

Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation.

Pierre Tittlein

Thèse co-dirigée par Etienne Wurtz et Gilbert Achard



Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés au bâtiment

Tache solaire

Échangeur air-sol

MCP

Analyse globale du bâtiment

Conclusions et perspectives

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Contexte

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

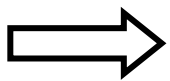
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Objectifs (issus du Grenelle de l'environnement)

- ❑ **Bâtiment Basse Consommation (BBC) :**
Consommation < **50** kW.h/(m².an) en **2012** (chauffage, ECS, ventilation, éclairage en **énergie primaire**)
- ❑ **Bâtiments à énergie positive (BEPOS) en 2020**
(moyenne sur l'année)



Pour atteindre ces performances, la simulation numérique devient vraiment nécessaire

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

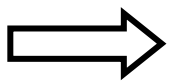
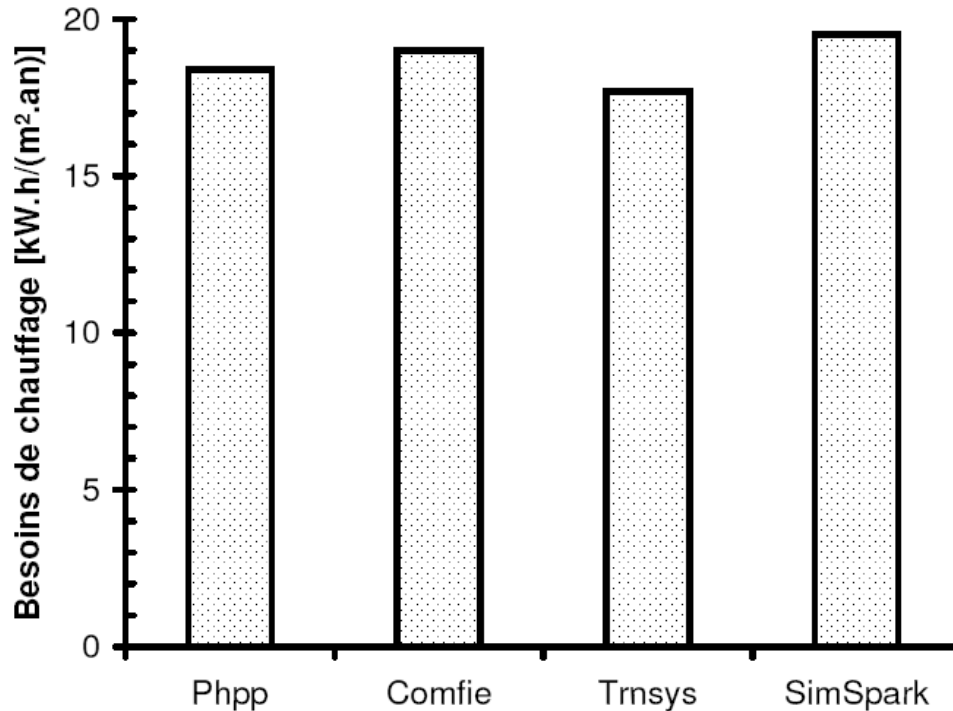
Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Pertinence de la simulation numérique



L'utilité de la simulation n'est plus au niveau du calcul des besoins de chauffage

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Quelques verrous scientifiques à lever

- Comment maintenir le confort d'été dans des bâtiments très isolés?
- Les puits canadiens sont ils pertinents dans le cadre des BBC?
- La ventilation double flux a-t-elle une utilité l'été?
- L'inertie du bâtiment peut-elle réduire significativement les besoins de chauffage?
- Dans quelles conditions l'utilisation de matériaux à changement de phase est elle pertinente?

➔ **Quel environnement de simulation peut permettre de répondre à ces questions?**

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Outils de simulation

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Les différents objectifs de simulation

Objectifs

Obtenir des tendances,
vérifier la norme

Développer les connaissances
physiques des phénomènes

Intégrer les connaissances
physiques pour comprendre le
comportement global du
bâtiment

Type d'outils

Outils statiques, ou
dynamiques ciblés

Outils de type CFD

Outils dynamiques

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Défis à relever par les outils de simulation des BBC

Comportement
dynamique

Phénomènes
couplés

Nouvelles
technologies du
bâtiment

Analyse de
sensibilité

Simulation en
temps réel

Optimisation

Retour
expérimental
(diagnostic)

...

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Architecture des outils existants



Efficacité, facilité
d'utilisation

Interface graphique ++

Méthode de calcul adaptées

Facilité d'inter-changer
des modèles

Librairies très fournies

Interface ergonomique

Non orientation du
problème a priori

Procédure de résolution
adaptée

Lisibilité totale « boîte
blanche »

Monolithique:

Architecture monobloc

Fonctionnalités
prédéfinies

Modulaire:

Basée sur des modules
orientés

Changement de solveur
possible

Basée sur les systèmes d'équations

Connexions non
orientées

Structuration
hiérarchisée

Sorties limitées

« boîte noire »

Difficile à modifier

Prise en main longue

Résolution orientée

Certains modèles de
type « boîte noire »

Prise en main longue

Interface souvent peu
ergonomique

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

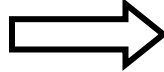
Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Présentation de Spark

Caractéristiques principales

Orienté objet, basé
sur les systèmes
d'équations

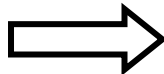


Modularité

**Non orientation
du problème**

Lisibilité

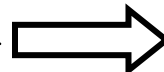
Décomposition des
systèmes par la
méthode des
graphes



**Sous-systèmes
d'équations résolus
indépendamment**

**Réduction des temps
de calcul**

Plusieurs
méthodes
d'intégration
robustes



**Moins de
problèmes de
convergence**

Solveur robuste à
pas de temps
variable

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Présentation de SimSpark

Simulation des bâtiments dans Spark

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

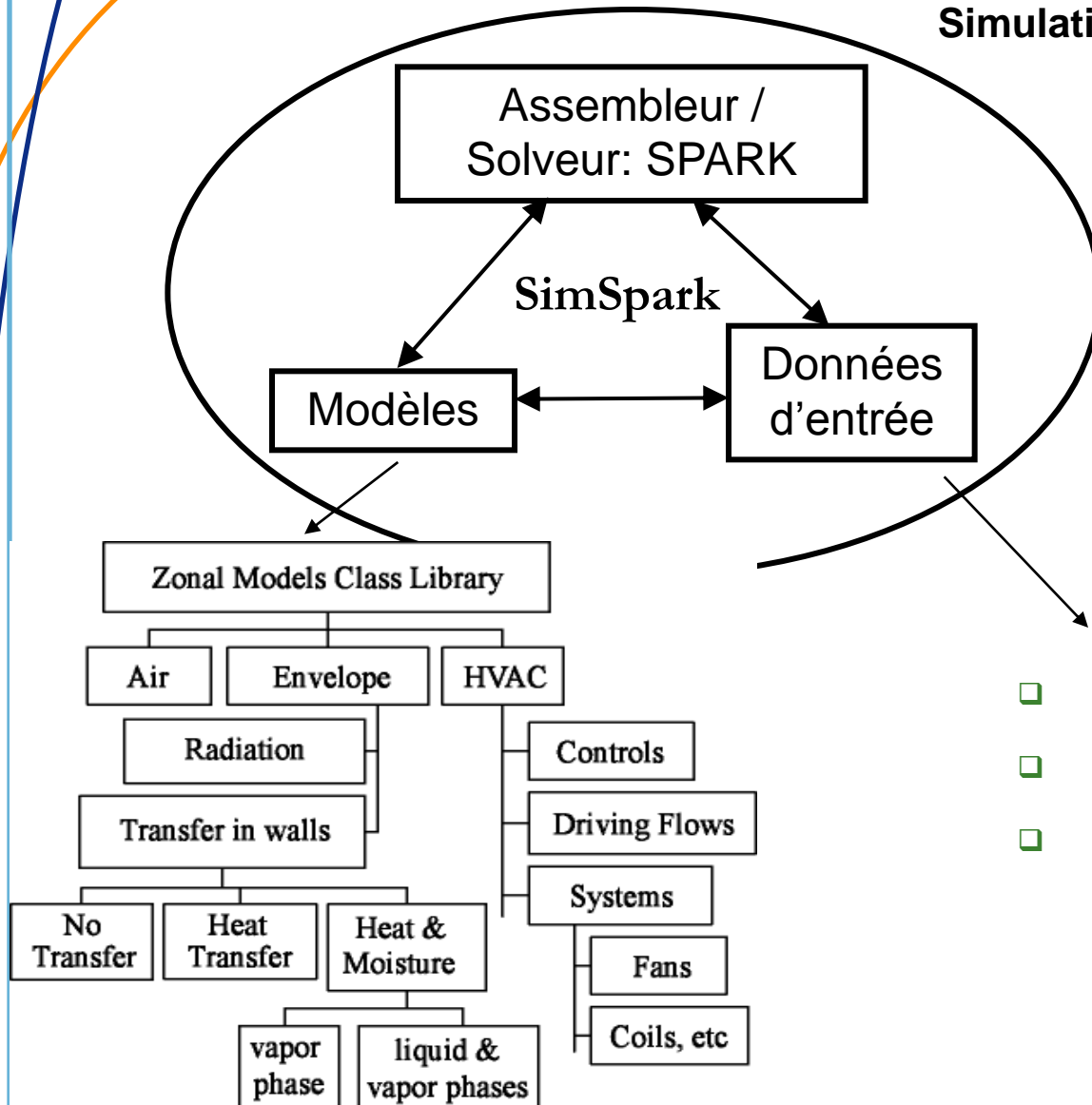
Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

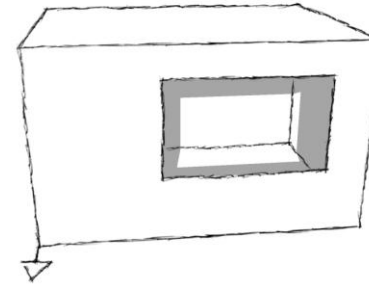
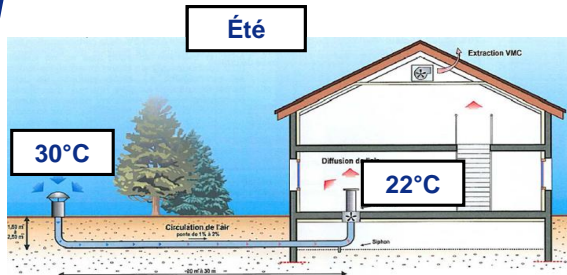
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives



- Météo
- Matériaux
- Etc.



Modèles intégrés au bâtiment

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- Matériaux à changement de phase (MCP)

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

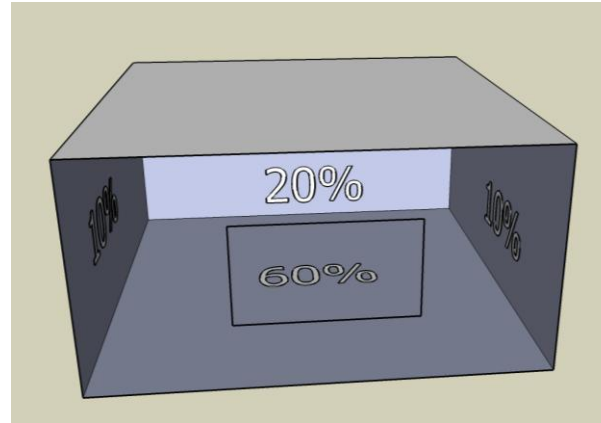
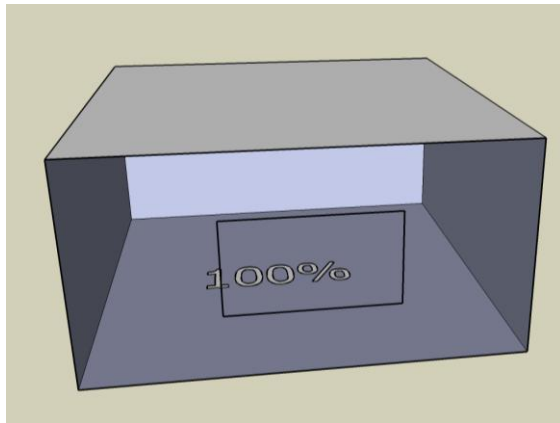
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

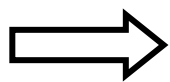
Conclusions et
perspectives

Constatations:

- Le coefficient de répartition du flux solaire à l'intérieur d'une pièce est souvent pris constant dans les logiciels de simulation (choisi par des utilisateurs experts)



- Dans les anciens bâtiments : peu d'influence sur le comportement thermique



Avec les bâtiments basse consommation, ces hypothèses sont-elles encore acceptables?

