Ecole thématique SIMUREX 2012
9-14 avril 2012, Cargèse

DEMARCHE DE VALIDATION EXPERIMENTALE DE MODELES

Elena Palomo del Barrio

Institut de Mécanique et d'Ingénierie - I2M UMR 5295

Département TREFLE – Transferts et Fluides

I2M – Site AMPT, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence

elena.palomo@trefle.u-bordeaux.fr

1) Qu'est-ce qu'un modèle ? Qu'est-ce qu'un bon modèle ?

2) Les modèles thermiques des bâtiments: de l'objet jusqu'au code de simulation

3) L'objectif de la validation expérimentale et les étapes préliminaires

4) Une démarche structurée de validation: les questions, les outils, les difficultés

5) Exemple

QU'EST-CE QU'UN MODELE ?

QU'EST-CE QU'UN BON MODELE ?

Forme de appréhender le réel - Image de la réalité

PORTRAIT

CARICATURE

Modèle échelle 1:1
Copie conforme de la réalité

Aller de la place de la
Comédie à la gare
Saint-Jean

3 ronds, 2 lignes

Quel modèle de la terre ?

Un point matériel

Une sphère

Un solide avec un relief
et une structure et
composition internes

Un **BON MODELE** est un modèle utile !

La modélisation n'est pas destinée à reproduire exactement la réalité, mais à fournir une image de celle-ci qui ne garde que les traits pertinents compte tenu des attentes formulées

Le modèle doit être **construit** et **évalué**
en tenant compte de l'usage prévu

L'élaboration d'un modèle est motivée par un ensemble de questions auxquelles le modèle doit contribuer à répondre. Ainsi, la modélisation procède d'une longue suite de décisions et de choix orientés par les questions initiales

**HYPOTHESES MENANT A LA
CONSTRUCTION DU MODELE**

La question est, non pas de savoir si un modèle est correct ou non (**TOUS SONT FAUX**), mais d'apprécier son apport dans un processus de compréhension du système étudié et de ses comportements, motivé par un ensemble de questions initialement explicitées

**EXPERIENCES ET CRITERES
POUR LA VALIDATION**

LES MODELES THERMIQUES DES BATIMENTS: DE L'OBJET JUSQU'AU CODE DE SIMULATION

Modèles issus de la
mécanique milieux continus
E.D.P
Enveloppe, ambiance ...

Modèles d'état
Modèles Entrées/Sorties
E.D.O / R.N / F.T / E.A
Équipement, régulation/commande

Modèles non déterministes
E.D.O / E.D. / E.A
Climat, occupants, gestion,
régulation/commande ...

Modèle logiques
(déterministes, flous ...)
Occupant, gestion,
régulation/commande ...

EVENEMENTS
Éléments mobiles, ouvrants ...

Nature des modèles

Un cocktail de **modèles mathématiques**, mais au cœur: des modèles issus de la mécanique des milieux continus

Confort
hygrothermique
Confort visuel
Qualité de l'air
Besoins en
énergie
Consommation
d'énergie
Dimensionn.
équipements

Processus de modélisation

De l'objet au code de simulation

5 mondes à parcourir

*La modélisation procède d'une longue suite de décisions
et de choix orientés par les questions initiales*

Technologique	Positionnement du problème Objectifs et questions technologiques qui se posent Topologie, découpage, géométrie des objets
Physique ou phénoménologique	Echelles d'analyse, granularité Identification des phénomènes mis en jeu Lois élémentaires et propriétés physiques Entrées - Sorties
Mathématique	Formalisation mathématique Equations de conservation Couplages, hiérarchies
Numérique	Méthodes numériques Discrétisation des équations Transformations Réduction
Algorithmique	Algorithmes et stratégies de résolution → Codes

EXEMPLE

Monde Technologique

Objectif : Analyse du comportement thermique en régime variable d'évolution d'une paroi multicouche

Description : Système parallélépipède multicouche, de dimensions telles que $e \ll L, H$

Découpage :

EXEMPLE

Monde Physique ou Phénoménologique

Transferts monodimensionnels
Couches homogènes
(propriétés effectives)

Couplage hygrothermique négligeable
Perméabilité à l'air négligeable
Transfert de chaleur par conduction

Propriétés physiques constantes

Contact thermique parfait

Représentation conjointe des échanges convectifs et radiatifs IR
Propriétés optiques et coefficients d'échange constants

