



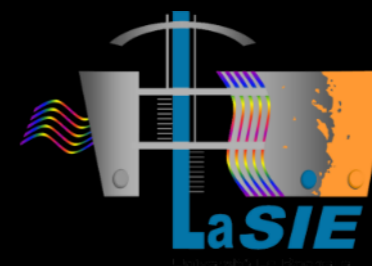
Du bâtiment à la ville, panorama des approches de modélisation du comportement thermique des bâtiments dans leur environnement

Marjorie Musy

Chercheur au CRENAU, UMR CNRS 1563
Directrice adjointe de l'IRSTV, FR CNRS 2488

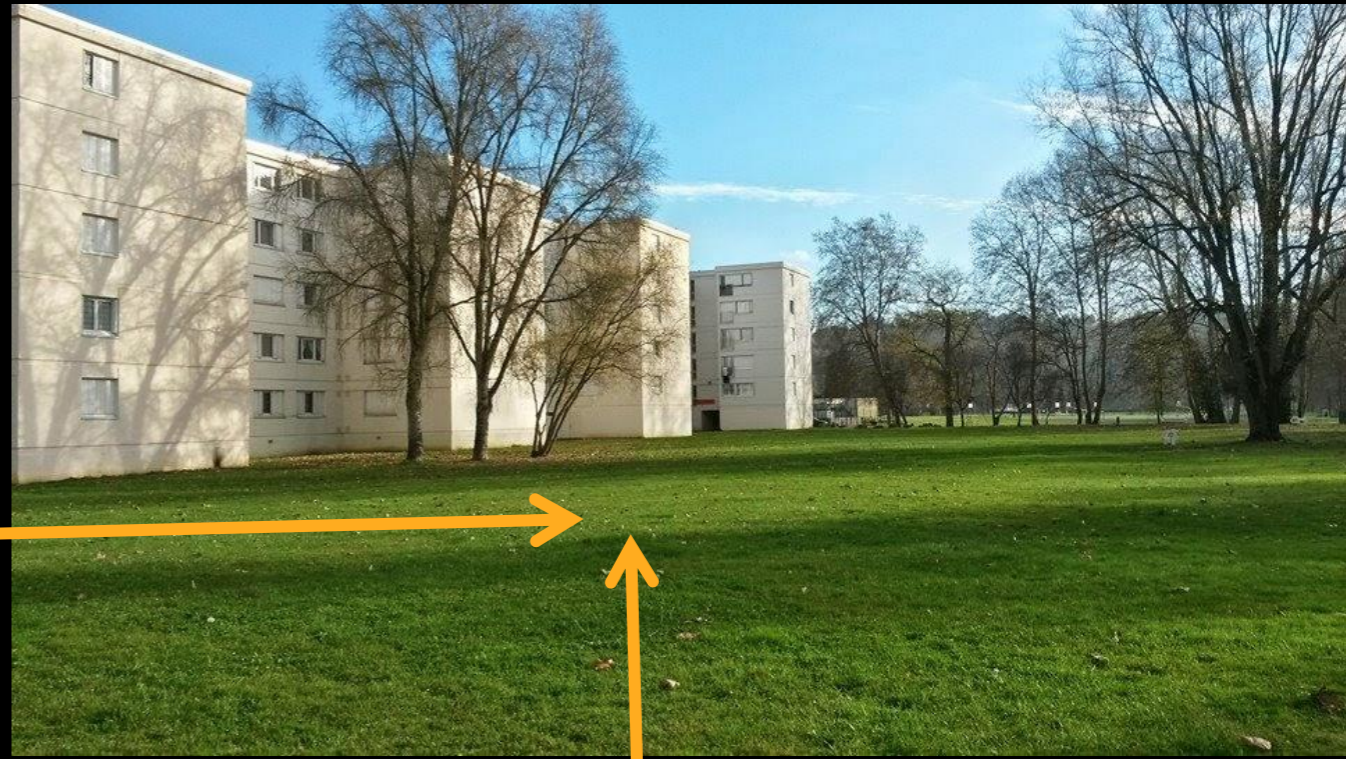
Emmanuel Bozonnet

Enseignant-Chercheur au LaSIE, UMR CNRS 7356, Université de La Rochelle
& IRSTV - FR CNRS 2488

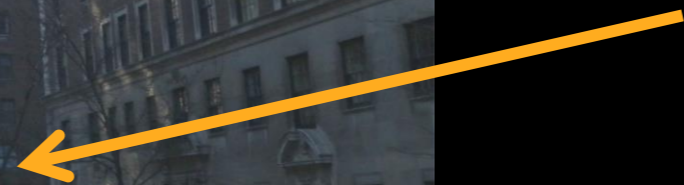




Données météo aéroport ?



Effet des bâtiments environnants ?



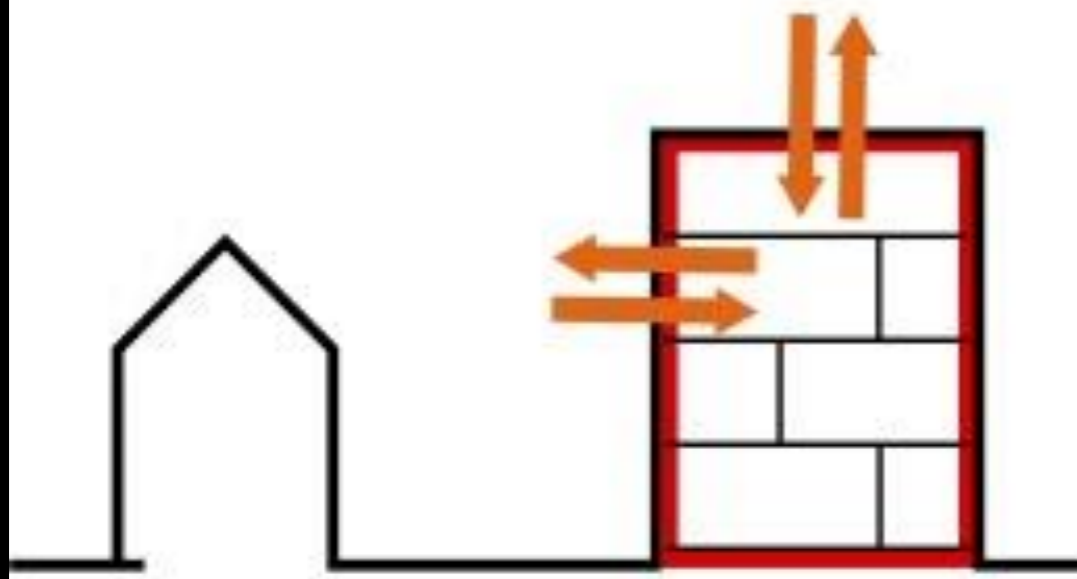
A la croisée de 2 mondes...

Modèle thermique de bâtiment

- Pas de représentation explicite de l'environnement
- Bilan thermique de surface simplifié à l'extérieur du bâtiment
- Centré sur les systèmes de chauffage et de climatisation

Modélisation microclimatique

- Pas de représentation explicite de l'intérieur des bâtiments
- Pas de bilan énergétique des bâtiments
- Flux convectifs forcés ou température intérieure fixée



Source L. Malys

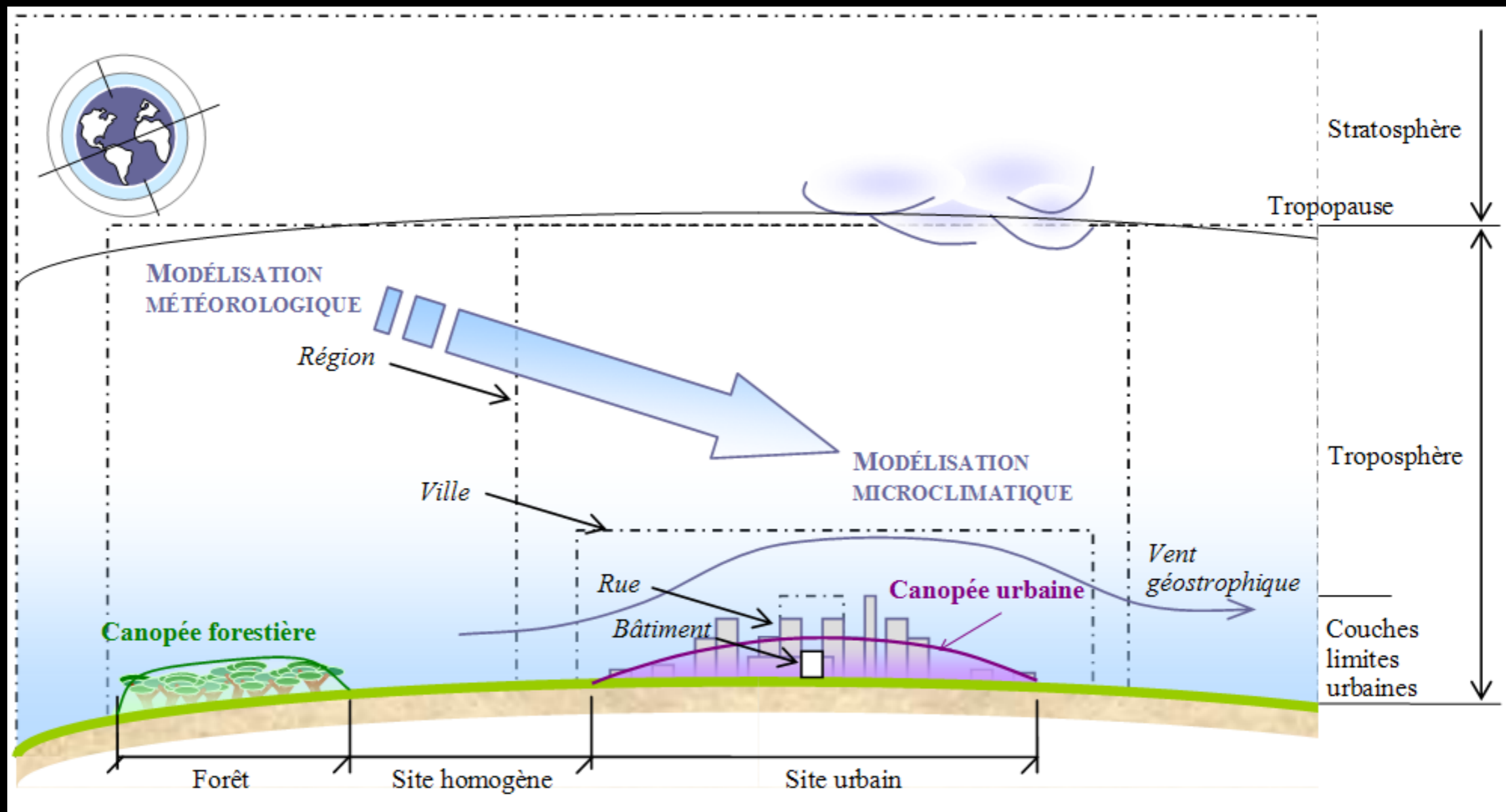
Plan

- 1) Le bâtiment dans son environnement
- 2) Le couplage microclimat-bâtiment à l'échelle de l'îlot
- 3) L'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments à l'échelle du quartier
- 4) Les bâtiments dans les modèles climatiques urbains

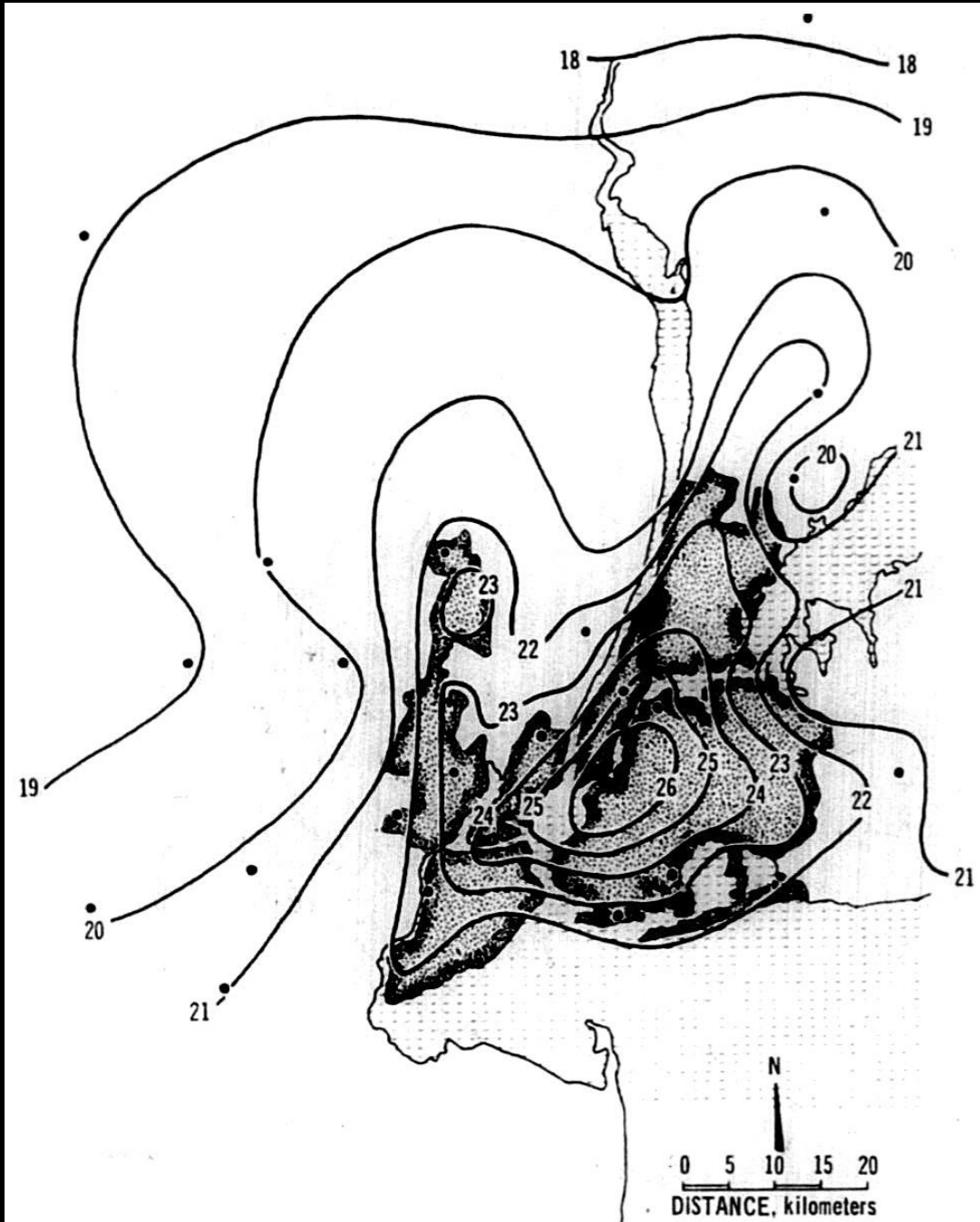
Le panorama sera fait à partir d'exemples pour chaque échelle

1). Le bâtiment dans son environnement

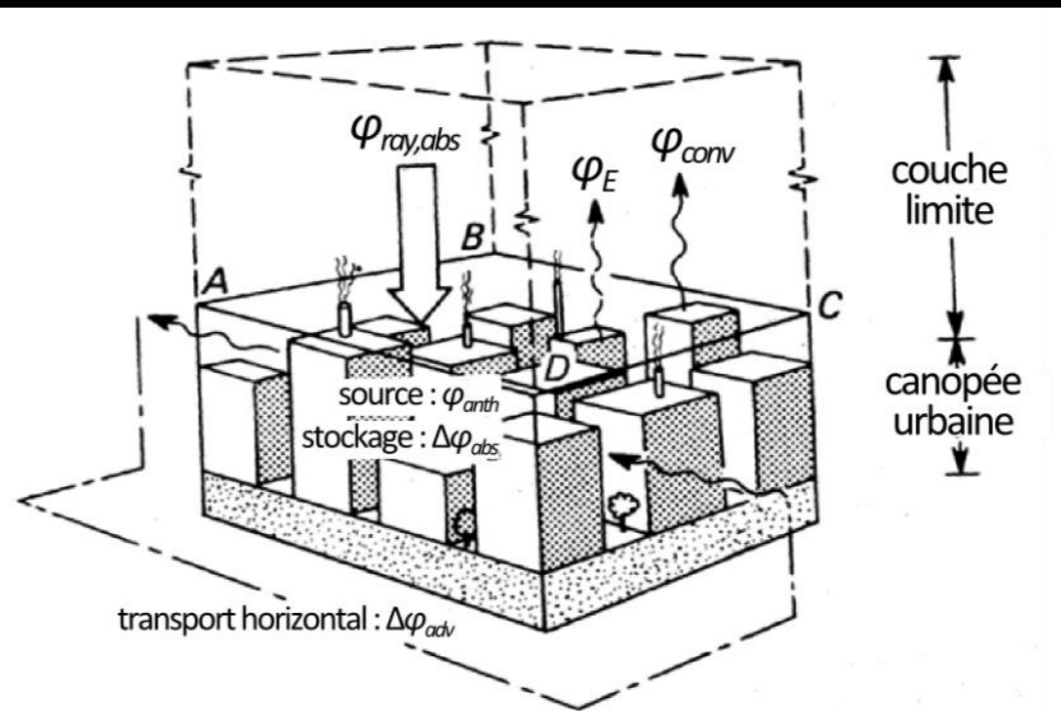
L'îlot de chaleur urbain comme biais de mesure du climat



