

Du matériau au bâtiment : mesure et modélisation hygrothermique des performances du matériau et impact sur le bâtiment

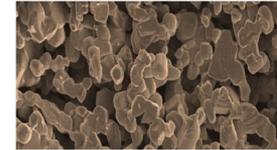
Rafik BELARBI
Professeur à l'Université de La Rochelle

Paris, 8 octobre 2013

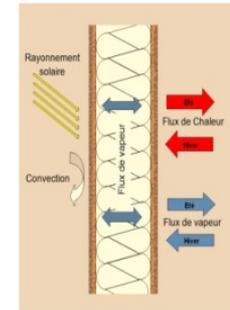
Thématique & Démarche

□ Transfert de chaleur et de masse (hydrique) à l'échelle :

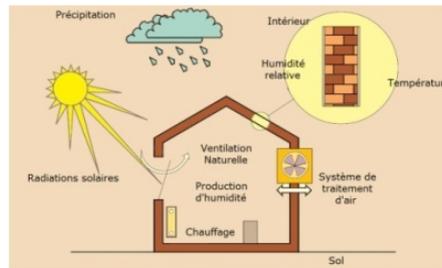
➔ du matériau poreux



➔ de l'enveloppe du Bâtiment



➔ couplage enveloppe bâtiment – ambiance



➔ Etude de l'interaction bâtiment – Microclimat urbain

Modélisation, Caractérisation,
Validation expérimentale

Problématiques, enjeux

❑ Exigences réglementaires

Partant du principe que les transferts de masse auraient de plus en plus d'influence sur les transferts de chaleur

❑ Performance énergétique et humidité

Prise en compte des transferts hydriques peut réduire la demande énergétique des bâtiments jusqu'à 30 %

❑ Qualité des ambiances et humidité

Allergies, maladies respiratoires (COV+HR élevée), croissance fongique

❑ Durabilité des matériaux et transferts hydriques

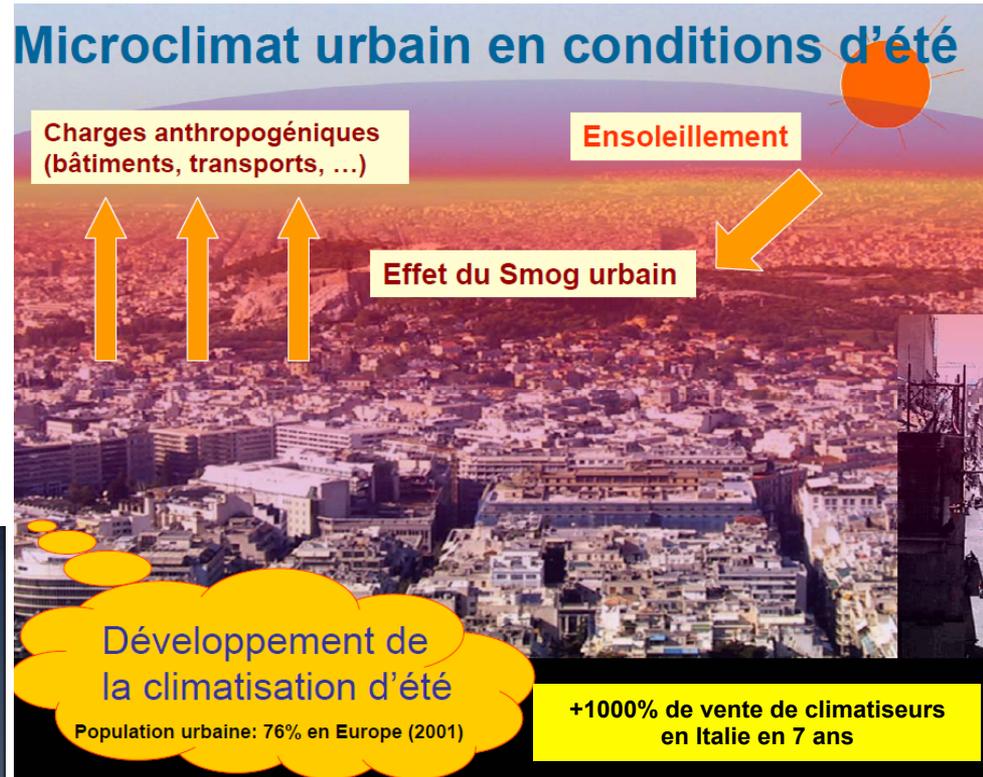
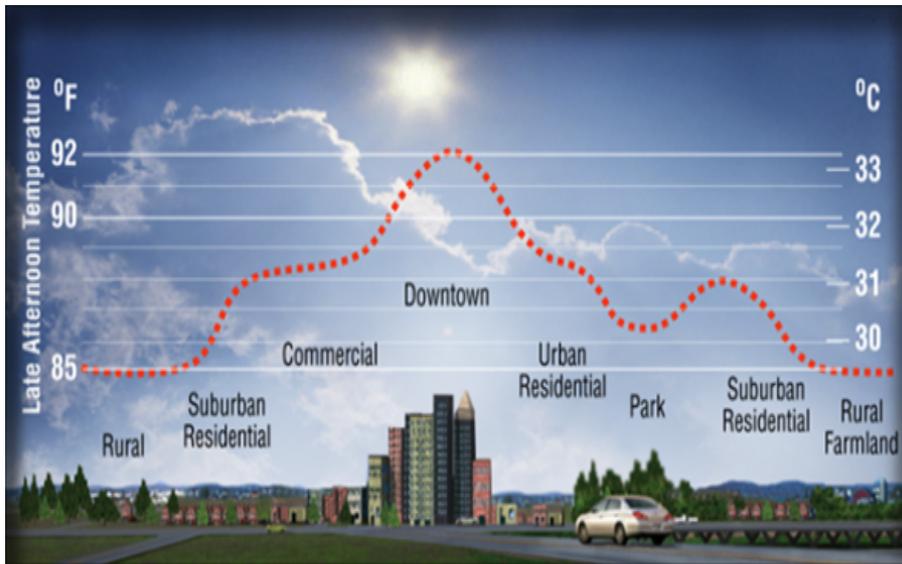
Dégradation des structures due aux transferts hydriques : corrosion, réduction de la durée de vie des ouvrages

 **Nécessité de maîtriser les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les ambiances et dans les matériaux**

Contexte : Energie-Environnement bâtiment microclimat urbain



Chauffage, ventilation, systèmes de climatisation ainsi que la lumière, l'eau et les ascenseurs contribuent à rendre les bâtiments une source importante de gaz à effet de serre et un consommateur important d'énergie.