EXEMPLE

Monde Physique-Mathématique

	Mécanismes de transfert de chaleur	Hypothèses
A l'intérieur des couches	Conduction	Transfert 1D Couches homogènes Propriétés constantes
Aux interfaces entre deux couches	Conduction	Contact parfait
Face intérieure de la paroi	Convection Rayonnement IR	Représentation globale par la loi de Newton avec coefficient d'échange constant
Face extérieure de la paroi	Convection Rayonnement IR Rayonnement solaire	Représentation globale (transferts convectifs et IR) par la loi de Newton avec coefficient d'échange constant Propriétés optiques constantes dans le spectre solaire, indépendantes de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence

Equation de conservation de l'énergie
(couche $i = 1 \dots N$)

$$\rho c_i \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad \forall t, \quad x_i < x < x_{i+1}$$

Equation de couplage entre couches adjacentes (couches i et $i+1$)

$$T^-(x,t) = T^+(x,t) \quad \forall t, \quad x = x_{i+1}$$

$$-\lambda_i \frac{\partial T^-(x,t)}{\partial x} + \lambda_{i+1} \frac{\partial T^+(x,t)}{\partial x} = 0$$

Equation de couplage avec l'ambiance intérieure

$$-\lambda_o \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -h_o (T(0,t) - T_{\text{int}}(t)) \quad \forall t, \quad x = 0$$

Equation de couplage avec l'ambiance extérieure

$$-\lambda_N \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_N} = \alpha \varphi(t) - h_N (T(x_N,t) - T_{\text{ext}}(t)) \quad \forall t, \quad x = x_N$$

Etat initial

$$T(x,0) = T_{\text{ini}}(x) \quad \forall x, \quad t = 0$$

E.D.P

$$(\rho c_p) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} = \nabla \lambda(T) \nabla T(x, y, t)$$

$$T(x=0, y, t) = T_{gauche}(t); \quad T(x=L, y, t) = T_{droite}(t)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = -h(\Delta T)(T - T_{bas}) + \varphi_{bas}(t)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = \varphi_{haut}(t)$$

E.D.O

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_1}{dt} &= f_1(\vec{T}, \vec{U}, t) \\ \frac{dT_2}{dt} &= f_2(\vec{T}, \vec{U}, t) \\ &\dots \\ \frac{dT_n}{dt} &= f_n(\vec{T}, \vec{U}, t) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{d\vec{T}}{dt} = f(\vec{T}, \vec{U}, t)$$

$$\vec{T} = [T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_n]$$

$$\vec{U} = [T_{gauche} \quad T_{droite} \quad T_{bas} \quad \varphi_{bas} \quad \varphi_{haut}]$$

*AUTRES
TRANSFORMATIONS

ALGORITHMES
D' INTEGRATION*

CODE

EXEMPLE
Mondes Numérique
& Algorithmique

Processus de modélisation De l'objet au code de simulation

L'OBJECTIF DE LA VALIDATION EXPERIMENTALE ET LES ETAPES PRELIMINAIRES

La validation expérimentale s'attache à analyser la pertinence des choix/hypothèses adoptées dans les mondes technologique et physique

La validation expérimentale procède par comparaisons MODELE/MESURES

Connaissance « a priori » du modèle

Conception et réalisation de l'expérience

Vue exhaustive et structurée
des hypothèses adoptées

Paramètres: valeurs et
incertitudes

Choix des observables en
fonction des attentes
formulées et des contraintes
expérimentales

Choix/conception du
dispositif expérimental

Variables d'entrée à mesurer
(lesquelles, capteurs, points
de mesure)

Variables d'entrée
commandables (lesquelles,
commande)

Observables à mesurer
(lesquels, capteurs, points
de mesure)

Durée de l'expérience et
temps d'échantillonnage

Choix du dispositif expérimental en fonction des objectifs de validation

Complexité
croissante du
modèle

+

Contraintes
expérimentales
de plus en plus
fortes

||

Possibilités de
validation
approfondie de
plus en plus
faibles

ETNA - EDF, Fontainebleau

BESTLab - EDF, Fontainebleau

MARIA - CSTB, Marne la Vallée

INCAS - INES, Chambéry

CELLULES TEST & MAISONS EXPERIMENTALES

Enveloppe

- Murs standard
- Fenêtres, protections solaires, etc.
- Double paroi, murs végétalisés, paroi bois, etc.
- MCP
- Etc.

Processus/phénomènes

- Transmission/absorption du rayonnement solaire
- Inertie thermique interne
- Echanges aérauliques, ventilation
- Eclairage
- Etc.

