

Les bâtiments en environnement urbain

G. RUSAOUEN

Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon
Bâtiment Sadi-Carnot
9, rue de la Physique
INSA de LYON
Campus La Doua – LyonTech
69621 Villeurbanne Cedex

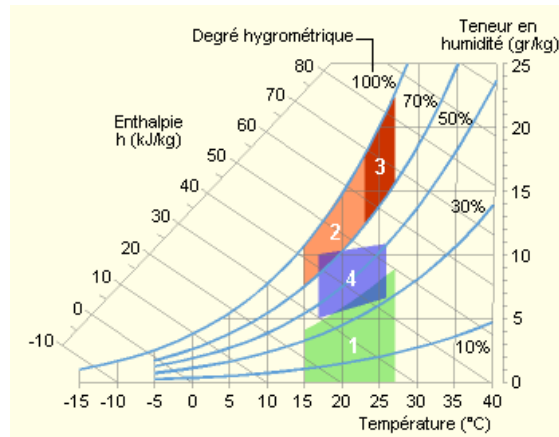
IUT Lyon 1 – Génie Thermique et Energie
71, rue Peter Fink
01000 Bourg en Bresse

Contexte

»» Quel est le problème ?

L'homme dans l'environnement

Confort hygrothermique humain :



- ▶ 1: Zone à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse.
- ▶ 2 et 3 : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons.
- ▶ 3 : Zone à éviter vis-à-vis des développements d'acariens.
- ▶ 4 : Polygone de confort hygrothermique.

Rarement atteint 24h/24h & 7j/7j sur la planète !

Mais l'extérieur est utile :



Mais l'environnement

- ▶ Est aussi gênant :



De plus,

- ▶ Le confort hygro-thermique n'est qu'une partie du problème :



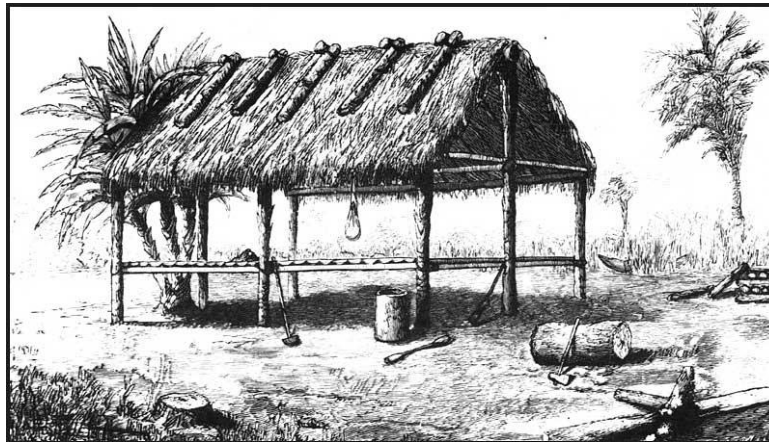
La qualité de l'air est aussi importante !



- Dans l'UE, 500.000 malades en 2010.
- Coût économique 1420 milliards d'euros par an, 10% du PIB de l'UE.

Bâtiment

- ▶ Il s'agit donc de réaliser une médiation entre l'humain et son environnement



Objectif : garantir le confort 24h/24h & 7j/7j à l' "intérieur" !

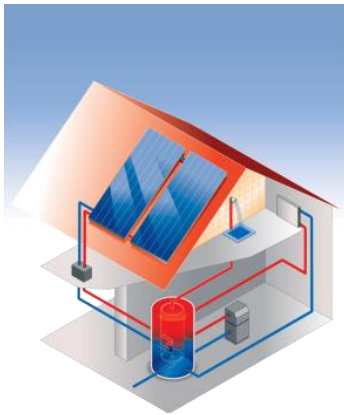
Environnement

- ▶ En utilisant l'environnement au mieux en tant que sources
- ▶ En tenant du compte du fait que l'environnement est aussi utilisé par l'être humain :



Bon sens

- ▶ En évitant les solutions actives le plus possible :



- ▶ En tenant compte des divers usages participant à la médiation :

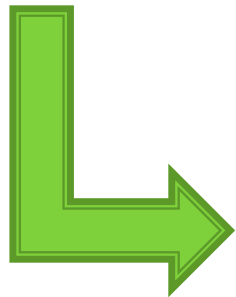
- ▶ Eclairage
- ▶ Acoustique
- ▶ Thermique
- ▶ Qualité de l'air
- ▶ ...

Préliminaires

»» L'isolation

Historique

- ▶ Clash pétrolier de 1974 : nécessité pour les états consommateurs de prouver qu'ils peuvent agir sur leur consommation



- En France, le bâtiment consomme **près de 46 %** de l'énergie finale.
- Le secteur du bâtiment résidentiel et tertiaire est le premier consommateur d'énergie, avec une augmentation de 30 % au cours des 30 dernières années.



Solution d'urgence : s'isoler de l'environnement



Limites (1)

- ▶ Parc ancien, coût de l'immobilier
- ▶ Efficacité :

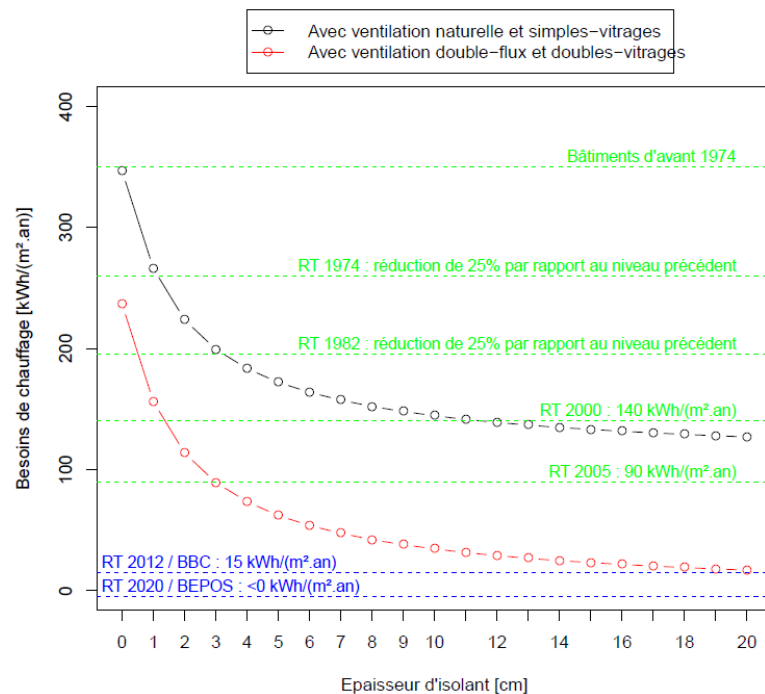


FIGURE 1.7 – Évolution des besoins de chauffage d'une maison individuelle dans le climat de Trappes en fonction de l'épaisseur de l'isolant (laine de verre de conductivité égale à $0.034 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Lou Chesné, Thèse 2012

Limites (2)

- ▶ Apparition de surchauffe en été si l'inertie du bâtiment est insuffisante ou les charges internes trop élevées
- ▶ Déploiement de systèmes de climatisation

Première étape

- »» Les indicateurs synchrones de ressources

Méthodologie

- ▶ Tester une source environnementale à la fois, par exemple le soleil.
- ▶ Réaliser une évaluation des besoins avec la source, puis une sans la source.

