rightarrow X'Y'} = N_{X'Y' \rightarrow XY}$$

Formule des facteurs de vue entre deux surfaces (Noilhan, 1980).

Cette collaboration s'est renforcée avec la participation des équipes canadiennes au volet urbain de la campagne de mesures Escompte⁶ lors de l'été 2001 sur Marseille (figures 5 et 6). Plusieurs équipes françaises ont participé à cette première étude d'envergure sur le climat urbain en France (Mestayer *et al.*, 2005), avec en particulier des mesures infrarouge aéroportées (températures des surfaces), des mesures par lidar scannant (vent), des scintillomètres (flux de chaleur) et diverses stations de bilan d'énergie.

Implication dans la campagne de mesures Escompte sur Marseille

Dans le cadre de la campagne Escompte, un enjeu particulièrement important et difficile était de pouvoir mesurer les échanges d'énergie entre la ville et l'atmosphère pour un quartier très dense du centre-ville de Marseille. Le CNRM, bien qu'ayant déjà mené de



Figure 6. Site de mesures de la cour d'appel administrative de Marseille. Installation du mât de 28 m avec Sue Grimmond (2^e à partir de la gauche).

nombreuses campagnes de mesures météorologiques, n'avait alors aucune expertise sur les mesures en ville. La collaboration avec les équipes canadiennes a permis un transfert de

6. Experiments to constrain models of atmospheric pollution and transport of emissions.

compétences vers les équipes du CNRM. Joël Noilhan s'est très fortement impliqué dans cette campagne, autant dans l'organisation pour la préparation de la campagne que dans sa réalisation elle-même.

Ces campagnes de mesures évoquent toujours des souvenirs particuliers. Nous nous rappelons les visites des nombreux toits de Marseille afin de trouver un site adéquat pour installer un mât de mesure permettant de placer les instruments à plus de deux fois la hauteur des bâtiments environnants (figures 7 et 8) et comment Joël Noilhan a remué ciel et terre pour trouver un installateur pouvant gruter le mât deux semaines avant le démarrage de la campagne. Lors de ces visites de sites, nous cherchions aussi avec Jean-Pierre Lagouarde, de l'Inra⁷ de Bordeaux, un toit d'immeuble où installer un scintillomètre. Un scintillomètre mesure les flux de chaleur intégrés traversant un trajet entre deux points, ici séparés de quelques kilomètres. Il s'agissait donc de placer émetteur et récepteur sur deux immeubles assez hauts de part et d'autre du mât de mesure. Ce protocole permettait de comparer les mesures du scintillomètre et du mât. Un des immeubles était l'université. De l'autre côté, un seul immeuble correspondait à nos critères scientifiques. En y allant, nous avons découvert tous ensemble que le dernier étage était occupé par le consulat d'Israël. Mais Jean-Pierre



Figure 7. Vue aérienne du site de mesures de la campagne Escompte en 2001 à Marseille (sur laquelle est indiqué en rose la zone influençant les mesures de flux turbulents)

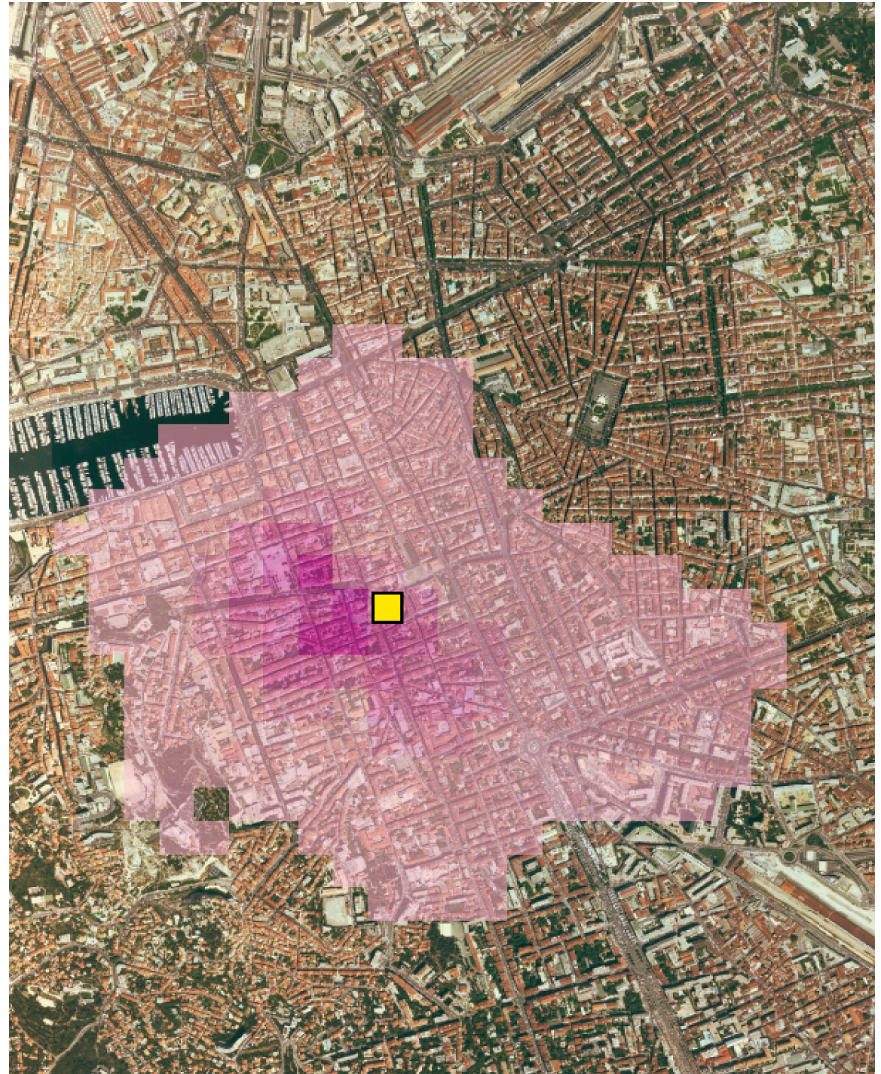


Figure 8. Vue du mât de mesures déployé lors de la campagne Escompte (28 m au-dessus du toit soit environ 50 m au-dessus de la route). Sa position dans la ville est indiquée par le carré jaune de la figure 7.