Equipements

- Elements de chauffage/climatisation
- Régulation/commande
- Systèmes solaires de production
- Systèmes de stockage
- Etc.

Réseaux PASSYS – DYNASTEE – IEA/SHC

UNE DEMARCHE STRUCTUREE DE VALIDATION: LES QUESTIONS, LES OUTILS, LES PROBLEMES

- 1) A-t-on une connaissance suffisante du système au regard des exigences du modèle ?**
- 2) Peut-on entamer l'étude de validation sur la base des mesures disponibles ?**
- 3) Qu'est-ce qu'on va pouvoir valider: quelles dynamiques, quels phénomènes, etc. ?**
- 4) Est-ce que le modèle représente correctement la réalité observée ?**
- 5) Si le modèle fait défaut, que doit-on améliorer ?**

LAYER	(m)
Paper	0.001
Plasterboard	0.010
Polyestylene	0.080
Air	0.010
Hollow blocks	0.200
Facing	0.020

UN EXEMPLE SIMPLE POUR ILLUSTRATION

Un mur opaque multicouche séparant
deux ambiances et recevant du
rayonnement solaire sur une face

HYPOTHESES

Transferts par conduction 1D

Couches homogènes

Paramètres constants

Contact parfait aux interfaces

CL: Loi de Newton

BUT

Prévoir les échanges d'énergie avec
l'ambiance à droite

Conduction à l'intérieur des couches

$$\rho^{(k)} c_p^{(k)} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda^{(k)} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad x_a^{(k)} < x < x_f^{(k)}$$

Couplage entre couches

$$T(x_a^{(k)}, t) = T(x_f^{(j)}, t)$$

$$-\lambda^{(k)} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_f^{(k)}} + \lambda^{(j)} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_f^{(j)}} = 0$$

Conditions aux limites

$$-\lambda^{(1)} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -h_{\text{left}} (T(0, t) - T_{\text{left}}(t))$$

$$-\lambda^{(6)} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = -h_{\text{right}} (T(L, t) - T_{\text{right}}(t)) + \eta \varphi(t)$$

A-t-on une connaissance suffisante du système au regard des exigences du modèles ?

Paramètres { Géométrie
Physique
Control
Opération
Occupation
Etc.

**Valeur la plus probable
+ Incertitude**

	Thickness (m)	$\rho c_p \times 10^{-3}$ (J.m ⁻³ .K ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	h (W.m ⁻²)	η (-)
Plasterboard	0.010	680	0.350	4.0	0.008
Polystyrene	0.080	18	0.043		
Air	0.010	1.29	0.071		
Hollow blocks	0.200	1140	1.052		
Facing	0.020	1657	1.150	4.0	

{
 Mesure

{
 Mesure
 Base de données

{
 Réglementation
 thermique

{
 Estimation

Description des incertitudes
sur les paramètres, les entrées,
l'état initial

Intervalles

$$\forall k \quad \theta_k \in [\theta_{k \min} \quad \theta_{k \max}]$$

$$\Theta = \begin{array}{l} [\theta_{1 \min} \quad \theta_{1 \max}] \\ \times [\theta_{2 \min} \quad \theta_{2 \max}] \\ \vdots \\ \times [\theta_{p \min} \quad \theta_{p \max}] \end{array}$$

Fonctions probabilité

$$\begin{aligned} P(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) &= \\ &= P(\theta_1) \times P(\theta_2) \times \dots \times P(\theta_p) \end{aligned}$$

PROPAGATION DES INCERTITUDES

**Incertitude sur les prévisions du
modèle induite par une
connaissance incertaine des
valeurs des paramètres, des
sollicitations ou de l'état initial**

$$\forall j \quad \forall t \quad [y_{j \min}(t) \quad y_{j \max}(t)]$$

Intervalle tel que

$$\begin{aligned} \forall \theta \in \Theta \\ \text{Prob}\{y_j(t; \theta) \notin [y_{j \min}(t) \quad y_{j \max}(t)]\} < \alpha \end{aligned}$$

Intervalle de longueur minimale tel que

$$\begin{aligned} \forall \theta \in \Theta, \forall t, \forall j \\ y_{j \min}(t) \leq y_j(t; \theta) \leq y_{j \max}(t) \end{aligned}$$

PROPAGATION DES INCERTITUDES

Exemple: Méthode de Monte Carlo

Si les bandes d'incertitude sont très larges, on doit améliorer la connaissance du système avant de démarrer l'étude de validation

Si l'incertitude sur les prévisions du modèle est acceptable, on peut démarrer l'étude de validation

Peut-on entamer l'étude de validation à partir des mesures disponibles ?