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

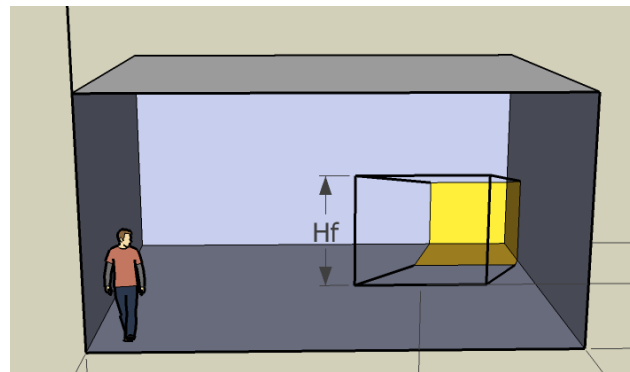
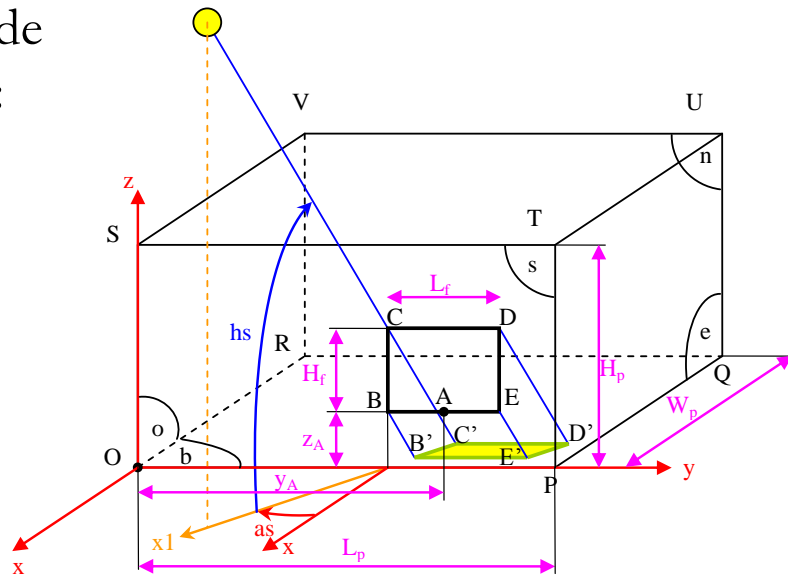
Calcul de la position et de la surface de la tache solaire

- Calcul des coordonnées de la projection de la fenêtre :

$$x_{B1} = -z_A \cdot \frac{\cos(as)}{\tan(hs)}$$

$$y_{B1} = y_A - \frac{L_f}{2} - z_A \cdot \frac{\sin(as)}{\tan(hs)}$$

- 20 cas sont distingués dans le calcul:
 - Tout le rayonnement arrive au plancher
 - Tout le rayonnement arrive sur le mur en face de la fenêtre...



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Calcul de la position et de la surface de la tache solaire

- La surface de la tache solaire est calculée sur chaque paroi à chaque pas de temps par une formule explicite :

Cas 1 :

$$A_b = \left| L_f \cdot \cos(as) \cdot H_f \cdot \frac{\cos(hs)}{\sin(hs)} \right| \quad A_o = 0$$

$$A_e = 0$$

$$A_n = 0 \quad A_s = 0$$

Cas 2 :

$$A_b = \left| \left(-zA \cdot \frac{\cos(as)}{\tan(hs)} + W_p \right) \cdot L_f \right| \quad A_o = 0$$

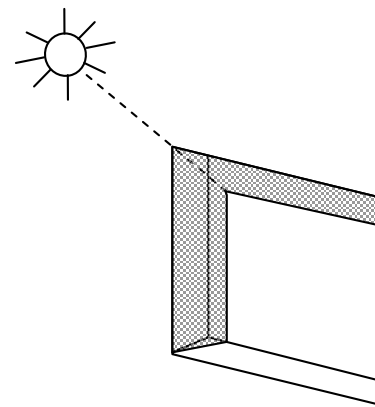
$$A_e = 0$$

$$A_n = \left| \left(zA + H_f - W_p \cdot \frac{\tan(hs)}{\cos(as)} \right) \cdot L_f \right| \quad A_s = 0$$

- Prise en compte des masques solaires en considérant une fenêtre fictive éclairée :

$$L_{f,ec} = \min \left(\begin{array}{l} \min \left(L_f, \max \left(0, L_f + D_{m,g} - W_{m,g} \cdot \tan(as) \right) \right), \\ \min \left(L_f, \max \left(0, L_f + D_{m,dr} + W_{m,dr} \cdot \tan(as) \right) \right) \end{array} \right)$$

$$H_{f,ec} = \min \left(H_f, H_f + H_{ca} - W_{ca} \cdot \frac{\tan(hs)}{\cos(as)} \right)$$



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Prise en compte dans le calcul thermique

- Calcul du flux primaire qui atteint les murs :

Coef. transmission vitrage [-]

Surface tache solaire [m²]

Flux Primaire [W]

Éclairement dans le plan de la fenêtre [W/m²]

Paroi est : $q_{D,e} = \tau \cdot A_e \cdot q''_{r,D} \cdot \tan(as)$

Paroi nord : $q_{D,n} = \tau \cdot A_n \cdot q''_{r,D}$

Paroi ouest : $q_{D,o} = -\tau \cdot A_e \cdot q''_{r,D} \cdot \tan(as)$

Plancher : $q_{D,b} = \tau \cdot A_b \cdot E_{D,h}$

Angle caractérisant la position du soleil par rapport à la paroi [rad]

- Utilisation de ce flux primaire dans la méthode des enceintes fictives pour le calcul du rayonnement

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

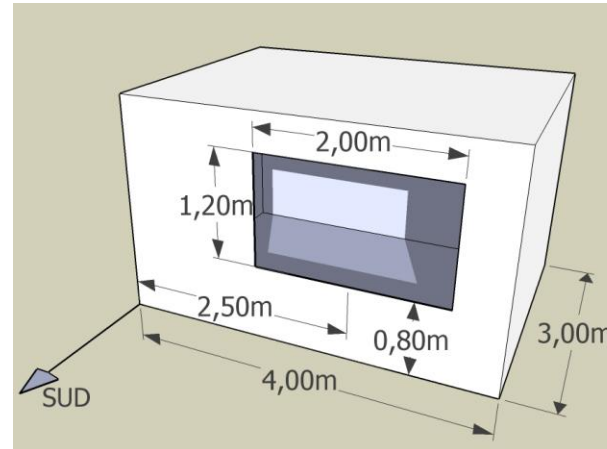
Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

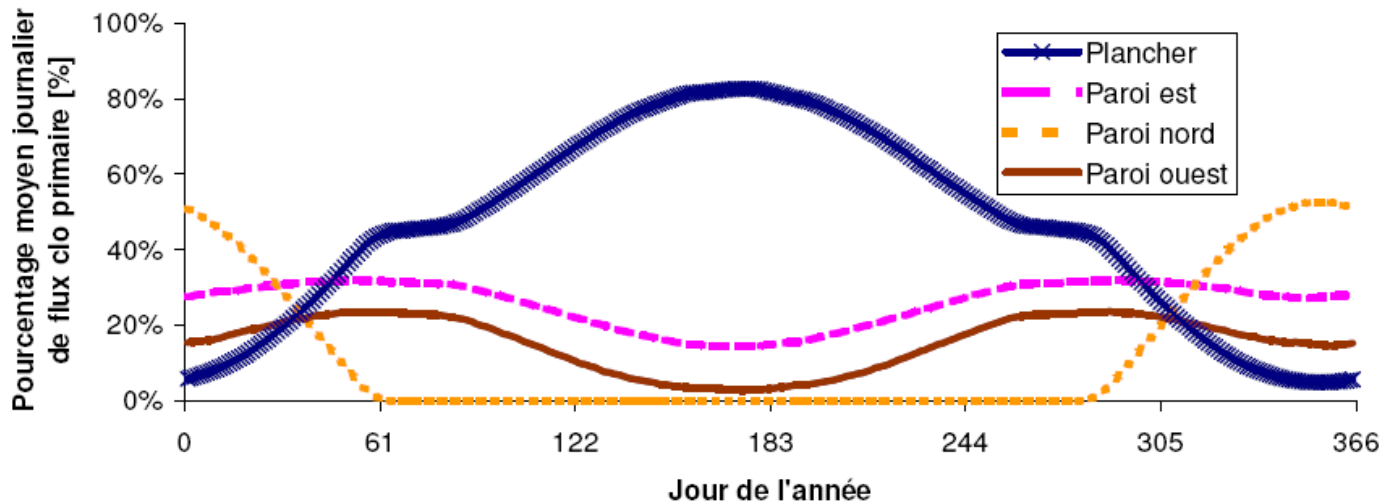
Répartition du flux solaire: cas test

Cas test étudié:

Pièce parallélépipédique avec une fenêtre au sud



Répartition annuelle moyenne:



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

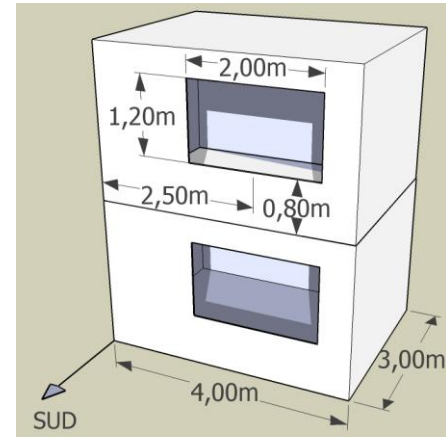
Tache solaire / comportement thermique du bâtiment

Cas étudié

Cas test:

- Deux pièces superposées
 - Enveloppe fortement inertielle (béton, isolant extérieur)
 - Enveloppe faiblement inertielle (type ossature bois)

- Configurations de calcul:
 - Cas 1 : calcul de la tache solaire à chaque pas de temps
 - Cas 2 : on considère que le flux CLO direct arrive sur le plancher pendant toute la simulation
 - Cas 3 : on considère que 60% du flux CLO direct arrive sur le plancher et le reste est réparti au prorata des autres surfaces pendant toute la simulation
 - Cas 4 : le calcul de la tache solaire est réalisé une fois sur toute l'année et on considère la moyenne de la répartition sur la saison de chauffe pour le calcul du flux CLO



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Tache solaire / comportement thermique du bâtiment

Résultats

□ Besoins de chauffage (Enveloppe à forte inertie) :

		cas 1 (calcul de la tache solaire)	cas 2 (répartition forfaitaire: tout sur le sol)	cas 3 (répartition forfaitaire: 60% sur le sol)	cas 4 (répartition constante avec calcul préliminaire)
RDC	Besoins de chauffage [kW.h/(m ² .an)]	17.2 (référence)	15.7	16.4	17.1
	Écart par rapport au cas 1	-	8.5%	4.6%	0.1%
étage	Besoins de chauffage [kW.h/(m ² .an)]	21.7 (référence)	23.2	22.5	21.6
	Écart par rapport au cas 1	-	-7.1%	-3.5%	0.3%

□ Besoins de chauffage (Enveloppe à faible inertie) :

		cas 1 (calcul de la tache solaire)	cas 2 (répartition forfaitaire: tout sur le sol)	cas 3 (répartition forfaitaire: 60% sur le sol)	cas 4 (répartition constante avec calcul préliminaire)
RDC	Besoins de chauffage [kW.h/(m ² .an)]	20.8 (référence)	20.3	20.6	20.8
	Écart par rapport au cas 1	-	2.6%	1.4%	0.1%
étage	Besoins de chauffage [kW.h/(m ² .an)]	25.8 (référence)	26.3	26.1	25.7
	Écart par rapport au cas 1	-	-2.2%	-1.1%	0.1%

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Tache solaire / comportement thermique du bâtiment

Modèle :

- Formulation explicite permet des temps de calcul très faibles
- Hypothèse : répartition uniforme de la tache solaire sur chaque paroi
- Limitation à une géométrie parallélépipédique et fenêtre rectangulaire

Résultats : (sur le cas d'étude choisi)

- Considérer que tout le flux solaire arrive au sol peut entraîner des écarts importants sur le comportement simulé des bâtiments dans le cas des bâtiments à forte inertie
- Le pré-calcul des coefficients de répartition du flux solaire moyen selon la saison permet de mieux appréhender le comportement thermique du bâtiment

Intérêt de l'environnement de simulation :

- Le fait qu'il soit basé sur les systèmes d'équations permet de remplacer facilement dans le modèle de rayonnement le flux primaire qui était un paramètre d'entrée par un calcul plus détaillé.

