



---

« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne...et personne ne sait pourquoi »

Albert EINSTEIN

---

***A mes parents***  
*Aux êtres qui me sont les plus chers*  
*Devant tous les sacrifices que vous avez consentis pour moi, aucune*  
*dédicace ne saurait exprimer la grandeur des sentiments*  
*que j'ai pour vous.*  
*Comment pourrais-je vous dédier un travail qui est le vôtre.*

***A mes Frères***  
*Mohamed, Sami, Ismail*  
*A mes deux sœurs Saadia, Hajjer*  
*A ma sœur Amira et son mari Khalil*  
***A monsieur Zoubeir LAFHAJ***  
***A monsieur Nourredine BEN JAMAA***  
***A monsieur Marouene et sa femme sana***  
***A monsieur Ahmed NAJER***  
***A mes prof en Tunisie***

# Remerciements

Cette recherche a été effectuée au sein de l'équipe "Habitat" du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement Lille Nord de France (LGCgE) sur le site de l'Université d'Artois à Béthune. Deux sentiments m'animent au moment d'écrire ces mots. Le premier sentiment est l'immense joie d'avoir mené à terme ce travail. Le second sentiment est la peur d'oublier dans ces remerciements quelqu'un qui de près ou de loin a contribué à l'aboutissement de ce projet. Je tiens à adresser, dans un premier temps, mes vifs remerciements au Professeur Didier DEFER de m'avoir fait confiance en acceptant de me confier ce sujet. Qu'il trouve dans ces quelques mots le témoignage de ma profonde gratitude pour tous ses conseils et son soutien indéfectible durant ces années. J'espère simplement ne pas l'avoir déçu.

Je remercie vivement Monsieur Laurent ZALEWSKI, Maître de conférences, qui a co-dirigé mon travail, et qui a su par son enthousiasme, sa compétence m'aider tout au long de ma thèse, pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués et sa disponibilité.

Je tiens à remercier vivement Monsieur Bertrand D'AGARO, Responsable Recherche et Développement énergie/enveloppe de Pas-de-Calais Habitat, pour l'intérêt qu'il porte à mon travail et d'avoir accepté d'être dans le Jury de soutenance. Les remarques et conseils qu'il a pu m'adresser m'ont été très profitables dans la conduite de cette étude.

Mes remerciements vont également à Pas de Calais Habitat ainsi qu'au conseil régional du Nord – Pas de Calais pour avoir accepté de financer ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame Colette SIRIEIX de l'Université de Bordeaux 1 et Madame Berangère LARTIGUE du laboratoire P.H.A.S.E de l'Université de Toulouse III, pour l'intérêt qu'elles ont porté à mes travaux et le temps qu'elles y ont consacré. Je leur adresse toute ma reconnaissance d'avoir accepté de rapporter cette thèse.

Je remercie vivement Monsieur Mohammed LACHI, Professeur de l'Université de Reims-Champagne-Ardenne, IUT de Reims-Châlons-Charleville de m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger et d'examiner mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Emmanuel ANTCZAK professeur au Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement Lille Nord de France (LGCgE) – Artois à Béthune, pour l'honneur qu'il m'a fait en prenant part à ce jury.

Je ne saurai assez remercier mon professeur Zoubeir LAFHAJ, Directeur des Relations Internationales - Professeur des Universités - Equipe Génie Civil - Laboratoire de Mécanique de Lille (LML)/ Responsable de la filière ACE, pour son généreux soutien moral.

Je suis également reconnaissant à Monsieur Thierry CHARTIER, Ingénieur d'étude, pour son aide très précieuse tout au long de cette thèse, ses multiples services et son inébranlable bonne humeur.

Je tiens à remercier chaleureusement tous les thésards avec qui j'ai partagé mon bureau, et qui ont partagés avec moi leurs multiples et riches connaissances, ainsi que leurs rêves et projets.

# Nomenclature

| <i>Notation</i>                 | <i>Désignation</i>                   | <i>Unité</i>                   |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| $h_g$                           | Coefficient d'échange global         | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  |
| $q_0$                           | Densité de flux de chaleur           | $W \cdot m^{-2}$               |
| $q_e$                           | Densité de flux surfacique           | $W \cdot m^{-2}$               |
| $q$                             | Densité de flux                      | $W \cdot m^{-2}$               |
| $\frac{\partial T}{\partial x}$ | Variations spatiales du paramètre T  |                                |
| $t$                             | Temps                                | S                              |
| $\Delta t$                      | Pas de temps                         | S                              |
| $\frac{\partial T}{\partial t}$ | Variation de température             | °C                             |
| $T_e$                           | Température ambiante                 | °C                             |
| $T_s$                           | Température de surface               | °C                             |
| $T_1 - T_2$                     | Ecart de température                 | °C                             |
| $\theta_{exp}$                  | Température normalisée expérimentale |                                |
| $\theta_{\lambda,pc,h}$         | Température normalisée simulée       |                                |
| $T_i^n$                         | Evolution de la température simulée  | °C                             |
| $\Delta x$                      | Pas axial                            | cm                             |
| $x$                             | Coordonnée cartésienne               |                                |
| $e$                             | Epaisseur de chaque couche           | cm                             |
| $L$                             | Epaisseur totale de la paroi         | cm                             |
| $R_T$                           | Résistance thermique du matériau     | $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$     |
| $C_p$                           | Chaleur massique                     | $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ |

**Symboles grecques :**

| <b><i>Notation</i></b> | <b><i>Désignation</i></b> | <b><i>Unité</i></b>  |
|------------------------|---------------------------|--|
| $\lambda$              | Conductivité thermique    | $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$                     |
| $\rho$                 | Masse volumique           | $\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$  |
| $\varphi_s$            | Flux surfacique           | $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$   |
| a                      | Diffusivité thermique     | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$                                       |
| b                      | Effusivité thermique      | $\text{J} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| $\phi$                 | Flux                      | W  |

**Indices et exposants :**

| <b><i>Notation</i></b> | <b><i>Désignation</i></b>     | <b><i>Unité</i></b> |
|------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 0,1,2,...,n            | Indice du paramètre considéré |                     |
| i,j,k                  | Index                         |                     |

# Résumé

Les préoccupations environnementales actuelles visent à réduire les consommations énergétiques. Dans une démarche d'amélioration des bâtiments existants, l'étude du comportement thermique d'une paroi n'est pas aisée du fait de la méconnaissance de ses propriétés thermophysiques réelles. Ces paramètres sont pourtant prépondérants pour la phase d'optimisation économique des opérations de réhabilitation ou pour vérifier ses performances in situ. Il apparaît donc important de pouvoir caractériser les parois de bâtiment en place.

Notre travail vise à développer une méthode de caractérisation thermique d'une paroi adaptée aux applications in situ basée sur une approche active. Le principe d'identification consiste à solliciter thermiquement une face d'accès en imposant un flux de chaleur sous forme d'un créneau et à étudier la réponse en température enregistrée par thermographie infrarouge sur l'autre face. A partir de signaux de flux et de températures mesurés aux limites de la paroi, les propriétés thermophysiques de la paroi seront estimées par méthode inverse. Nous nous sommes dans un premier temps intéressés aux parois homogènes. Le schéma d'inversion est construit autour d'un modèle numérique décrivant la réponse de la paroi suivant la méthode des différences finies en 1D. L'identification de la conductivité thermique et de la chaleur volumique de la paroi est réalisée en optimisant le groupement de paramètres qui permet de minimiser l'écart entre la température normalisée mesurée et la température normalisée simulée. Le coefficient d'échange surfacique global est également identifié à partir du même essai.

Dans ce travail, la méthode a été appliquée à une paroi homogène en carreaux de plâtre mise en place au laboratoire. Elle a une épaisseur de 6.5 cm. Cette technique a été utilisée pour les parois multicouches de bâtiments. Les résultats issus de cette procédure d'inversion ont été comparés à des valeurs de référence obtenues à partir d'une procédure classique (NF EN 12664-méthode fluxmétrique). Une bonne concordance des résultats est obtenue. Une autre partie représente les essais in situ.

---

## Mots clés :

Carreau de plâtre, flux, température, différences finies, thermographie infrarouge, propriétés thermophysiques, paroi monocouche, paroi multicouche, coefficient d'échange surfacique global.

---

# Abstract

Current environmental concerns are intended to reduce energy consumption. In a process of improving existing buildings, the study of the thermal behavior of a wall is not easy because of the ignorance of its real thermophysical properties. These parameters are yet to dominate the economic optimization phase of the rehabilitation or to check its performance in situ. It therefore appears important to characterize the walls of existing building.

Our work aims to develop a method of thermal characterization of a wall suitable for in situ applications based on an active approach. The principle of identification is to apply a heat-face access by imposing a heat flux in the form of a pulse and to study the temperature response recorded by infrared thermography on the other side. From signal flow and temperature measured at the limits of the wall, the thermophysical properties of the wall will be estimated by inverse method. We are at present interested in homogeneous walls. The inversion scheme is built around a digital model describing the response of the wall following the finite difference method in 1D. The identification of the thermal conductivity and heat volume of the wall is achieved by optimizing the group of parameters which minimizes the normalized difference between the temperature measured and the temperature standard simulated. The overall Global exchange coefficient is also identified from the same test.

In this work, the method was applied to a homogeneous wall tile plaster introduction to the laboratory. It has a thickness of 6.5 cm. This technique was used for multilayer walls of buildings. The results of this inversion procedure were compared with reference values obtained from a standard procedure (DIN EN 12664-flow meter methods). A good agreement is obtained. Another part is the in situ tests.

---

**Key Words:**

Gypsum tile, flux, temperature, finite differences, infrared thermography, thermophysical properties, wall monolayer, multilayer wall, Global exchange coefficient.

