

***Journée SFT « Méthodes inverses et thermique du bâtiment: réduction et identification de modèles »  
Mercredi 2 mai 2018***



**Problématique de l'estimation de la résistance thermique de parois courantes de bâtiments par thermographie infrarouge: apport et limitations de la réduction de modèles**

***Laurent IBOS, Thanh-Tung HA, Vincent FEUILLET***



***Simon THEBAULT, Kamel ZIBOUCHE, Rémi BOUCHIE***



***Julien WAEYTENS, Zohra DJATOUTI, Jean DUMOULIN***



***Véronique LE SANT***



# Plan de l'exposé

## Contexte & Objectifs, Problématique

## Simulations numériques

Modèles Physiques Générateurs

Cas Tests

## Réduction de modèle

Modèles réduits utilisés

Erreurs de modèle et Analyse de sensibilité

## Identification de résistance thermique

Quelques résultats

Limitations et Perspectives

## Conclusion

# Contexte des travaux – Projet RESBATI

## Mesure in-situ de **RES**istance thermique de parois de **BATI**ment

*Octobre 2016 – Septembre 2020*



**Développement d'un appareil de terrain pour la mesure de la Résistance thermique de parois / Méthode active / Utilisation de la thermographie**

**Phase 0 : Principes de bases et cahier des charges**

**Phase 1 : Appareil de mesure en démonstration et protocole de mesure**

**Phase 2 : Fabrication, déploiement et retour d'expérience**



IFSTTAR



LNE

Le progrès, une passion à partager



Cerema

CERTES

CSTB  
le futur en construction

afnor  
GROUPE

Themac Ingénierie  
Thermique Environnement Matériaux Contrôle de Structures

UPEC  
UNIVERSITÉ PARIS-EST CRÉTEIL

EFLUVE  
Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU)

# Objectifs du Projet RESBATI

## Mesure in-situ de la résistance thermique de parois de bâtiments

- *Uniquement parois opaques*
- *Parois courantes homogènes*
- *Différentes typologies (ITI, ITE, Ossatures Bois, isolation répartie)*

## Mesures de terrain (environnement contraint)

- *Dispositif portable, simple d'utilisation*
- *Accessibilité*
- *Durée de mesure réduite*

## Applications visées:

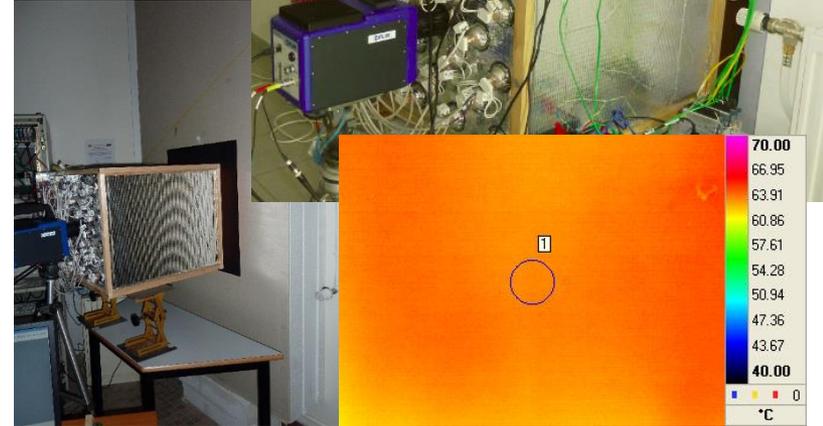
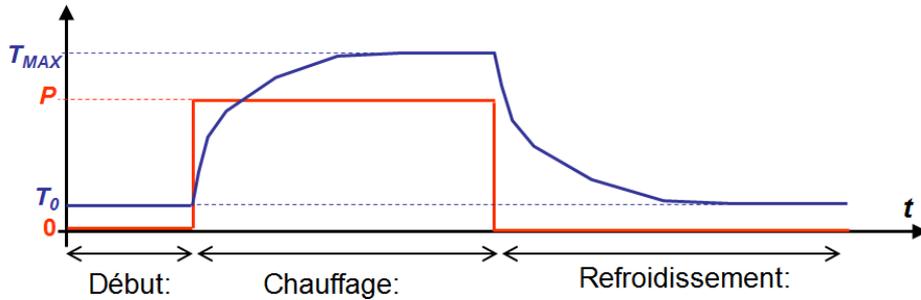
- *Diagnostic de l'existant*
- *Contrôle sur chantier*
- *Contrôle à réception de travaux*

# Thermographie Active

## Rappel des principes généraux

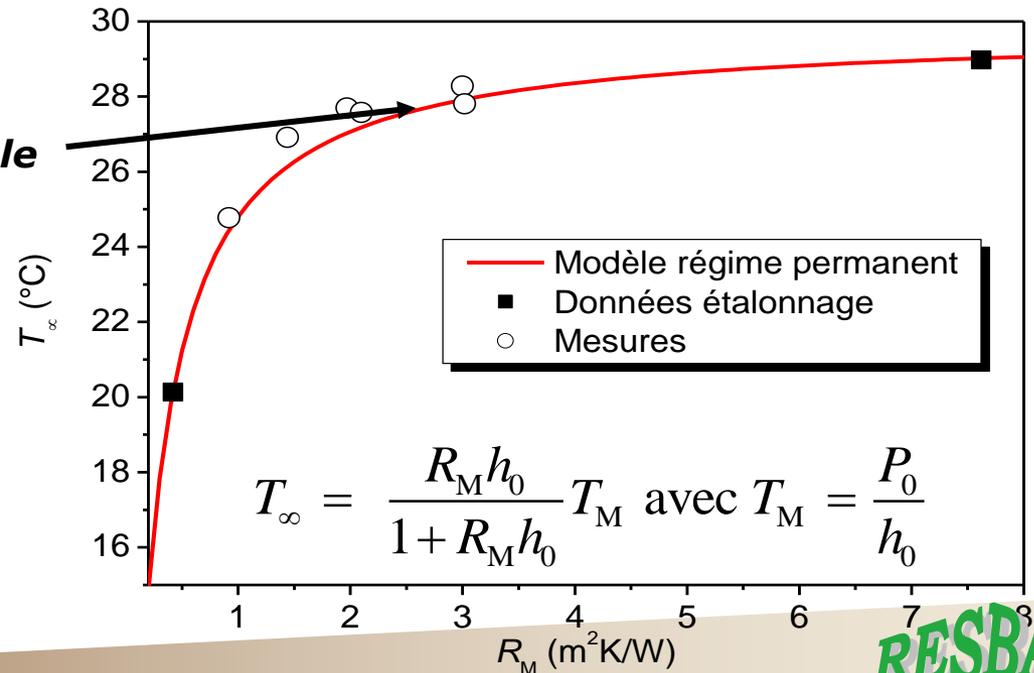
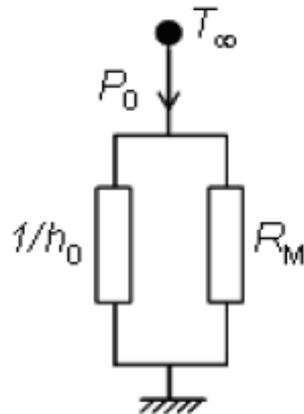
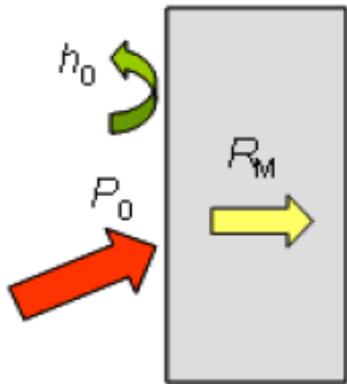
### Définition:

Observation de l'échauffement de la surface d'une paroi suite à une excitation thermique contrôlée et limitée dans le temps



### Modèle asymptotique, temps longs

Sensibilité faible pour  $R$  élevées



# Thermographie Active

## *Rappel des principes généraux*

### **Difficultés**

Zone d'analyse de surface réduite

Matériel pour chauffer la paroi

### **Avantages**

Faible sensibilité aux variations des conditions météorologiques

Peu de paramètres influents: émissivité, absorptivité (vis à vis du rayonnement de la source rayonnante)

Pas de nécessité de déterminer la température absolue

Durée de mesure réduite

# Plan de l'exposé

Contexte & Objectifs, Problématique

## **Simulations numériques**

**Modèles Physiques Générateurs**

**Cas Tests**

## Réduction de modèle

Modèles réduits utilisés

Erreurs de modèle et Analyse de sensibilité

## Identification de résistance thermique

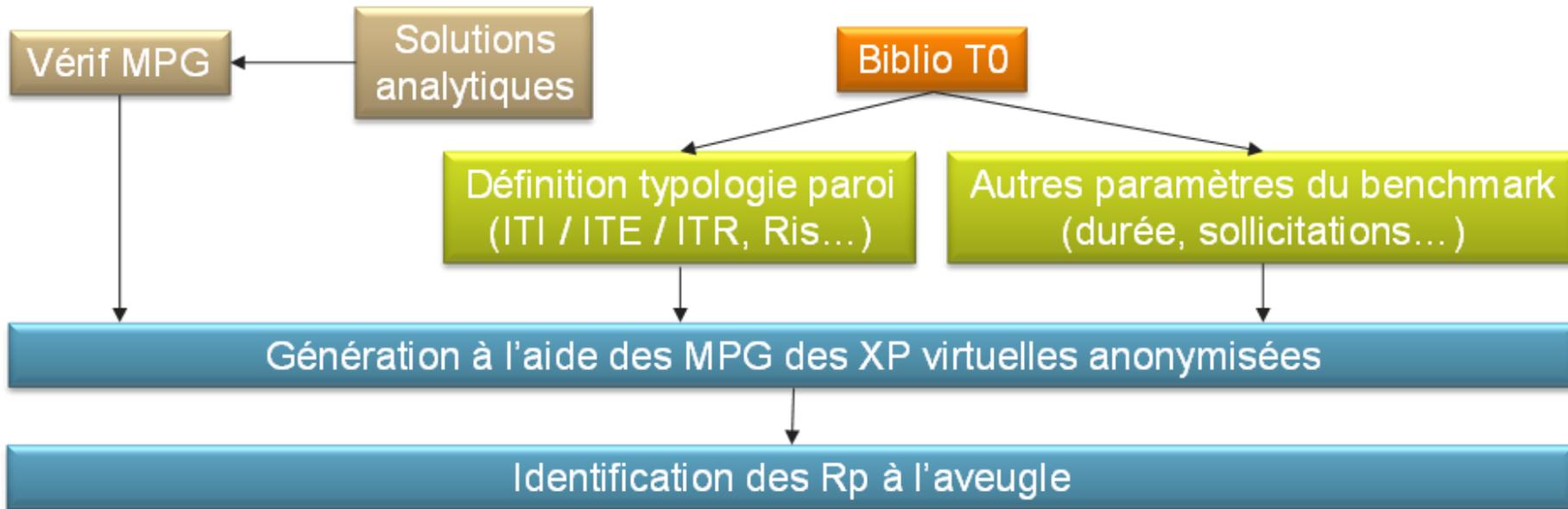
Quelques résultats

Limitations et Perspectives

## Conclusion

# Simulation numérique

## Méthodologie générale pour l'étude de la robustesse des méthodes d'identification de la résistance thermique



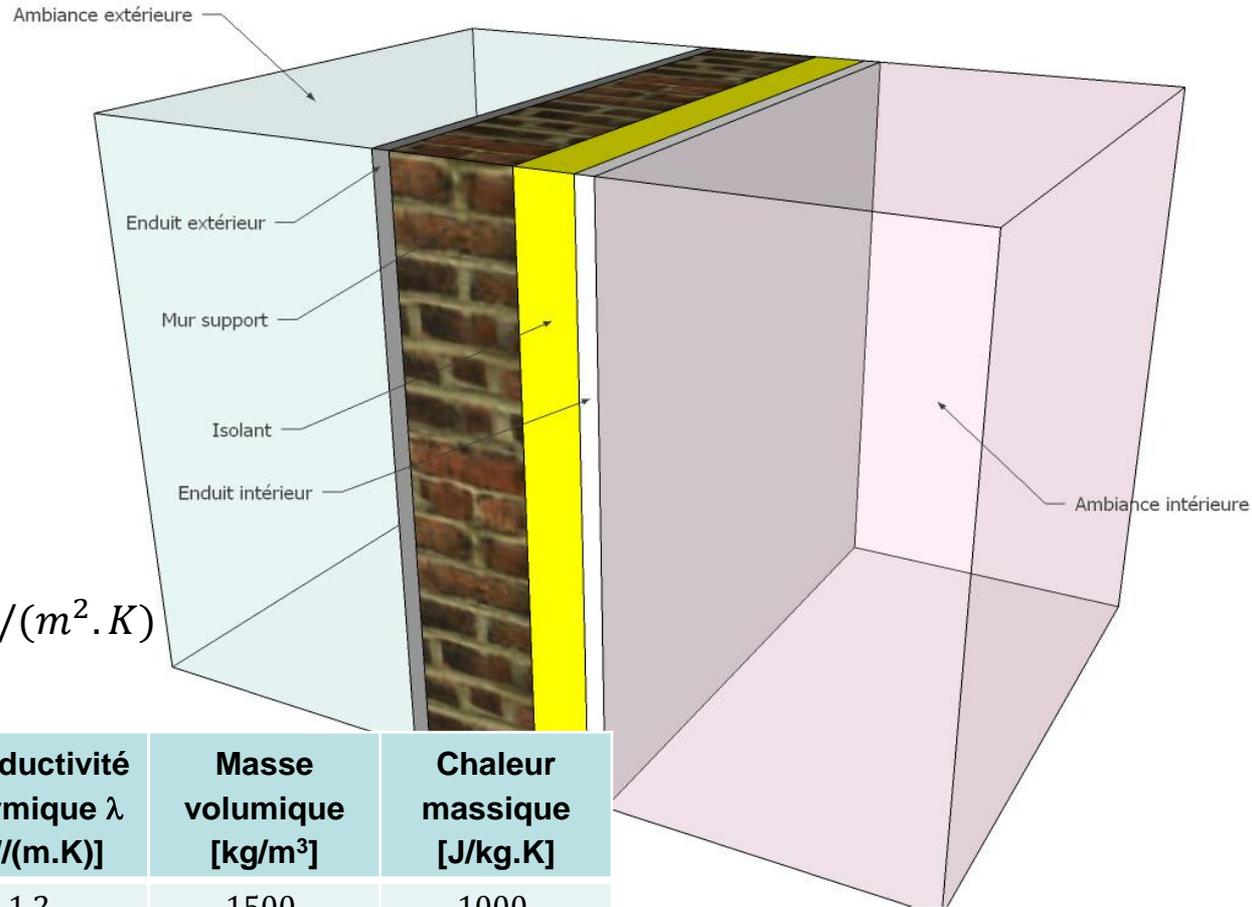
### Modèles physiques générateurs (MPG) – Simulation 3D transitoire