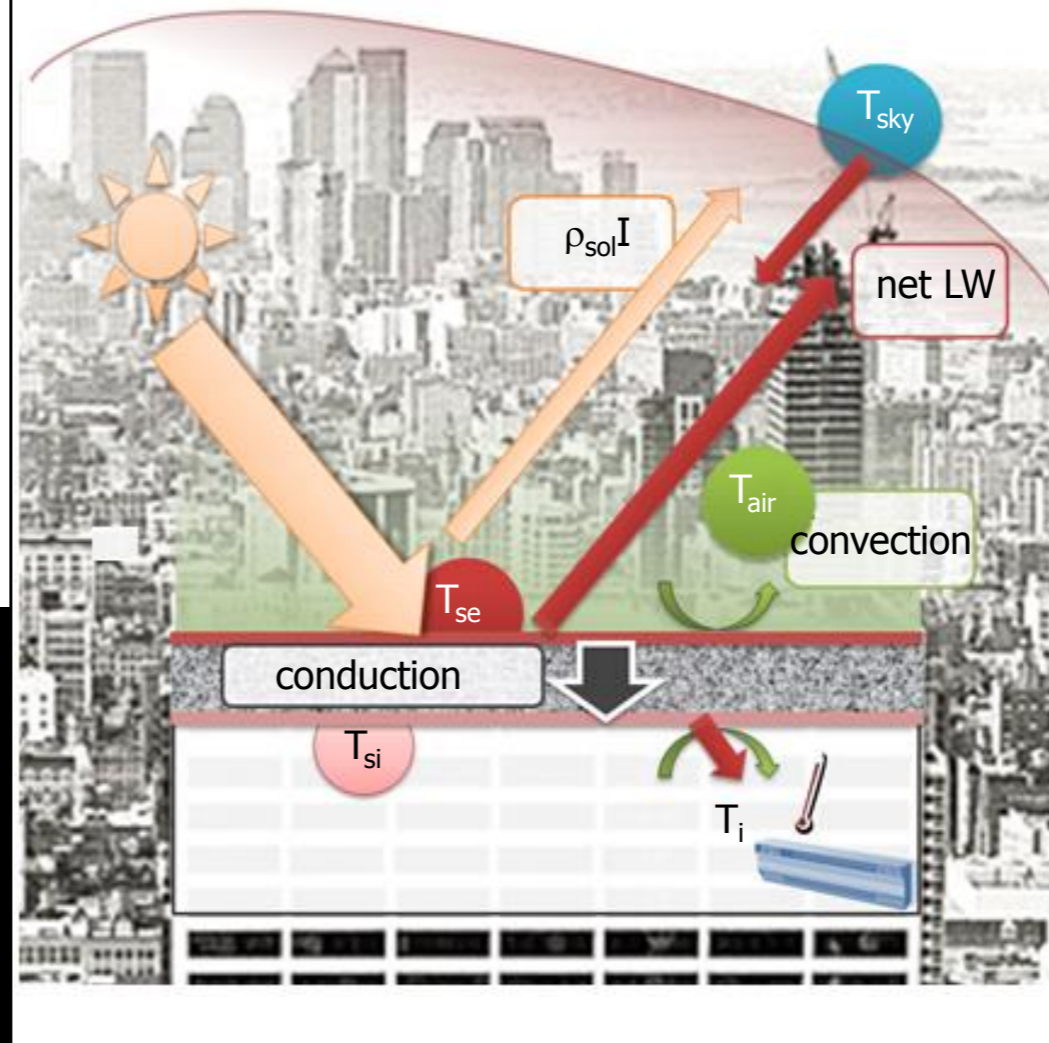
Le bâtiment dans son environnement



Mesure de l'ICU – N.Y. juin 1955
(Clarke 1972)



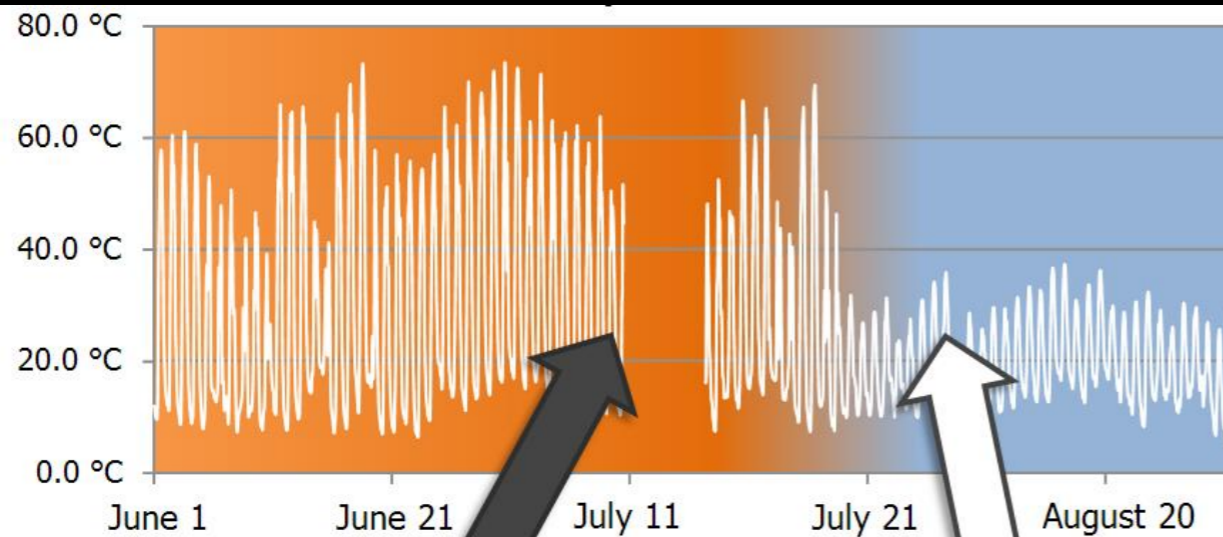
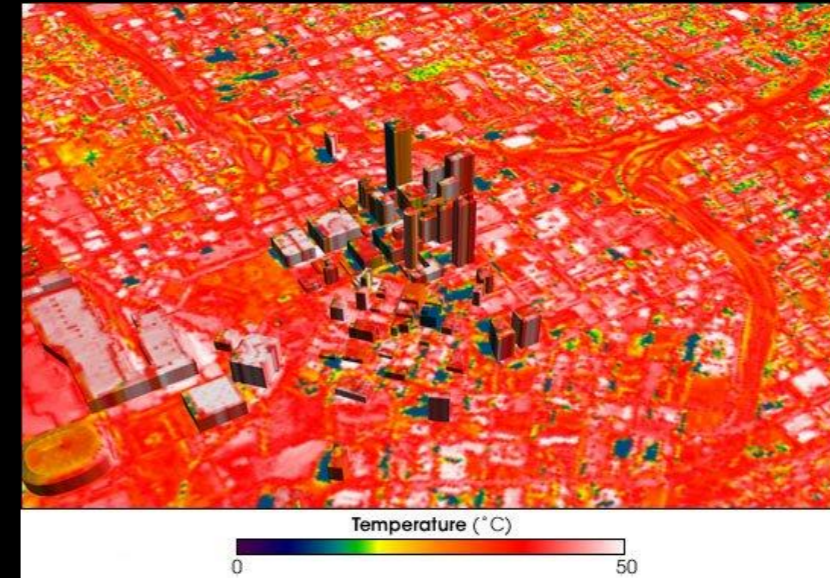
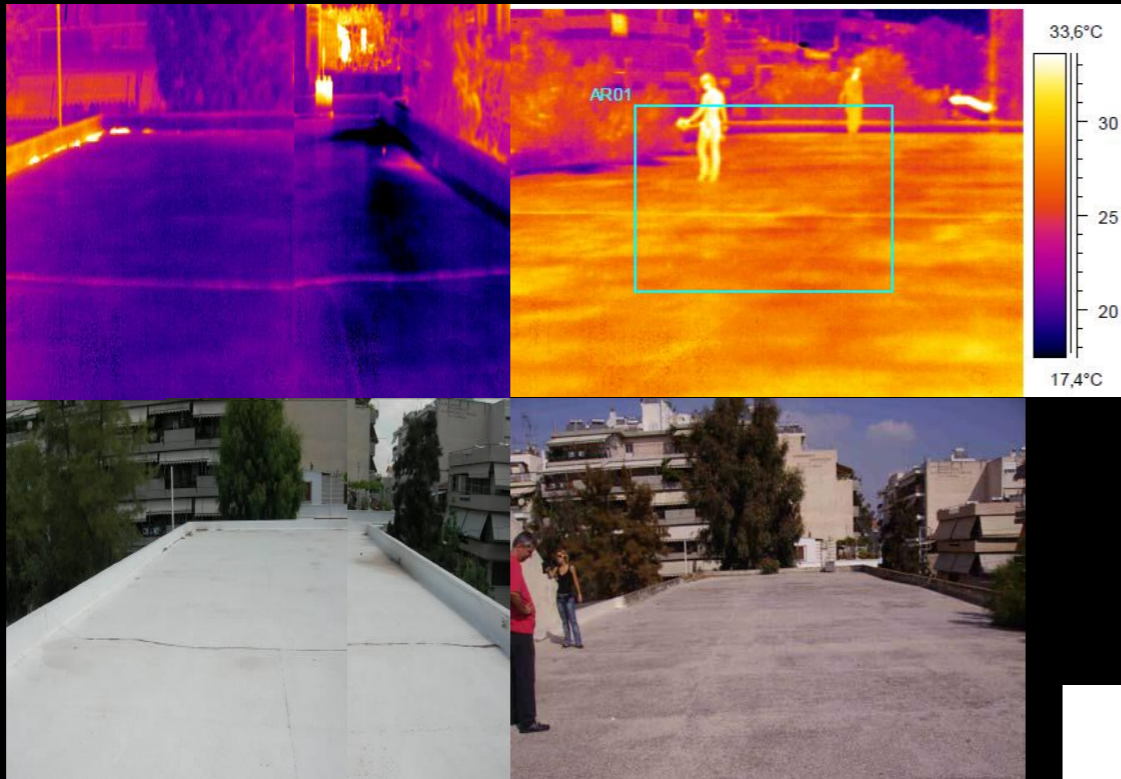
Bilan énergétique
d'un fragment
urbain



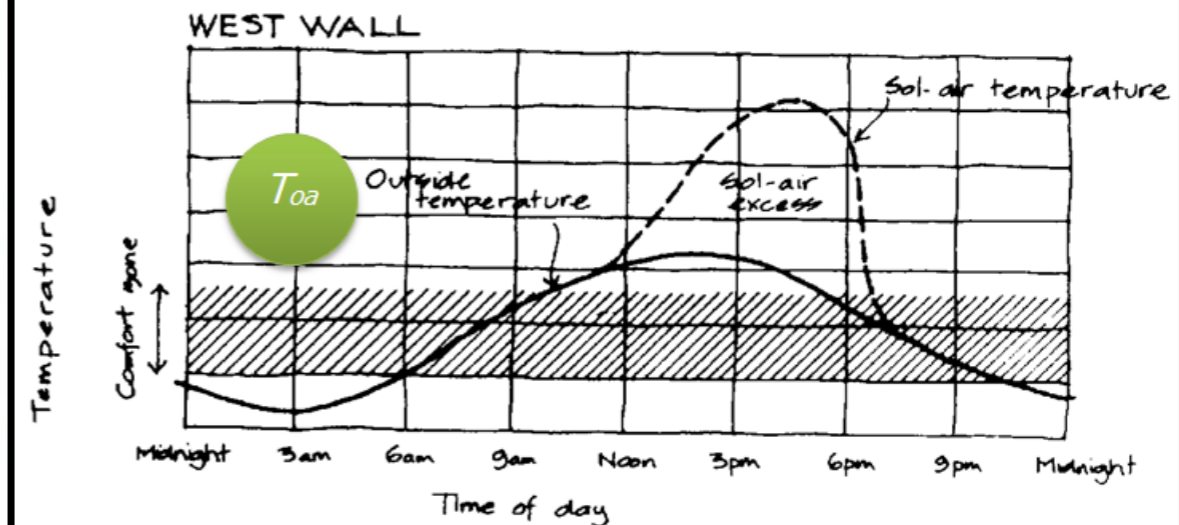
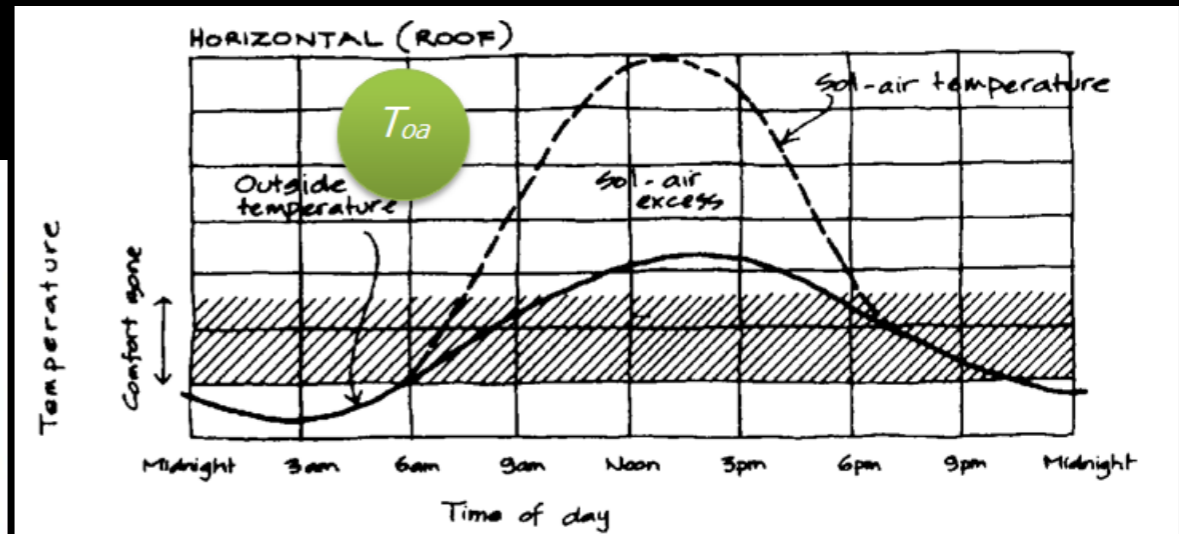
Bilan énergétique
de l'enveloppe du
bâtiment

Le bâtiment dans son environnement

Les effets directs de l'enveloppe bâtie sur l'environnement urbain et intérieur



Building in Poitiers (France)



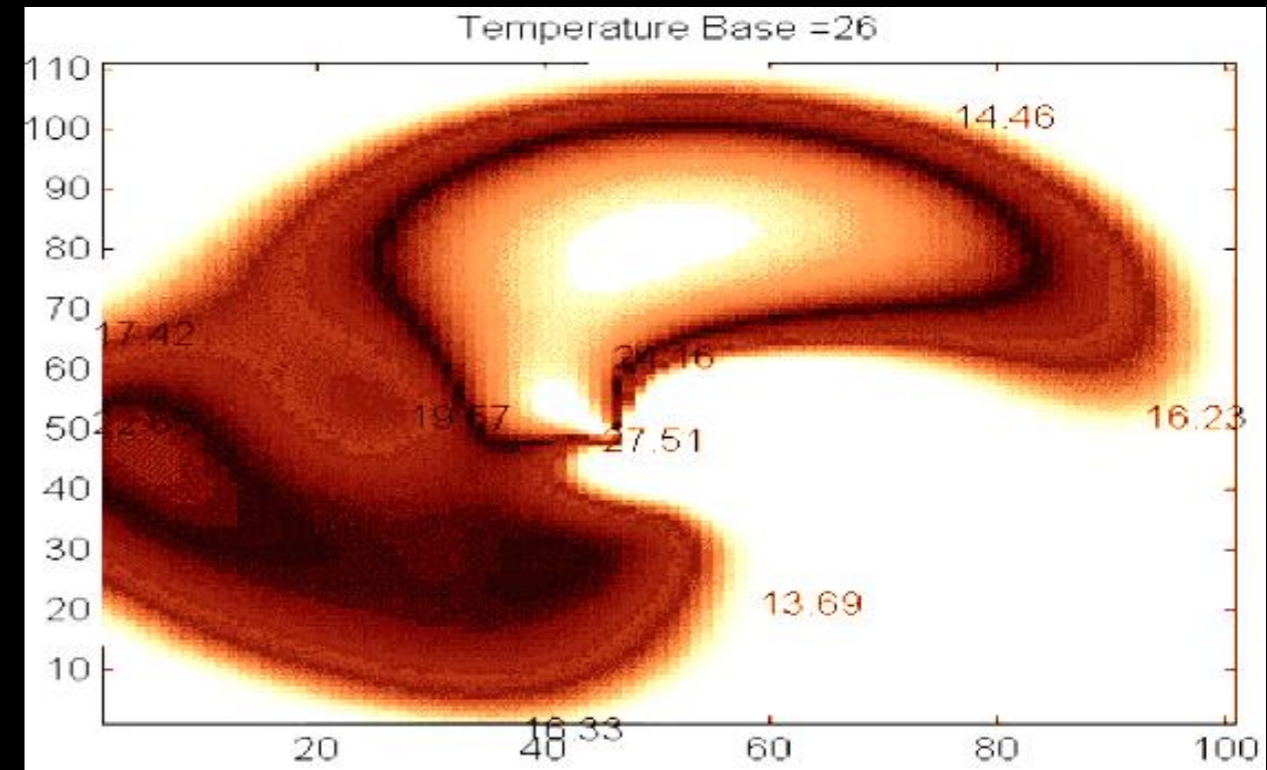
Le bâtiment dans son environnement

Les effets indirects de l'environnement urbain sur le bâtiment et ses systèmes

- La demande de climatisation peut être doublée
 - Le COP des système de clim est diminué (-25 % à Athènes)
- augmentation de la puissance nécessaire (2 à 4 % pour une augmentation de 1C)



Répartition de la charge de refroidissement dans la ville d'Athènes, pour une température de consigne de 27° C et août 1996. Les valeurs sont en kWh/m2

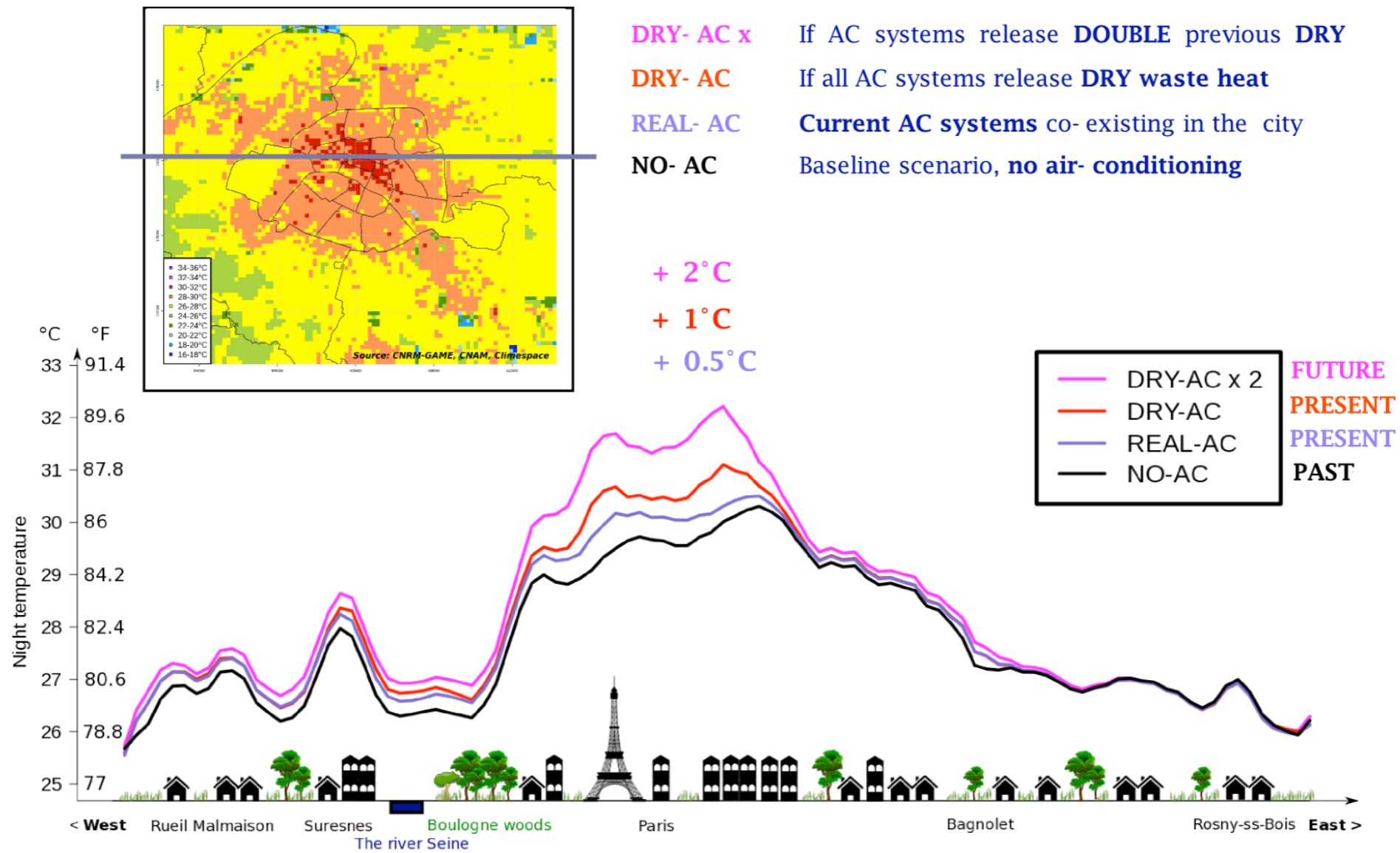


Variation spatiale du pic de refroidissement des bâtiments à Athènes en août 1996 avec une température de consigne 26° C. Les valeurs sont en kW.