Grandeurs mesurées
Ensemble des sollicitations/entrées au modèle
Données horaires (moyennes)

Grandeurs mesurées
Température à la surface coté droite
Données horaires (moyennes)

Flux échangé avec l'ambiance à droite = $h \times (T_{\text{surface}} - T_{\text{air}})$

Constantes de temps du modèle (h)

19.7497
1.3673 > 1h

0.4733
0.3883 > 15 min

0.1835
0.1107 > 5 min
0.0841

0.0767
0.0608
0.0523 > 1 min
0.0482
0.0220
0.0173

0.0099
0.0069
0.0055
0.0036
0.0036
0.0025
0.0019
0.0015

.....

Durée de l'expérience

23 jours = 552 h

>> 1^{ère} constante de temps du modèle

Echantillonnage en temps

1 h > 3^{ème} constante de temps du modèle

Seul les dynamiques associées aux deux premières constantes de temps seront observables

Un intervalle de temps d'échantillonnage bien plus petit aurait été souhaitable

Qu'est-ce qu'on pourrait valider ?

QUELS DYNAMIQUES ? Les dynamiques sollicitées

Les conclusions de la validation ne s'adresseront « a priori » qu'à ces conditions d'excitation – **TRES BASSES, BASSES FREQUENCES**

QUELLES PARTIES (phénomènes/processus) DU MODELE ?

Les parties du modèle ayant un effet significatif sur les sorties

OUTIL D'ANALYSE – ANALYSE DE SENSIBILITE

DEFINITION

Estimation de premier ordre de l'effet d'une faible variation du k^{ème} paramètre sur la sortie y(t) du système

$$S_k(t) \equiv \left. \frac{\partial y(t)}{\partial \theta_k} \right|_{\theta_{i \neq k} = \theta_{io}}$$

Sensibilité réduite

$$s_k(t) \equiv \left. \frac{\partial y(t)}{(1/\theta_k) \partial \theta_k} \right|_{\theta_{i \neq k} = \theta_{io}}$$

Vecteur des paramètres

$$\Theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_p]$$

Vecteur des valeurs nominales

$$\Theta_o = [\theta_{1o} \quad \theta_{2o} \quad \dots \quad \theta_{po}]$$

METHODES

Sensibilité différentielle

Méthode des perturbations

...

Une mesure locale

$$S_k(t) \equiv \left. \frac{\partial y(t)}{\partial \theta_k} \right|_{\theta_{i \neq k} = \theta_{io}}$$

Point nominal

$$\Theta_o = [\theta_{1o} \quad \theta_{2o} \quad \cdots \quad \theta_{po}]$$

EXEMPLE DU MUR – Valeurs nominales des paramètres

19
paramètres

	Thickness (m)	$\rho c_p \times 10^{-3}$ ($J.m^{-3}.K^{-1}$)	λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	h ($W.m^{-2}$)	η (-)
Plasterboard	0.010	680	0.350	4.0	0.008
Polystyrene	0.080	18	0.043		
Air	0.010	1.29	0.071		
Hollow blocks	0.200	1140	1.052		
Facing	0.020	1657	1.150	4.0	

Réponse nominale (T surface à droite)

SENSIBILITES REDUITES

		Mean (°C)	Standard Deviation (°C)
Conductivity	Plasterboard	-0.0065	0.0094
	Polystyrene	-0.4243	0.1790
	Air	-0.0315	0.0132
	Hollow blocks	-0.0404	0.0148
	Facing	-0.0034	0.0017
Capacity	Plasterboard	-0.0060	0.2501
	Polystyrene	-0.0006	0.0185
	Air	0.0000	0.0000
	Hollow blocks	-0.0068	0.0184
	Facing	0.0006	0.0039
Thickness	Plasterboard	0.0001	0.2449
	Polystyrene	0.3861	0.1619
	Air	0.0298	0.0125
	Hollow blocks	0.0304	0.0254
	Facing	0.0037	0.0035
Others	h-coeff - Left	-0.0502	0.0228
	h-coeff - Right	0.3892	0.3568
	Solar efficiency	0.1815	0.3353

19
paramètres

Moyenne > 0.05°C
Ecart type > 0.05°C

7
paramètres
significatifs

1	Plasterboard - Heat Capacity
2	Polystyrene - Thermal Conductivity
3	Left side Convective coefficient
4	Right side Convective coefficient
5	Solar efficiency
6	Polystyrene - Thickness
7	Plasterboard - Thickness

