



Modélisation du bâtiment dans son environnement

Marjorie Musy
CERMA / IRSTV



Modéliser l'environnement proche du
bâtiment :

Pourquoi, comment ?

Pourquoi ?



≠



Insertion urbaine,
Densité, Forme urbaine, matériaux, végétation, charges anthropiques...

Effets urbains : occupation des sols, densité, rugosité, ICU

+ Effets locaux : humidité, ombrages, vent, inter-réflexions

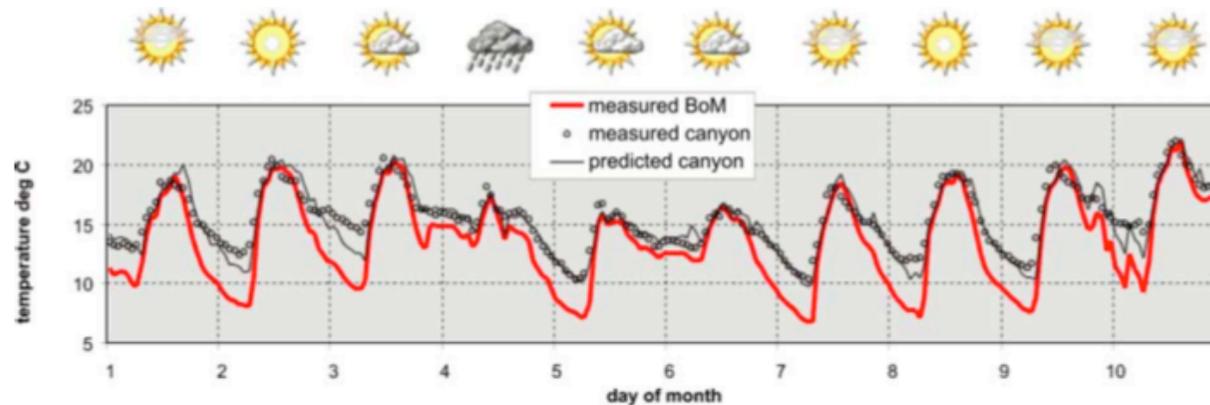
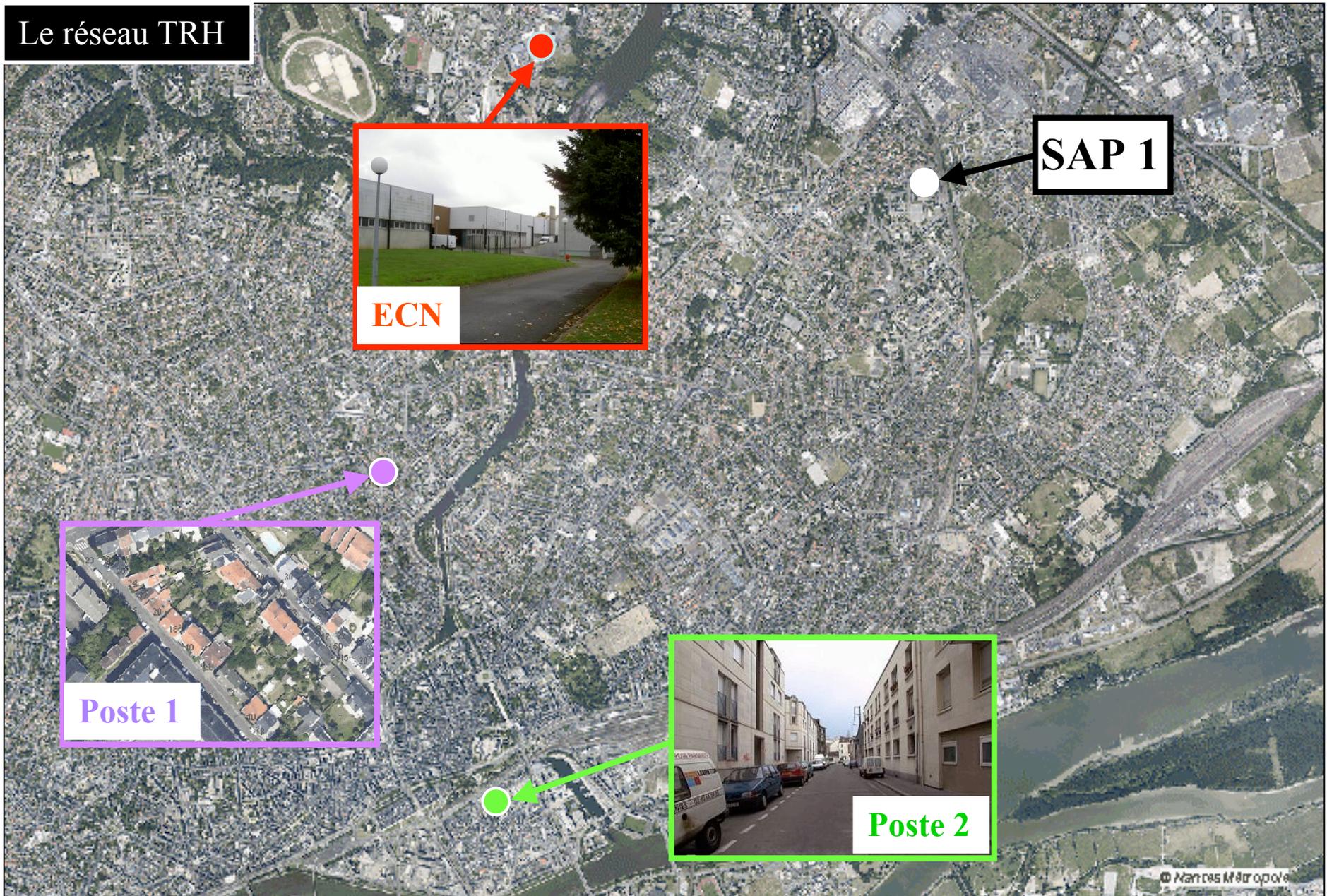


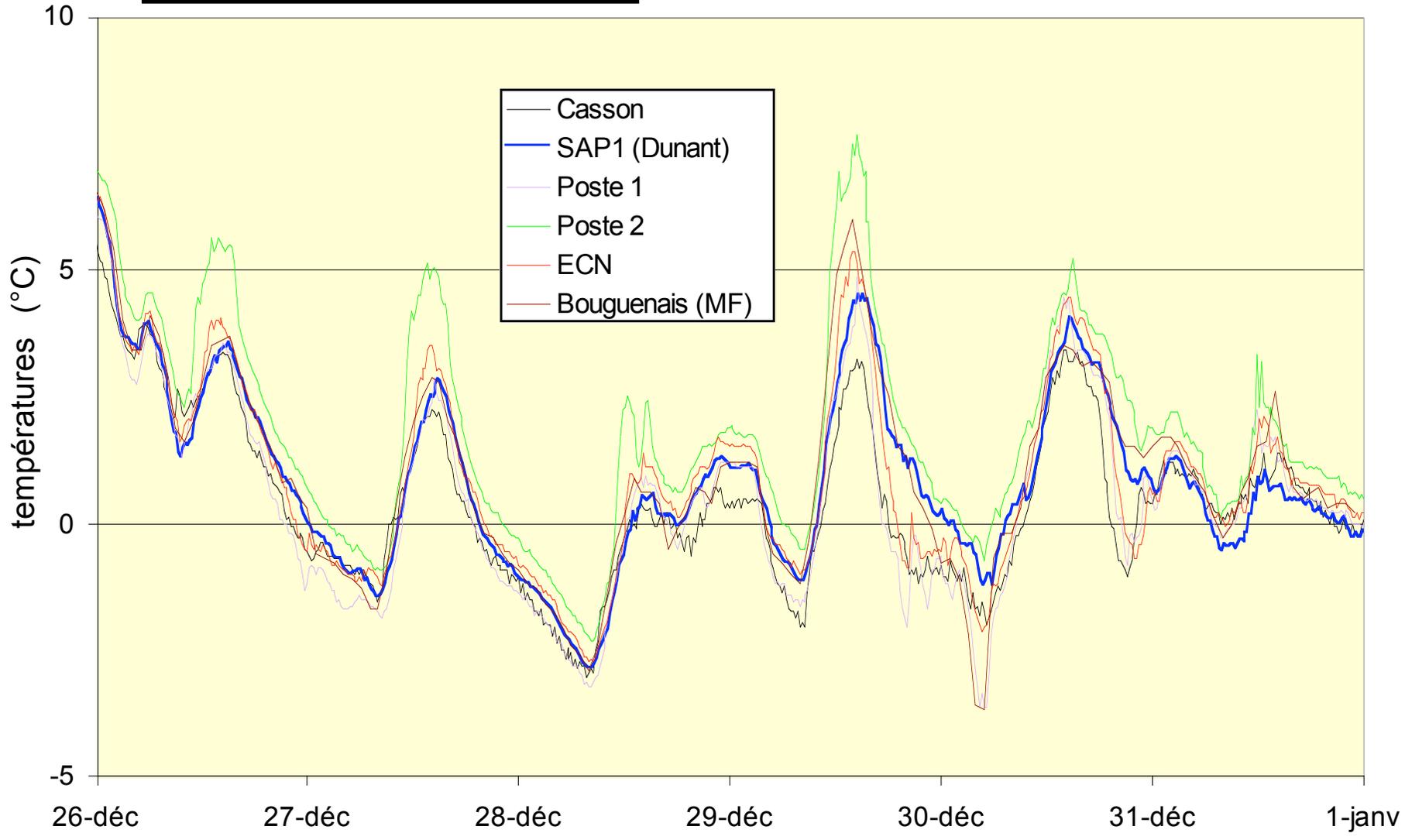
Figure 3. Comparison of measured air temperature at urban street canyon with temperature predicted by CAT from Bureau of Meteorology (BoM) data for a 10-day period in May, 2000.