Conclusions

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

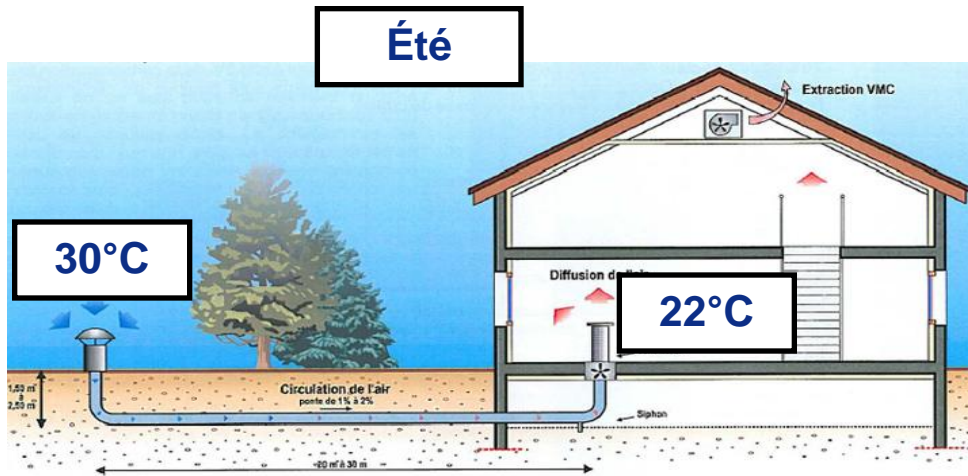
Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives



Modèles intégrés au bâtiment

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- Matériaux à changement de phase (MCP)

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

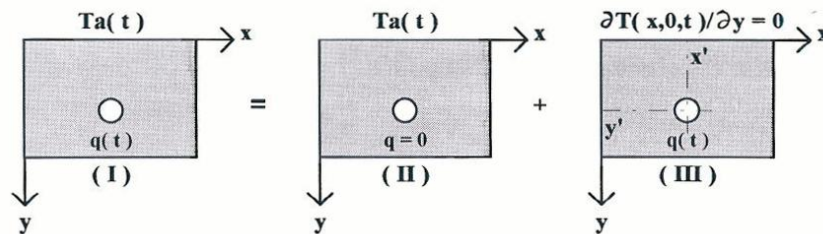
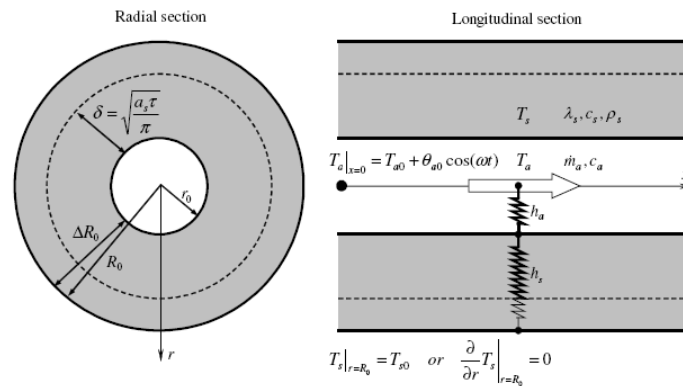
Modèles analytiques :

- Modèles basiques

$$T_{sol}(z, t) = T_{sse} - T_{amp, sse} \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - z \cdot \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot a}}\right)$$

$$(T_{sortie} - T_{sp}) = (T_{entrée} - T_{sp}) \cdot (1 - e^{-NUT(L_t)})$$

- Modèles évolués



Problème : géométries restreintes, sol homogène...

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

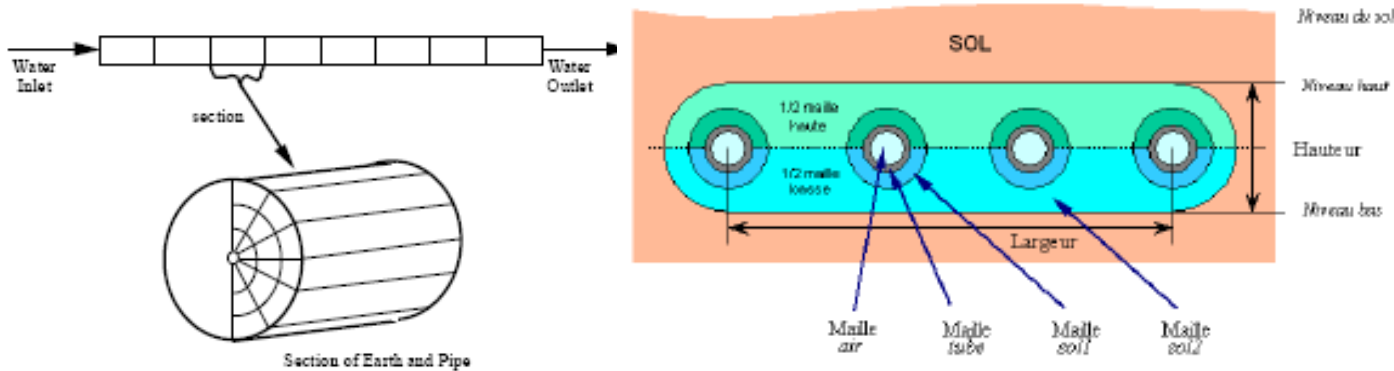
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Modèles numériques :

- Modèles de conduction prenant en compte une partie du sol



- Modèles de conduction prenant en compte la géométrie complète du problème
 - Modèles 2D (éléments finis ou différences finies)
 - Modèles 3D (éléments finis ou différences finies)

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

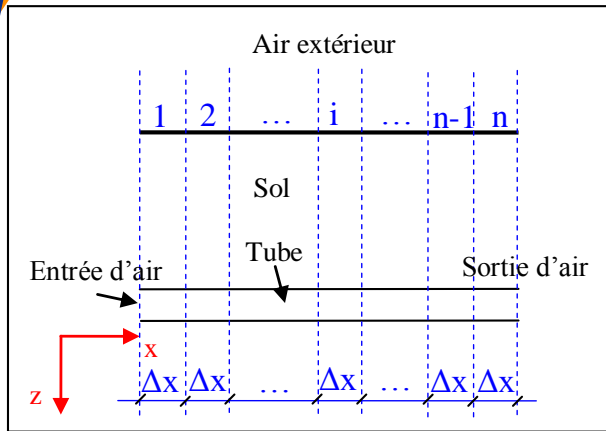
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

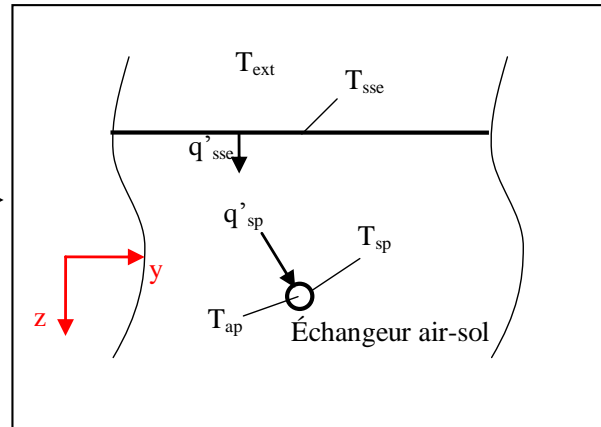
Conclusions et
perspectives

Présentation du modèle

Décomposition du problème



Discrétisation longitudinale



Problème à résoudre dans chaque tranche

$$q'_i \cdot \Delta x + \rho_{air} \cdot S \cdot C_{p_{air}} \cdot u \cdot \left(T_{i-\frac{1}{2}} - T_{i+\frac{1}{2}} \right) = 0$$

Bilan en surface du sol

Méthode des facteurs de réponse

$$q'_{sse} = (q''_{conv} + q''_{clo} + q''_{glo}) \cdot L_{infl}$$

Conduction

Bilan en surface du tube

$$q'_{sp} = h_{cp} \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{sp} - T_{ap})$$

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du bâtiment solaire

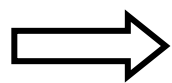
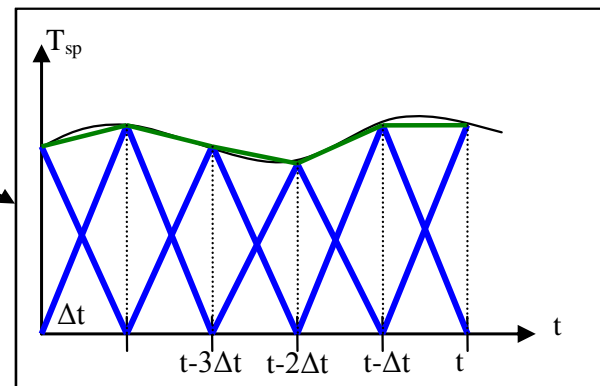
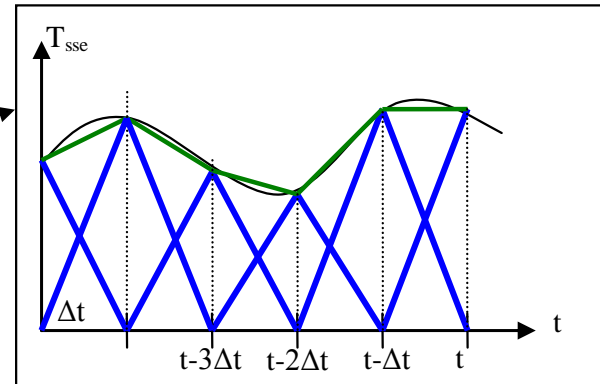
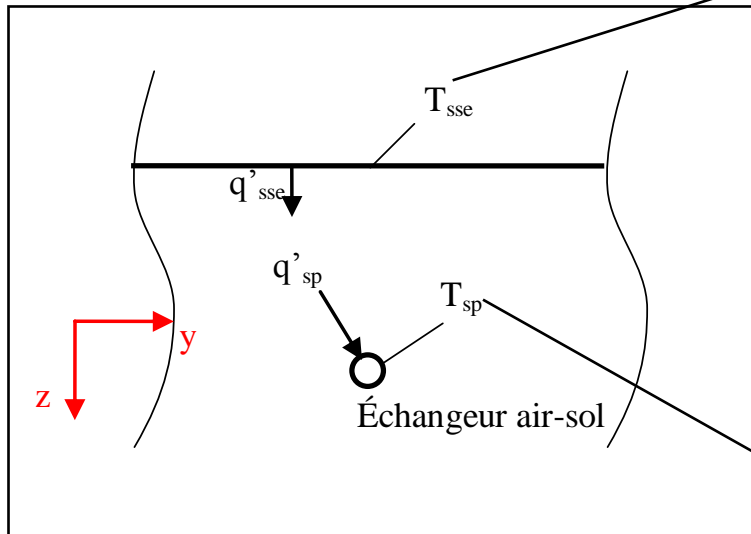
Conclusions et perspectives

Présentation du modèle

Méthode des facteurs de réponse pour le problème de conduction

Sollicitations:

Problème de conduction à résoudre:



On cherche la réponse du système à une sollicitation élémentaire en température de forme triangulaire