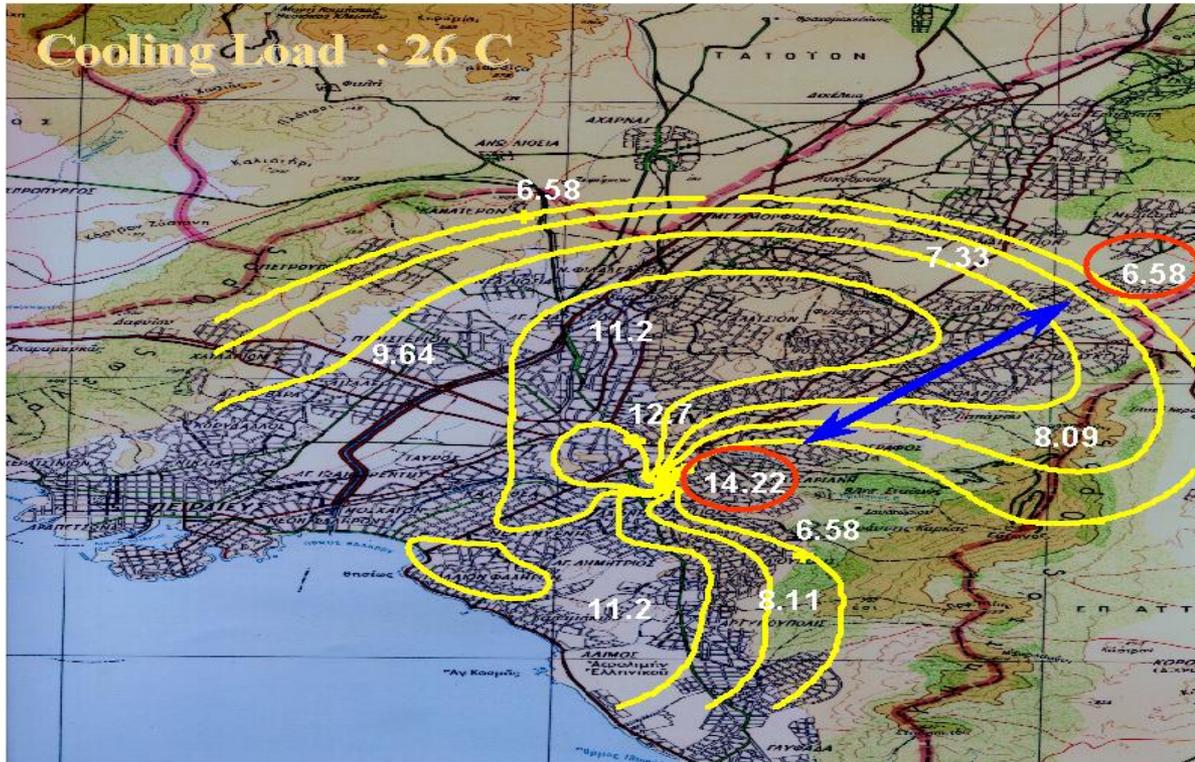


En Europe, le bâtiment représente 40% de la consommation totale d'énergie finale et 36% de l'ensemble des émissions de CO₂.

Source: Laboratoire national de Lawrence Berkeley

Contexte : Interaction microclimat urbain et bâtiment

● Effet directs et indirects sur la demande énergétique des bâtiments



- Les charges de climatisation peuvent être plus que doublées
- COP des systèmes de climatisation réduits
- (-25% à Athènes)
- Pics de puissance accrus (2 à 4% pour 1°C supplémentaire)

Distribution de la charge de climatisation [kWh/m³] à Athènes 2004, pour une consigne en température de 26°C, (Santamouris et al,2004)

Echelle du matériau

❑ Développement de modèles de prédiction du comportement thermo hydrique des matériaux

Modélisation macroscopique

Prise en compte des mécanismes de transfert de chaleur, de diffusion, de transport capillaire, de la thermodiffusion et de l'infiltration de l'air

❑ Caractérisation des propriétés des matériaux

Thermophysique, hydrique, microstructurale

Elaboration de bancs expérimentaux au laboratoire

Ecomatériaux, Matériaux biosourcés, Matériaux recyclés

Matériaux cimentaires, Bois, isolants fibres de bois, Chanvre, substrat de parois végétales

❑ Validation des modèles

Développement de plateformes expérimentales

Confrontation avec les données expérimentales

Confrontation inter-modèles (différents modèles; solutions analytiques)

Caractérisation expérimentale

Bilan massique

ρ_s : Densité sèche des matériaux
 C_m : Capacité hydrique
 δ_m : Coefficient de diffusion
 ε : Coefficient de gradient thermique
 k : Coefficient d'infiltration de l'air

Bilan thermique

C_p : Chaleur spécifique
 λ : Conductivité thermique
 L_{vl} : Chaleur latente
 γ : Chaleur de sorption-désorption
 $\sigma = \delta_v / \delta_m$

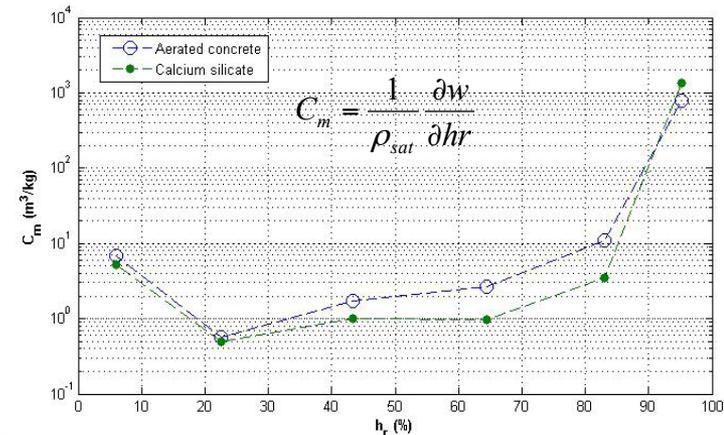
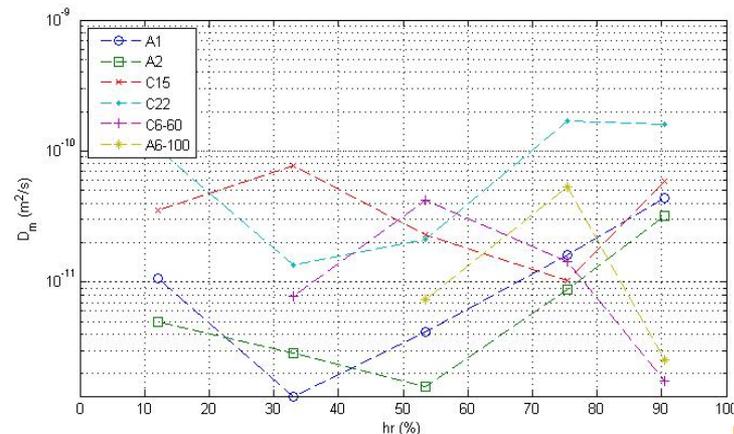
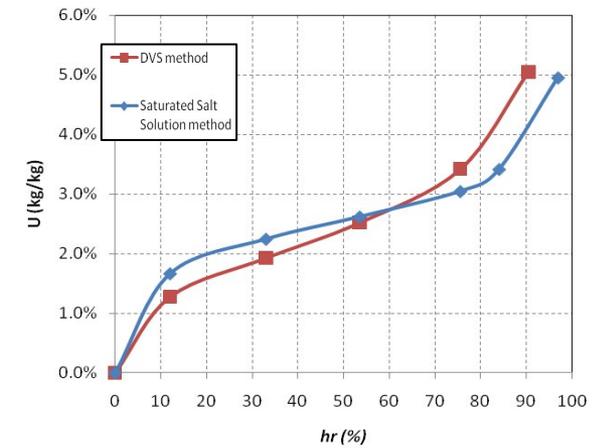
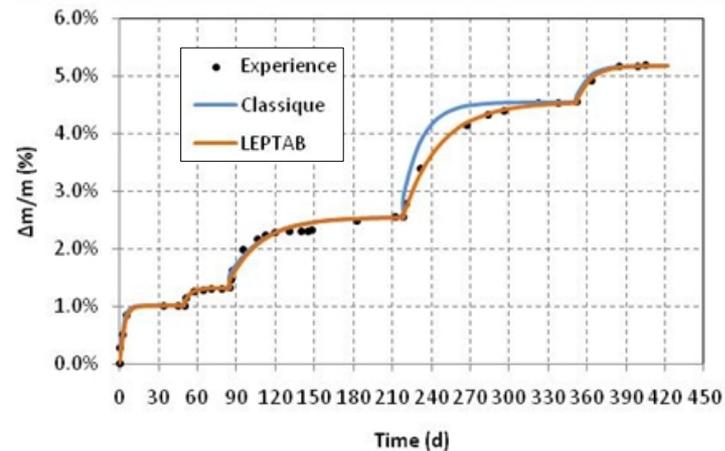
Isothermes d'adsorption/désorption

