



## Journée AppliBUGS - AgroParisTech

Intérêt de l'estimation bayésienne de modèles inverses pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments

Séverine DEMEYER

13/12/2018

# CONTEXTE: MESURE DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS (MPEB)

## Familles de méthodes de MPEB

Mesure des performances énergétiques de l'enveloppe et des parois

- **Mesure du niveau d'isolation thermique de l'enveloppe à réception/en exploitation**
- **Mesure du niveau d'isolation thermique des parois (résistance thermique)**

Mesure des performances énergétiques des équipements

Mesure et la vérification (M&V) des performances énergétiques du bâtiment

- **Vérification de l'atteinte d'une cible de performance : par ex. vérification de l'adéquation entre les calculs de consommations réalisés et les mesures in situ : procédure d'ajustement et vérification du respect de l'engagement**

Suivi des performances énergétiques pour le « bon fonctionnement » du bâtiment

# CONTEXTE: MESURE DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS (MPEB)

## Initiatives nationales

Projet FBE Fondation Bâtiment Energie (2018-2020)



- Harmonisation et recensement des approches MPEB existantes au sein d'un consortium alliant chercheurs et utilisateurs
- Sélection d'indicateurs de PEB et de méthodes d'évaluation de l'incertitude

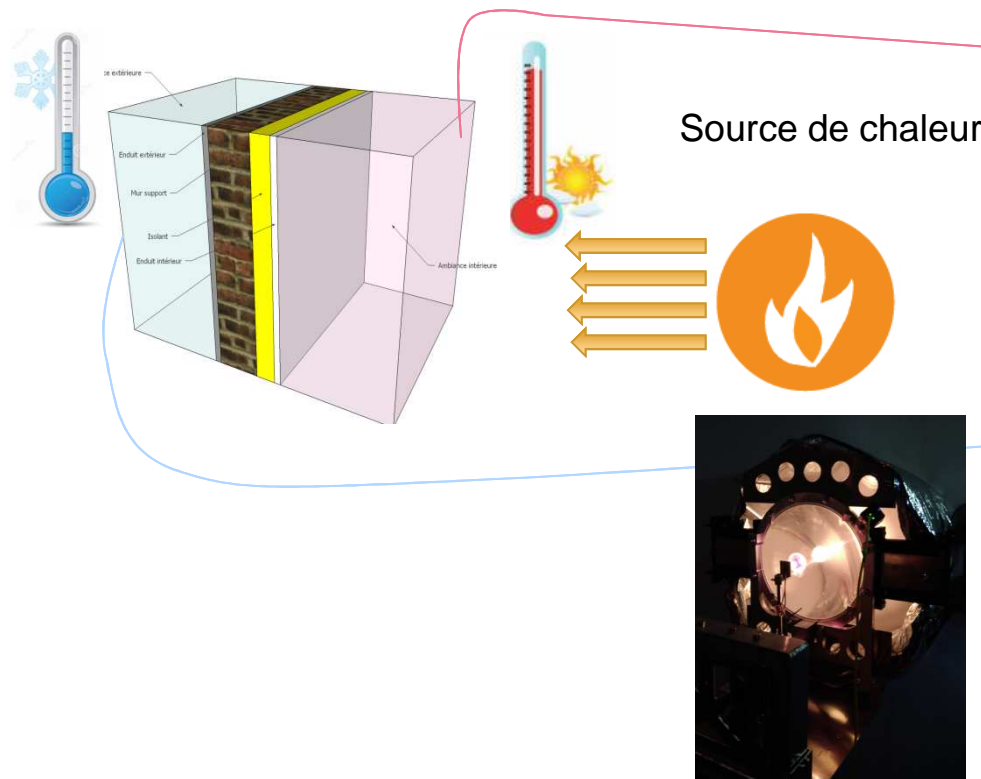
ANR RESBATI (mesure in-situ de RESistance thermique de parois de BATiment) (2016-2020)



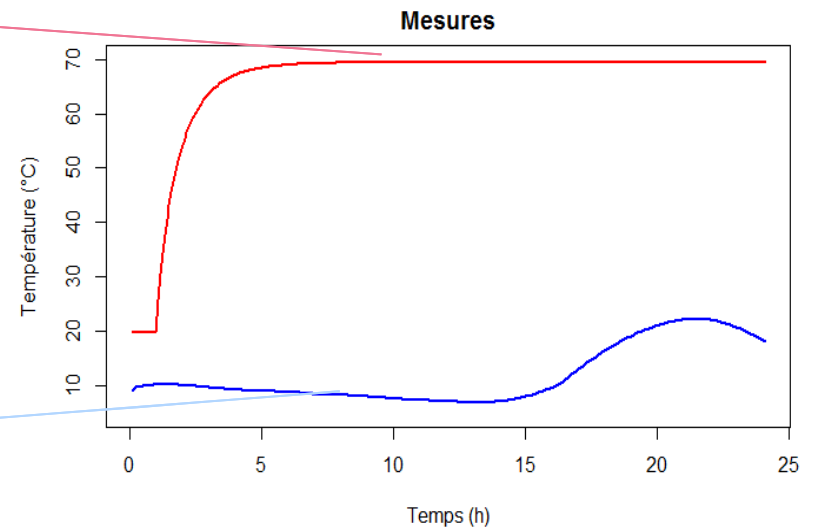
- Développement d'une méthode de mesure in-situ de la résistance thermique d'une paroi et de son incertitude associée