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

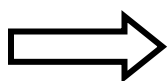
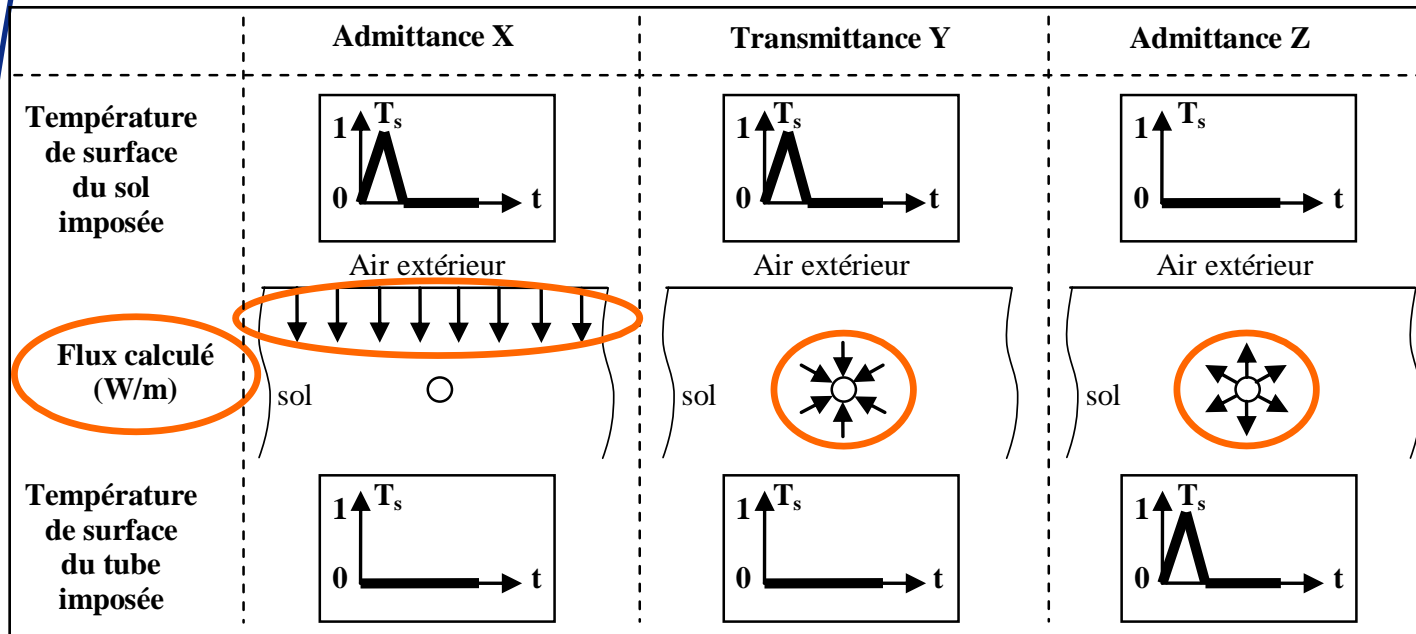
Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Présentation du modèle

Méthode des facteurs de réponse pour le problème de conduction

Trois facteurs de réponse à déterminer :



Utilisation d'un logiciel de calcul par éléments finis 2D

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Présentation du modèle

Méthode des facteurs de réponse pour le problème de conduction

Calcul du flux arrivant dans le tube :

$$q'_{sp}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} Y[i] \cdot T_{sse}(t - i \cdot \Delta t_y) - \sum_{i=0}^{\infty} Z[i] \cdot T_{sp}(t - i \cdot \Delta t_z)$$

Réduction de la somme infinie :

- On utilise les propriétés des facteurs de réponse:

$$\sum_{i=0}^{\infty} X[i] = \sum_{i=0}^{\infty} Y[i] = \sum_{i=0}^{\infty} Z[i] = K$$

- On obtient donc:

$$q'_{sp}(t) = \sum_{i=0}^{n_y} Y[i] \cdot T_{sse}(t - i \cdot \Delta t_y) + \overline{T_{sse}} \cdot \left(K - \sum_{i=0}^{n_y} Y[i] \right) - \sum_{i=0}^{n_z} Z[i] \cdot T_{sp}(t - i \cdot \Delta t_z) - \overline{T_{sp}} \cdot \left(K - \sum_{i=0}^{n_z} Z[i] \right)$$

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

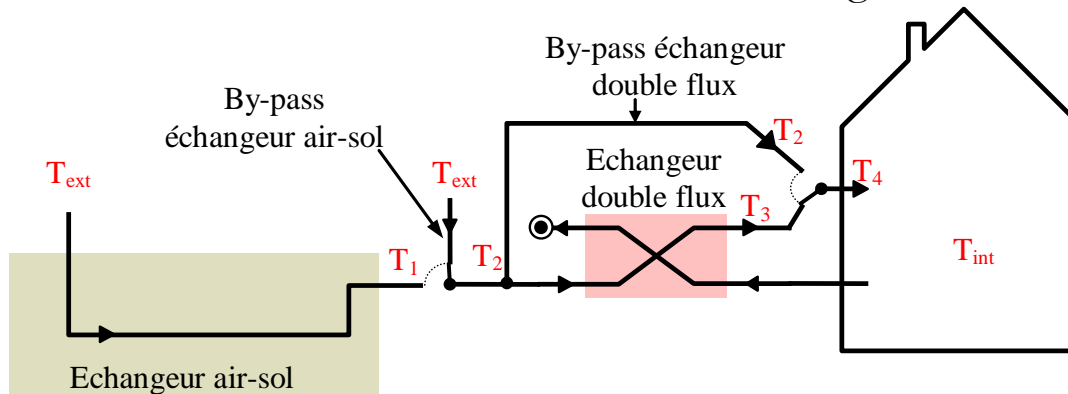
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Couplage de l'échangeur air-sol à un bâtiment

- ❑ Maison béton, isolant extérieur (20 cm)
- ❑ Géométrie de l'échangeur:
 - Longueur 20 m
 - Profondeur 2 m ou 60 cm
 - Diamètre 20 cm
- ❑ Débit dans le tube: 250 m³/h
- ❑ Sollicitation: météo de Chambéry
- ❑ Association ventilation double flux – échangeur air-sol



- ❑ Couplage au sein de SimSpark : on connecte les variables de vitesse d'air et de température de sortie du tube

Cas test étudié

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

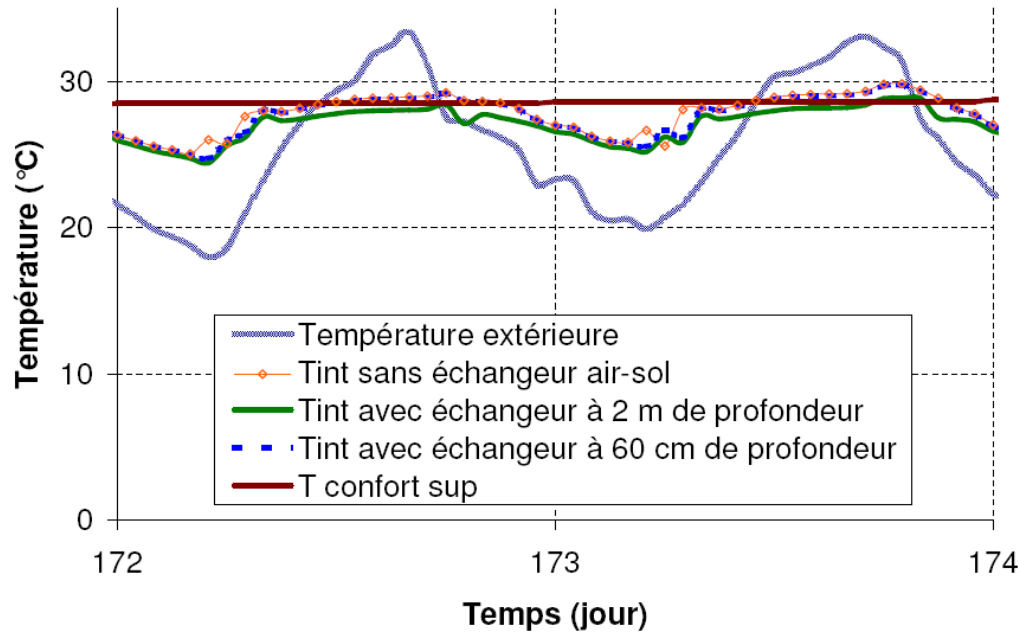
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Couplage de l'échangeur air-sol à un bâtiment

□ Confort d'été :



Échangeur air-sol	aucun	profondeur: 60cm	profondeur: 2m
Nombre d'heure en dehors de la zone de confort	188 h	156 h	74 h
Nombre de degrés-heure au dessus de la température de confort	3029 °C.h	2683 °C.h	2581 °C.h

Résultats

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

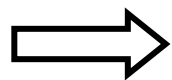
Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Couplage de l'échangeur air-sol à un bâtiment

□ Besoins de chauffage :

Type de ventilation	Ventilation double flux			Ventilation simple flux		
	aucun	profondeur: 2 m	profondeur: 60 cm	aucun	profondeur: 2 m	profondeur: 60 cm
Besoins de chauffage [kW.h/(m ² .an)]	18	15	16	36	24	27



Le puits canadien peut être intéressant sans ventilation double flux l'hiver

Résultats

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Couplage de l'échangeur air-sol à un bâtiment

Modèle :

- Intéressant pour sa précision avec réduction des temps de calcul
- Permet de prendre en compte un sol quelconque
- Peut être couplé aisément à un bâtiment
- Peut prendre en compte l'interaction de plusieurs tubes mais devient vite fastidieux

Résultats : (sur le cas d'étude choisi)

- L'intérêt peut être limité (hiver avec ventilation double flux)
- Peut être intéressant en hiver avec utilisation d'une ventilation simple flux, potentiellement intéressant en été

Intérêt de l'environnement de simulation :

- Permet de rechercher les niches pour lesquels l'échangeur air-sol est intéressant.
- Permet de valider le modèle d'échangeur air-sol de façon indépendante puis de le coupler aisément au modèle de bâtiment.

Conclusions

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

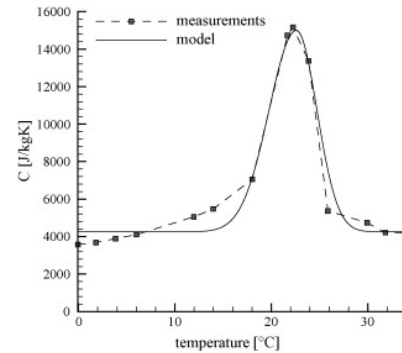
Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives



Modèles intégrés au bâtiment

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- Matériaux à changement de phase (MCP)

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

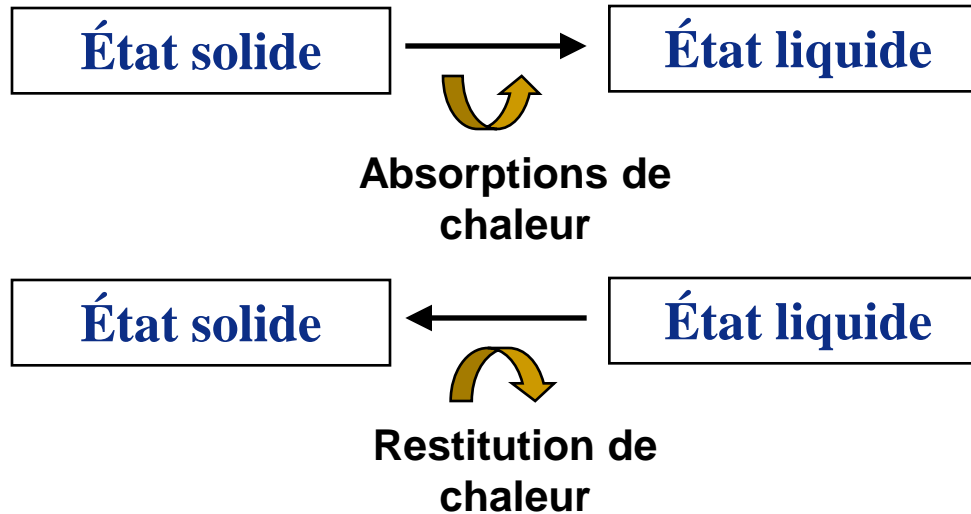
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Les MCP dans le bâtiment

Principe:



Idée:

- Stocker l'énergie en journée et la restituer la nuit

Produits:

- Macro-encapsulés dans blocs de bétons ou béton coulé
- Micro-encapsulés dans des panneaux de gypse ou dans des plaques à matrice polymérique