T.J. Williamson et al., BS'2009, Ville de Adelaïde, Australie

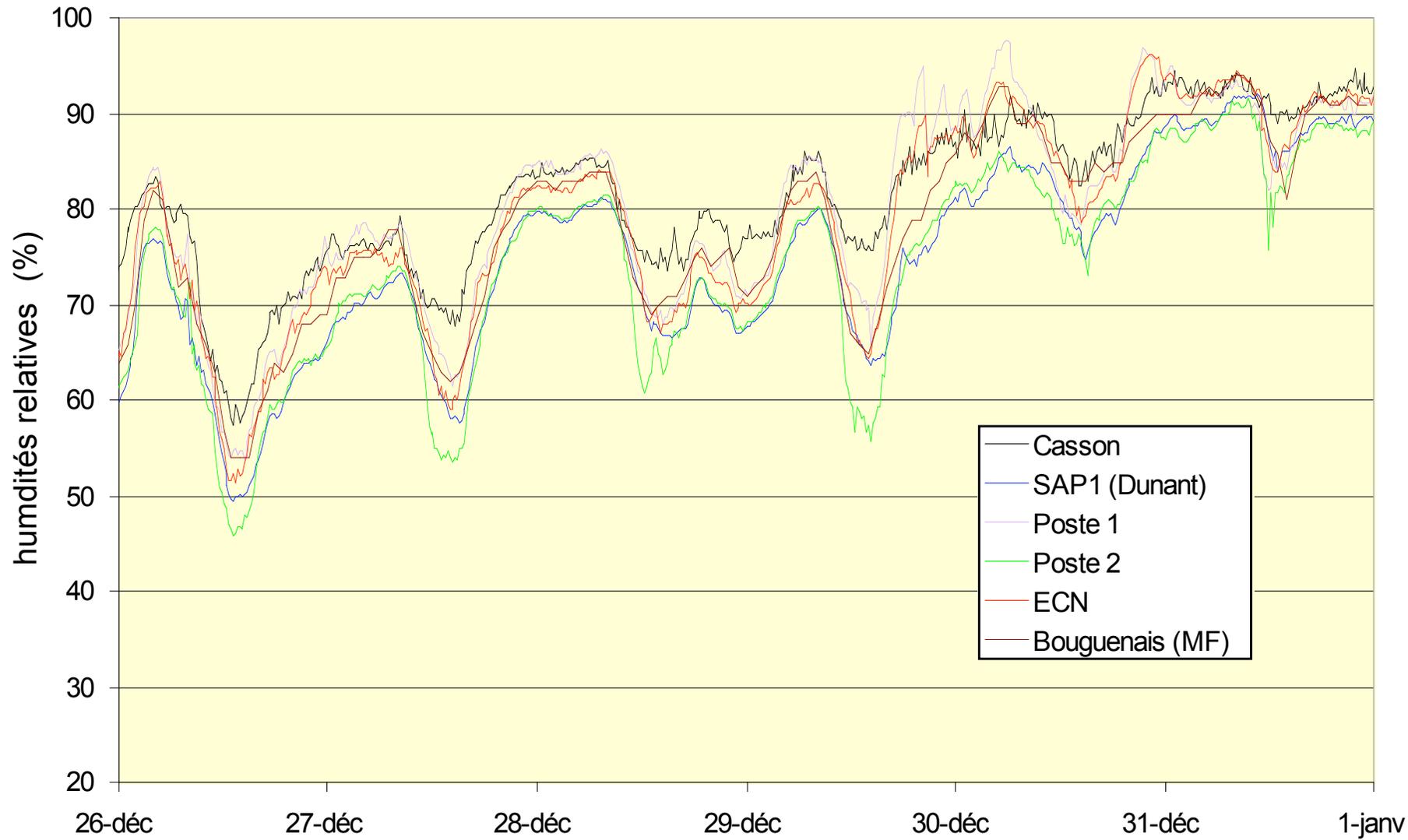
Nantes



Le réseau TRH - Températures



Le réseau TRH - Humidités relatives



Des conséquences remarquées sur l'évaluation des consommations énergétiques des bâtiments

T.J. Williamson et al., BS'2009

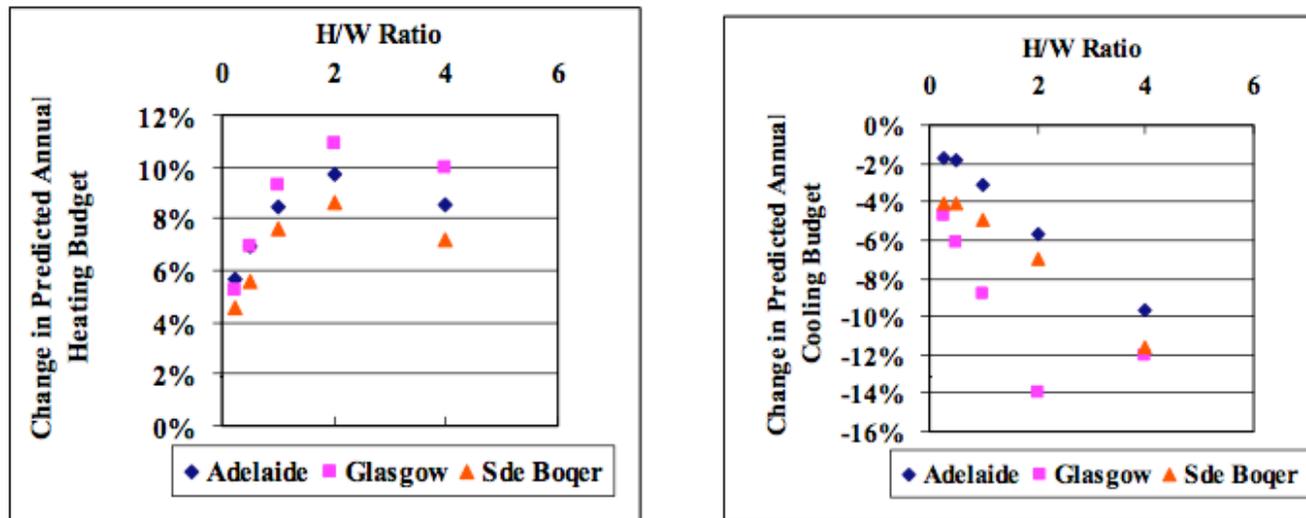
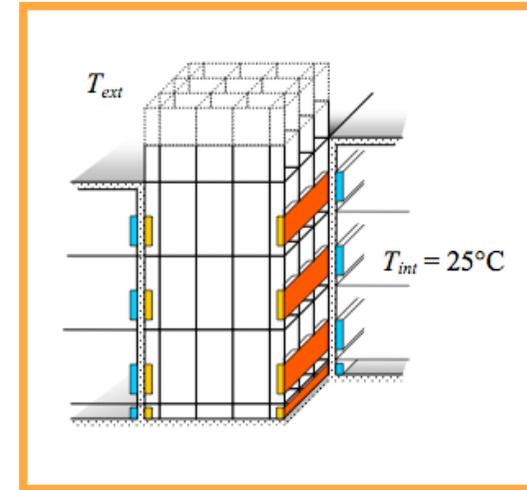
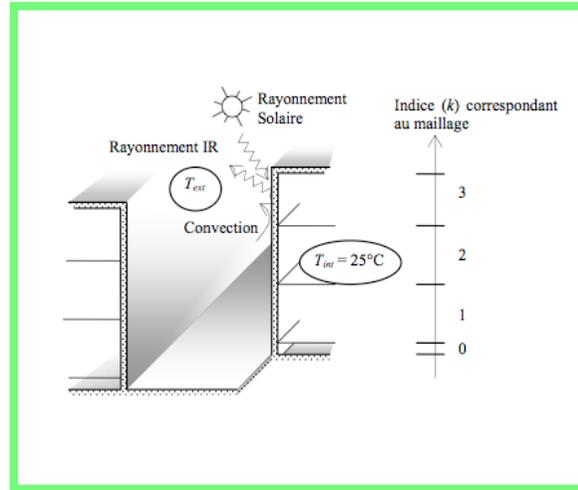
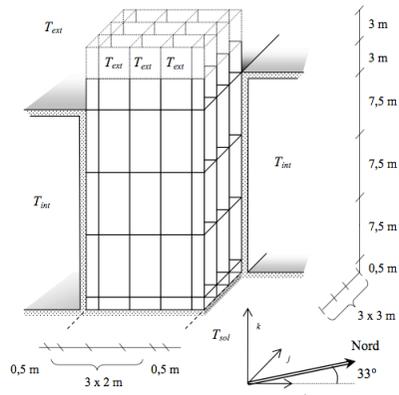
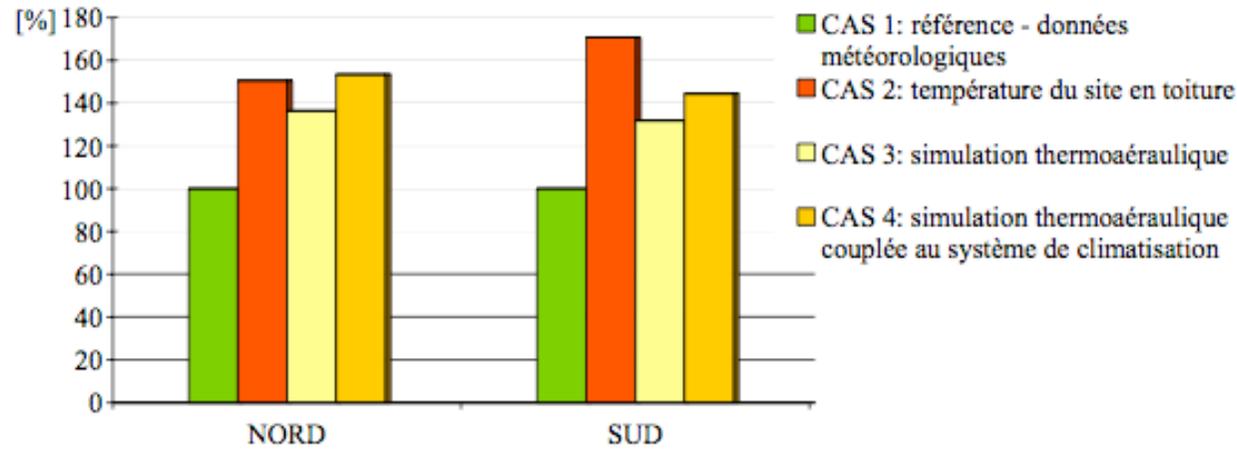


Figure 10: Error in annual budget for heating the generic office building (left) and cooling it (right), as a result of urban modification of air temperature and WITH mutual SHADING in East-West Canyon, as predicted by EnerWin for three locations in different climate zones.