Le bâtiment dans son environnement

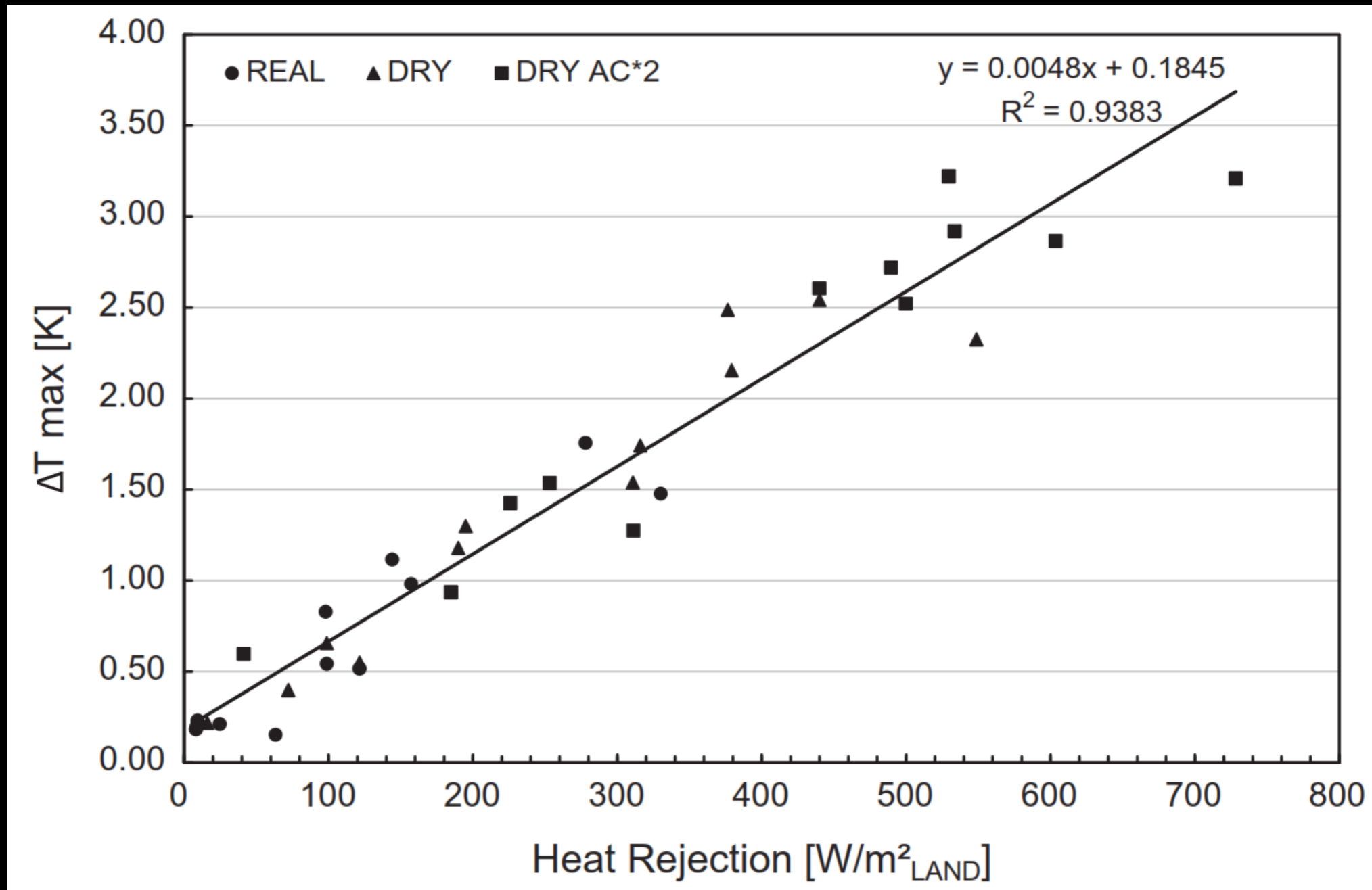
Les effets indirects de l'environnement urbain sur le bâtiment et ses systèmes

différent scénario de climatisation



Le bâtiment dans son environnement

Contribution du bâtiment à la part anthropique de l'ICU

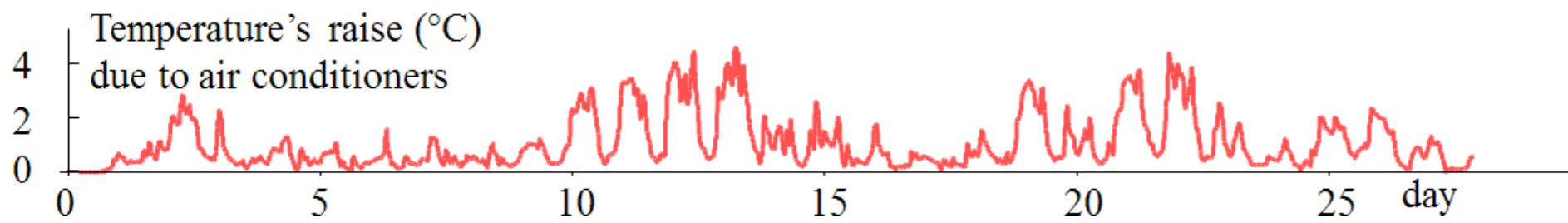
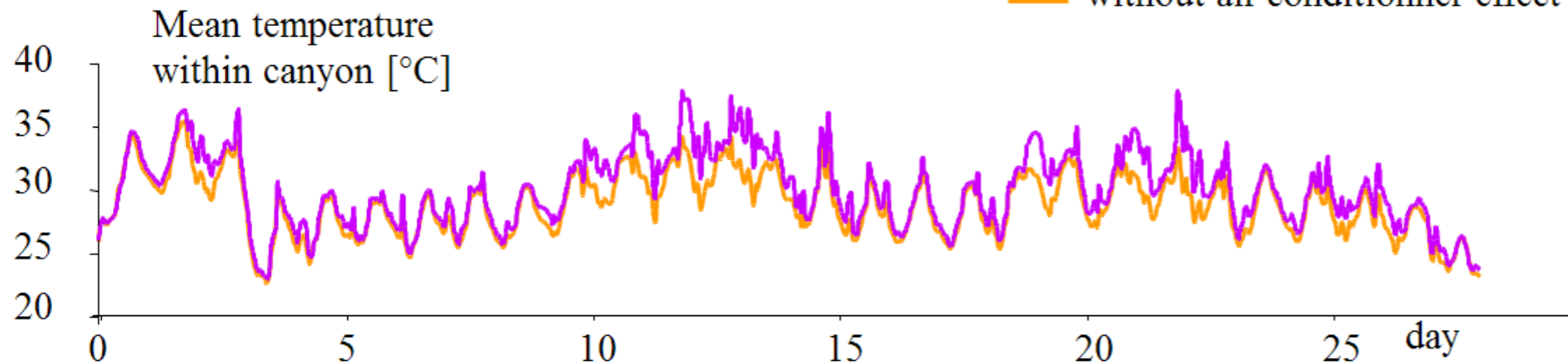
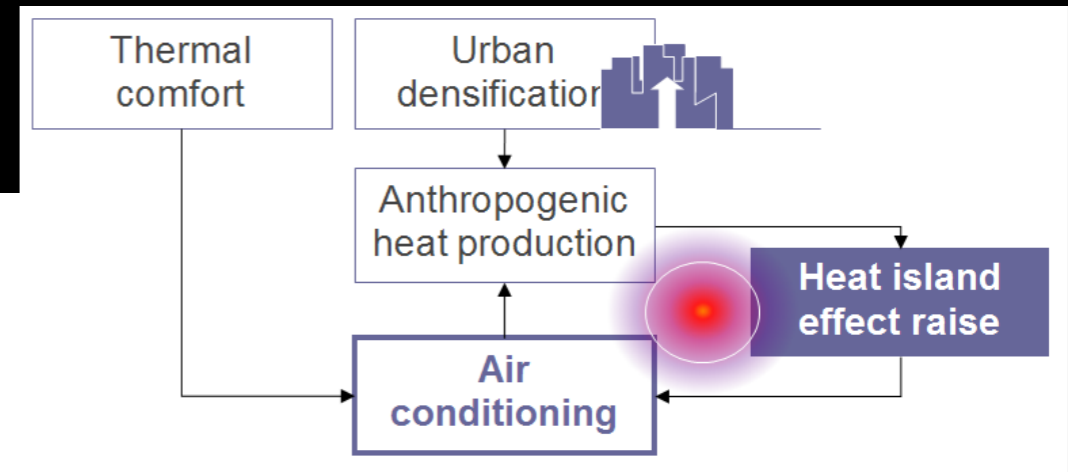
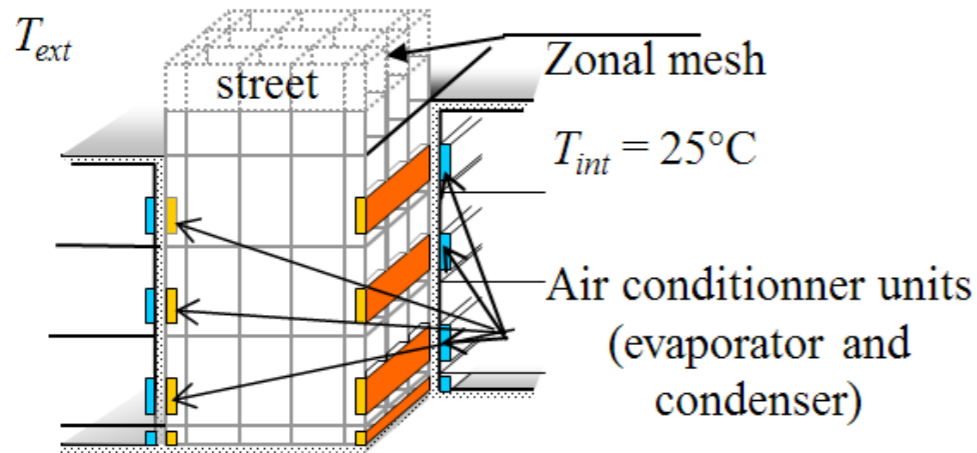


Source: Tremeac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., et al. (2012). "Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures" *Applied Energy* 95, 102–110.

Le bâtiment dans son environnement

Contribution du bâtiment à la part anthropique de l'ICU

cas d'un canyon urbain – cas d'étude Athènes/mois d'août



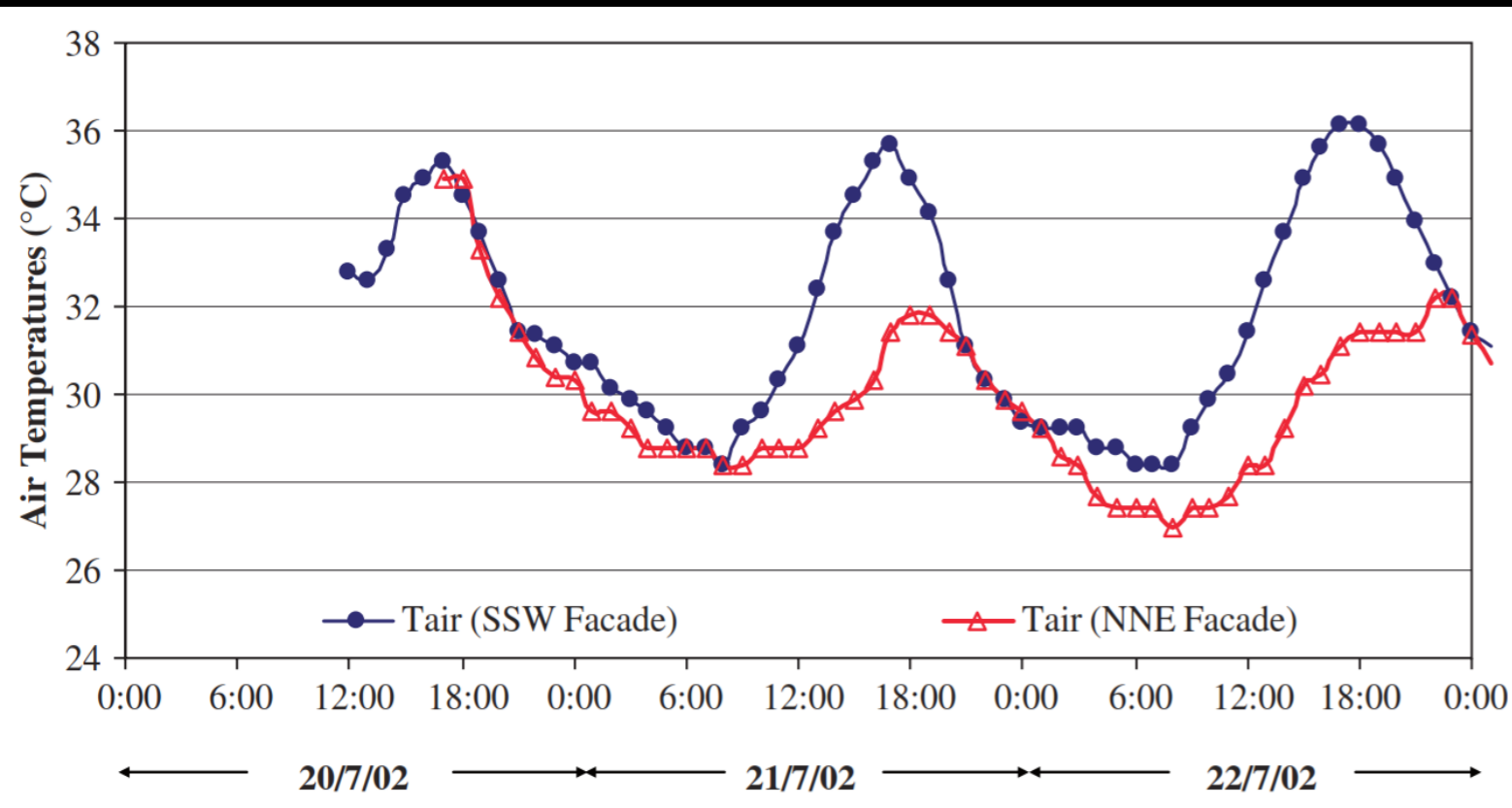
Source: Bozonnet, E., Belarbi, R., and Allard, F. (2007). "Thermal Behaviour of buildings: modelling the impact of urban heat island" *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)* 14, 19–22.

Le bâtiment dans son environnement

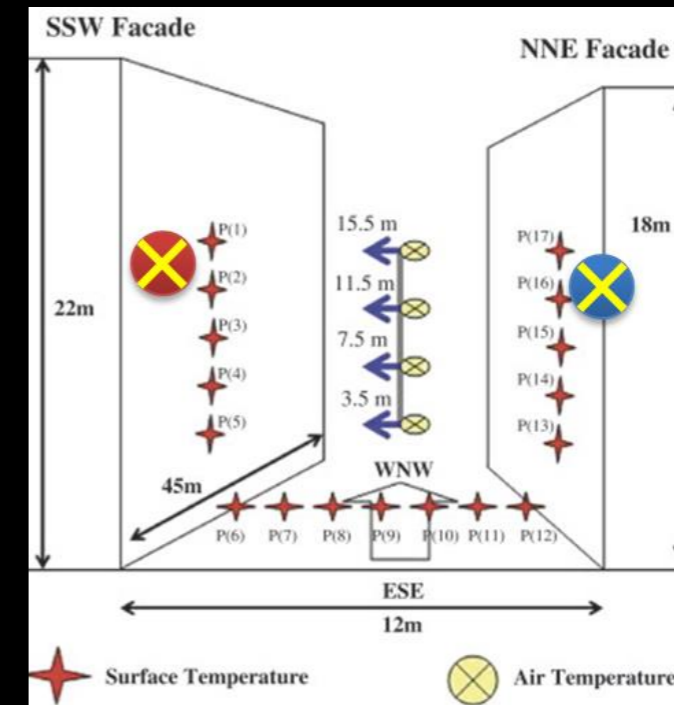
Prise en compte de l'environnement proche dans les STD bâtiments

Confinement thermoaéraulique à l'échelle de la rue canyon

- Inertie thermique des matériaux de construction
- Transferts thermiques par convection
- Piégeage radiatifs (GLO et solaire) – SVF & albédo équivalent



Source: Niachou, K., Livada, I., and Santamouris, M. (2008). "Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions—Part I: Air and surface temperatures" *Building and Environment, Hybrid Ventilation In The Urban Environment* 43, 1383–1392.