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

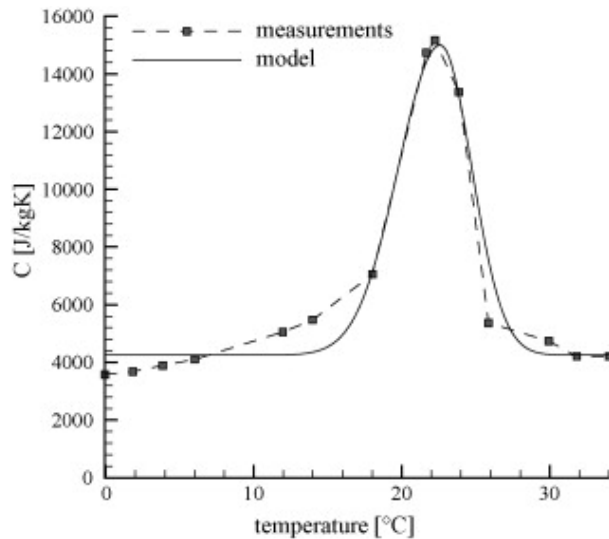
Modèle de MCP utilisé

Modèle de Kuznik et al. (2008) :

- Conduction dans la plaque 1D, différences finies :

$$q''_{i+\frac{1}{2}} - q''_{i-\frac{1}{2}} = \rho \cdot Cp \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} \quad q''_{i+\frac{1}{2}} = \frac{\lambda \cdot (T_i - T_{i+1})}{\Delta x}$$

- Variation de la conductivité avec la température :



$$C_p = \begin{cases} 4250 + 10750 \cdot e^{-\left(\frac{22,6-T}{4}\right)^2} & \text{si } T \leq 22,6^\circ\text{C} \\ 4250 + 10750 \cdot e^{-\left(\frac{22,6-T}{3}\right)^2} & \text{si } T > 22,6^\circ\text{C} \end{cases}$$

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

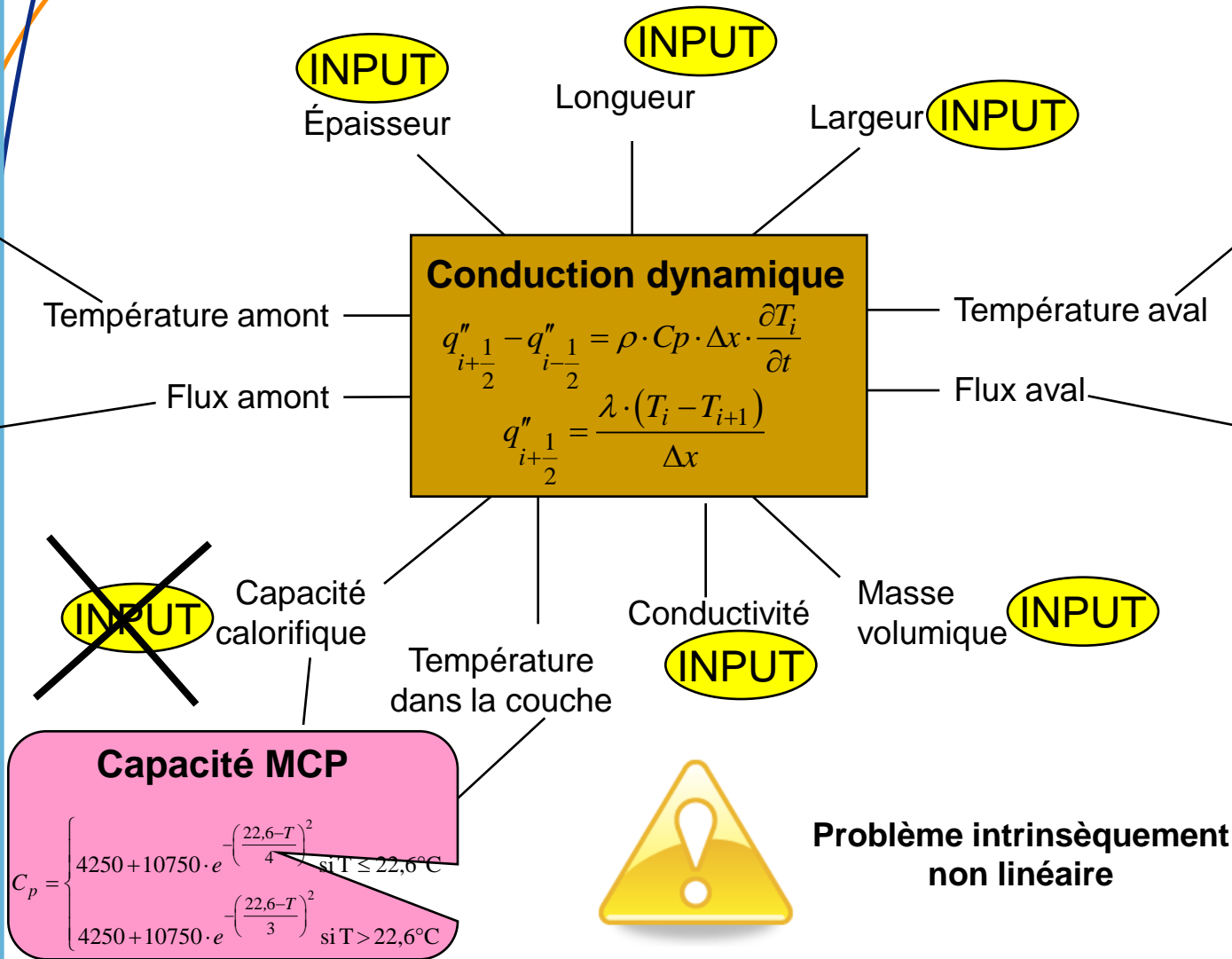
Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Intégration du modèle à SimSpark



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

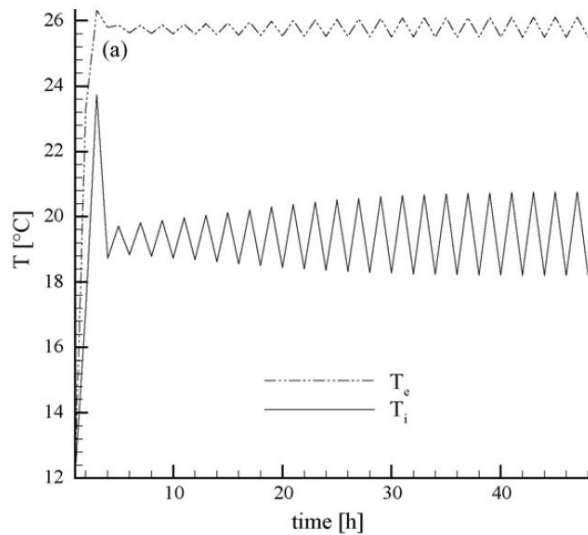
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

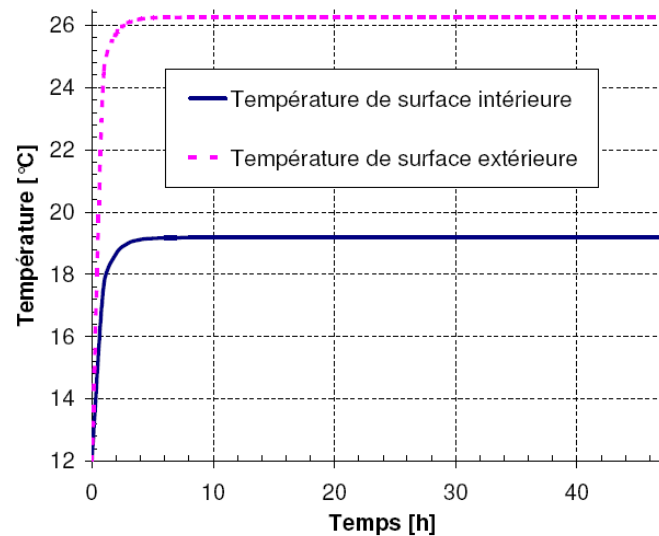
Conclusions et
perspectives

Problèmes d'instabilité numérique

- Réponse à un échelon en température :

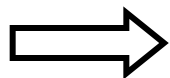


(Kuznik 2008)



Avec Spark

- Avec **Spark**, utilisation d'un modèle d'intégrateur robuste à pas de temps variable :



Pas de problème de convergence

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

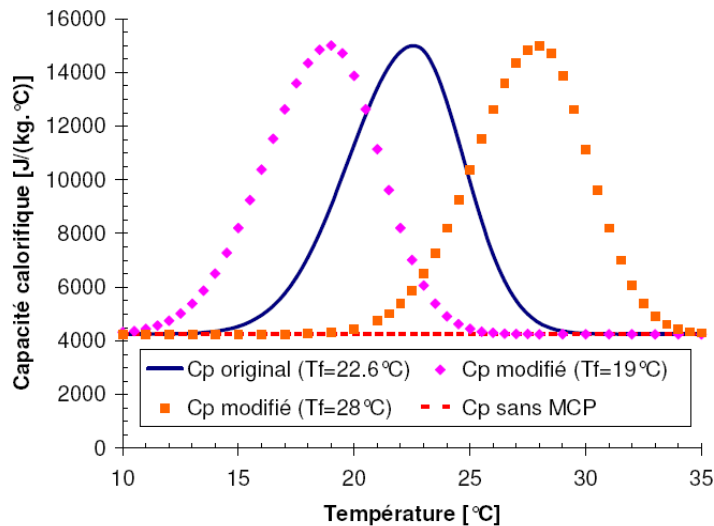
Conclusions et
perspectives

Influence des MCP sur le comportement du bâtiment

- Intégration des plaques de MCP dans la simulation de la maison INCAS bois (structure légère)

	sans MCP	5 mm de MCP	1 cm de MCP
Nombre de degrés heure en dehors de la zone de confort [°C.h]	601	580	502
Besoins de chauffage [kW.h/(m ² .an)]	20.4	20.2	20.1

- Étude de la température de fusion la plus adaptée:



$$C_p = \begin{cases} 4250 + 10750 \cdot e^{-\left(\frac{T_f - T}{4}\right)^2} & \text{si } T \leq T_f \\ 4250 + 10750 \cdot e^{-\left(\frac{T_f - T}{3}\right)^2} & \text{si } T > T_f \end{cases}$$

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

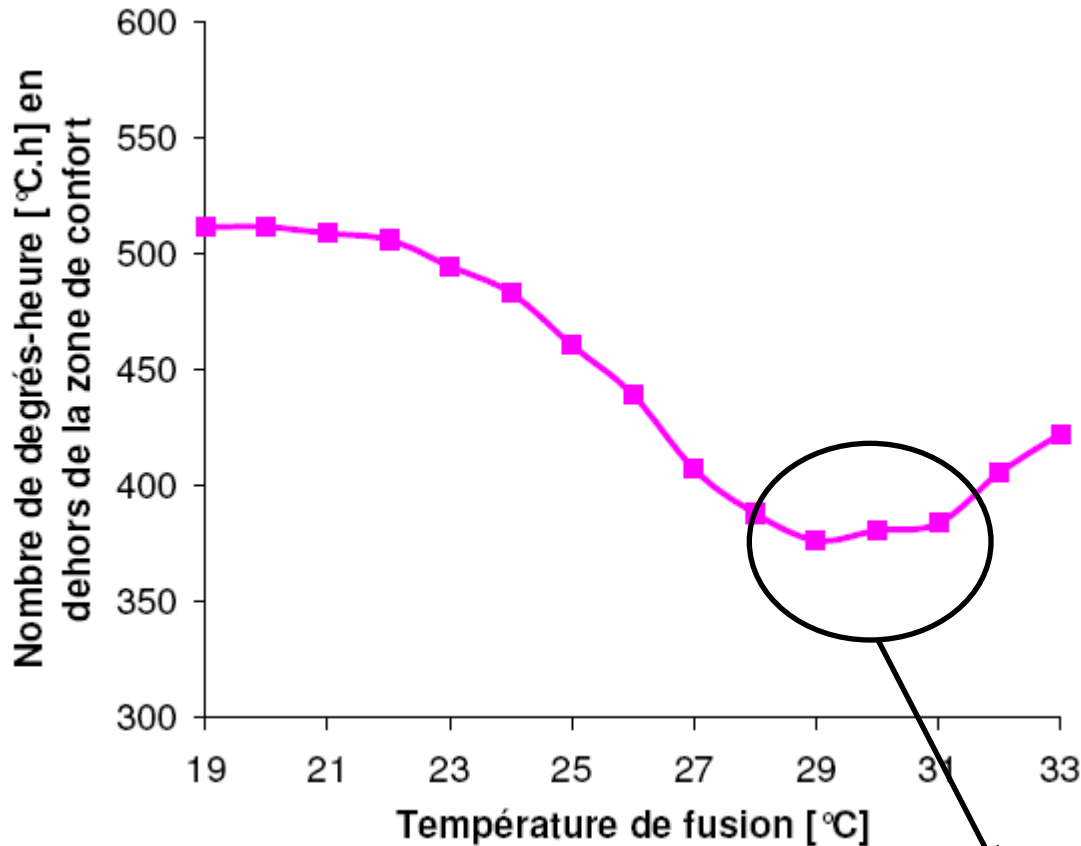
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Influence des MCP sur le comportement du bâtiment