- Voltra (CSTB) : logiciel commercial de simulation numérique (éléments finis)
- Comsol Multiphysics (LNE) : logiciel commercial de simulation numérique (éléments finis)
- Quadripôles thermiques (CERTES) : méthode de résolution semi-analytique (transformations intégrales) + inversion numérique de la transformée de Laplace

# Simulation numérique

## Cas Tests considérés : exemple pour ITI et ITE

### Isolation Thermique par l'intérieur (ITI)



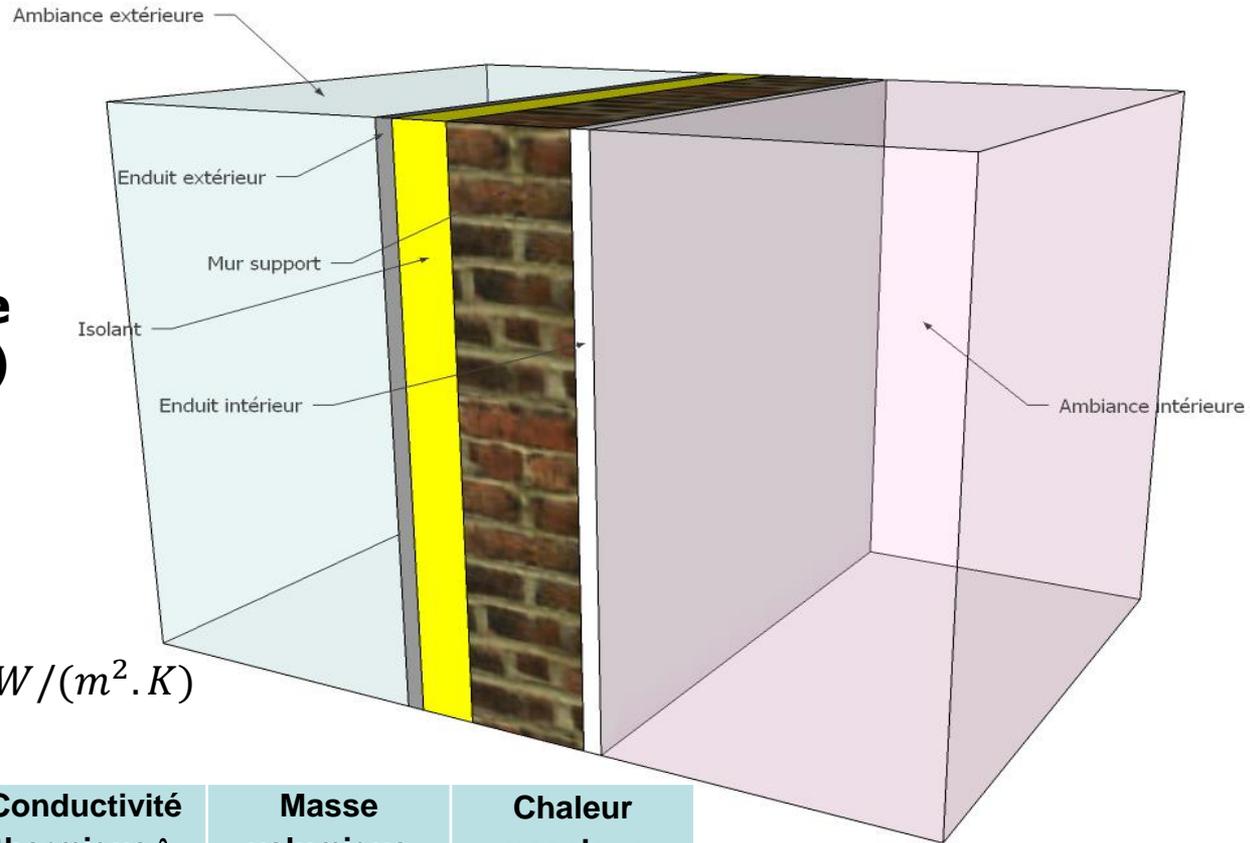
$$R = 4,47 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} ; U_p = 0,22 \text{ X}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Couche (de l'ext vers l'int)	Epaisseur [m]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Chaleur massique [J/kg.K]
Enduit extérieur	0.01	1.2	1500	1000
Mur support	0.22	0.7	900	1000
Isolant	0.14	0.034	50	1100
Enduit ou parement intérieur	0.013	0.3	750	1000

# Simulation numérique

## Cas Tests considérés : exemple pour ITI et ITE

### Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE)

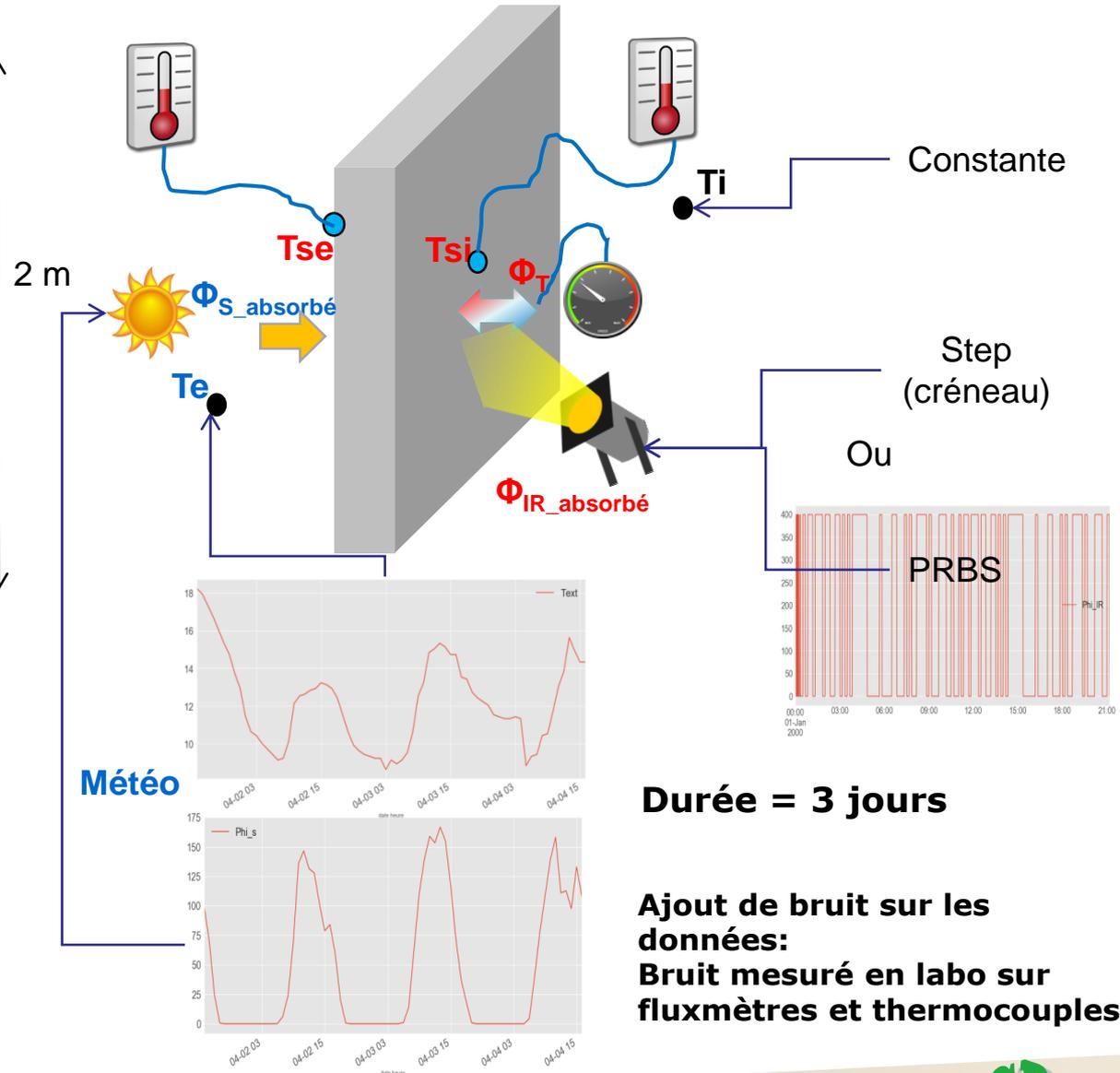
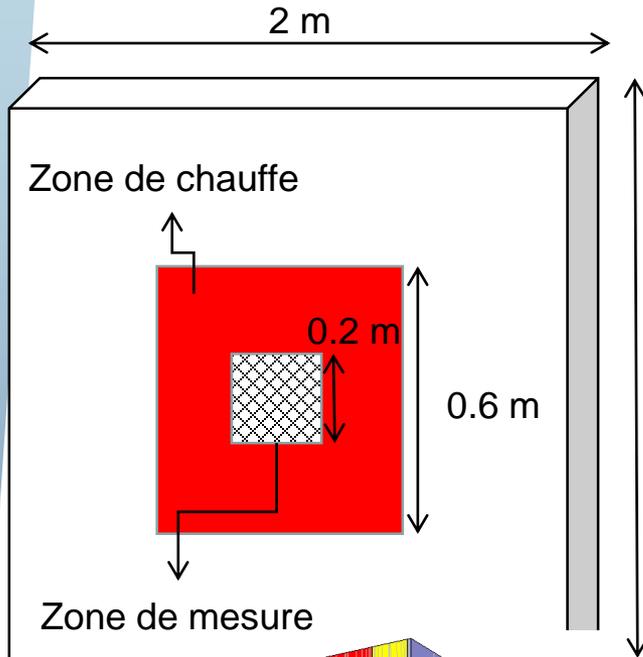


$$R = 5,30 \text{ m}^2 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}} ; U_p = 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Couche (de l'ext vers l'int)	Epaisseur [m]	Conductivité thermique $\lambda$ [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Chaleur massique [J/kg.K]
Enduit extérieur	0.01	1.3	1000	1000
Isolant	0.16	0.031	40	1000
Mur support	0.15	2.0	2200	1000
Enduit ou parement intérieur	0.013	0.25	800	1000

