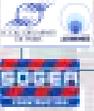


ADEME - PUCA
Journée thématique
Enveloppe du Bâtiment

MURS SOLAIRES À ISOLATION RENFORCÉE

Bruno PEUPORTIER et Alain GUIAVARCH
ARMINES - École des Mines de Paris – CENERG

Bruno MARCONATO et Henri SACCHI
SOGEA CONSTRUCTION



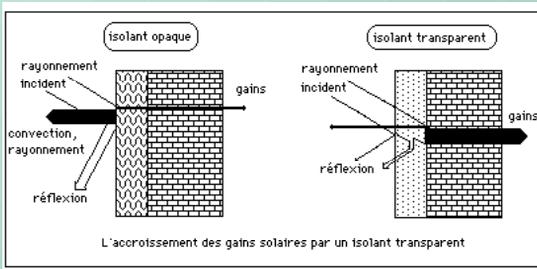
Objectifs de la recherche

- ▶ Réduire d'un facteur 4 les émissions de CO2 des bâtiments à l'horizon 2050, renforcement progressif de la RT et amélioration des bâtiments existants
- ▶ Façades double peau comme alternative à l'isolation opaque, intéressant aussi en réhabilitation
- ▶ Evaluer la productivité thermique pour différentes typologies (avec et sans circulation d'air)
- ▶ Concevoir un composant optimisé
- ▶ Evaluer l'intérêt économique et environnemental du concept sur des cas types (logements collectifs, maison individuelle)



Evaluation du potentiel

- ▶ Une maison bien exposée en Ile de France reçoit, sur une saison de chauffe, un rayonnement solaire de l'ordre de 8 fois supérieur à ses besoins de chauffage (1,5 fois en décembre)
- ▶ Seulement 2 à 5% de l'énergie solaire reçue est valorisée actuellement
- ▶ Peut-on valoriser cette énergie plus efficacement ?
 - Utilisation de vitrages isolants ou d'isolants transparents
 - Stockage de l'énergie, relève des gains directs par les vitrages en soirée



2

Typologie – Différents types d'intégration

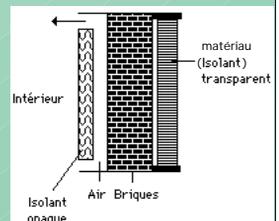
Allège de vitrage, préchauffage



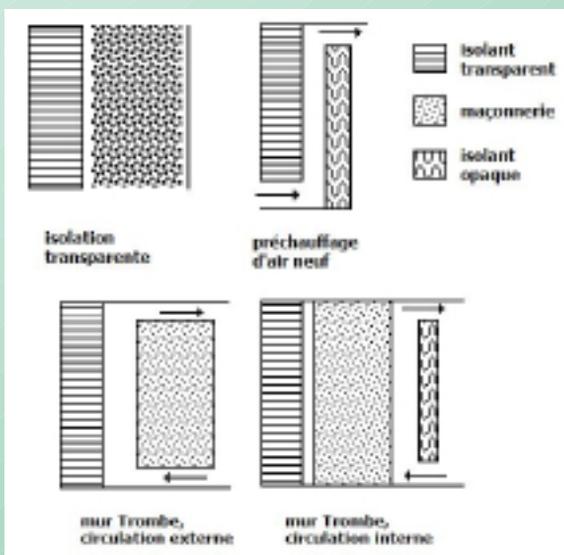
Double peau, ventilation



Mur Trombe, chauffage



Typologie : différents modes de circulation d'air

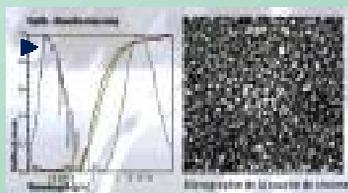
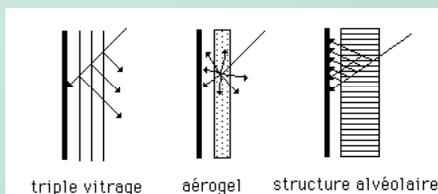