- Caractérisation de la variabilité des propriétés hygrothermiques (APPLET – ANR RGCU projet)
- Etude de l'hystérésis (Coupelles– VSA-DVS-Belsorp)
- Effets de la taille des échantillons (Coupelles– VSA-DVS-Belsorp)

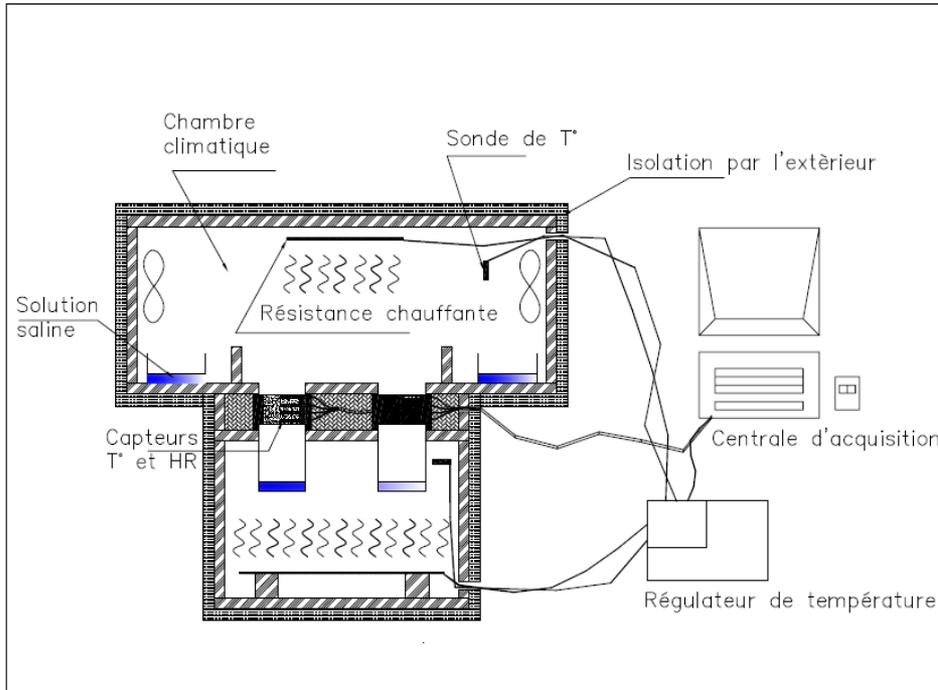
Caractérisation des propriétés de transfert

Conditions isothermes

- Méthode gravimétrique (solutions salines saturées) : durée de l'essai **2 ans**
- Méthode dynamique DVS (Dynamic Vapor Sorption) : durée de l'essai **2 semaines**



Coefficient de gradient thermique

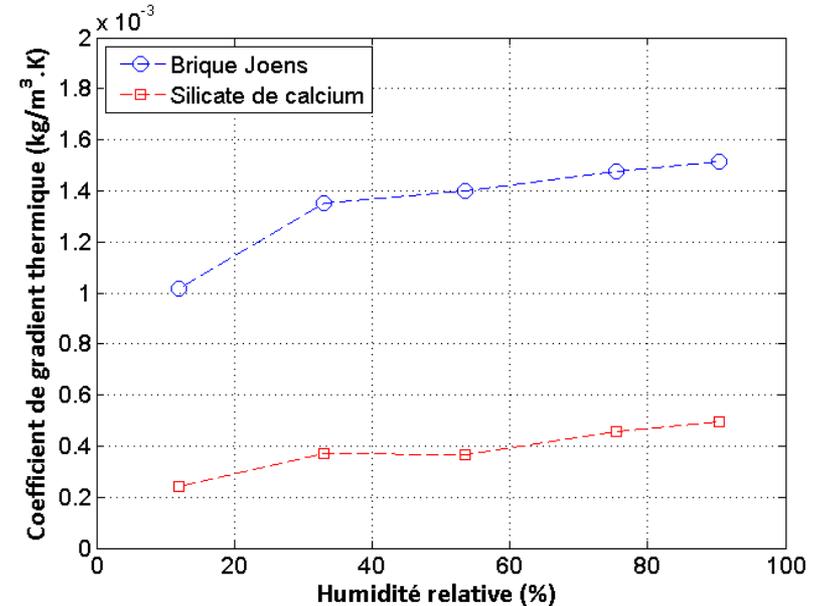


Non-isotherme Isotherme

$$\frac{1}{\delta_{v+l}} = -\frac{1}{j_i} \cdot \frac{d\rho_{vi}}{dx} \Big|_{\rho_{vi}(x)=\rho_v} \quad -j_i = \delta_{v+l} \cdot \frac{d\rho_{vi}}{dx}$$

$$-j_t = \delta_{v+l} \cdot \frac{d\rho_{vt}}{dx} + \delta_{v+l} \cdot \varepsilon \cdot \frac{dT}{dx}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{dT}{dx}} \cdot \left[\frac{j_t}{j_i} \cdot \frac{d\rho_{vi}}{dx} \Big|_{\rho_{vi}(x)=\rho_{vt}} - \frac{d\rho_{vt}}{dx} \right]$$