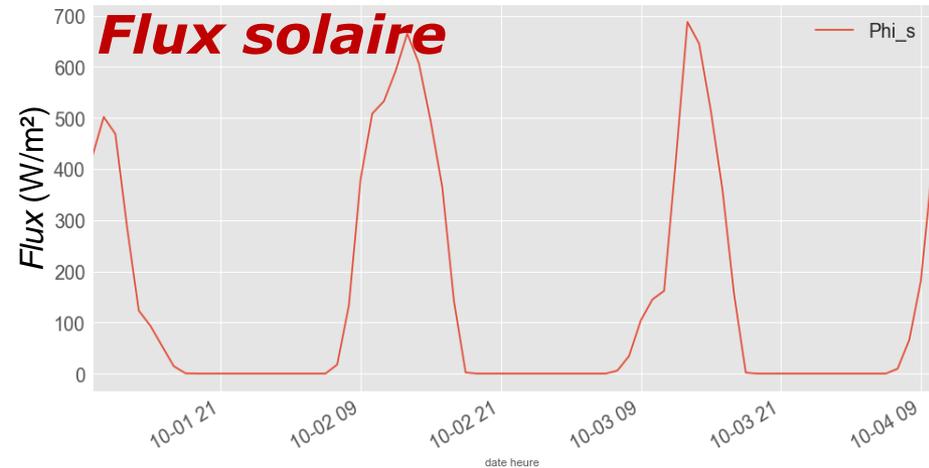
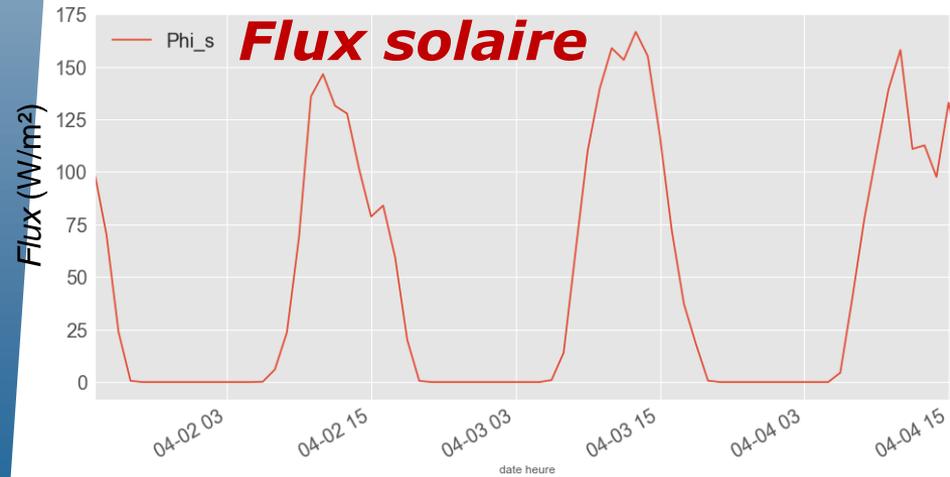
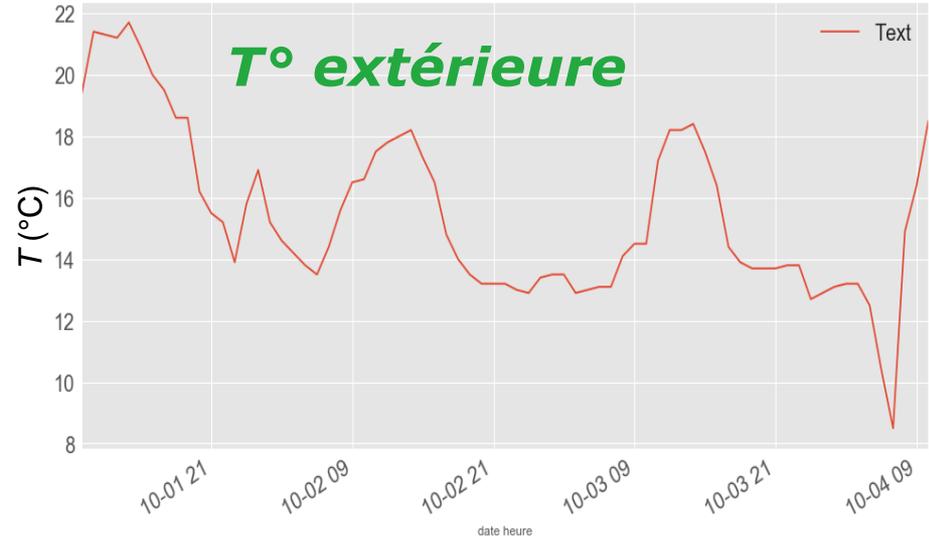
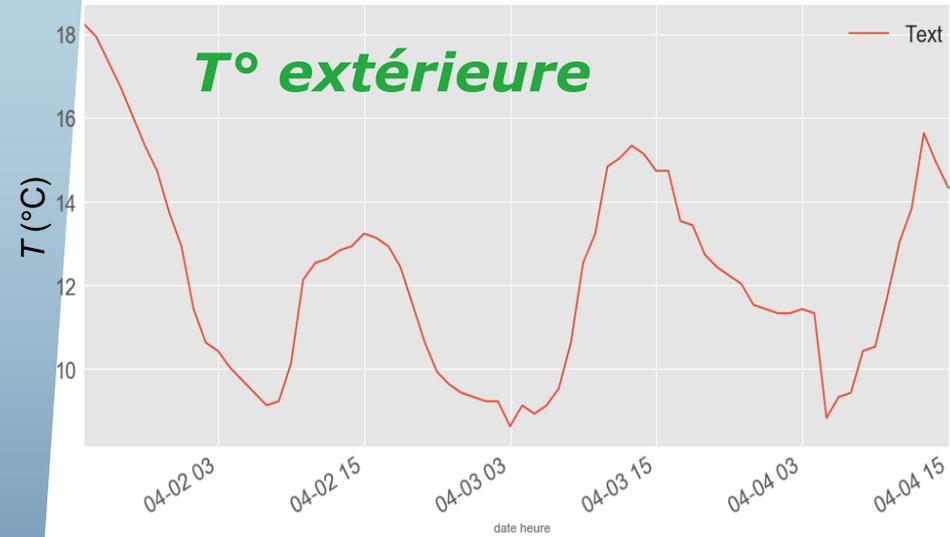
# Simulation numérique

## Configuration générale, Conditions limites & Excitations



# Simulation numérique

## Climats sélectionnés



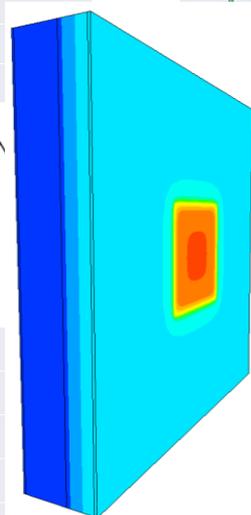
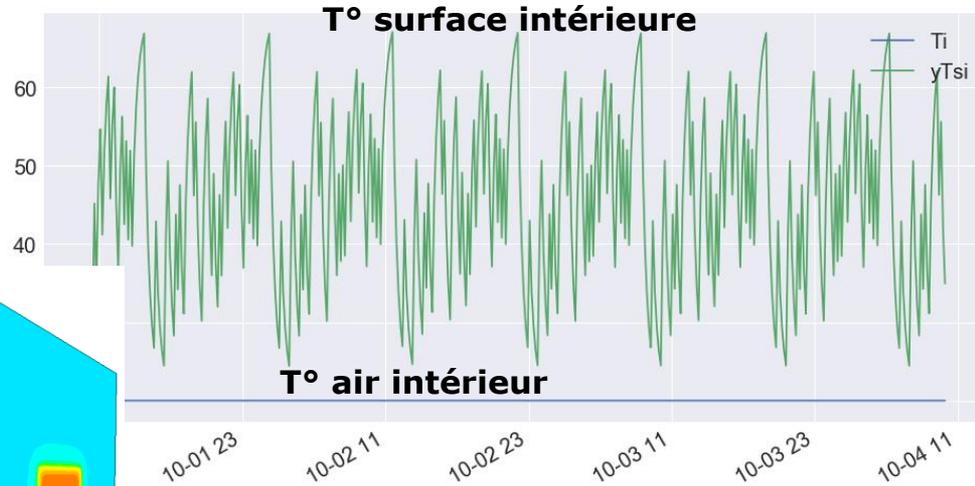
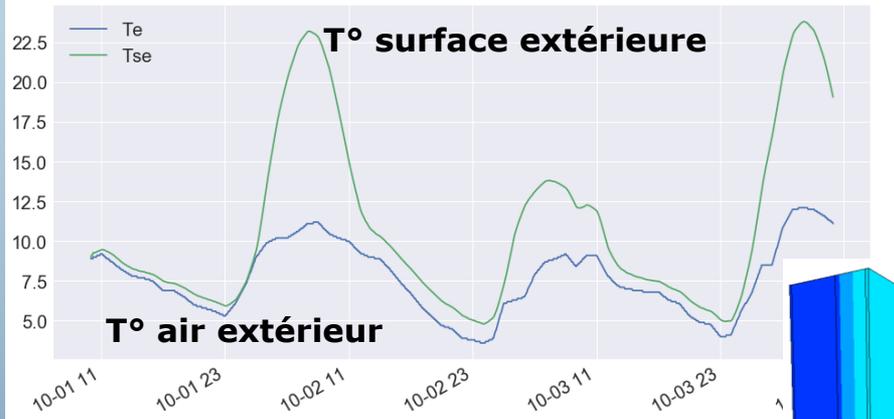
**Trappes - avril**

**Carpentras - octobre**

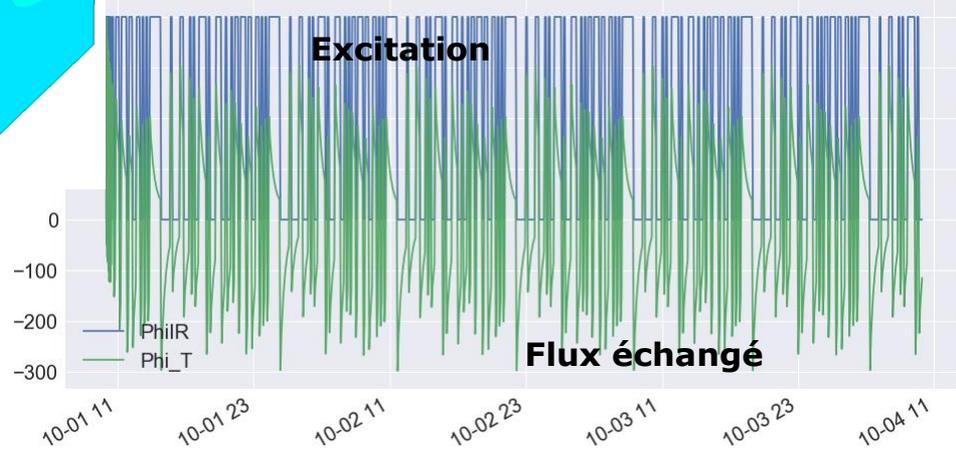
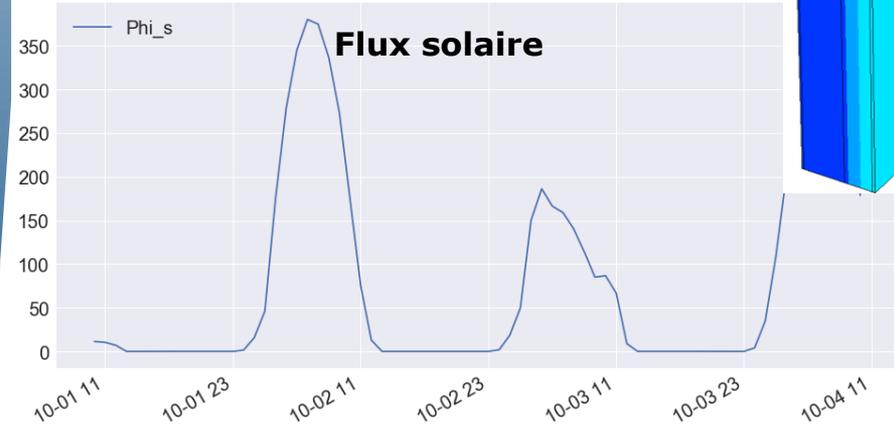
# Simulations numériques

## Exemple de sollicitation et de réponse obtenue

$T(^{\circ}\text{C})$



Flux ( $\text{W}/\text{m}^2$ )



**Données VOLTRA / CSTB**

# Plan de l'exposé

Contexte & Objectifs, Problématique

Simulations numériques

Modèles Physiques Générateurs

Cas Tests

**Réduction de modèle**

**Modèles réduits utilisés**

**Erreurs de modèle et Analyse de sensibilité**

Identification de résistance thermique

Quelques résultats

Limitations et Perspectives

Conclusion

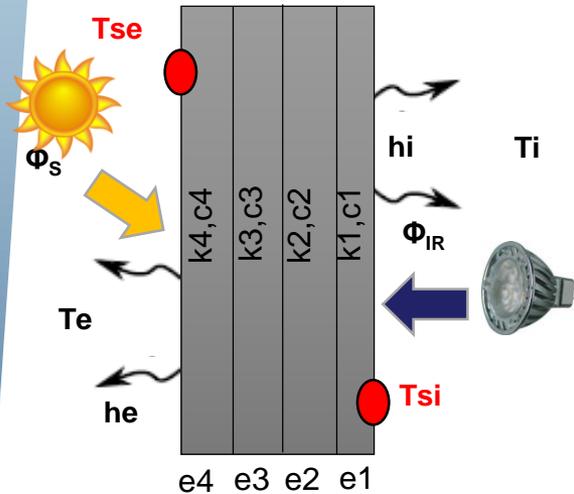
# Réduction de modèle

## Modèle N° 1 – proposé par l'IFSTTAR

### Méthode des éléments finis et algorithme à direction de descente

Modèle simplifié : 1D instationnaire avec 4 couches

$T_r(x,t)$



#### Paramètres

- Paramètres considérés connus ou fixés:  
 $h_i$ ,  $h_e$ ,  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ ,  $e_4$
- Paramètres à recalculer. **ki**, **ci**