4

Différents phénomènes physiques couplés

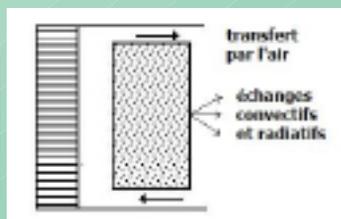
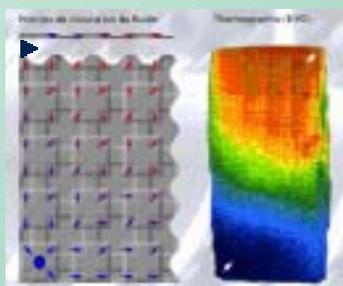
- Captage de chaleur : transmission

absorption : $\alpha = 0.96$, $\varepsilon = 0.05$



- transfert

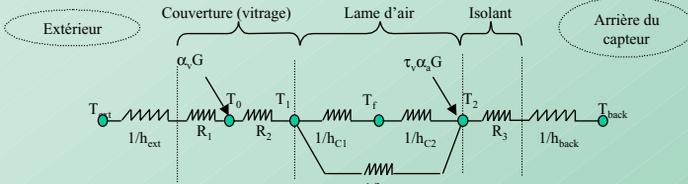
Stockage et distribution de chaleur



5

Modélisation – Solaire thermique à air

► Modèle de capteur à air



Transfert convectif entre le capteur et l'air en mouvement : $\dot{m} C_p \frac{\partial T_f}{\partial x'} = h_{c1} A_1 (T_1 - T_f) + h_{c2} A_2 (T_2 - T_f)$ (1)

- avec \dot{m} : débit massique de l'air dans le capteur (kg/s),
 T_f : température moyenne de l'air (K)
 C_p : chaleur spécifique de l'air (J/kg/K),
 $x' = x/L$: position (relative) par rapport à l'axe principal (parallèle au sens d'écoulement du fluide)
 A_1 , (resp. A_2) : surface de la couverture (resp. de l'absorbeur).

Bilan des flux thermiques aux trois nœuds de température T_0 , T_1 et T_2 : $h_{c1} A_1 (T_1 - T_f) = h_{fa} A_1 (T'_{sol} - T_f)$
 $h_{c2} A_2 (T_2 - T_f) = h_{fr} A_2 (T'_R - T_f)$ (2)

- avec T'_{sol} = fonction (T_{ext} ; G , h_{ext} , h_r , α_v , ...)
 T'_R = fonction (T_{back} , h_{back} , h_r , τ_v , α_a , ...)
 h_{fa} = fonction (h_{c1} , h_{ext} , ...)
 h_{fr} = fonction (h_{c2} , h_{back} , ...)

$$\Rightarrow \dot{m} C_p \frac{\partial T_f}{\partial x'} = h_{fa} A_1 (T'_{sol} - T_f) + h_{fr} A_2 (T'_R - T_f)$$

6



Modélisation – calcul du débit d'air

► Convection naturelle

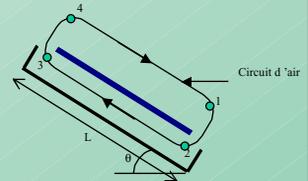
- Etude bibliographique (Brinkworth, Hypri...)
- Modèle
 - Conservation de la quantité de mouvement

