



Etat de l'art sur les méthodes inverses appliquées à la caractérisation thermique des parois

Manon RENDU, Jérôme LE DRÉAU, Patrick SALAGNAC, Maxime DOYA

Paris, le 2 mai 2018



UNION EUROPEENNE
Projet bénéficiaire
du Fonds européen
de développement régional



Sommaire

➤ I – Contexte

➤ II – Verrous scientifiques

- > Le triptyque de la méthode inverse
- > L'analyse des données

➤ III – Etat de l'art sur les méthodes inverses appliquées à la caractérisation thermique des parois

- > Installations
- > Méthodes et modèles statiques
- > Méthodes et modèles dynamiques
- > Instrumentation

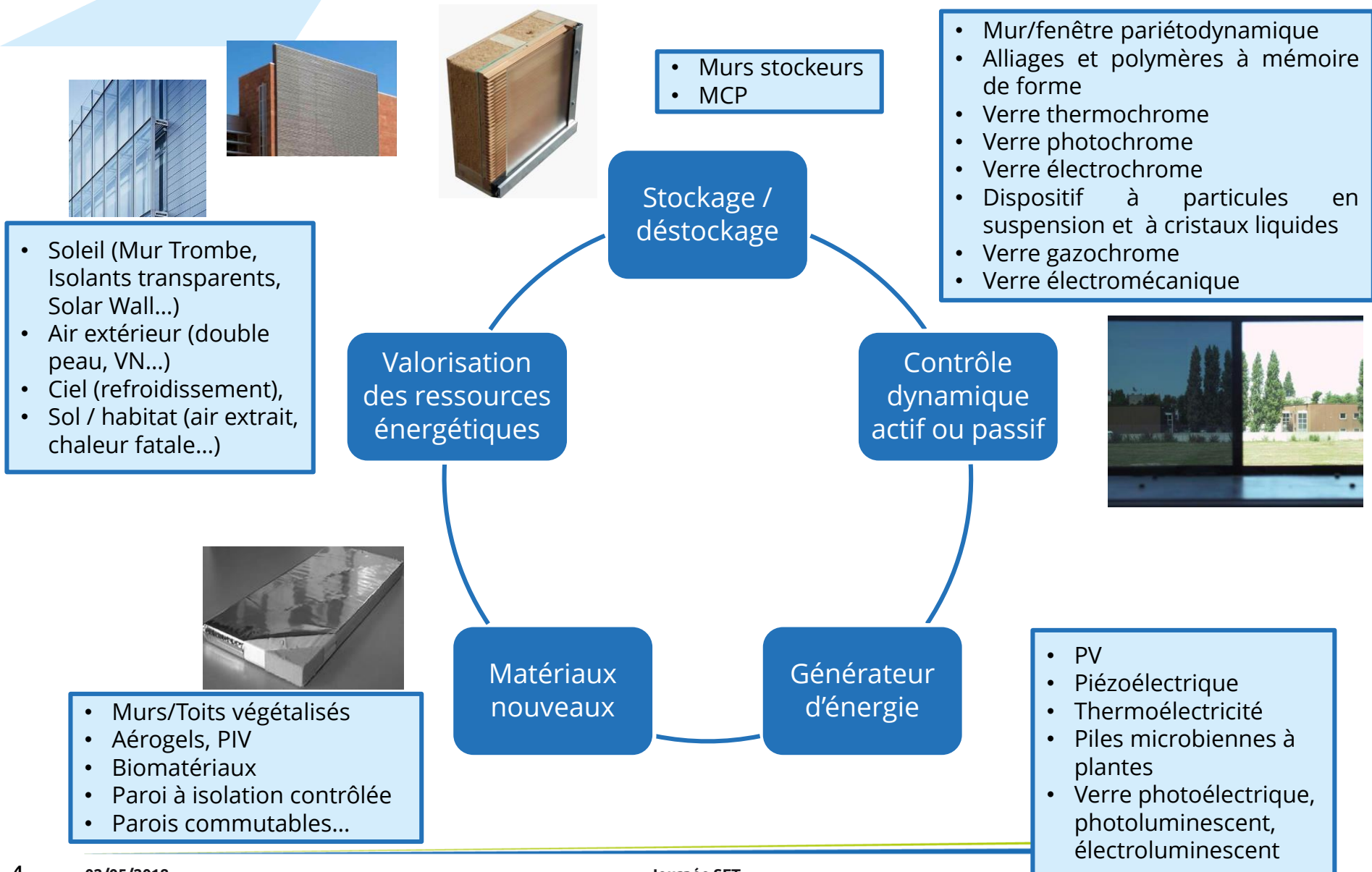
➤ IV - Conclusion

➤ Pourquoi caractériser le comportement thermique des parois ?