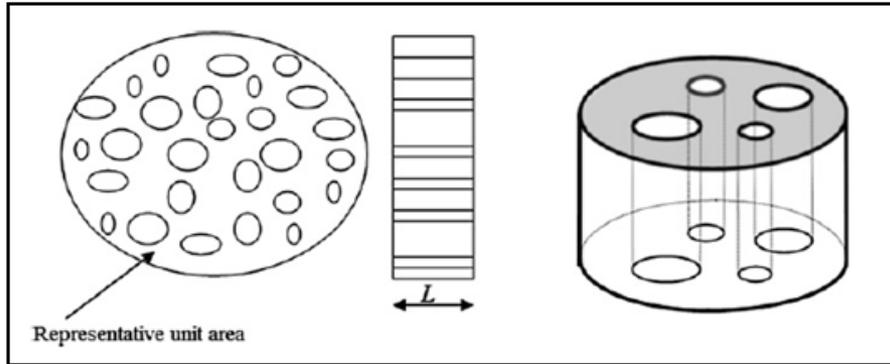


- Suivi dans le temps : T, HR de l'ambiance;
- Mesure à différentes positions de l'échantillon (profil) : T, HR, ρ_v
flux massique isotherme,
flux massique non isotherme

Caractérisation

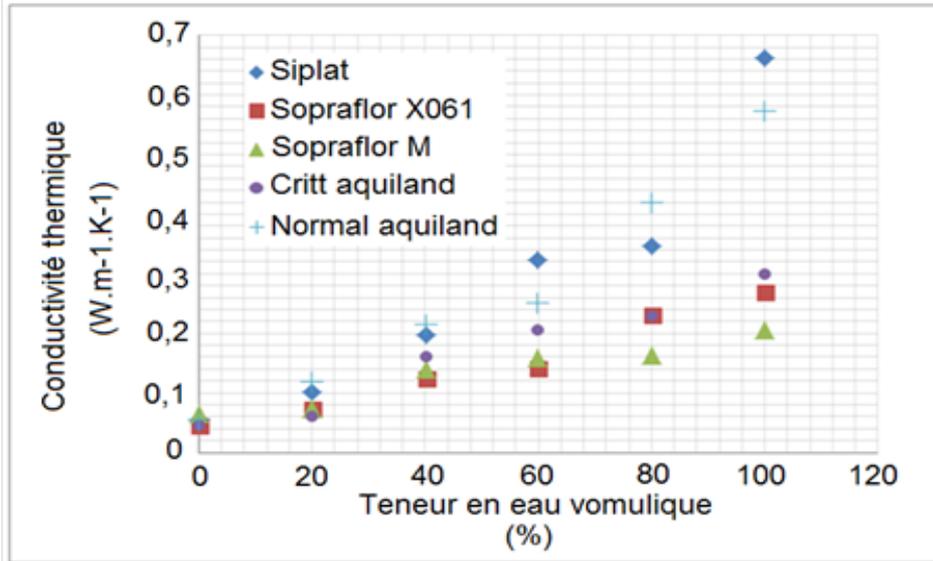
❖ Caractérisation microstructurale

➔ Porosité au mercure



➔ ❖ Caractérisation thermo-physique

❖ Conductivité thermique

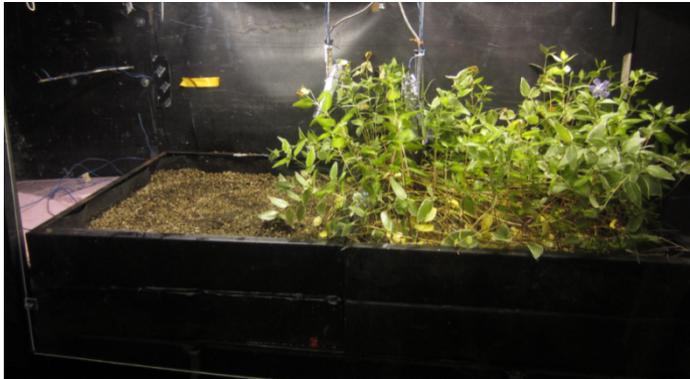
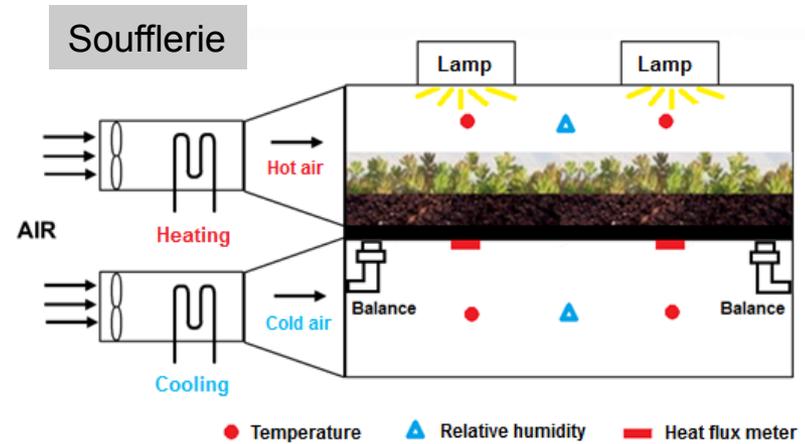


Caractérisation de l'évapotranspiration

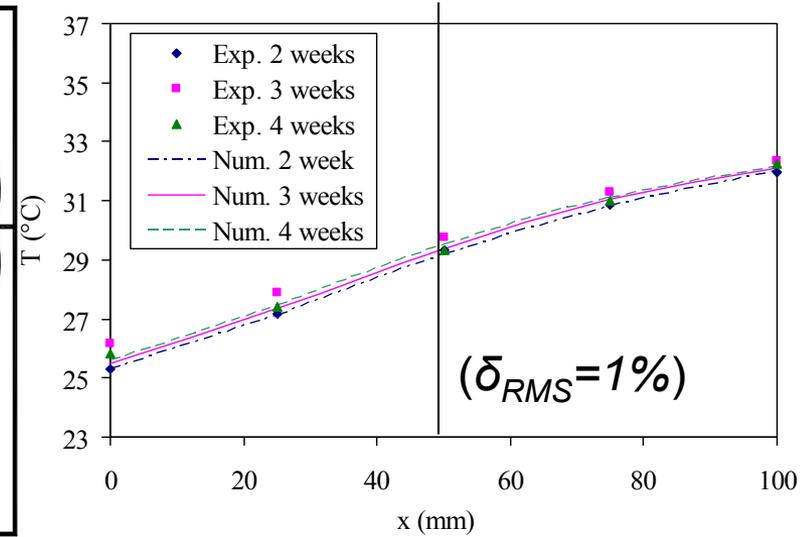
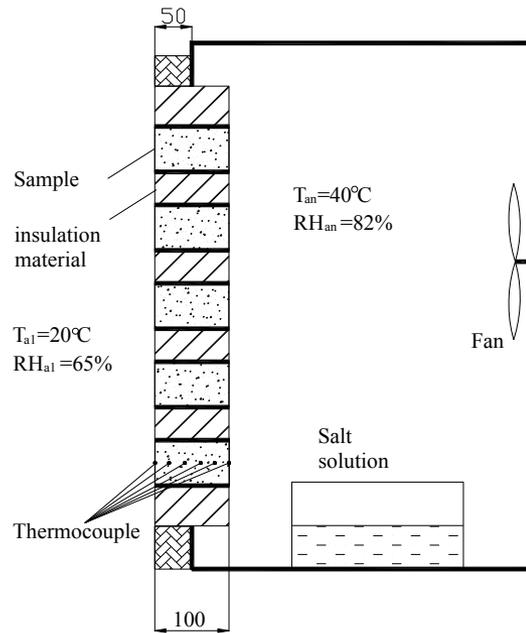
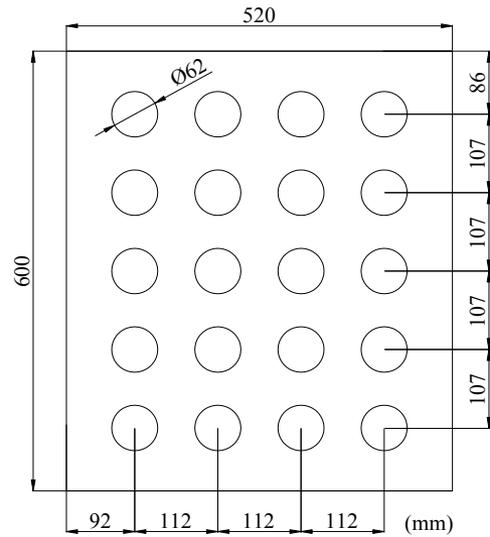
Dimensions des bacs 0.61m*0.61m
Vitesse du vent 2.2 m/s
Température de l'air (25-60°C)
HR (10-50%)
Radiations 100W/m²
Chambre froide (7-8°C)