(régime stationnaire) :

$$gL \sin(\theta) \Delta\rho = \frac{1}{2} K_{f1} \rho_2 U_2^2 + \frac{1}{2} K_{f3} \rho_3 U_3^2 + \frac{1}{2} f \frac{L}{D_h} \rho_m U^2$$

avec $\Delta\rho = \rho_0 - \rho_m$

- U : vitesse moyenne de l'air dans le capteur,
 U_2 (resp. U_3) : vitesse moyenne de l'air à l'entrée (resp. à la sortie) du capteur,
 L : longueur du capteur,
 w : largeur du capteur,
 d : épaisseur de la lame d'air,
 D_h : diamètre hydraulique du conduit,
 θ : inclinaison du capteur par rapport à l'horizontal,
 f : coefficient de frottement dans la lame d'air,
 ρ_0 : densité de l'air à l'extérieur,
 ρ_m : densité moyenne de l'air dans le capteur,
 ρ_2 (resp. ρ_3) : densité de l'air à l'entrée (resp. à la sortie) du capteur,
 K_{f1} , K_{f3} : coefficients de perte de charge à l'entrée et à la sortie du capteur,
 g : accélération universelle (m/s²).



7

Modélisation – Calcul du débit d'air

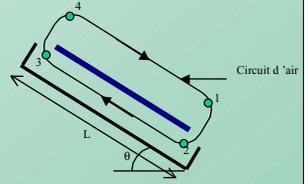
► Convection naturelle

- Conservation de la masse :

$$U = \frac{\dot{m}}{wd\rho_m}, \quad U_2 = \frac{\dot{m}}{wd\rho_2} \quad \text{et} \quad U_3 = \frac{\dot{m}}{wd\rho_3}$$

$$\text{et } \rho_2 \cong \rho_3 \cong \rho_m \cong \rho_0$$

$$\Rightarrow \dot{m} \left[K_{f1} + K_{f2} + f \frac{L}{D} \right] = \frac{2\delta_s P_{TH} (\rho_0 wd)^2 g L \beta \sin(\theta)}{C_p}$$



- Si écoulement laminaire :

$$f = f_0 + \frac{f_1}{\left(\frac{L}{D_h}\right)} + \frac{f_2}{Re^n}$$

$$\Rightarrow A\dot{m}^3 + B\dot{m}^2 + C\dot{m} + D = 0$$

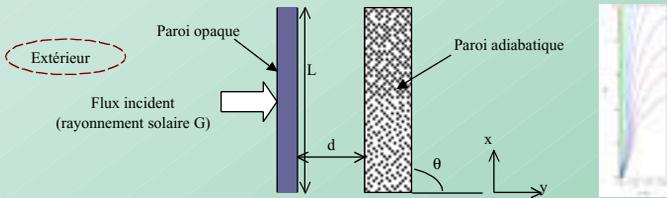
$$Re = U D_h / \nu$$

► Couplage débit / transfert convectif

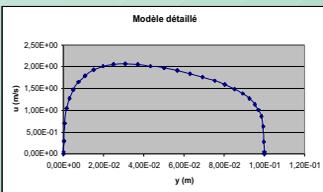


Modélisation – Ecoulement d'air

► Validation : comparaison avec outil de type CFD ('EtuCo' – LEEVAM, Univ. Cergy)



- Écoulement turbulent



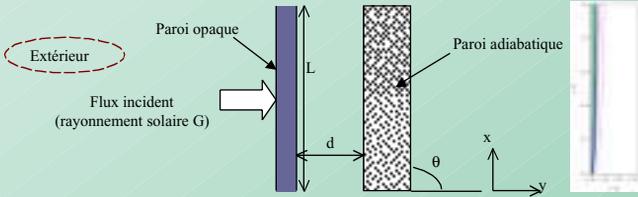
Paramètres									
Paramètre	Unité	Val	Unité	Val	Paramètre	Unité	Val	Unité	Val
Longueur	m	1.00	m	0.0001	Angle	deg	18.2	Angle	deg
Rayon	m	0.01	m	0.0001	Angle	deg	18.2	Angle	deg

Résultats			
Paramètre	Unité	Modèle	Reff
Nombre de Reynolds (Re)		1.00	1.40
Nombre de Reynolds (Re)		21.9	18.2
Nombre de Reynolds (Re)		4.60E+01	21.9
Nombre de Reynolds (Re)		4.60	18.2
Nombre de Reynolds (Re)		11.01E+01	18.2