Bozonnet, 2005

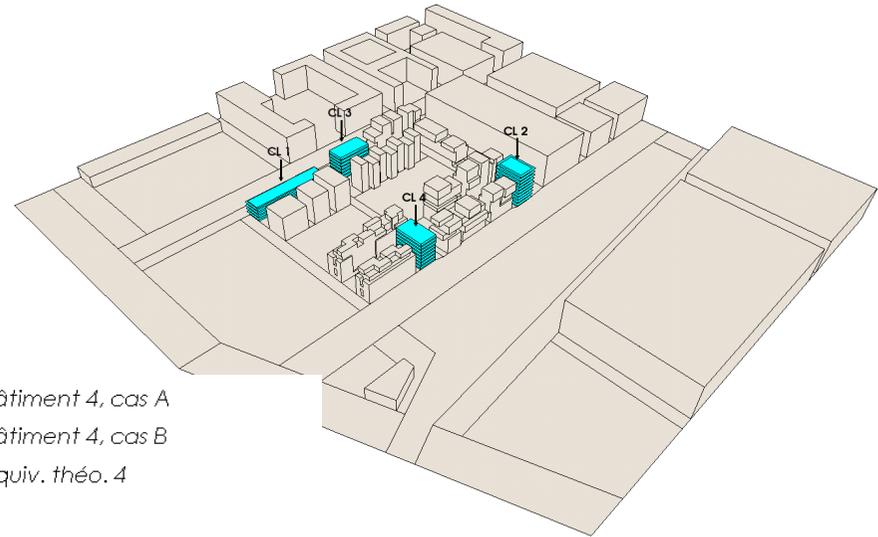


Demande énergétique globale relative au cas de référence



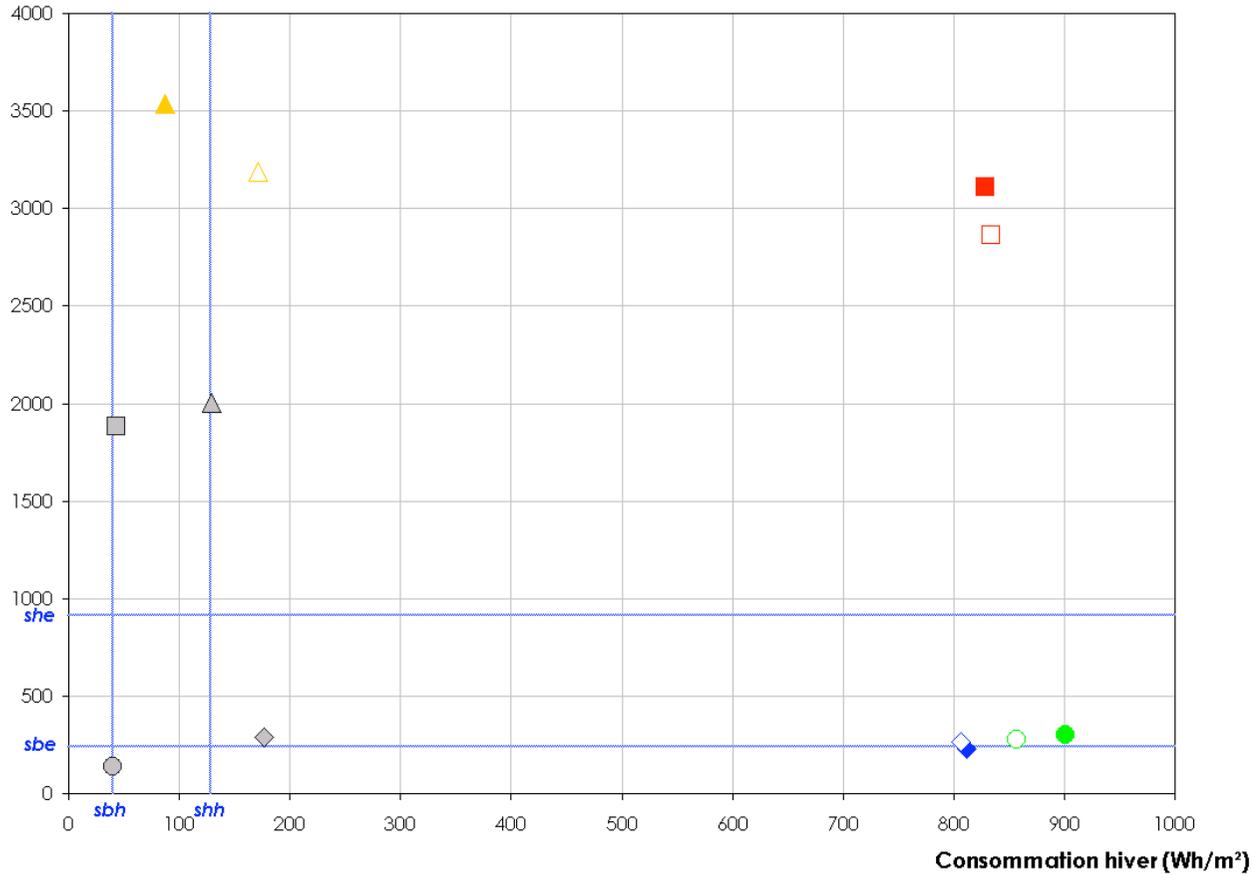
Comparaison, en pourcentage, de la demande énergétique calculée sur les 28 jours d'étude pour les différents niveaux de détermination des conditions extérieures par rapport au cas de référence (rafraîchissement)

Bouyer, 2009



- Bâtiment 1, cas A
- ◆ Bâtiment 2, cas A
- Bâtiment 3, cas A
- ▲ Bâtiment 4, cas A
- Bâtiment 1, cas B
- ◇ Bâtiment 2, cas B
- Bâtiment 3, cas B
- △ Bâtiment 4, cas B
- équiv. théo. 1
- ◆ équiv. théo. 2
- équiv. théo. 3
- △ équiv. théo. 4

Consommation été (Wh/m²)



Comment ?

Des réponses en modélisation,
des échelles régionales aux échelles micro

De l'ICU au microclimat : TEB, SM2U, SimCity, AUSSM...

MODELE Microclimatique du CERMA

- Présentation du modèle
- Echelles spatiales et temporelles
- Entrées - sorties
- Validation
- Applications

Modèle SOLENE/(FLUENT)

Rayonnement CLO issu soleil

Echanges GLO et CLO entre les surfaces y compris voûte céleste et enveloppe de la végétation

Conduction et stockage de chaleur dans les parois et le sol

Rayonnement, conduction et stockage dans un bassin d'eau

Evaporation à la surface du bassin

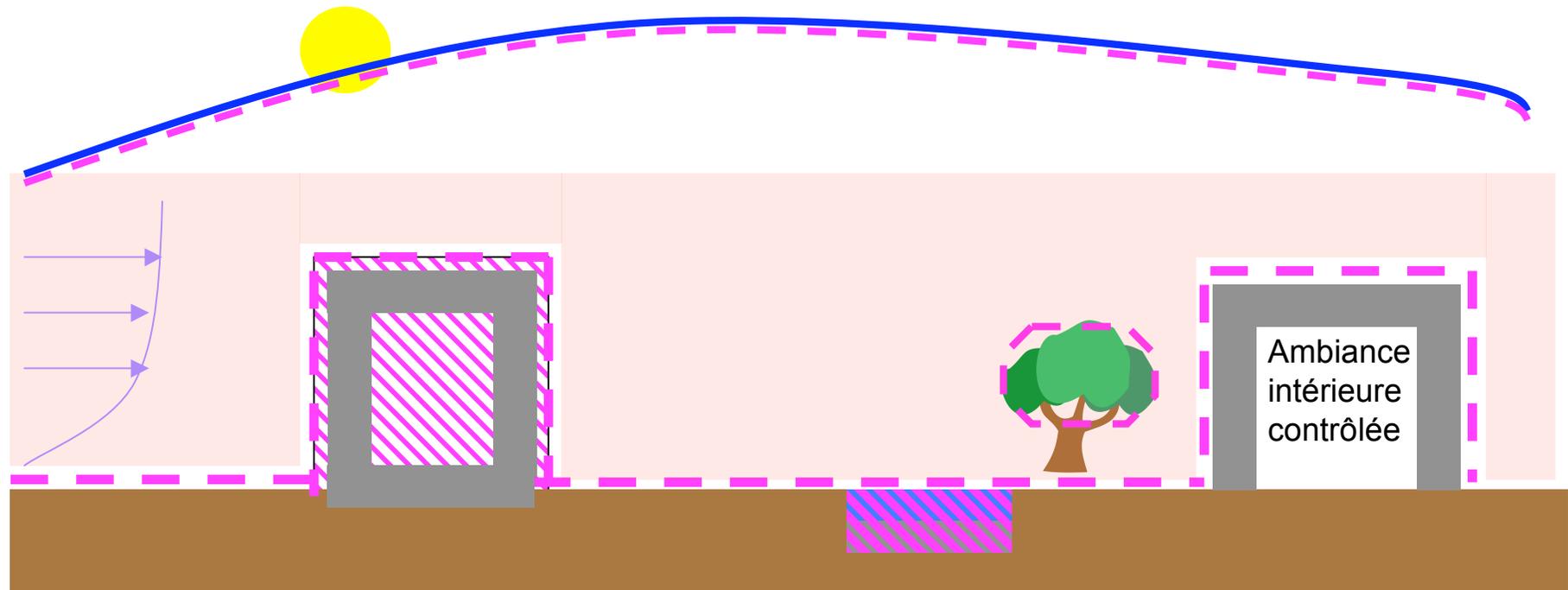
Effet de traînée, évapotranspiration, convection de la végétation

Vent, transport diffusion de la vapeur d'eau et de la température

Convection à la surface des parois

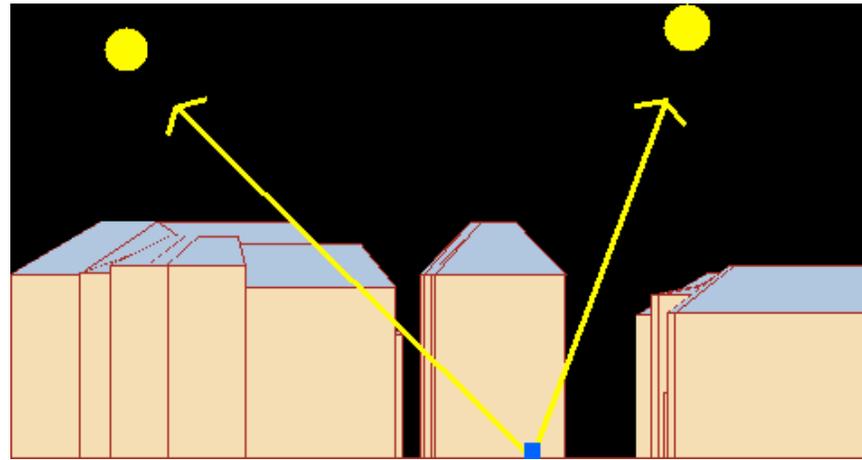
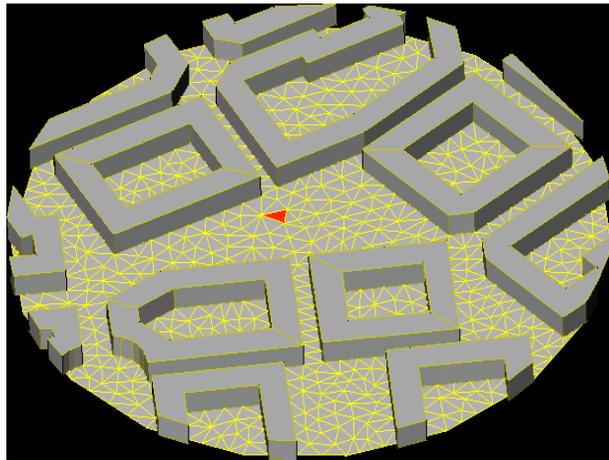
Confort thermique extérieur