Effet de la température de fusion



Optimum autour de la température de confort

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

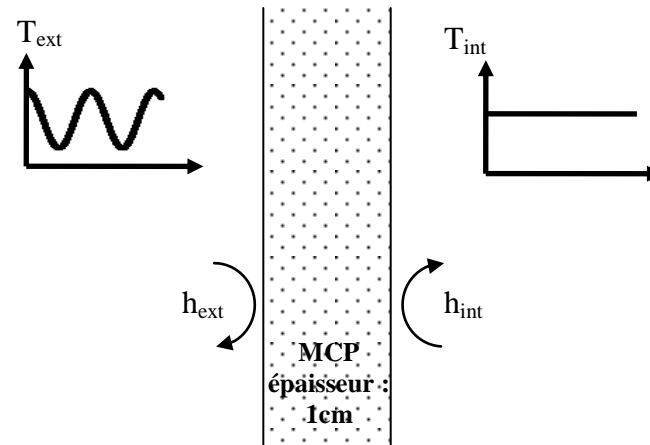
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Inversion de modèle

- On part d'une expérience virtuelle
- On relève les températures au sein du MCP
- On utilise ces données comme des résultats expérimentaux et on essaye d'en déduire la capacité calorifique du MCP



Méthode:

- On utilise une paroi classique (modèle 1D différences finies)
- On fixe en entrée les températures au sein du MCP et on relève la capacité calorifique
- Besoin d'utiliser un dérivateur (implicite 2° ordre):

$$\dot{u}_i = \frac{\Delta t_i^2 \cdot u_{i-2} - (\Delta t_i + \Delta t_{i-1})^2 \cdot u_{i-1} + (\Delta t_{i-1}^2 + 2 \cdot \Delta t_i \cdot \Delta t_{i-1}) \cdot u_i}{\Delta t_i \cdot \Delta t_{i-1}^2 + \Delta t_i^2 \cdot \Delta t_{i-1}}$$

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

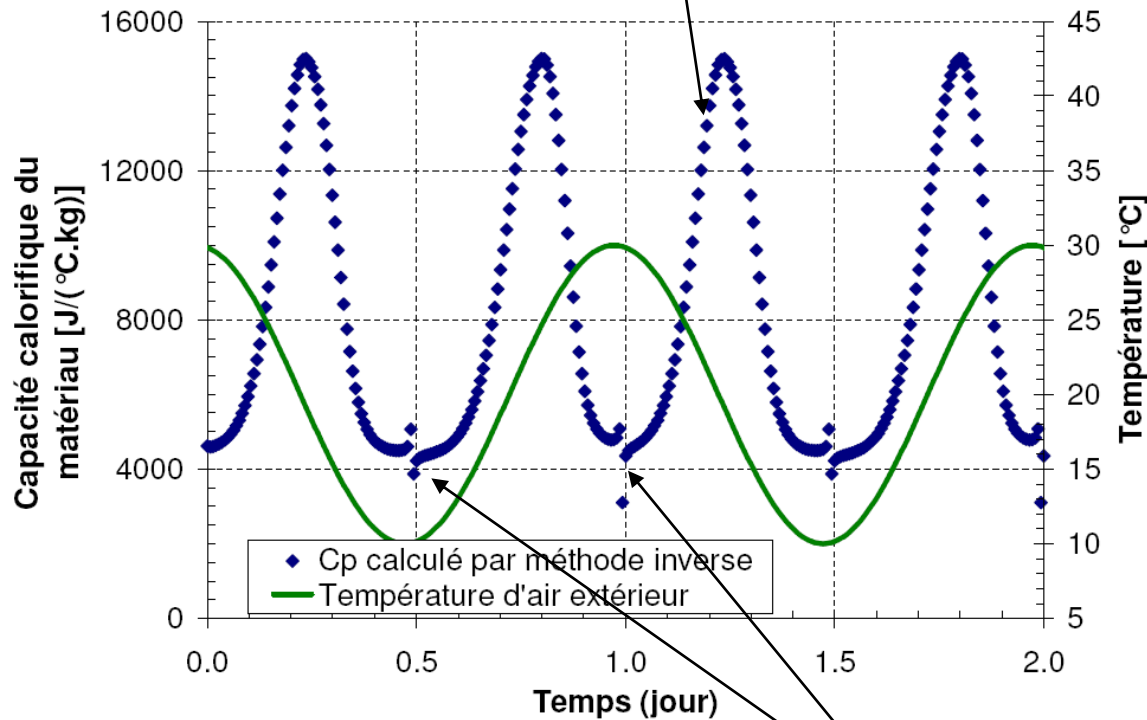
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Inversion de modèle

Variation de Cp au cours du temps



$$Cp = \frac{q_{cond,am} - q_{cond,av}}{\rho \cdot V \cdot \frac{\partial T_{MCP}}{\partial t}}$$

Instabilités dues à la dérivée de température qui s'annule

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

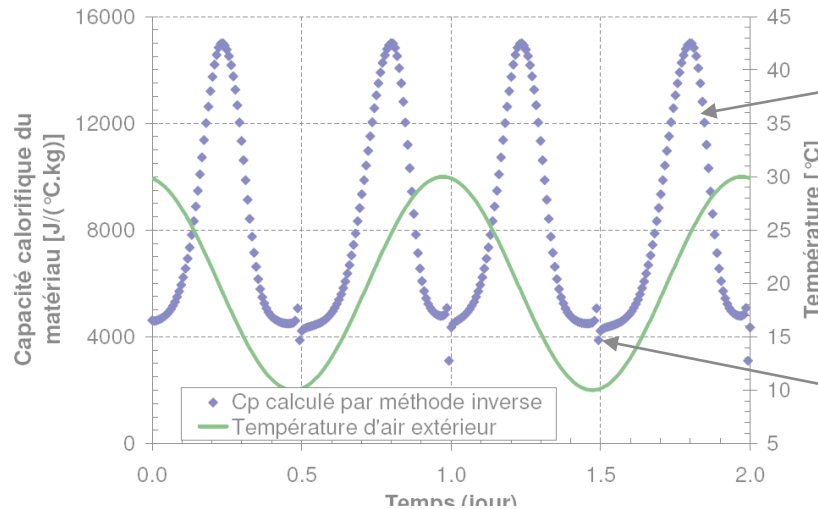
Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Inversion de modèle



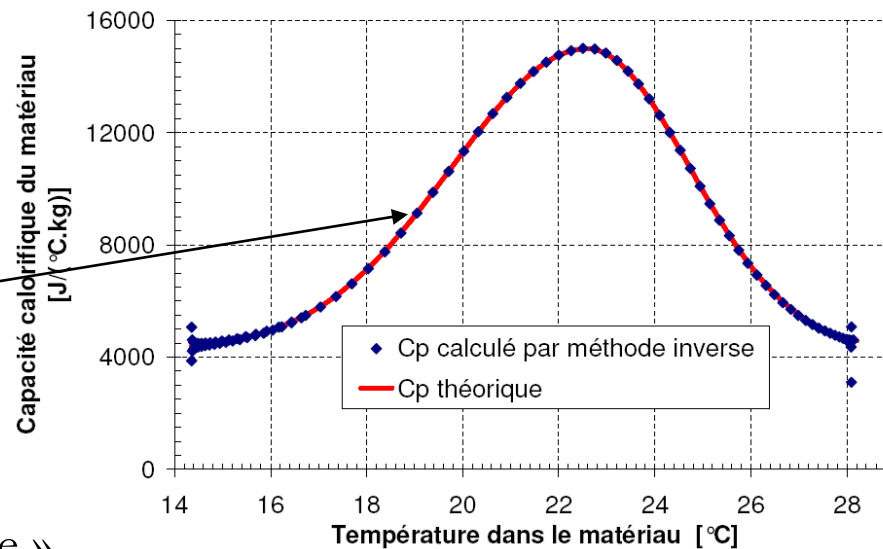
Variation de Cp au cours du temps

Instabilité due à la dérivée de température qui s'annule

On retrouve la courbe de variation $C_p=f(T)$



« Expérience virtuelle »



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Intégration des MCP dans le bâtiment

Conclusions

Modèle :

- Modèle de la littérature basé sur des mesures expérimentales (comportement identique solidification, liquéfaction)

Résultats : (sur le cas d'étude choisi)

- La température de fusion choisie par le fabricant n'est pas optimale (22.6°C au lieu de 29°C)

Intérêt de l'environnement de simulation :

- Intégration aisée du modèle de MCP dans une paroi classique
- Robustesse du solveur qui permet de s'affranchir de certains problèmes numériques
- Intégration aisée de la paroi MCP dans la simulation globale du bâtiment
- Possibilité d'inversion du modèle

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives



Analyse globale du bâtiment solaire

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Efficacité solaire d'un Bâtiment

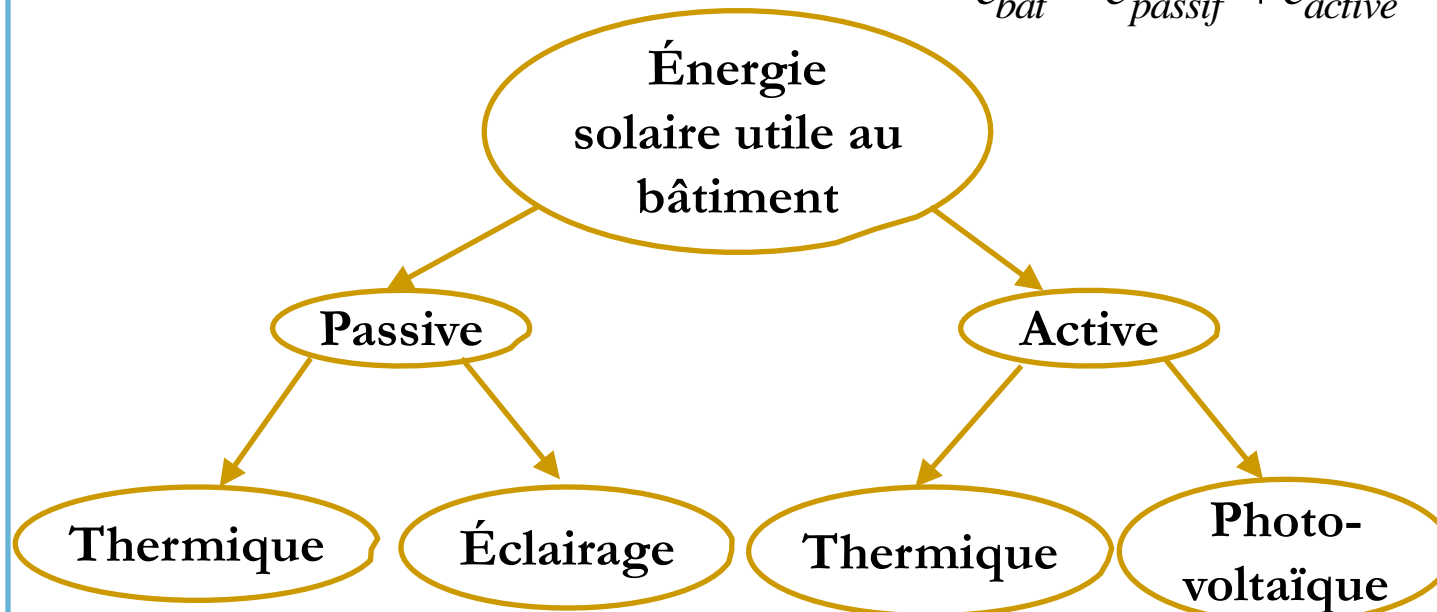
Idée : évaluer le pourcentage utile du flux solaire total arrivant sur le bâtiment