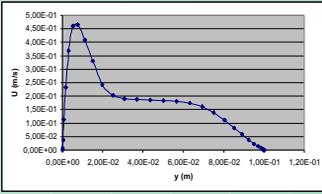


Modélisation – Ecoulement d'air

► Validation : comparaison avec outil de type CFD ('EtuCo' – LEEVAM, Univ. Cergy)



■ Ecoulement laminaire



Paramètres						
Paramètre	L	d	u ₀	Re _{crit}	Re	U _{crit}
Unité	m	m	m/s			
Valeur	7	1.9	1	2300	13.2	480

Méthode			
Paramètre	Modèle	Erreur	
Flux incident G (W/m²)	101.8	11.1	+11%
T _{int} (°C)	22.5	21.5	+46%
T _{ext} (°C)	49.1	50.7	+32%
T _{ext} (°C)	49.1	51.7	+52%
Flux de rayonnement G _{int} (W/m²)	208.1	241.9	+17%

- Si la valeur du coefficient d'échange convectif calculée par les corrélations est remplacée par la valeur calculée avec le modèle 'EtuCo', l'écart sur la puissance thermique passe de 64 % à 25 %.

10

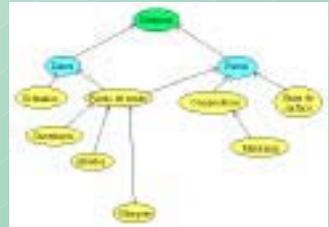
Modélisation - Bâtiment et système solaire

► Modèle thermique de bâtiment

- Modèle aux différences finies réduit par analyse modale
- Découpage en zone thermique
- Modèle dynamique, prise en compte de l'inertie
- Conception bioclimatique (assurer un niveau de confort tout en minimisant les besoins énergétiques, en prenant en compte le climat)
- Solaire passif (véranda, vitrage, protection solaire...)

► Développement logiciel : outil de simulation 'COMFIE' (CENERG)

Structure de données :



► Couplage composant solaire / bâtiment

► Enveloppe du bâtiment et composant solaire

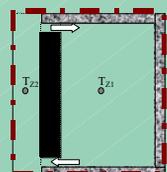
- Exemple : capteur à air

Légende :

- : absorbeur
- : couverture
- : isolant
- : mouvement d'air
- : parois du bâtiment
- : enveloppe du bâtiment



(a) Bâtiment mono-zone



(b) Bâtiment mono-zone + capteur à air

11

Modélisation d'une paroi selon son inertie thermique

- ▶ Si $I > 25 \text{ Wh/K/m}^2$, n mailles, raison géométrique r



$e, e \times r, e \times r^2 \dots e \times r^{n-1}$

- ▶ Pour les parois légères, 1 maille
- ▶ 1 maille également du côté extérieur à un isolant



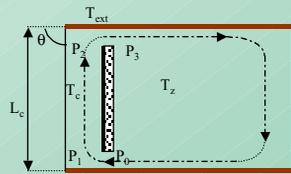
Couplage systèmes solaires et bâtiment

■ Capteur hybride :

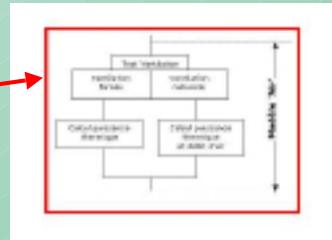
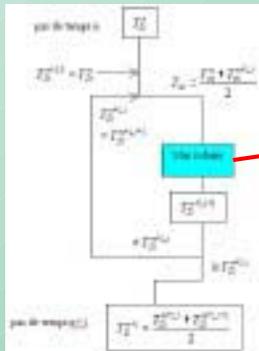
- Convection naturelle

Légende :

- : enveloppe du bâtiment
- : couverture du capteur à air
- : absorbeur du capteur à air
- : circuit d'air
- ▨ : isolant