Bilan énergétique d'un bâtiment (consommation ou températures)



Rayonnement CLO issu soleil

Méthode Masque : permet de connaître les conditions d'ensoleillement d'un site au cours du temps. La visibilité des trajectoires solaires est déterminée, en chaque point du maillage, en tenant compte des différents obstacles.



flux solaire direct : modèle de Perez et al.

$$S_e = D_e(\varepsilon - 1) \left(1 + 1.041 \left(\frac{\pi}{2} - h \right)^3 \right) \quad D_e = 1367 \Delta \frac{\alpha'}{m}$$

$1 \leq \varepsilon \leq 12$: degré de pureté du ciel

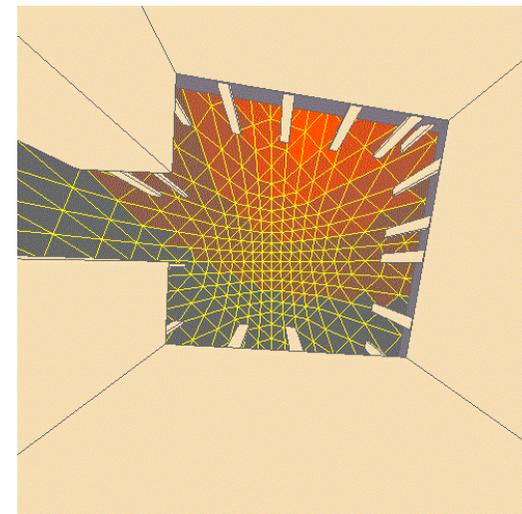
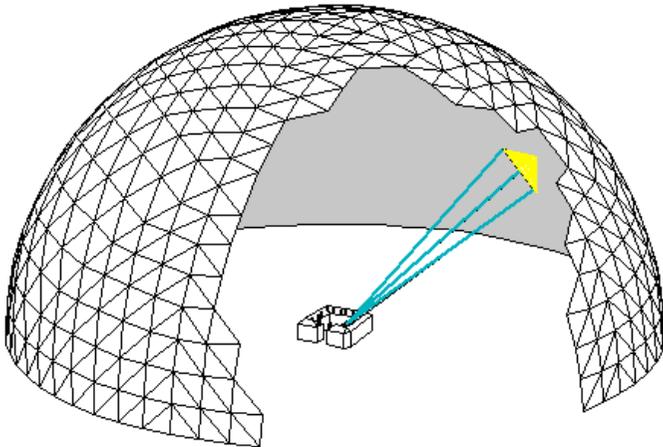
$0.01 \leq \Delta \leq 0.6$, $0.05 =$ ciel sombre, $0.5 =$ ciel très brillant

$m =$ masse d'air optique, $h =$ hauteur solaire

Rayonnement CLO issu soleil

Flux diffus :

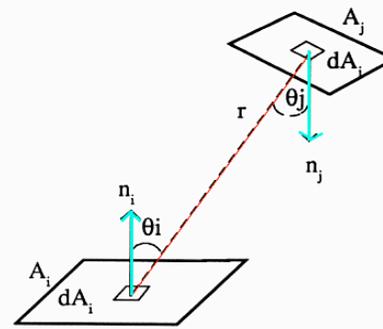
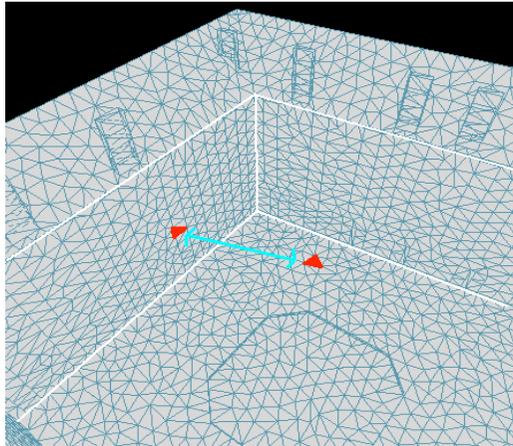
- voûte céleste modélisée géométriquement sous forme d'un hémisphère triangulée de rayon infini devant les dimensions de la scène
- modèle de radiance spécifique de conditions de ciel (Perez tous temps et CIE normalisés clair et couvert).
- Pour un élément de surface situé au centre de l'hémisphère, l'angle solide sous lequel est vu chaque élément de la surface du ciel est obtenu à partir du théorème de Girard.
- Energie reçue par chaque élément de la scène = cumul des luminances des éléments de ciel visible, avec respect de l'angle d'incidence et de l'angle solide sous lequel est vu l'élément de ciel



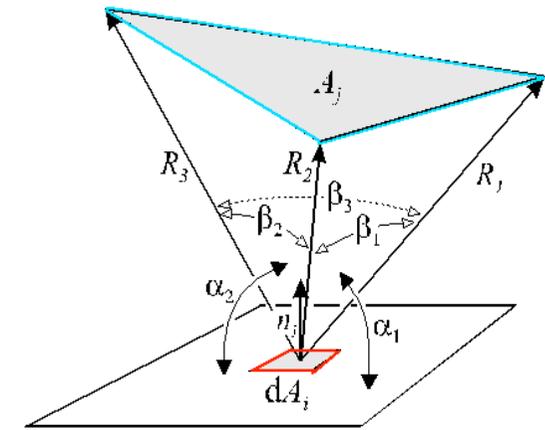
Echanges GLO et CLO entre les surfaces

Les inter-réflexions

Evaluation des facteurs de forme

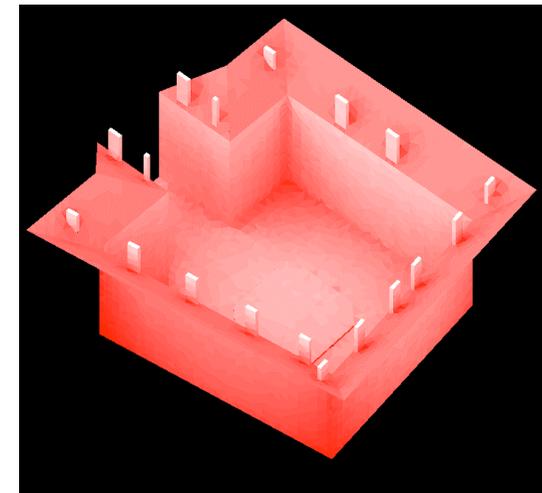


$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \left(\frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\Pi r^2} \right) dA_j dA_i$$



Méthode des radiosités

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j \cdot F_{ij}$$



Echanges GLO avec voûte céleste

Echange avec le ciel : Φ ciel $\varphi_{ciel} = F_{ext,ciel} \left(\sigma \varepsilon_{ext} T_{ext}^4 - L \downarrow \right)$

Avec un rayonnement du ciel calculé à partir de la formule [Monteith] :

$$L \downarrow = 5.5 T_{air} + 213$$

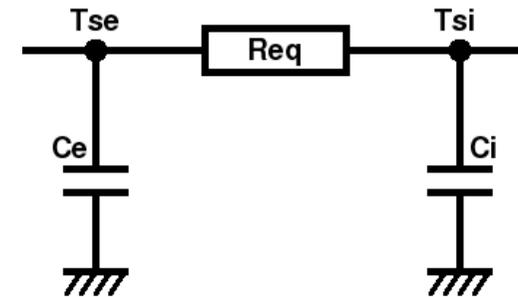
Maintenant remplacé par des données empiriques + calcul des échanges entre les surfaces de la scène

Conduction et stockage de chaleur dans les parois

Bâtiments de la scène urbaine dont on ne calcule pas le comportement énergétique interne + Surfaces de sol artificiel

T_{si} : Température de consigne fixe

- Nombre de couches de matériaux au choix de l'utilisateur
- Méthode de calcul de C_e et C_i pour une meilleure gestion de l'inertie

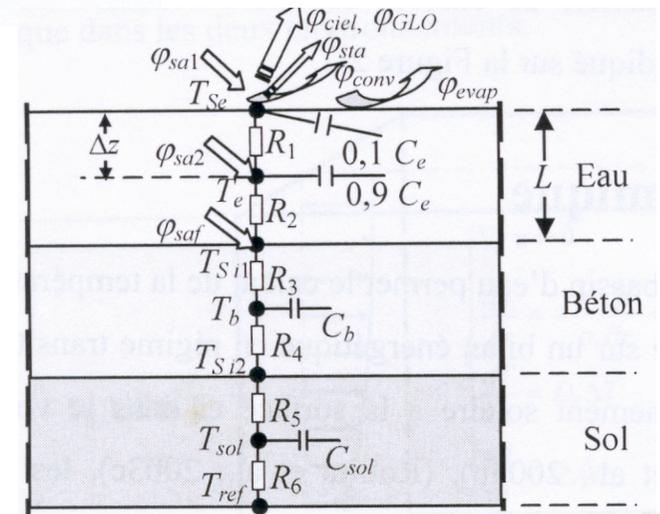
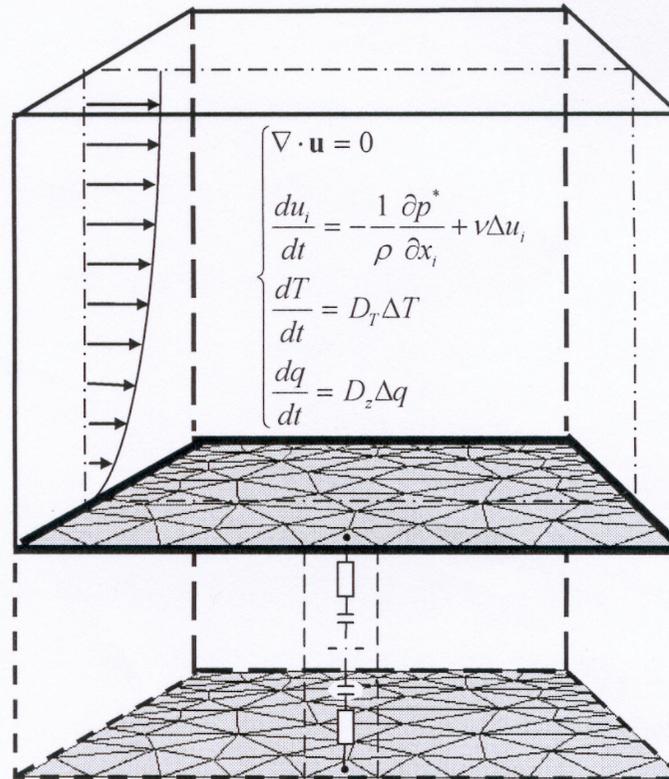