Indicateurs possibles

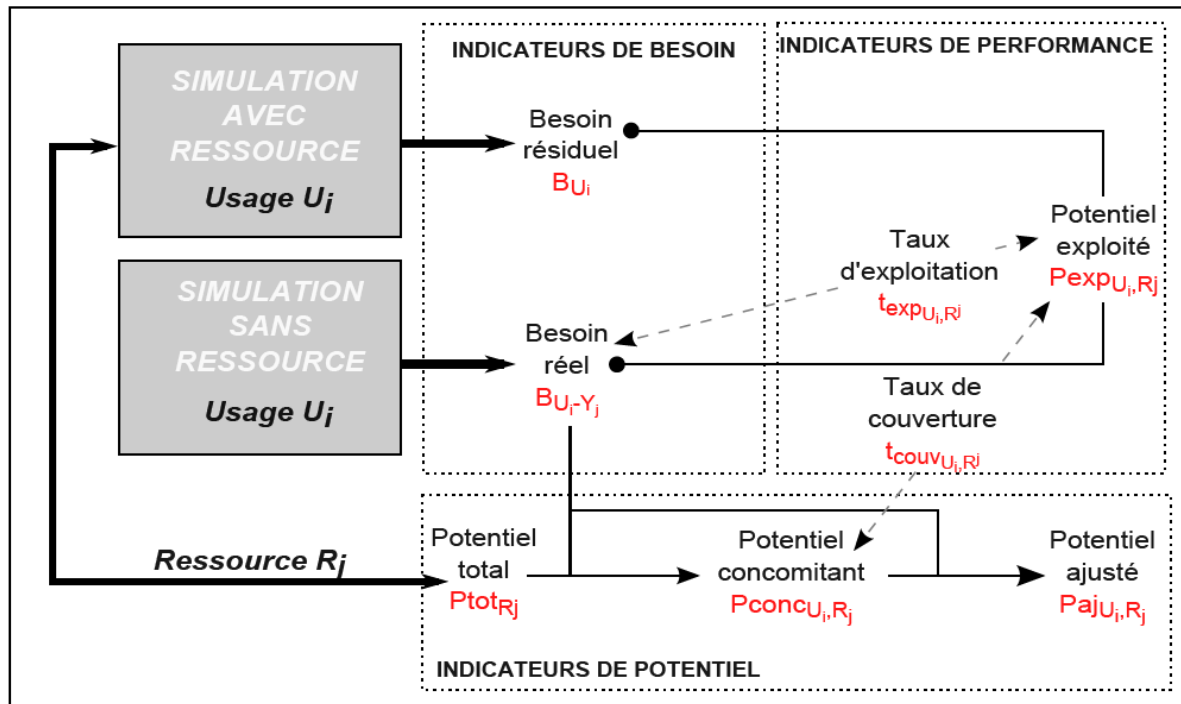


FIGURE 3.1 – Diagramme général des indicateurs

Lou Chesné, Thèse 2012

Comment les obtenir ?

- ▶ Simulation bien sûr :

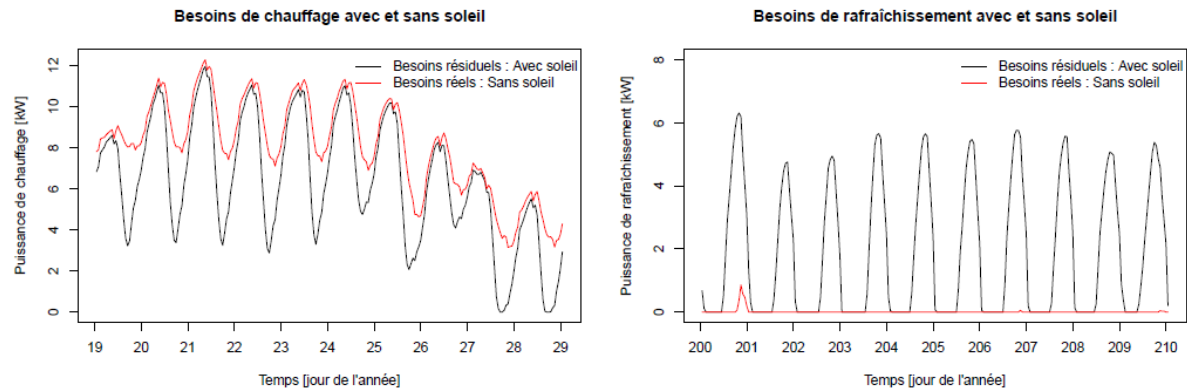


FIGURE 3.2 – Besoins avec et sans soleil d'une maison individuelle non isolée
Lou Chesné, Thèse 2012

Potentiel total

$$ptot_s(t) = \sum_{Parois} (Dir(t) + Dif(t))S_p \quad (3.12)$$

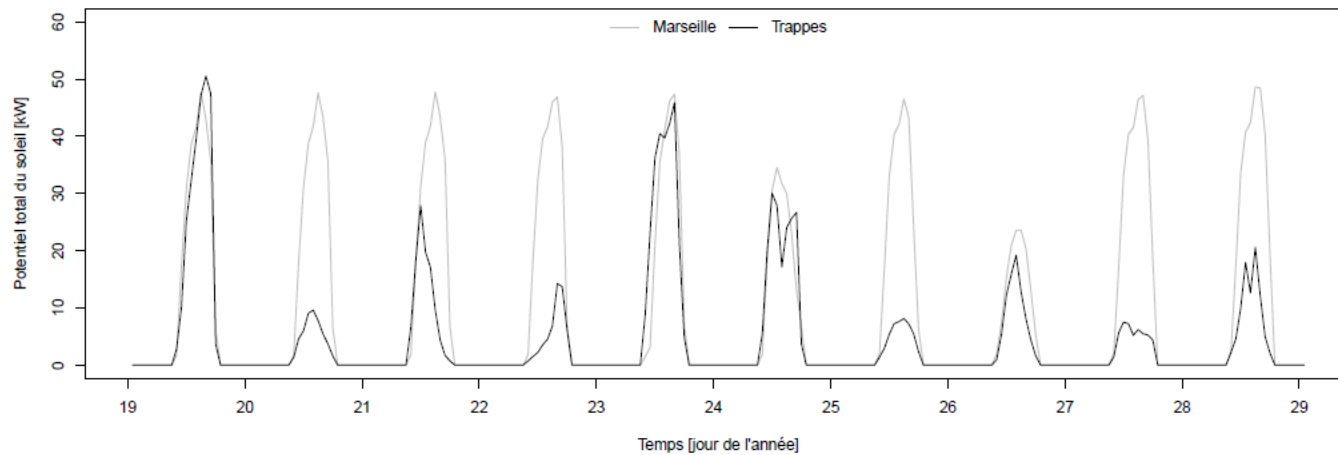


FIGURE 3.5 – Potentiel total du soleil pour une maison individuelle non isolée dans deux climats différents

Lou Chesné, Thèse 2012

Potentiel concomitant

- ▶ Le potentiel concomitant du soleil est égal au potentiel total si les besoins de chauffage sans soleil existent, sinon il est nul

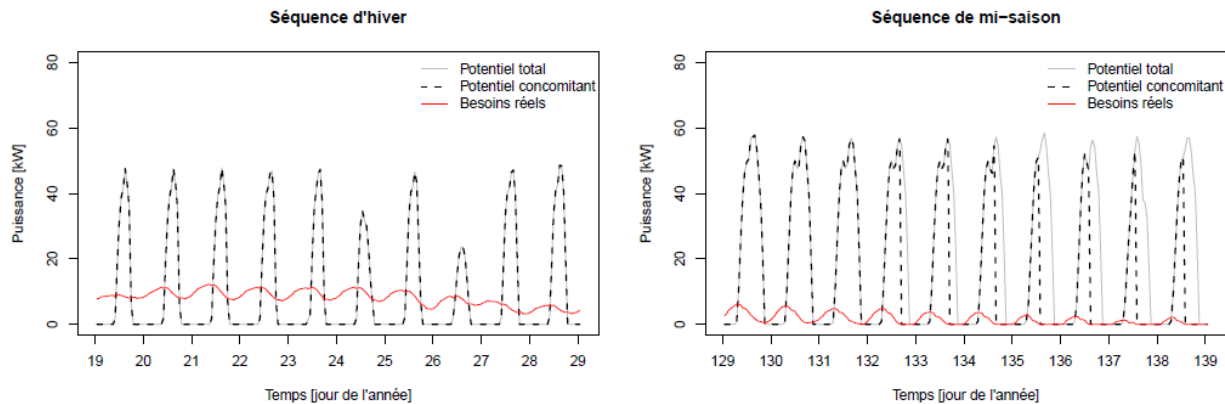


FIGURE 3.8 – Potentiel concomitant du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences temporelles différentes