- > Evaluer les **performances énergétiques des bâtiments** qui dépendent fortement de l'enveloppe des bâtiments en hiver comme en été, qualifiée de « modératrice climatique » (John et al. 2005)

- > Caractériser des composants d'enveloppes **innovants** :
 - géométrie complexe,
 - phénomènes physiques non linéaires (convection dans des lames d'air),
 - humidité,
 - aspects dynamiques (solaires)...

Composants d'enveloppes innovants



L'échelle d'étude

➤ A l'échelle des matériaux

- > Mesure des propriétés thermiques normalisées :
 - Résistance thermique (NF EN 12939, NF EN 12667, NF EN 12664)
 - Conductivité thermique et diffusivité thermique (NF EN 22007-2)
- > Recherche sur des matériaux nouveaux, les transferts couplés (Berger et al. 2018)...

➤ A l'échelle des parois

Caractéristiques = Performance globale

≠ \sum propriétés thermiques de chaque matériau

- > Des essais en **conditions réelles** sont nécessaires pour identifier les caractéristiques thermiques des composants de façade de manière dynamique

Le triptyque de la méthode inverse

Les déperditions de plus en plus faibles : comment les mesurer ?

Que doit-on mesurer et comment ?

Quelle installation de test utiliser ?

Expérience

Comment prendre en compte l'inertie ?

Quels paramètres en fonction du type de paroi ?

Modèle

Inversion

Quelles méthodes inverses utilisées ?

Quelles données sont sélectionnées ?

Quel niveau de détail de modèle nécessaire à l'échelle de la paroi ?

Mais pas seulement...

Le traitement des données

Table 2
Determined overall heat loss coefficient (W/K) of the round robin test box by different modelling teams and making use of different data analysis methods and sampling times.

Team		Winter data Belgium	Summer data Spain
1	Averaging method	3.77–3.92	
	State space model (RC using LORD)	3.07–3.42	
2	Averaging method	2.86–4.15	
	Linear regression (5'-data)	2.84–4.11	
	Linear regression (daily averaged data)	3.68–4.12	4.32–4.48
	AR(MA)X-models	3.79–4.06	4.07–4.20
	State space models (RC using LORD)	3.93	4.23
3	Multiple linear regression (hourly data)	4.77–5.24	
	Multiple linear regression (daily data)	3.73–4.39	
4	State space models	4.27–4.56	
5	Linear regression (daily averaged data)	3.99–4.08	
	State space models (RC using CTSM-R)	3.99	
6	State space models (RC using Matlab)	3.97	4.1–4.46
7	ARX-models	3.95	4.05–4.10
	State space models (RC using CTSM-R)	3.84	3.96
8	Averaging method	3.72–3.99	
	Linear regression (5'-data)	2.98–3.94	
	AR(MA)X-models	4.01–4.08	
	State space models (RC using CTSM-R)	4.48	

$$HLC_{th} = 4,08 \text{ W/K}$$

Roels et al. 2017 dans le cadre du projet AIE EBC Annex 58 'ReliableBuilding Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements'



Les installations



Caractéristiques	Laboratoire contrôlé	Cellule test extérieure	Mesure in situ
Conditions aux limites	Contrôlées	Contrôlées / Réelles	Réelles
Instrumentation	+	+	-
Précision	+	=	-
Influence occupant	✗	✗	Possible
Essais répliquables	✓	✗	✗

Adapté à :

Parois opaques	✓	✓	✓
Parois vitrées	✓	✓	≈
Parois actives	✗	✓	✗

Ces trois installations sont complémentaires (Cattarin et al. 2016)

Modèles et méthodes statiques

- Méthode simple découlant de la loi de Fourier
- Détermination la résistance thermique, mais pas la capacité thermique
- Hypothèses
 - > CL constantes ou moyennées,
 - > propriétés indépendantes du temps,
 - > stockage thermique négligé
- Contraintes
 - > Nécessite une longue durée d'essai,
 - > Généralement un fort gradient de température entre int/ext (>10K),
 - > Difficulté à prendre en compte l'ensoleillement