#### Equation aux dérivées partielles à résoudre

$$\begin{cases} c(x) \frac{\partial T_r}{\partial t}(x,t) - k(x) \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2}(x,t) = 0, & x \in [0, L], t \in [0, \tau] \\ -k(x) \frac{\partial T_r}{\partial x}(x=0,t) = \Phi_{IR}(t) - h_i(T_r(x=0,t) - T_i(t)), & t \in [0, \tau] \\ -k(x) \frac{\partial T_r}{\partial x}(x=L,t) = h_e(T_r(x=L,t) - T_e(t)) - \Phi_s(t), & t \in [0, \tau] \\ T_r(x,t=0) = T_{t=0}(x), & x \in [0, L] \end{cases}$$

Mesures utilisées (avec bruit) au niveau de la paroi :

- Température face intérieure
- Température face extérieure

Bruit de 0,02°C

# Réduction de modèle

## Modèle N° 1 – proposé par l'IFSTTAR

### Méthode des éléments finis et algorithme à direction de descente

Formulation du problème de recalage des paramètres :

$$\min_{\mathbf{p}, T \in \mathcal{T}} J(T; \mathbf{p})$$

où

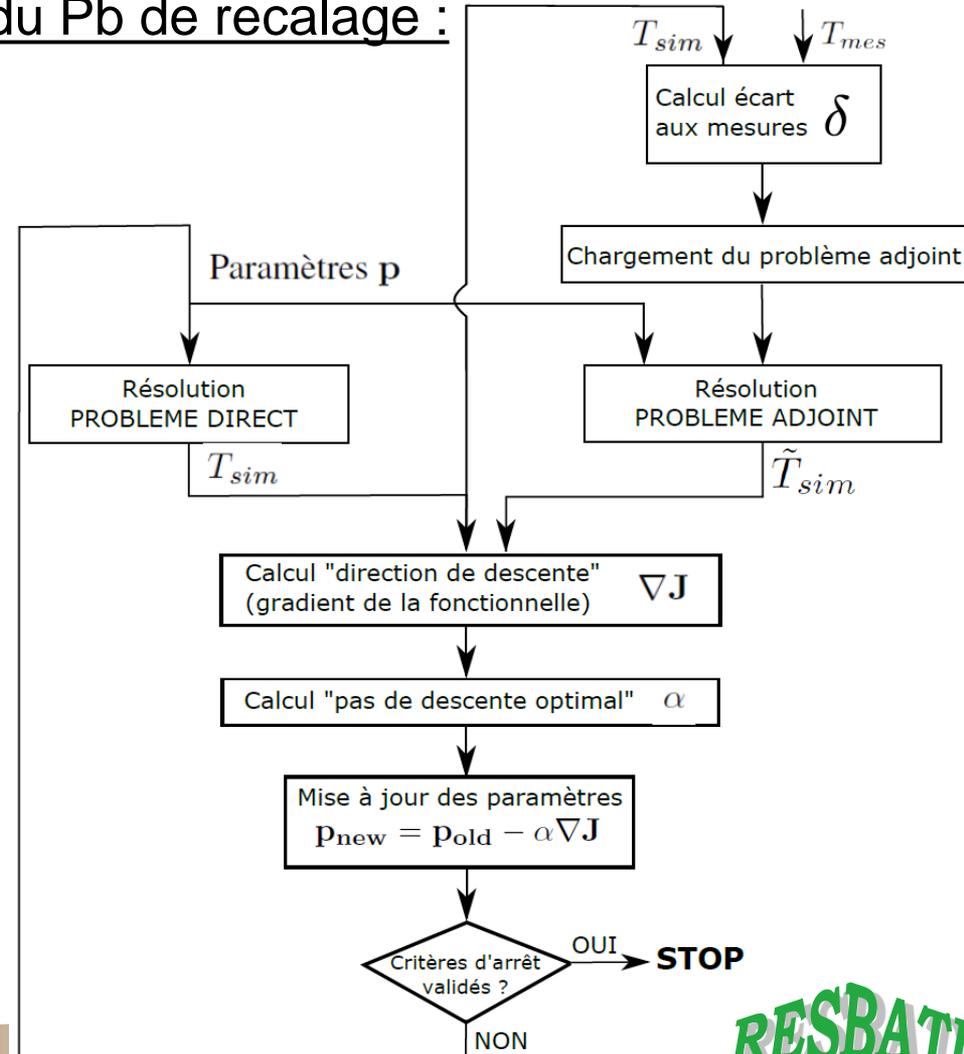
$$J(T; \mathbf{p}) = \frac{1}{2} \int_{t=0}^{t=\tau} (T(t; \mathbf{p}) - T^{mes}(t))^2 dt + \alpha_{reg} \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_0\|^2$$

Terme Régularisation [Tikhonov 77]

$\mathcal{T} = \{\mathbf{T}(t), t \in [0, \tau]$  tel que

$$\mathbf{C}(\mathbf{p}) \frac{d\mathbf{T}}{dt} + \mathbf{K}(\mathbf{p})\mathbf{T} = \mathbf{F}(\mathbf{p}), \mathbf{T}(t=0) = \mathbf{T}_{t=0}\}$$

Méthode numérique pour la résolution du Pb de recalage :



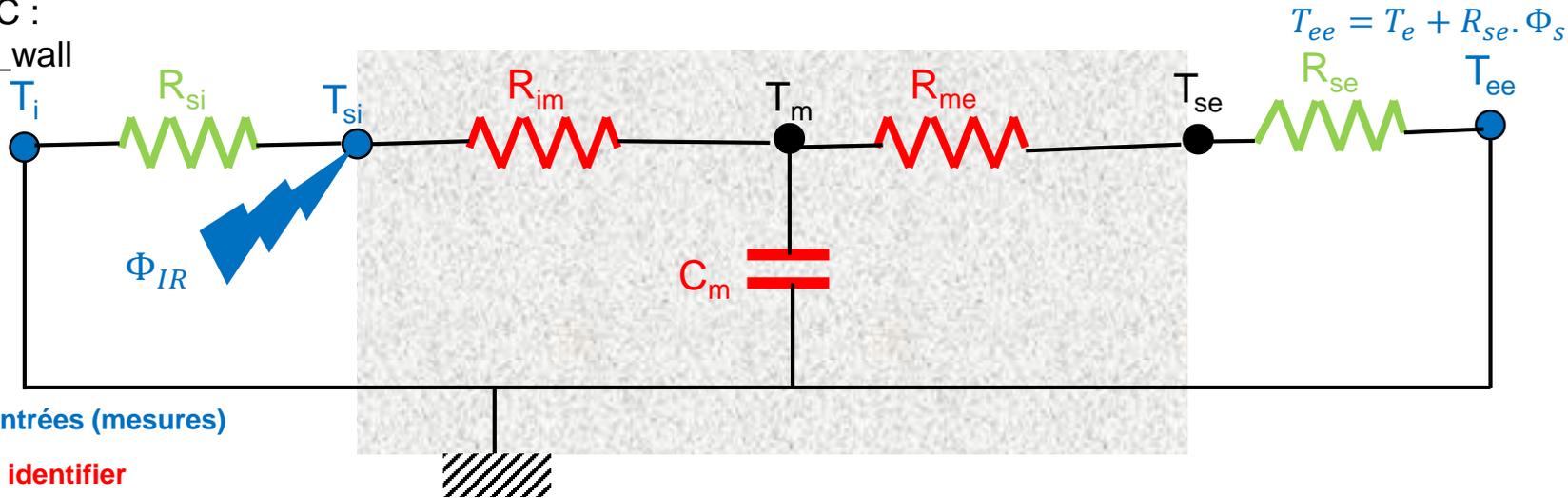
# Réduction de modèle

## Modèle N° 2 – ISABELE, proposé par le CSTB

**Modélisation stochastique de type "boîte grise" avec une approche de type maximum de vraisemblance**

Modèle RC :

M1\_TmTi\_wall



→ Données entrées (mesures)

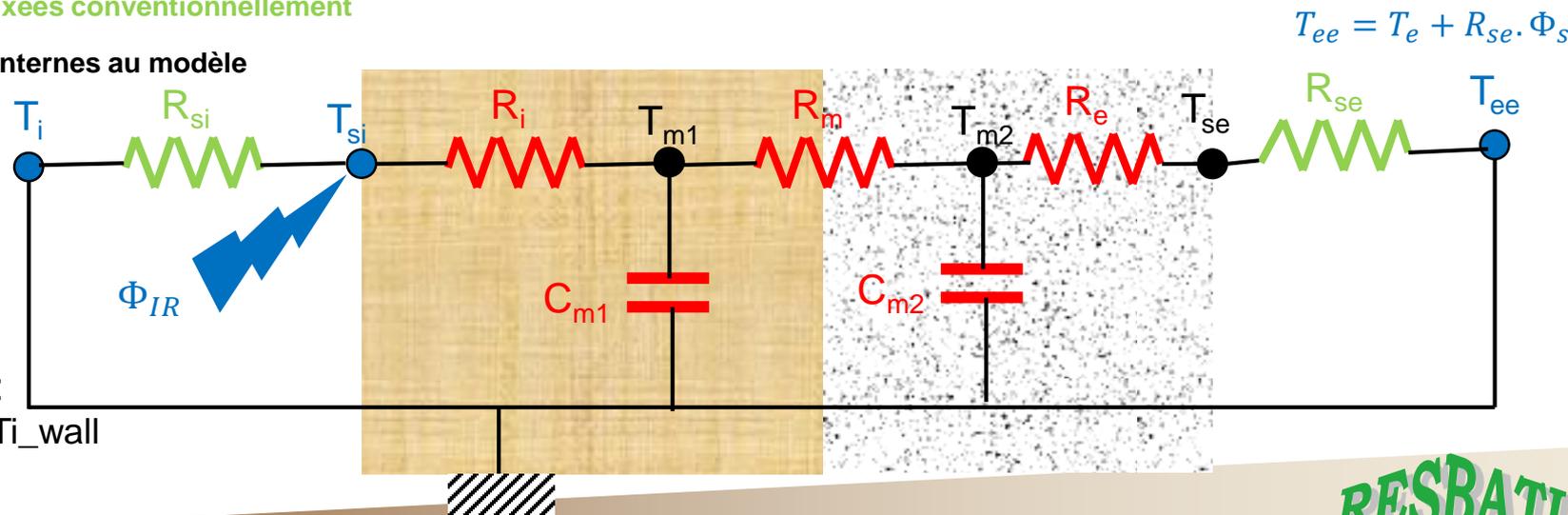
→ Données à identifier

→ Données fixées conventionnellement

→ Variables internes au modèle

Modèle RC :