Objectives : Résistance thermique des TTV
Evapotranspiration
Caractérisation de l'irrigation

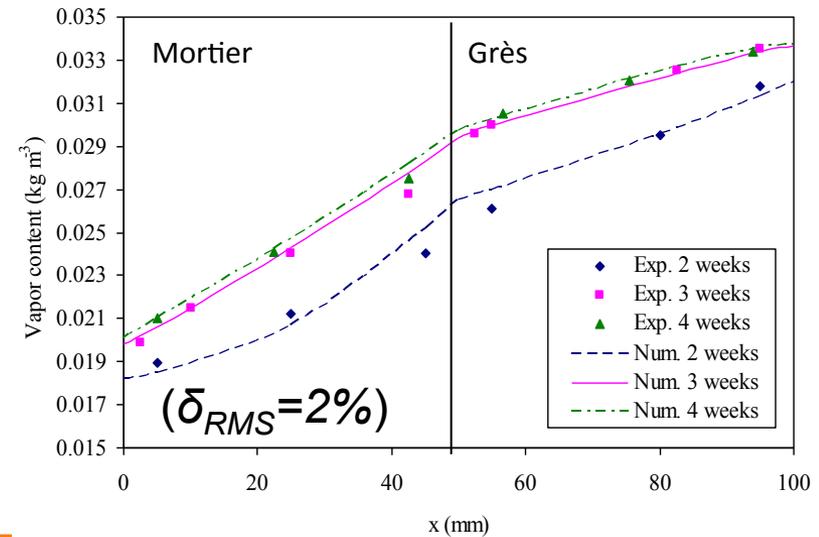
Collaboration GBRL (Portland State University)



Validation expérimentale



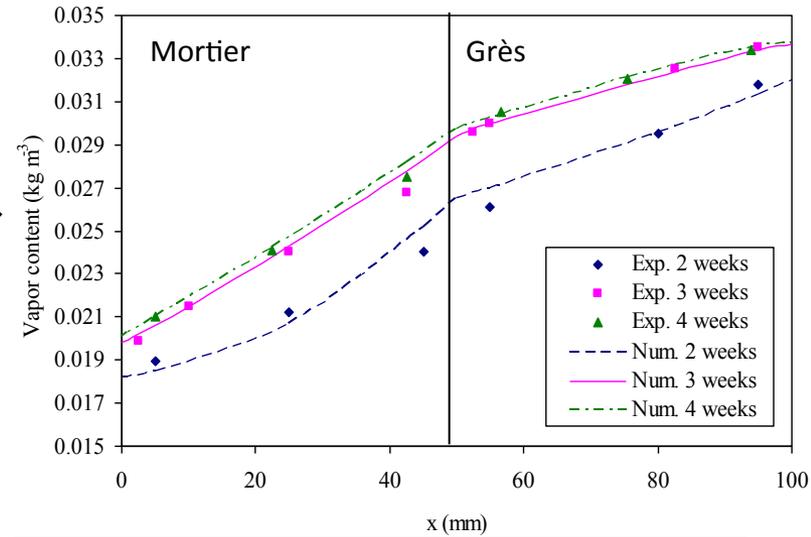
Collaboration
(Université de Lund)



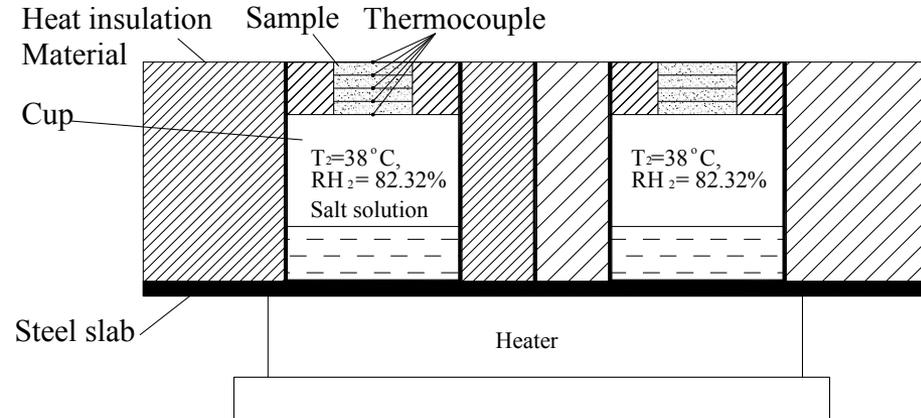
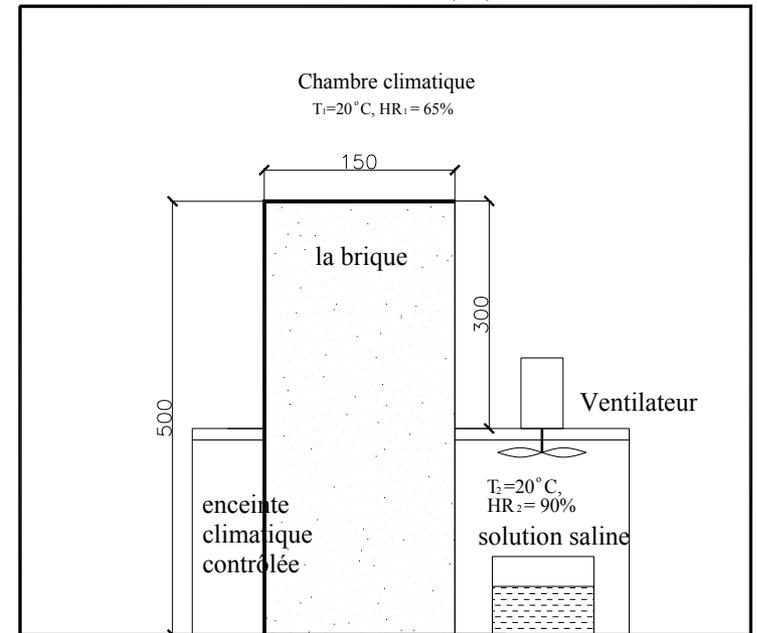
Validation expérimentale