Lagouarde et Joël Noilhan ne se sont pas découragés, et malgré les contraintes de sécurité inhérentes au lieu, le scintillomètre a finalement pu y être installé.

Et surtout, nous nous souviendrons de sa constante bonne humeur pendant la campagne et de l'aide qu'il a apporté au quotidien à nos amis canadiens (qui étaient quelque peu traumatisés par la circulation à Marseille).

Nous avons ainsi pu recueillir des mesures précieuses, socle de la thèse d'Aude Lemonsu, qui lui ont permis d'effectuer pour la première fois une amélioration et une validation de modèle de canopée urbaine pour une ville européenne (Lemonsu *et al.*, 2004). Les mesures ont été exploitées bien au-delà des attentes initiales, ayant permis notamment de mettre en évidence des processus d'advection spécifiques sur le bilan d'énergie liés à la proximité de la mer, à 4 km de là (Pigeon *et al.*, 2007).

Le début d'une grande aventure

Après ces premières années d'étude du climat urbain au CNRM, Joël Noilhan a toujours continué à suivre les travaux menés sur ce sujet. Les collaborations internationales ont continué avec le séjour postdoctoral d'Aude Lemonsu à Environnement Canada et l'implémentation de TEB dans les modèles canadiens, ainsi que la campagne de mesures Capitoul⁸ (Masson *et al.*, 2008) qui a permis d'analyser le microclimat urbain sur Toulouse pendant plus d'un an, et les processus associés. Joël Noilhan doit être remercié de tout ce qu'il nous a apporté. Nous retiendrons qu'il a toujours fait confiance, encouragé et soutenu ses chercheurs et qu'il possédait une bonne humeur particulièrement communicative.

7. Institut national de recherches agronomiques.

8. *Canopy and aerosol particles interactions in Toulouse urban layer.*

Bibliographie

- Bougeault P, André J.-C., 2020. Joël Noilhan (1953-2010), une carrière scientifique consacrée à la micrométéorologie et à l'hydrologie. *La Météorologie*, 108, xx-xx.
- Grimmond C.S.B., Blackett M., Best M.J., Barlow J., Baik J.-J., Belcher S.E., Bohnenstengel S.I., Calmet I., Chen F., Dandou A., Fortuniak K., Gouvea M.L., Hamdi R., Hendry M., Kawai T., Kawamoto Y., Kondo H., Krayerhoff E.S., Lee S.-H., Loridan T., Martill A., Masson V., Miao S., Oleson K., Pigeon G., Porson A., Ryu Y.-H., Salamanca F., Shashua-Bar L., Steeneveld G.-J., Tombrou M., Voogt J., Young D., Zhang N., 2010. The international urban energy balance models comparison project: first results from phase 1. *J. Applied Meteor. Climatol.*, 49, 1268-1292.
- Lemonsu A., Grimmond C.S.B., Masson V., 2004. Modelling the surface energy balance of an old Mediterranean city core. *J. Appl. Meteorol.*, 43, 312-327.
- Lemonsu A., Masson V., Shaushua-Bar L., Erell E., Pearlmutter D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas. *Geosci. Model Dev.*, 5, 1377-1393. doi : 10.5194/gmd-5-1377-2012
- Masson V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.*, 94, 357-397.
- Masson V., Grimmond C.S.B., Oke T.R., 2002. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *J. Appl. Meteorol.*, 41, 1011-1026.
- Masson V., Gomes L., Pigeon G., Lioussé C., Ont V., Lagouarde J.-P., Voogt J., Salmond J., Oke T., Hidalgo J., Legain D., Garrouste O., Lac C., Connan O., Briottet X., Lachéradé S., 2008. The Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer (Capitoul) experiment. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 102, 135-157.
- Mestayer P, Durand P, Augustin P, Bastin S., Bonnefond J.-M., Bénech B., Campistron B., Coppalle A., Delbarre A.H., Dousset B., Drobinski P., Druilhet P., Fréjafon E., Grimmond S., Groleau D., Irvine M., Kergomard C., Kermadi S., Lagouarde J.-P., Lemonsu A., Lohou F., Long N., Masson V., Moppert C., Noilhan J., Offerle B., Oke T., Pigeon G., Puygrenier V., Roberts S., Rosant J.-M., Saïd F., Salmond J., Talbaut M., Voogt J., 2005. The urban boundary layer field experiment over marseille ubl/clu-ESCOMPTE: set-up and first results. *Boundary-Layer Meteorol.*, 114, 315-365.
- Noilhan J., 1980. *Contribution à l'étude du microclimat au voisinage d'un bâtiment*. Thèse de doctorat, université Paul Sabatier, Toulouse.
- Noilhan J., 1981. A model for the net total radiation flux at the surfaces of a building. *Building Environ.*, 16, 259-266.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A., 2017. *Urban climates*. Cambridge University Press, 520 p.
- Pigeon G., Lemonsu A., Grimmond C.S.B., Durand P., Thouron O., Masson V., 2007. Divergence of turbulent fluxes in the surface layer: case of a coastal city. *Boundary-Layer Meteorol.*, 124, 269-290. doi: 10.1007/s10546-007-9160-2
-