M2\_Tm1Tm2Ti\_wall

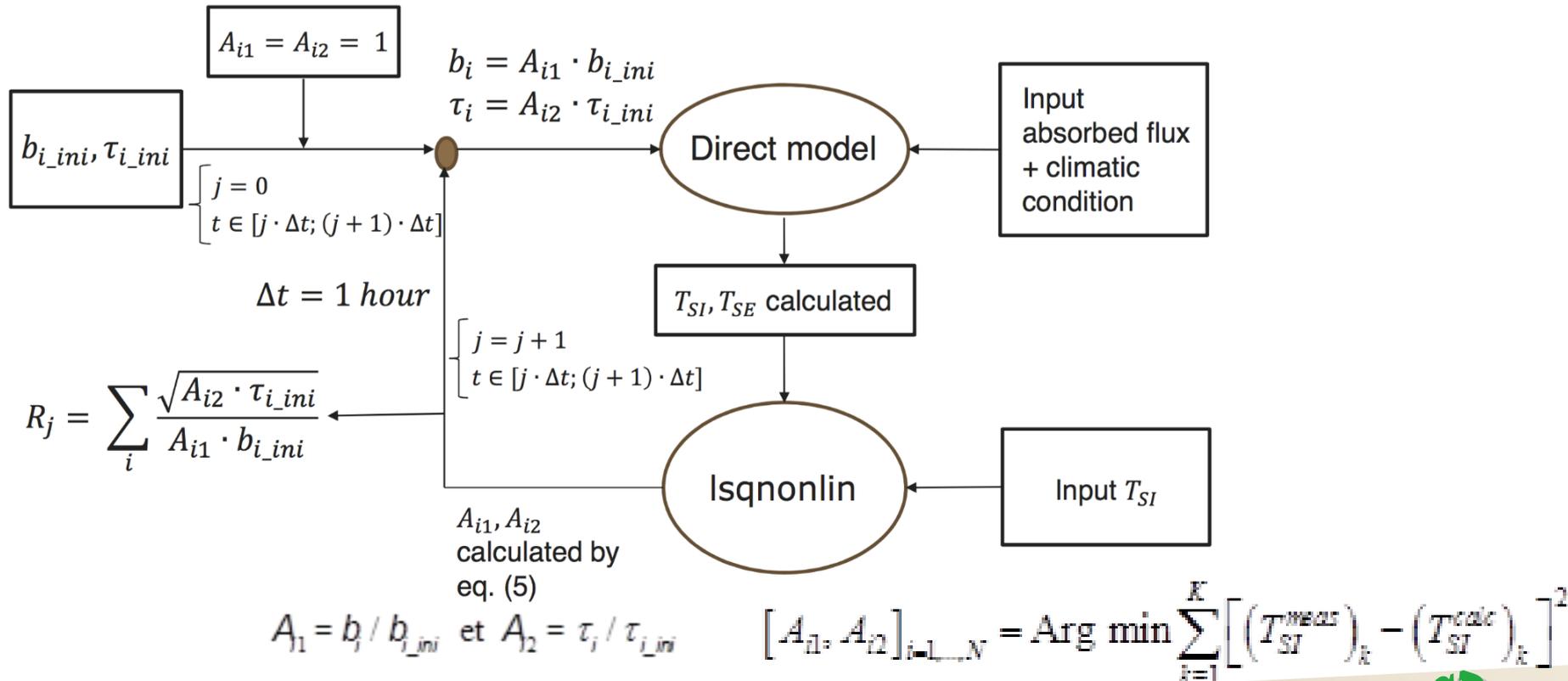


# Réduction de modèle

## Modèle N° 3 – proposé par le CERTES

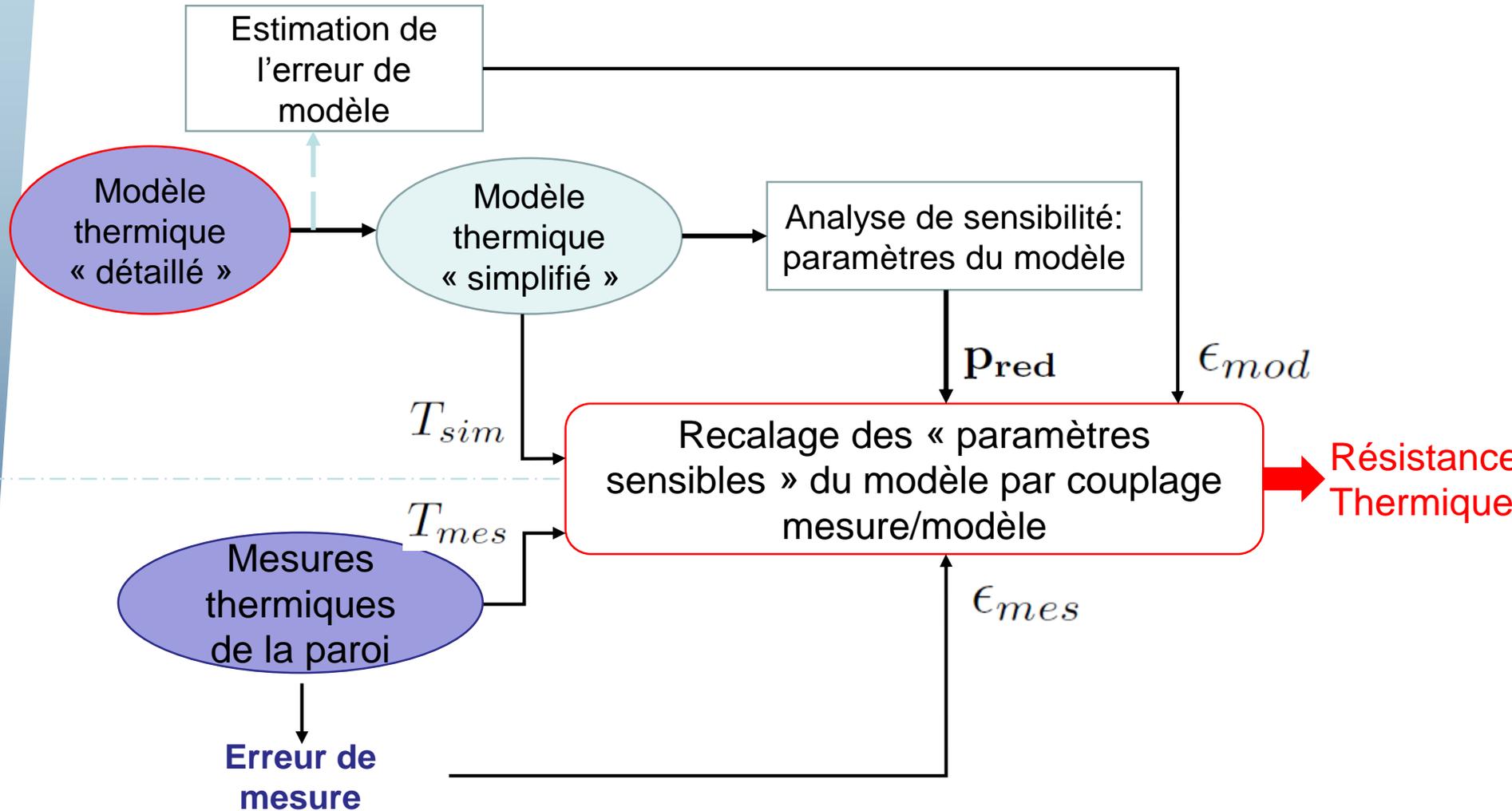
### Méthode des quadripôles thermiques et algorithme à région de confiance

- Quadripôles 1D – 4 couches + échanges faces intérieures et extérieures
- Formulation des matrices en utilisant la constante de temps  $\tau$  et l'effusivité  $b$  de chaque couche
- Utilisation d'une inversion numérique de la Transformée de Laplace
- Identification heure par heure



# Réduction de modèle

## Stratégie globale pour l'estimation de la résistance thermique



# Réduction de modèle

## Erreur de modèle – exemple d'estimation pour le modèle 1

### Erreur de modèle : ITI - Climat Trappes - Step

Modèle complexe : 3D instationnaire avec 4 couches  $T(x,t)$

Modèle simplifié : 1D instationnaire avec 4 couches  $T_r(x,t)$

Erreur de modèle en  $x=x_i$  :

$$\|T(x = x_i, t) - T_r(x = x_i, t)\|_{L_2}$$

- Erreur sur température de paroi intérieur :  $\sim 0,05^\circ\text{C}$
- Erreur sur température de paroi extérieur :  $\sim 0,14^\circ\text{C}$

Seuil de la fonctionnelle associée à l'erreur de modèle :  $3,1 \times 10^3$

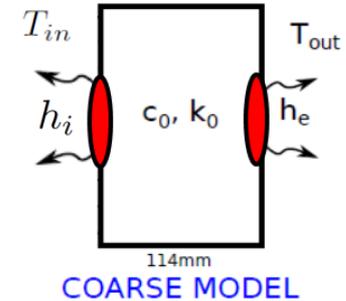
# Réduction de modèle

## Analyse de sensibilité – exemple pour modèle 1

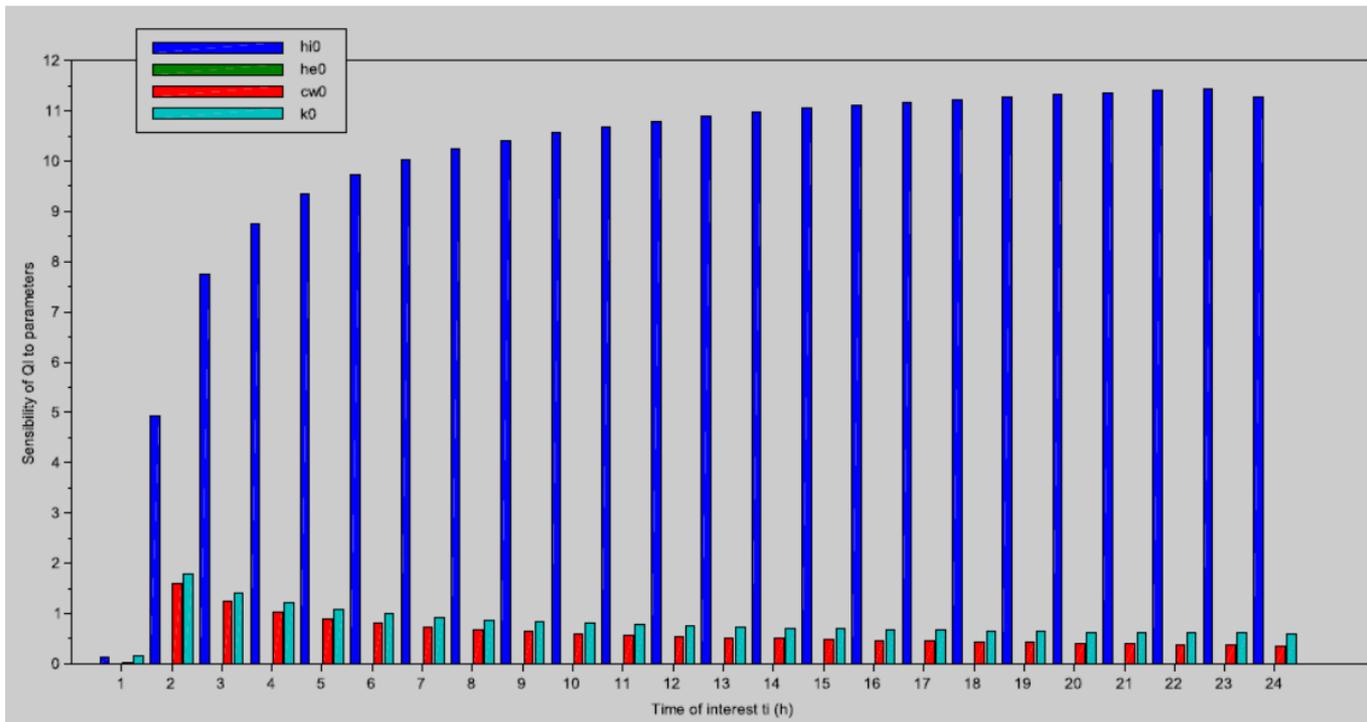
### Cas modèle simplifié mono-couche

Analyse de sensibilité :

Objectif : Evaluer la sensibilité de *quantité d'intérêt* par rapport aux paramètres du modèle



- Quantité d'intérêt #1 : Température paroi côté intérieur



Sensibilité à  $h_i$  est 10 fois supérieure à  $k$  et  $c$  !

# Réduction de modèle

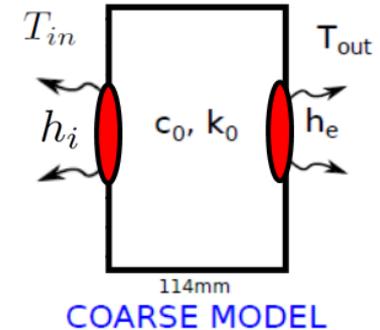
## Analyse de sensibilité – exemple pour modèle 1

### Cas modèle simplifié mono-couche

Analyse de sensibilité :

Objectif : Evaluer la sensibilité de *quantité d'intérêt* par rapport aux paramètres du modèle

- Quantité d'intérêt #1 : Température paroi côté intérieur
- Quantité d'intérêt #2 : Température paroi côté extérieur



Sensibilité QI/p	QI#1	QI#2
$h_i$	9,9	$\sim 0$
$h_e$	$\sim 0$	0,1
$c$	0,4-1,6	0,04
$k$	0,8-1,8	0,1

# Plan de l'exposé

Contexte & Objectifs, Problématique

Simulations numériques

Modèles Physiques Générateurs

Cas Tests

Réduction de modèle

Modèles réduits utilisés

Erreurs de modèle et Analyse de sensibilité

**Identification de résistance thermique**

**Quelques résultats**

**Limitations et Perspectives**

Conclusion

# Estimation de Résistance Thermique

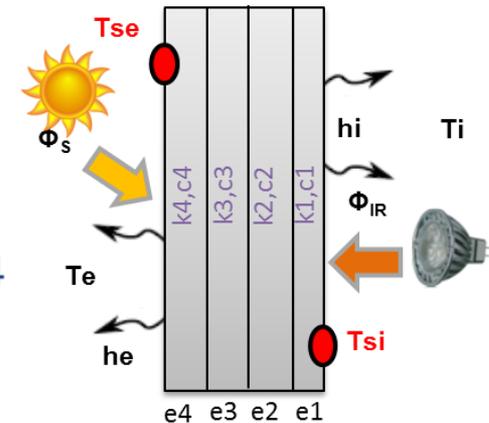
## Exemple de résultat – ITI – Modèle 1

### Recalage ITI Trappes - Step

Temps d'observation de 72h

$h_i$  et  $h_e$  supposés connus

$e_1/e_{1ex}=0,77$  ;  $e_2/e_{2ex}=1,14$  ;  $e_3/e_{3ex}=0,81$  ;  $e_4/e_{4ex}= 1,4$



	EXACT	INITIAL	RECALE
cw1norm	1	0,8	1,32
k1norm	1	0,67	1,19
cw2norm	1	0,89	0,72
k2norm	1	1,71	1,16
cw3norm	1	1,11	1,33
k3norm	1	0,57	0,75
cw4norm	1	1,13	0,86
k4norm	1	1,5	1,4