Ce n'est pas parce que deux paramètres sont significatifs, que l'on va pouvoir dissocier leurs effets (**Nouvelle limite à la validation**)

Détection de corrélations

**GROUPEMENT
paramètres
significatifs**

EXEMPLE D'OUTIL

Matrice de corrélation des sensibilités réduites

	1	2	3	4	5	6	7
1	1.0000	0.0821	-0.4148	-0.0303	-0.4066	0.0306	0.9996
2	0.0821	1.0000	-0.3884	0.3667	-0.3110	-0.9935	0.0777
3	-0.4148	-0.3884	1.0000	-0.2522	-0.4589	0.3461	-0.4092
4	-0.0303	0.3667	-0.2522	1.0000	0.0020	-0.3750	-0.0345
5	-0.4066	-0.3110	-0.4589	0.0020	1.0000	0.2630	-0.4085
6	0.0306	-0.9935	0.3461	-0.3750	0.2630	1.0000	0.0353
7	0.9996	0.0777	-0.4092	-0.0345	-0.4085	0.0353	1.0000

GROUPES DE PARAMETRES SIGNIFICATIFS

	Parameters in the group	Group representative
1	Plasterboard Heat Capacity Plasterboard Thickness	Plasterboard Heat Capacity
2	Polystyrene Thermal Conductivity Polystyrene Thickness	Polystyrene Thermal Conductivity
3	Left side Convective coefficient	Left side Convective coefficient
4	Right side Convective coefficient	Right side Convective coefficient
5	Solar efficiency	Solar efficiency

Aucun paramètre relatif aux couches « Hollow blocks » et « Facing »

Un seul paramètre pour les couches de finition et d'isolation

Est-ce que le modèle représente correctement la réalité observée ?

1) Comparaison MODELE/MESURE en tenant compte des incertitudes dans les observables mesurés et dans les sorties du modèle

$$\forall t \quad [y_{mes,\min}(t) \quad y_{mes,\max}(t)] \subset [y_{sim,\min}(t) \quad y_{sim,\max}(t)]$$

ou

$$\forall t \quad y_{mes}(t) \subset [y_{sim,\min}(t) \quad y_{sim,\max}(t)]$$

Pas de raison pour
rejeter le modèle
VALIDATION CROISEE

2) Analyse des résidus MODELE (sorties nominales)/MESURE

$$e(t) = y_{mes}(t) - y_{sim}(t)$$

Bruit blanc

Moyenne nulle

Auto-corrélation nulle pour lag>0

Spectre uniforme

Pas de raison pour
rejeter le modèle
VALIDATION CROISEE

EXEMPLE DU MUR

Incertitude sur paramètres thermophysiques des couches: 10%

Incertitude sur épaisseurs des couches: 5%

Incertitude sur coefficients convectifs: 50%

Incertitude sur paramètre d'efficacité solaire: 50%

RESIDUS = Mesure – Sortie nominale

MOYENNE = - 0.7 °C

ECART TYPE = 0.3 °C

La variance des résidus se cumule aux basses fréquences

Le spectre montre des cumuls plus significatives aux périodes 24h et 12h

La fonction d'autocorrélation reste significative en dehors de lag=0

Elle met en évidence des périodicités dans les résidus

Si le modèle fait défaut, qu'est-ce qu'on doit améliorer ?

DIFFICILE

Parfois, l'analyse de **cohérence spectrale des résidus/entrées** peut apporter des informations utiles

Parfois, l'analyse des **composantes principales des sensibilités réduites** peut apporter des informations utiles

Parfois, le **calage du modèle** peut apporter des informations utiles

1) ANALYSE DE COHERENCE SPECTRALE Résidus/Entrées

Les sollicitations peuvent-elles expliquer les résidus observés ? Peut-on établir un modèle dynamique linéaire reliant les résidus aux entrées ?