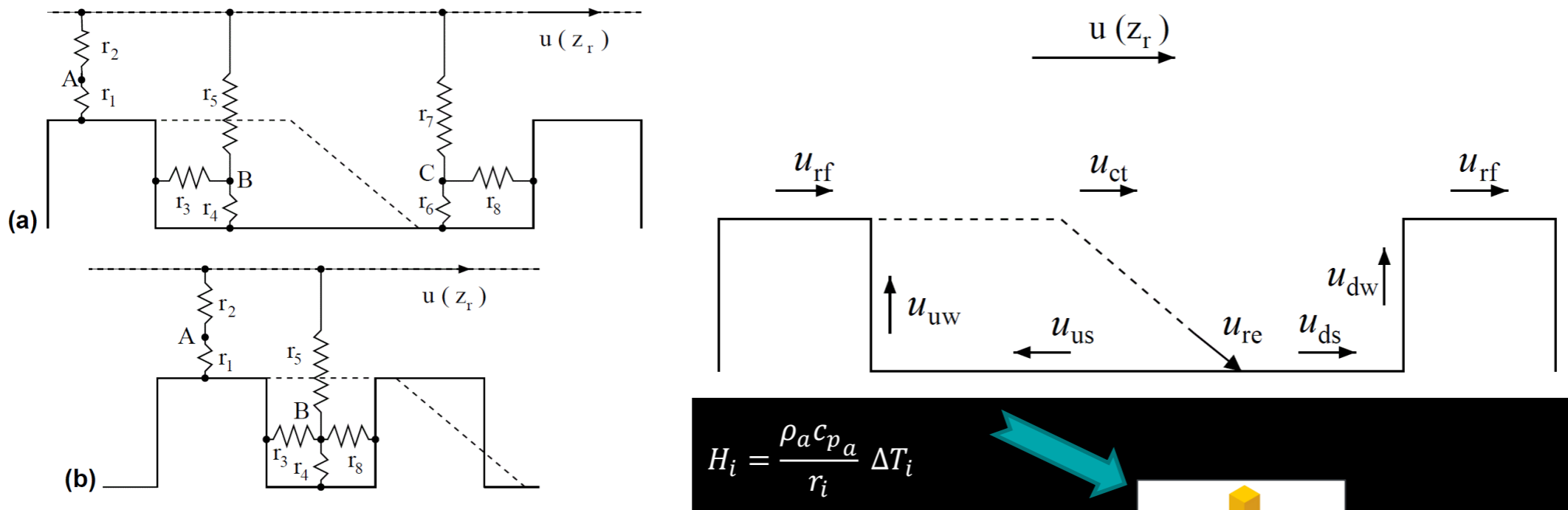


Mesures de températures d'air dans un canyon urbain

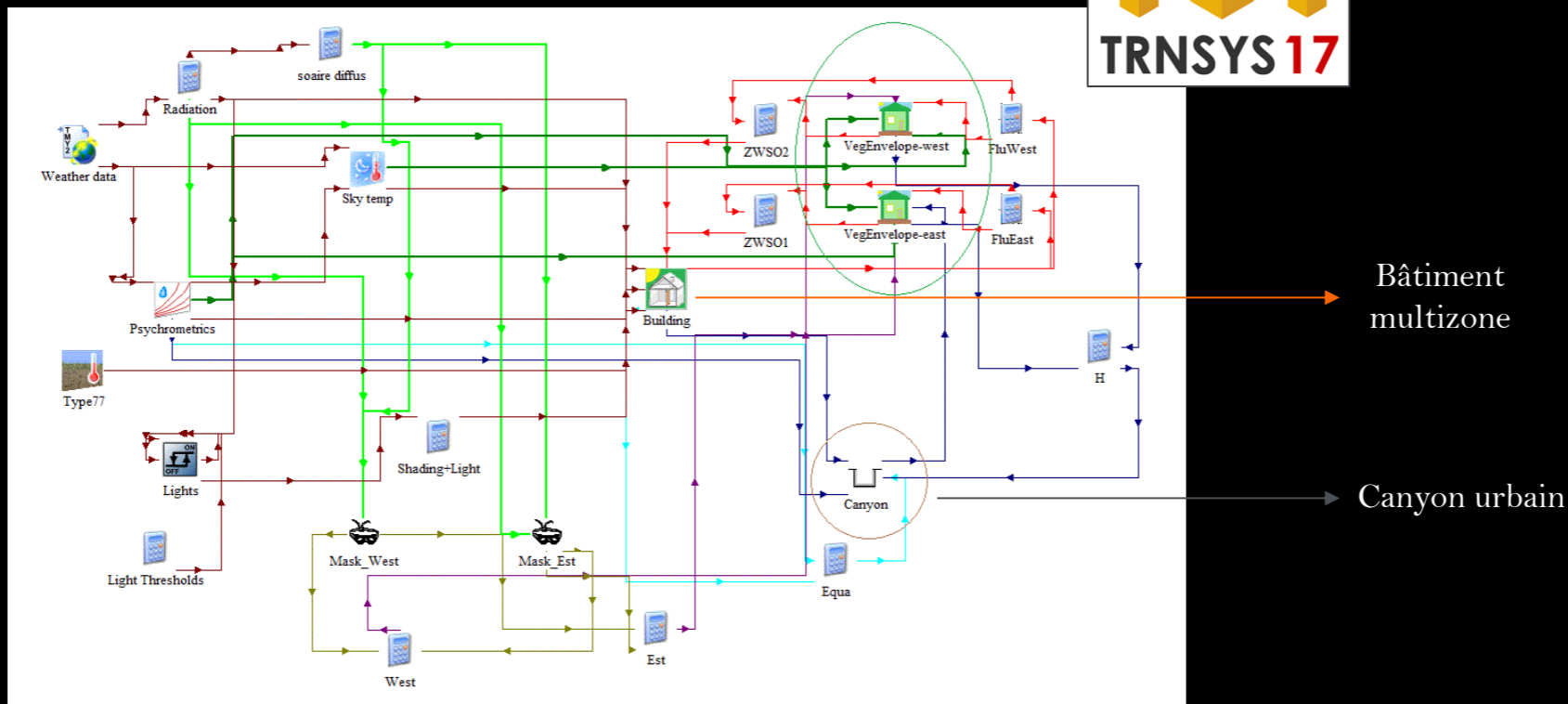
- Pas de variations significative avec la hauteur au centre
- Peu de différences entre l'intérieur et l'extérieur
- Différences les plus importantes entre façades

Le bâtiment dans son environnement

Prise en compte de l'environnement proche dans les STD bâtiments

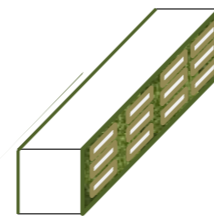
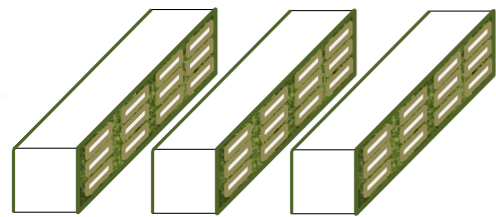
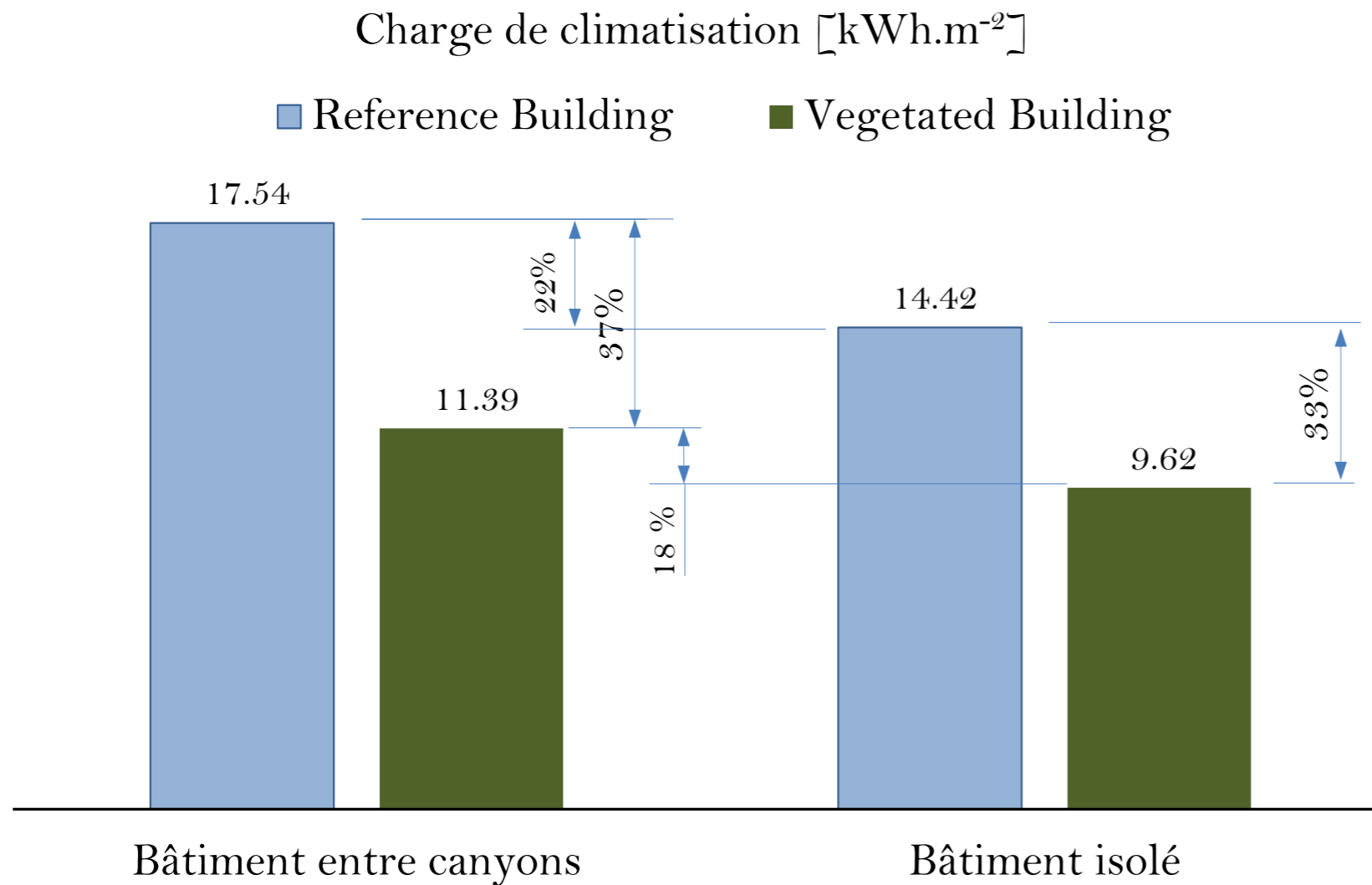


Harman, I.N., Barlow, J.F., Belcher, S.E., 2004. Scalar Fluxes from Urban Street Canyons Part II: Model. Boundary-Layer Meteorology 113, 387–410



Le bâtiment dans son environnement

Prise en compte de l'environnement proche dans les STD bâtiments



Bâtiment à 3 étages à structure légère

- Murs en parpaing creux de 12 cm
- Planchers et toiture en béton de 20 cm
- Les vitrages représentent 20 % de la surface habitable
- **Aucune isolation**

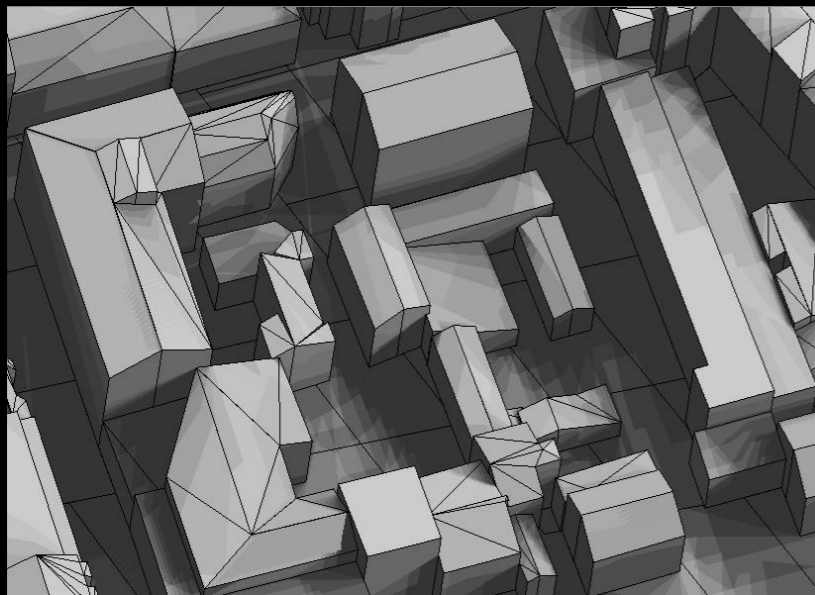
Façades végétales à l'est et à l'ouest

- Épaisseur du substrat : 12 cm
- Teneur en eau : 60%
- Taux de couverture végétale : 100 %
- Indice de surface foliaire : 4

climat **La Rochelle**

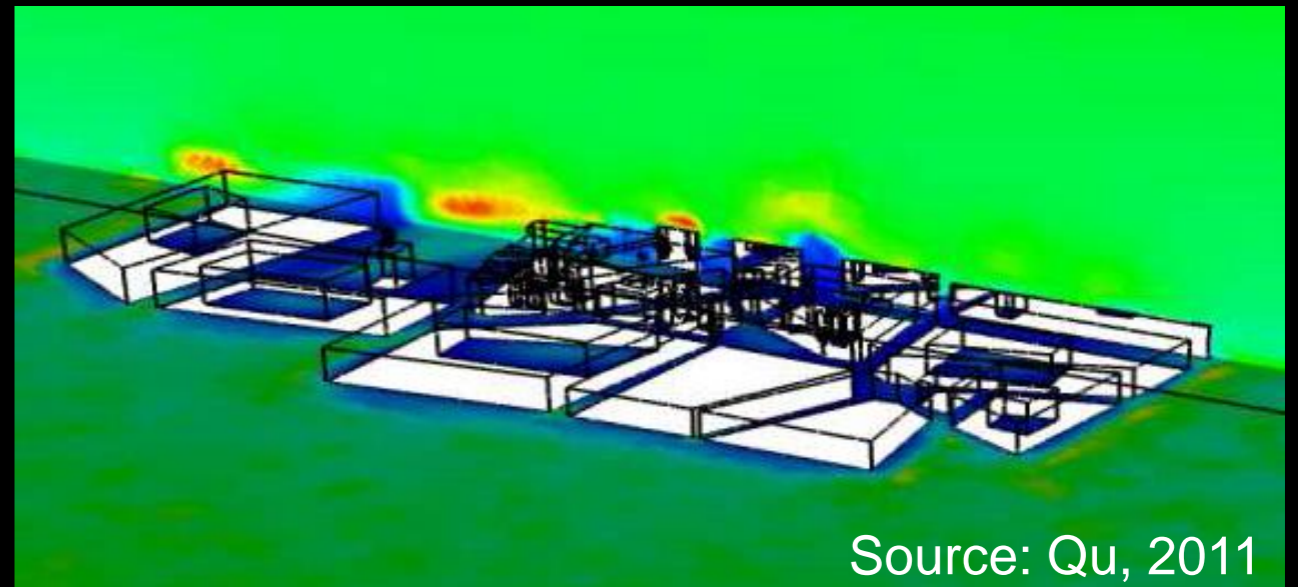
2). Le couplage microclimat-bâtiment à l'échelle de l'îlot

Modèles à base radiative



Solene-microclimat,
DartTEB

Modèles à base aéraulique



Source: Qu, 2011

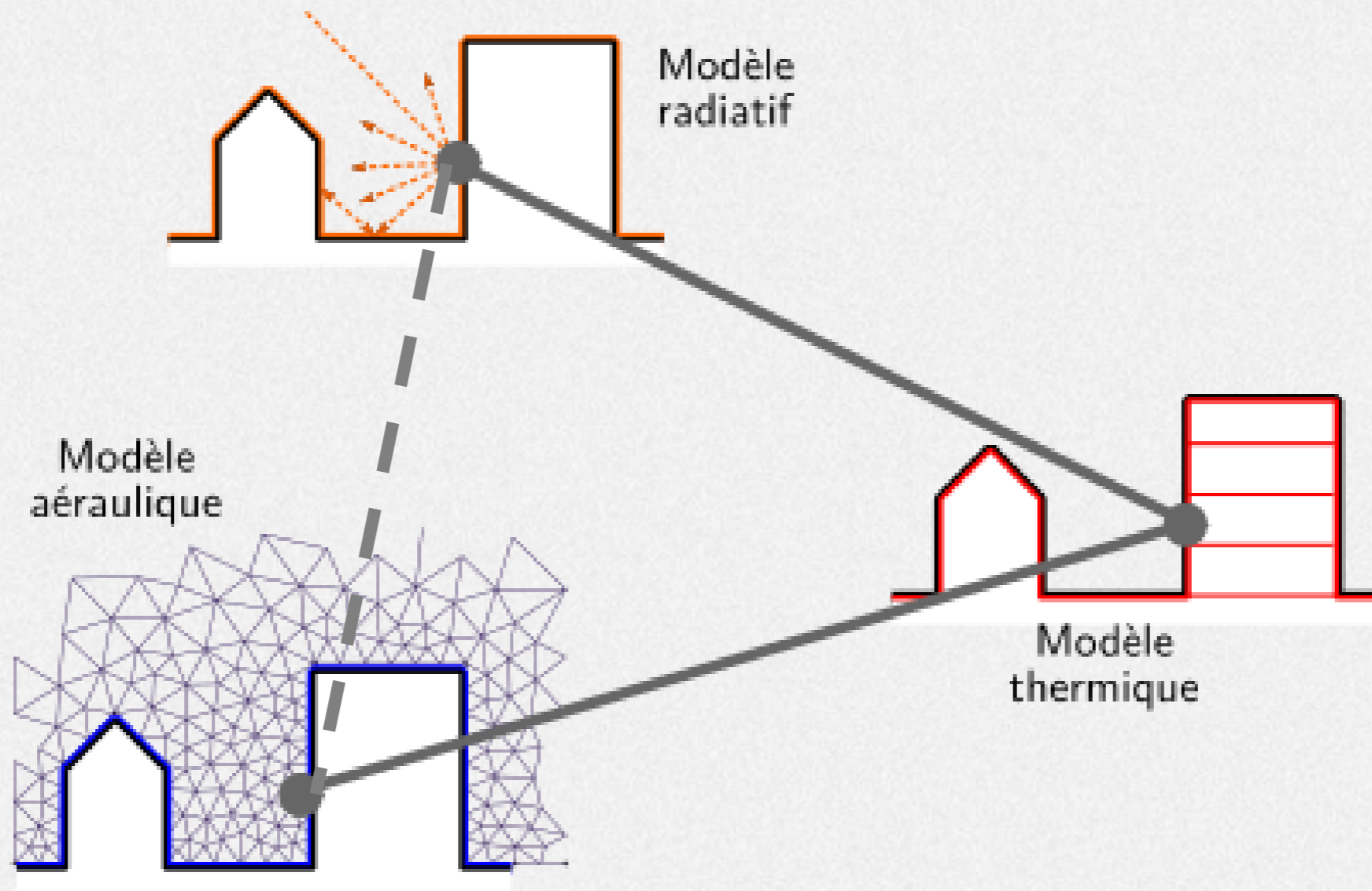
Code Saturne, Envi-met...