Lou Chesné, Thèse 2012

Potentiel ajusté

- ▶ Le potentiel ajusté du soleil est le minimum entre les besoins de chauffage réels et le potentiel total

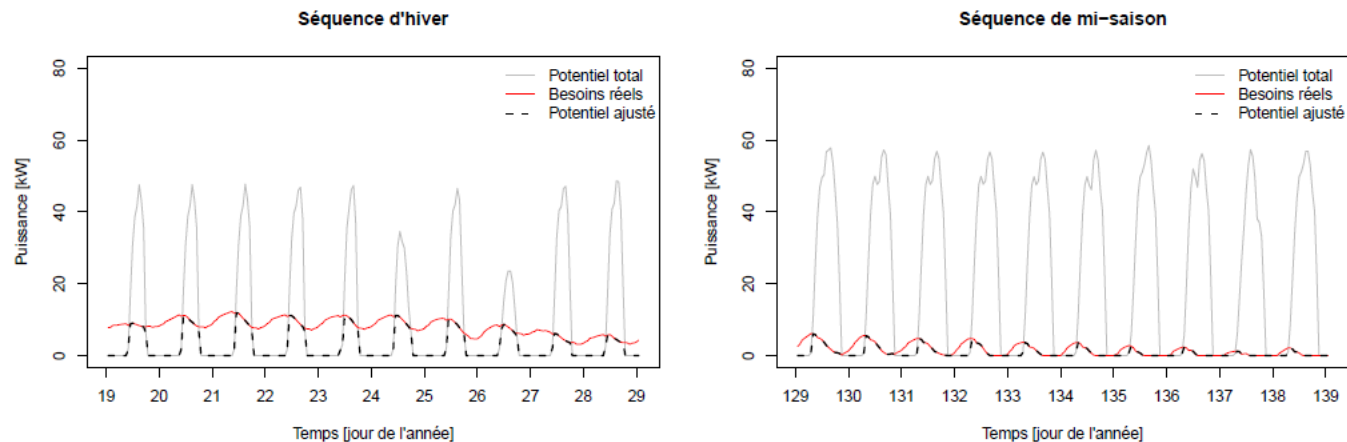


FIGURE 3.11 – Potentiel ajusté du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences temporelles différentes

Lou Chesné, Thèse 2012

Potentiel exploité

- ▶ Le potentiel exploité du soleil pour les besoins de chauffage est la différence des besoins de chauffage sans soleil (besoins réels) et des besoins de chauffage avec soleil (besoins résiduels)

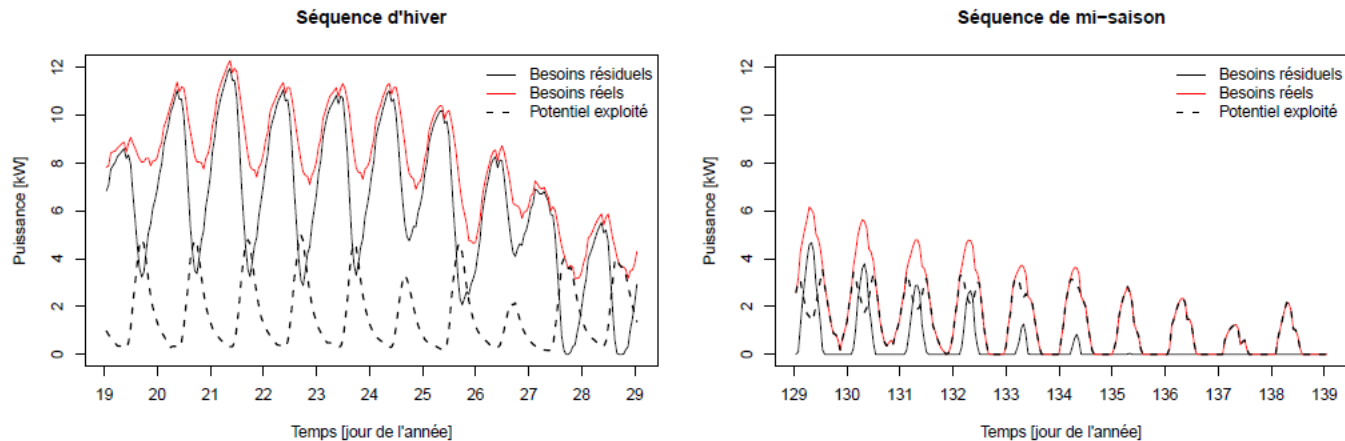


FIGURE 3.14 – Potentiel exploité du soleil pour une maison individuelle non isolée sur deux séquences temporelles différentes

Lou Chesné, Thèse 2012

Taux de couverture des besoins

- ▶ C'est le rapport du potentiel exploité aux besoins sans la source

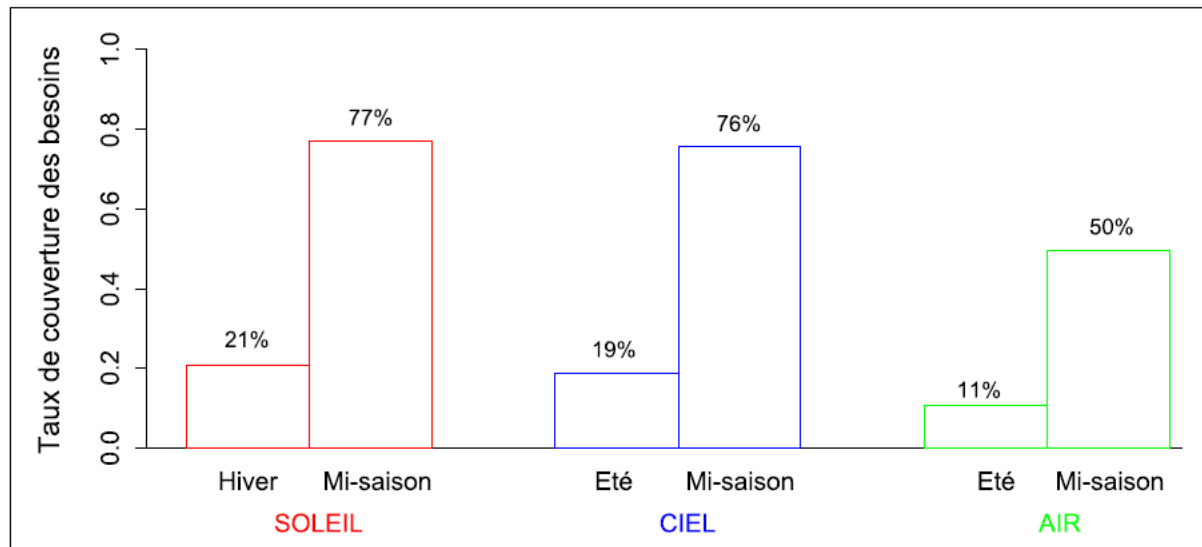


FIGURE 3.17 – Taux de couverture des besoins par les trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée plusieurs séquences (été : du 19 au 28 juillet, hiver : du 19 au 28 janvier, mi-saison : du 9 au 18 mai)