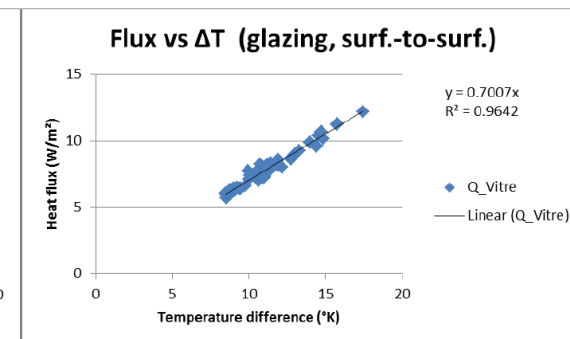
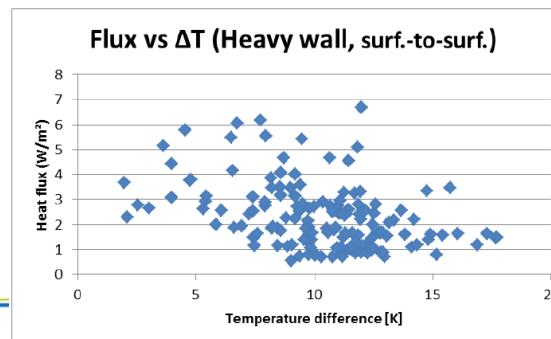
Modèles et méthodes statiques

➤ Méthode de la moyenne

- > Méthode très utilisée sur site
- > Définie dans ISO 9869-1
- > Nécessite la mesure de la température d'air intérieur, la température d'air extérieur et le flux thermique
- > Incertitude devient grande pour des parois fortement isolées
- > Pas adapté aux parois à forte inertie

- > Exemples d'applications
 - Comparaison à d'autres méthodes (Nardi et al. 2016, Biddulph 2014)
 - Utilisation sur site (Baker 2008, Lucchi 2017)
 - Amélioration et évaluation de la méthode (Naveros et al. 2012 , Ficco et al. 2015, Gaspar et al. 2018)

$$R = \sum (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) / \sum Q$$



Modèles et méthodes dynamiques

➤ Principe

- > Prend en compte le **comportement dynamique** de la paroi et **les conditions aux limites variées** (rayonnement solaire, convection forcée due au vent...) pour définir des caractéristiques thermiques de la paroi

➤ Contraintes

- > Nécessite de sélectionner convenablement les données à traiter,
- > Modèles plus complexes

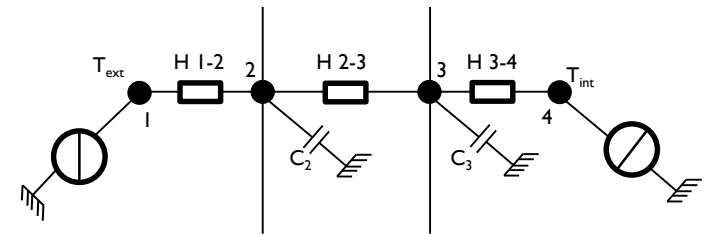
➤ Grande variété

- > Modèles de connaissance (ex. : méthode des différences finies)
- > Méthodes à partir de modèles « boîte grise » (LORD, CTSM)
- > Modèles de comportement (ex. : méthodes à facteurs de réponse)

Modèles et méthodes dynamiques

➔ LORD | 1994

- > Modèles boîte grise : modèles RC
- > 2 types de minimisation :
 - OEM (Output Error Method) = somme des écarts quadratiques entre la température mesurée et la température calculée
 - PEM (Prediction Error Method) = incertitudes sur les mesures et les calculs
- > Estime le coefficient de transmission thermique et le facteur solaire
- > Algorithme de minimisation : Méthode de Nelder-Mead + Monte Carlo
- > Disponible sur www.dynastee.info
- > Exemples d'applications
 - Différents murs avec ou sans ouvrant (U et g) : Androutsopoulos et al. 2008
 - Projet Paslink : Baker et van Dijk 2008
 - U et g en climat chaud : Jiménez et al. 2008