Couplage aéraulique, radiatif et thermique

Couplage aérodynamique, radiatif et thermique



- Développement intégré (Envi-met, code-saturne, coupled simulation)
- Couplage d'outils (Solene-microclimat, EnviBatE)



Source: Malys 2012

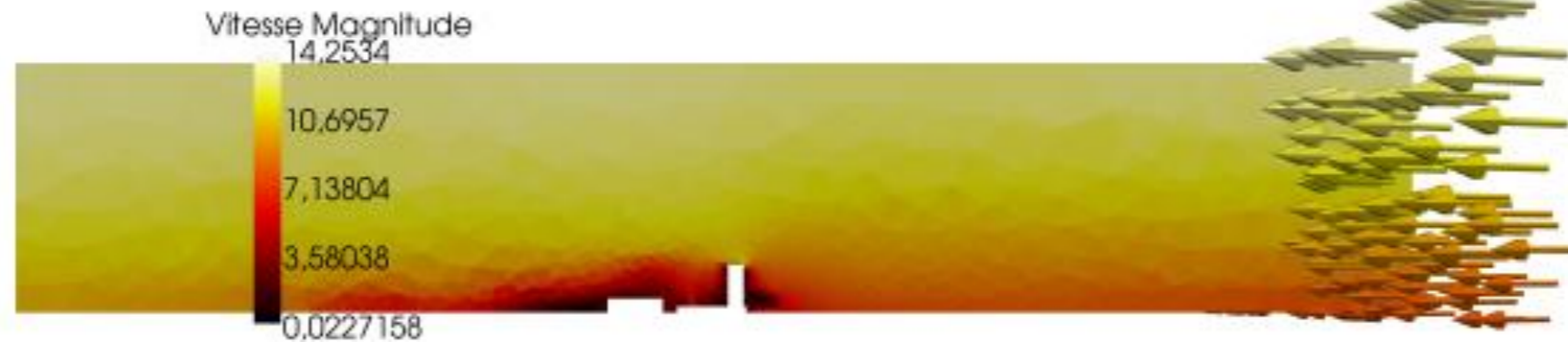
Les approches aérauliques

CFD

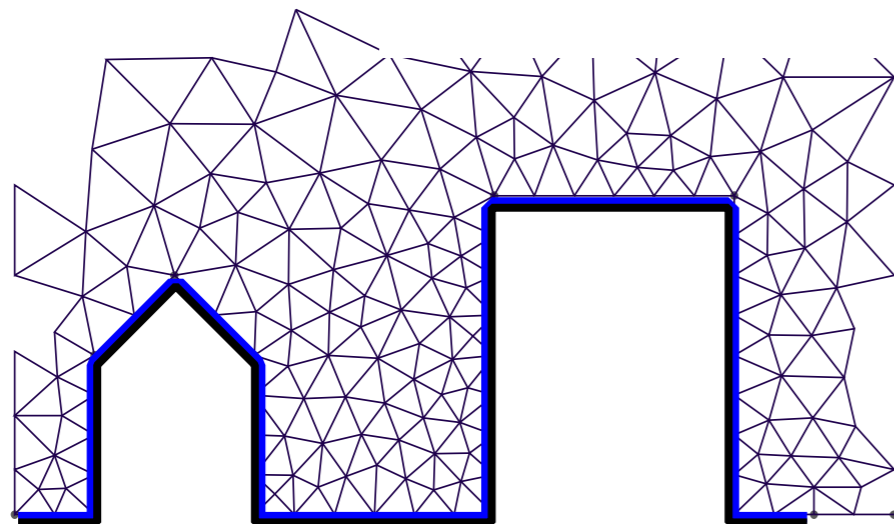
Méthode RANS, modèles k- ϵ

Techniques de tunnel numérique

Solene-microclimat (code Saturne),
Envi-met,
Code-Saturne,
Coupled simulation



Modèle
aéraulique

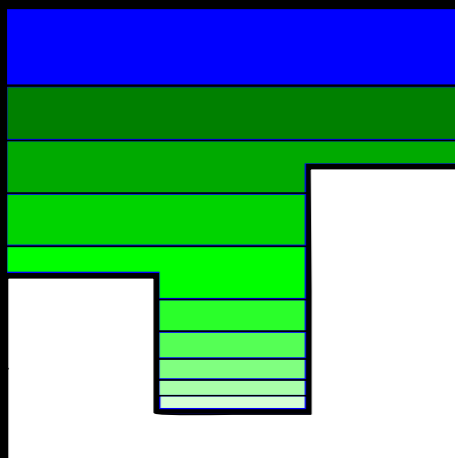


+ Température
+ Humidité
+ Végétation

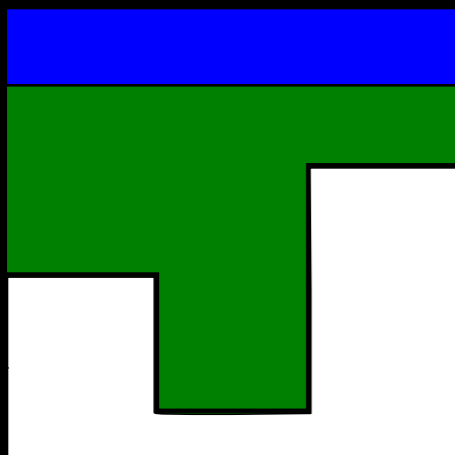
Les approches aérauliques

Approche monozone

Option Solene- microclimat



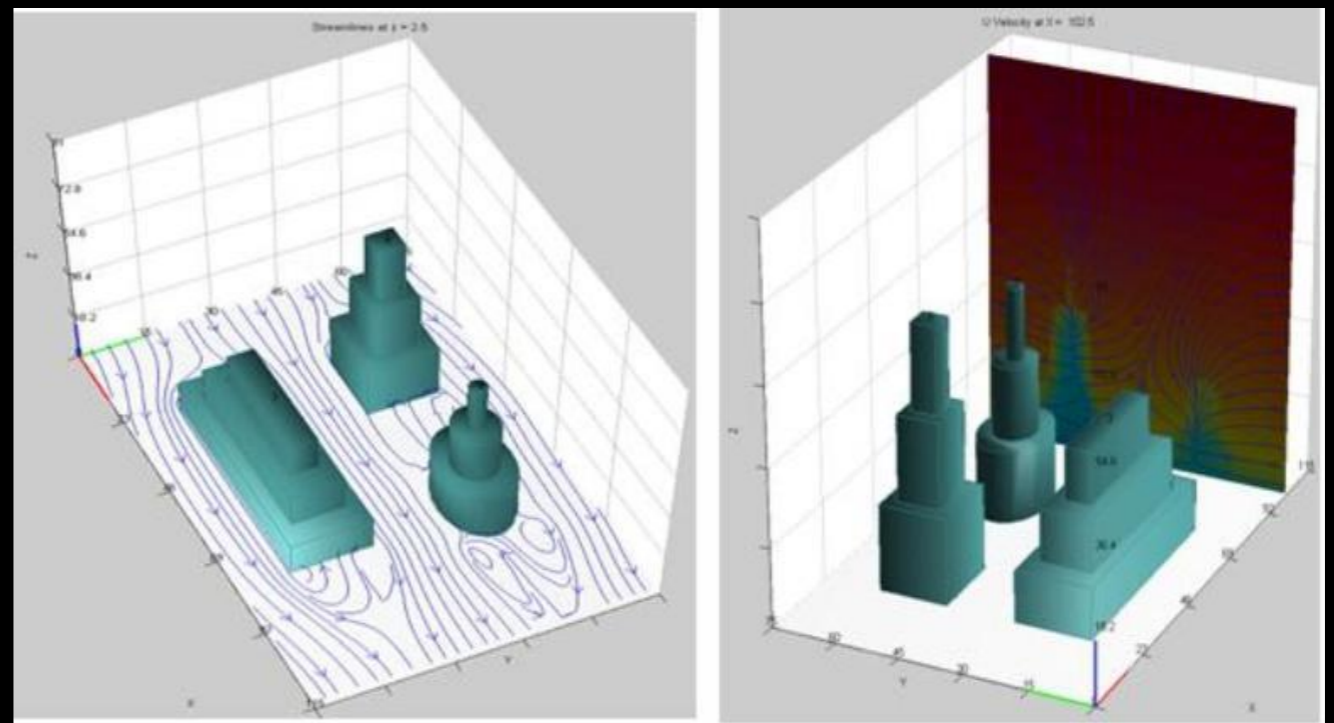
Profil de vitesse



Bilan de flux
Pour le calcul de
la température

Approche zonale

EnviBatE



Quic-Urb

(<http://www.lanl.gov/projects/quic/quicurb.shtml>)

Les approches radiatives

Discrete Ordinates Method

Code-Saturne

Atténuation + 1 réflexion

EnviMet

Méthode des radiosités
(et méthodes simplifiées)

Solene-microclimat
EnviBatE

Lancer de rayons

Coupled simulation

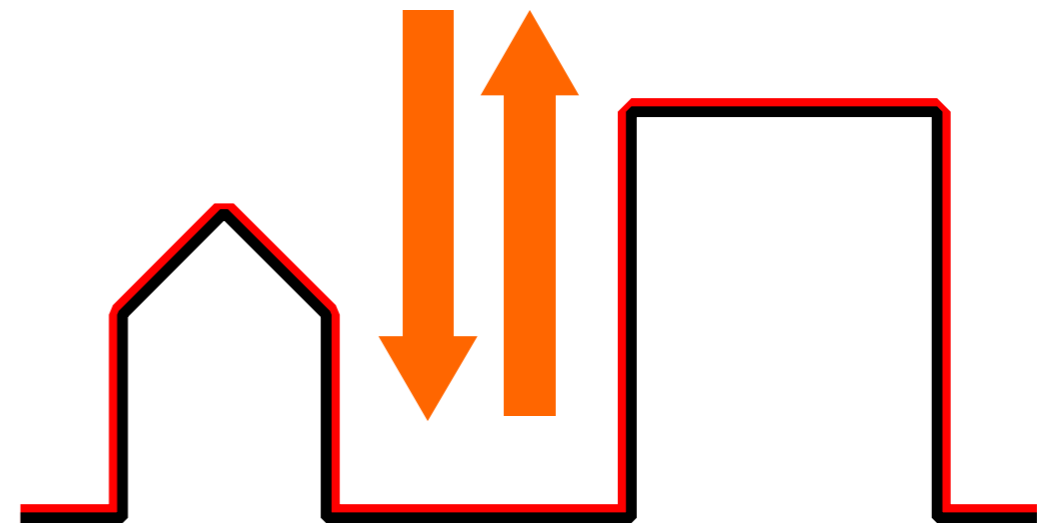
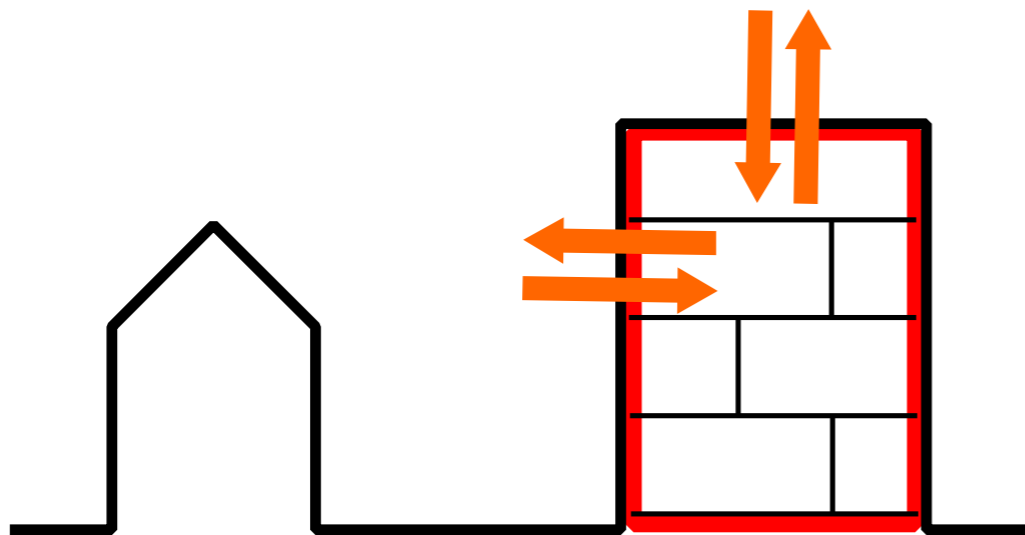
Les approches thermiques

Bilan thermique du bâtiment

- Multizone (par étage)
- Monozone

Modèles thermiques de parois

- Analogies électriques
- Différences finies
- Transformée en Z
- ...