	INITIAL	RECALE
R1/R1ex	1,15	0,64
R2/R2ex	<b>0,67</b>	<b>0,99</b>
R3/R3ex	1,43	1,08
R4/R4ex	0,93	1,00
<b>R/Rex</b>	<b>0,73</b>	<b>0,99</b>

**Erreur résistance thermique < 2%**

# Estimation de Résistance Thermique

## Exemple de résultat – ITI – Modèle 1

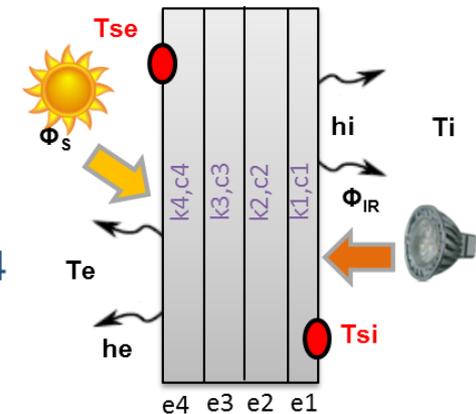
### Recalage ITI Trappes - Step

Temps d'observation de 72h

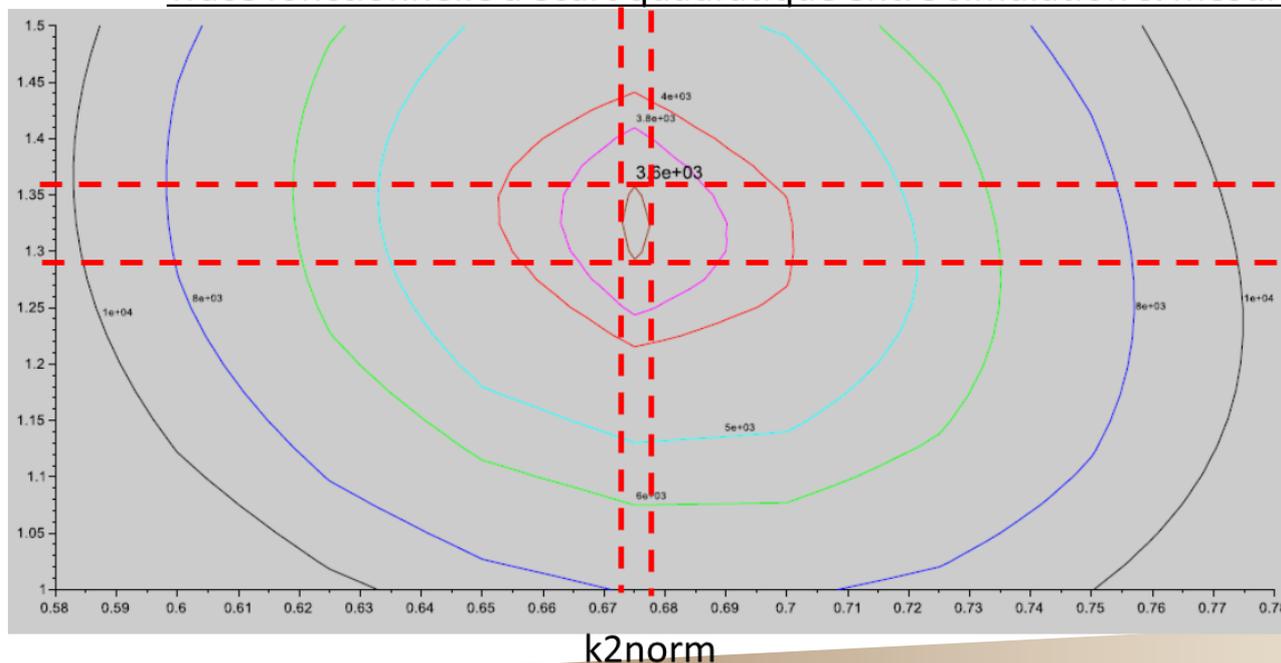
$h_i$  et  $h_e$  supposés connus

$e_1/e_{1ex}=0,77$  ;  $e_2/e_{2ex}=1,14$  ;  $e_3/e_{3ex}=0,81$  ;  $e_4/e_{4ex}=1,4$

Compte tenu de l'erreur de modèle et de mesure,  
on stoppe le recalage lorsque :  $J \approx 3,6 \times 10^4$



$k_3$ norm Tracé fonctionnelle d'écart quadratique entre simulation & mesure



$$\frac{k_2}{k_{2ex}} \in [1,14 ; 1,16]$$

&

$$\frac{k_3}{k_{3ex}} \in [0,74 ; 0,78]$$



$$\frac{R}{R_{ex}} \in [0,98 ; 1,01]$$

**Erreur < 2%**

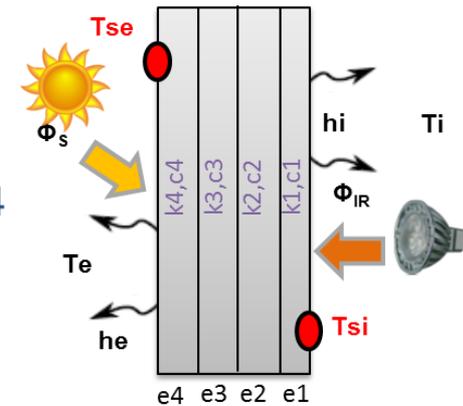
# Estimation de Résistance Thermique

## Exemple de résultat – ITI – Modèle 1

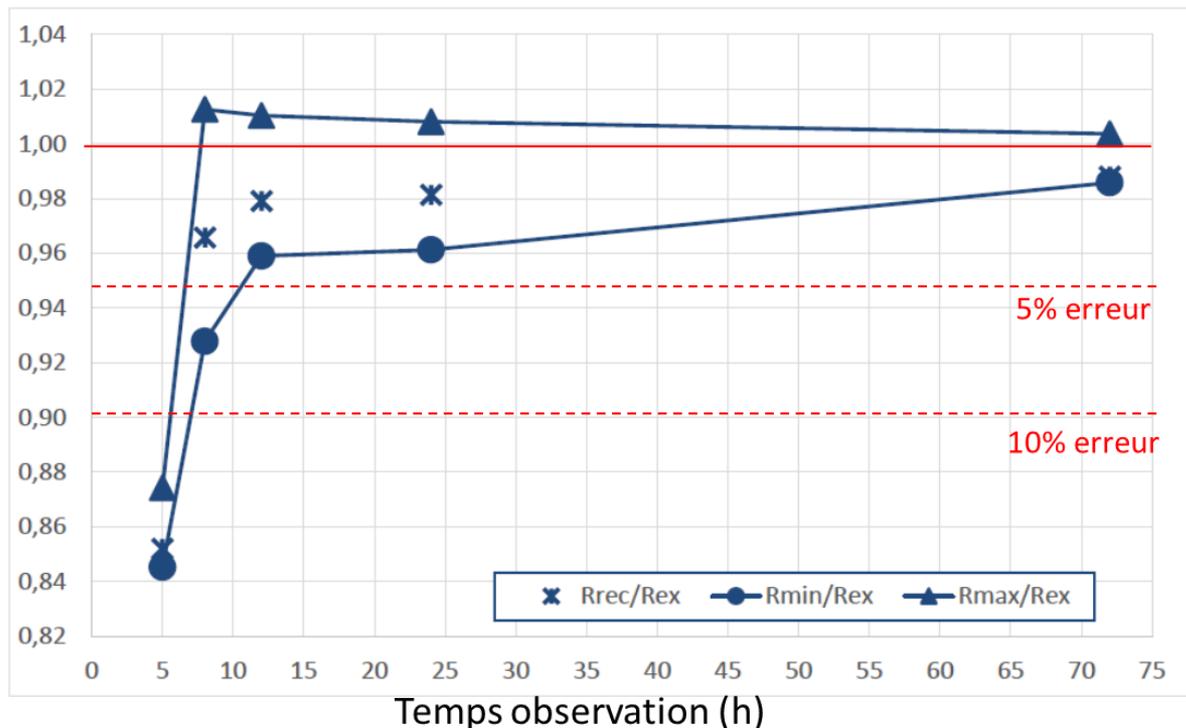
### Recalage ITI Trappes - Step

hi et he supposés connus

$e1/e1ex=0,77$  ;  $e2/e2ex=1,14$  ;  $e3/e3ex=0,81$  ;  $e4/e4ex=1,4$



Résistance thermique recalée (normalisée)