Climatic room
 $T_1=20^\circ\text{C}$, $\text{RH}_1=65\%$

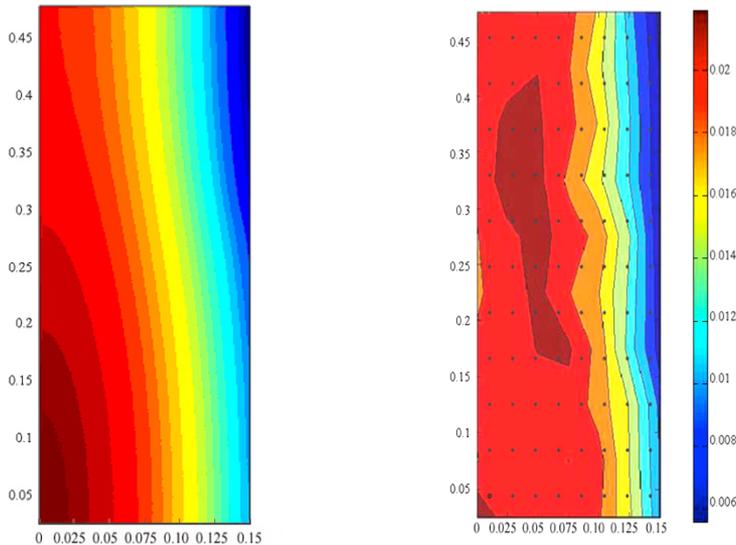
Validation 1D Bicouche



Validation 2 D monocouche



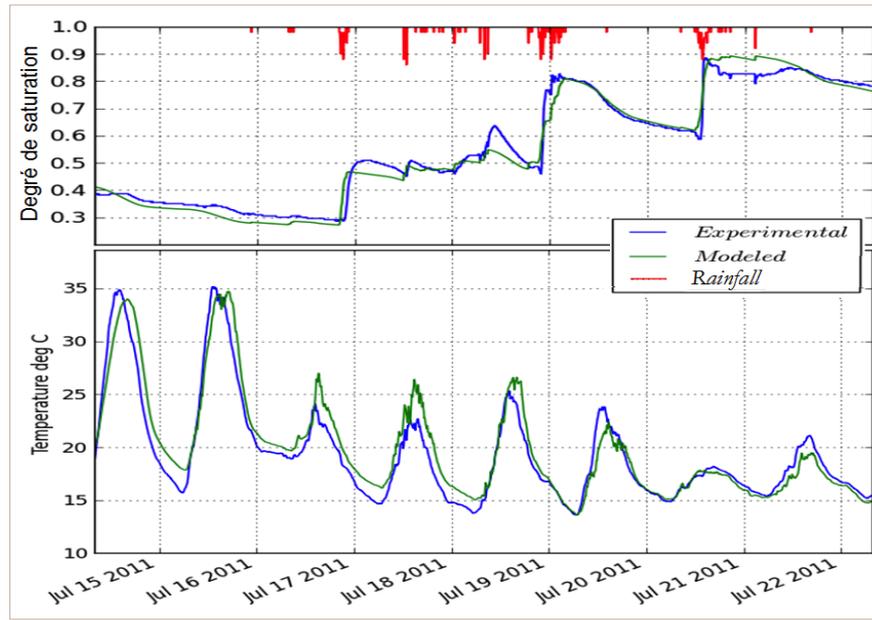
Collaboration (University Lund)



Validation expérimentale (échelle 1:10)

5 bâtiments, 4 rues canyons, 2 toitures végétalisées, 1 mur végétal

Climabat

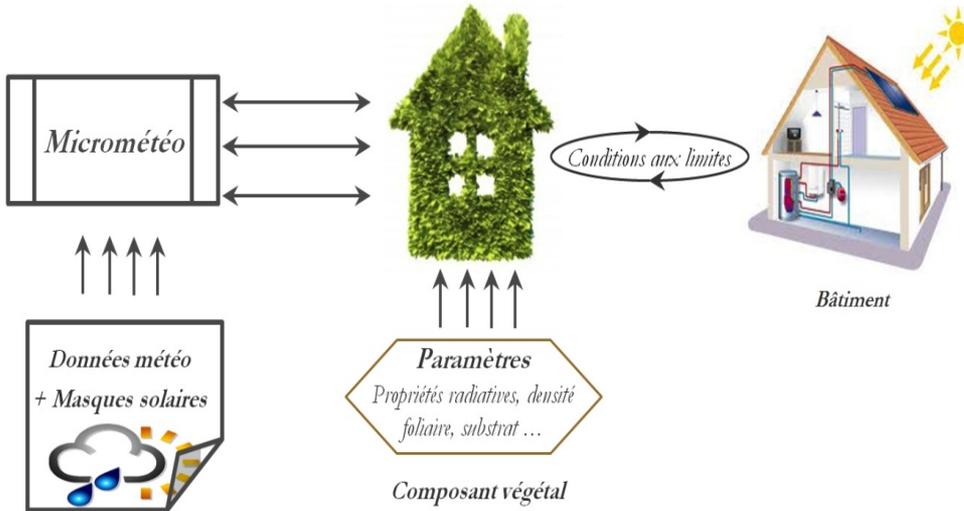


Capteur : Station météo, Pyranomètre, Pyrgeomètre, thermocouples, capteurs de teneurs en eau, capteurs flux thermiques, capteurs de précipitation