Rayonnement, conduction et stockage dans un bassin d'eau

Air environnant
Modèle thermo-aéraulique - FLUENT

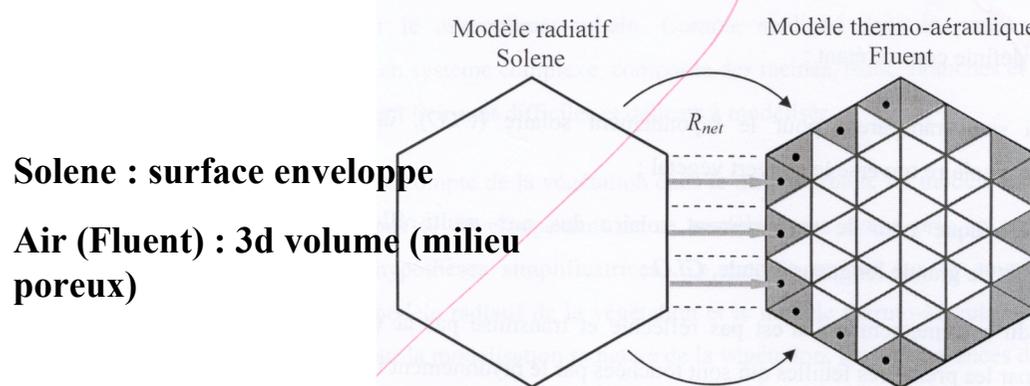
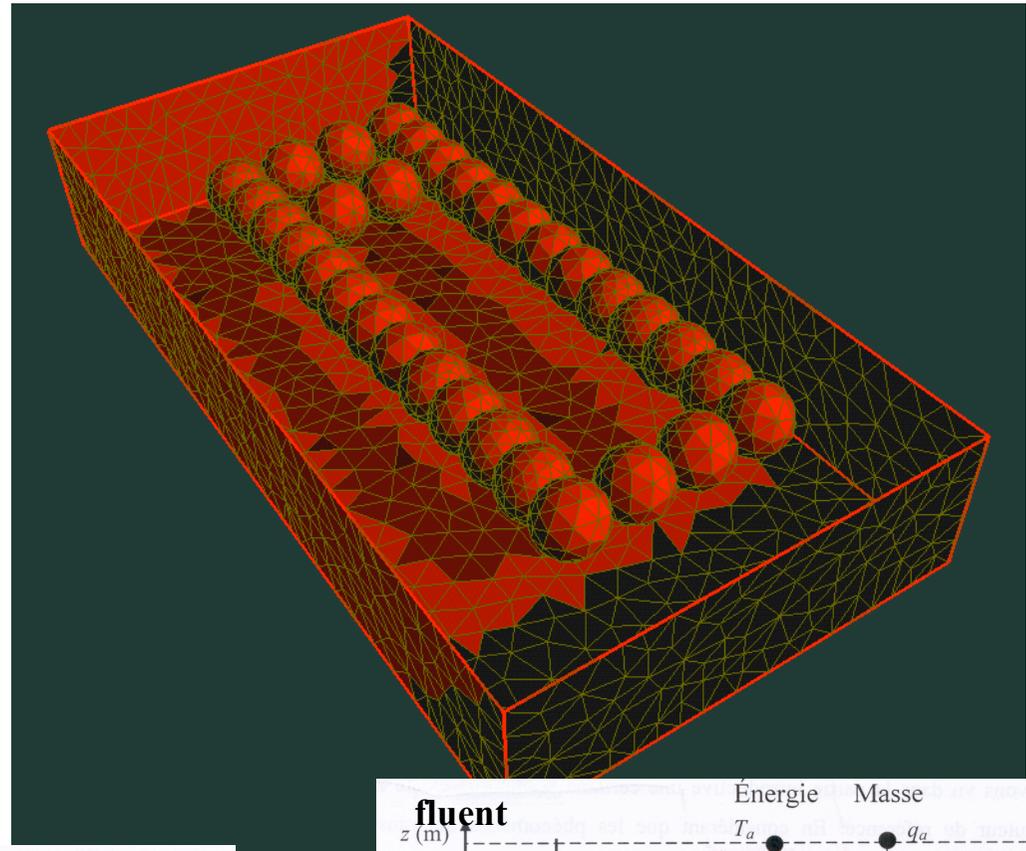
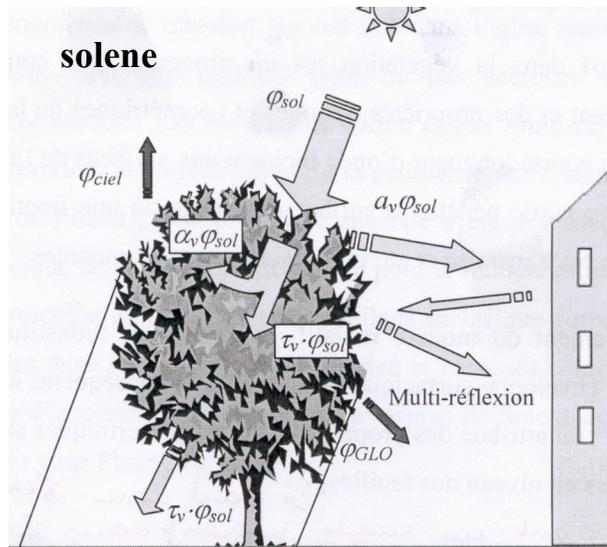
Surface d'eau
Couplage entre les modèles

Bassin d'eau
Modèle thermique - SOLENE



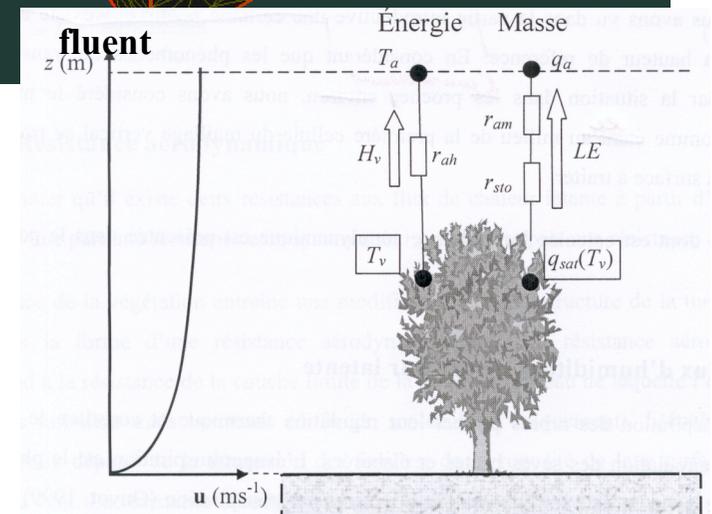
Effet de traînée, évapotranspiration, convection de la végétation

Les arbres



Solene : surface enveloppe

Air (Fluent) : 3d volume (milieu poreux)



Modèle thermique de bâtiment

Principe

Modélisation analogique et résolution nodale

Spécificités géométriques

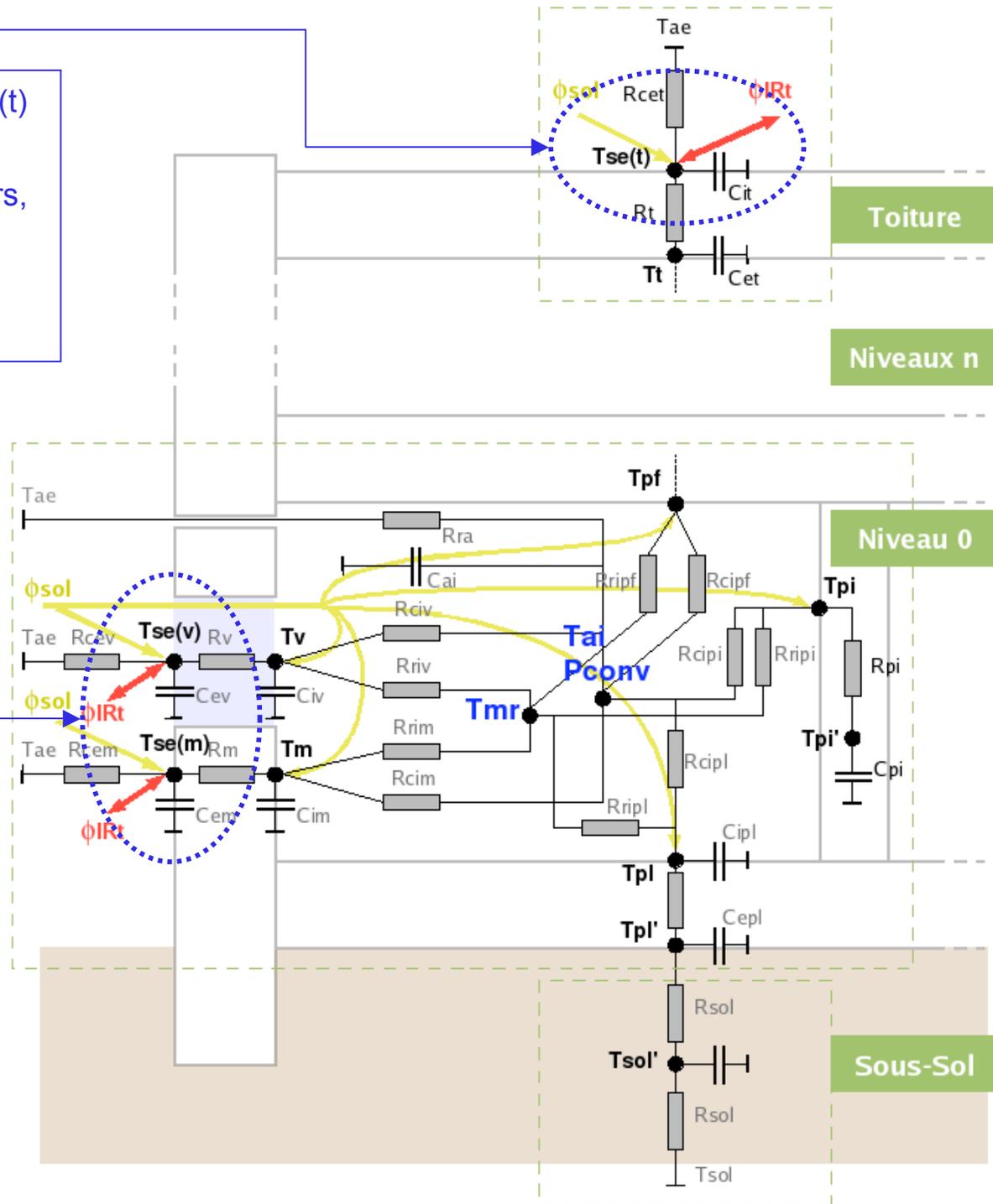
- Discrétisation surfacique extérieure
- Un noeud par classe de paroi intérieure (mur, vitrage, plancher, plafond, paroi int.)
- Nombre de niveaux variable
- Chaque niveau = 1 zone
- Toiture terrasse
- Plancher sur terre-plein