# MESURE DE LA RÉSISTANCE THERMIQUE D'UNE PAROI

## Dispositif expérimental in situ (prototype)



Relevés de température en surface par caméra thermique



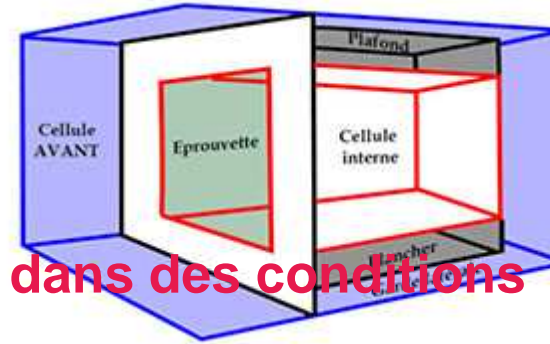
modèle d'inversion

**résistance thermique & incertitude associée**

# MESURES DE REFERENCE DE LA RESISTANCE THERMIQUE

Caractérisation d'un matériau (paroi,...) dans des conditions contrôllées

Boîte chaude gardée (CSTB)

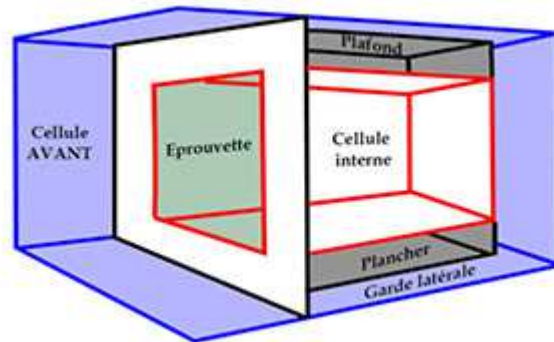


Chambre climatique contrôllée (REBECCA, LNE)



Pour les deux dispositifs : incertitude associée ~ 10%

## BILANS D'INCERTITUDE



### Mesures en chambre climatique

- températures « extérieures » et « intérieures » fixes (et mesurées) et  $\Delta T = T_{ext} - T_{int}$  constant
- températures de surface mesurées par thermocouple
- flux de chaleur mesuré par plaque fluxmétrique et constant (car  $\Delta T$  constant)

**incertitude minimale ~ 10%**

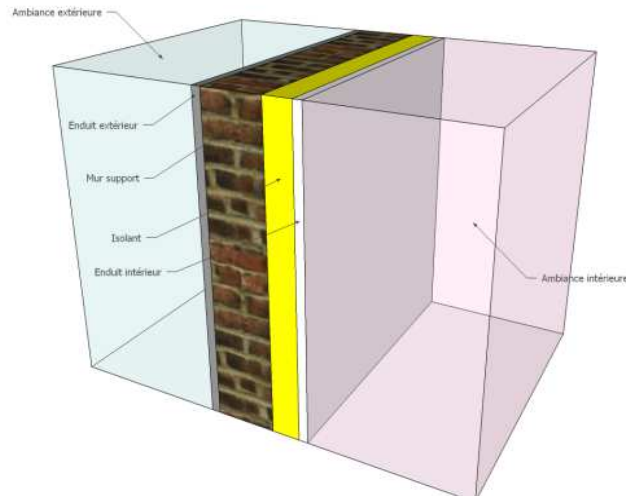
### Mesures In-situ

- températures et flux extérieurs variables
- température de surface mesurée par caméra thermique
- flux intérieur calculé par le prototype

**incertitude réelle >> 10%**

## MESURE DE LA RESISTANCE THERMIQUE D'UNE PAROI)

La résistance thermique ( $R$  en  $m^2K/W$ ) est une mesure indirecte



La résistance thermique d'une paroi  $i$  est la somme des résistances thermiques des couches qui la constituent

$$R = \sum R_i$$

$R_i$  dépend de l'épaisseur  $e_i$  et de la conductivité thermique  $k_i$

$$R_i = \frac{e_i}{k_i}$$



**Le problème revient donc à estimer les  $k_i$  et leurs incertitudes associées**

# MESURE DE LA RESISTANCE THERMIQUE D'UNE PAROI)

## Formulation du problème d'inversion

$cw_i$  : capacité thermique,  $k_i$  : conductivité thermique

paramètres thermiques

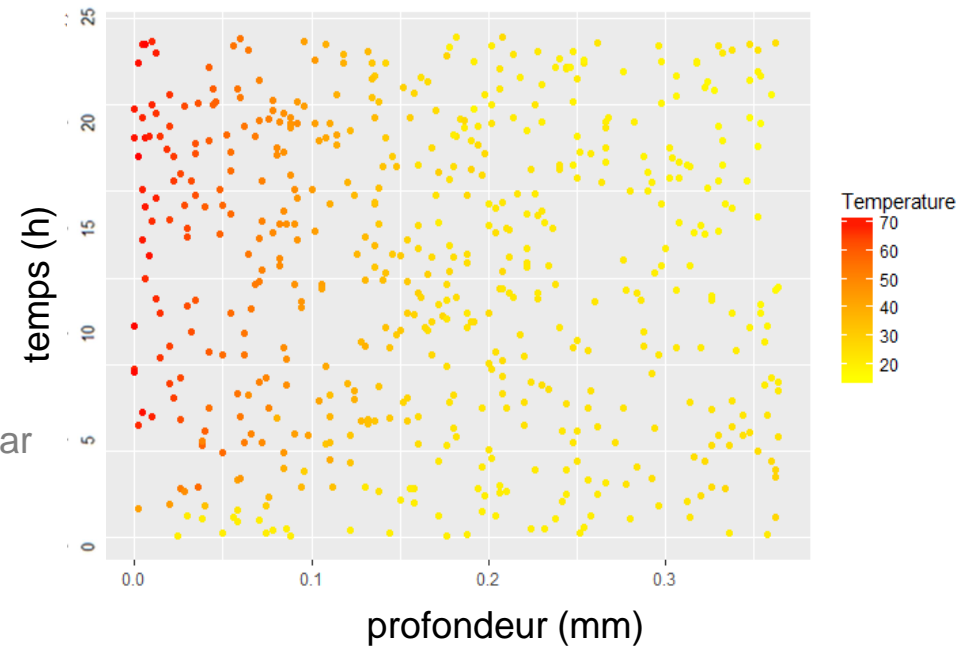
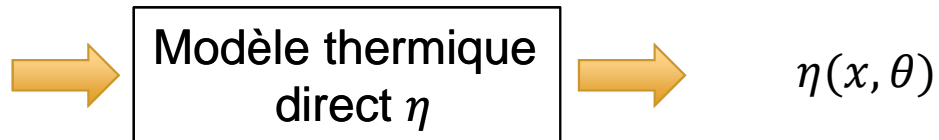
$$\theta = \{k_i, cw_i\}_i$$

variables de contrôle

$$x = (t, d)$$

$t = \text{temps}$

$d = \text{profondeur dans le mur}$



A droite : carte des températures générées par le modèle direct en fonction de  $x = (t, d)$  et  $\theta$  variant dans sa distribution *a priori*



## MODÈLE DES TEMPERATURES MESURÉES

**Hypothèse : le modèle thermique 1D est réaliste** (vrai si on chauffe dans une seule direction)

$$y(x_i) = \eta(x_i, \theta) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

↑                    ↑                    ↑  
Température    Modèle    Erreur de mesure  
                         thermique

N: nombre de pas de temps

### Vraisemblance des mesures intérieures et extérieures

$$l(T_{int}, T_{ext} | \theta, \sigma_{int}, \sigma_{ext}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^N \sigma_{int}^N \sigma_{ext}^N} \exp - \left\{ \frac{1}{2\sigma_{int}^2} \|T_{int} - \eta(d_{int}, \theta)\|_2^2 + \frac{1}{2\sigma_{ext}^2} \|T_{ext} - \eta(d_{ext}, \theta)\|_2^2 \right\}$$

### Distributions *a priori* de $(\theta, \sigma_{int}^2, \sigma_{ext}^2)$

$$\sigma_{int}^2 \sim \text{Inv} - \text{Khi2}(v_0, s_0^2)$$

$\theta \sim \pi_0$  provenant de connaissances sur les matériaux

# INFÉRENCE BAYÉSIENNE

## Algorithme de Metropolis-within-Gibbs

■ initialisation :  $\theta_0, \sigma_0^2$

Pour  $i = 1, \dots, M$

■ tirage de  $\theta_i | \sigma_{i-1}^2, y, \eta(x, \theta_{i-1})$  : étape de Metropolis

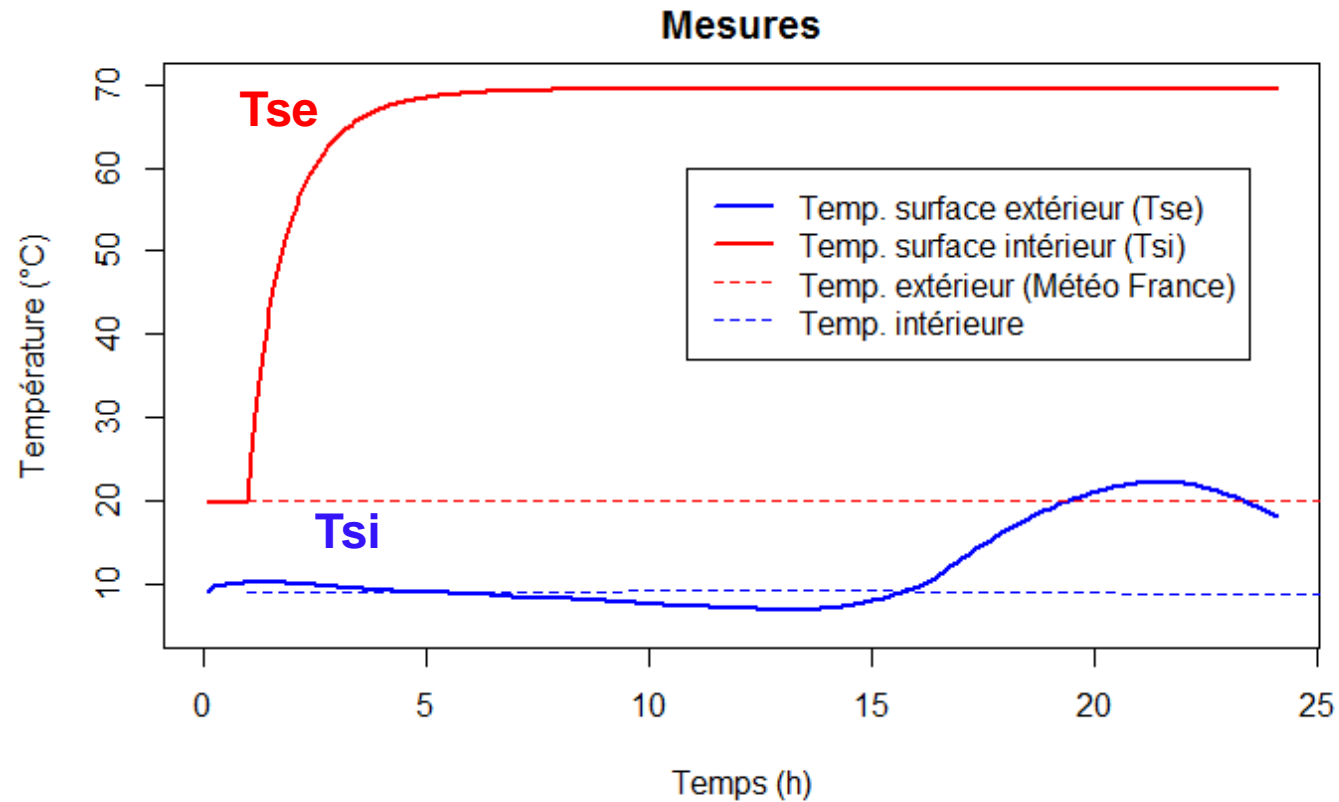
$$\begin{aligned} & \pi(\theta | \sigma_{int}, \sigma_{ext}, y, \eta(x, \theta_{i-1})) \\ & \propto \exp - \left\{ \frac{1}{2\sigma_{i-1,int}^2} \|T_{int} - \eta(d_{int}, \theta_{i-1})\|_2^2 \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{2\sigma_{i-1,ext}^2} \|T_{ext} - \eta(d_{ext}, \theta_{i-1})\|_2^2 \right\} \times \pi(\theta) \end{aligned}$$

■ tirage de  $\sigma_{i,int}^2 | T_{int}, \eta(d_{int}, \theta_i) \sim \text{Inv} - \text{Khi2} \left( \nu_p, \frac{\nu_0 s_0^2 + \|T_{int} - \eta(d_{int}, \theta_i)\|_2^2}{\nu_p} \right)$

■ tirage de  $\sigma_{i,ext}^2 | T_{ext}, \eta(d_{ext}, \theta_i) \sim \text{Inv} - \text{Khi2} \left( \nu_p, \frac{\nu_0 s_0^2 + \|T_{ext} - \eta(d_{ext}, \theta_i)\|_2^2}{\nu_p} \right)$

## DONNÉES SIMULÉES

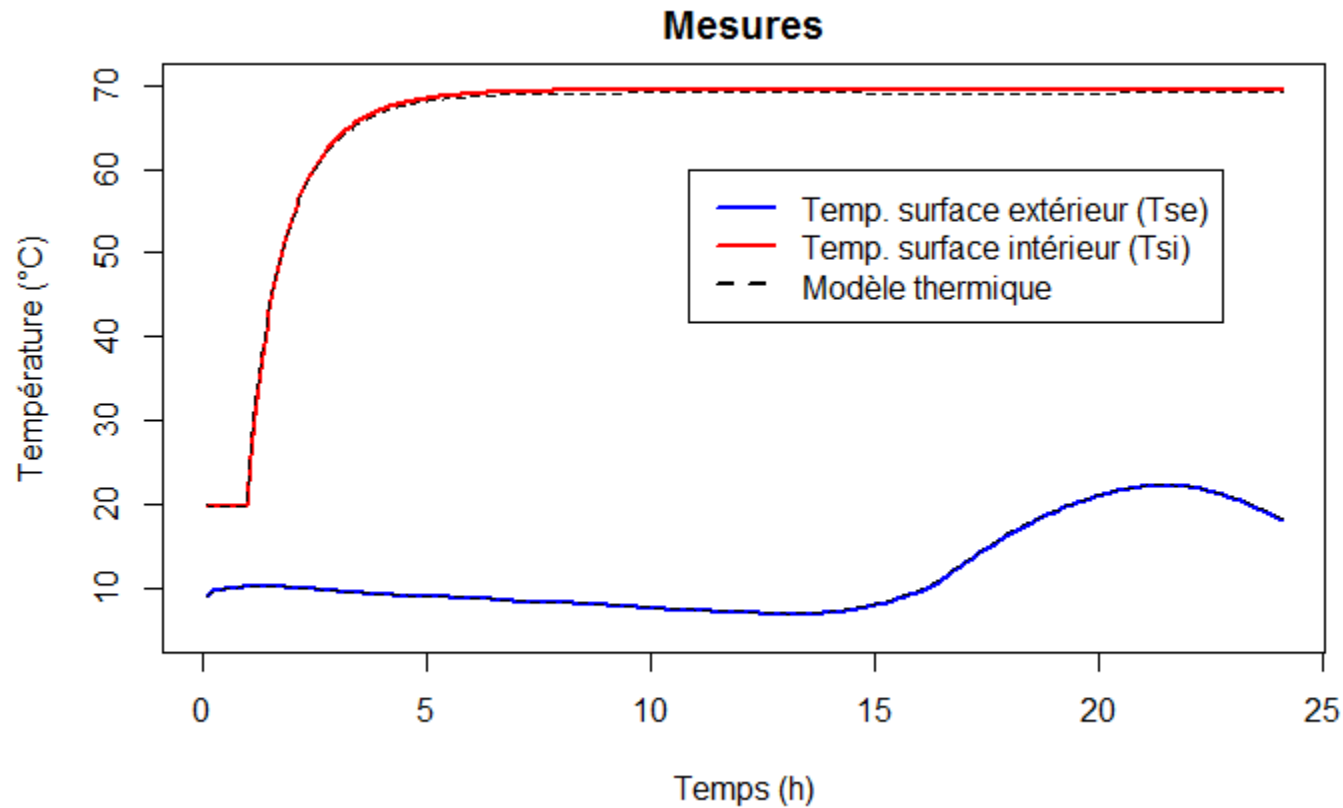
Etude préalable sur données simulées (pas d'erreur de mesure pour Tse et Tsi) – Simulation avec modèle 3D dans COMSOL



## DONNÉES SIMULÉES

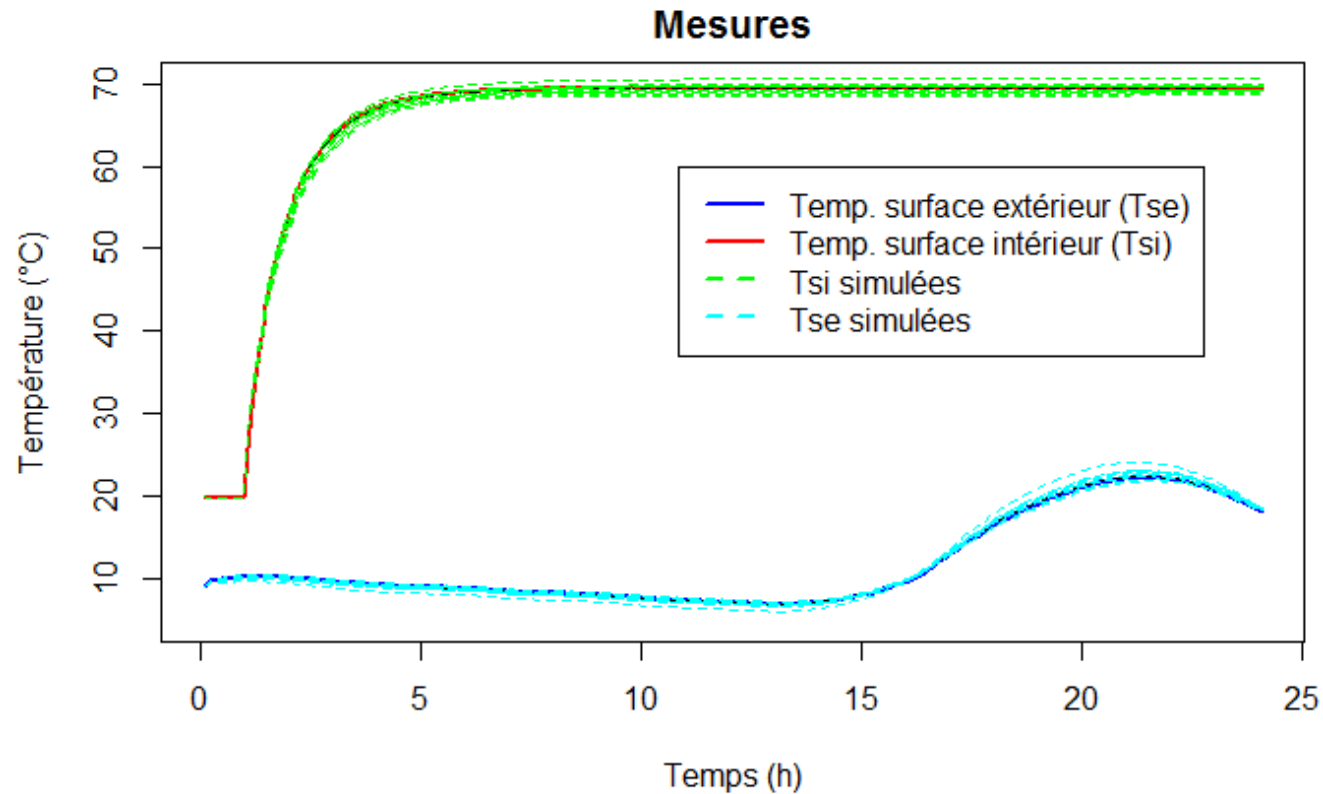
Etude du biais entre mesures (modèle 3D) et modèle thermique 1D:

$$\eta(x, \theta = \theta_{vrai})$$



## DONNÉES SIMULÉES

Etude du biais entre mesures (modèle 3D) et modèle thermique 1D:  
 $\eta(x, \theta = \theta_{vrai})$



## REMARQUES DE MODÉLISATION

Données simulées  
sans erreur de  
mesure

$$y(x_i) = \eta(x_i, \theta) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, N$$

↑ Modèle 3D   
 ↑ Modèle 1D   
 ↖ Erreur de mesure  
   
    
 ↖ **Biais (erreur de modèle)**

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$$

$N$ : nombre de pas de temps

Vraisemblance

$$l(T_{int}, T_{ext} | \theta, \sigma_{int}, \sigma_{ext}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^N \sigma_{int}^N \sigma_{ext}^N} \exp - \left\{ \frac{1}{2\sigma_{int}^2} \|T_{int} - \eta(d_{int}, \theta)\|_2^2 + \frac{1}{2\sigma_{ext}^2} \|T_{ext} - \eta(d_{ext}, \theta)\|_2^2 \right\}$$

Vraisemblance utilisée dans l'algorithme (calcul du ratio) avec tuning parameter  $\tau = 5$

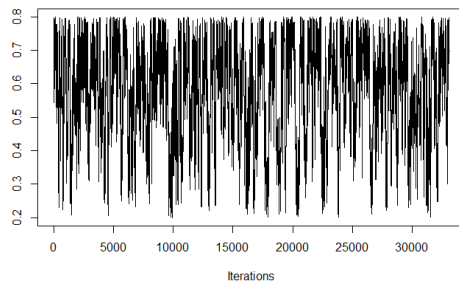
$$l(T_{int}, T_{ext} | \theta, \sigma_{int}, \sigma_{ext}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^N (\sigma_{int}^2 + \tau^2)^{N/2} (\sigma_{ext}^2 + \tau^2)^{N/2}} \exp - \left\{ \frac{1}{2(\sigma_{int}^2 + \tau^2)} \|T_{int} - \eta(d_{int}, \theta)\|_2^2 + \frac{1}{2(\sigma_{ext}^2 + \tau^2)} \|T_{ext} - \eta(d_{ext}, \theta)\|_2^2 \right\}$$

# RÉSULTATS

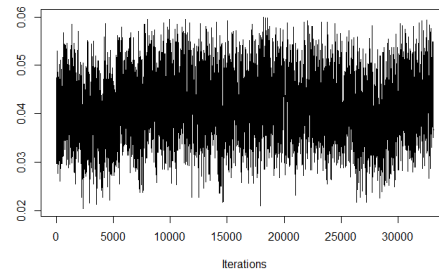
## Paramètres à calibrer (pour la résistance thermique)

### Traces

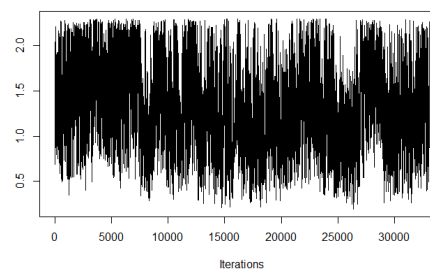
K1



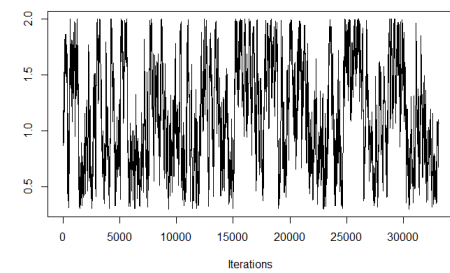
K2



K3

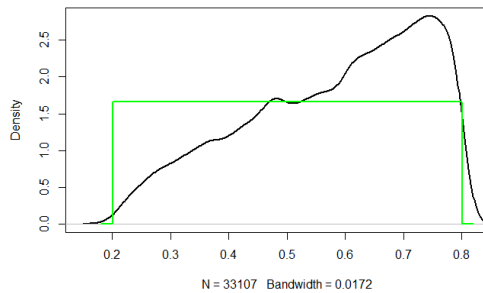


K4

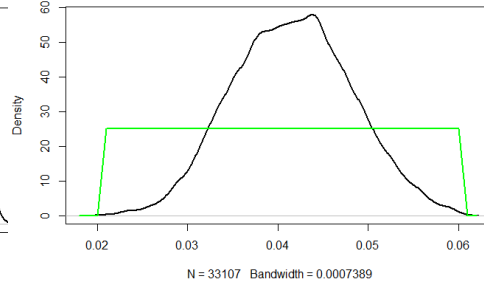


### Distribution *a posteriori* vs *a priori* des paramètres à calibrer

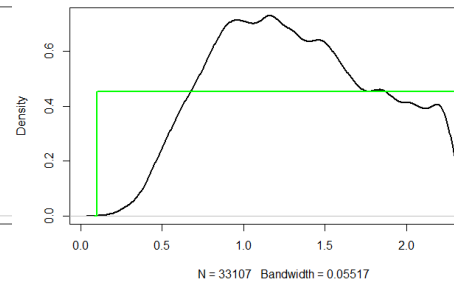
K1



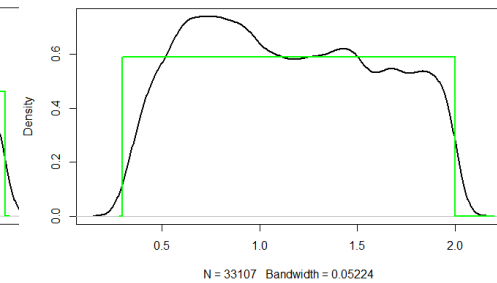
K2



K3



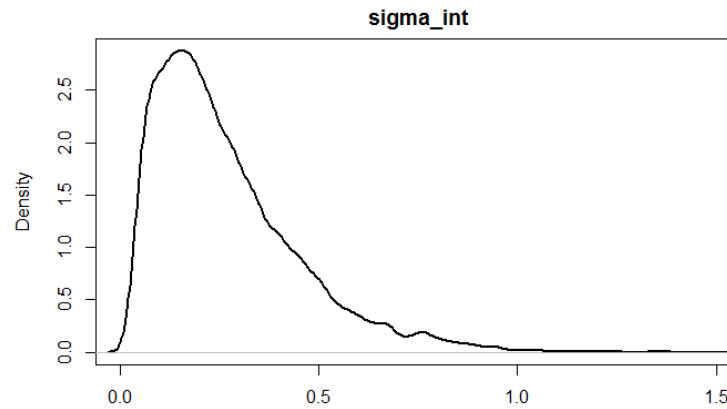
K4



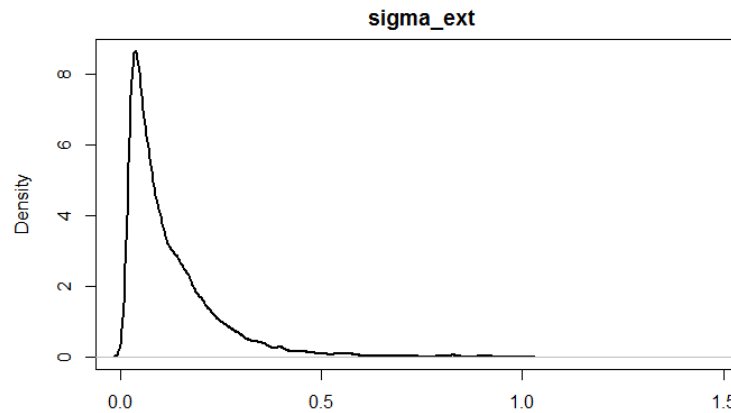
# RÉSULTATS

## Paramètres de variance

Distribution *a posteriori*



Biais des mesures  
intérieures



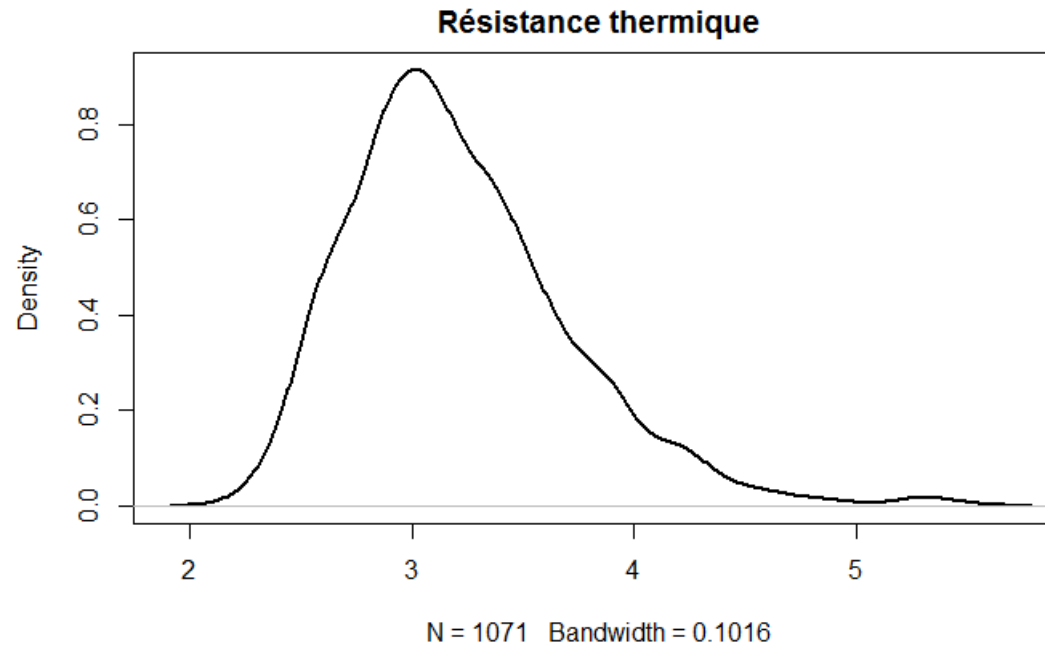
Biais des mesures  
extérieures

N = 33107 Bandwidth = 0.009732



## RÉSULTATS

Distribution *a posteriori* de la résistance thermique  $R$  théorique = 3.235 m<sup>2</sup>.K/W



$R=3.21\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$

$u(R)=0.50 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$  (soit 15%)

L'erreur de modèle en utilisant un modèle 1D engendre 15% d'incertitude sur l'estimation de la résistance thermique.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- ❑ Travaux en cours (dispositifs expérimentaux et méthodologie statistique) sur l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments (inoccupés).
- **fiabiliser la mesure de performance par le calcul de l'incertitude associée**