Fonction de cohérence multiple

Mesure normalisée par fréquence du degré de corrélation existant entre les résidus et l'ensemble des entrées/sollicitations

Fonctions de cohérence partielle

Mesure normalisée par fréquence du degré de corrélation linéaire existant entre les résidus et chacune des entrées séparément

**REGIME
DYNAMIQUE**

2) ANALYSE DES COMPOSANTES PRINCIPALES DES SENSIBILITES

BEAUCOUP D'INTERET QUAND LE MODELE NE
REPRODUIT PAS CORRECTEMENT LE REGIME STATIQUE

Matrice d'énergie

$$\mathbf{W} = \int_0^{t_{end}} \mathbf{S}(t) \mathbf{S}'(t) dt$$

Décomposition spectrale
de la matrice d'énergie

$$\mathbf{W} = \mathbf{V} \mathbf{D} \mathbf{V}'$$

Vecteurs propres

$$\mathbf{V}' \mathbf{V} = \mathbf{I}$$

Valeurs propres

$$\mathbf{D} = \text{diag} [\sigma_1^2 \quad \sigma_2^2 \quad \dots \quad \sigma_n^2]$$

$$\sigma_1^2 \geq \sigma_2^2 \geq \dots \geq \sigma_n^2 > 0$$

$$\mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_n(t) \end{bmatrix}$$

Vecteur des sensibilités réduites
Paramètres significatifs

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{V} \mathbf{X}(t) = \mathbf{V} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix}$$

Coefficients de projection
orthogonaux (décorrélés)

$$\int_0^{t_{end}} \mathbf{X}(t) \mathbf{X}'(t) dt = \mathbf{D}$$

$$\forall k, \quad s_k(t) = \sum_{i=1}^n v_{ki} x_i(t)$$

**SOMME DES
COMPOSANTES
PRINCIPALES**

Energie du signal $s_k(t)$

$$\forall k, E_k \equiv \int_0^{t_{end}} s_k^2(t) dt = \sum_{i=1}^n v_{ki} \sigma_i^2$$

Contribution de la i ème
composante principale à
l'énergie

$$\gamma_{k,i} = \frac{v_{ki} \sigma_i^2}{\sum_{i=1}^n v_{ki} \sigma_i^2}$$

EXEMPLE DU MUR

SPECTRE/SIGNATURE SVD DES PARAMETRES

	Contribution to the energy of the principal component number						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0484	0.1119	0.8395	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000
2	0.9524	0.0059	0.0414	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
3	0.7828	0.1520	0.0651	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
4	0.7846	0.0001	0.0378	0.1716	0.0059	0.0001	0.0000
5	0.2338	0.7647	0.0011	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000
6	0.9369	0.0037	0.0592	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
7	0.0382	0.1138	0.8473	0.0003	0.0003	0.0000	0.0000

Nombre de paramètres indépendants ou peu corrélés
GROUPEMENT

$$\Delta y(t) \equiv y(t) - y_o(t) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\Delta \theta_k}{\theta_{ko}} \right) s_k(t) = \sum_{i=1}^n (\Delta \alpha_i) x_i(t)$$

$$\Delta \alpha_i = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\Delta \theta_k}{\theta_{ko}} \right) v_{ki}$$

**NOUVEAUX JEUX
DE PARAMETRES
DECORRELES**

$$\frac{\partial y(t)}{\partial \alpha_i} = x_i(t)$$

	Mean value	Standard deviation	Contribution to the energy	Correlation with residuals
x1	-0.7143	0.3402	0.6683	-0.9327
x2	0.0138	0.4113	0.1805	0.2318
x3	0.0751	0.3679	0.1503	0.0599
x4	-0.0049	0.0259	0.0007	-0.0013
x5	-0.0006	0.0090	0.0001	0.0956
x6	-0.0002	0.0033	0.0000	-0.0022
x7	0.0000	0.0002	0.0000	-0.0723

$$\Delta y(t) \equiv y(t) - y_o(t) \approx (\Delta \alpha_1) x_1(t)$$

$$\Delta \alpha_1 = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\Delta \theta_k}{\theta_{ko}} \right) v_{k1}$$

PREMIER VECTEUR PROPRE ISSU DE LA SVD

3) CALAGE DU MODELE DANS UN BUT DE DIAGNOSTIC

Chercher la valeur des paramètres significatifs qui minimise les résidus

Minima locaux

Chercher les sous-domaines de l'espace des paramètres compatibles avec les observations

Valeurs des paramètres $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ telles que

$$y_{\min}(t) \leq y(t; \theta_1, \dots, \theta_p) \leq y_{\max}(t) \quad \forall t$$

Encadrement de la mesure

RESULTATS

EXEMPLE DU MUR

	Nominal value	Gauss-Newton estimations	Bounding method estimations
Plasterboard Heat Capacity	680.0	635.8	[646.0, 650.3]
Polystyrene Conductivity	0.043	0.063	[0.059, 0.078]
Left side Convective coefficient	4.0	2.47	[1.93, 3.43]
Right side Convective coefficient	4.0	3.99	[4.46, 4.81]
Solar efficiency	0.008	0.0034	[0.0025, 0.0026]