- Évaluation de l'énergie solaire totale atteignant le bâtiment :
$$q''_{CLO} = q''_{r,D} + q''_{r,d} + q''_{r,R}$$

direct diffus réfléchi

- Évaluation de l'énergie utile :

$$e_{bat} = e_{passif} + e_{active}$$



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

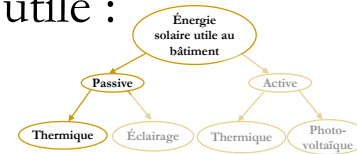
Conclusions et
perspectives

Calcul de l'efficacité solaire passive thermique

Calcul de l'efficacité solaire :

$$e = \left[\frac{\text{énergie solaire utile}}{\text{énergie solaire totale reçue par le bâtiment}} \right]_{\text{période utile}}$$

Évaluation de l'énergie solaire passive thermique utile :



Simulation 1:

- Températures de consigne: basées sur les limites de confort
- Durée: période utile
- Sollicitations : météo classique

Simulation 2:

- Températures de consigne: basées sur les limites de confort
- Durée: période utile
- Sollicitations : météo classique mais sans soleil

$$\text{Energie solaire utile} = \max \left(\left[\int_{\text{période utile}} |P_{\text{sans soleil}}| - |P_{\text{avec soleil}}| dt \right], 0 \right)$$

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Efficacité solaire d'une maison INCAS



Maison 1



Maison 2

Période	Hiver		Intersaison	
	1	2	1	2
Maison étudiée	1	2	1	2
Efficacité passive	6.7%	9.1%	3.4%	4.1%
Efficacité PV	4.7%		4.3%	
Efficacité thermique	0.8%		0.4%	
Efficacité totale	12.2%	14.6%	8.1%	8.8%
Besoins [kWh/(m ² .an)]	18	15		

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Conclusions et perspectives

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

- ❑ Environnements de simulation orientés objet, basés sur les systèmes d'équations adapté aux défis des bâtiments basse consommation
- ❑ Nécessité de trouver des niches pertinentes pour le recours à des systèmes innovants
- ❑ Rôle important de la répartition de l'inertie pour des bâtiments basse consommation
- ❑ Efficacité de l'échangeur air-sol est fonction des conditions climatiques et du type de bâtiment
- ❑ Adaptation de la température de fusion des MCP pour optimiser les conditions de confort

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

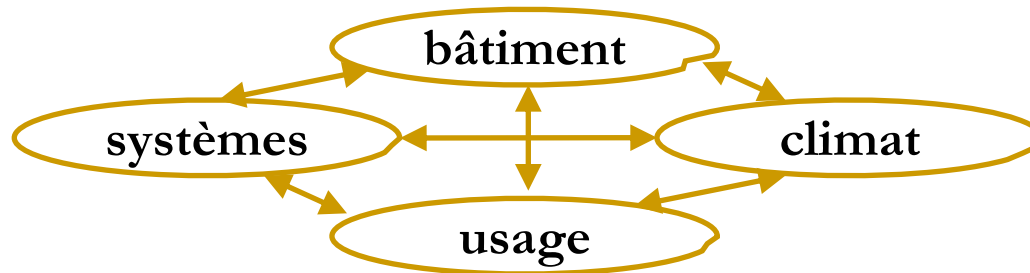
Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

- ❑ Validation des modèles développés
- ❑ Inversion de modèles pour le diagnostic énergétique des bâtiments
- ❑ Gestion des apports gratuits (inertie du bâtiment en hiver, sources internes et puits énergétiques)
- ❑ Optimisation d'un bâtiment en fonction du contexte :



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives



Merci de votre attention

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

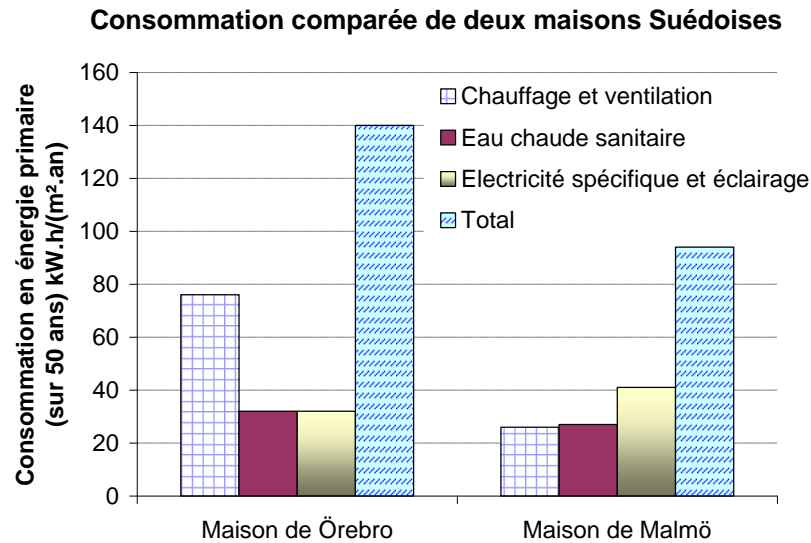
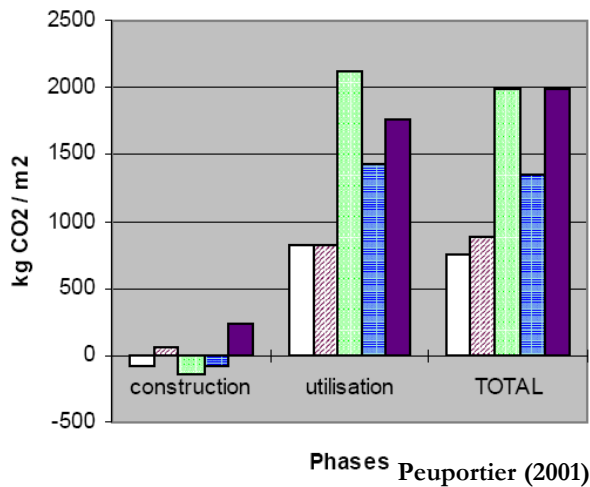
Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Analyse du cycle de vie d'un bâtiment

But : Évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment de manière globale sur toute son existence

➔ On peut savoir quelle phase et quel poste d'un projet sont les plus nuisibles



➔ Pour réduire l'impact global d'un bâtiment, il est primordial de réduire ses besoins de chauffage

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

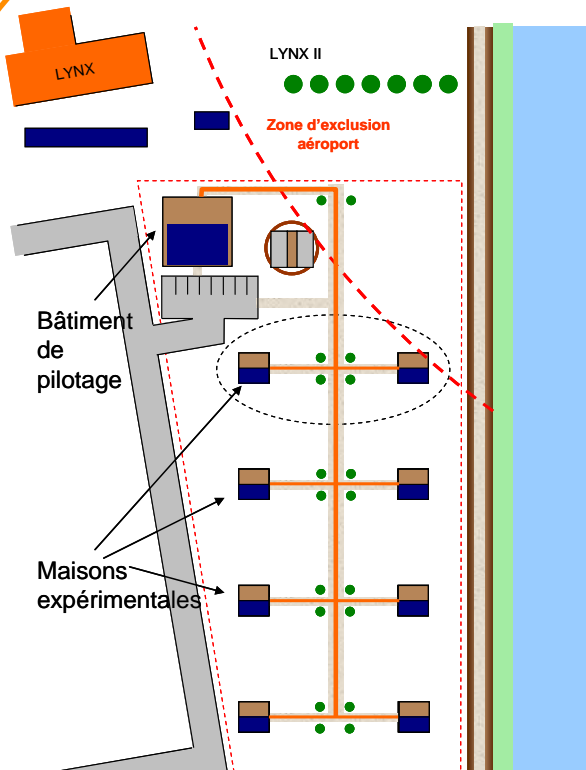
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Couplage de l'échangeur air-sol à un bâtiment

La plateforme expérimentale INCAS



- N maisons à géométries identiques
 - Fonctionnement maîtrisé (inhabité), climat subi.
 - Comportement des occupants simulé
- Objectif: valider les modèles développés



Les premières maisons :

- Double mur parpaing isolant au centre (20 cm)
- Béton isolant extérieur
- Ossature bois

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

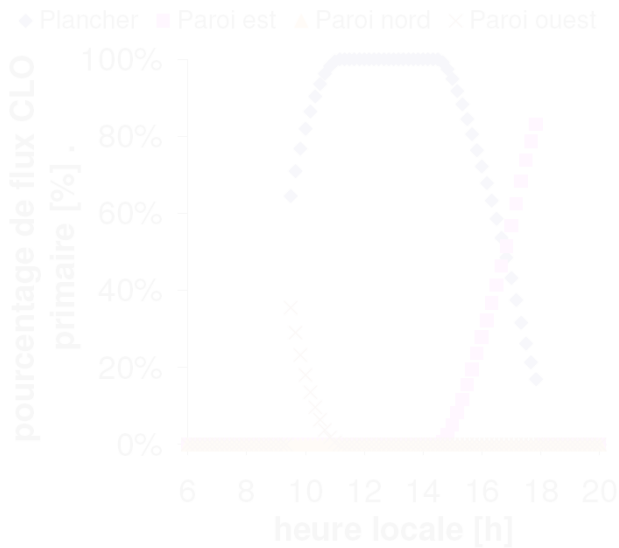
- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

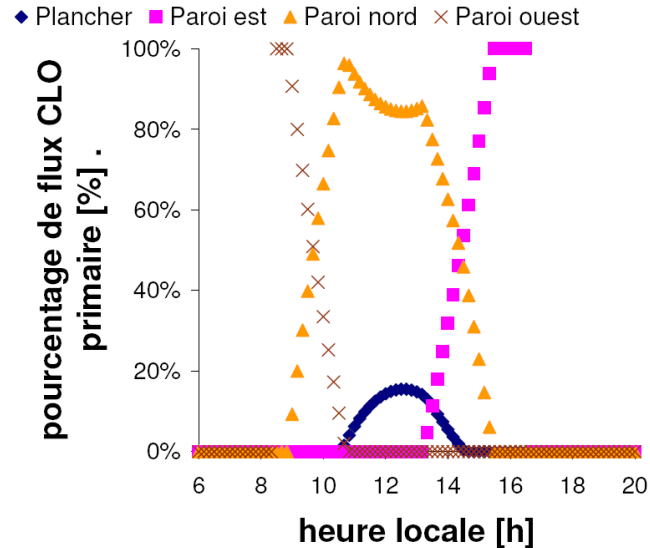
Conclusions et
perspectives

Répartition du flux solaire: cas test

Répartition journalière:



le jour de l'été



le jour de l'hiver

	Plancher	Paroi est	Paroi Nord	Paroi ouest
toute l'année	46.3%	26.0%	12.2%	15.5%
juillet, août	71.4%	20.0%	0.0%	8.6%
novembre, décembre, janvier, février	16.1%	29.7%	35.3%	18.9%