Spécificités énergétiques

- Charges de ventilation : basé sur le débit de ventilation hygiénique
- Charges latentes : bilan de masse d'humidité
- Pas de déperditions aux ponts thermiques
- Gestion intérieure de la répartition des flux solaires et des débits de ventilation

Autant de noeuds $T_s(m)$ $T_s(v)$ $T_s(t)$ que de facettes discrètes respectivement de Murs extérieurs, de Vitrages et de Toiture

$$N_{tot} = f + 8n + 2$$



Vent, transport diffusion de la vapeur d'eau et de la température Convection à la surface des parois

Principe d'une soufflerie numérique (uniquement cas de convection forcée)

Equation NS

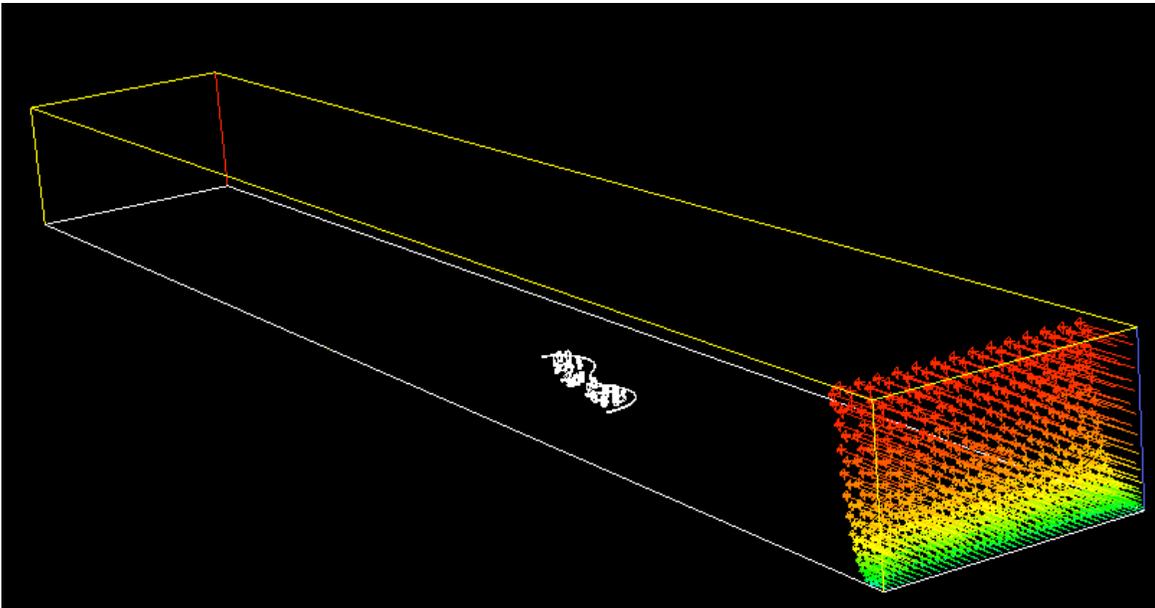
Transport diffusion de la Température et de l'humidité

Convection aux parois (lois de paroi remplacées par des fonctions $hc(V)$)

Modèle de viscosité $k-\varepsilon$ standard ou RNG

Ajout de termes source pour les arbres (humidité, chaleur et quantité de mvt)

Pour le bassin, CL Concentration en eau et température



Confort thermique

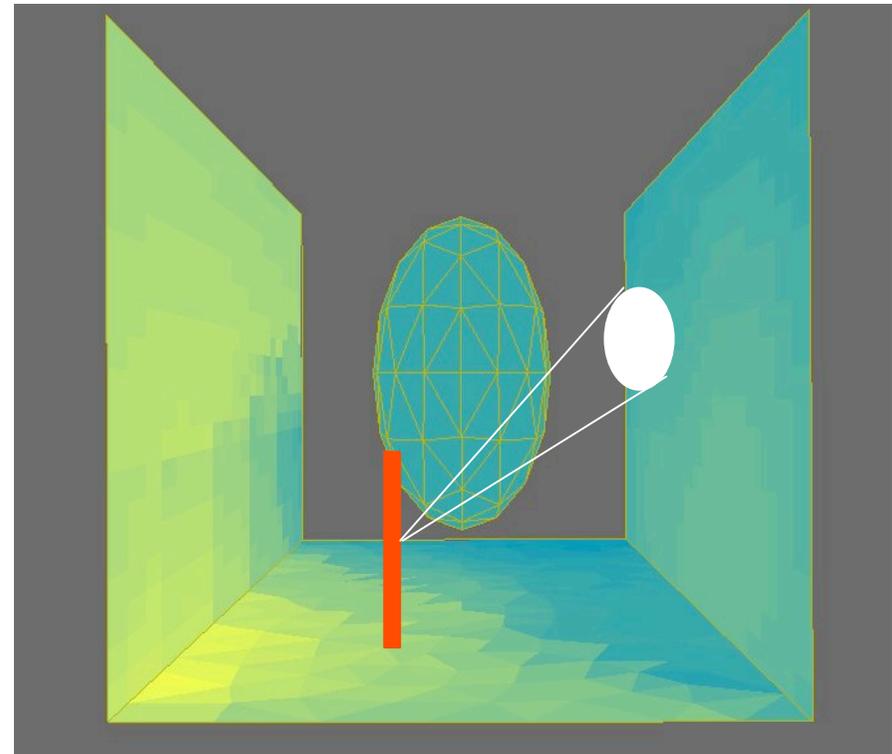
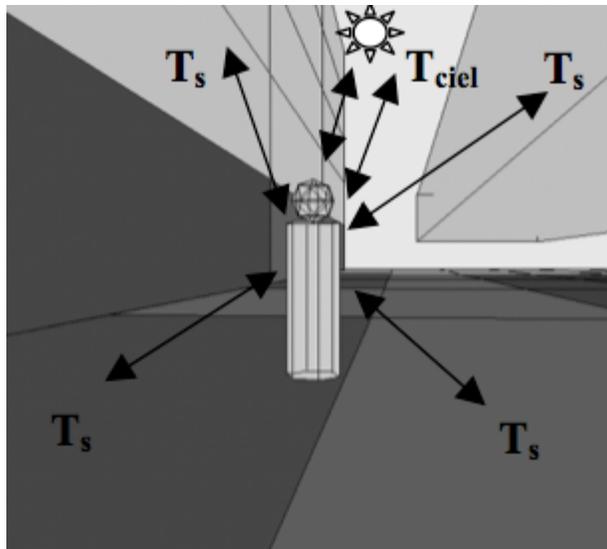
Température radiante moyenne

PMV*predictive mean vote

OUT-SET, outside standard effective temperature

PT (température perçue), PET, physiological equivalent temperature

DISC



SOLENE
calcul itératif

couplage à définir

FLUENT
calcul itératif

PAROI

Temp de surface
Bilan thermique
1 ou 2 couches



Flux convectif

ARBRE

Flux Net
Pas de bilan thermique
Temp de surface connu



Temp de surface
bilan thermo-évaporatif

BASSIN

Temp de surface
Bilan thermique incluant
l'évaporation



Flux convectif
Flux évaporé

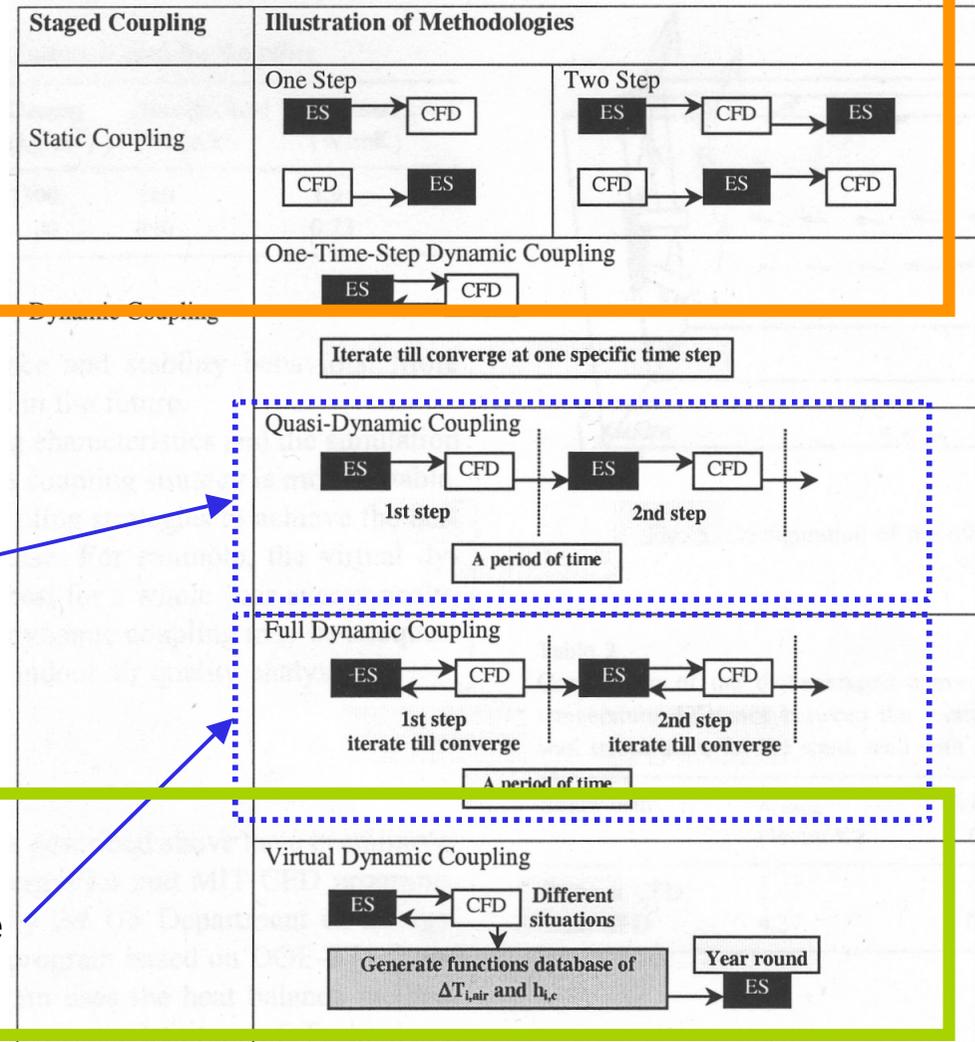
Technique de couplage

Adaptation à la dynamique de simulation micro-climatique

Julien Bouyer

Forçage aérodynamique :