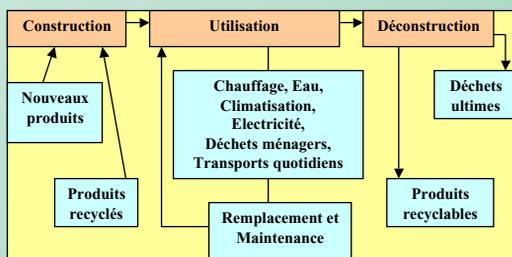


Chauffage d'air



Aspect environnemental – ACV du bâtiment

► Outil de simulation de cycle de vie de bâtiment : EQUER



► Intégration de composants solaires

- Collecte de base de données
 - vitrages
 - polycarbonate



14

Etudes paramétriques, optimisation

► Type de vitrage, transmission selon l'angle d'incidence

- Maçonnerie, standards actuels (béton ou parpaings)
- Orientation et surface du mur
- Type d'enduit (propriétés optiques)

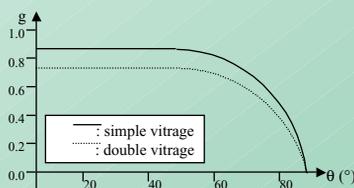


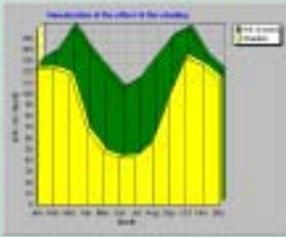
Figure 5.1 : facteur solaire en fonction de l'angle d'incidence.



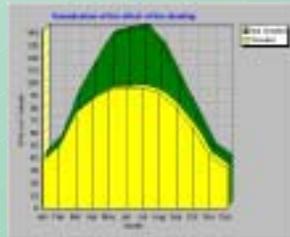
15

Protection contre les surchauffes d'été

- ▶ Blocage de la circulation d'air et isolation
- ▶ Ventilation naturelle du mur solaire
- ▶ Protections solaires
- ▶ Masques architecturaux