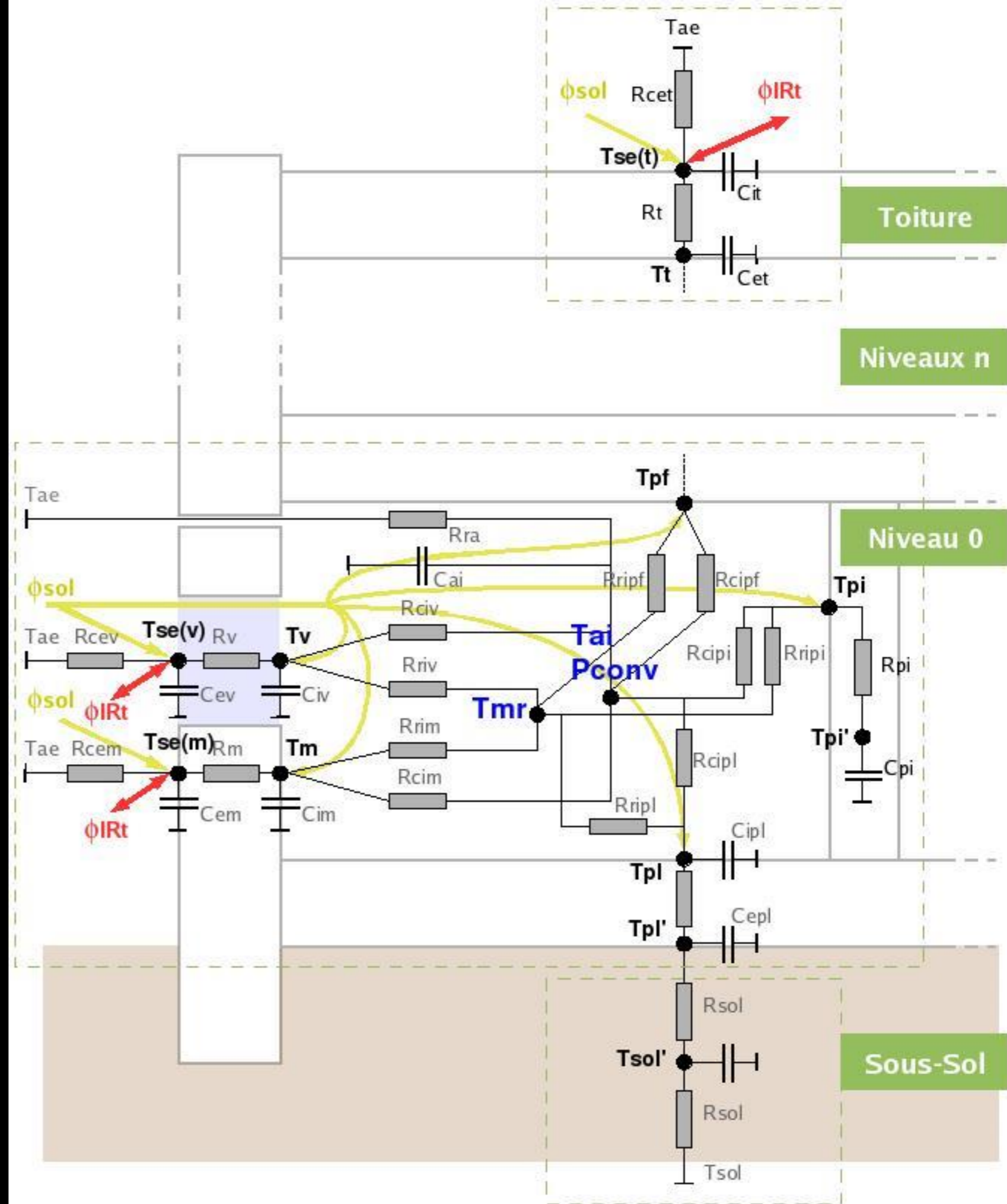
Source : L. Malys

Solene-microclimat

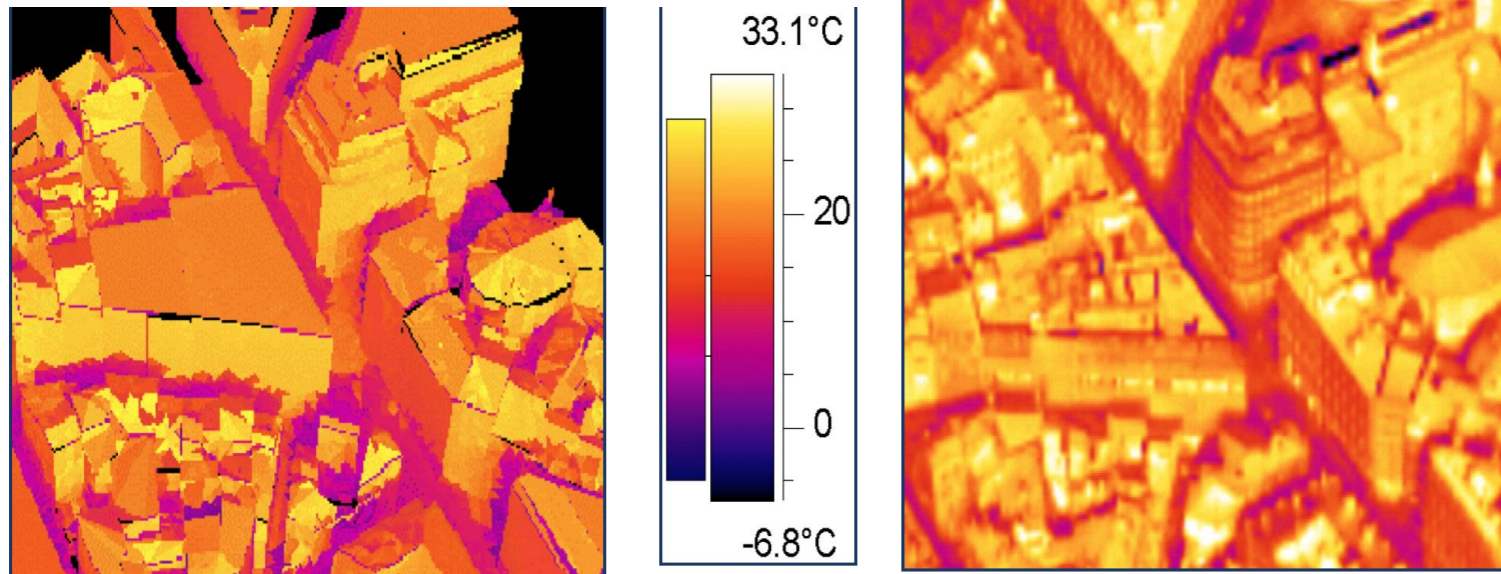
EnvibatE, Coupled Simulation

Envi-met, Code_saturne

Exemple Solene- microclimat

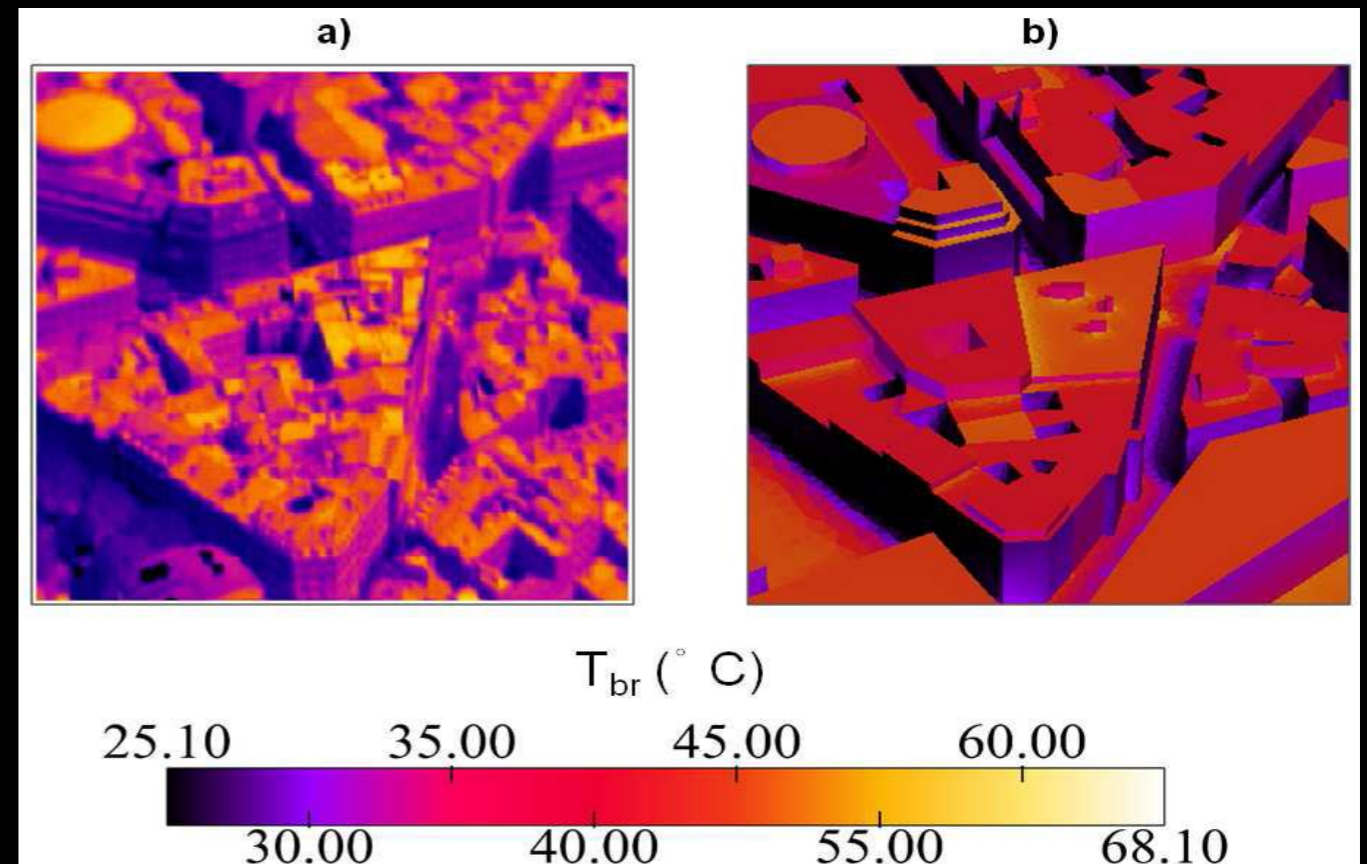


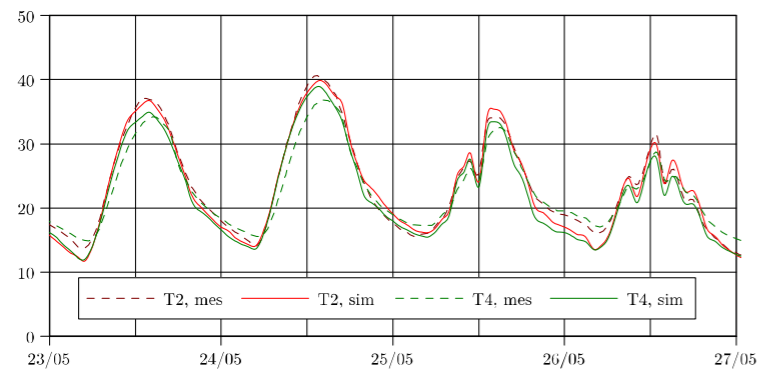
Validation des modèles (rayonnement et thermique de parois) : Campagne Capitoul



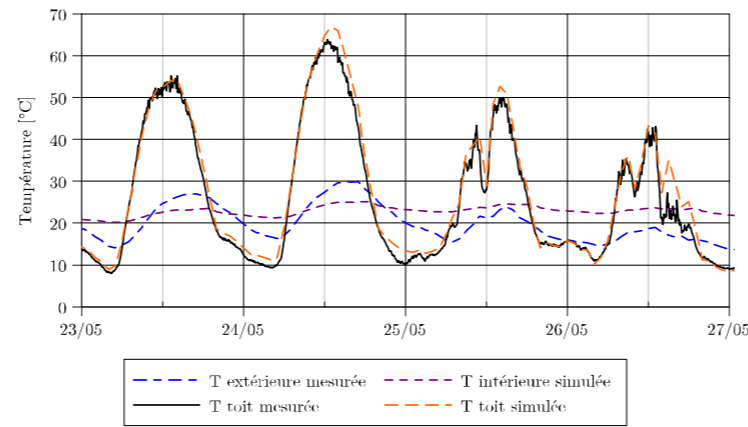
Comparaison avec la mesure de la caméra aéroportée,
Source : A. Hénon, 2008.
SOLENE

Comparaison avec la mesure de la caméra aéroportée,
Source : Y. Qu, 2011
Code_saturne

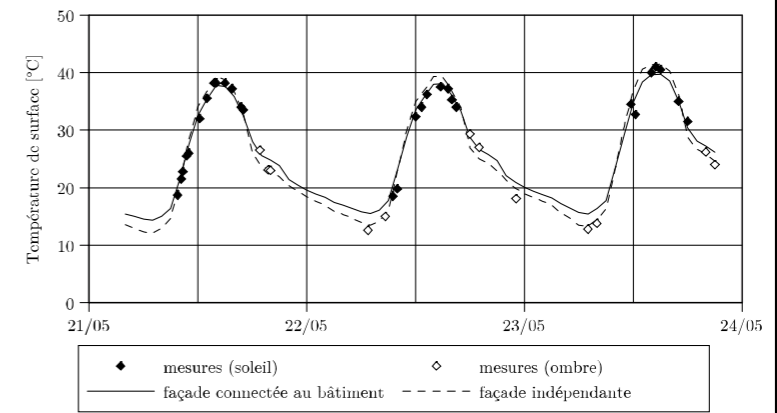




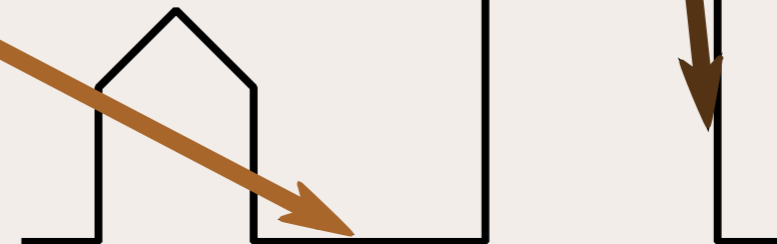
Modèle de sol



Modèle de toit

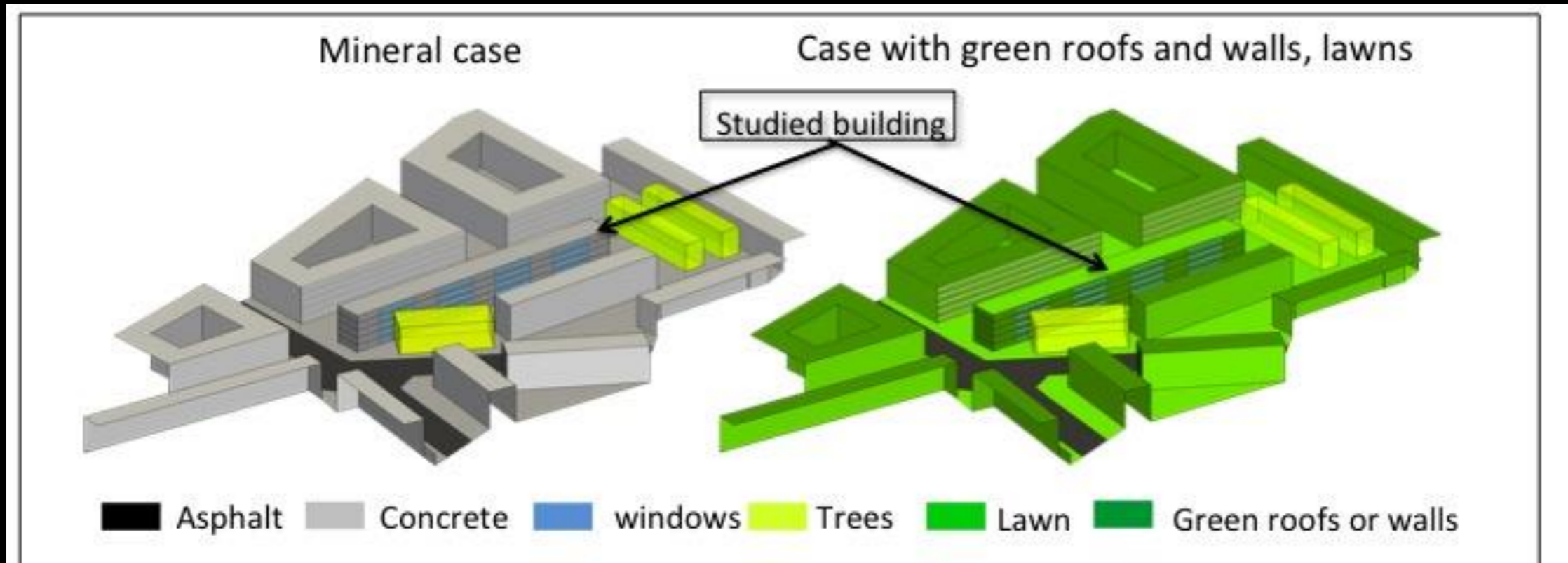


Modèle de façade

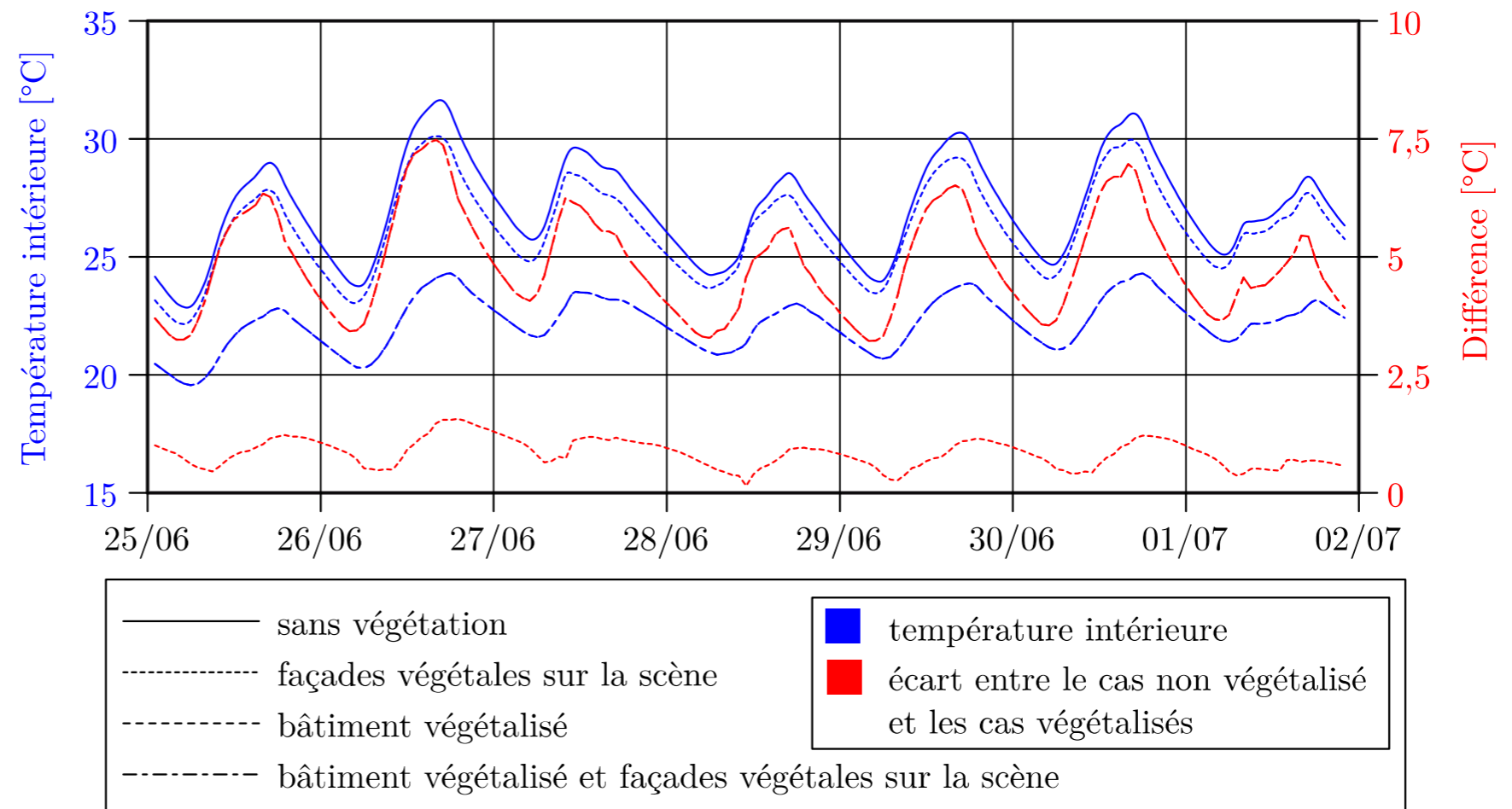


Solene-microclimat- Comparaison avec les mesures de FLUXSAP 2010 (Nantes) Source : L. Malys

Application : évaluation des impacts de la végétation



SOLENE-microclimat
 Température au 2^{ème}
 étage du bâtiment en
 fonction de
 l'environnement



3). L'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments à l'échelle du quartier

Outils basés sur différents types de modélisation thermique du quartier

- Modèles thermoradiatifs et solaires
 - DART ,SOLENE, SOLWEIG, ...
 - Paramétrisation pour les phénomènes non modélisés
 - Potentiel solaire, confort thermique, températures radiantes, ...
- Modèles couplés avec l'aéraulique à l'échelle du quartier
 - ENVI-met, SOLENE-microclimat, EnviBatE, ...
 - Couplage des bilans entre la canopée urbaine et les surfaces urbaines (bilans radiatifs et inertie), ainsi que la prise en compte des flux latents.

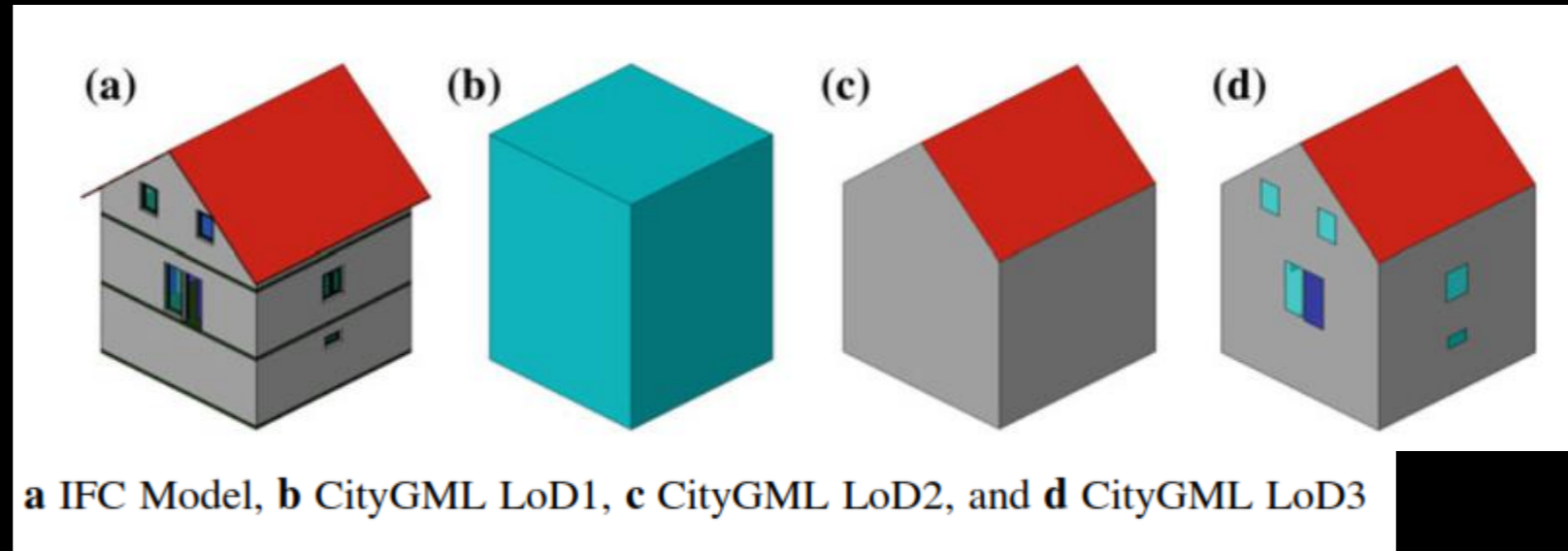
Prise en compte couplée du besoin énergétique ou/et du confort intérieur des bâtiments du quartier plus ou moins complète...

Ex : CitySim avec prise en compte du comportement des occupants

L'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments à l'échelle du quartier

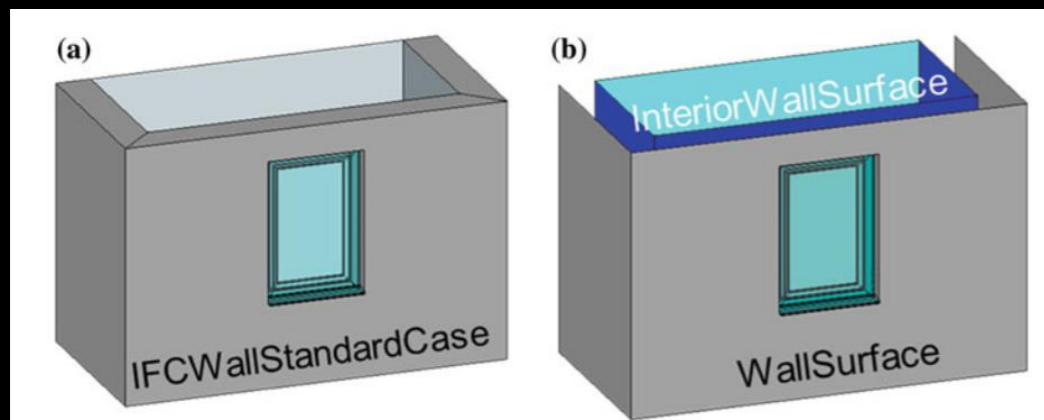
Problématique du niveau de description

Gestion des données d'entrée



CityGML :

- **LOD1** : bâtiment représenté sous forme de boîte, surface au sol et hauteur issues du cadastre ;
- **LOD2** : enveloppe extérieure est représentative du bâtiment réel
- **LOD3** : enveloppe extérieure détaillée
- **LOD4** : description de l'intérieur du bâtiment ajoutée.