Ex : Mur homogène

Modèles et méthodes dynamiques

➤ CTSM = Continuous Time Stochastic Model

- > Développé sous R à DTU
- > Modèle boîte grise : « continuous time state space models » avec prise en compte du bruit de mesure
- > Non linéaire et instationnaire
- > Minimisation : PEM (Prediction Error Method) = incertitudes sur les mesures et les calculs
- > Algorithme de minimisation : Stochastique

- > Exemples d'applications
 - PV : Jiménez et al. 2008
 - U, facteur solaire et C_{eff} : Naveros et al. 2014
 - R et C : Deconinck et Roels 2017

Modèles et méthodes dynamiques

➤ Modèles AR(MA)X

- > Modèles de comportement
- > Aucune information physique, sauf lorsque le comportement du modèle est stable = comparaison possible avec l'équation du transfert thermique statique

$$Q(B)q_j = \omega_{si}(B)T_{si,j} + \omega_{se}(B)T_{se,j} + e_j$$

with $Q(B) = 1 + Q_1B^1 + \dots + Q_{nq}B^{nq}$,
 $\omega_{si}(B) = \omega_{si,0} + \omega_{si,1}B^1 + \dots + \omega_{si,ni}B^{ni}$
 $\omega_{se}(B) = \omega_{se,0} + \omega_{se,1}B^1 + \dots + \omega_{se,ne}B^{ne}$

$$q = (1/R)(T_{si} - T_{se}) = H(T_{si} - T_{se})$$

$$H_i = \frac{1}{R_i} = \frac{\omega_{si}(1)}{Q(1)} \quad H_e = \frac{1}{R_e} = \frac{-\omega_{se}(1)}{Q(1)}$$

$$H_{tot} = \frac{1}{R_{tot}} = \lambda H_i + (1 - \lambda)H_e$$

- > Exemples d'applications
 - U, facteur solaire et C_{eff} : Naveros et al. 2015
 - U et g (modèles à plusieurs sorties) : Jiménez et Heras 2005

Naveros et al. 2015 | Deconinck et Roels 2016 | Gori, 2017

Modèles et méthodes dynamiques

➤ Autres modèles dynamiques

- > Facteur de réponse
 - Peng et Wu 2008, Rasooli et al. 2016
- > Méthode des différences finies et algorithme de LM
 - Chaffar et al. 2014, Maréchal 2014
- > Modèles RC
 - Analyse bayésienne : Biddulph et al. 2014
 - Algorithme générique : Wang 2006
- > Méthode des quadripôles et algorithme du gradient réduit généralisé
 - Sassine 2016

Instrumentation

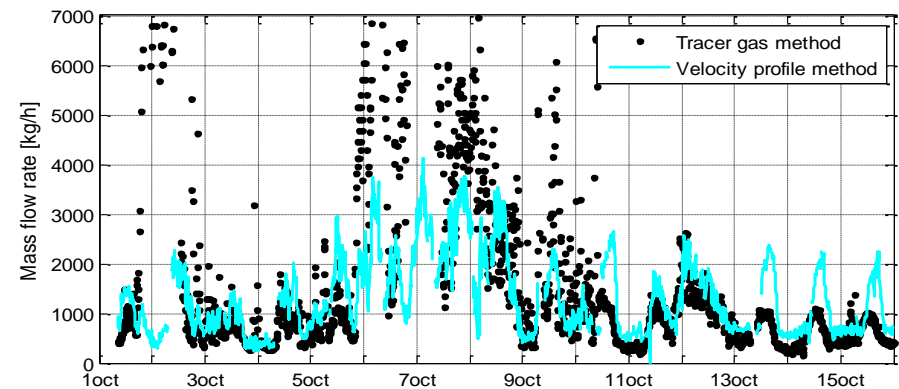


➤ Deux types de données

- > Les conditions aux limites (température, humidité, flux...)
- > Mesures pour l'identification (généralement, température et/ou flux, voire débit)

➤ Vigilances

- > Sur les grandeurs
 - Grande variété
 - Différents ordres de grandeur
- > Sur les capteurs
 - Choix et précision
 - Positionnement
 - Impact sur la mesure
- > Sur les données récoltées
 - Choix du pas de temps d'acquisition
 - Sélection des données pertinentes et traitement efficace