Lou Chesné, Thèse 2012

Taux d'exploitation d'une source

- ▶ C'est le rapport entre le potentiel exploité et le concomitant

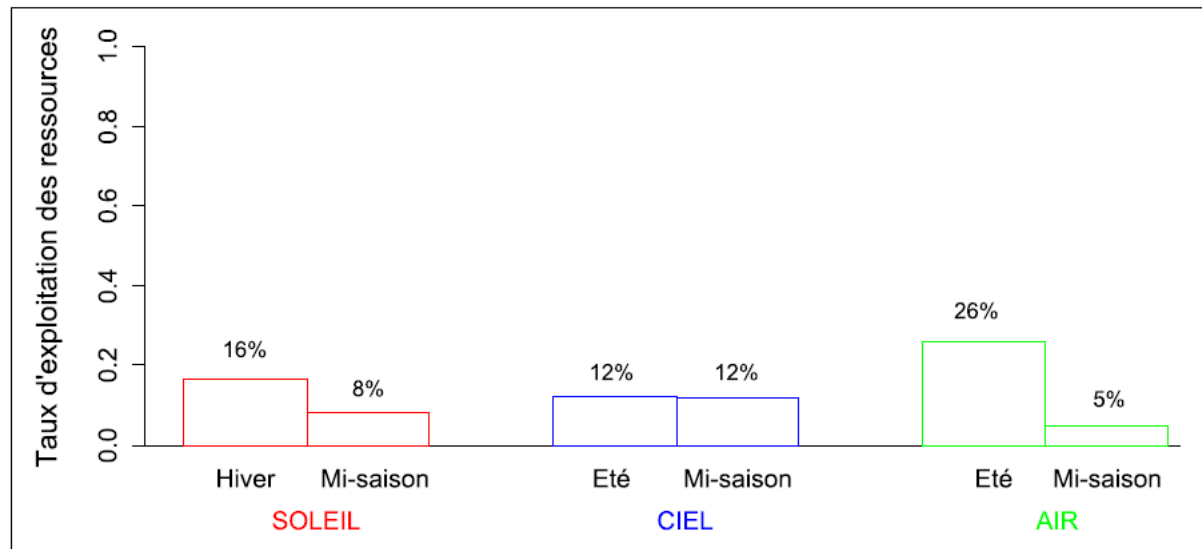


FIGURE 3.18 – Taux d'exploitation des trois ressources (soleil, ciel et air) pour une maison individuelle non isolée plusieurs séquences (été : du 19 au 28 juillet, hiver : du 19 au 28 janvier, mi-saison : du 9 au 18 mai)

Lou Chesné, Thèse 2012

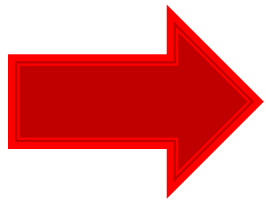
Deuxième étape

»» La simulation

Quel niveau de simulation choisir ?

▶ Critères :

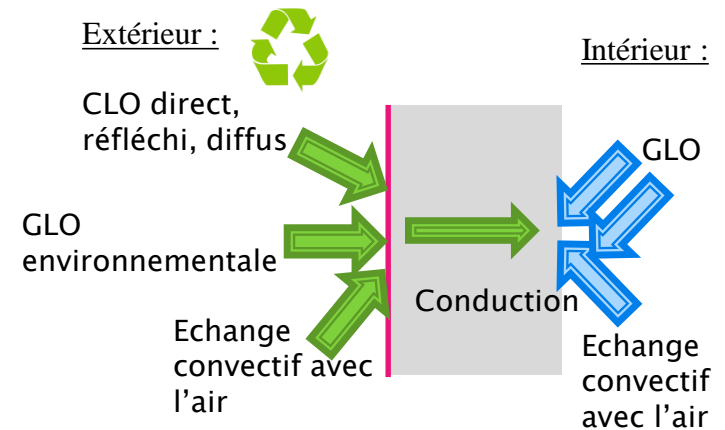
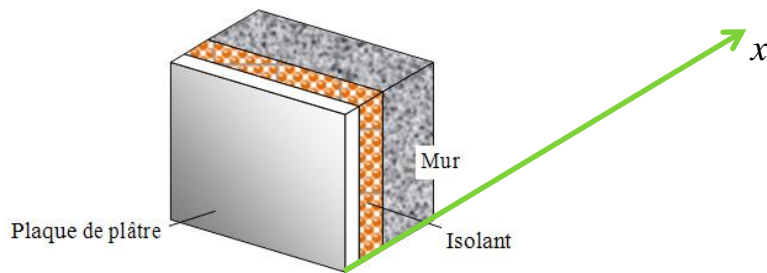
- Simulation dynamique sur au moins une année
- Effets du vent
- Assimilation des données météorologiques
- Taille de l'environnement



Simulation directe et complète impossible

Simulation des bâtiments (1)

► Pour les parois :



Conduction à l'intérieur de la paroi :

$$C_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left(k_W \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_W \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right)$$

Simulation des bâtiments (2)

- ▶ Echange convectif avec l'air :

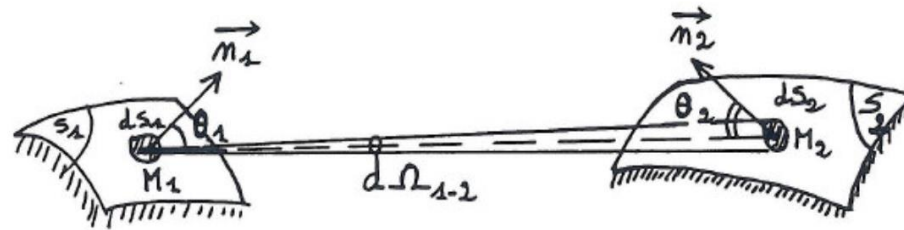
$$Q_c = h_{c,ext} A (T_{surf} - T_{air})$$

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer $h_{c,ext}$ qui dépend de nombreux paramètres :

- ▶ Caractéristiques du fluide,
- ▶ Nature de l'écoulement,
- ▶ Nature de la paroi,
- ▶ La température,
- ▶ La forme de la surface d'échange,...

Simulation des bâtiments (3)

► GLO environnementale



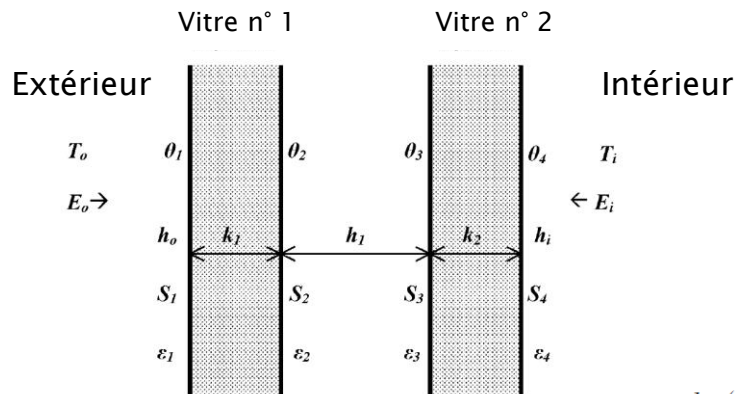
$$\Phi_{env \rightarrow paroi} = F_{env \rightarrow paroi}^{Géo} \epsilon_{env}^{Phys} \sigma_0 T_{env}^4 S_{env}^{Inc} S_{env}^{Géo}$$

Dans l'environnement urbain, il y a souvent d'autres bâtiments....



Simulation des bâtiments (4)

- Pour les vitrages :



$$E_o \varepsilon_1 - \varepsilon_1 \sigma \theta_1^4 + k_1 (\theta_2 - \theta_1) + h_o (T_o - \theta_1) + S_1 = 0$$

$$k_1 (\theta_1 - \theta_2) + h_1 (\theta_3 - \theta_2) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_3^4 - \theta_2^4) + S_2 = 0$$

$$h_1 (\theta_2 - \theta_3) + k_2 (\theta_4 - \theta_3) + \sigma \frac{\varepsilon_2 \varepsilon_3}{1 - (1 - \varepsilon_2)(1 - \varepsilon_3)} (\theta_2^4 - \theta_3^4) + S_3 = 0$$

$$E_i \varepsilon_4 - \varepsilon_4 \sigma \theta_4^4 + k_2 (\theta_3 - \theta_4) + h_i (T_i - \theta_4) + S_4 = 0$$

Simulation des bâtiments (5)