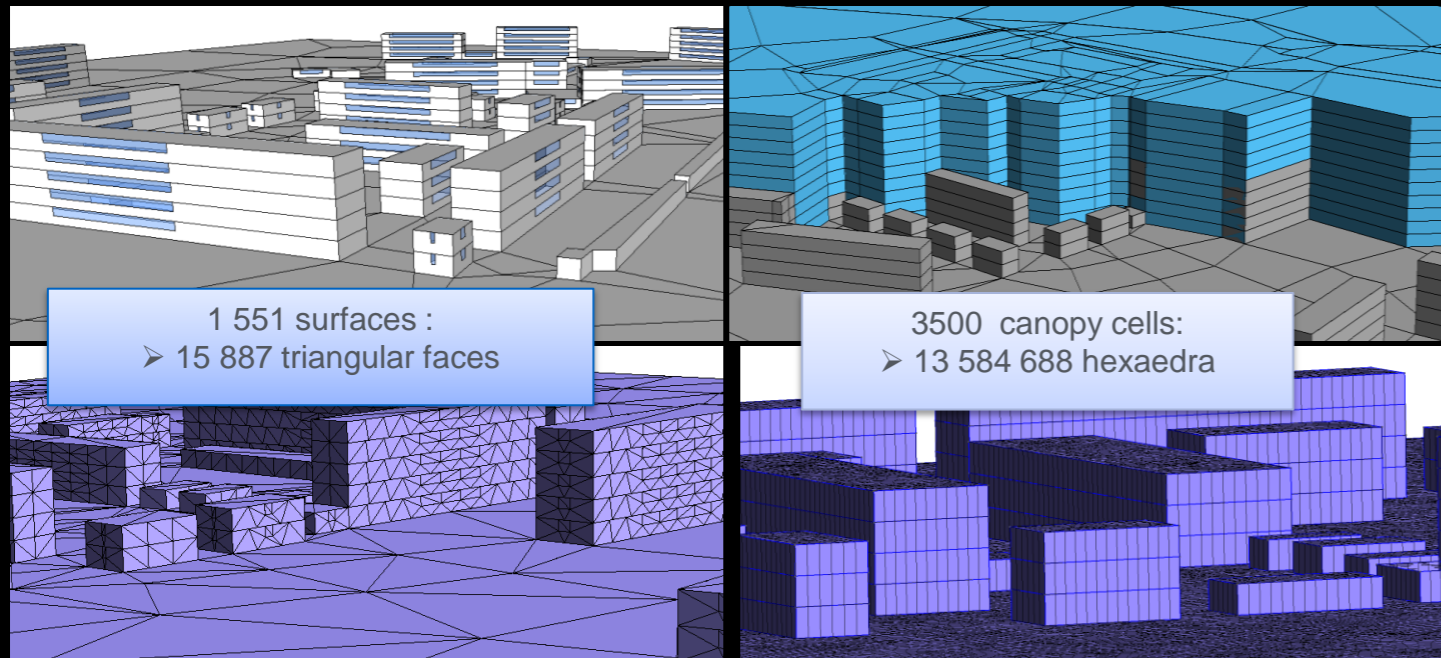


Convergence des standards bâtiment IFC (a) et ville CityGML (b)

Geiger A, Benner J, Haefele KH. Generalization of 3D IFC Building Models. In: Breunig M, Al-Doori M, Butwilowski E, Kuper PV, Benner J, Haefele KH, éditeurs. 3D Geoinformation Science [Internet]. Springer International Publishing; 2015. p. 19-35.

L'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments à l'échelle du quartier

De la STD aux modèles à l'échelle du quartier



Gros et al. (2013)

Maillages volumétriques et surfaciques adaptés aux modèles d'énergétique du bâtiment

Raffinement nécessaire en fonction des phénomènes modélisés (rayonnement solaire, vents dominants, ...)



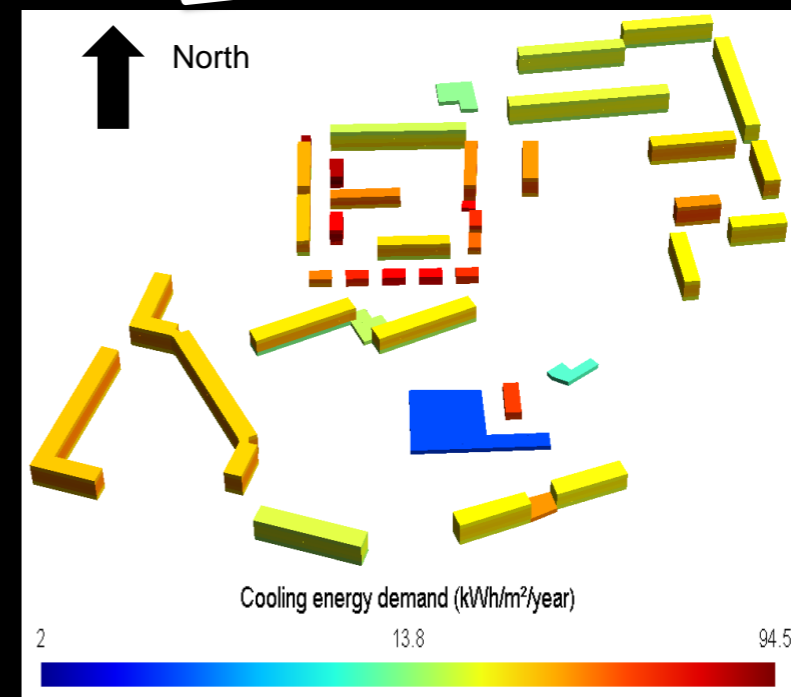
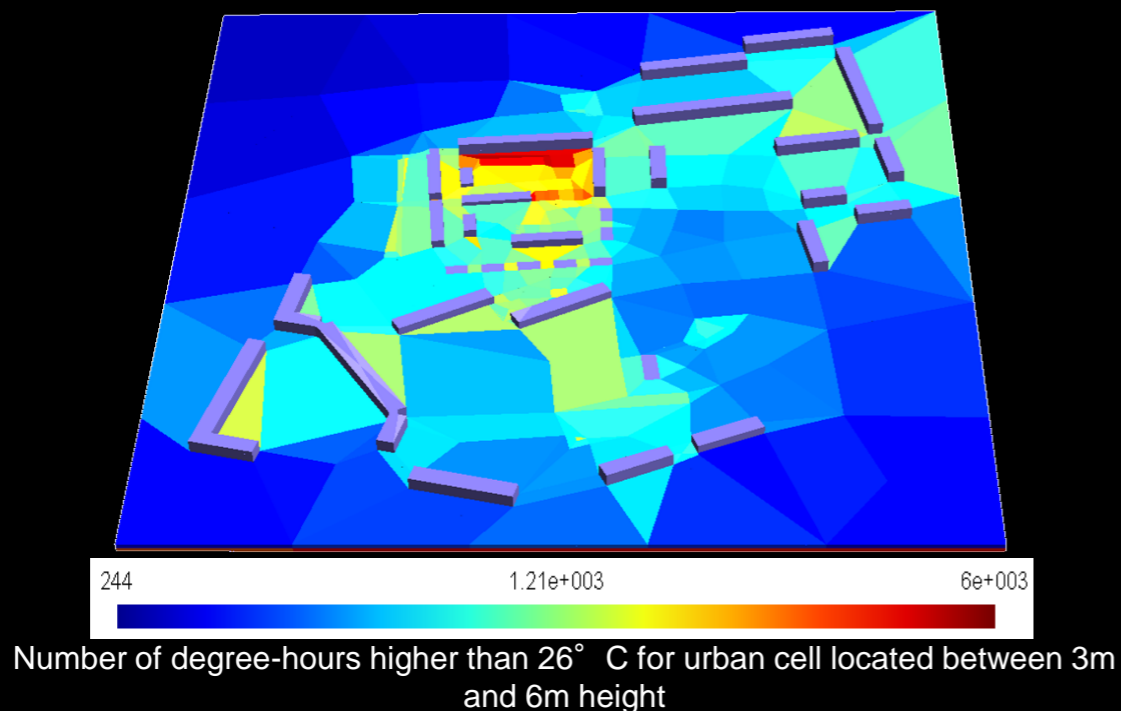
Problématique de l'efficacité :

- des modèles bâtiments (modèles réduits)
- et de la gestion des données (SIG et maquettes numériques 3D complexes)

L'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments à l'échelle du quartier

Couplage de modèles pour l'évaluation du microclimat urbain et de l'énergétique du bâtiment

Gros et al. (2013)



- Effets indirects sur la performance énergétique évalués par le couplage fort des modèles
- Différentes approches sont possibles en considérant différentes échelles de temps :
 - Pics d'appels de puissance et analyses détaillées sur de courtes périodes avec des modèles fins
 - Analyse globale des températures extérieures et du confort thermique/besoin d'énergie pour une saison complète

Principe du modèle

SOLENE
Apports solaires

Méthodes des radiosités
simplifiée

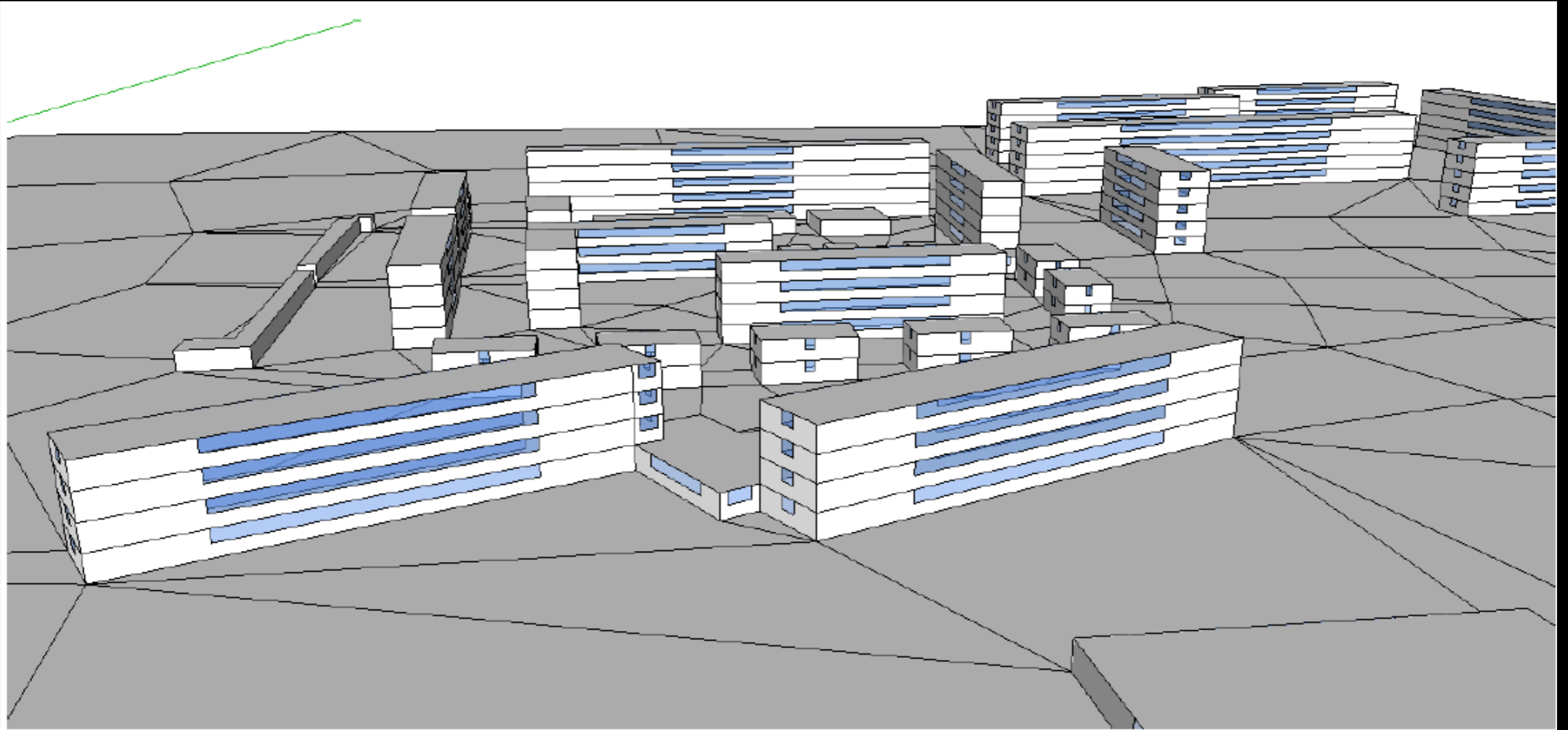
Echanges infrarouges et
inter-réflexions solaires

Couplage par un modèle
zonal

QuicURB
Aéraulique

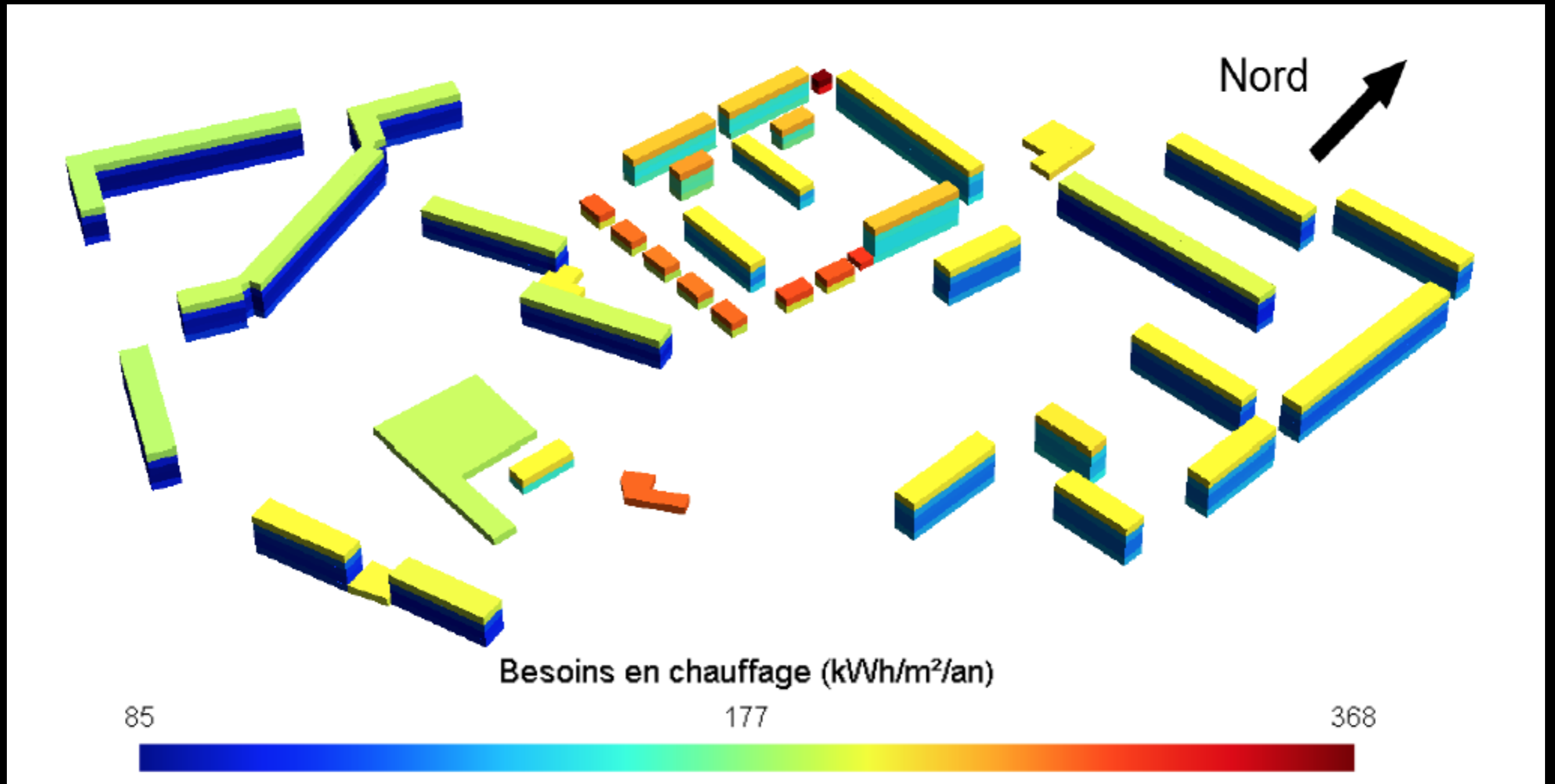
Transformées en Z
Thermique du bâtiment

Applications



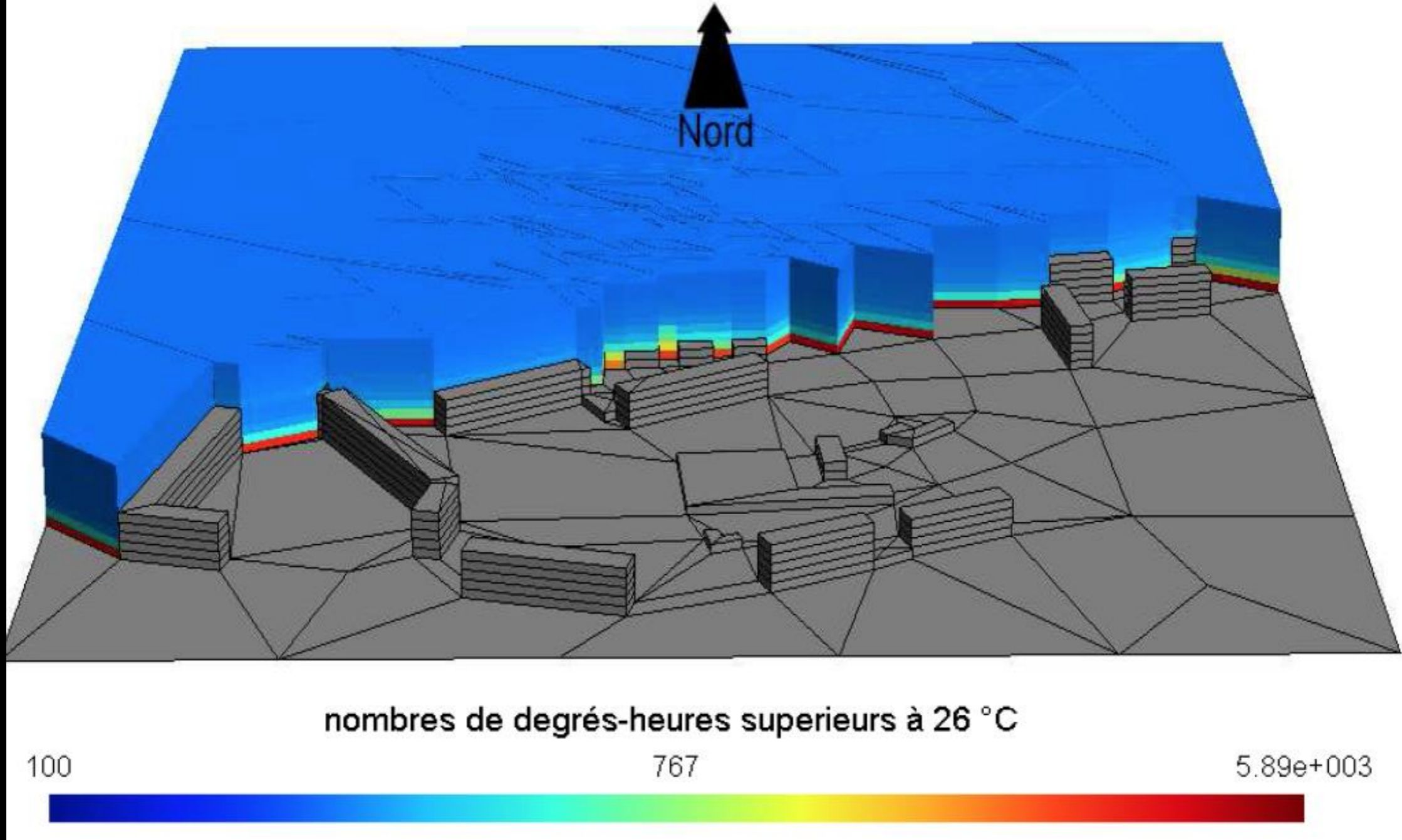
Modélisation du quartier Pin Sec à Nantes