Larsen et al. 2007

Rogez et Le Coze 2009 | Meng et al. 2015 | Cucumo et al. 2018

- Méthodes statiques simples mais limitées
- Large avantage des méthodes dynamiques pour notre problématique
- Grande diversité de méthodes dynamiques et de méthodes inverses
- Façades actives : Nombreux modèles « boîte grise » mais aussi modèles de connaissance



Avez-vous des questions

Contact : Manon Rendu, manon.rendu@univ-lr.fr

- > Androutsopoulos, A., J.J. Bloem, H.A.L. van Dijk, et P.H. Baker. 2008. « Comparison of User Performance When Applying System Identification for Assessment of the Energy Performance of Building Components ». Building and Environment 43 (2): 189-96. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.017>.
- > Baker, P. H., et H. A. L. van Dijk. 2008. « PASLINK and dynamic outdoor testing of building components ». Building and Environment, Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components, 43 (2): 143-51. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.009>.
- > Baker, Paul. 2008. « Technical Paper 2 - In Situ U-Value Measurements in Traditional Buildings - Preliminary Results ».
- > Berger, Julien, Thomas Busser, Denys Dutykh, et Nathan Mendes. 2018. « On the estimation of moisture permeability and advection coefficients of a wood fibre material using the optimal experiment design approach ». Experimental Thermal and Fluid Science 90 (janvier): 246-59. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.07.026>.
- > Biddulph, Phillip, Virginia Gori, Clifford A. Elwell, Cameron Scott, Caroline Rye, Robert Lowe, et Tadj Oreszczyn. 2014. « Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements ». Energy and Buildings 78 (août): 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.004>.
- > Cattarin, G., F. Causone, A. Kindinis, et L. Pagliano. 2016. « Outdoor test cells for building envelope experimental characterisation – A literature review ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 (février): 606-25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.012>.
- > Chaffar, Khaled, Alexis Chauchois, Didier Defer, et Laurent Zalewski. 2014. « Thermal characterization of homogeneous walls using inverse method ». Energy and Buildings 78 (août): 248-55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.038>.
- > « CTSM-R Version 1.0.0 ». 2015. CTSM-R Development Team.
- > Cucumo, Mario, Vittorio Ferraro, Dimitrios Kaliakatsos, et Marilena Mele. 2018. « On the distortion of thermal flux and of surface temperature induced by heat flux sensors positioned on the inner surface of buildings ». Energy and Buildings 158 (janvier): 677-83. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.034>.

- > Deconinck, An-Heleen, et Staf Roels. 2016. « Comparison of characterisation methods determining the thermal resistance of building components from onsite measurements ». *Energy and Buildings* 130 (octobre): 309-20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.061>.
- > ———. 2017. « The as-built thermal quality of building components: characterising non-stationary phenomena through inverse modelling ». *Energy Procedia*, 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway, 132 (octobre): 351-56. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.748>.
- > Ficco, Giorgio, Fabio Iannetta, Elvira Ianniello, Francesca Romana d'Ambrosio Alfano, et Marco Dell'Isola. 2015. « U-value in situ measurement for energy diagnosis of existing buildings ». *Energy and Buildings* 104 (octobre): 108-21. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>.
- > Gaspar, Katia, Miquel Casals, et Marta Gangolells. 2018. « In Situ Measurement of Façades with a Low U-Value: Avoiding Deviations ». *Energy and Buildings* 170 (juillet): 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.012>.
- > Gori, Virginia, University College London, et The Barlett. 2017. « A Novel Method for the Estimation of Thermophysical Properties of Walls from Short and Seasonally Independent In-Situ Surveys », 272.
- > Gutschker, Olaf. 2008. « Parameter identification with the software package LORD ». *Building and Environment, Outdoor Testing, Analysis and Modelling of Building Components*, 43 (2): 163-69. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.010>.
- > ———. s. d. « LORD 3.2 ». <http://dynastee.info/wp-content/uploads/2012/12/lordmanual.pdf>.
- > « ISO 9869-1:2014 - Isolation thermique -- Éléments de construction -- Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique -- Partie 1: Méthode du fluxmètre ».
- > Jensen, Rasmus Lund, Olena Kalyanova, Ph D-student, et Per Heiselberg. 2008. « Modeling a Naturally Ventilated Double Skin Façade with a Building Thermal Simulation Program ». *Building Physics*, 8.
- > Jiménez, M. J., H. Madsen, J. J. Bloem, et B. Dammann. 2008. « Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules ». *Energy and Buildings* 40 (2): 157-67. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.026>.