EXEMPLE

Modèle d'enveloppe de la cellule ETNA

Parois verticales multicouche (voir exemple mur)

Plancher

Plafond

DONNEES HORAIRES DISPONIBLES (EDF)

HYPOTHESES DE MODELISATION

Conduction à travers l'enveloppe

Transferts 1D – Linéarité – Paramètres constants

Air

Homogénéité – Infiltrations négligeables – Chauffage 100% convectif

Echanges paroi/air

Loi de Newton – Coefficients constants

Processeur solaire

Calcul de R_{sud} à partir de R_{glo} – Rayonnement transmis -> plancher

Component	Parameters			Total
	Geometry	Thermophysical	Optical	
Floor	8	16	1	25
North wall	5	10	1	16
West wall	6	12	1	19
South wall	6	12	2	20
East wall	8	16	1	25
Ceiling	5	10	1	16
South window	6	12	4	22
West window	6	12	2	20
Door	2	4	1	7
				170

Pour les détails :

E. PALOMO DEL BARRIO, G. GUYON, 2004, Application of parameters space analysis tools for empirical model validation, Energy and Buildings, vol. 36, 23-33.

E. PALOMO DEL BARRIO, G. GUYON, 2003, Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools, Energy and Buildings, vol. 35, pp. 971-1076.

E. PALOMO DEL BARRIO, G. GUYON, 1999, Validation of two French software programs: Part II - Parameter estimation methods applied to empirical validation, Transactions of the ASHRAE, vol. 105, SE-99-6-3 (12 pp.).

E. PALOMO DEL BARRIO, G. GUYON, Using parameters space analysis techniques for diagnostic purposes in the framework of empirical model validation, Ed. International Energy Agency, « Solar Heating and Cooling » series, 2003 (119 pp).

Parties du modèle
que l'on peut
éventuellement
valider

Qualité du modèle

Voies d'amélioration
du modèle

RESULTATS DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE

	Components	Significant parameters & Chosen representative
Group n°1	F1	HEAT CONDUCTION THROUGH THE FLOOR Concrete (k, e), Floor surface area
Group n°2	F2	HEAT CONDUCTION THROUGH THE FLOOR Styrodur conductivity and thickness
Group n°3	F3	HEAT CONDUCTION THROUGH THE FLOOR Polystyrene conductivity & thickness
Group n°4	N2	NORTH WALL/INDOOR AIR EXCHANGES Indoor wall convective coefficient
Group n°5	F4 C1	FLOOR/INDOOR AIR EXCHANGES Indoor floor/air convective coefficient Ceiling Plasterboard: thermal capacity & thickness
Group n°6	S1 SW1	HEAT CONDUCTION THROUGH THE SOUTH WALL South wall: surface area & polystyrene (k, e) South window: surface + others
Group n°7	F5 S2 E4 C3	SOLAR PROCESSOR Floor: solar efficiency South wall: solar efficiency & outdoor h-coefficient East wall: solar efficiency Ceiling: solar efficiency
Group n°8	N1, E1, C2 WW1, W1, D1	HEAT CONDUCTION THROUGH VERTICAL WALLS (- South) Many parameters, Ceiling Glass Wool conductivity
Group n°9	N3 E2 C4	HEAT CONDUCTION THROUGH N, E & C WALLS North wall surface area East wall: polystyrene (k, e), surface Ceiling: surface

QUALITE DU MODELE INSUFFISANTE

RESIDUS

Moyenne = -0.22°C

Ecart type = 0.72°C

Variance concentré aux basses fréquences

59% des mesures en dehors des
bandes d'incertitude des
simulations

VOIES D'AMELIORATION

Analyse des composantes principales

VOIES D'AMELIORATION

Calage du modèle

Meta-Group	Representative	Nominal value	HBM	SRA	GNM
MG1	Floor surface area	16.28 m ²	[19.45, 20.22]	20.05	19.96
MG2	Floor styrodur layer conductivity	0.029 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	[0.0234, 0.0305]	0.026	0.0313
MG3	Floor polystyrene layer conductivity	0.040 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	[0.0801, 0.0753]	0.08	0.0968
MG4	Indoor vertical walls convective coefficient	9.1 W.m ⁻²	[3.9059, 3.6326]	3.56	1.666
MG5	Floor-indoor air convective coefficient	5.88 W.m ⁻²	[4.6327, 4.4079]	4.49	4.68
MG6	South wall area	7.25 m ²	[10.58, 16.34]	14.01	15.87
MG7	South wall solar absorptivity (outdoor side)	0.30	[1.0137, 0.6581]	0.822	1.357
MG8	Ceiling glass wool layer conductivity	0.042 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	[0.0623, 0.0674]	0.066	0.1015
MG9	North wall area	7.0 m ²	[12.06, 12.48]	12.53	10.75