---

# Sommaire

|  |             |
|--|-------------|
| <b>REMERCIEMENTS</b>   | <b>III</b>  |
| <b>NOMENCLATURE</b>  | <b>IV</b>   |
| <b>RÉSUMÉ</b>  | <b>VI</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>  | <b>VII</b>  |
| <b>SOMMAIRE</b>  | <b>VIII</b> |
| <b>LISTE DES TABLEAUX</b>  | <b>XII</b>  |
| <b>LISTE DES FIGURES</b>   | <b>XIII</b> |
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>   | <b>1</b>    |
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>   | <b>2</b>    |
| <b>CHAPITRE I:</b>   | <b>6</b>    |
| <b>ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES</b>   | <b>6</b>    |
| <b>I.1 INTRODUCTION</b>  | <b>7</b>    |
| <b>I.2 ENJEUX LIÉS AUX CHOIX DES BÂTIMENTS ANCIENS</b>                         | <b>7</b>    |
| <b>I.3 LA PROBLÉMATIQUE DE CARACTÉRISATION DE PAROIS</b>                       | <b>10</b>   |
| I.3.1 LES GRANDES CLASSES DE MÉTHODES  | 12          |
| <b>I.4 THERMOGRAPHIE INFRAROUGE</b>  | <b>13</b>   |
| I.4.1 CAMÉRA INFRAROUGE  | 14          |
| I.4.2 LE RAYONNEMENT INFRAROUGE  | 15          |
| <b>I.5 MÉTHODE PAR CONTACT</b>   | <b>16</b>   |
| I.5.1 MÉTHODE EN RÉGIME PERMANENT  | 16          |
| I.5.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée                                     | 17          |
| I.5.1.2 Méthode des boîtes   | 19          |
| I.5.2 MÉTHODE EN RÉGIME TRANSITOIRE  | 19          |
| I.5.2.1 Méthode de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud       | 20          |
| I.5.2.1.1 Principe de la méthode   | 20          |
| I.5.2.2 Mesure de l'effusivité thermique par la méthode du plan chaud          | 22          |
| <b>I.6 MÉTHODE SANS CONTACT</b>  | <b>24</b>   |
| I.6.1 MÉTHODE FLASH  | 24          |
| I.6.1.1 Principe de la méthode   | 25          |
| I.6.1.2 Modélisation de la méthode Flash                                       | 26          |
| I.6.2 MÉTHODE ACTIVE   | 27          |
| I.6.3 MÉTHODE PASSIVE  | 27          |
| I.6.3.1 Méthode non destructive et sans contact                                | 29          |
| I.6.3.2 Appareil de mesure   | 29          |
| <b>I.7 LA THERMOGRAPHIE INFRAROUGE APPLIQUÉE AUX CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS</b> | <b>30</b>   |
| I.7.1 THERMOGRAPHIE MODULÉE  | 31          |
| I.7.2 LA THERMOGRAPHIE PULSÉE  | 32          |
| I.7.3 LA THERMOGRAPHIE À PHASE PULSÉE  | 33          |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>I.8 MÉTHODES IN SITU</b>   | <b>34</b> |
| <b>I.9 TRAVAUX DÉVELOPPÉS DANS NOTRE LABORATOIRE</b>                              | <b>38</b> |
| <b>I.10 CONCLUSION</b>  | <b>40</b> |
| <b>CHAPITRE II:</b>   | <b>42</b> |
| <b>ASPECTS THÉORIQUES</b>   | <b>42</b> |
| <b>II.1 INTRODUCTION</b>  | <b>43</b> |
| II.1.1 FORMULATION DE PROBLÈME  | 43        |
| <b>II.2 TRANSFERTS DE LA CHALEUR</b>  | <b>45</b> |
| <b>II.3 MISE EN ÉQUATIONS DES PHÉNOMÈNES</b>                                      | <b>46</b> |
| II.3.1 CONDUCTION   | 46        |
| II.3.1.1 Loi de Fourier   | 46        |
| II.3.1.2 Equation de la chaleur   | 46        |
| II.3.1.3 Echanges surfaciques et conditions limites                               | 47        |
| II.3.1.4 Conditions initiales   | 48        |
| II.3.2 MODÈLE DIRECT  | 48        |
| II.3.2.1 Notions de différences finies  | 49        |
| II.3.2.1.1 Cas du transfert de chaleur pour un système monodirectionnel cartésien | 49        |
| II.3.3 APPLICATION À NOTRE SITUATION EXPÉRIMENTALE                                | 52        |
| II.3.3.1 Cas de la paroi monocouche   | 52        |
| II.3.3.2 Cas de la paroi multicouche  | 55        |
| II.3.3.2.1 Equation aux interfaces de différents matériaux                        | 56        |
| II.3.3.2.2 Le système   | 57        |
| II.3.3.3 Définition du mur équivalent   | 61        |
| <b>II.4 ÉTUDE DE SENSIBILITÉ AUX PARAMÈTRES</b>                                   | <b>62</b> |
| II.4.1 PASSAGE À LA TEMPÉRATURE NORMALISÉE  | 62        |
| II.4.2 CAS D'UN MUR MONOCOUCHE  | 63        |
| II.4.2.1 Fonctions de sensibilité   | 63        |
| II.4.2.2 Corrélation des paramètres   | 66        |
| II.4.3 CAS D'UNE PAROI TRICOUCHE  | 70        |
| II.4.3.1 Fonctions de sensibilité   | 70        |
| II.4.3.1.1 Premier cas  | 70        |
| II.4.3.1.1.1 Etude de corrélation entre paramètres                                | 73        |
| II.4.3.1.2 Fonctions de sensibilité et corrélations pour le deuxième cas          | 73        |
| <b>II.5 ÉTUDE NUMÉRIQUE DES PLUSIEURS CAS AVEC UN MUR ÉQUIVALENT</b>              | <b>76</b> |
| II.5.1 PAROI SANS ISOLANT   | 78        |
| II.5.2 PAROI AVEC ISOLANT   | 79        |
| <b>II.6 PROCÉDURE INVERSE</b>   | <b>81</b> |
| II.6.1 PROBLÈME INVERSE   | 81        |
| II.6.1.1 Schéma du problème inverse   | 82        |
| II.6.2 LES DIFFÉRENTES MÉTHODES D'OPTIMISATION                                    | 83        |
| II.6.2.1 Les méthodes déterministes   | 83        |
| II.6.2.1.1 La méthode du simplexe   | 83        |
| II.6.2.1.1.1 Méthode simplexe initial   | 83        |
| II.6.2.1.1.2 Méthode Nelder-Mead  | 85        |
| II.6.2.1.2 Méthode Levenberg Marquardt  | 86        |
| II.6.2.2 Les méthodes stochastiques   | 87        |
| II.6.2.2.1 Algorithme génétique   | 87        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>II.7 CONCLUSION</b>  | <b>89</b>  |
| <b>CHAPITRE III:</b>  | <b>90</b>  |
| <b>ASPECTS EXPÉRIMENTAUX</b>  | <b>90</b>  |
| <b>III.1 INTRODUCTION</b>   | <b>91</b>  |
| <b>III.2 CHAÎNE DE MESURES ET CAPTEURS</b>  | <b>91</b>  |
| III.2.1 CHAÎNE DE MESURES   | 91         |
| III.2.1.1 Multimètres   | 91         |
| III.2.1.2 Centrale d'acquisition  | 92         |
| III.2.1.3 Caméra SILVER 420M  | 92         |
| III.2.2 LES CAPTEURS  | 93         |
| III.2.2.1 Les thermocouples   | 94         |
| III.2.2.2 Les fluxmètres  | 96         |
| <b>III.3 CARACTÉRISATION PRÉALABLE</b>  | <b>97</b>  |
| III.3.1 ETALONNAGE  | 98         |
| III.3.2 CARACTÉRISATION DES GRANDEURS THERMIQUES  | 100        |
| III.3.2.1 Matériaux étudiés   | 100        |
| III.3.2.2 Principe de détermination de la conductivité thermique                              | 101        |
| III.3.2.3 Principe de détermination de la capacité thermique                                  | 102        |
| III.3.2.4 Résultats de caractérisation en laboratoire   | 102        |
| <b>III.4 CARACTÉRISATION DES PAROIS PAR THERMOGRAPHIE INFRAROUGE ACTIVE</b>                   | <b>104</b> |
| III.4.1 INTRODUCTION  | 104        |
| III.4.2 PAROI MONOCOUCHE  | 105        |
| III.4.2.1 Mesures en laboratoire  | 105        |
| III.4.2.1.1 Caractérisation d'une paroi constituée d'un carreau de plâtre – Première approche | 105        |
| III.4.2.1.2 Caractérisation d'une paroi constituée de carreaux de plâtre                      | 106        |
| III.4.2.1.2.1 Dispositif expérimental   | 106        |
| III.4.2.1.2.2 L'uniformité de flux de chaleur   | 108        |
| III.4.2.1.2.3 Ecart type  | 109        |
| III.4.2.1.2.4 Températures normalisées  | 110        |
| III.4.2.1.2.5 Procédure expérimentale de déroulement de l'essai                               | 112        |
| III.4.2.1.2.6 Mesures expérimentales  | 113        |
| III.4.2.1.2.7 Les résultats du Mur en carreaux de plâtre                                      | 114        |
| III.4.2.1.2.7.1 Influence du coefficient d'échange  | 115        |
| III.4.2.1.2.7.2 Méthode d'estimation de Parker  | 118        |
| III.4.2.2 Mesures in situ   | 120        |
| III.4.2.2.1 Paroi en béton armé   | 120        |
| III.4.2.2.1.1 Instrumentation   | 120        |
| III.4.2.2.1.2 Mesures expérimentales  | 121        |
| III.4.2.2.1.3 Résultats de la paroi en béton armé   | 122        |
| III.4.2.3 Discussions   | 123        |
| III.4.3 PAROIS MULTICOUCHE  | 123        |
| III.4.3.1 Caractérisation en laboratoire de parois tri-couches                                | 123        |
| III.4.3.1.1 Paroi : plaque de plâtre-isolant-carreau de plâtre                                | 123        |
| III.4.3.1.1.1 Dispositif expérimental   | 123        |
| III.4.3.1.1.2 Vérification de l'uniformité de flux de chaleur                                 | 124        |
| III.4.3.1.1.3 Courbes normalisées   | 126        |
| III.4.3.1.1.4 Procédure expérimental  | 126        |

---

|  |            |
|--|------------|
| III.4.3.1.1.5 Mesures expérimentales   | 127        |
| III.4.3.1.1.6 Résultats de la paroi tri-couche : plaque de plâtre-isolant-plâtre | 129        |
| III.4.3.1.2 Paroi en plaque de plâtre-béton cellulaire-carreau de plâtre         | 130        |
| III.4.3.1.2.1 Dispositif   | 130        |
| III.4.3.1.2.2 Procédure expérimentale  | 131        |
| III.4.3.1.2.3 Mesures expérimentales   | 131        |
| III.4.3.1.2.4 Résultats de la paroi : plaque de plâtre-béton cellulaire-plâtre   | 133        |
| III.4.3.2 Caractérisation in situ de paroi multicouche                           | 134        |
| III.4.3.2.1 Logement rue Georges BRAQUES   | 134        |
| III.4.3.2.1.1 Mise en place de l'instrumentation                                 | 134        |
| III.4.3.2.1.2 Mesures expérimentales   | 136        |
| III.4.3.2.1.3 Résultats paroi rue Georges BRAQUES                                | 137        |
| III.4.3.2.2 Maison individuelle  | 138        |
| III.4.3.2.2.1 Mesures expérimentale  | 138        |
| III.4.3.2.2.2 Résultats  | 140        |
| III.4.3.3 Résultats et discussions d'une paroi multicouche                       | 140        |
| III.4.4 MUR ÉQUIVALENT   | 141        |
| III.4.4.1 Paroi de laboratoire   | 141        |
| III.4.4.1.1 Paroi plaque de plâtre-isolant-plâtre                                | 141        |
| III.4.4.1.2 Paroi plaque de plâtre-béton cellulaire-plâtre                       | 142        |
| III.4.4.2 Parois in situ   | 143        |
| III.4.4.3 Paroi Georges BRAQUES  | 143        |
| III.4.5 CONCLUSION   | 144        |
| <b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>  | <b>146</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b>   | <b>148</b> |
| <b>ANNEXES</b>   | <b>156</b> |
| <b>ANNEXE II-1</b>   | <b>157</b> |
| <b>ANNEXE II-2</b>   | <b>160</b> |
| <b>ANNEXE III-1</b>  | <b>162</b> |

---

# Liste des tableaux

|  |     |
|--|-----|
| Tableau I-1. Évolution de la Réglementation thermique (RT) en France   | 8   |
| Tableau I-2. Avantages et inconvénients de la thermographie IR   | 14  |
| Tableau II-1. Les valeurs initiales testées  | 70  |
| Tableau II-2. Les valeurs initiales testées  | 73  |
| Tableau II-3. Les différents murs de références sans isolant (P.T. Tsilingiris 2004)[92]                               | 77  |
| Tableau II-4. Les différents murs de références avec isolant (P.T. Tsilingiris 2004)[92]                               | 77  |
| Tableau II-5. Tableau de synthèse des résultats par la méthode inverse   | 79  |
| Tableau II-6. Tableau de synthèse des résultats de caractérisation des parois 7 à 9 par une paroi homogène équivalente | 80  |
| Tableau III-1. Sensibilité des fluxmètres utilisés   | 99  |
| Tableau III-2. Synthèse des résultats des différents paramètres thermophysiques  | 104 |
| Tableau III-3. Tableau de synthèse des résultats des différents essais   | 117 |
| Tableau III-4. Les résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion  | 118 |
| Tableau III-5. Valeurs de la diffusivité de référence et issues de la méthode Parker                                   | 119 |
| Tableau III-6. Tableau de synthèse des résultats de deux essais  | 122 |
| Tableau III-7. Les résultats de la procédure d'inversion   | 122 |
| Tableau III-8. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion  | 130 |
| Tableau III-9. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion  | 133 |
| Tableau III-10. Résultats de la procédure d'inversion  | 137 |
| Tableau III-11. Résultats de la procédure d'inversion  | 140 |
| Tableau III-12. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion   | 142 |
| Tableau III-13. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion   | 143 |
| Tableau III-14. Résultats de la méthode d'inversion  | 144 |

# Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1. Consommation d'énergie finale par secteur d'activités, en France (DGEMP 2010)[1]   | 2  |
| Figure I-1. a) Principe général de la mesure de propriétés thermo-physiques en régime in stationnaire – b) quatre principaux modes de perturbation thermique associés (C. Lorrette 2007)[14] | 11 |
| Figure I-2. Méthode de la plaque chaude gardée   | 18 |
| Figure I-3. Cellule de mesure de la conductivité thermique (I. Aboubou 2004)[25]   | 19 |
| Figure I-4. a) Principe de la méthode du fil chaud, b) Thermogramme associé (C. Lorrette 2007)[30]   | 21 |
| Figure I-5. Mesure par sonde thermique – méthode du a) plan chaud, b) ruban chaud et du c) disque chaud (C. Lorrette 2007)[14]   | 22 |
| Figure I-6. Schéma du dispositif expérimental  | 23 |
| Figure I-7. Thermogramme en face arrière, courbe de sensibilité réduite et temps de demi-montée (Techniques de l'ingénieur)[43]  | 25 |
| Figure I-8. Schéma de principe de la méthode flash   | 26 |
| Figure I-9. Composition du rayonnement reçu par la caméra infrarouge[58]   | 28 |
| Figure I-10. Caméra infrarouge SILVER™ 420 M   | 29 |
| Figure I-11. Impulsion d'excitation thermique  | 32 |
| Figure I-12. Montage expérimental pour la TP, la TM ou la TPP  | 33 |
| Figure I-13. FFT d'une impulsion de Dirac et de la Fonction rectangle  | 34 |
| Figure I-14. Schéma et l'image de l'appareil expérimental (G. Baldinelli 2010)[70]   | 35 |
| Figure I-15. Coupe verticale de la station d'essai (Université de la Calabre)[72]  | 36 |
| Figure I-16. Cellules climatisées (Puigverd de Lleida-Barcelona)[73]   | 36 |
| Figure I-17. Les températures extérieures, intermédiaires et intérieur de paroi en Novembre 1995[75]   | 37 |
| Figure I-18. Modules des fonctions $H_1$ théorique et expérimental   | 39 |
| Figure II-1. Schéma principe d'étude   | 44 |
| Figure II-2. Discrétisation de mur en m points pour $0 \leq x \leq e$  | 50 |
| Figure II-3. Schéma aux différences finies implicite   | 51 |
| Figure II-4. Schéma principe d'étude   | 52 |
| Figure II-5. Courbe de simulation  | 54 |
| Figure II-6. Schéma d'une paroi multicouche  | 55 |
| Figure II-7. Modélisation par différences finies de l'interface entre deux matériaux   | 56 |
| Figure II-8. Schéma implicite en différence finies à l'interface 1 et 2  | 57 |
| Figure II-9. Schéma implicite en différence finies à l'interface 2 et 3  | 58 |
| Figure II-10. Schéma d'une paroi multicouche et la paroi monocouche équivalente  | 61 |
| Figure II-11. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres   | 64 |
| Figure II-12. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (temps de montée)   | 65 |
| Figure II-13. Sensibilité des paramètres pour la période de refroidissement  | 66 |
| Figure II-14. Evolution de la sensibilité de la conductivité thermique en fonction de la chaleur volumique   | 68 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure II-15. Evolution de la sensibilité de la conductivité thermique en fonction du coefficient d'échange                     | 68  |
| Figure II-16. Evolution de la sensibilité de la chaleur volumique en fonction du coefficient d'échange                          | 69  |
| Figure II-17. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (paroi tri-couche)                           | 71  |
| Figure II-18. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (temps de montée)                            | 72  |
| Figure II-19. Sensibilité des paramètres pour la période de refroidissement   | 72  |
| Figure II-20. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres  | 74  |
| Figure II-21. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (phase montante de la température de sortie) | 74  |
| Figure II-22. Sensibilité des paramètres pour la période entre 22000 secondes et la fin de l'essai                              | 75  |
| Figure II-23. Schéma d'étude numérique  | 76  |
| Figure II-24. Cas d'une paroi simulée par méthode inverse   | 78  |
| Figure II-25. Courbes d'un mur multicouche par le mur équivalent  | 79  |
| Figure II-26. Schéma de principe de la procédure d'inversion  | 82  |
| Figure II-27. Interprétations géométriques du simplexe en petites dimensions  | 84  |
| Figure II-28. Schéma de la méthode du simplexe initial  | 85  |
| Figure III-1. KEITHLEY 2700   | 92  |
| Figure III-2. Centrale d'acquisition IDL100   | 92  |
| Figure III-3. Caméra SILVER 420M  | 93  |
| Figure III-4. Thermocouple de type T et Résistance de platine Pt100   | 94  |
| Figure III-5. Branchement différentiel de thermocouples   | 94  |
| Figure III-6. Montage pour mesure de température avec référence extérieur   | 95  |
| Figure III-7. Masse thermique à température constante   | 96  |
| Figure III-8. Exemple d'un capteur(15*15) et coupe d'une cellule de fluxmètre   | 97  |
| Figure III-9. Etalonnage flux métrique par la méthode du flux nul   | 98  |
| Figure III-10. Réponse en tension en fonction de la densité de flux   | 99  |
| Figure III-11. Carreau de plâtre  | 100 |
| Figure III-12. Béton cellulaire   |     |
| Figure III-13. Polystyrène  | 100 |
| Figure III-14. Plaque de plâtre   |     |
| Figure III-15. Dispositif expérimental de mesure pour caractériser un carreau de Plâtre   | 101 |
| Figure III-16. Exemple d'évolution des flux au cours de la détermination de la conductivité thermique                           | 103 |
| Figure III-17. Exemple d'évolution des flux au cours de la détermination de la chaleur massique                                 | 103 |
| Figure III-18. Dispositif expérimental  | 105 |
| Figure III-19. Mesure de l'éclairement par le luxmètre  | 106 |
| Figure III-20. Schéma de principe expérimental associé  | 107 |
| Figure III-21. Courbe de flux entrant et sortant en régime permanent  | 108 |
| Figure III-22. Scène thermique  | 109 |
| Figure III-23. la zone centrale   |     |
| Figure III-24. Température de la paroi après 50h de chauffage   | 109 |
| Figure III-25. L'écart type   | 110 |
| Figure III-26. Température mesurée par caméra et thermocouple d'une paroi monocouche  | 110 |
| Figure III-27. Température normalisée mesurée par caméra et thermocouple d'une paroi monocouche                                 | 111 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure III-28. Procédure expérimentale  | 112 |
| Figure III-29. Courbe de flux entrant sous forme d'un créneau   | 113 |
| Figure III-30. Courbe d'évolution de la température normalisée (mesure infrarouge)                        | 114 |
| Figure III-31. Courbes normalisées mesurée et simulée de carreau de plâtre                                | 114 |
| Figure III-32. Courbe d'un essai en regime transitoire  | 116 |
| Figure III-33. La courbe de coefficient d'échange en fonction de temps                                    | 116 |
| Figure III-34. Courbe expérimentale (Méthode flash)   | 119 |
| Figure III-35. Procédure expérimentale d'une paroi en béton armé  | 120 |
| Figure III-36. Courbe de flux entrant   | 121 |
| Figure III-37. Courbe de la température normalisée (mesure caméra)  | 121 |
| Figure III-38. Courbes mesurée et simulée d'un mur en béton armé  | 122 |
| Figure III-39. Dispositif expérimental d'une paroi tri-couche   | 124 |
| Figure III-40. Courbe de flux entrant et sortant en régime permanent d'une paroi tri-couche               | 124 |
| Figure III-41. Température de la paroi après 70h de chauffage   | 125 |
| Figure III-42. La zone d'observation  | 125 |
| Figure III-43. Courbes de température normalisée caméra et thermocouple d'une paroi tri-couche            | 126 |
| Figure III-44. Procédure expérimentale d'une paroi tri-couche   | 126 |
| Figure III-45. Photographie du système d'alimentation   | 127 |
| Figure III-46. Courbe d'un créneau de flux  | 128 |
| Figure III-47. Courbe d'évolution de la température normalisée d'une paroi tri-couche (mesure infrarouge) | 128 |
| Figure III-48. Courbe simulée et mesurée sur toute la montée  | 129 |
| Figure III-49. Dispositif expérimental d'une paroi tri-couche   | 130 |
| Figure III-50. Procédure expérimentale  | 131 |
| Figure III-51. Flux sous forme d'un créneau   | 132 |
| Figure III-52. Courbe de température normalisée   | 132 |
| Figure III-53. Courbe de température normalisée mesurée et simulée  | 133 |
| Figure III-54. Le support et son positionnement   | 135 |
| Figure III-55. La face extérieure et le positionnement de la caméra                                       | 135 |
| Figure III-56. Le système d'acquisition à l'extérieur de logement   | 135 |
| Figure III-57. Le flux entrant sous forme d'un créneau  | 136 |
| Figure III-58. La température normalisée ( mesure caméra)   | 136 |
| Figure III-59. Courbe de température normalisée mesurée et simulée  | 137 |
| Figure III-60. Paroi bicouche   | 138 |
| Figure III-61. Le flux entrant sous forme d'un créneau  | 139 |
| Figure III-62. La température normalisée ( mesure caméra)   | 139 |
| Figure III-63. Courbe de température normalisée mesurée et simulée  | 140 |
| Figure III-64. Courbe normalisée simulée et mesurée de mur equivalent                                     | 141 |
| Figure III-65. Courbes normalisées simulée et mesurée   | 142 |
| Figure III-66. Courbes de température normalisée simulée et mesurée                                       | 143 |

---

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Actuellement, la communauté scientifique internationale ne conteste quasiment plus le réchauffement climatique puisque des effets sensibles sont désormais observables à l'échelle planétaire. Parmi ces effets, on note une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et des océans, une fonte massive de la glace et une élévation du niveau de la mer. Ainsi, si aucune initiative n'est entreprise pour limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES), la Terre pourrait subir un réchauffement global de l'ordre de 1,8°C à 4°C d'ici 2100 (prévisions du groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat GIEC). Pour contenir le réchauffement climatique à moins de 2°C, tout en respectant le développement des pays du Sud, les experts du GIEC préconisent aux pays industrialisés de diviser par quatre leur émissions de GES par rapport à leur niveau de 1990 [1].

La France s'est engagée à diviser ses émissions de GES d'un facteur 4 d'ici 2050. Le secteur le plus consommateur d'énergie est celui du résidentiel-tertiaire avec une consommation de 68 Mtep (Mégatonne d'équivalent pétrole) en 2010, soit 43 % de l'énergie finale consommée en France, ce qui représente 23% des émissions nationales de CO<sub>2</sub>. L'Etat se fixe comme objectif de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38% d'ici à 2020. De plus, sa contribution semble appelée à augmenter au cours des prochaines années en raison de la croissance des exigences en matière de confort. Cette inquiétude a conduit à la mise en place d'actions spécifiquement destinées à alléger la consommation d'énergie dans le bâti. Les chiffres cités ci-dessus, placent le secteur du résidentiel-tertiaire devant les transports (31%), l'industrie (24%) et l'agriculture (2%) au niveau de la facture énergétique. Les deux tiers de l'énergie consommée par le résidentiel-tertiaire sont consacrés au chauffage, 20% à l'électricité spécifique (éclairage, climatisation...) et 14% à l'eau chaude sanitaire et la cuisson (Figure I.1, [1]).

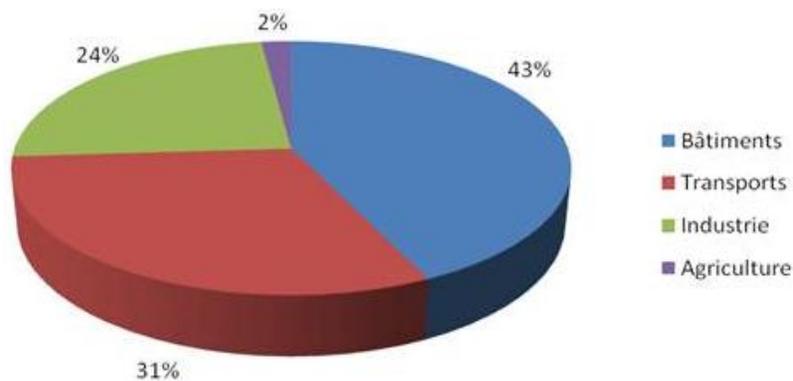


Figure I.1. Consommation d'énergie finale par secteur d'activités, en France (DGEMP 2010)[1]

Concernant l'émission de gaz à effet de serre, le secteur du bâtiment se situe en deuxième position derrière les transports parmi les secteurs responsables. Les consommations du secteur résidentiel-tertiaire sont dues principalement aux logements pour à peu près les deux tiers, et

puisque le taux de renouvellement des habitations est très faible, l'objectif « facteur 4 » ne peut être atteint que grâce à une réglementation stricte, sur la construction des bâtiments neufs et mais également sur la réhabilitation du parc de logements existants qui est le plus énergivore. Sur cette réglementation thermique RT 2005, une attention particulière est apportée à la qualité d'isolation et à l'amélioration des équipements thermiques utilisés. Depuis une trentaine d'années des progrès importants ont été faits dans les logements neufs grâce à l'instauration des réglementations thermiques en vigueur depuis 1973 alors que les bâtiments plus anciens restent très mal isolés. Pour atteindre son objectif, la France prévoit la rénovation complète de 400 000 logements chaque année à compter de 2013. L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments anciens constitue un levier d'action essentiel dans l'atteinte des objectifs nationaux de réduction des émissions de GES.

La réglementation thermique imposée en France, se traduit par le respect des 3 exigences suivantes:

- La consommation conventionnelle d'énergie doit être inférieure à une consommation de référence, valeurs établies en énergie primaire (suivant les zones) ;
- La température intérieure calculée en été doit être inférieure à une température de référence (doit être inférieure ou égale à celle du même bâtiment ayant des caractéristiques thermiques de référence) ;
- Des performances minimales « gardes Fou » sont requises pour une série de composants ou (Isolation, ventilation, système de chauffage...).

L'entrée en vigueur de la réglementation thermique 2012 doit permettre à toutes les constructions neuves d'atteindre une consommation d'énergie primaire à un maximum de 50 kWh/m<sup>2</sup>/an en moyenne contre 150 kWh/m<sup>2</sup>/an auparavant. La RT 2012 s'applique à tous les bâtiments neufs et aux locaux chauffés plus 12°C, hormis les piscines, les chambres froides et les bâtiments d'élevages. Suppression des gardes fous sur le bâtiment, la RT 2012 est avant tout une réglementation des résultats et non moyens.

Pour améliorer la performance énergétique des Bâtiments dans l'Union Européenne, une directive, signée en 2003, préconise de prendre en considération tant les conditions climatiques extérieures et les particularités locales que les exigences en matière de climat intérieur ou le rapport coût/efficacité. L'objectif est de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments en Europe, sans provoquer d'énormes dépenses supplémentaires, tout en améliorant sensiblement le confort. Cet instrument législatif communautaire impose aux états membres de fixer des seuils de consommation énergétique maximale pour le neuf, comme pour l'existant, avec des exigences progressives, à utiliser un processus de certification (étiquette énergie) des bâtiments pour rendre la consommation énergétique beaucoup plus visible pour les propriétaires, les locataires et les utilisateurs.

Dans les bâtiments existants, le plus gros potentiel d'économies d'énergie réside dans l'enveloppe. L'expérience montre que les immeubles anciens présentent souvent de gros défauts thermiques.

Pas de Calais Habitat (PCH) est l'Office Public d'Aménagement et de Construction du Pas-de-Calais (OPAC 62) depuis 1987. Sa mission s'est élargie en 2001, pour englober la fonction d'opérateur urbain. Doté d'un parc immobilier de 38000 logements, PCH construit près de 700 logements neufs par an pour répondre à une forte demande des habitants du département. Ses opérations de renouvellement urbain intègrent à la fois réhabilitation, construction de logements, création de services, aménagement d'axes de communication et de parcs paysagers. En juin 2006, il a obtenu la certification ISO 9001 : 2000, pour l'ensemble de ses activités. Aujourd'hui, face au poids croissant de la facture énergétique de ses locataires, à l'iniquité économique et aux différences de performances de ses logements ainsi qu'aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et du projet de loi Grenelle Environnement, PCH souhaite faire une étude préalable sur les bâtiments. Par conséquent, dans une démarche d'amélioration d'un bâtiment existant, la connaissance du comportement thermique réel d'une paroi est problématique. De ce fait, il est important pour optimiser économiquement les opérations de réhabilitation de pouvoir caractériser in situ les parois de bâtiment.

Pour caractériser exactement cette inertie, il est nécessaire de passer par une connaissance parfaite des paramètres thermiques des éléments de l'enveloppe du bâtiment. Ces données sont importantes pour les futures réglementations qui prévoient de prendre en compte l'inertie des enveloppes pour satisfaire le confort d'été et l'optimisation des consommations énergétiques.

Notre étude consiste à étudier le transfert thermique à travers des parois ou des éléments de parois. Deux types de parois sont étudiés : Les essais réalisés en laboratoire sont concentrés surtout sur une paroi monocouche, consistent à déterminer les paramètres thermophysiques à partir de la courbe expérimentale en utilisant la procédure inverse. La suite du travail consiste à caractériser thermiquement les parois multicouches en laboratoire avant d'étudier des parois composites in situ.

L'objectif de ce travail est de mettre au point une méthode de caractérisation thermique d'une paroi in situ basée sur une application de la thermographie infrarouge active. La démarche envisagée consiste à solliciter une face d'une paroi avec créneau de flux et à observer les modifications du champ de température sur l'autre face. A partir de signaux de flux et de températures mesurées aux limites de la paroi, les propriétés thermophysiques de la paroi seront estimées par méthode inverse.

L'identification des paramètres thermiques de la paroi peut être réalisée en passant par une démarche d'inversion. Un modèle numérique décrivant la réponse de la paroi est élaboré. Il est intégré dans un schéma d'inversion dont le rôle est d'identifier les paramètres physiques de la paroi testée.

Le premier chapitre est dédié à une analyse bibliographique très large dans laquelle nous présentons les différentes techniques de détermination de la conductivité, la résistance thermique, l'effusivité et de la diffusivité thermique. La suite du chapitre est consacrée à la thermographie infrarouge appliquée à la caractérisation des parois de bâtiment. Une dernière partie traite plus

particulièrement de l'état des travaux et des connaissances concernant les techniques appliquées aux caractérisations des parois in situ.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la présentation de la méthode numérique et du dispositif de mesure de la conductivité, de la chaleur volumique et du coefficient d'échange global surfacique. Le transfert de chaleur au sein du dispositif est modélisé par la méthode inverse. Ce modèle est alors placé au centre d'un algorithme d'optimisation qui vise à permettre d'identification des paramètres thermophysiques des parois. La comparaison des fonctions de transfert théoriques et expérimentales permet l'identification simultanée des paramètres thermophysiques de l'échantillon. L'outil numérique présente également l'avantage d'analyser et de quantifier la réponse fonctionnelle du dispositif vis-à-vis des erreurs inévitables qui entachent la détermination des caractéristiques thermophysiques des parois. Les étapes de l'élaboration d'un modèle numérique en différences finies sont détaillées en partant des équations générales de diffusion de la chaleur en régime de conduction unidirectionnel. Une étude de sensibilité permet de discuter des potentialités d'identification des paramètres.

Le troisième chapitre, est destiné à présenter le dispositif de mesure de la conductivité, de la chaleur volumique et du coefficient d'échange et les résultats expérimentaux obtenus sur des parois spécialement réalisées pour l'étude de laboratoire. La méthode a été appliquée à des parois homogènes en carreaux de plâtre et multicouches mise en place au laboratoire. Les résultats issus de cette procédure d'inversion ont été comparés à des valeurs de référence obtenues à partir d'une procédure classique (NF EN 12664-méthode fluxmétrique, [2]). La technique est ensuite expérimentée in situ.

Une étude de l'impact de l'erreur des paramètres supposés connus du modèle thermique utilisé sur les valeurs identifiées est aussi présentée. Cette phase nous permettra en même temps de valider notre modèle numérique et notre technique de caractérisation par thermographie infrarouge active.

Les enseignements ont permis, après la conclusion, de dégager et de proposer des développements futurs et des perspectives.

# **Chapitre I:**

## **Etudes bibliographiques**

## **I.1 Introduction**

Dans le contexte environnemental actuel et depuis sa signature, le protocole de Kyoto sur les changements climatiques a engagé les Etats signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5,2% par rapport aux niveaux de 1990 durant la période 2008-2012. Les États membres de l'Union Européenne doivent réduire collectivement leurs émissions de gaz à effet de serre de 8% entre 2008 et 2012. D'autre part, l'analyse des secteurs responsables de la plus grande partie de la consommation d'énergie et des principales émissions de gaz à effet de serre (G.E.S) met en évidence le secteur du bâtiment qui représente à lui seul le plus grand consommateur d'énergie, devant le secteur des transports. De plus, sa contribution semble appelée à augmenter au cours des prochaines années en raison de la croissance des exigences en matière de confort. Cette inquiétude a conduit à la mise en place d'actions spécifiquement destinées à alléger la consommation d'énergie dans le bâti.

La consommation des bâtiments représente près de la moitié de l'énergie utilisée en France, avec plus de 100 Mtep/an. Il importe avant tout de poursuivre vigoureusement les économies d'énergie réalisées dans les bâtiments existants avant 1975 ou construits avec des normes insuffisamment durcies dans les années 1975-1995. En effet, la destruction des immeubles, extrêmement lente en France, aura peu d'effet, même à long terme.

Si les bâtiments sont énergivores c'est parce que la plus grande partie de ces derniers a été construite à une période où le coût de l'énergie était bas, et la sensibilité à l'environnement était quasi inexistante. Suite au premier choc pétrolier, la première réglementation (1974) est apparue en imposant une performance énergétique minimale aux constructions neuves. Cette réglementation a eu pour effet de stabiliser la consommation d'énergie, mais ne l'a pas fait diminuer.

## **I.2 Enjeux liés aux choix des bâtiments anciens**

On estime que, au sein du secteur du bâtiment, le parc existant aujourd'hui représenterait toujours deux tiers du parc de 2050 [source : Habitat et Développement Durable : bilan rétrospectif et prospectif, avril 2001, [3] ], compte tenu d'un renouvellement annuel relativement faible. Ainsi, pour atteindre l'objectif général de réduction d'un facteur 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050, il est évident que l'essentiel de l'effort doit porter sur la réhabilitation énergétique du parc bâti existant.

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments existants s'impose comme une nécessité. Comme il a été déjà précisé, les Règlements Thermiques successives (Tableau I-1) ont eu comme objectif principal de réduire les consommations énergétiques des bâtiments neufs. Aujourd'hui, la RT 2012, dans le cadre de la mise en application des lois liées au Grenelle de l'environnement, vise un niveau de performance se référant au label BBC-Effinergie (bâtiment

basse consommation), soit une consommation moyenne en énergie primaire inférieure à 50 kWhEP/m<sup>2</sup>/an.

| Année | Caractéristiques  |
|-------|---|
| 1974  | L'objectif est de répondre rapidement à l'augmentation du prix de l'énergie. Pour ce faire, cette réglementation consistait à calculer un coefficient G de déperditions globales à travers l'enveloppe sans se préoccuper des consommations. Applicable aux bâtiments neufs   |
| 1982  | A partir de cette date, les apports solaires et internes sont déduits des besoins de chauffage (coefficient B). Applicable aux bâtiments neufs  |
| 1988  | Alors que jusqu'à présent, on parlait uniquement de besoins, on caractérise désormais les consommations, en tenant compte des rendements des systèmes via le Coefficient C. Applicable aux bâtiments neufs  |
| 2000  | Elle s'exprime sous forme de performances à atteindre. Une consommation de référence est établie. La consommation du bâtiment étudié doit être inférieure à la consommation de référence ou à des performances minimales (garde-fous). Applicable aux bâtiments neufs   |
| 2005  | Il y a la RT 2005 pour le neuf, et en plus, pour l'existant on voit apparaître les premiers textes : elle renforce les exigences de performances minimales lors du remplacement de composants de l'enveloppe ou d'équipements énergétiques. Elle impose également, pour les opérations importantes, des études préalables de solutions durables. Ces études seront prescrites à partir du 1er janvier 2008 dans le neuf et du 1er avril 2008 pour les réhabilitations lourdes. Enfin, les bâtiments publics d'une certaine taille devront afficher un diagnostic de performance énergétique à partir du 2 janvier 2008. |

*Tableau I-1. Évolution de la Réglementation thermique (RT) en France*

Un fort potentiel d'économies d'énergie est possible dans le patrimoine bâti notamment dans les bâtiments datant d'avant la première réglementation thermique de 1974. Ces bâtiments sont très « énergivores » et leur consommation d'énergie est estimée à un niveau 1,6 fois plus élevé que celle des bâtiments neufs [4].

Pour le résidentiel, le renouvellement du parc, lié à la destruction de logements, ne représente qu'environ 3 pour mille du parc existant [5] – 0,1 à 0,2% par an selon les chiffres du Grenelle. Il était donc urgent de se focaliser sur la rénovation durable des bâtiments anciens, et c'est ce qui a été initié dans la réglementation thermique « RT 2005 ». Malgré une évolution certaine, la nouvelle réglementation RT 2012 se limite aux bâtiments de plus de 1000 m<sup>2</sup> faisant l'objet de travaux de réhabilitation importants. Le décret prévoyait une mise en application de cette obligation le 28 Octobre 2011. Pour les bâtiments inférieurs à 1000 m<sup>2</sup>, la réglementation était à appliquer élément par élément : des exigences de performances minimales sont imposées lors du remplacement de composants de l'enveloppe (fenêtres, isolation thermique) ou d'équipements énergétiques, depuis le 1<sup>er</sup> novembre 2007. Son objectif est de faire disparaître du marché les produits de construction ou équipements techniques obsolètes en terme de performances énergétiques, afin de privilégier la diffusion la plus large possible dans le parc existant, des meilleurs produits disponibles, et d'impulser une rénovation dans les bâtiments de grande taille.

Néanmoins, on peut souligner quelques limites de cette réglementation : la nature des matériaux à utiliser n'est pas précisée et il n'y a pas de préconisations sur les techniques de construction et de rénovation à privilégier.

Un autre dispositif juridique a été développé pour les bâtiments existants : le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) (Ministère du logement et de la ville, 2007). La notion de diagnostic de performance énergétique des bâtiments est issue de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments [6], [7], [8] et [9] vise à donner un cadre européen aux politiques nationales de réduction des consommations d'énergie des bâtiments existants et à construire, dans la perspective de la mise en œuvre du protocole de Kyoto.

Le Diagnostic de Performance Énergétique (DPE) a pour objectifs pour le futur propriétaire ou le futur locataire [10]:

- D'informer sur la consommation énergétique du logement et le coût moyen de celle-ci.
- De sensibiliser aux conséquences de sa consommation en énergie sur le climat de notre planète, en repérant cette consommation et les émissions de CO<sub>2</sub> qui en résultent, d'une part sur une étiquette « énergie » et d'autre part sur une étiquette « climat », suivant une échelle de A (logement économe) à G (logement énergivore).
- De donner des conseils pour maîtriser sa consommation sous forme de recommandations de gestion et de comportement; et au futur propriétaire des recommandations de travaux d'économie d'énergie ou de lutte contre l'effet de serre.

Le chantier des bâtiments existants est d'ailleurs d'actualité avec le Grenelle de l'environnement lancé par le gouvernement qui projette « d'engager le chantier ambitieux de rénovation des bâtiments, afin de réaliser des économies d'énergie de 20% dans les bureaux et de 12% dans les logements privés d'ici à cinq ans, et d'un tiers d'ici 2020, a indiqué le climatologue Jean Jouzel » cité par [11].

La consommation énergétique d'immeubles sans chauffage collectif est nettement plus faible que les immeubles avec chauffage collectif : alors qu'ils représentent 24,3 % des logements, ils ne consomment que 11,5 % de l'énergie dédiée au chauffage [12], montrent que les logements anciens représentent l'enjeu en matière de réduction des consommations de chauffage avec environ 70 % de la consommation totale de chauffage. Par ailleurs, les maisons individuelles anciennes avec environ 47 % de la consommation de chauffage peuvent être identifiées comme une priorité en matière d'économies d'énergie.

De manière générale, les véritables consommateurs d'énergie sont les bâtiments anciens, c'est là que les pertes d'énergie sont les plus importantes. L'expérience montre que les immeubles anciens présentent souvent de gros défauts thermiques. Dans les bâtiments existants, le plus gros potentiel d'économies d'énergie réside dans l'enveloppe [4].

Il est important de structurer et réaliser une réhabilitation globale et correcte pour permettre d'éviter les dommages à la construction et les dégâts qu'ils entraînent. Ceci pourrait aussi

augmenter la durée de vie des différents éléments de construction, améliorer le confort et le climat ambiant et réduire les nuisances sonores. Part ailleurs, il est conseillé d'utiliser des matériaux de construction mieux tolérés par les habitants, créer des pièces plus claires recevant plus de lumière du jour, contribuer à améliorer la structure sociale du quartier ou encore revaloriser le quartier. En même temps, il est nécessaire de développer l'aspect architectural du bâtiment, préserver et augmenter la valeur de l'immeuble et réduire les frais énergétiques. Enfin, cette structuration de réhabilitation peut aussi permettre une meilleure exploitation des volumes : réduire les pertes d'énergie dans le bâtiment, éliminer les ponts thermiques, utiliser économiquement les ressources énergétiques et préserver notre environnement.

### **I.3 La problématique de caractérisation de parois**

Pour répondre à des enjeux environnementaux et économiques cruciaux, la consommation énergétique des bâtiments est devenue une préoccupation majeure des pouvoirs publics, de l'ensemble des acteurs de la construction, des gestionnaires de bâtiments et de leurs usagers. Parmi toutes les sources de déperditions, la transmission de la chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment est un paramètre important de sa performance énergétique. Dans le cas de nouvelles constructions, les concepteurs prévoient des parois à fort pouvoir isolant. Toutefois, une fois mises en œuvre, les parois peuvent présenter des performances moindres. Le soin apporté à la réalisation, le vieillissement des matériaux, la présence d'humidité peuvent diminuer la résistance thermique de la paroi. Des matériaux issus de sous produits de l'agriculture ou de produits recyclés sont maintenant plus largement utilisés. Ils présentent souvent une forte hygroscopie, un fort pouvoir de tassement et entraînent une plus forte variabilité des caractéristiques des parois. Pour les bâtiments anciens, le coût d'une rénovation thermique complète peut être très élevé. Lors d'un programme de réhabilitation, les investissements doivent souvent être optimisés. La connaissance des propriétés thermiques est un point essentiel de la phase de diagnostic de la paroi réelle. Elle peut en outre aider au choix d'une stratégie de rénovation. Ces problématiques montrent l'intérêt de l'estimation in situ des propriétés thermiques de parois. Différentes approches ont été abordées pour y aboutir.

Dans une démarche d'amélioration d'un bâtiment existant, il est important d'optimiser économiquement les opérations de réhabilitation. La connaissance de la constitution de l'enveloppe est essentielle dans la démarche de priorisation des interventions. La caractérisation in situ de ces parois pourrait être dans ce cadre un outil très intéressant pour les gestionnaires de parcs de logements.

Le développement de nouvelles méthodes de caractérisation basée sur les techniques infrarouges a permis de donner un nouvel élan au contrôle non destructif. Elles sont connues sous le terme de méthodes photo-thermiques. La paroi à caractériser est soumise à une excitation lumineuse et sa réponse thermique est enregistrée. A partir du thermogramme obtenu, il est possible de déterminer la diffusivité thermique. La méthode ne permet pas d'atteindre la chaleur volumique et la conductivité thermique du matériau qui permettent une caractérisation complète.

D'un point de vue théorique, une excitation impulsionnelle sollicite toutes les dynamiques et provoque une réponse riche en informations. Pour garantir un rapport signal sur bruit de la réponse suffisant sur toutes les fréquences utiles, il est nécessaire d'imposer une énergie importante. Ceci peut occasionner des dégradations de la paroi. Il est difficilement envisageable d'appliquer cette approche sur des parois de bâtiments.

Les méthodes de caractérisation thermo-physiques sont classées en 3 grands groupes [13]:

- Les méthodes en régime permanent.
- Les méthodes en régime quasi établi.
- Les méthodes en régime variable.

Pour déterminer les propriétés thermophysiques d'un corps, il est nécessaire de créer un déséquilibre thermique du milieu qui peut être stationnaire ou non selon la méthode employée. L'analyse de la réponse en température conduit ensuite à l'identification des grandeurs (Figure I-1, [14]).

Il pourra s'agir de :

- La conductivité thermique  $\lambda$ , qui caractérise l'aptitude du milieu à conduire la chaleur.
- La capacité thermique volumique ( $\lambda \cdot c_p$ ), qui traduit le pouvoir du milieu à emmagasiner l'énergie.
- La diffusivité thermique  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ , qui traduit la capacité d'un matériau continu à transmettre un signal de température d'un point à un autre de ce matériau. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique).
- L'effusivité thermique  $b = \sqrt{\lambda \rho c}$ , qui traduit la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement.

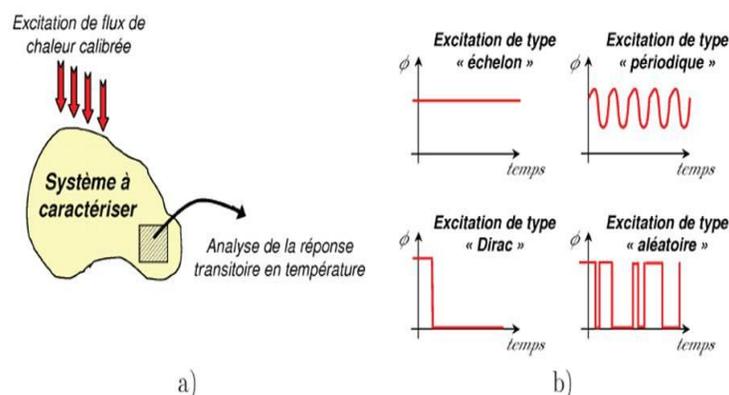


Figure I-1. a) Principe général de la mesure de propriétés thermo-physiques en régime in stationnaire – b) quatre principaux modes de perturbation thermique associés (C. Lorrette 2007)[14]

Pour l'estimation de propriétés thermo-physiques il est nécessaire d'établir un modèle mathématique et numérique du problème direct du transfert de la chaleur dont on compare les résultats à la mesure expérimentale de la température (méthode inverse [15]). L'écriture de ce modèle contraint à préciser la géométrie du système, les conditions aux frontières à appliquer ainsi que la répartition initiale du champ de température si celui-ci ne s'effectue pas en régime permanent, ni établi. Cet ensemble de conditions définit une forme simplifiée de l'équation de la chaleur et des conditions aux limites. Bien souvent, plusieurs hypothèses simplificatrices sont formulées pour aboutir à une solution. Pour diverses raisons, ces hypothèses ne sont qu'imparfaitement réalisées lors de l'expérience (difficulté d'imposer des conditions aux limites parfaitement définies, imprécision sur la position des capteurs, etc). Il en découle alors une erreur systématique qu'il est difficile d'évaluer. Pour cette raison, un des enjeux de l'identification repose sur la description la plus précise possible de l'expérience en utilisant des outils mathématiques simples et appropriés.

### I.3.1 Les grandes classes de méthodes

Pour classer les nombreuses méthodes de mesure, différents critères sont envisageables. Le plus naturel consiste à réaliser deux grands groupes : (i) les méthodes en régime permanent où le temps n'intervient pas et (ii) les méthodes en régime instationnaire qui contrairement aux précédentes, dépendent du temps.

Dans la première catégorie, la conductivité thermique est obtenue directement par le résultat de la mesure. C'est notamment l'exemple de la méthode de la plaque chaude gardée détaillée plus loin. Dans la seconde catégorie, qui regroupe les méthodes les plus répandues, les mesures sont effectuées en fonction du temps et permettent de ce fait l'identification de plusieurs paramètres comme la conductivité, la diffusivité, l'effusivité ou d'autres groupements de  $\lambda$  et  $\rho.c_p$ . Les méthodes se différencient par :

- Le mode d'excitation appliqué à l'échantillon qui peut être de type photo-thermique (laser) ou électrothermique (effet joule) ;
- La nature de la perturbation ;
- Le type de mesure (température, flux ou les deux) et sa localisation.

A travers un panorama complet des différentes méthodes de caractérisation thermique des solides, Degiovanni établit un classement avisé selon ces trois critères [16], [17].

Dans nos travaux, nous distinguerons les méthodes dites « sans contact » des méthodes « avec contact ». La première catégorie fait référence à une expérience où l'excitation et la mesure de la réponse en température sont éloignées de l'échantillon. La plupart d'entre elles sont fondées sur la détection optique des effets thermiques. C'est le cas des méthodes flash. Les autres induisent un contact intime entre le dispositif d'excitation, les sondes de mesure et l'échantillon. C'est le cas des méthodes de type fil chaud/plan chaud. Ces deux approches sont utilisées pour la caractérisation thermique à haute température.

## I.4 Thermographie infrarouge

L'utilisation de la plupart des méthodes photothermiques et photoacoustiques se limitent à une caractérisation locale d'une paroi. Cependant, il est possible de produire une image plus étendue de la réponse photothermique de l'échantillon en mettant en mémoire tout un ensemble de mesures ponctuelles et successives à l'aide d'imageurs infrarouges à balayage vidéo (caméra thermique). Son principe consiste à éclairer l'échantillon de façon relativement uniforme à l'aide d'une lampe flash (ou d'une série de lampes) pour provoquer un régime thermique transitoire au sein de la paroi à étudier, puis à saisir une image, de la scène observée à des intervalles de temps successifs.

La thermographie infrarouge est une technique de cartographie spatiale et temporelle des températures, dans le spectre du rayonnement infrarouge (AFNOR A 09-400 1991, [18]). De façon plus imagée, c'est une méthode qui permet de voir l'invisible, de le qualifier et de le quantifier [19].

Il existe trois types de capteurs dans les utilisations infrarouges radiomètres, scanners et caméras :

- Les radiomètres qui réalisent une mesure ponctuelle. Ils sont généralement utilisés pour effectuer un suivi temporel d'un point ou d'une zone précise ;
- Les scanners qui réalisent une mesure le long d'un profil. Leur mise en œuvre nécessite de les positionner sur un support qu'il faudra déplacer avec une vitesse « maîtrisée » afin d'obtenir le thermogramme d'une scène ;
- Les caméras et les imageurs thermiques qui réalisent des mesures d'une scène rectangulaire ou carrée. Les imageurs se distinguent des caméras par le fait qu'ils permettent uniquement de visualiser des variations spatiales de la luminance, alors que les caméras sont des appareils de mesure de température.

Nous avons choisi de travailler avec une caméra infrarouge distribuée par CEDIP (modèle SILVER©, modèle 420 M). Par la suite, nous verrons les principaux avantages de ce type d'appareil.

La radiométrie photo-thermique consiste à imposer un flux d'énergie (visible ou non, localisé ou étendu) à la face avant d'un échantillon, ce qui va provoquer un échauffement. Ce dernier, induit alors une variation transitoire (dépendant de la forme de l'excitation : impulsionnelle, sinusoïdale, aléatoire,...) de l'émission infrarouge de l'échantillon. Celle-ci, fortement dépendante des propriétés optiques (absorption volumique, émissivité infrarouge), thermiques (diffusivité thermique, effusivité thermique) et des caractéristiques géométrique (épaisseur) de l'échantillon, est mesurée à l'aide d'un radiomètre et permet de caractériser le matériau.

La thermographie infrarouge permet une mesure globale et sans contact de la température d'objets présents dans la scène thermique analysée [20].

La thermographie s'est ainsi imposée comme la méthode de référence pour le contrôle de nombreuses applications [21] telles que le contrôle d'installations électriques ou le contrôle de l'isolation thermique des bâtiments. Dans ce type d'applications, les éléments des scènes thermiques observées sont naturellement émetteurs de chaleur. C'est par l'observation des variations de flux thermique dans la scène que l'opérateur effectue le diagnostic.

Les avantages et les inconvénients de la thermographie infrarouge couramment cités dans la littérature sont résumés dans le tableau suivant :

| Avantages  | Inconvénients  |
|--|--|
| Mesure sans contact                                      | Connaissance de paramètres environnementaux (Températures, Distance, Emissivité des surfaces...) |
| Cartographie 2D et évolution temporelle des températures |  |
| Méthode surfacique à grand rendement                     | Conditions météorologiques favorables  |
| Mise en œuvre rapide                                     |  |
| Hautes températures possibles                            | Accessibilité de la scène thermique  |
| Possibilité de mesure sur des pièces en mouvement        |  |

Tableau I-2. Avantages et inconvénients de la thermographie IR

### I.4.1 Caméra infrarouge

On trouve dans le marché deux grandes catégories de caméras infrarouges : les caméras à balayage et les caméras à matrice de détecteurs. Les systèmes à balayage sont des systèmes qui utilisent un petit nombre de détecteurs (un seul pour la plupart), ils comportent des miroirs et un dispositif de balayage afin de "déplacer" le champ de vision du détecteur dans l'espace bidimensionnel et produire ainsi une image. Les caméras à matrice de détecteurs ont des milliers de détecteurs rangés dans une grille bidimensionnelle. Chacun des détecteurs voit une partie de la scène thermique et il n'y a donc besoin d'aucun dispositif mécanique de balayage. Le signal fourni par chacun des détecteurs est traité par des multiplexeurs électroniques; le signal résultant sera soumis à divers traitements afin de créer une image thermographique. Indifféremment de la catégorie dont elle fait partie, une caméra infrarouge présente toujours trois composants essentiels: le détecteur, le système optique et le circuit électronique [22].

Un détecteur de rayonnement transforme un signal optique incident, fonction de paramètres d'espace et de temps (qui peut être un flux, un éclaircissement ou toute autre grandeur traduisant une énergie électromagnétique) en signal électrique. Il existe deux utilisations des détecteurs: en récepteurs de flux (il s'agit alors de radiométrie) qui réalisent l'intégration spatiale du signal optique et donnent une réponse fonction du temps, et en récepteurs d'images pour lesquels l'intégration du signal porte sur le temps, la réponse étant fonction des variables d'espace. La

limitation de la détection des bas niveaux de rayonnement est due à la superposition d'une composante aléatoire (le bruit du signal de sortie). L'évaluation du rapport entre le signal de sortie et le bruit permet de donner un critère de qualité de la détection. Ce rapport doit être aussi élevé que possible.

Une mesure de température, effectuée à l'aide d'une caméra infrarouge, demande une certaine précaution. De nombreux effets apparaissent suivant les conditions de la mesure. L'effet de "vignettage" par exemple est perceptible à chaque expérience et peut fausser la mesure. Les capteurs infrarouges dans la caméra enregistrent, non seulement la température de l'objet observé, mais aussi la température de la lentille. Ainsi les bords de l'image peuvent être plus chauds que son centre à cause de cette variation de température. Ce phénomène survient lorsque l'objet observé est plus froid que la température de la caméra (température en relation avec la température ambiante). Le phénomène inverse se produit lorsque la température de l'objet est plus chaude que celle de la caméra. Pour d'autres raisons, comme le bruit (thermique et électronique) est généré par les capteurs infrarouges, une calibration est recommandée avant chaque série d'expériences.

## **I.4.2 Le rayonnement infrarouge**

L'énergie infrarouge est une fraction du rayonnement appelé spectre électromagnétique. Le spectre électromagnétique contient les rayons gamma, les rayons X, l'ultraviolet, le visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio.

L'infrarouge est la fraction du spectre électromagnétique comprise entre le visible et les micro-ondes. Donc, les ondes infrarouges ont une longueur d'onde ( $1\mu\text{m} - 1\text{mm}$ ) plus grande que le visible ( $450\text{nm} - 700\text{nm}$ ) et plus petite que les micro-ondes ( $1\text{mm} - 1\text{m}$ ). La source primaire du rayonnement infrarouge est le rayonnement thermique, autrement dit, la chaleur. En thermographie infrarouge uniquement deux parties du spectre infrarouge sont généralement utilisées. Il s'agit, d'une part, de ce qu'on appelle le proche infrarouge dans la bande  $3\mu\text{m} - 5\mu\text{m}$  (le cas de notre caméra SILVER©, modèle 420 M ) ce qui correspond au domaine de travail des caméras infrarouges à courte longueur d'onde (Short Wave), et d'autre part, l'infrarouge lointain, domaine où les caméras travaillent dans la bande  $7,5\mu\text{m} - 13\mu\text{m}$  (Long Wave).

Les caméras infrarouges fournissent une image thermique. Le contraste dans une image infrarouge est proportionnel au contraste thermique de l'objet observé. Il est bien évident que l'observation est d'autant plus intéressante que le système caméra est capable de discriminer des écarts de température faibles. Cette capacité est liée à la résolution thermique du système infrarouge.

La résolution spatiale définit la dimension des détails de l'objet qui sont à la limite de la perception, et l'éclairement équivalent au bruit représente l'énergie minimale à fournir au système pour qu'il délivre un signal au moins égal à son bruit propre. La résolution spatiale dépend de la taille du pixel, il est généralement en conflit avec le rapport signal-sur-bruit (SNR). Plus le pixel

est petit, plus la résolution spatiale est élevée, mais plus le rapport signal-sur-bruit est bas. Pour les caméras thermographiques, il existe plusieurs paramètres qui établissent le rapport entre la distance de l'objet ausculté et la taille des pixels. En ce qui concerne le choix du bon objectif, il convient de prendre en compte les valeurs suivantes :

- NETD : Sensibilité thermique (caméra infrarouge haute résolution)
- HFOV : L'étendue horizontale du champ d'observation total sur l'objet
- VFOV : L'étendue verticale du champ d'observation total sur l'objet
- IFOV : La taille des pixels individuels sur l'objet
- MFOV : La plus petite recommandée de l'objet, 3x3 Pixels

Ainsi un objet de dimension angulaire supérieure à celle correspondant à la résolution spatiale du système émettant une énergie infrarouge, telle que l'éclairement produit au niveau de la pupille d'entrée est supérieur à l'éclairement équivalent au bruit du système, a toutes les chances d'être restitué correctement si la différence de température apparente entre lui-même et son environnement est supérieure à la résolution thermique. La température apparente est celle qu'aurait un corps noir placé dans le vide au même endroit que l'objet et produisant le même effet sur le capteur de rayonnement - le détecteur.

Il existe alors une correspondance unique entre le signal électrique délivré et la température apparente de l'objet.

Nous distinguerons les méthodes dites « sans contact » des méthodes « avec contact ». La première catégorie fait référence à une expérience où l'excitation et la mesure de la réponse en température sont éloignées de l'échantillon. La plupart d'entre elles sont fondées sur la détection optique des effets thermiques. C'est le cas des méthodes flash. Les autres induisent un contact intime entre le dispositif d'excitation, les sondes de mesure et l'échantillon. C'est le cas des méthodes de type *fil chaud/plan chaud*. Ces deux approches sont utilisées pour la caractérisation thermique à haute température.

## I.5 Méthode par contact

### I.5.1 Méthode en régime permanent

Cette méthode, basée sur un transfert thermique unidirectionnel et stationnaire, se caractérise par la mesure simultanée d'un flux de chaleur (constant) traversant l'échantillon et par celle d'une différence de température (fixe) des deux milieux extérieurs.

Ainsi pour un échantillon d'épaisseur  $e$ , et dans le cas d'absence de source de chaleur interne, on peut déduire sa conductivité ou sa résistance thermique en utilisant les formules suivantes :

$$R_T = \frac{T_1 - T_2}{\phi}, \quad R_T = \frac{e}{\lambda S}, \quad \lambda = \frac{S\phi}{e(T_1 - T_2)} \quad (\text{I-1})$$

Avec :

$R_T$ : Résistance thermique du matériau ( $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ )

$T_1 - T_2$ : Ecart de température ( $^{\circ}C$ )

$\Phi$ : Densité de flux thermique ( $W \cdot m^{-2}$ )

$e$ : Epaisseur du matériau (cm)

$\lambda$ : Conductivité thermique du matériau ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$S$ : Surface traversée par le flux ( $cm^2$ )

Cette méthode englobe deux grandes techniques de mesures selon la valeur de la conductivité recherchée :

- **Pour des isolants** ( $\lambda < 0,3 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) : C'est la technique, dite de la plaque chaude, qui est utilisée pour caractériser des échantillons de grande taille (domaine de l'isolation des bâtiments).
- **Pour les conducteurs tels que** ( $\lambda > 0,3 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) : On adopte la technique de la barre qu'on associe à une géométrie où l'épaisseur est grande devant les dimensions transverses.

Même si en théorie ces techniques sont simples, expérimentalement elles sont difficiles à mettre en œuvre puisque ce n'est pas facile :

- D'avoir un régime permanent établi.
- D'obtenir un flux unidirectionnel dans la paroi.
- De mesurer le flux et la température avec précision.
- De maintenir constant dans le temps et homogène le coefficient de convection  $h$  à la surface de l'échantillon.

### I.5.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée

Parmi ces méthodes, nous pouvons citer la méthode stationnaire de la plaque chaude gardée dont le principe consiste à mesurer la température sur les faces d'un échantillon et le flux qui le traverse sous l'effet d'un gradient thermique (Figure I-2).

Le système est symétrique, il comporte deux échantillons de faible épaisseur par rapport aux dimensions transverses et deux plaques froides de part et d'autre. Le flux est obtenu directement par la mesure de la puissance dégagée dans l'enroulement principal de la plaque chauffante. Une garde active est utilisée pour minimiser les pertes.

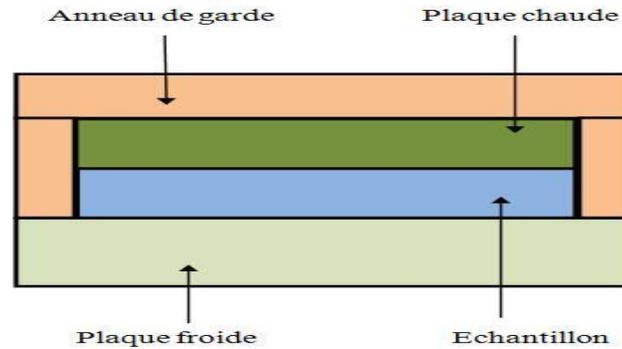


Figure I-2. Méthode de la plaque chaude gardée

Le modèle et la méthode d'identification sont élémentaires puisque basés sur le transfert unidirectionnel en régime permanent, soit :

$$T_1 - T_2 = R\Phi \quad (\text{I-2})$$

Où  $T_1 - T_2$  est la différence de température au sein de la plaque à caractériser,  $R$  sa résistance thermique et  $\Phi$  le flux de chaleur imposé.

Si l'échantillon est un matériau idéal, on déduit alors sa conductivité thermique de la relation

$$R = \frac{e}{\lambda S} \quad (\text{I-3})$$

Où  $e$  est l'épaisseur de la plaque et  $S$  la surface d'échange.

Certains appareillages fonctionnent dans des gammes de température variées pouvant aller jusqu'à environ 500°C. Pour ces températures intermédiaires, la cellule en contact avec les échantillons est généralement en cuivre, un film de chrome recouvre ces derniers lorsqu'il s'agit de poudre ou de sels. Les mesures de températures sont effectuées par des couples thermoélectriques isolés. Cette méthode s'adresse principalement à la caractérisation d'isolants thermiques. La limite de conductivités est fixée par la précision de la mesure de la différence de température  $\Delta T$  aux bornes de l'échantillon ; en général,  $\lambda \leq 0,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Cette méthode n'est applicable qu'aux isolants pour lesquels on peut négliger les résistances de contacts par rapport à la résistance du matériau. Ils permettent par ailleurs d'obtenir des écarts de température entre les deux faces relativement importants donc mesurables avec une bonne précision. On peut utiliser de la graisse conductrice pour diminuer les résistances de contact entre les échantillons et les plaques. Cette méthode est difficilement applicable à haute température et le résultat peut être biaisé par les pertes latérales si la surface de l'échantillon est insuffisante par rapport à l'épaisseur. Elle a fait l'objet d'une normalisation ISO 8302 :1991, NF EN 1946-2.

Enfin, bien qu'assez précise, la méthode de la plaque chaude gardée présente plusieurs inconvénients ; les temps d'établissement du régime permanent rendent notamment l'expérience très longue, le dispositif de garde en température est en général très imposant. En outre, l'expérience ne faisant pas intervenir les effets capacitifs du matériau, la méthode ne permet pas

d'atteindre la capacité thermique. Ces points négatifs ont conduit raisonnablement au développement de méthodes instationnaires par contact.

### I.5.1.2 Méthode des boîtes

La méthode des boîtes [23] permet de déterminer la conductivité thermique apparente en régime permanent avec un temps d'expérimentation beaucoup moins long et une précision comparable aux autres méthodes, soit 6%. Boukhattem [24] a utilisé cette méthode pour déterminer la conductivité thermique de mortier.

L'appareil de mesure est schématisé par la figure I-3 [25]. Il s'agit de réaliser un écoulement de chaleur unidirectionnel connu, à travers l'échantillon à tester puis d'effectuer les mesures de températures après obtention du régime permanent. En refroidissant A et en chauffant B, on crée un gradient de température entre les deux ambiances de telle sorte que les échanges convectifs sur les deux faces de l'échantillon soient négligeables. On mesure les températures des deux faces de l'échantillon. Connaissant les dimensions du matériau (épaisseur, longueur, largeur), on déduit la conductivité thermique.

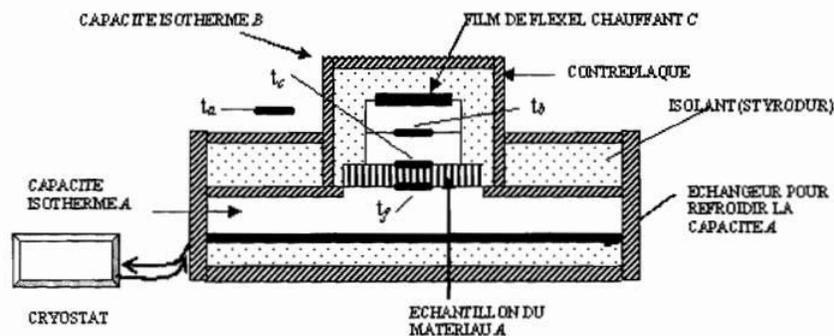


Figure I-3. Cellule de mesure de la conductivité thermique (I. Aboubou 2004)[25]

### I.5.2 Méthode en régime transitoire

Le principe général des méthodes en régime variable consiste à déduire directement la diffusivité de la chaleur et l'effusivité thermique d'un matériau soumis à une perturbation thermique contrôlée. La détection s'effectue soit par la mesure de :

- L'émission radiative d'équilibre statique du matériau avec un radiomètre.
- La modification que celle-ci provoque sur le gaz qui environne l'échantillon.
- La température de surface de l'échantillon.

Au sein du notre laboratoire, ont été développées des méthodes fluxmétriques basées sur le formalisme de l'impédance. L'impédance thermique est un moyen de définir les caractéristiques des systèmes thermiques. Il s'agit d'une fonction qui représente la relation entre les composantes

de fréquence de la température et la densité de flux dans un plan pour chaque fréquence. Jusqu'à présent, son utilisation a été limitée à une direction pour des systèmes conductifs. D'un point de vue expérimental, l'impédance est déterminée par la mesure de la densité de flux et la température simultanément dans un plan de mesure. D. DEFER et al [26] ont montré qu'il est possible d'utiliser l'impédance thermique comme un moyen de caractérisation des systèmes thermiques pour des fréquences plus élevées, en tenant compte de la perturbation créée par les instruments de mesure. Ils ont déterminé l'effusivité thermique avec une erreur de moins de 5%. Cette méthode a fait l'objet de nombreux travaux de détermination de la diffusivité et l'effusivité thermique des matériaux [27], [28], [29].

Ces divers phénomènes peuvent être détectés en face avant ou arrière à l'aide de radiomètre infrarouge ou capteurs de température de contact, fluxmètres et thermocouples et ceci pour des modes d'excitation variés :

- Mode modulé (excitation périodique),
- Mode transitoire (excitation impulsionnelle),
- Mode aléatoire (excitation aléatoire).

La mesure de cette réponse thermique, qui dépend des propriétés optiques et thermo-physiques du matériau permet d'atteindre les caractéristiques thermiques dynamiques du matériau : la diffusivité et/ou l'effusivité. Et ceci avec ou sans contact.

### **I.5.2.1 Méthode de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud**

Un certain nombre de dispositifs de mesure par contact utilise une résistance électrique pour créer un déséquilibre thermique au sein du milieu étudié. C'est le cas pour la méthode du fil chaud (Figure I-4, [30]) dont l'installation et la mise en œuvre paraissent a priori simples.