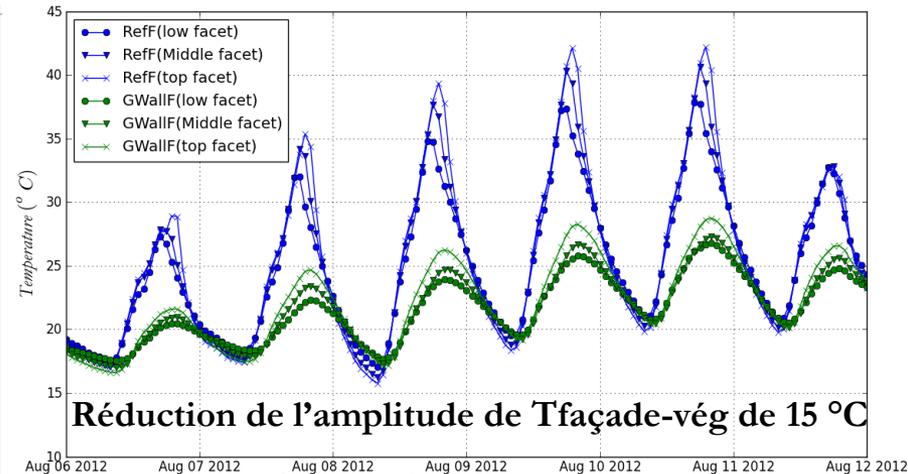
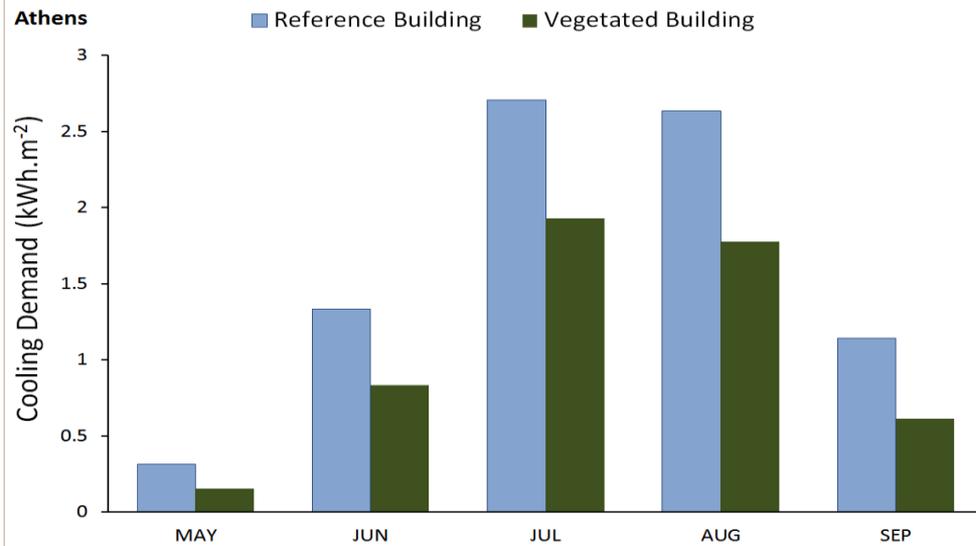
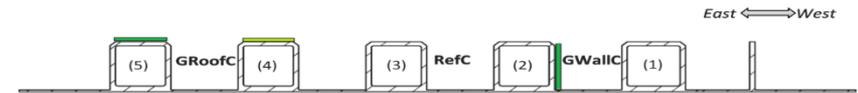


Couplage avec le bâtiment

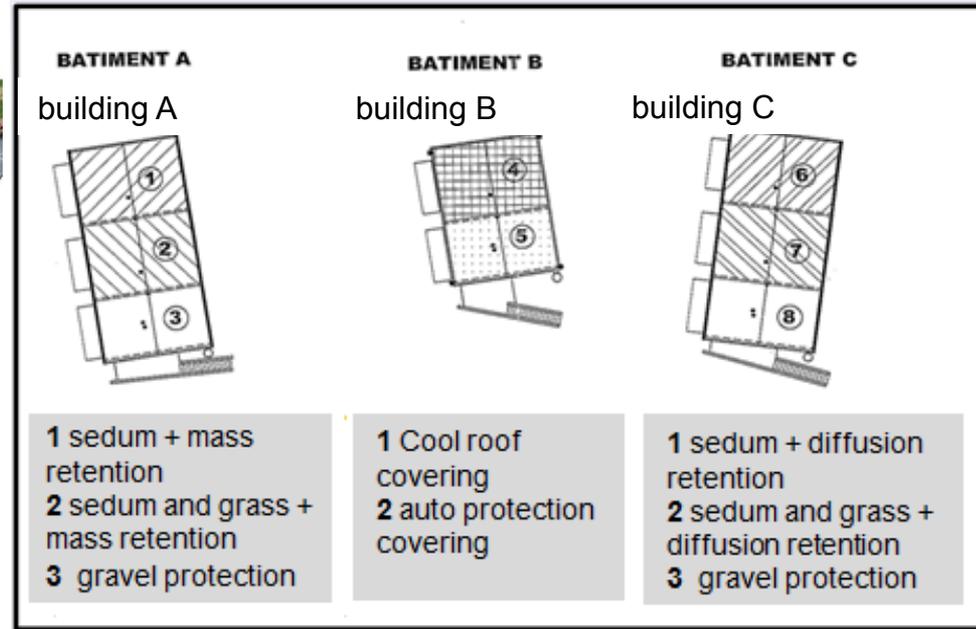
Couplage du modèle de paroi à un code de simulation thermohygrique des bâtiments



Interaction Bâtiment-Microclimat urbain (maquette 1/10, in-situ 1/1)



Expérimentation (échelle 1:1)



Modélisation à l'échelle du bâtiment

- ❖ Modèle de paroi intégré dans un code de thermique du bâtiment

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \text{div}[D_m (\nabla \omega + \delta \nabla T + \alpha \nabla P)]$$

$$C \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(a_t \nabla T + \delta_t \nabla \omega + \zeta \nabla P) + h_{lv} \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

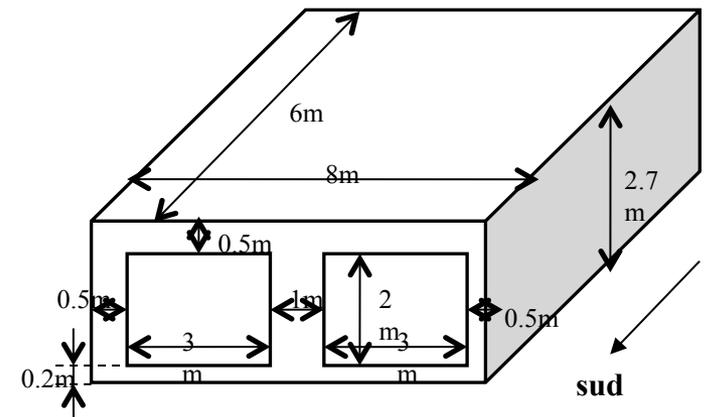
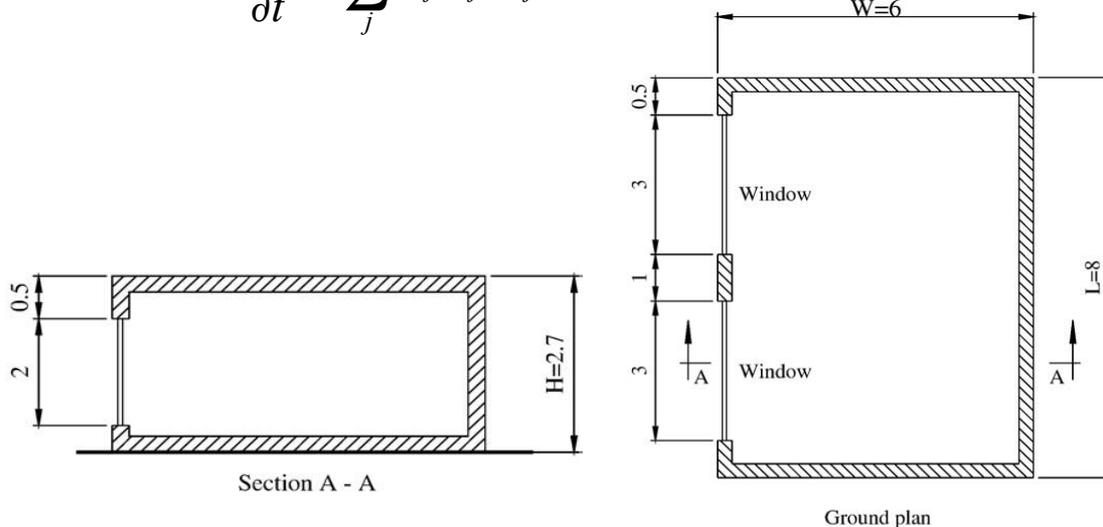
$$h_a \frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(\lambda_f \nabla P) + \rho_s \chi \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