Résistance à 10% près  
pour  $tobs=8h$

Résistance à 5% près  
pour  $tobs=12h$

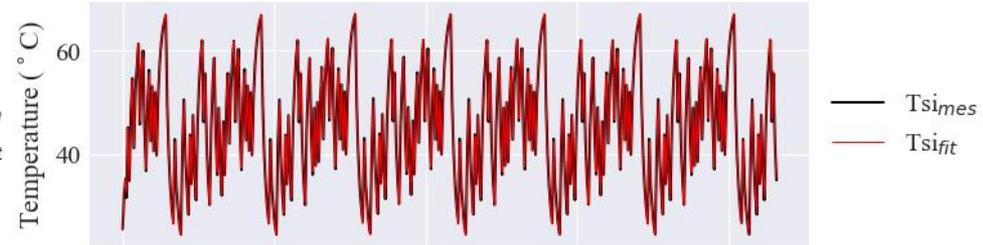
# Estimation de Résistance Thermique

## Exemple de résultat – ITI – Modèle 2

STEP



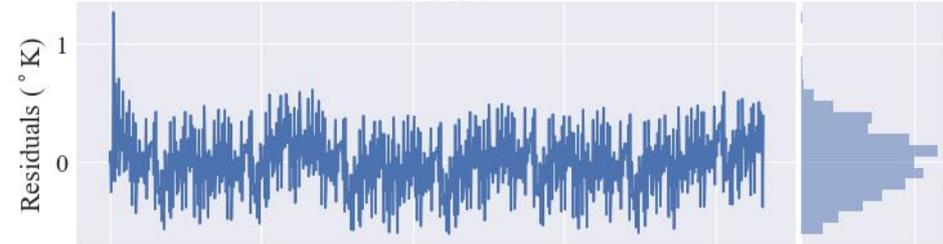
PRBS



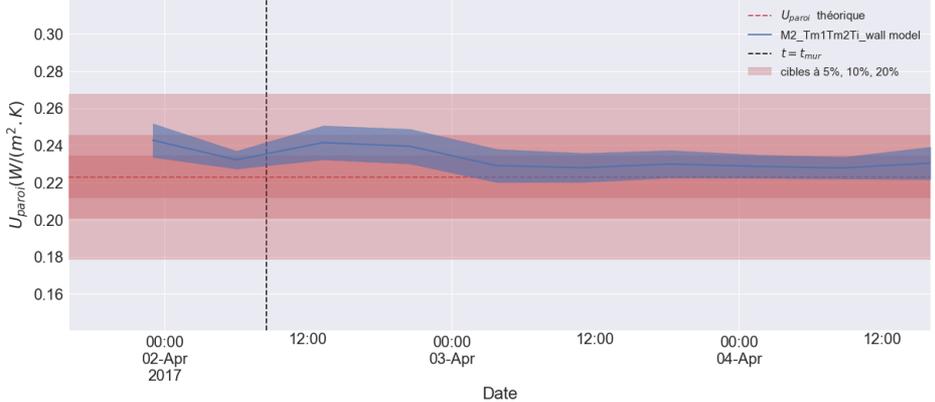
Residuals



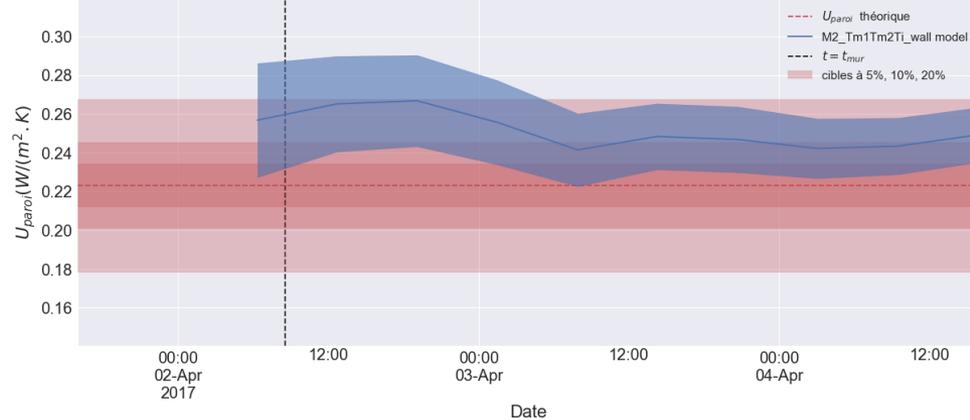
Residuals



Évolution du résultat de mesure



Évolution du résultat de mesure



# Estimation de Résistance Thermique

## Exemple de résultat - ITE- Modèle 2

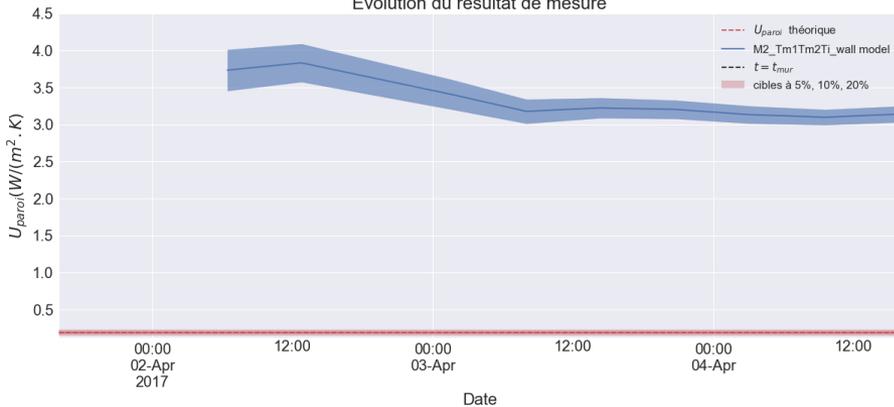
STEP



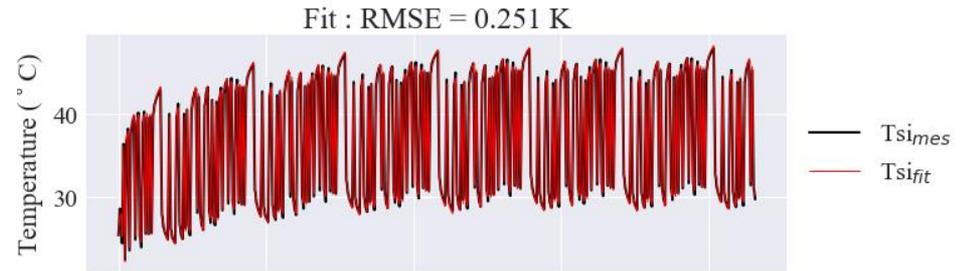
Residuals



Évolution du résultat de mesure



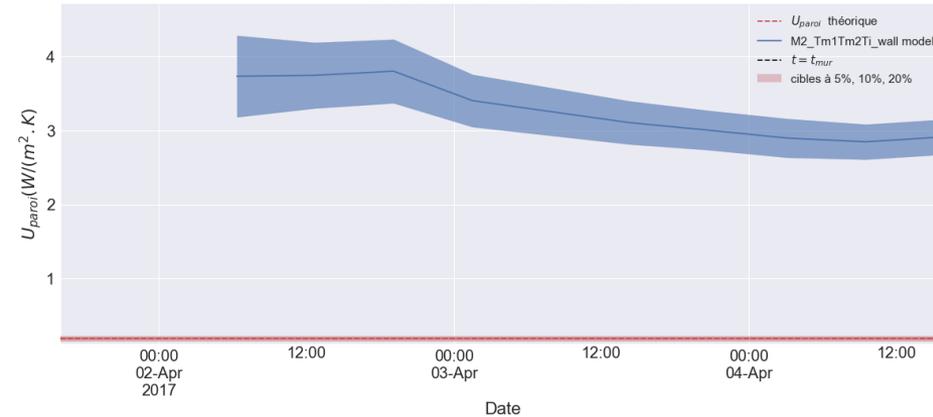
PRBS



Residuals



Évolution du résultat de mesure



# Estimation de Résistance Thermique

## Synthèse des Résultats

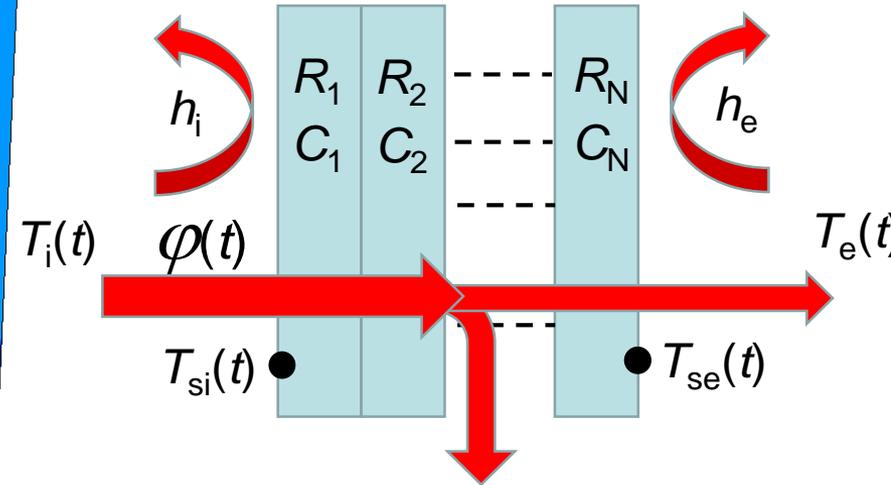
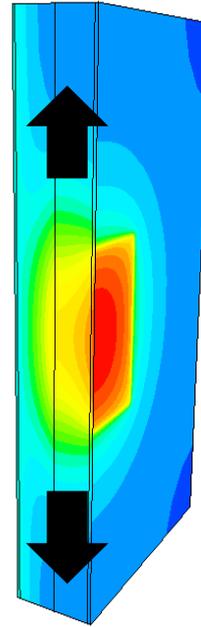
Typologie Paroi	Excitation	Conditions			Durée minimale de mesure pour atteindre la valeur attendue de R (ou 1/R) à +/-			Tps calcul
		Méthode Identification	Climat	Bruit de Mesure	20%	10%	5%	
ITI	STEP	CSTB	Trappes	Oui	6h30	7h	14h	10 sec
			Carpentras	Oui	6h30	7h	14h	10 sec
		IFSTTAR	Trappes	Oui	5h	8h	12h	10 min
			Carpentras	Oui	5h	8h	24h	10 min
		CERTES	Trappes	Oui	7h	7h	27h	5 min
			Carpentras	Oui	5h	5h	24h	5 min
			Trappes	Non	1h	4h	5h	5 min
			Carpentras	Non	7h	9h	10h	5 min
	PRBS	CSTB	Trappes	Oui	14h	40h	Non atteint	1 min
			Carpentras	Oui	14h	40h	Non atteint	1 min
ITE	STEP / PRBS	CSTB - IFSTTAR - CERTES	Trappes / Carpentras	Oui / Non	Non atteint	Non atteint	Non atteint	-

# Estimation de Résistance Thermique

## Limitations des Modèles

Extension latérale limitée:  
présence de flux transverses  
dans la paroi

*Pas de prise en compte dans  
les modèles 1D réduits  
Surtout important en ITE*



Modèle 2D?

Pb: Augmentation  
Temps Calcul!



Forte sensibilité au coefficient  
d'échange intérieur



Maîtriser cette valeur?  
Mesurer ce paramètre?  
Estimer ce paramètre?  
Supprimer ce paramètre  
des équations!



La sensibilité diminue au fur et à  
mesure que  $R$  augmente



Allonger la durée de mesure  
Adaptation de la forme des  
signaux d'excitation

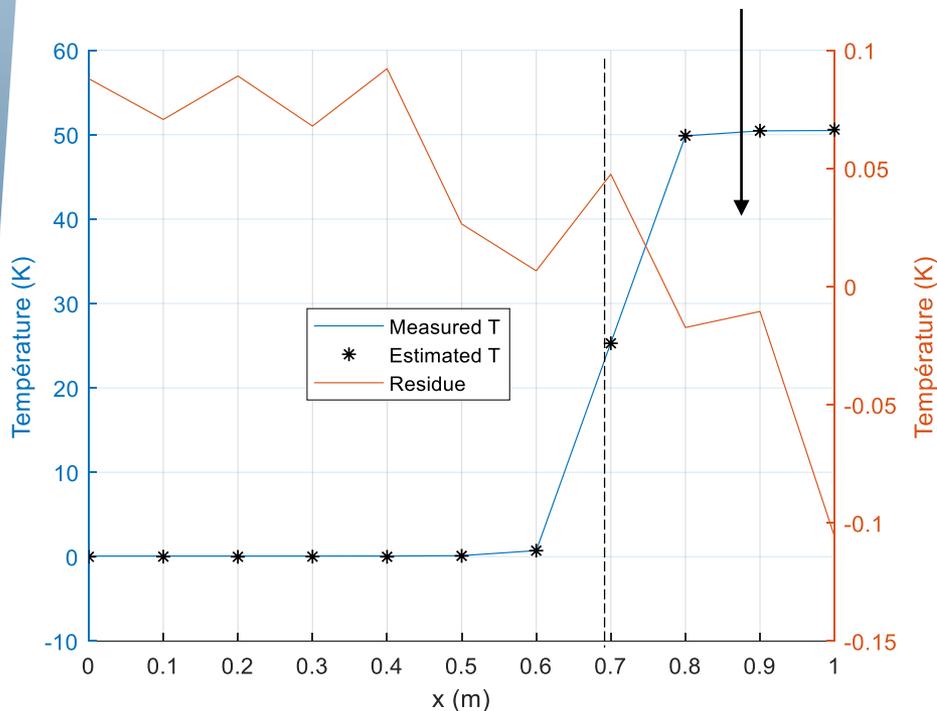
# Estimation de Résistance Thermique

## Perspectives – Utilisation d'un modèle 2D ?

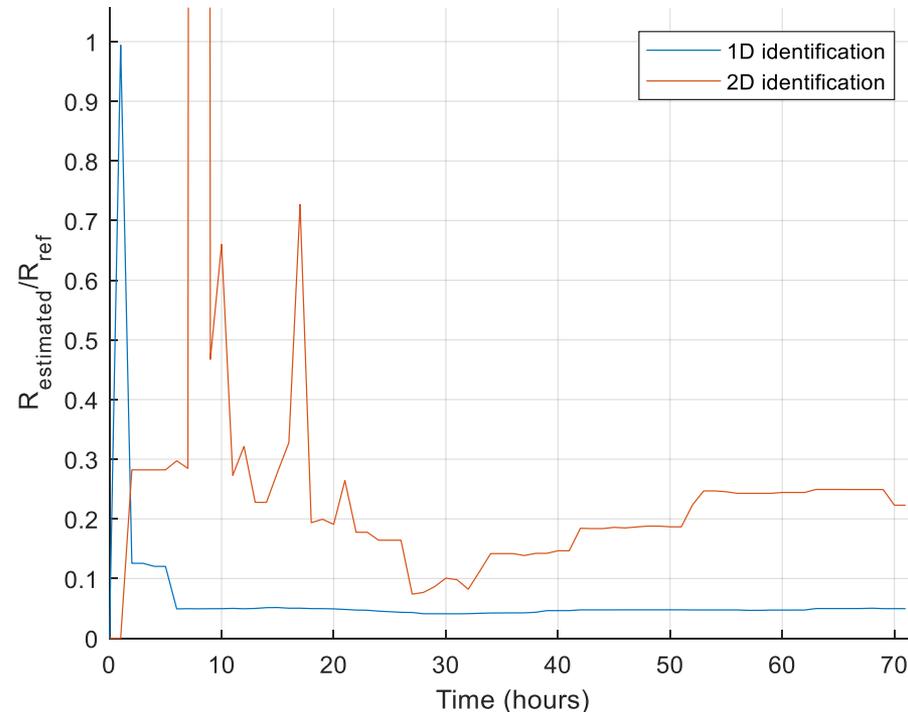
Test de l'utilisation d'un modèle quadripôle 2D:

- calage de profils sur un pas spatial de 10cm
- Problème pour ITE non résolu!
- Augmentation du temps de calcul ( $\geq 10$  heures) / (max 5 min. en 1D).