- > Jiménez, M. J., B. Porcar, et M. R. Heras. 2008. « Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions ». *Solar Energy* 82 (7): 573-87. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.013>.
- > Jiménez, María José, et Henrik Madsen. 2008. « Models for describing the thermal characteristics of building components ». *Building and Environment*, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.030>.
- > John, Godfaurd, Derek Clements-Croome, et George Jeronimidis. 2005. « Sustainable Building Solutions: A Review of Lessons from the Natural World ». *Building and Environment* 40 (3): 319-28. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.011>.
- > Kristensen, Niels Rode, Henrik Madsen, et Sten Bay Jørgensen. 2004. « Parameter estimation in stochastic grey-box models ». *Automatica* 40 (2): 225-37. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2003.10.001>.
- > Lucchi, Elena. 2017. « Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data ». *Energy and Buildings* 151 (septembre): 393-405. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.002>.
- > Maréchal, William. 2014. *Utilisation de méthodes inverses pour la caractérisation de matériaux à changement de phase (MCP)*. Pau. <http://www.theses.fr/2014PAUU3014>.
- > Meng, Xi, Tao Luo, Yanna Gao, Lili Zhang, Qiong Shen, et Enshen Long. 2017. « A new simple method to measure wall thermal transmittance in situ and its adaptability analysis ». *Applied Thermal Engineering* 122 (juillet): 747-57. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.074>.
- > Nardi, Iole, Domenica Paoletti, Dario Ambrosini, Tullio de Rubeis, et Stefano Sfarra. 2016. « U-value assessment by infrared thermography: A comparison of different calculation methods in a Guarded Hot Box ». *Energy and Buildings* 122 (juin): 211-21. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.017>.
- > Naveros, I., P. Bacher, D. P. Ruiz, M. J. Jiménez, et H. Madsen. 2014. « Setting up and validating a complex model for a simple homogeneous wall ». *Energy and Buildings* 70 (février): 303-17. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.076>.
- > Naveros, I., Christian Ghiaus, D.P. Ruiz, S. Castano, et S. Castaño. 2015. « Physical parameters identification of walls using ARX models obtained by deduction ». *Energy and Buildings*, n° 108: 317-29. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.021>.

- > NF EN 12664 - Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits secs et humides de moyenne et basse résistance thermique. 2001.
- > NF EN 12667 - Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits de haute et moyenne résistance thermique. 2001.
- > NF EN 12939 - Performance thermique des matériaux et produits pour le bâtiment - Détermination de la résistance thermique par la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode fluxmétrique - Produits épais de haute et moyenne résistance thermique. 2001.
- > NF EN ISO 22007-2 - Plastiques - Détermination de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique - Partie 2 : méthode de la source plane transitoire (disque chaud). 2015.
- > Peng, Changhai, et Zhishen Wu. 2008. « In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction ». Energy and Buildings 40 (11): 2076-82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.012>.
- > Rasooli, Arash, Laure Itard, et Carlos Infante Ferreira. 2016. « A response factor-based method for the rapid in-situ determination of wall's thermal resistance in existing buildings ». Energy and Buildings 119 (mai): 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.009>.
- > Roels, Staf, Peder Bacher, Geert Bauwens, Sergio Castaño, Maria José Jiménez, et Henrik Madsen. 2017. « On Site Characterisation of the Overall Heat Loss Coefficient: Comparison of Different Assessment Methods by a Blind Validation Exercise on a Round Robin Test Box ». Energy and Buildings 153 (octobre): 179-89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.006>.
- > ROGEZ, Jacques, et Jean LE COZE. 2009. « Mesure des températures - Questions à se poser avant la mesure ». Text. Ref : TIP672WEB - « Mesures physiques ». 10 mars 2009. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-generalites-echelles-de-temperature-et-etalonnage-42542210/mesure-des-temperatures-r2516/>.

- > Sassine, Emilio. 2016. « A practical method for in-situ thermal characterization of walls ». Case Studies in Thermal Engineering 8 (septembre): 84-93. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.03.006>.
- > Wang, Shengwei, et Xinhua Xu. 2006. « Parameter estimation of internal thermal mass of building dynamic models using genetic algorithm ». Energy Conversion and Management 47 (13): 1927-41. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.09.011>.