Façade sud

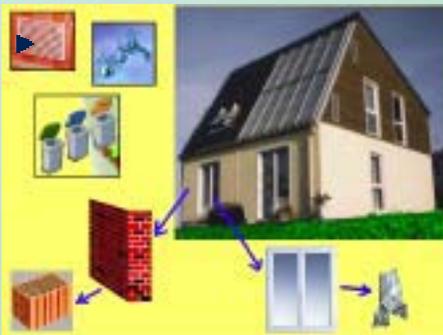


Façade ouest



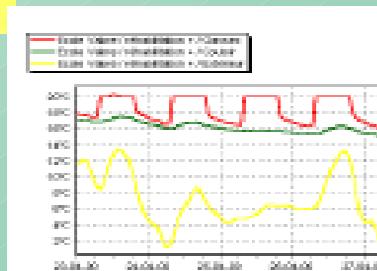
16

COMFIE (simulation thermique) www.izuba.fr



*Besoins de chauffage
et de climatisation*

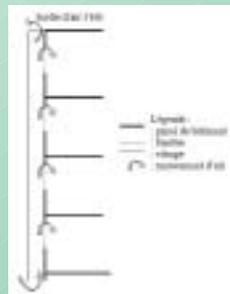
*Profils de
température*



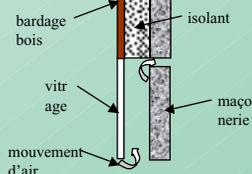
17

Application – Cas d'étude

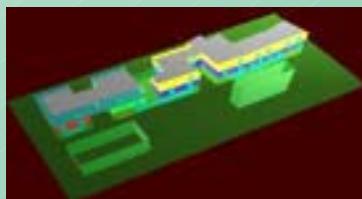
**Immeuble HLM
de 52 logements**



Maison individuelle

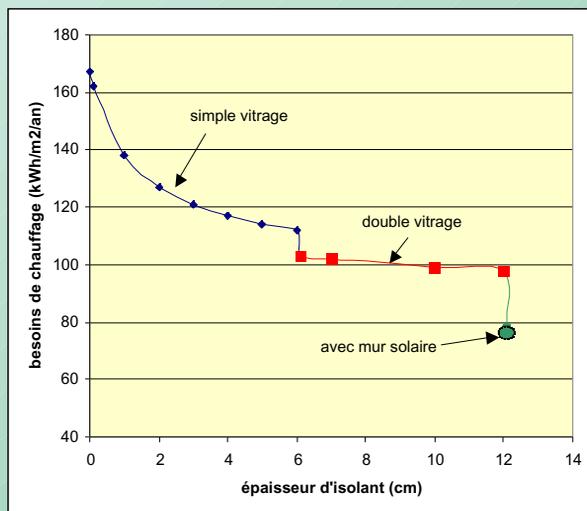


Bâtiment résidentiel



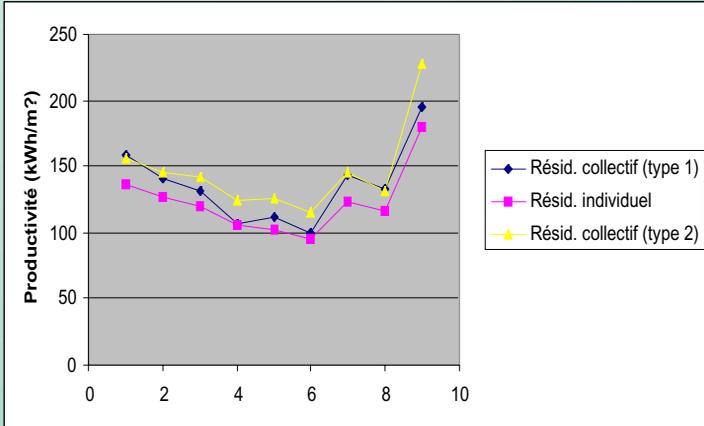
Résultats de l'analyse thermique

Immeuble HLM, réduction des besoins de chauffage



Résultats – Cas d'étude

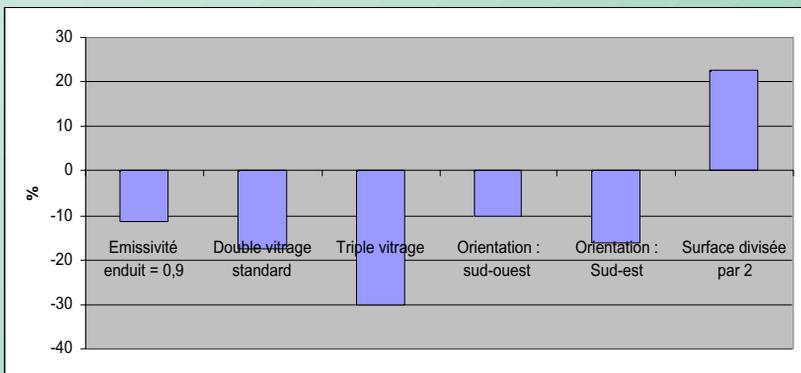
- **Productivité, réduction des besoins de chauffage en kWh par m2 et par an**



20

Variations paramétriques – Cas d'étude

- **Variation de la productivité en fonction des différents paramètres (base = 160 kWh/m2/an)**



21

Conclusions

- ▶ **Modélisation de systèmes solaires intégrés au bâtiment**
 - Couplage des différents transferts thermiques
 - Couplage mur solaire / bâtiment
- ▶ **Collecte de données sur les impacts environnementaux**
- ▶ **Implémentation dans un ensemble logiciel**
 - Outil de simulation pour professionnel du bâtiment
- ▶ **Application sur 3 cas d'étude**
 - Simulation thermique des bâtiments intégrant des murs solaires
 - Optimisation du composant
- ▶ **Modèle de connaissance permettant de connaître l'intérêt environnemental de différents murs solaires**
- ▶ **Perspectives : optimisation et bilan technico-économique**