► Avec :

$$S_{2j-1} = S_{2j} = \frac{1}{2} \left(I_{bm}^{ext} \cos \phi A_j^f(\phi) + I_{dif}^{ext} A_j^{f,dif} + I_{sw}^{int} A_j^{b,dif} \right), j = 1 \text{ to } N$$

$$S_{2N} = S_{2N} + \varepsilon_{2N} I_{lw}^{int}$$

$$h_i = Nu \left(\frac{\lambda}{H} \right)$$

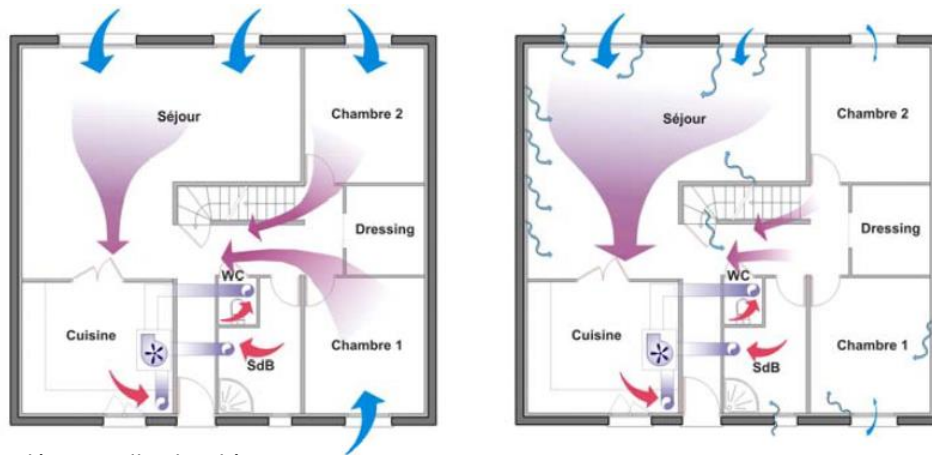
$$Ra_H = \frac{\rho^2 H^3 g c_p |T_{surf,i} - T_{air}|}{T_{m,f} \mu \lambda}$$

$$T_{m,f} = T_{air} + \frac{1}{4} (T_{surf,i} - T_{air})$$

$$Nu = 0.13 Ra_H^{1/3} \dots$$

Simulation des Défauts (1)

► Les infiltrations d'air :

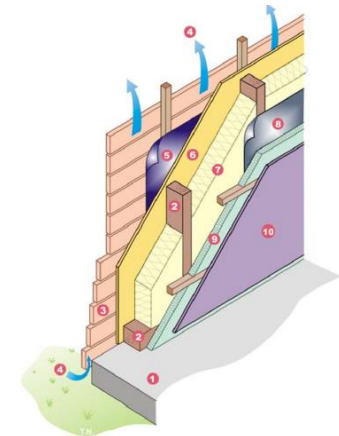


Clément Belleudy, Thèse 2016

Particulièrement visible dans les bâtiments à ossature bois :

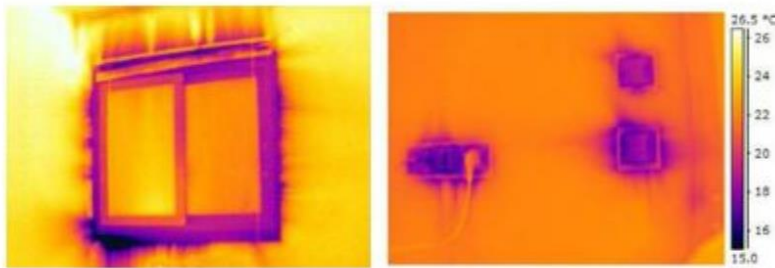
■ Nomenclature globale de l'enveloppe

- ① Soubassement maçonné
- ② Lisses et montants de structure
- ③ Bardage extérieur à claire-voie
- ④ Lame d'air de ventilation
- ⑤ Ecran pare-pluie
- ⑥ Voile travaillant en panneau OSB
- ⑦ Isolation thermique 150 mm
- ⑧ Ecran pare-vapeur
- ⑨ Isolation thermique et acoustique 50 mm
- ⑩ Parement intérieur type Fermacell



Simulation des Défauts (2)

► Mise en évidence :



Fuites d'air mises en évidence par la thermographie, au niveau de la jonction menuiserie paroi (gauche) et d'une prise électrique (droite). [Source : faconalpes.fr]

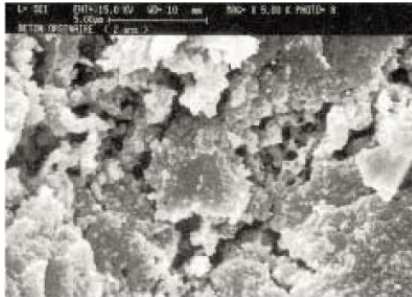
Importance de l'air humide



– Dégradation du bois due au passage de l'air exfiltré chargé de vapeur d'eau
[Source : Eneritech, Olivier Sidler]

Simulation des Défauts (3)

- ▶ Matériaux poreux :



Simulation des Défauts (4)

► Comment modéliser ?

✓ L'air :

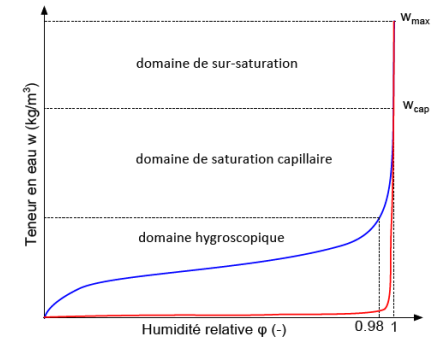
Loi de Darcy dans un milieu poreux en régime permanent : $u = -\frac{k_{mat}}{\mu_{air}} \nabla P$

✓ L'humidité :

$$g_{diff} = -\delta_{mat}(\varphi) \nabla p_v(T, \varphi)$$

$$g_{liq} = -D_w(\varphi) \nabla w(\varphi)$$

$$g_{adv} = \rho_{vap}(T, \varphi) u$$



$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\underbrace{-\delta_{mat}(\varphi) \nabla p_v(T, \varphi)}_{g_{diff}} + \underbrace{\rho_{vap}(T, \varphi) u}_{g_{adv}} - \underbrace{D_w(\varphi) \frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \nabla \varphi}_{g_{liq}} \right)$$

Simulation des Défauts (5)

✓ La chaleur :

$$(\rho_{mat}c_{mat} + w(\varphi)c_w) \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\underbrace{-\lambda_{mat}(\varphi)\nabla T}_{q_{cond}} + \underbrace{\rho_{air}c_{p_{air}}T u}_{q_{conv}} + \underbrace{L_v(g_{adv}(T, \varphi) + g_{diff}(T, \varphi))}_{q_{latent}} \right] \quad (2.44)$$

✓ Et bien sûr des conditions aux limites !

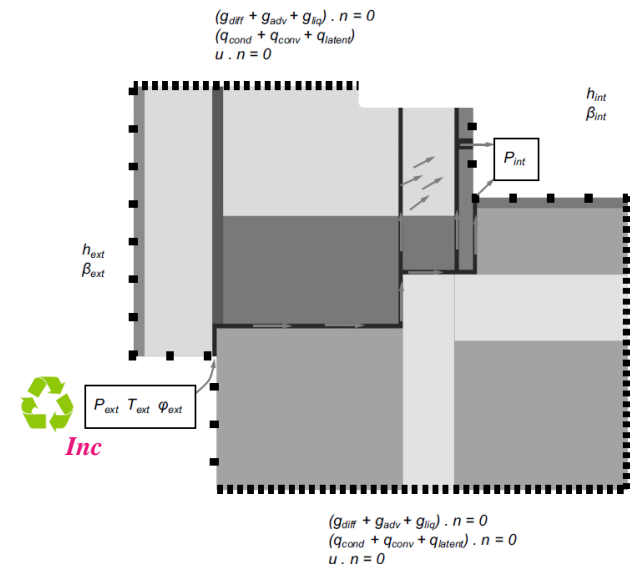


FIGURE 3.7 – Conditions aux limites du modèle en infiltration d'air
Les bâtiments en environnement urbain

Simulation des Défauts (6)