- Champ de vitesse calculé qu'une seule fois
- On ne calcule que les termes transportés à chaque pas de temps Fluent



Couplage « Ping-Pong » :

- Calcul du champ de vitesse à chaque pas de temps, sans itérations entre Solene et Fluent
- Possibilité de décliner en sélectionnant des pas de temps particuliers pour les itérations

Mirela Robitu

Couplage itératif complet :

- Itérations entre Solene et Fluent à chaque pas de temps

Echelles spatiales et temporelles

Maillage Fluent volumique

-> Maillage Solene surfacique

Tailles de mailles de (0,2m à 2m près des surfaces)

Pas de temps de simulation d'1h, dans FLUENT pas d'effets d'inertie, mais succession d'états stationnaires

Dans SOLENE, inertie thermique des parois

Il faudrait réduire les pas de temps car discontinuité des taches solaires posent problèmes, mais durée de temps de calcul

Illustration : Simulation Square Fleuriot : inter-réflexions uniquement dans la partie centrale du square, 3 mois de simulation pour chaque cas : 5h00- 12h00

Pour couplage avec thermique du bâtiment, nécessité de passer à des simulations sur des périodes plus longues

Entrées - sorties

FLUENT :

- Vitesse de vent à 10m, loi de profil pour U, k et ε (direction vent fixe)
- Température et humidité en entrée de veine (selon météo pour T, H fixé en général)
- Caractéristiques des arbres (résistances en fonction de LAD)

SOLENE :

- Données géographiques
- Caractéristiques thermo-radiatives des parois, du bassin et des arbres
- Flux atmosphérique
- Usage et composition du bâtiment modélisé

- Vitesse d'air en tous points du maillage (y compris dans la végétation)
- Température, humidité, k, ε
- Flux convectif aux parois et à la surface du bassin
- Flux ET et transfert de masse à la l'interface eau/atmosphère

- Températures des surfaces
- Flux radiatifs aux surfaces
- Températures et flux aux (entre) nœuds des parois et bassin
- Consommation énergétique par étage du bâtiment (ou température libre)
- Indices de confort

Validation (SOLENE)

Hénon, A.

Canopée urbaine : relations entre températures mesurées, modélisées, et observées par satellite - modélisation aéro-thermo-radiative des émissivités effectives et des flux de chaleur urbains, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2008.

Groleau, D., Fragnaud, F., Rosant, J-M.

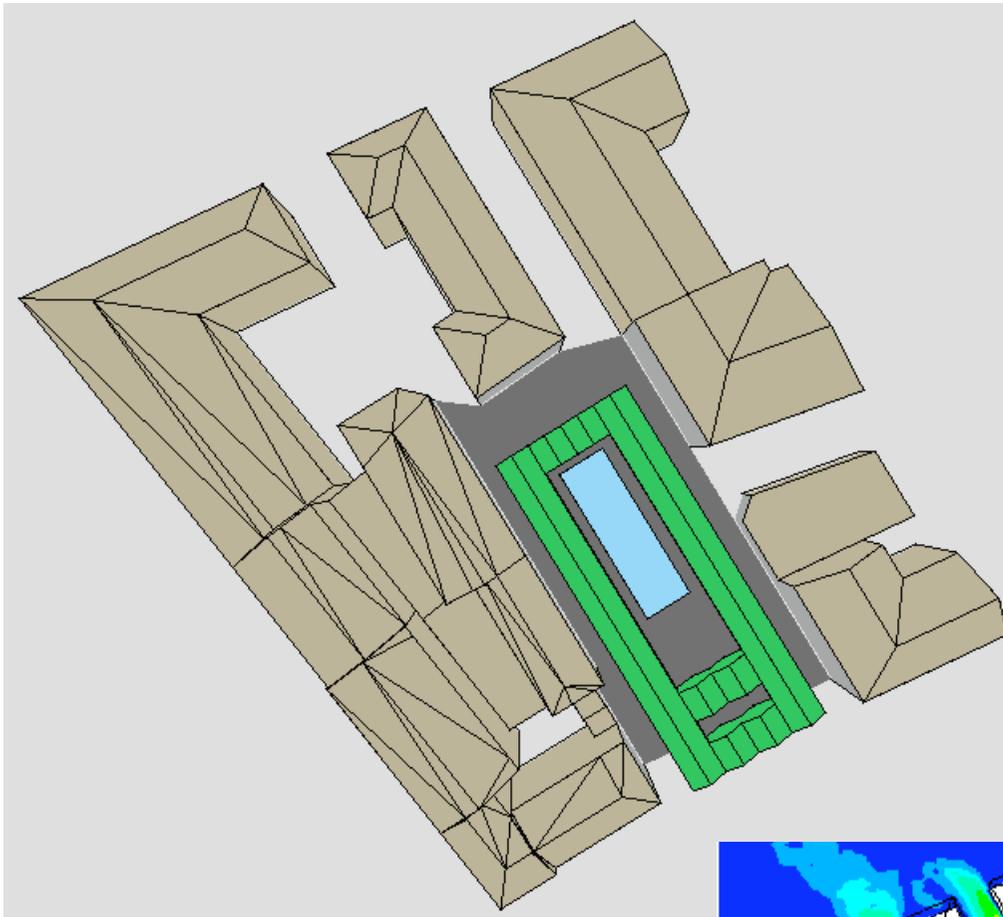
Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with the solene model, ICUC5, 2003.

Ringebach, N.

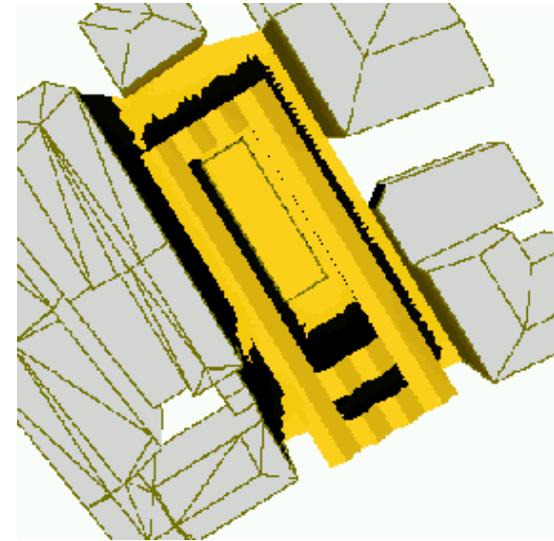
Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine: mesures, modélisation et validation sur Strasbourg, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2004.

Applications

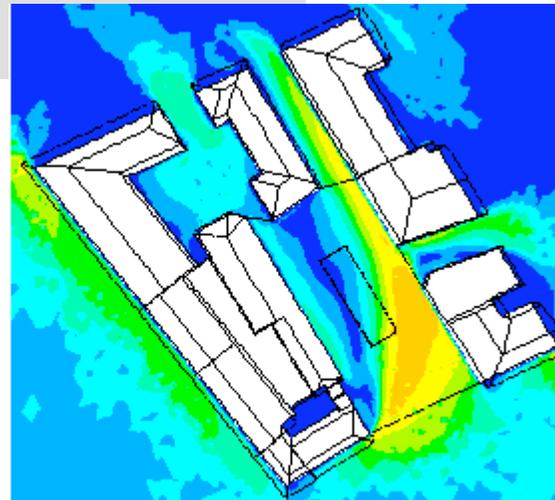
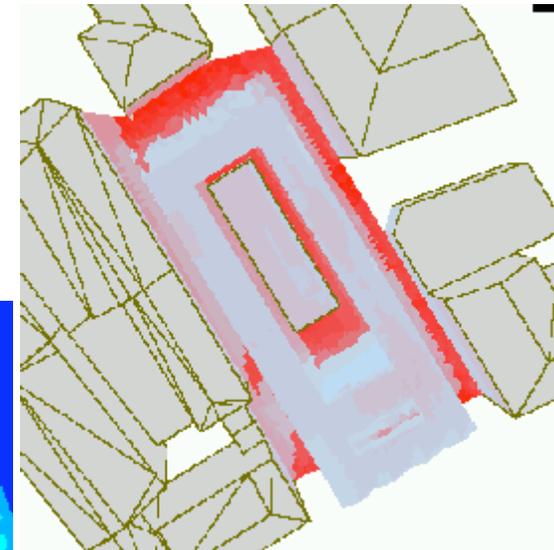
Robitu 2005, square Fleuriot (Nantes) : paroi opaque, bassin d'eau et végétation