VOIES D'AMELIORATION

Autres calages

TABLE 1
Convective Coefficient Values

	Results of parameter estimation method Convective coefficients values ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)		
	Identified	Initial value	Variation(%)
Indoor vertical	5.11	4.1	-24.6
Outdoor vertical	10.65	9.1	-17.0
Wind exposed	13.03	16.6	+21.5
Indoor floor	4.77	0.9	-430.5
Outdoor floor	6.77	5.9	-14.8
Indoor ceiling	1.16	6.1	+80.9
Outdoor ceiling	10.81	11.1	+2.6

TABLE 2
Solar Absorptivity(α) and Transmissivity (τ) Values

	Results of parameter estimation method Solar absorptivity (α) and transmittivity (τ) values		
	Identified	Initial value	Variation(%)
τ Glazing	0.77	0.675	-13.4
α Glazing	0.11	0.13	+13.2
α East	0.322	0.9	+64.2
α North	0.434	0.9	+51.8
α West	0.834	0.9	+7.4
α South	0.676	0.9	+24.9
α Floor	0.467	0.9	+48.1
α West window	0.321	0.9	+64.3

TABLE 3
Thermal Capacity Values

	Results of parameter estimation method Thermal capacity values (J/kg·K)		
	Identified	Initial value	Variation(%)
Wallpaper	1033.8	938.0	-10.2
Plasterboard	557.8	680.0	+17.9
Polyestyrene	20.91	18.0	-16.1
Air layer	1.51	1.30	-16.2
Hollow blocks	1304.4	1140.0	-14.4
Concrete	1828.3	1957.0	+6.6
Styrodur	49.39	42.0	-17.6
Polyamide	1242.8	1200.0	-3.5
Floor eq. layer	1833.1	1695.1	-8.1
Honeycomb	30.59	34.90	+12.3
Facing	1610.6	1657.5	+2.8
Glass wool	9.82	8.80	-11.5
Planks	551.47	600.0	+8.1
Particleboards	879.56	840.0	-4.7
Air layer in ceiling	1.04	1.24	+15.9
Hollow door	297.83	275.0	-8.3

TABLE 4
Thermal Conductivities

	Results of parameter estimation method Thermal conductivities (W/m·K)		
	Identified	Initial value	Variation(%)
Wallpaper	0.168	0.14	-19.7
Plasterboard	0.382	0.35	-9.2
Polyestyrene	0.0387	0.043	+9.9
Air layer	0.0673	0.071	+5.1
Hollow blocks	1.051	1.052	+0.1
Concrete	1.52	1.39	-9.7
Styrodur	0.0333	0.029	-14.7
Polyamide	0.278	0.3	+7.2
Floor eq. layer	0.0402	0.0467	+14.0
Honeycomb	0.326	0.287	-13.6
Facing	1.207	1.15	-5.0
Glass wool	0.0445	0.042	-5.9
Planks	0.168	0.15	-12.1
Particleboards	0.196	0.17	-15.3
Air layer in ceiling	0.913	0.846	-8.0
Hollow door	0.106	0.09	-17.8

Augmentation généralisée des conductivités et des capacités thermiques
Si on inclut les superficies en tant que paramètres libres: 79.8 m² -> 85.8 m²

CONCLUSION

Il faut modéliser les effets 2D/3D dans la conduction à travers l'enveloppe

Il faut adapter les valeurs des coefficients d'échanges convectifs aux conditions d'essai

Il faut améliorer le processeur solaire

SI J'AVAIS A LANCER UNE THESE SUR LE SUJET OU A REPRENDRE CES RECHERCHES

CONCEPTION DE L'EXPERIENCE

Où/quoi mesurer pour que l'expérience soit bien plus informative vis-à-vis de l'objectif de validation

VOIES D'AMELIORATION DES MODELES

Comment formaliser les liens entre déplacements paramétriques observés et hypothèses de modélisation

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !