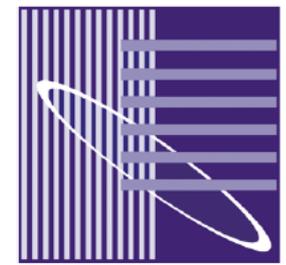


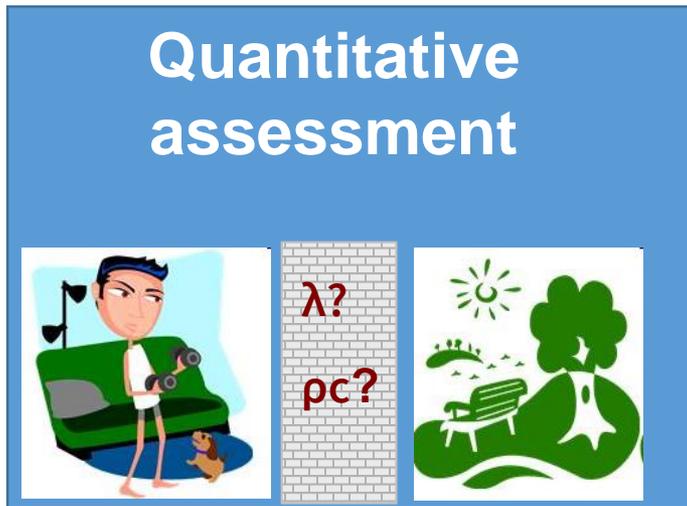
Identification in-situ de la performance thermique de la paroi d'un bâtiment

S. Guernouti, A. Rodler

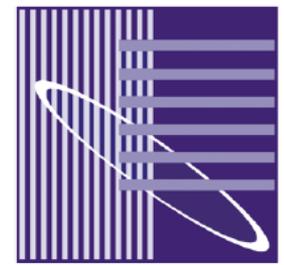
23 Mai 2019



1. Contexte

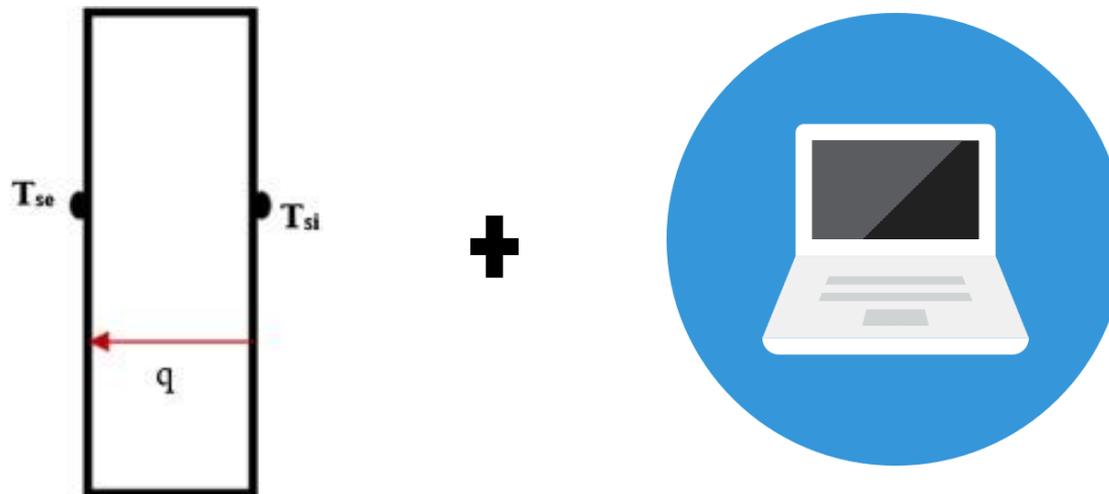


- **Built2Spec** (H2020 – 2015-2018).
- **Incertitudes** liées aux **propriétés thermiques** des matériaux: peuvent provenir d'un manque de caractérisation ou d'un changement de matériau entre les phases de conception et de construction.
- **Diagnostic thermique non destructif** pour l'identification et la quantification des défauts et la vérification des performances de construction.
- **Caractérisation in-situ**: les conditions climatiques ne peuvent être contrôlées et les mesures doivent être non intrusives.

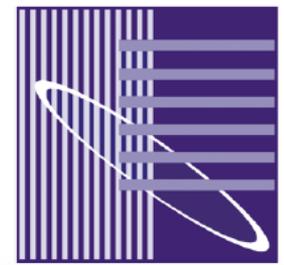


2. Objectif

- Comparer différentes méthodes d'identification existantes.
- Transférer une méthode « clé en main » vers les professionnels.



Rodler A, Guernouti S, Musy M. Bayesian inference method for in situ thermal conductivity and heat capacity identification: Comparison to ISO standard. Construction and Building Materials. 30 janv 2019;196:574-93



3. Méthodes : ISO 9869-1 average

Données d'entrée : q ; T_{si} ; T_{se}

Donnée de sortie : Valeur de U

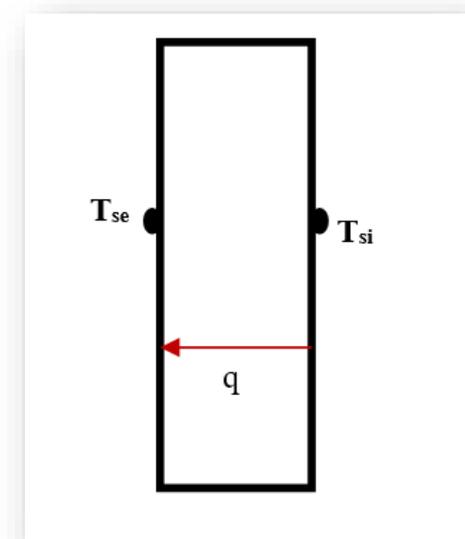
$$U_{value} = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\sum_{i=1}^N (T_{sint}^i - T_{sext}^i)}$$

Hypothèses

- La paroi testée est composée de couches homogènes.
- Le flux thermique mesuré est considéré unidimensionnel.

Précautions

- Le fluxmètre ne doit pas être installé à proximité d'un pont thermique ni d'une source de chaleur, de climatisation ou de ventilation
- La surface extérieure doit être protégée du rayonnement solaire direct et/ou de la pluie.
- Le capteur de température surfacique intérieur doit être placé à proximité du fluxmètre.

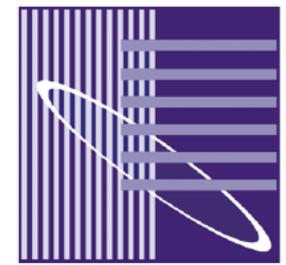


Durée du test

72h si T° stable autour du fluxmètre sinon 7 jours

Gradient de température

$\Delta T = 5 - 10^\circ \text{C}$



3. Méthodes : ISO 9869-1 dynamic

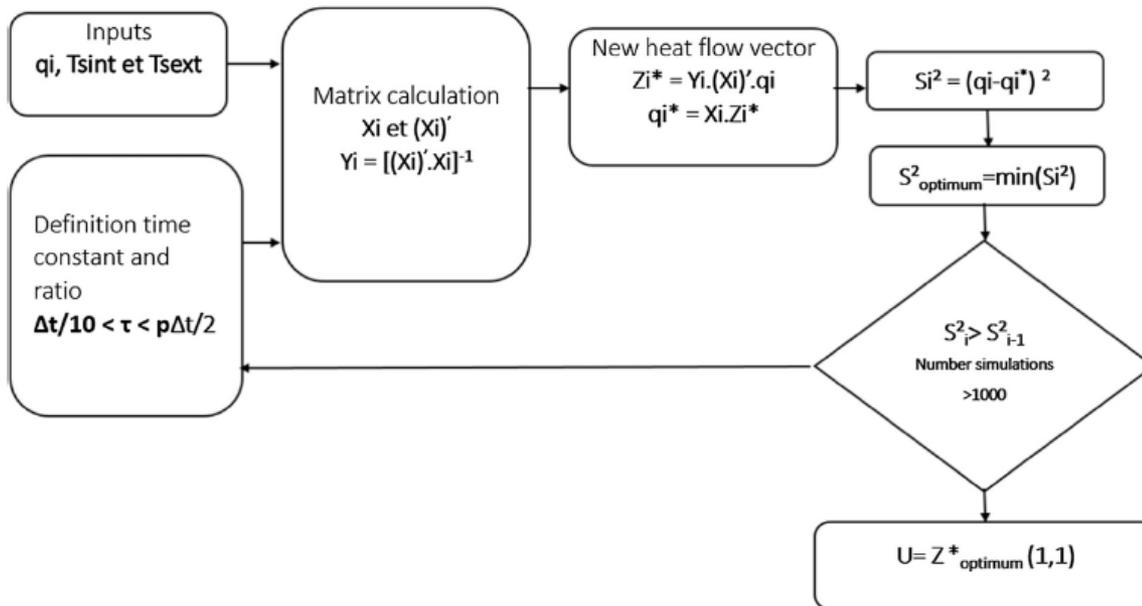
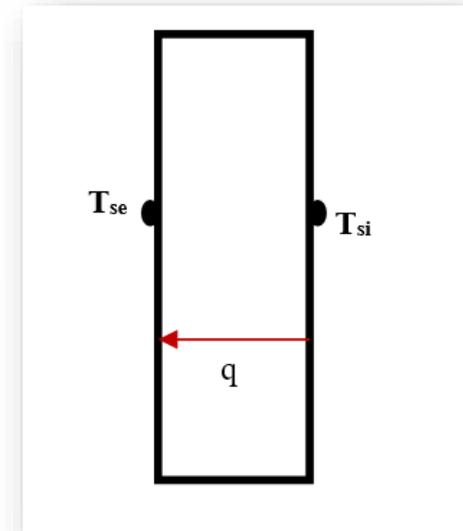
Données d'entrée : q ; T_{si} ; T_{se}
Donnée de sortie : Valeur de U

$$q_i = U(T_{sint} - T_{sext}) + K_1 \dot{T}_{sint} - K_2 \dot{T}_{sext} + \sum_n P_n$$

$$\sum_{j=i}^{i-1} T_{sint} i j (1 - \beta_n) \beta_n (i - j) + \sum_n Q_n$$

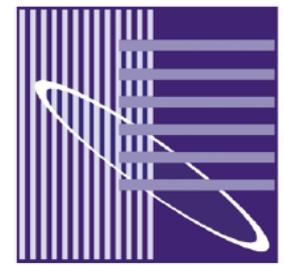
$$\sum_{j=i-p}^{i-1} T_{sext} j (1 - \beta_n) \beta_n (i - j)$$

Mêmes hypothèses et précautions.



Durée du test
 72h si T° stable autour du fluxmètre sinon 7 jours

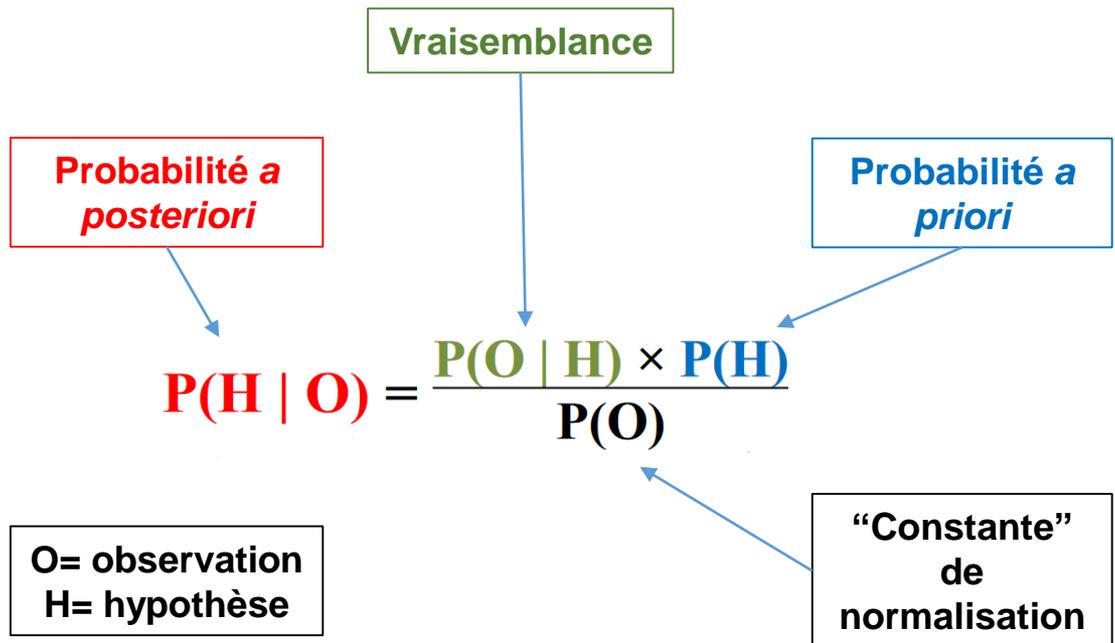
Gradient de température
 $\Delta T = 5 - 10^\circ C$

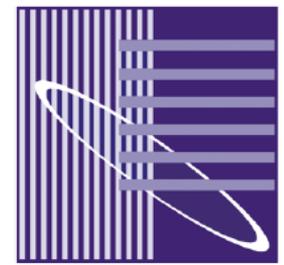


3. Méthodes : Approche Bayésienne

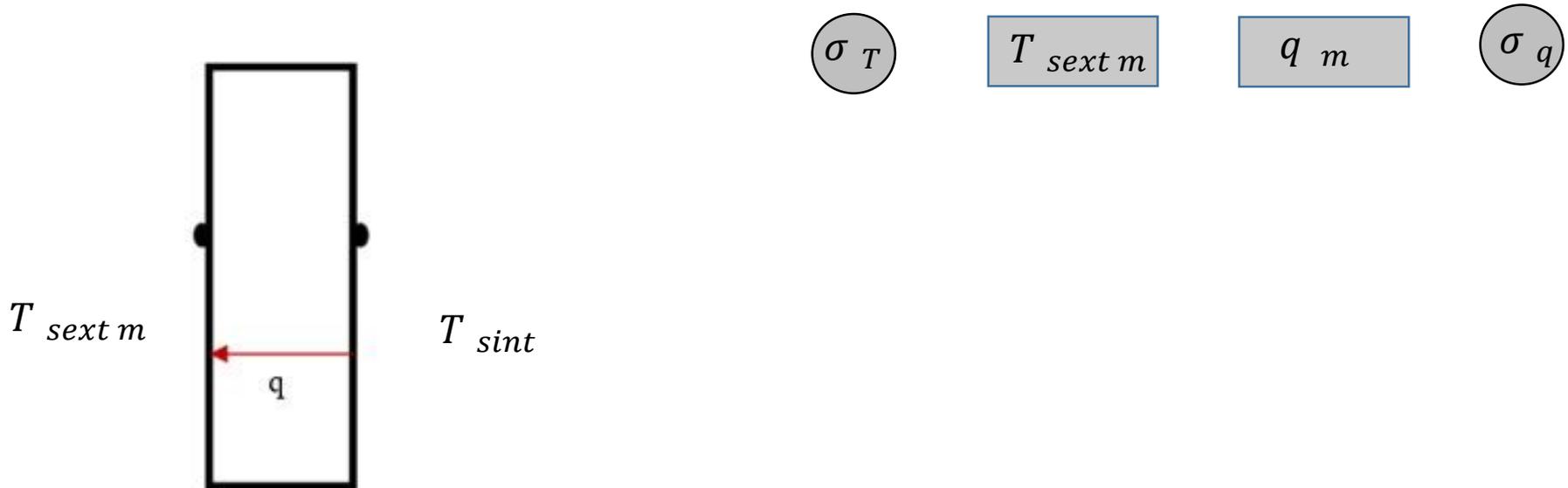
Le **théorème de Bayes** vise à calculer les probabilités a posteriori d'un événement en fonction des probabilités a priori de cet événement.

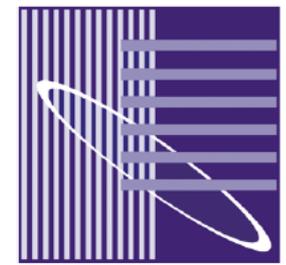
A priori et a posteriori s'entendent par rapport à la connaissance d'une information.



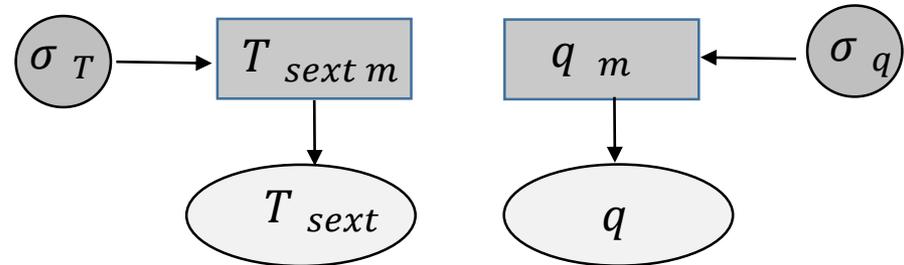
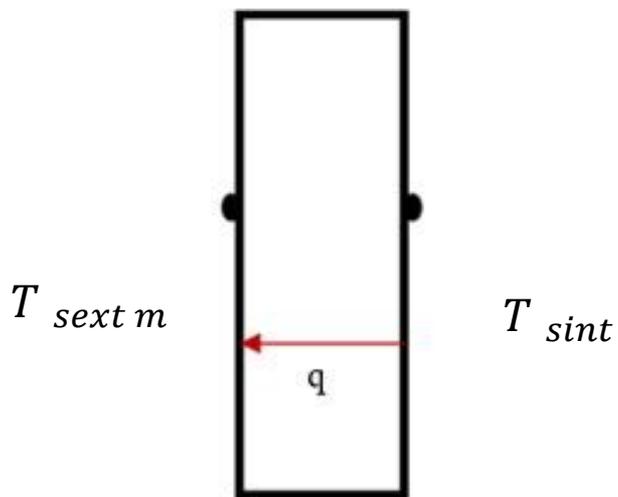


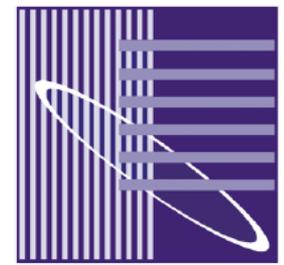
3. Méthodes : Approche Bayésienne





3. Méthodes : Approche Bayésienne





3. Méthodes : Approche Bayésienne

Problème de diffusion de chaleur 1D

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \text{ in } x \in \Omega[0, L], t \in [0, n]$$

$$T(x, t) = T_s, \text{ on } \Gamma_g, t \in [0, n]$$

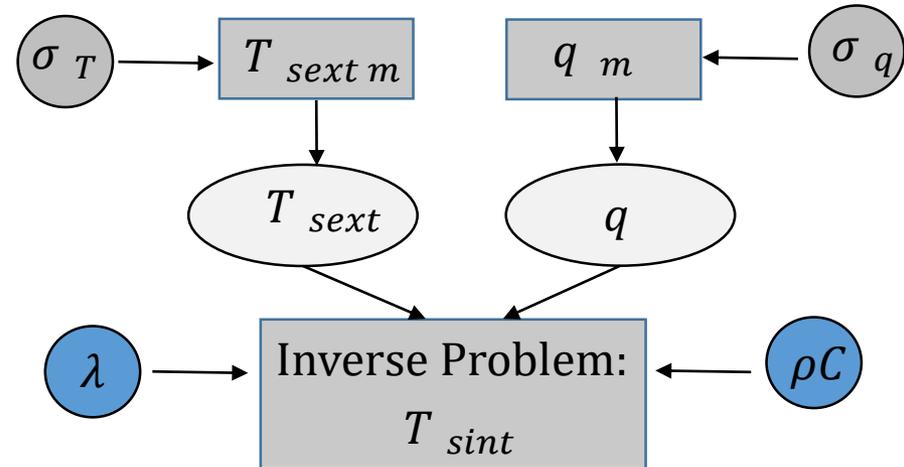
$$k \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = q, \text{ on } \Gamma_d, t \in [0, n]$$

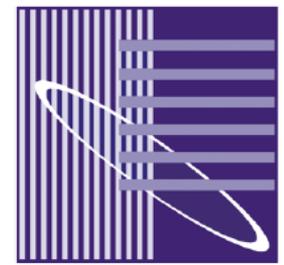
$$T(x, 0) = T_0, \text{ in } \Omega \in [0, L]$$

Deux distributions *a priori* testées :

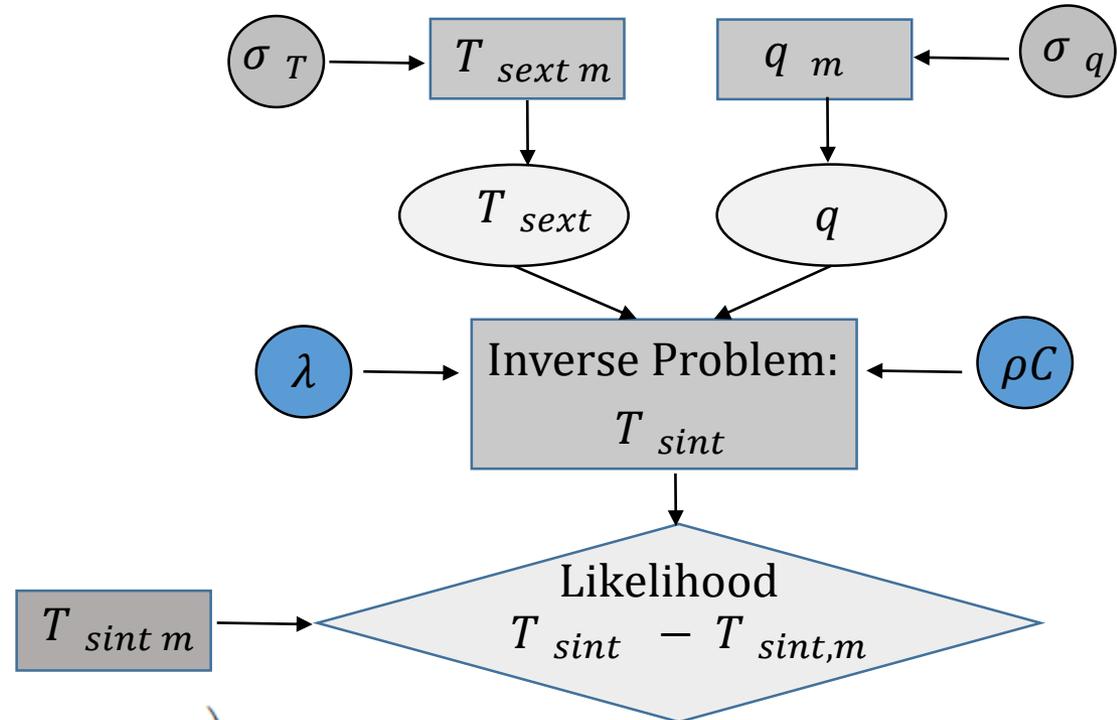
$$P(\lambda) = \frac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \text{ for } \lambda \in [\lambda_{\min}, \lambda_{\max}], \text{ Else } P(\lambda) = 0$$

$$P(\lambda) = \sqrt{\frac{1}{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\lambda - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

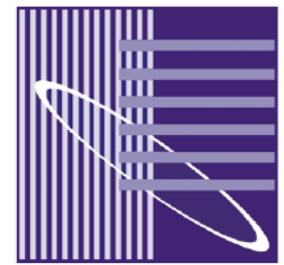




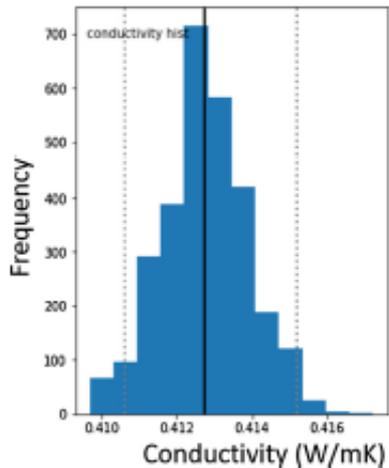
3. Méthodes : Approche Bayésienne



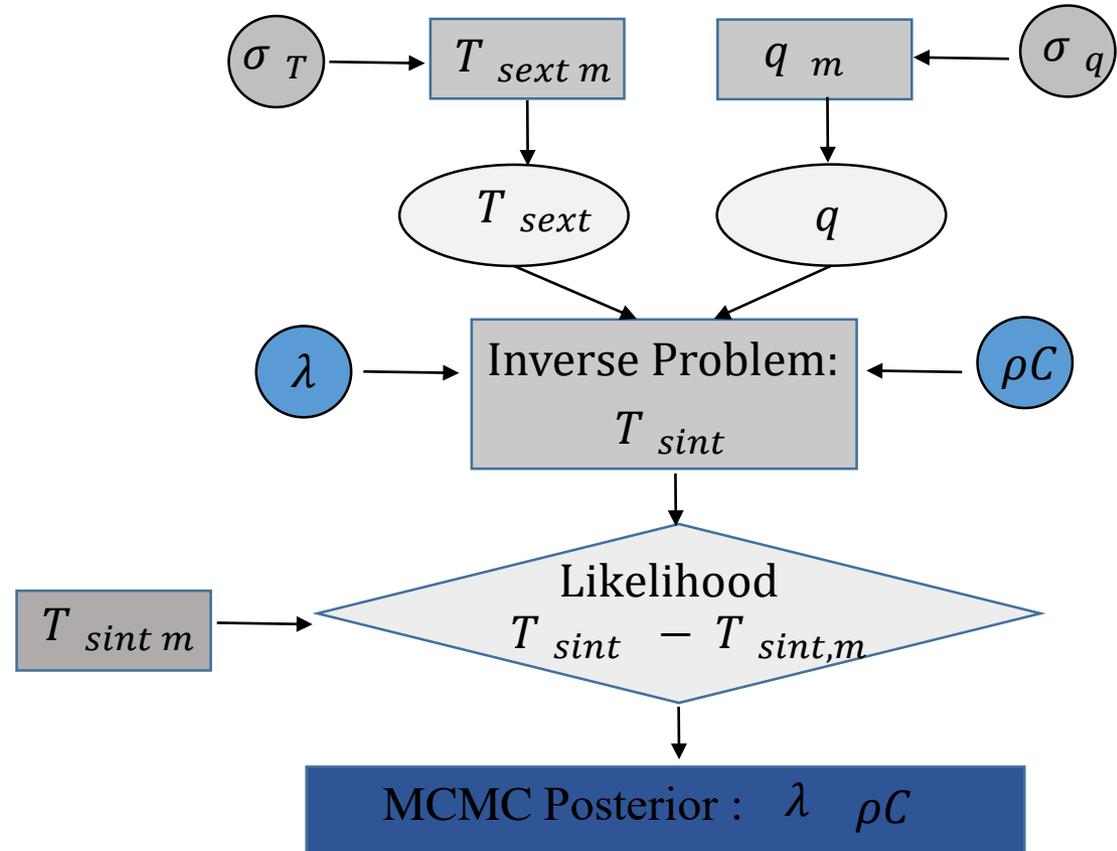
$$P(T_{mes}|\theta) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma^2)^n}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{t=1}^n (T_{sint}(t) - T_{mod}(\theta)(t))^2\right)$$

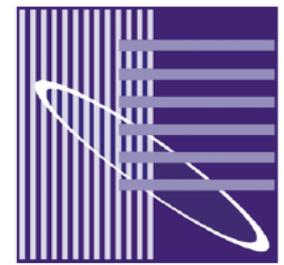


3. Méthodes : Approche Bayésienne



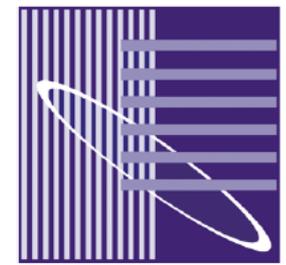
$$P(\theta|x) = \frac{1}{C_{st}} P(x|\theta)P(\theta)$$





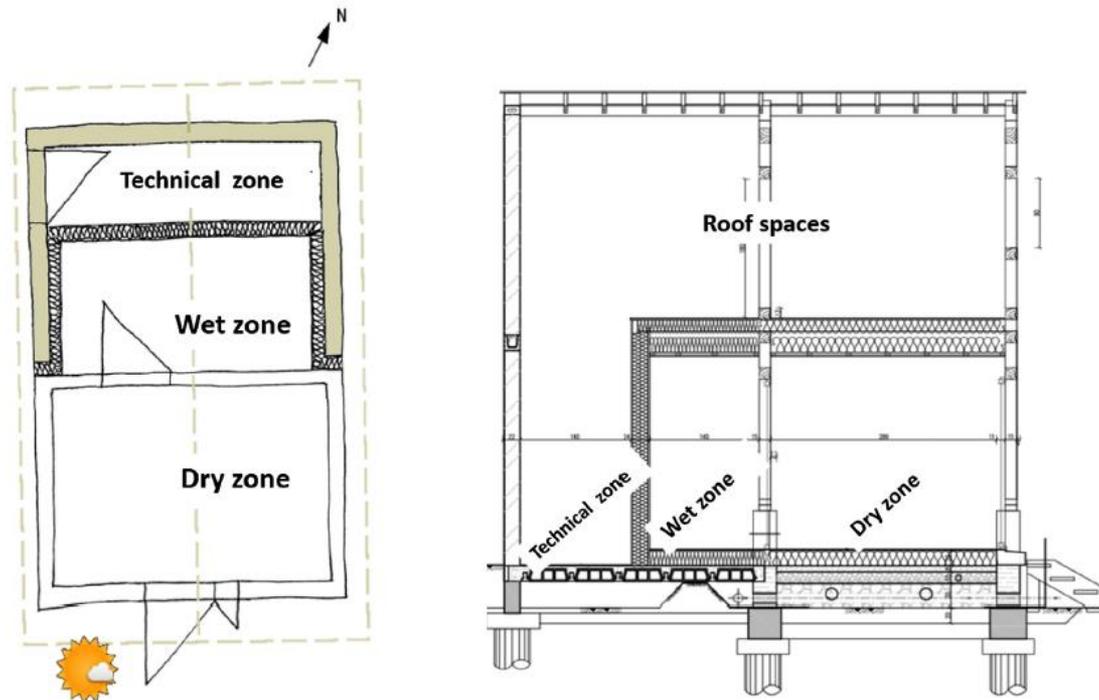
3. Méthodologie

- Durée minimale de mesure (L'ISO fixe trois jours).
- **Impact de la réduction de la durée de mesure** sur la précision des résultats et recherche de la durée optimale de mesures pour trouver des résultats satisfaisants.
- **Impact du gradient de température** et ainsi que de la disponibilité des données sur la précision de la conductivité et de la capacité estimées.



4. Mesures

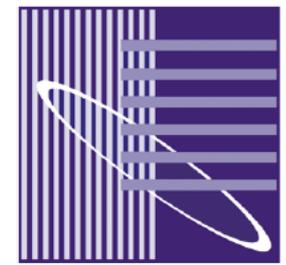
HAMEx Reno (Heat Air and moisture Experiment for Renovation).



4. Mesures

HAMEx Reno (Heat Air and moisture Experiment for Renovation).

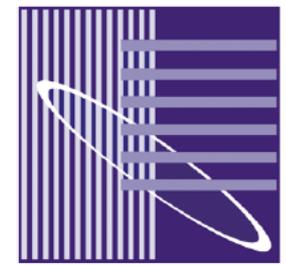




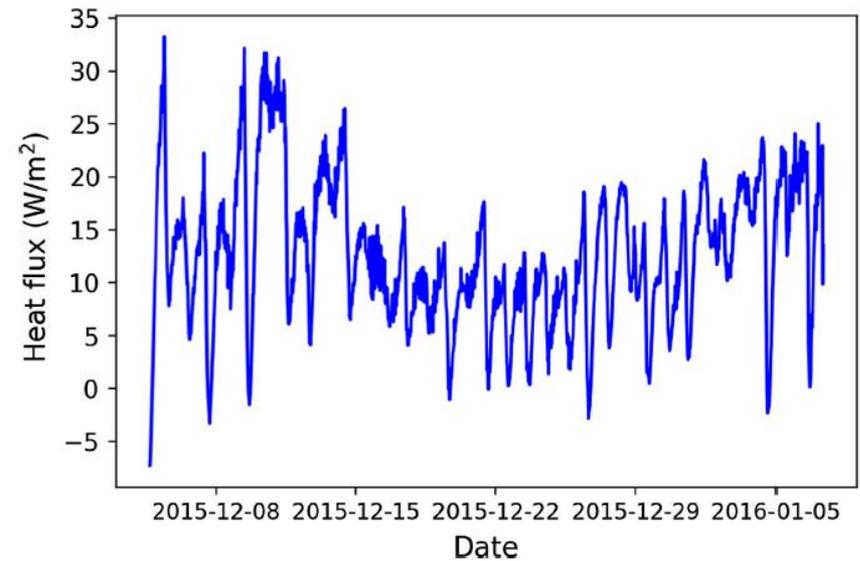
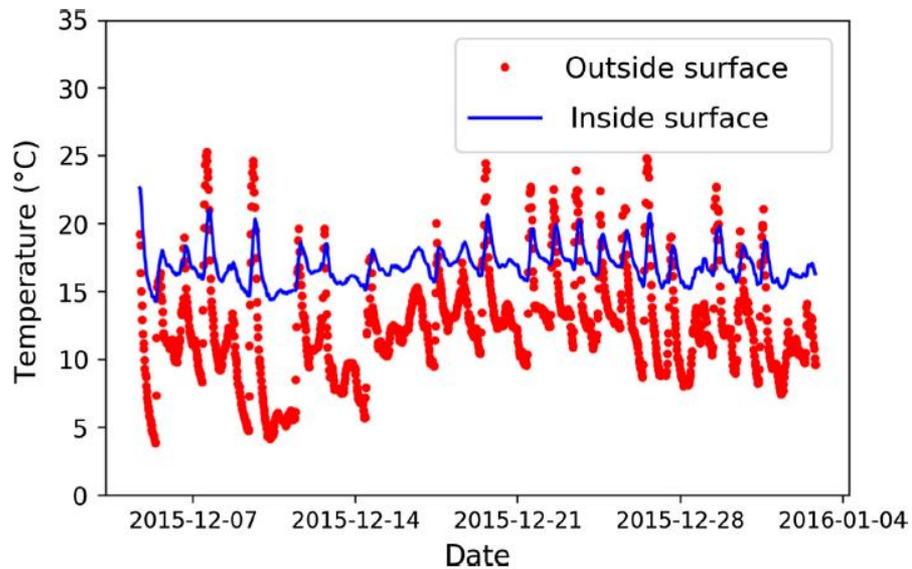
4. Mesures

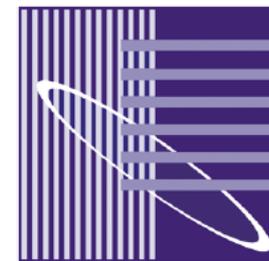


- Conductivité équivalente: 0.44 W/M.K
- Capacité thermique équivalente: 8.69e5 J/kg.K
- 15 mailles equidistantes



4. Mesures

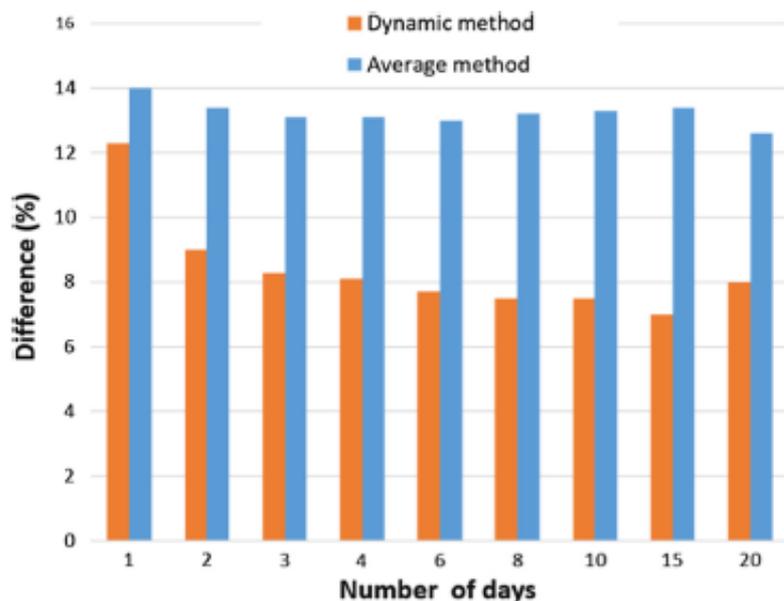




5. Résultats

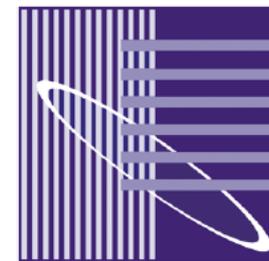
Durée minimale de mesure?

Conductivité thermique



Average method on 1 day: 14 %
Average method on 2-3 days: 13 %

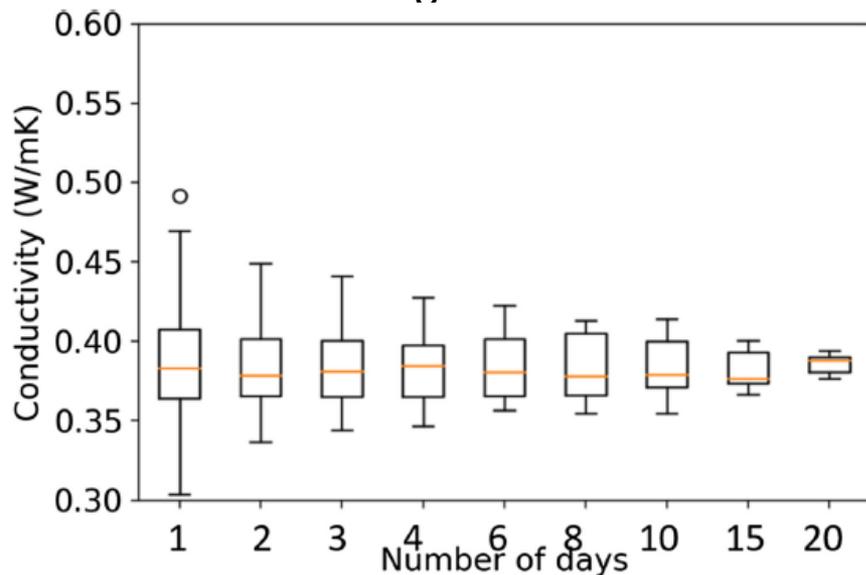
Dynamic method on 1 day: 12,3 %
Dynamic method on 2-3 days: 8 %



5. Résultats

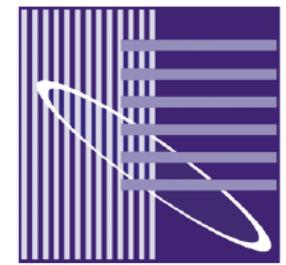
Durée minimale de mesure?

Average method



Average method on 1 day: 14 %
 Average method on 2-3 days: 13 %

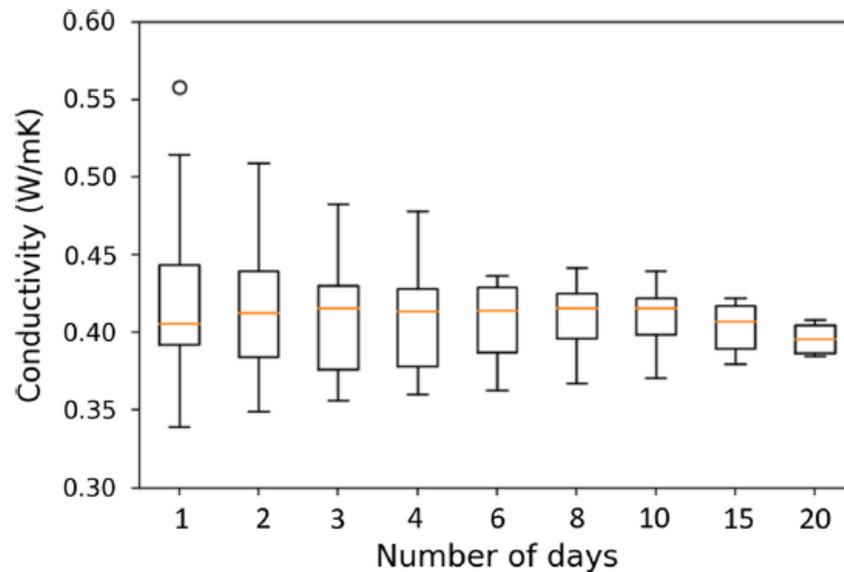
Dynamic method on 1 day: 12,3 %
 Dynamic method on 2-3 days: 8 %



5. Résultats

Durée minimale de mesure?

Dynamic method

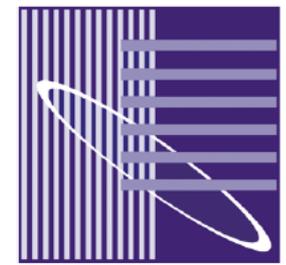


Average method on 1 day: 14 %

Average method on 2-3 days: 13 %

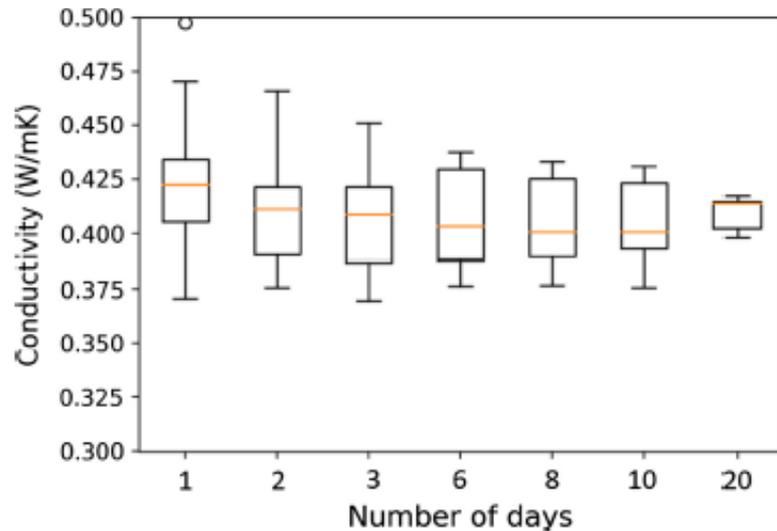
Dynamic method on 1 day: 12,3 %

Dynamic method on 2-3 days: 8 %



5. Résultats

Durée minimale de mesure?



Average method on 1 day: 14 %

Average method on 2-3 days: **13 %**

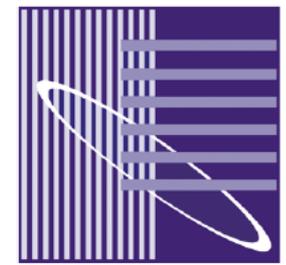
Dynamic method on 1 day: 12,3 %

Dynamic method on 2-3 days: **8 %**

Bayesian method on 1 day: 8,3 %

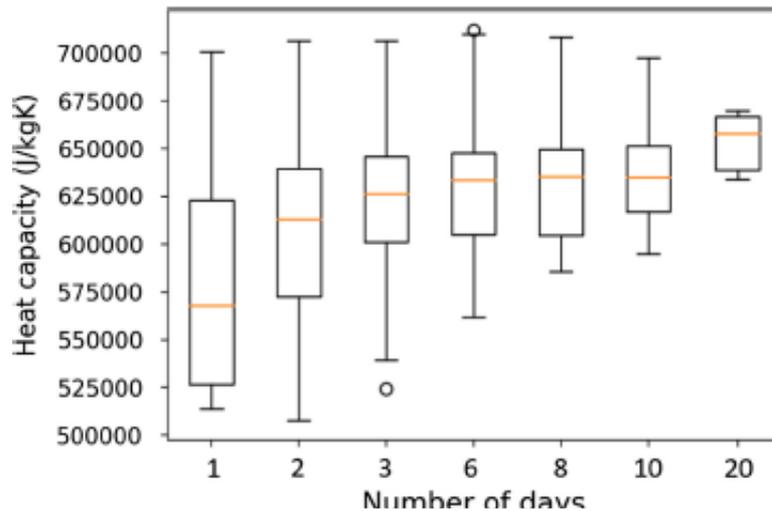
Bayesian method on **2-3 days: 6,1-6,9 %**

		1	2	3	6	8	10	20
Mean value	λ	0.4035	0.4199	0.4096	0.4105	0.4072	0.4053	0.4039
	ρc	639171	580517	654021	606725	621069	633374	636933
Relative Difference (%)	λ	8.3	6.1	6.9	6.7	7.4	7.8	8.2
	ρc	26.4	33	24.7	30.1	28.5	27.1	26.7



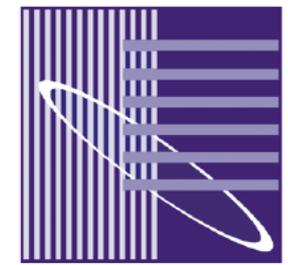
5. Résultats

Durée minimale de mesure?



Bayesian method on 1 day: 26,4 %
 Bayesian method on 2-3 days: 24 %

		1	2	3	6	8	10	20
Mean value	λ	0.4035	0.4199	0.4096	0.4105	0.4072	0.4053	0.4039
	ρc	639171	580517	654021	606725	621069	633374	636933
Relative Difference (%)	λ	8.3	6.1	6.9	6.7	7.4	7.8	8.2
	ρc	26.4	33	24.7	30.1	28.5	27.1	26.7

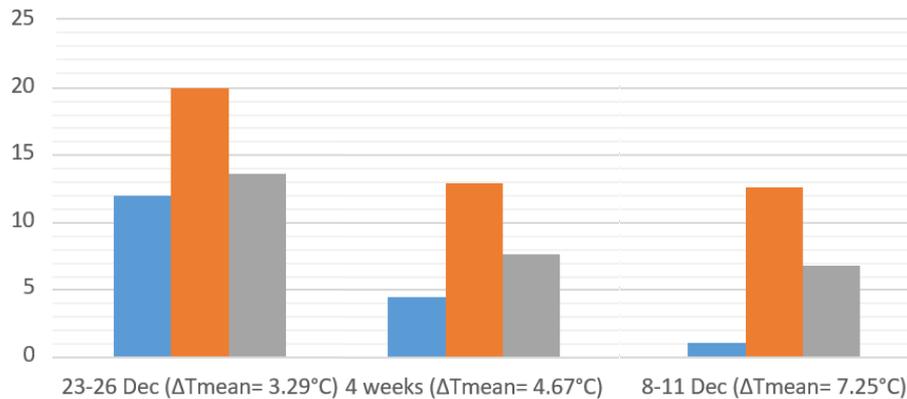


5. Résultats

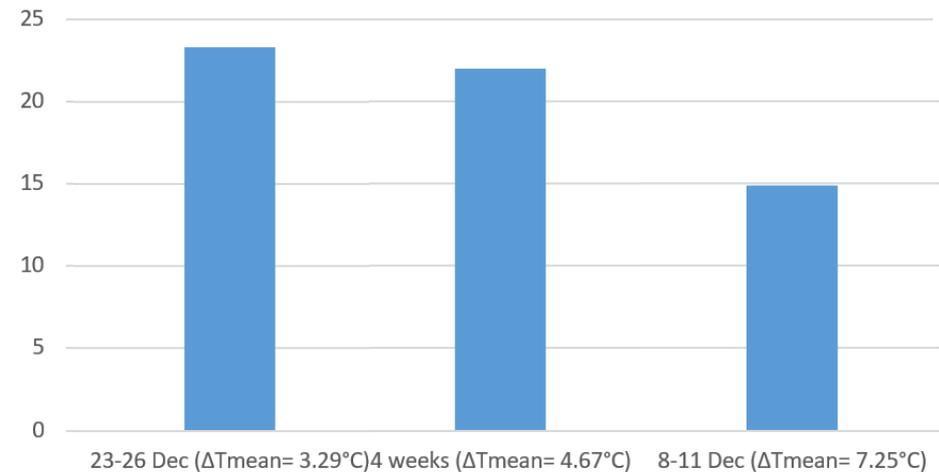
Gradient de température?

Thermal conductivity (Difference %)

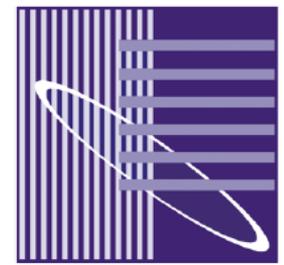
■ Bayesian ■ ISO Average ■ ISO Dynamic



Bayesian (Heat capacity difference %)

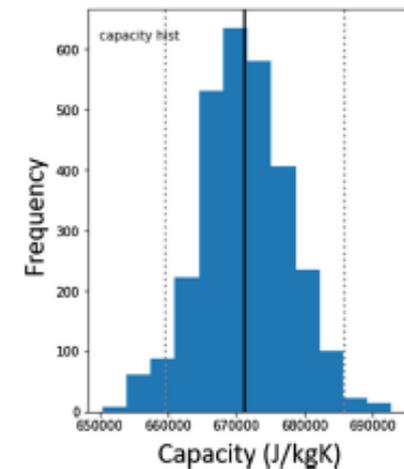
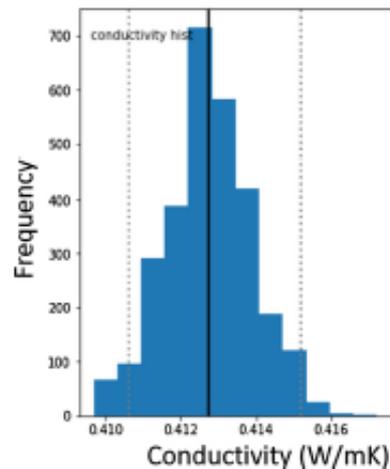


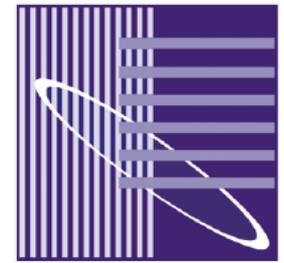
Plus le gradient de température est grand, meilleure est la précision des paramètres recherchés.



6. Conclusions

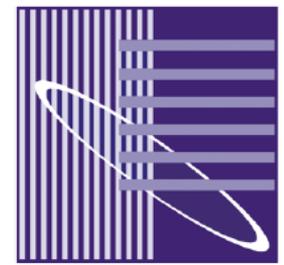
- Les méthodes ISO moyenne et dynamique ne fournissent pas un cadre statistique qui tienne compte de l'incertitude des propriétés thermiques ou des erreurs dans les mesures contrairement à l'approche Bayésienne.





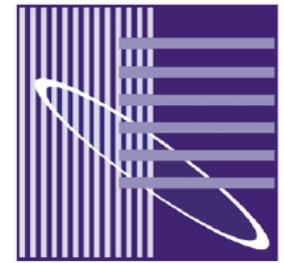
6. Conclusions

- Les méthodes ISO moyenne et dynamique ne fournissent pas un cadre statistique qui tienne compte de l'incertitude des propriétés thermiques ou des erreurs dans les mesures.
- Plus le gradient de température est grand, meilleure est la précision des paramètres recherchés.



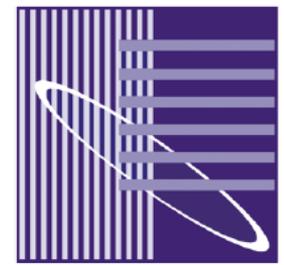
6. Conclusions

- Les méthodes ISO moyenne et dynamique ne fournissent pas un cadre statistique qui tienne compte de l'incertitude des propriétés thermiques ou des erreurs dans les mesures.
- Plus le gradient de température est grand, meilleure est la précision des paramètres recherchés.
- Le nombre de jours de mesures utilisé en entrée du modèle a eu une influence, mais a été moins déterminant que le gradient de température :
 - 3 jours pour ISO
 - 2 pour le bayésien



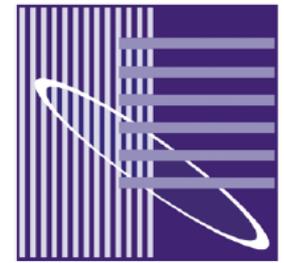
6. Conclusions

- Les méthodes ISO moyenne et dynamique ne fournissent pas un cadre statistique qui tienne compte de l'incertitude des propriétés thermiques ou des erreurs dans les mesures.
- Plus le gradient de température est grand, meilleure est la précision des paramètres recherchés.
- Le nombre de jours de mesures utilisé en entrée du modèle a eu une influence, mais a été moins déterminant que la température :
 - 3 jours pour ISO
 - 2 pour le bayésien
- La méthode dynamique est plus précise que la méthode moyenne pour tous les tests effectués. Cependant, c'est la méthode bayésienne qui donne les meilleurs résultats, quel que soit le test effectué.



7. Perspectives

- Tester sur d'autres parois (composition et orientation).
- Utilisation d'une source de chaleur.
- Approfondir la méthode du SEID.
- Mesure des températures de surfaces avec caméra TIR (active et passive).
- Tester d'autres méthodes (PGD, etc.).



MERCI !



This research work is carried out within the scope of the Built2Spec project, funded by European Union under Grant Agreement number: 637221 – H2020-EeB-2014-2015