Zone d'excitation



Résultats pour ITE

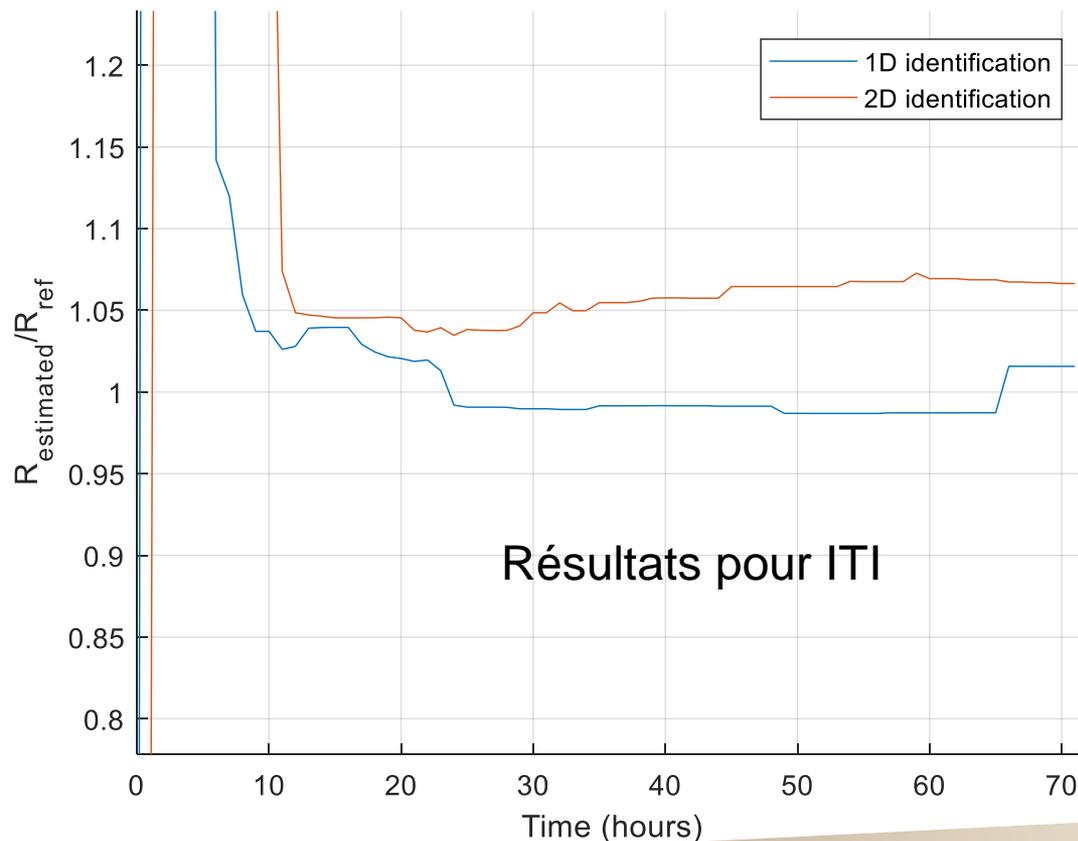


# Estimation de Résistance Thermique

## *Perspectives – Utilisation d'un modèle 2D ?*

En raison de la configuration en 2D, la formulation des quadripôles doit prendre en compte 3 paramètres pour chaque couche (l'épaisseur  $e$ , la conductivité thermique  $\lambda$  et la diffusivité thermique  $a$ ).

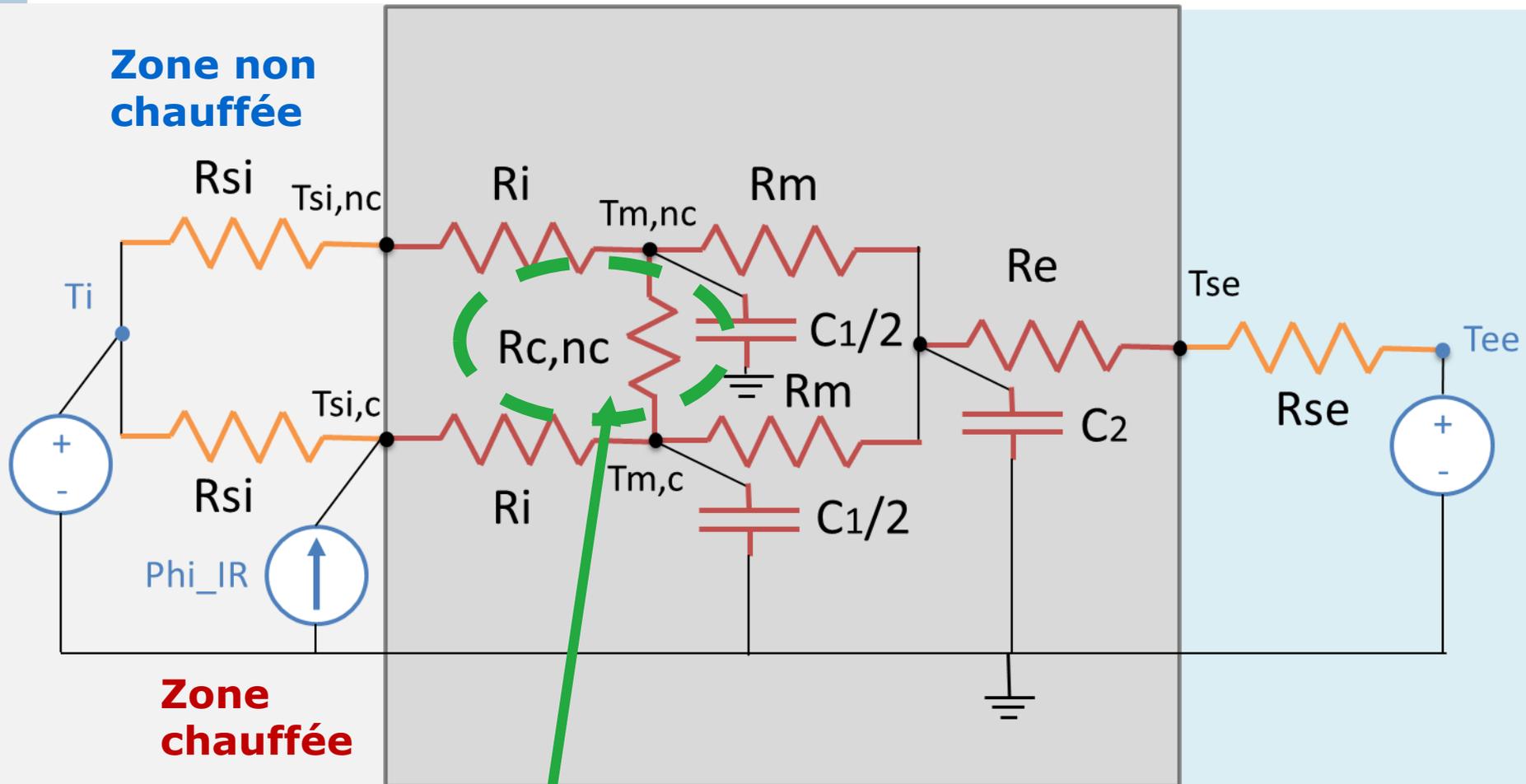
Donc, en ITI, le modèle 1D reste la meilleure solution



# Estimation de Résistance Thermique

## *Perspectives – Variante modèle ISABELE*

Test en cours d'une variante permettant la prise en compte du transfert de flux dans le mur porteur entre les zones chauffée et non chauffée



Transferts latéraux

# Estimation de Résistance Thermique

## *Perspectives – Utilisation du Flux en face avant ?*

Solution envisagée: Utiliser le flux entrant par la face avant afin de s'affranchir du coefficient d'échange sur la face intérieure.

Avec les quadripôles thermiques, ce changement est facile à réaliser.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -h_{int}^{-1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{T}_{int} \\ \hat{\phi}_{int} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \hat{P}_{exci} \end{pmatrix}}_{\text{Modèle Excitation Avec Convection (EAC)}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} 1 & h_{ext}^{-1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{T}_{ext} \\ \hat{\phi}_{ext} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \hat{P}_{sol} \end{pmatrix} \right\}$$

Modèle **Excitation Avec Convection (EAC)**

$$\begin{matrix} \swarrow \\ \rightarrow \end{matrix} \begin{pmatrix} \hat{T}_{SI} \\ \hat{\phi}_{abs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \left\{ \begin{pmatrix} 1 & h_{ext}^{-1} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{T}_{ext} \\ \hat{\phi}_{ext} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \hat{P}_{sol} \end{pmatrix} \right\}$$

Modèle **Flux Absorbé (FAb)**

Avantage: le flux d'excitation thermique est bien maîtrisé; avec le modèle EAC, il faut connaître la valeur exacte de l'excitation incidente absorbée en surface intérieure.

Difficulté: Mesure de ce flux

# Estimation de Résistance Thermique

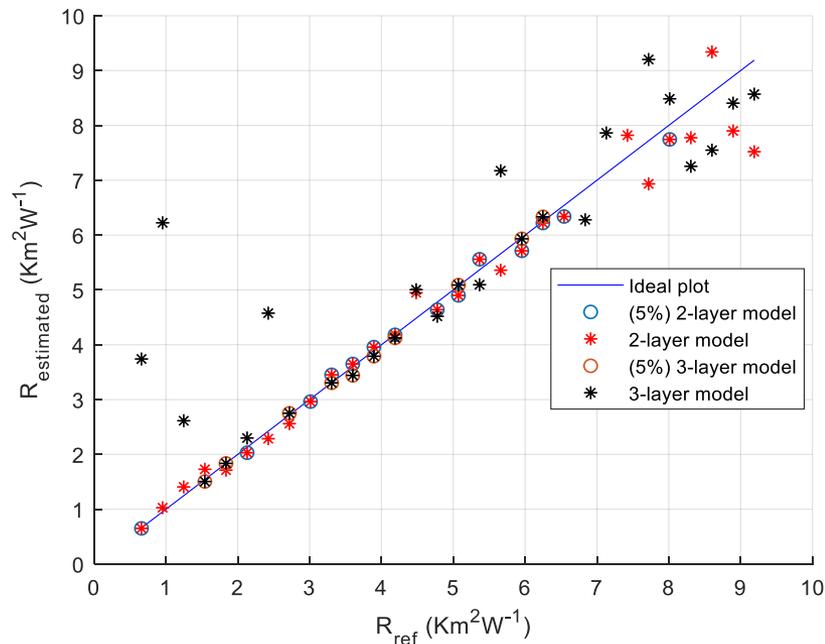
## Perspectives – Utilisation du Flux en face avant ?

Première comparaison des deux approches (EAC, FAb):

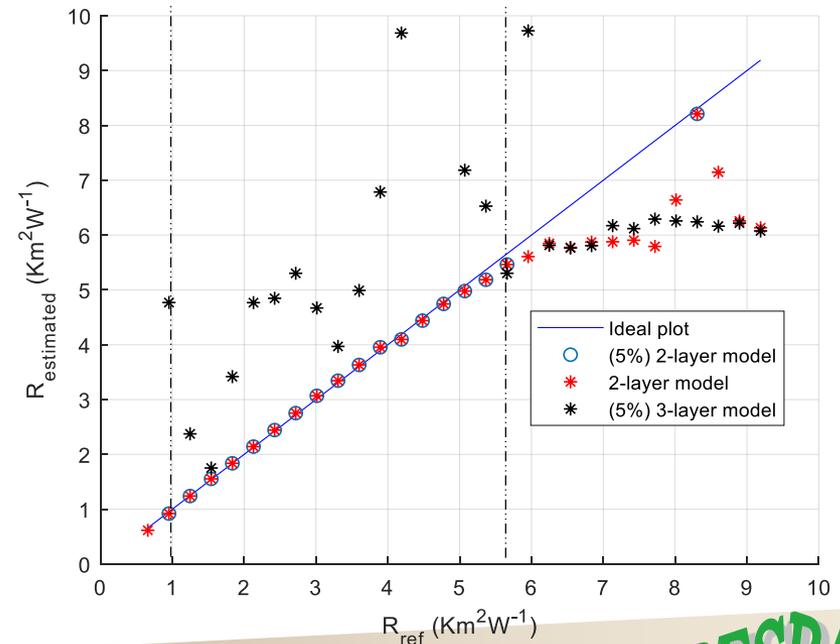
- en fixant des valeurs réalistes pour les propriétés de la première couche de parement (données conventionnelles ou mesure asymptotique temps court);
- identification des propriétés des autres couches (ici, 2 ou 3 couches).

Données: ITI avec épaisseur variable de l'isolant et durée de mesure de 24h

### Excitation Avec Convection (EAC)



### Flux Absorbé (FAb)



# Plan de l'exposé

Contexte & Objectifs, Problématique

Simulations numériques

Modèles Physiques Générateurs

Cas Tests

Réduction de modèle

Modèles réduits utilisés

Erreurs de modèle et Analyse de sensibilité

Identification de résistance thermique

Quelques résultats

Limitations et Perspectives

**Conclusion**

# Conclusion

## Conclusions générales

- Nécessité de la réduction de modèle pour l'identification de paramètres par méthodes inverses: limitation du nombre de paramètres, minimiser la durée des calculs...
- Importance de la quantification des erreurs introduites par l'utilisation de modèles réduits: incidence sur les incertitudes et biais sur les paramètres estimés

## Choix de modèles

- Nombreux paramètres même en situation de transfert 1D
- Problème d'identifiabilité des paramètres:  
*Fixer certains paramètres en fonction de l'application (contrôle de la pose d'isolants sur chantier par exemple): valeurs conventionnelles ou données fournisseur*  
*Ré-écriture du modèle et adaptation du protocole expérimental pour pouvoir disposer de mesures supplémentaires*
- Apport de modèles très simplifiés (asymptotiques par exemple) pour fixer certains paramètres ou bien fournir des valeurs initiales pour l'inversion; à confirmer pour l'application visée

***Journée SFT « Méthodes inverses et thermique du bâtiment: réduction et identification de modèles »  
Mercredi 2 mai 2018***



**Merci pour votre attention**

**Questions?**

**+ d'infos**

**[ibos@u-pec.fr](mailto:ibos@u-pec.fr)**

**[contact@resbati.org](mailto:contact@resbati.org)**

**RESBATI**



**IFSTTAR**



**LNE**

Le progrès, une passion à partager



**Cerema**

Thermique Environnement Matériaux Contrôle de Structures

**CERTES**

**CSTB**  
le futur en construction

**afnor**  
GROUPE

**Themacs** Ingénierie

**UPEC**  
UNIVERSITÉ PARIS-EST CRÉTEIL

**EFLUVE**  
Observatoire des Sciences de l'Université (OSU)