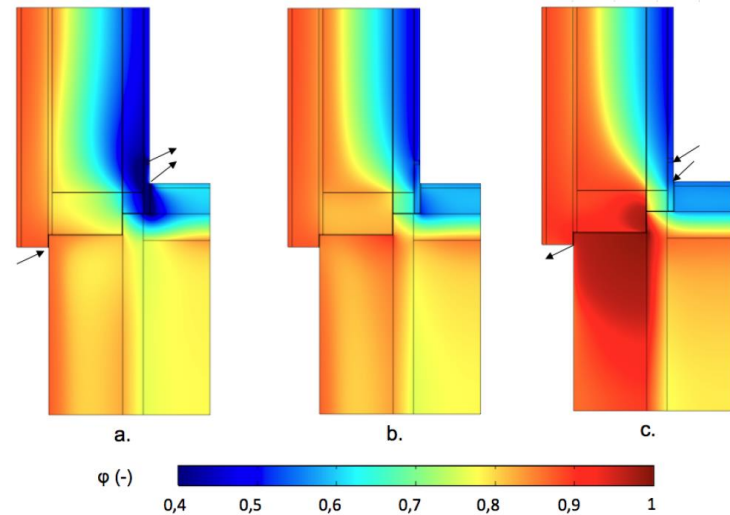
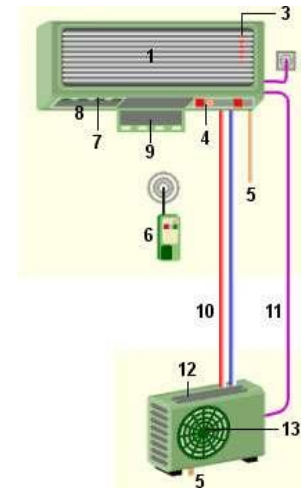
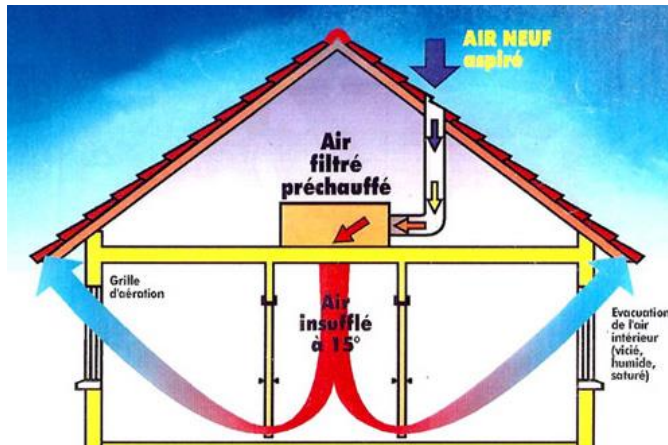


FIGURE 3.14 – Champ d'humidité relative au début de la quatrième année : dans le scénario d'infiltration (a.) et d'exfiltration (c.) avec $|P_{inside} - P_{outside}| = 1$ Pa, et sans air (b.)

Clément Belleudy, Thèse 2016

Simulation des systèmes (1)

- ▶ Les systèmes les plus évidents :



- 1 : air repris dans le local
- 2 : alimentation électrique
- 3 : sonde de température de reprise d'air
- 4 : commande unité intérieure
- 5 : évacuation des condensats
- 6 : télécommande
- 7 : volet réglable
- 8 : air soufflé dans le local
- 9 : filtre à air
- 10 : liaison du fluide frigorigène R22
- 11 : raccordement électrique
- 12 : air repris à l'extérieur
- 13 : air soufflé à l'extérieur

Simulation des systèmes (2)



Inc

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{m} \cdot \Delta P / (e_{tot} \cdot \rho_{air})$$

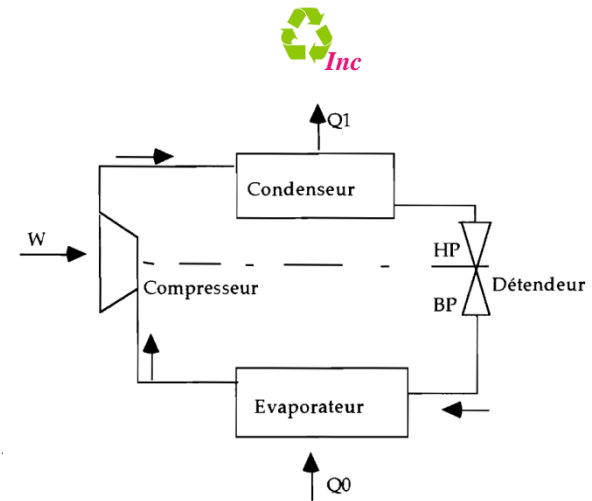
$$\dot{Q}_{shaft} = e_{motor} \cdot \dot{Q}_{tot}$$

$$\dot{Q}_{toair} = \dot{Q}_{shaft} + (\dot{Q}_{tot} - \dot{Q}_{shaft}) \cdot f_{motortoair}$$

$$h_{out} = h_{in} + \dot{Q}_{toair} / \dot{m}$$

$$w_{out} = w_{in}$$

$$T_{out} = PsyTdbFnHW(h_{out}, w_{out})$$



Simulation des systèmes (3)

► Capteur solaire !

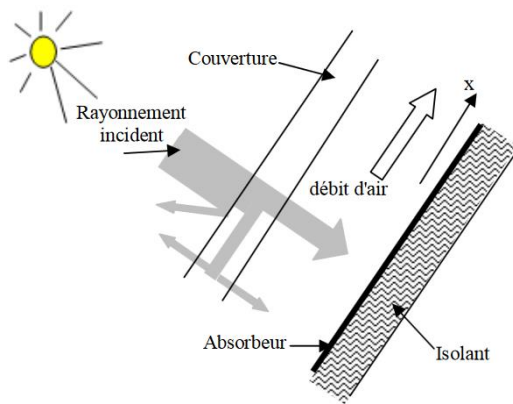


Figure 1 : Schéma de principe du capteur à air

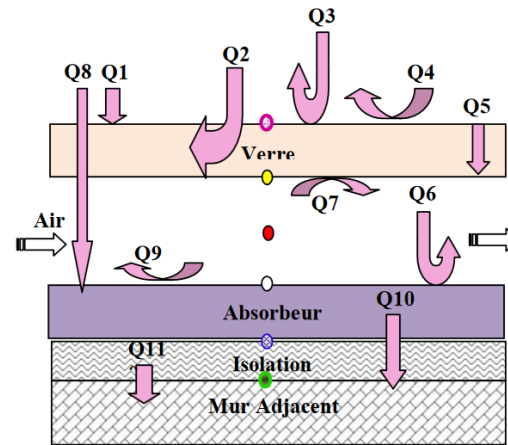


Figure 2 : Mécanisme des échanges de chaleur détaillé

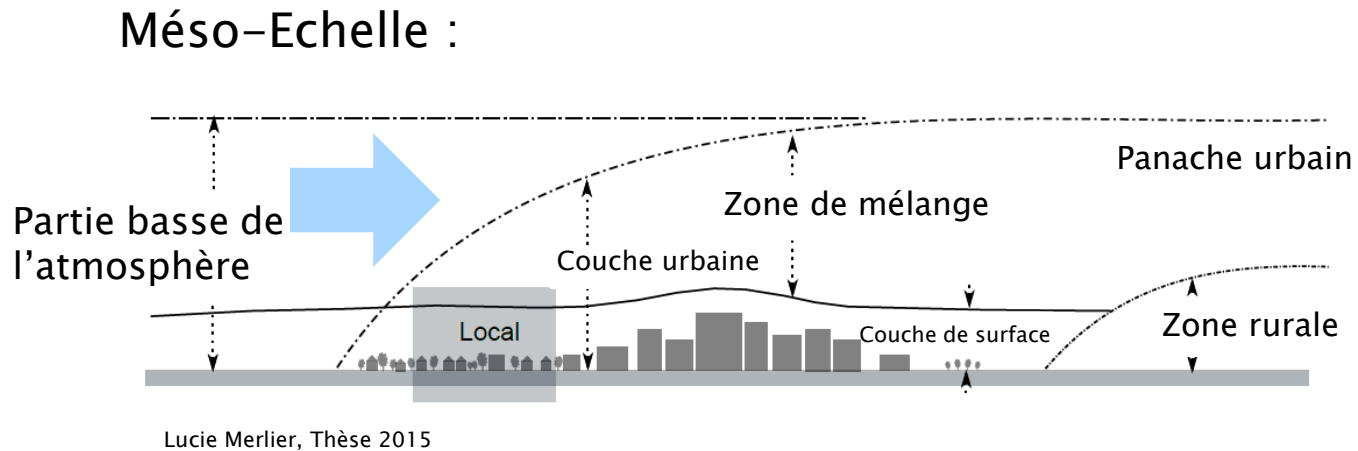
- : Nœud représentant la température du vitrage coté extérieure
- : Nœud représentant la température du vitrage coté intérieure
- : Nœud représentant la température du fluide (l'air)
- : Nœud représentant la température de la couche de l'absorbeur
- : Nœud représentant la température de la couche de l'isolant
- : Nœud représentant la température de la couche de l'isolant

Troisième étape

»» Comment traiter
l'environnement alors ?