- ❑ Illustration sur le calcul de la résistance thermique d'une paroi comme mesure de l'isolation thermique.
- ❑ En général, le paramètre d'intérêt est estimé par inversion sur la base de mesures physiques.
- ❑ L'intérêt de l'approche bayésienne est de permettre l'estimation de la distribution du paramètre d'intérêt.
- ❑ Jusqu'à présent, l'approche a été basée sur des données simulées.

### ■ Perspectives

ResBATi: Intégration des sources d'incertitudes dans le modèle d'inversion (capteurs, ...)

Optimisation de bâtiments en exploitation

## SUIVI EN EXPLOITATION DES BÂTIMENTS

**A venir : Collaboration avec le Pôle Data Science de CentraleSupélec**

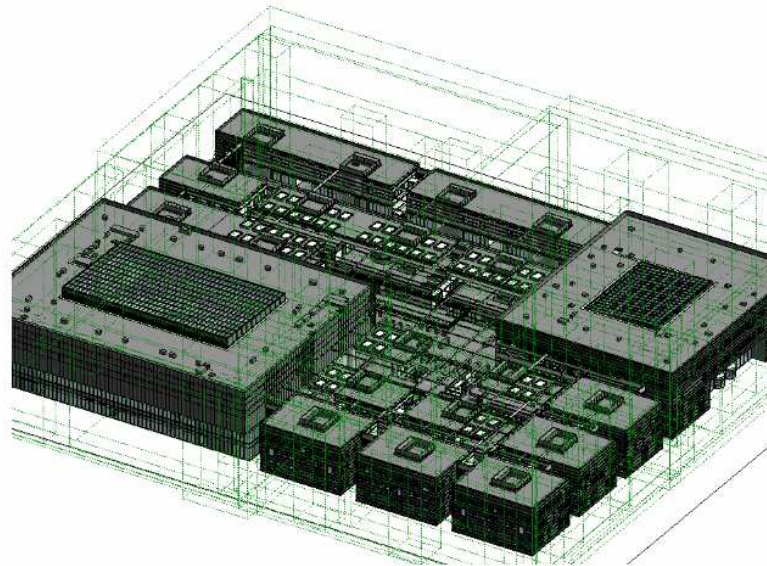


Développer un système de monitoring du  
comportement énergétique du bâtiment Eiffel

Séverine Démeyer, Pierre Jéhel et Emmanuel Vazquez

## A VENIR : COLLABORATION AVEC LE PÔLE DATA SCIENCE DE CENTRALESUPÉLEC

Suivi en exploitation des bâtiments → optimisation du pilotage



Enjeux

- Le bâtiment Eiffel de CentraleSupélec est équipé d'environ 9000 capteurs qui mesurent en permanence son état d'un point de vue énergétique
- Nous voulons créer un dispositif de monitoring du bâtiment à l'usage du public (installation d'un écran dans la Diagonale) et pour un pilotage optimisé des systèmes de régulation

Merci de votre attention