- ❖ Equations de bilan (Witt, 2000 ; Hagentoft, 2001)

$$V \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \sum_j S_j g_{in,j} + M_{prod.} + M_{HVAC} + nV(\rho_{vo} - \rho_{vi})$$

$$\rho C_P V \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_j S_j \alpha_j (T_j - T_i) + Q_{sol} + Q_{in} + nv\rho C_P (T_o - T_i)$$

Cellule test BESTEST
(Annexe 41, IAE 2005)

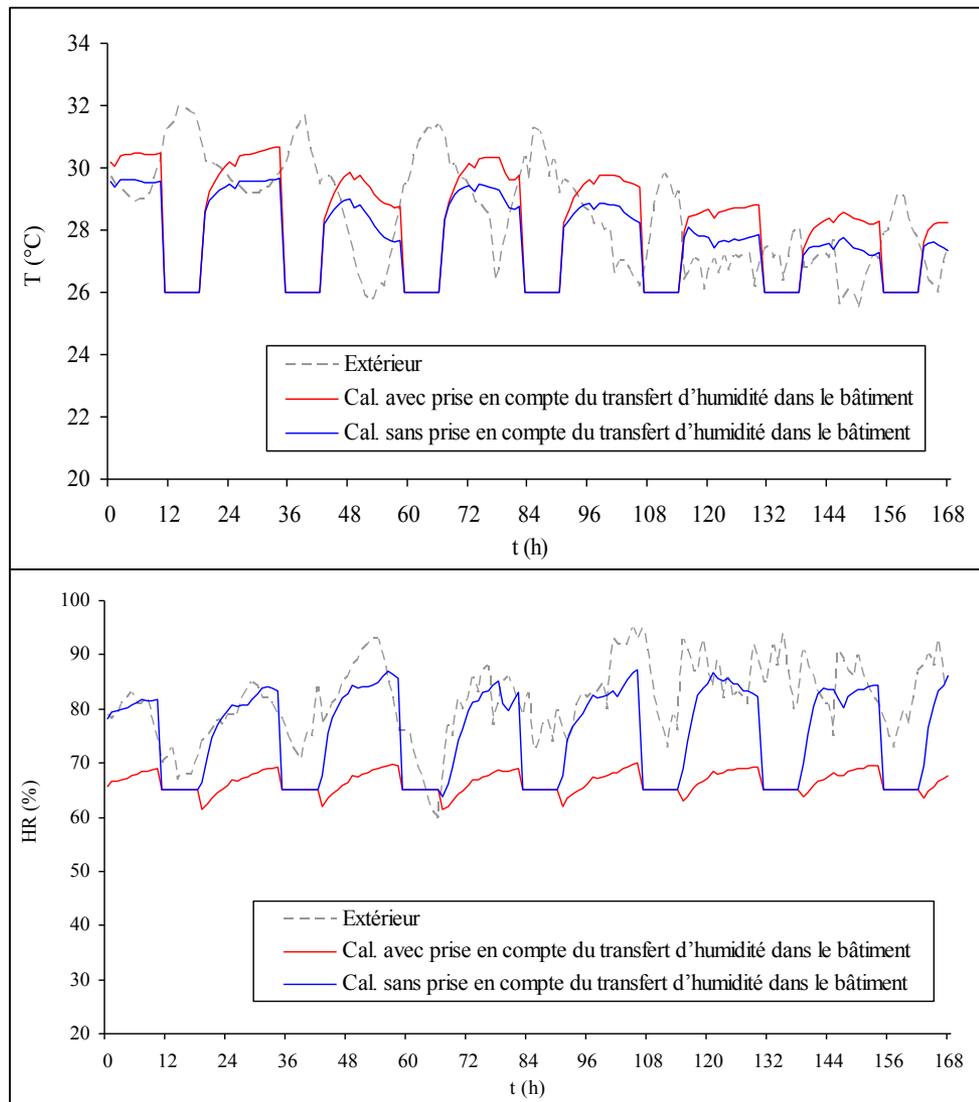


Modélisation à l'échelle du bâtiment

Incidence de l'humidité sur la charge du bâtiment & la consommation d'énergie
Cellule BESTEST

Mêmes conclusions que celles de :
(Mendes et al., 2003 ; Kunzel, 2005)

Incidence sensible sur l'humidité et peu
sur les températures



Transfert hygrothermique		Avec	Sans	(%)
Climat Tropical Climat tempéré	Énergie de refroidissement (kWh m ⁻² a ⁻¹)	204.0	234.9	15
	Charge maximum de refroidissement (kW)	45.8	49.1	7
		1.6	2.2	30
		1,0	1.1	10

Conclusion

- ❑ Modélisation des transferts couplés à l'échelle des matériaux de construction
- ❑ Caractérisation expérimentale des propriétés de transfert
 - ✓ Enrichissement de la base de données (D_m , $U=f(h_r)$, C_m , K)
 - ✓ Evaluation du coefficient de gradient thermique et la perméabilité à l'air (originalité de l'approche)
- ❑ Généralisation au cas d'un bâtiment : impact de la prise en compte des transferts sur le confort et sur la consommation énergétique
- ❑ Caractérisation des matériaux vis-à-vis des transferts
 - ✓ Améliorer les bases de données existantes
 - ✓ Prise en compte des phénomènes d'hystérésis
 - ✓ Variabilité des propriétés
- ❑ Modélisation à l'échelle des matériaux
 - ✓ Etendre l'étude à d'autres matériaux complexes (substrats de TTV)
 - ✓ Modèle hygrothermique de parois complexes
 - ✓ Intégration dans un code de simulation énergétique des bâtiments

Merci



Merci

Contexte : Interaction microclimat urbain et bâtiment

L'utilisation des parois végétalisées est une solution intéressante pour améliorer la performance énergétique du bâtiment, confort des occupants (thermique, acoustique).



Réduction de la pollution, biodiversité, qualité d'air, Rétention des eaux pluviales et réintroduction de l'eau de pluie dans le cycle de l'eau par consommation par les plantes et évapotranspiration du couvert végétal.