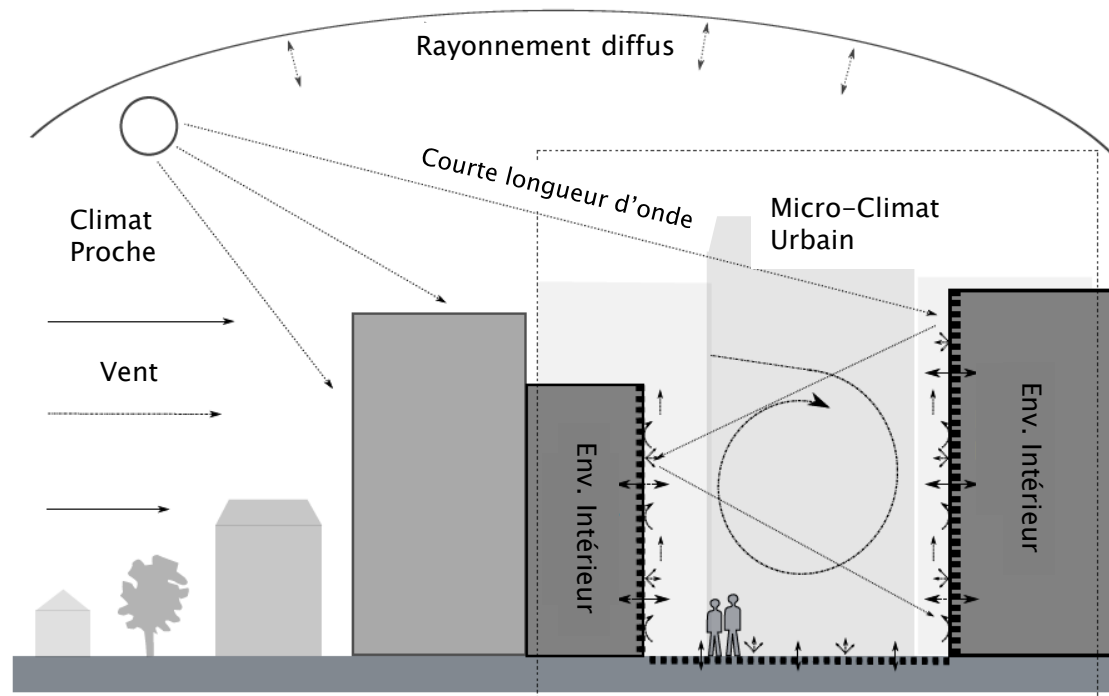
L'environnement

✓ Les échelles pour l'air :



Voisinage d'un bâtiment

► Au minimum :



Mécanique des Fluides

► Les équations:

- Équation de continuité (équation de bilan de la masse)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

- Équation de bilan de la quantité de mouvement

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) &= \nabla \cdot \mathbf{P} + \rho \mathbf{g} \\ &= -\nabla p + \nabla \cdot \Sigma + \rho \mathbf{g} \end{aligned}$$

- Équation de bilan de l'énergie

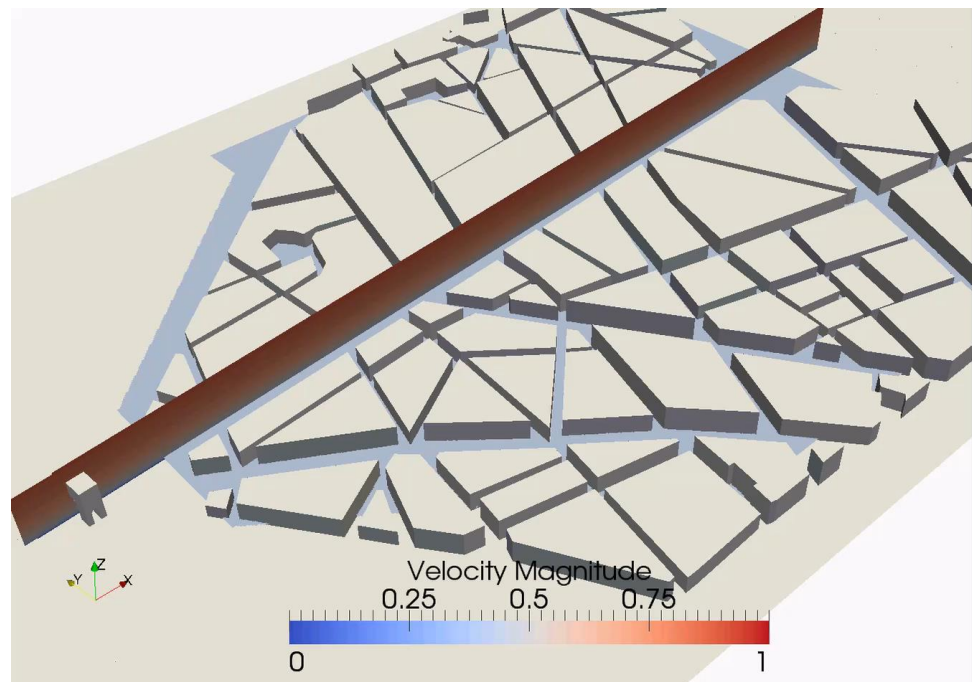
$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\mathbf{P} \cdot \mathbf{V}) + \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{V} + \nabla \cdot \mathbf{q} + \nabla \cdot \mathbf{q}_R$$

Dans ces équations :

- t représente le temps (unité SI : s) ;
- ρ désigne la **masse volumique** du fluide (unité SI : $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) ;
- \mathbf{V} désigne la vitesse eulérienne d'une particule fluide (unité SI : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ;
- \mathbf{P} est le **tenseur des contraintes** (ou tenseur de pression) qui, si on néglige le rayonnement, se décompose en :
$$\mathbf{P} = \Sigma - p\mathbf{I}$$
- Σ est le **tenseur des contraintes** visqueuses (unité SI : Pa) ;
- \mathbf{I} le tenseur unité ;
- p désigne la **pression** thermodynamique (unité SI : Pa) ;
- $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)$ est la gravité ou toute autre force massique extérieure (unité SI : $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) ;
- E est l'énergie totale par unité de masse (unité SI : $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) ; elle s'exprime en fonction de l'**énergie interne** e par :
$$E = e + \frac{V^2}{2}$$
- \mathbf{q} est le **flux de chaleur** (unité SI : $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Il est donné par la **loi de Fourier** :
$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T$$
- λ désigne la **conductivité thermique** du fluide (unité SI : $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$) ;
- T est la **température** (unité SI : K) ;
- \mathbf{q}_R représente le flux de chaleur du au rayonnement. Ce terme résulte en général d'un calcul de **transfert radiatif**,

Modélisation turbulence

- ▶ Un exemple avec LaBS (LBM, LES) :



M2P2 : LABORATOIRE DE MÉCANIQUE, MODÉLISATION & PROCÉDÉS PROPRES

Intégration dans un environnement de Simulation (Projet ANR MERUBBI)