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

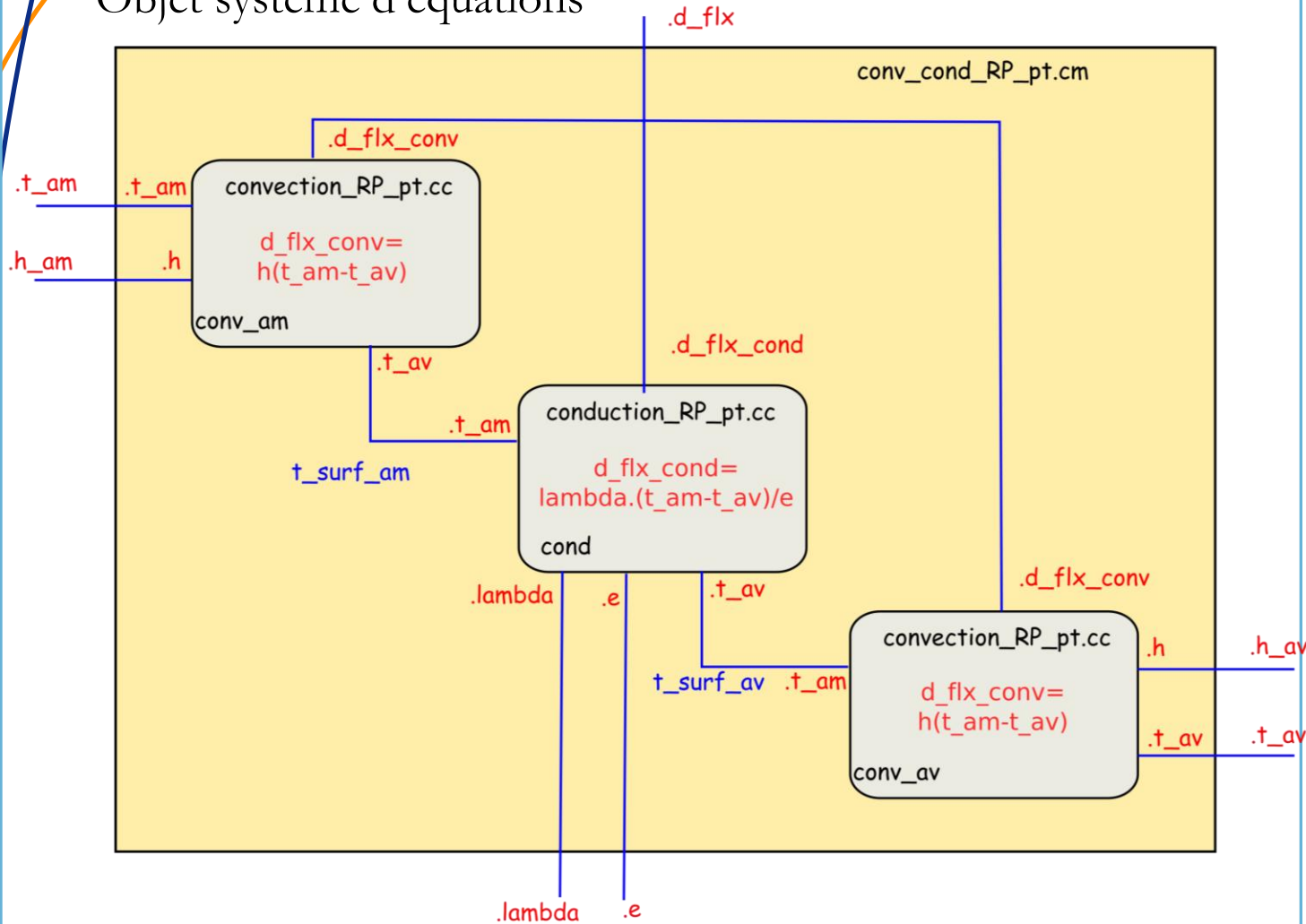
Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Présentation de Spark

Agencement des équations

Objet système d'équations



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

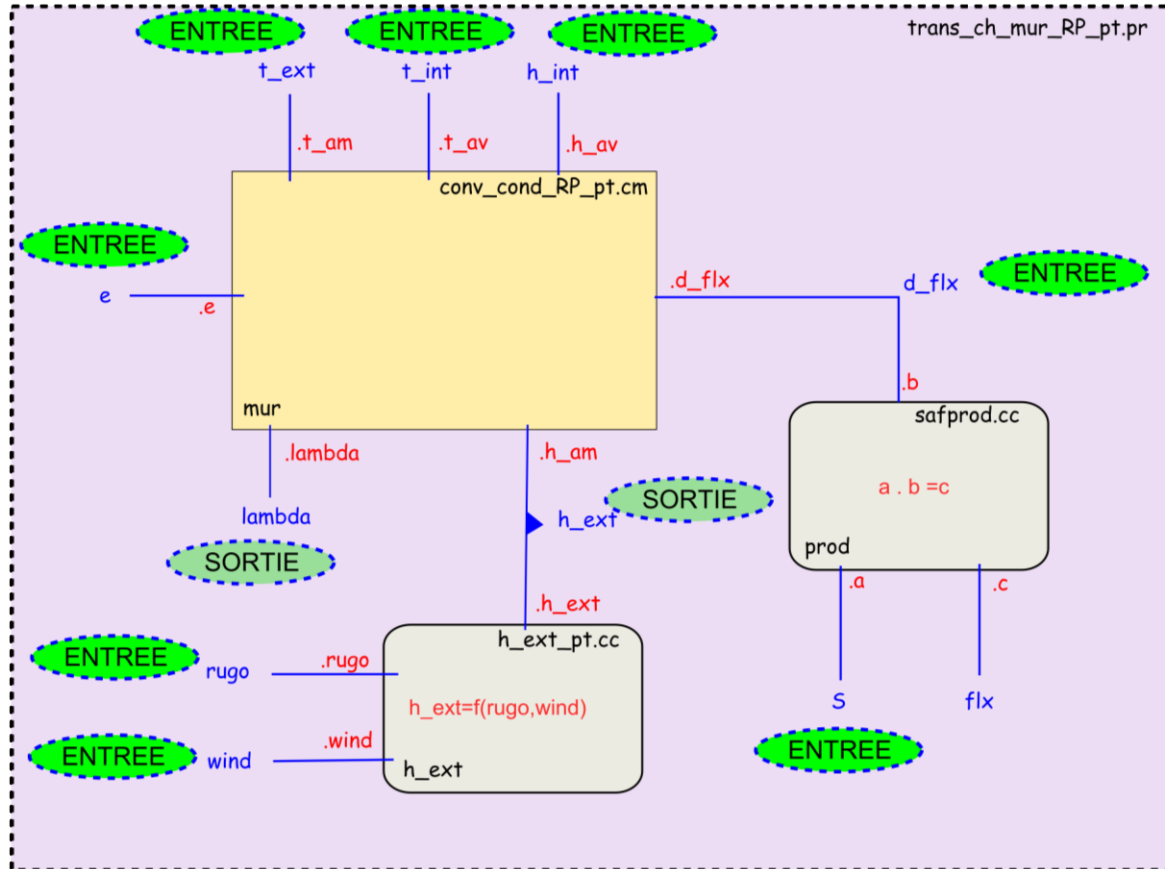
Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Présentation de Spark

Agencement des équations

Objet programme



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives



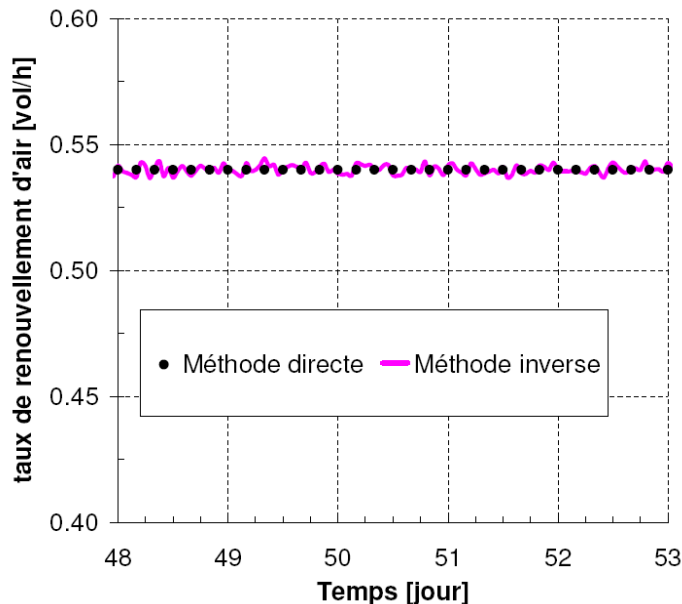
Possibilité d'inverser simplement un problème
(dans n'importe quel domaine scientifique)

Inversion de modèle

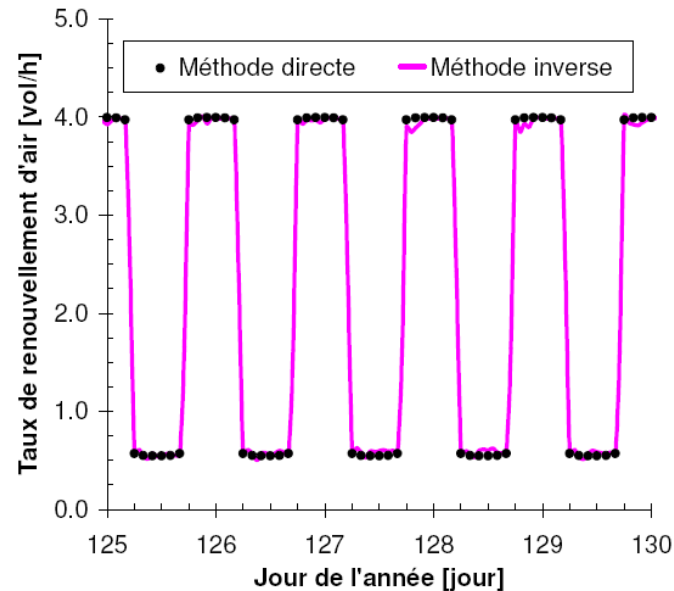
Modèle complet de bâtiment

Même principe :

- On relève température intérieure et puissance de chauffe à tout instant en imposant le renouvellement d'air
- On inverse pour retrouver le renouvellement d'air



Hiver



Été

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

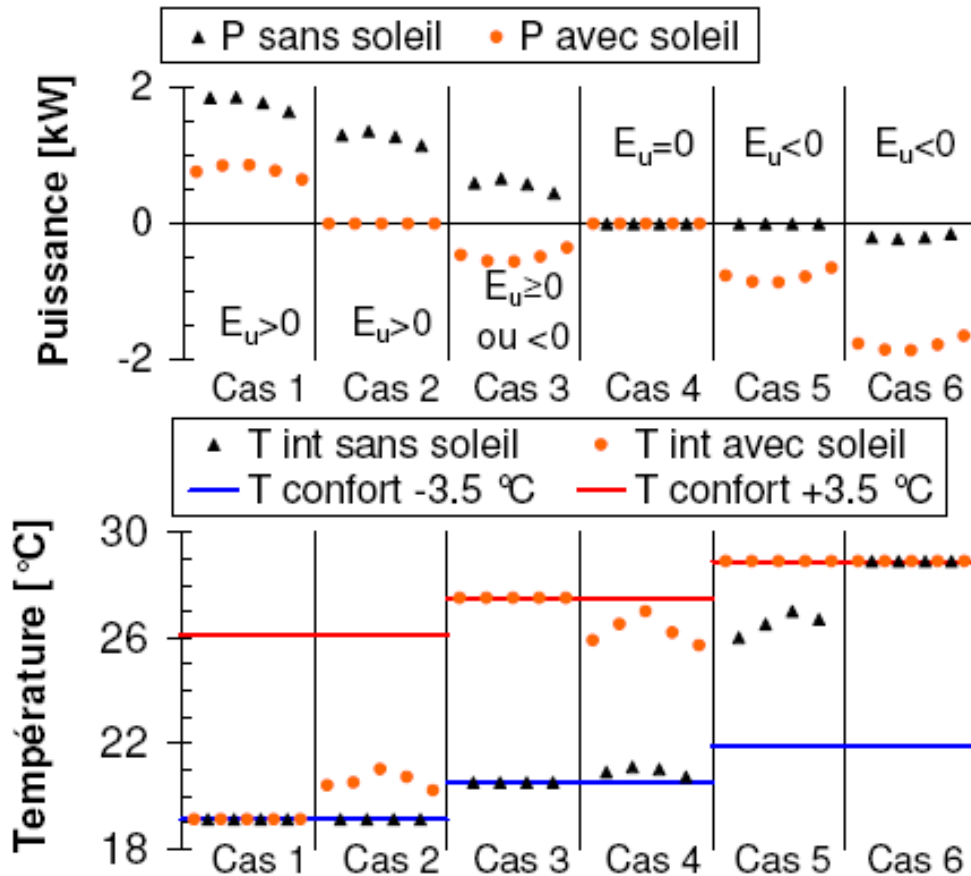
Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Cas considérés pour l'énergie utile



Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Répartition du flux solaire sur les parois

Soutenance de thèse de
Pierre Tittlein
Le 9/12/2008



Sommaire

Contexte

Outils de simulation

Modèles intégrés
au bâtiment :

- Tache solaire
- Échangeur air-sol
- MCP

Analyse globale du
bâtiment solaire

Conclusions et
perspectives

Période considérée		Année complète	Période hivernale (20 nov. - 8 mars)	Période estivale (1 mai - 15 sept.)	Période d'intersaison
Energie totale reçue [kW.h]		226442	31558	129853	71931
Répartition temporelle		référence	13.9%	57.3%	31.8%
Répartition spatiale	pan de toiture sud	29.4%	31.7%	28.1%	30.8%
	pan de toiture nord	18.8%	10.9%	22.8%	14.5%
	façade est	10.1%	8.7%	10.8%	9.2%
	façade sud	18.1%	28.0%	13.8%	22.3%
	façade ouest	15.5%	13.8%	15.6%	15.9%
	façade nord	8.1%	6.9%	8.8%	7.4%