Thèse de Adrien Gros

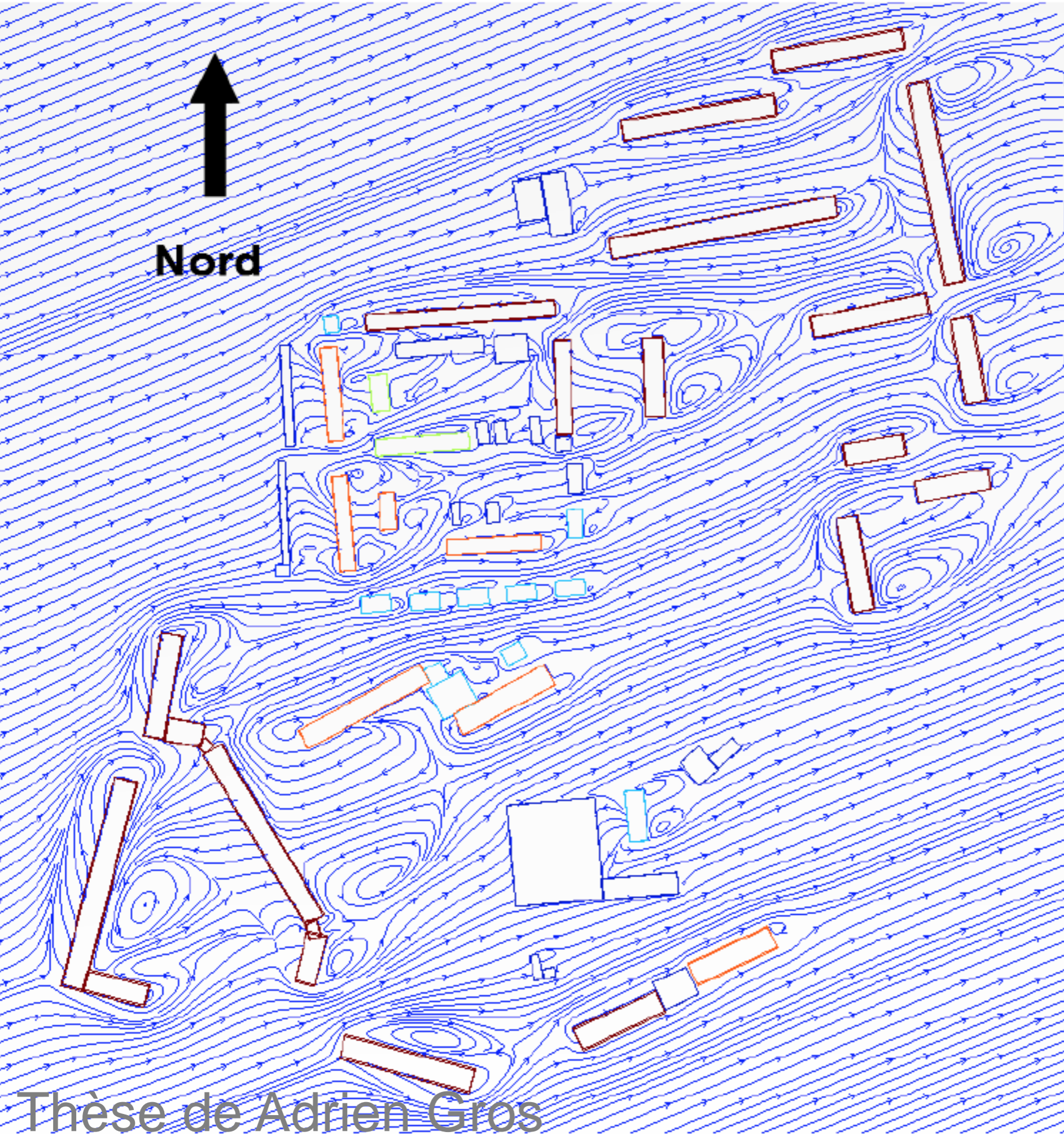


Calcul des besoins de chauffage, quartier Pin Sec à Nantes

Thèse de Adrien Gros



Champs de température extérieure, quartier Pin Sec à Nantes
Thèse de Adrien Gros

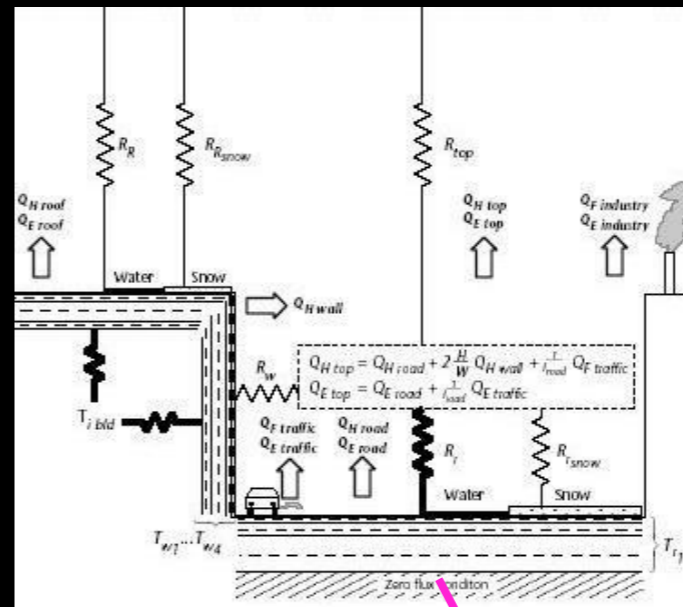
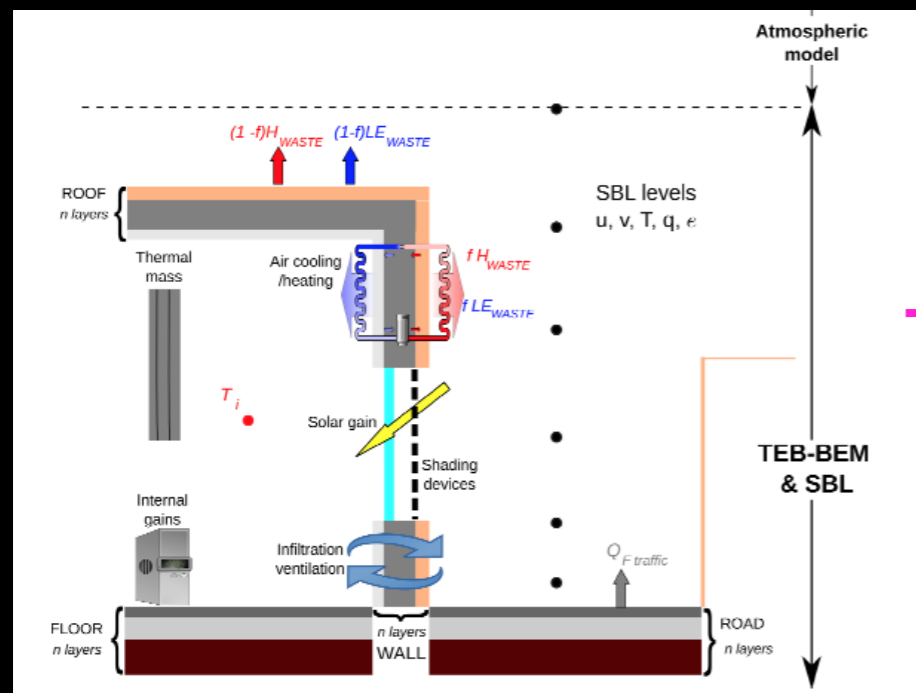


Lignes de courant

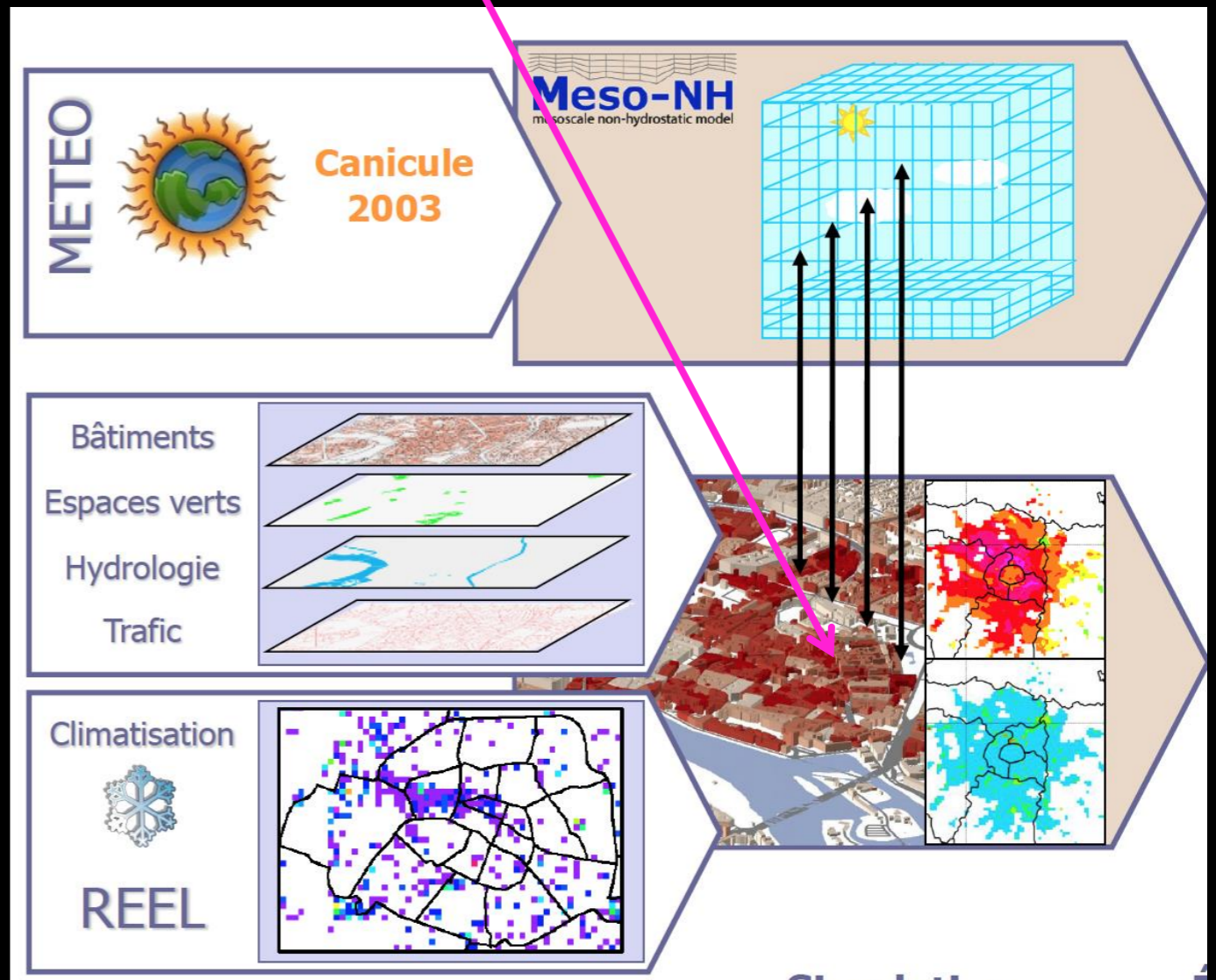
4). Les bâtiments dans les modèles climatiques urbains

Exemple : **TEB** - Météo France

TEB : analogie rue canyon

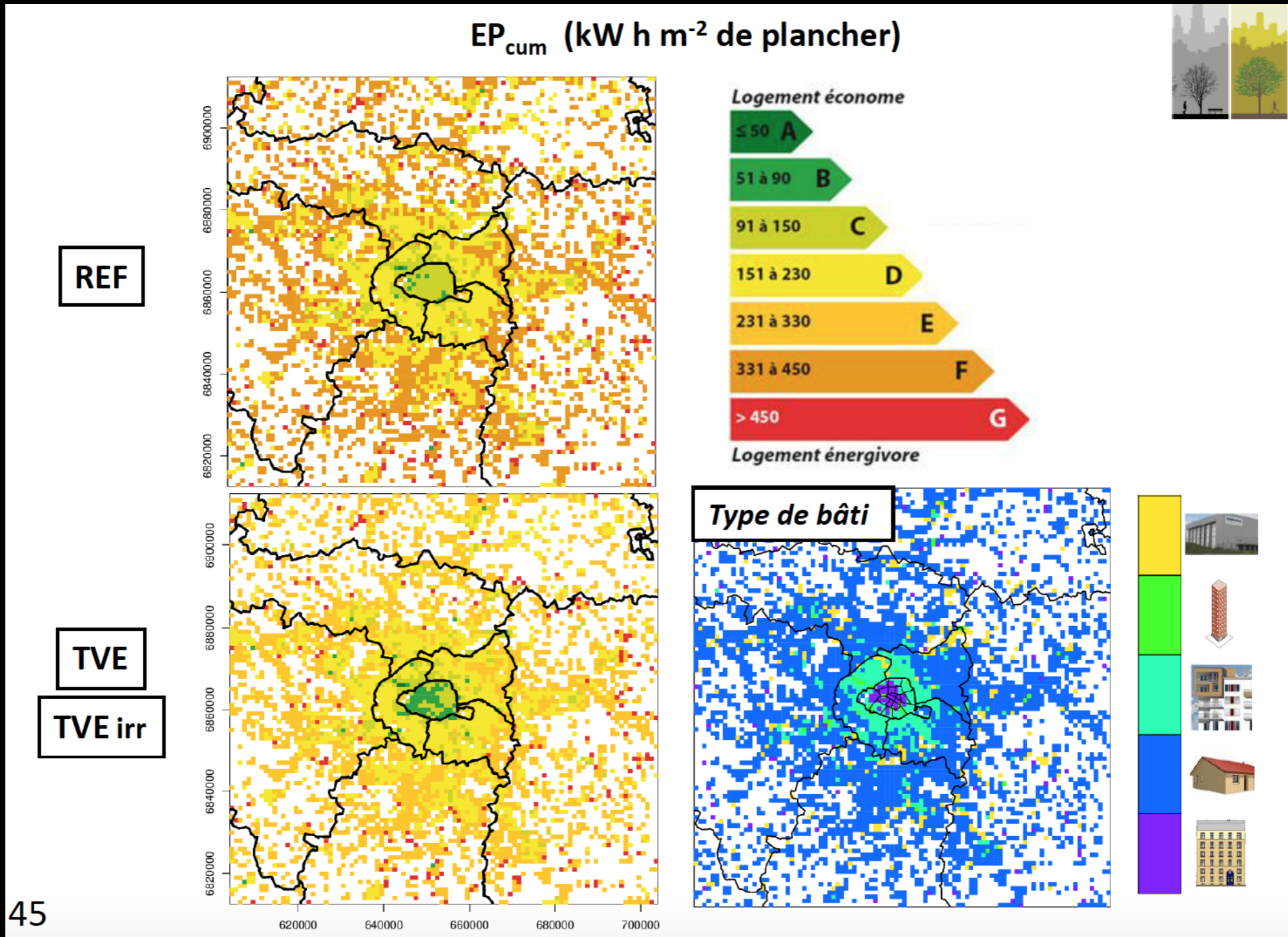


Bâtiment Monozone



Sources: de Munck 2012,
Lemonsu 2014

Impact du verdissement sur la consommation d'énergie annuelle



Conclusions

Une interface bâtiment-climat urbain de plus en plus étudiée

Des approches convergentes entre physique du bâtiment et climatologie urbaine

Des capacités de calculs qui vont permettre de traiter des problèmes de plus en plus grands

... un point commun : la donnée bâti et occupation des sols difficile à acquérir à l'échelle de la ville

Références

- Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2015. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings* 86, 93–103. doi:10.1016/j.enbuild.2014.09.057
- Gros, A., Bozonnet, E., Inard, C., 2012. Modeling the building energy demand at district scale. ICUC8, Dublin, Ireland.
- Huttner, S., Bruse, M., 2009. Numerical modeling of the urban climate - a preview on ENVI-MET 4.0. ICUC7, Yokohama.
- Bouyer, J., Inard, C., Musy, M., 2011. Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context. *Energy and Buildings* 43, 1549–1559.
- Bozonnet, E., Musy, M., Calmet, I., Rodriguez, F., 2015. Modeling methods to assess urban fluxes and heat island mitigation measures from street to city scale. *Int.Journal of Low-Carbon Technologies* 10, 62–77. doi:10.1093/ijlct/ctt049
- Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat. Université de Nantes.
- Malys, L., 2012. Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Nantes.
- Huang, Y., 2010. Methodology of Climatic Design of Urban District for Buildings Energy Efficiency. Ecole Centrale de Nantes (France) & Huazhong University (China), Nantes.
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary Layer Meteorology* 94, 357–397.
- Lemonsu, A., Masson, V., 2002. Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary-Layer Meteorology* 104, 463–490.
- Hénon, A., Mestayer, P.G., Groleau, D., Voogt, J.A., 2011. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Building and Environment* 46, 1747–1764.
- Gastellu-Etchegorry, J.-P., Zagolski, F., Romier, J., 1996. A simple anisotropic reflectance model for homogeneous multilayer canopies. *International Journal of Remote Sensing* 57, 22–38.
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., Wilke, U., 2009. CitySim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable. IBPSA Conf: Building Simulation 2009, Glasgow, pp. 1083–1090.
- Chen, H., Ookab, R., Huang, H., Tsuchiyab, T., 2009. Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Build. and Env.* 44, 2290–2299.

Références

- Hénon, A., Mestayer, P.G., Groleau, D., Voogt, J.A., 2011. High resolution thermo-radiative modeling of an urban fragment in Marseilles city center during the UBL-ESCOMPTE campaign. *Building and Environment* 46, 1747–1764. doi:10.1016/j.buildenv.2011.02.001
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.* 5, 1377–1393.
- De Munck, C., 2013. Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville (Ph. D. Thesis). Université de Toulouse, Toulouse.
- Qu, Y., Milliez, M., Musson-Genon, L., Carissimo, B., 2011. Micrometeorological Modeling of Radiative and Convective Effects with a Building-Resolving Code. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 50, 1713–1724. doi:10.1175/2011JAMC2620.1
- Qu, Y., Milliez, M., Musson-Genon, L., Carissimo, B., 2012. Numerical study of the thermal effects of buildings on low-speed airflow taking into account 3D atmospheric radiation in urban canopy. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104106, 474–483. doi:10.1016/j.jweia.2012.03.008
- Qu, Y., 2011. Three-dimensionnal modeling of radiative and convective exchanges in the urban atmosphere (Ph. D. Thesis). ENPC/Paritech.
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer meteorology* 94, 357–397.