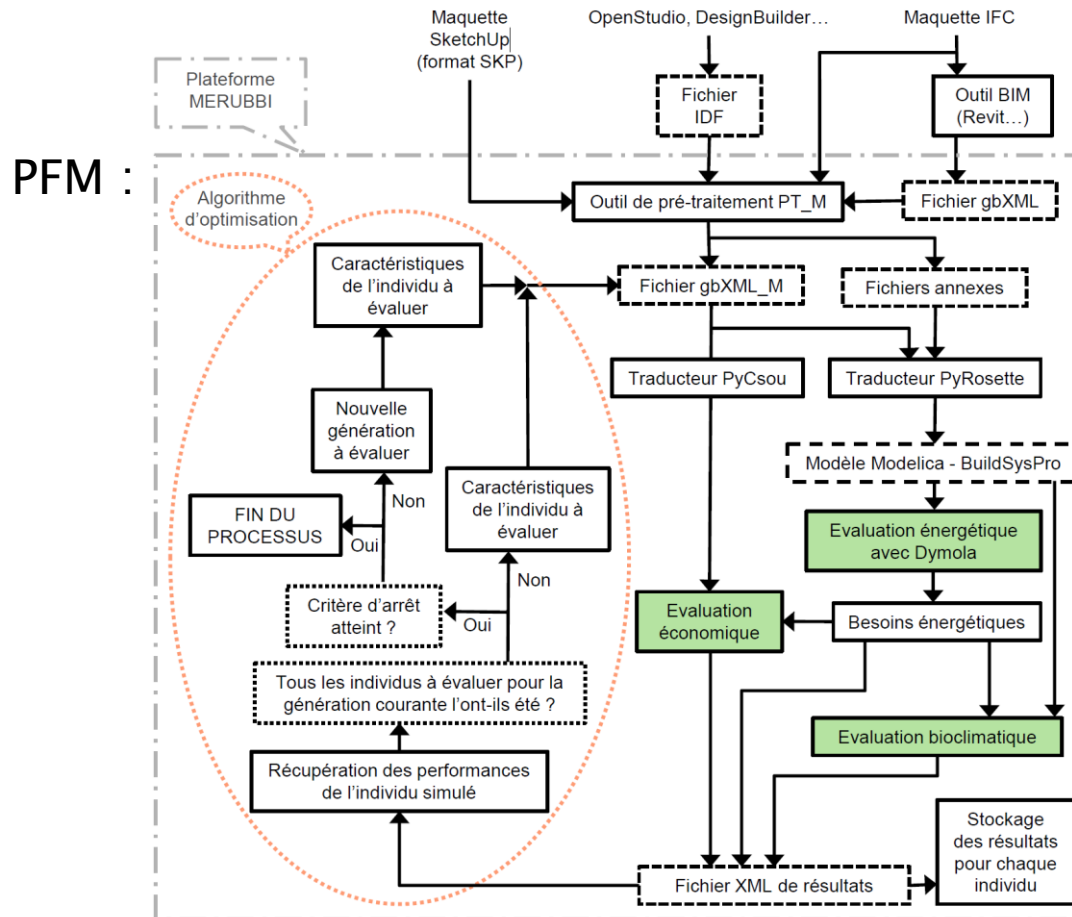
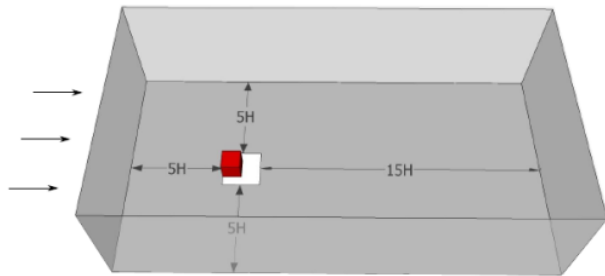


Figure III.1 - Schéma de fonctionnement de la plateforme MERUBBI.

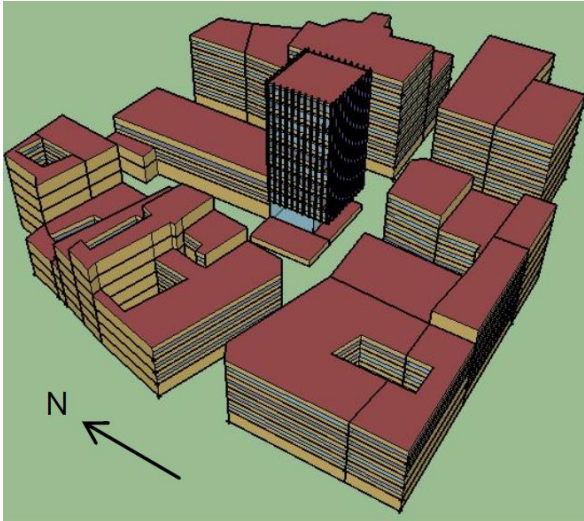
Différences avec un calcul R_t



		Isolated				Non-isolated			
		front	rear	top	side	front	rear	top	side
$h_{c,w}$	Th-U	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2	21.2
	Simu.	16.8	7.7	13.1	11.2	9.7	4.7	9.9	7.6
Deviation (%)		-20	-64	-38	-47	-54	-78	-53	-64
Insulated									
R_{th}	Th-U	2.76	2.76	2.73	2.76	2.76	2.76	2.73	2.76
	Simu.	2.77	2.80	2.75	2.78	2.79	2.82	2.76	2.80
Deviation (%)		0.28	1.45	0.62	0.85	1.07	2.32	1.05	1.48
Non-insulated									
R_{th}	Th-U	0.26	0.26	0.23	0.26	0.26	0.26	0.23	0.26
	Simu.	0.27	0.26	0.25	0.28	0.29	0.32	0.26	0.30
Deviation (%)		2.94	15.43	7.31	8.97	11.36	24.62	12.37	15.66

Lucie Merlier, Thèse 2015

Impact sur le voisinage



Thèse Clément Ribault, 2017

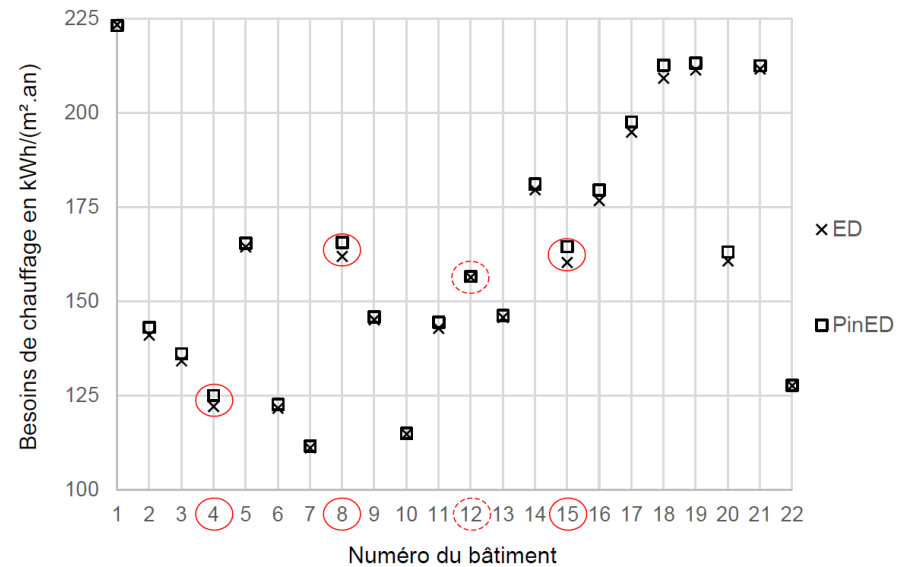


Figure III.9 - Estimation de l'impact de l'implantation du bâtiment neuf sur les besoins de chauffage des bâtiments existants en comparant les résultats obtenus avec la PFM pour la version 2 des modèles ED (bâtiments existants seuls) et PinED (bâtiments existants + bâtiment neuf).