Flux solaire



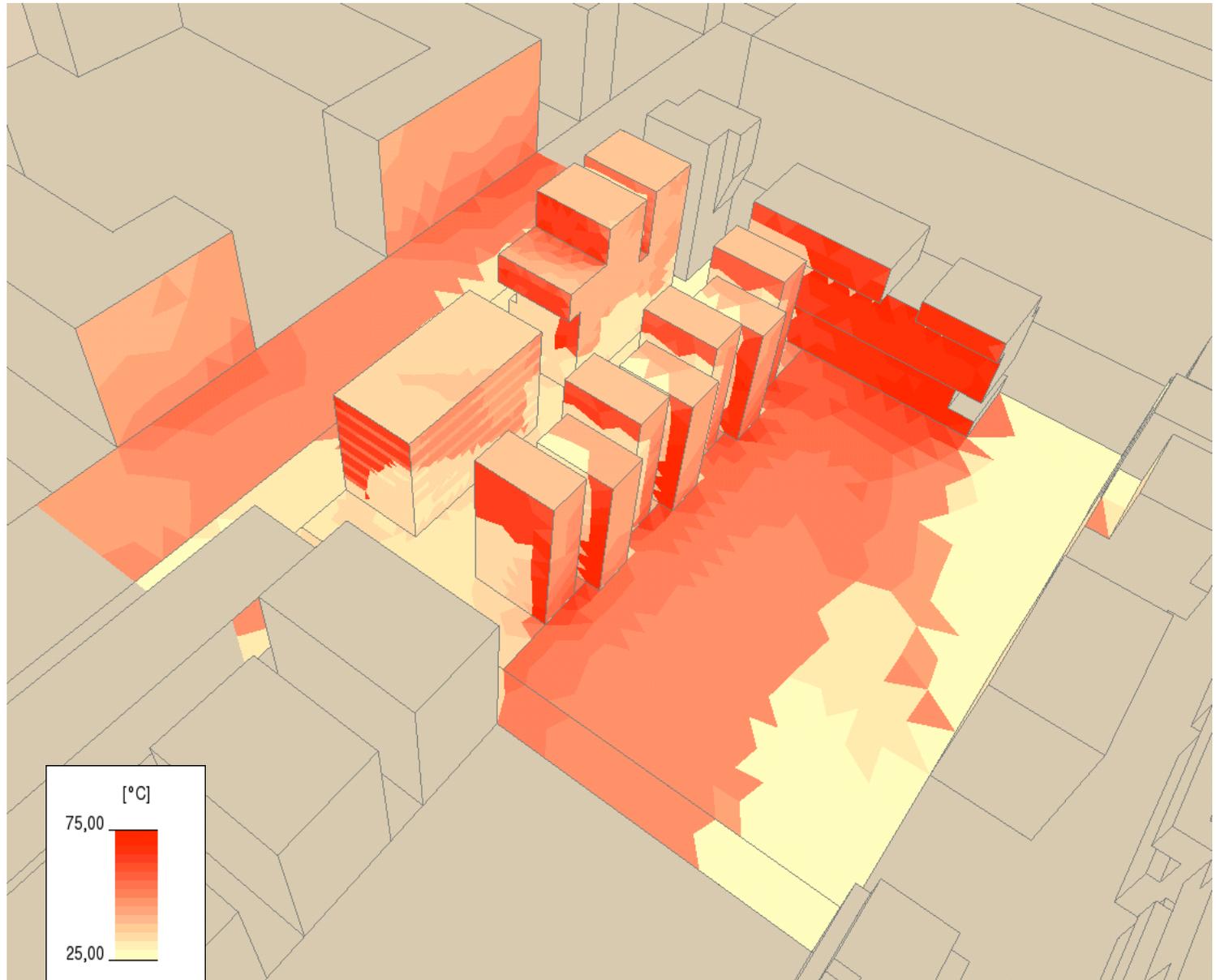
Température



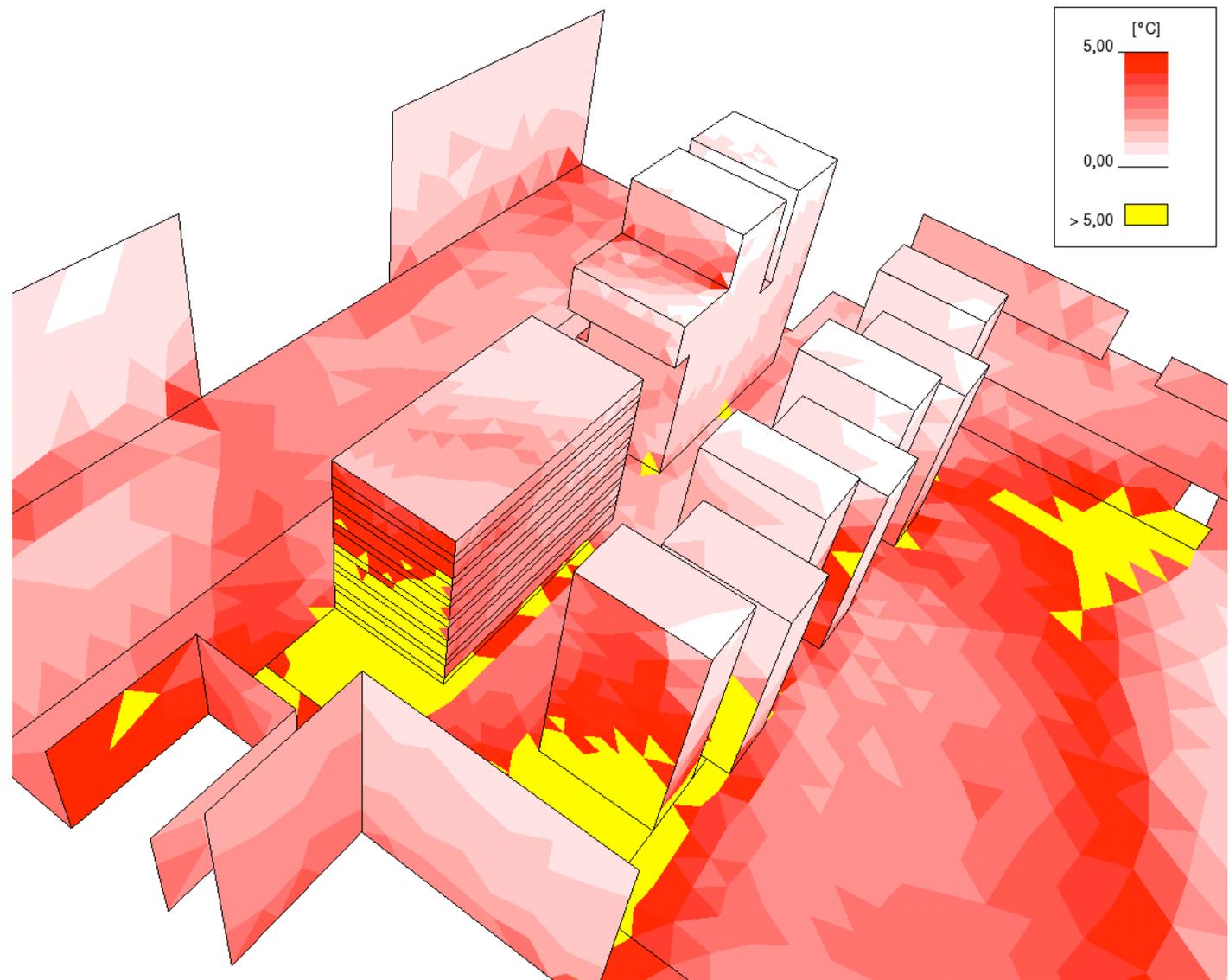
Champ vitesse

Bouyer 2009 : Application à Lyon Confluence, phase 1

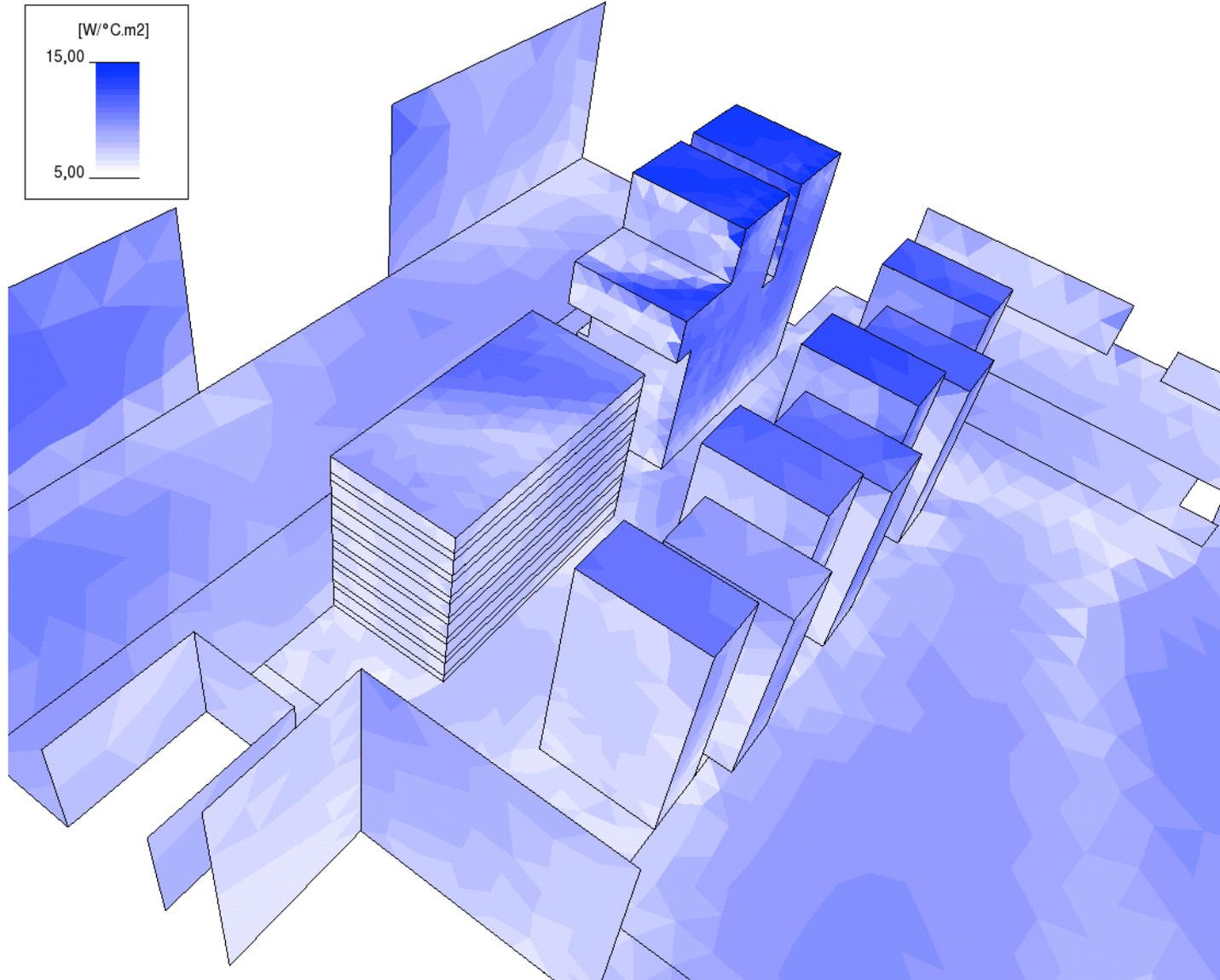
Température de surface, 15 juillet -17h



Ecart entre température d'air en entrée de veine à proximité des parois, 15 juillet -17h



Coefficient d'échange surfacique par convection calculé à partir des vitesses d'air à proximité des parois



Discussion

Modéliser l'environnement proche du
bâtiment :

Intérêt, perspectives ?