#### **I.5.2.1.1 Principe de la méthode**

On place un fil chauffant entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. On applique un échelon de flux de chaleur constant ( $\varphi = 0$  si  $t < t_0$  et  $\varphi = \varphi_0$  si  $t > t_0$ ) au fil chauffant et on relève l'évolution de la température  $T_s(t)$  de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide, on peut considérer que le transfert au centre de l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de :

- La conductivité thermique  $\lambda$ ;
- La capacitance thermique  $(\rho c_p)_s$  de l'ensemble sonde + résistance chauffante ;
- La résistance de contact  $R_c$  à l'interface sonde/échantillon, qui minimise l'écart entre les courbes  $T_s(t)$  théoriques et expérimentales.

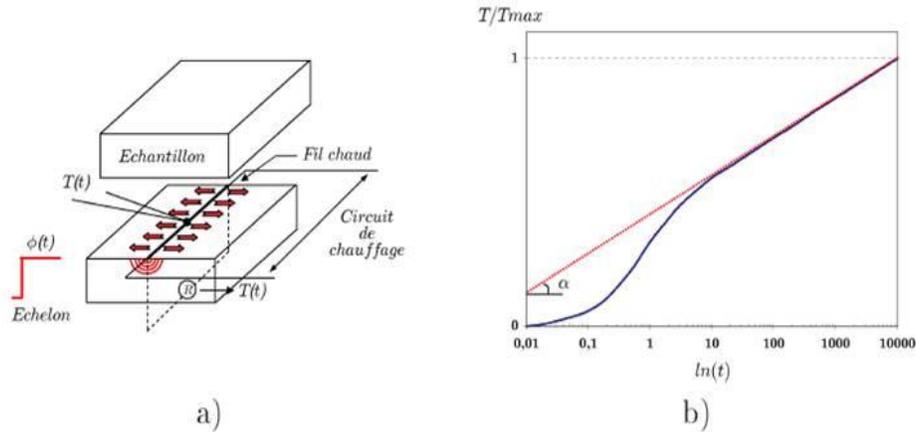


Figure I-4. a) Principe de la méthode du fil chaud, b) Thermogramme associé (C. Lorrette 2007)[30]

Dans le cadre d'une modélisation simple du problème, la distribution radiale de la température en fonction du temps, autour d'une source linéaire de chaleur dissipant une densité linéique de flux thermique  $q_l = Q/l$ ,  $l$  étant la longueur du fil, s'exprime par la relation :

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q_l}{4\pi\lambda} E \left( \ln \left( \frac{r^2}{4at} \right) \right) \quad (\text{I-4})$$

Où  $\lambda$  et  $a$  représentent respectivement la conductivité et la diffusivité thermique du milieu considéré infini,  $E(x)$  étant la fonction intégrale exponentielle

$$\int_x^{+\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (\text{I-5})$$

Pour des petites valeurs de  $r^2/(4at)$ , le développement de  $E$  au voisinage de  $r_0$  donne :

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4at}{r_0^2} \right) + \frac{r^2}{4at} + \dots \right] \quad (\text{I-6})$$

Aux temps longs, on obtient :

$$T(r, t) - T_0 \cong \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln(t) \quad (\text{I-7})$$

L'évolution de la température aux temps longs en fonction du logarithme du temps est donc une droite dont la pente est inversement proportionnelle à la conductivité thermique. Cette dernière peut alors être estimée par une simple régression. Dans une approche fine du problème, le modèle physique devra tenir compte à la fois, de l'inertie du fil chauffant et du contact entre fil chaud et échantillons, à l'origine du décalage observé sur le début de thermo-gramme.

Cette méthode conçue initialement pour la caractérisation de liquide puis étendue aux solides isolants à haute température, a donné lieu par la suite à l'utilisation de sondes thermiques aux géométries variées : cylindrique, sphérique ou plane. D'une manière générale, il est considéré qu'une sonde est constituée d'une partie centrale fournissant, par effet joule, une densité de flux

de chaleur uniforme par unité de volume. Elle est placée dans un milieu de dimensions suffisamment grandes de sorte qu'il puisse être considéré comme semi-infini. Comme pour le fil chaud, il existe deux possibilités pour la mesure de température, soit par un couple thermoélectrique, soit par la mesure de la variation de résistance de l'élément chauffant lui-même. Dans le cas de la sonde plane par exemple (*méthode du plan chaud*, figure I-5a, [14]), le comportement asymptotique aux temps longs est intéressant car il donne la possibilité d'identifier l'effusivité thermique par une mesure de la température directement sur le plan (en  $x = 0$ ) grâce à la relation :

$$T(0, t) - T_0 \cong \frac{2q_s}{\sqrt{\pi}\sqrt{\lambda\rho c_p}}\sqrt{t} \quad (\text{I-8})$$

Où  $q_s$  est cette fois une densité de flux surfacique dégagée par la résistance chauffante.

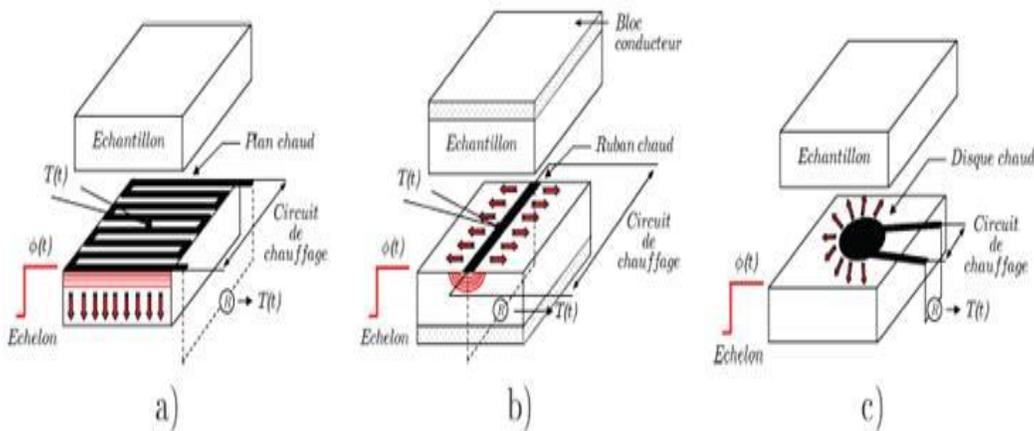


Figure I-5. Mesure par sonde thermique – méthode du a) plan chaud, b) ruban chaud et du c) disque chaud (C. Lorrette 2007)[14]

La méthode du ruban chaud (ou de la pastille chaude) avec température imposée sur la face non chauffée, illustrée figure I-5b, est analogue à celle du plan chaud ; elle est dédiée à la caractérisation de matériaux très isolants [31] contrairement à la première qui est applicable sur une large gamme de conductivité. Enfin, des sondes à géométrie discoïdale (méthode du Hot Disk [14], figure I-5c) sont également utilisées pour estimer simultanément la diffusivité et la conductivité thermique de matériaux en exploitant la mesure en régime quasi-établi de la tension et de l'intensité dans la résistance.

### I.5.2.2 Mesure de l'effusivité thermique par la méthode du plan chaud

Parmi toutes les propriétés thermiques, l'effusivité est probablement celle à laquelle on prête le moins attention. Pourtant, lorsque l'on s'intéresse aux processus dynamiques de transfert de la chaleur par conduction, on peut s'apercevoir que la *conductivité thermique* et la *capacité thermique volumique* interviennent de façon couplée et que le groupement constitué de leur

produit est déterminant dans la relation liant la chaleur apportée au matériau et les variations de température qui en découlent. La mesure de l'effusivité d'un matériau nécessite de perturber son équilibre thermique en lui apportant de la chaleur et de relever les variations induites de température.

La *méthode du plan chaud* et l'*impédance thermique* sont, sur l'aspect de la dimensionnalité (transfert 1D axial), les mieux appropriées pour la mesure d'effusivité. En introduisant une limitation géométrique à l'écoulement de la chaleur (effet d'épaisseur finie : méthodes de la source plane dynamique) ou à la distribution de l'énergie apportée à l'éprouvette (ruban chaud, disque chaud), on peut également accéder à la diffusivité du matériau, de par l'exploitation du thermo-gramme aux temps longs. On y accède également en plaçant une sonde de température à distance finie de la source de chaleur. Dans ce cas, les sensibilités à l'effusivité et à la diffusivité se développent après un délai du même ordre qui correspond au temps de diffusion entre les deux éléments de l'appareillage (plan chaud avec source et capteur séparés, fil chaud parallèle, double sonde sphérique active). L'instrument « fil chaud asymétrique gardé » fournit une mesure d'effusivité moyennant un étalonnage préalable avec une série de corps de référence. Cependant, les travaux publiés jusqu'à présent ne permettent pas encore de se faire une idée précise sur la robustesse de l'identification vis-à-vis des paramètres secondaires (ex. : résistance de contact), ni sur l'exactitude des résultats.

Le dispositif proposé est représenté sur la figure I-6. Il est constitué d'un échantillon parallélépipédique et d'une résistance électrique plane (sonde résistive) placée au contact de ce dernier, les deux éléments étant confinés dans un isolant thermique d'effusivité connue.

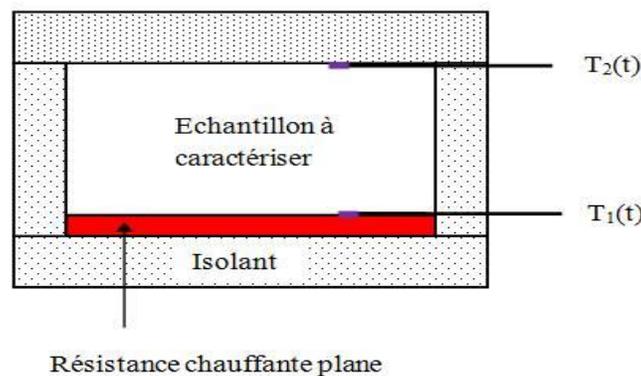


Figure I-6. Schéma du dispositif expérimental

Plan chauffant et échantillon possèdent la même surface pour permettre un transfert unidirectionnel du flux de chaleur. Deux mesures de température sont effectuées durant l'expérience, l'une en « face avant » :  $T_1$ , mesure réalisée sur le plan chauffant, l'autre en « face arrière » :  $T_2$ , mesure réalisée sur la face non chauffée de l'échantillon.

Le principe de la méthode consiste à utiliser le thermo-gramme obtenu en « face avant » au début de l'expérience pour réaliser une estimation de l'effusivité thermique  $b$  du matériau étudié,

de la capacitance thermique  $\rho c_p$  de la sonde et des résistances thermiques de contact  $R_c$  de part et d'autre du plan chauffant. A partir des valeurs identifiées, l'exploitation du thermo-gramme en « face arrière » permettra ensuite d'estimer aux temps longs la conductivité thermique  $\lambda$  de l'échantillon. Des lors, il deviendra possible de déduire les valeurs de diffusivité thermique  $a$  et de chaleur volumique  $\rho.c_p$  en posant :

$$a = \frac{\lambda}{b^2}, \quad \rho c_p = \frac{b^2}{\lambda} \quad (\text{I-9})$$

## I.6 Méthode sans contact

A température ambiante, la méthode flash (face arrière) est la technique la plus utilisée à ce jour pour la caractérisation thermique. La littérature scientifique publiée relatant les perpétuelles améliorations afférentes au dispositif de mesure, aux modèles de calcul et à l'estimation des paramètres comme en témoignent les références suivantes : [32], [33], [34], [35]. En prenant soin d'adapter méticuleusement les outils tout en respectant les précautions d'usage des hautes températures, cette méthode transitoire impulsionnelle permet également la caractérisation en température.

### I.6.1 Méthode flash

Cette méthode a été initiée par Parker [36]. Depuis, sa rapidité et sa simplicité de mise en œuvre en ont assuré son succès. Elle s'est imposée comme la principale technique de mesure de la diffusivité thermique des solides. Dans cette technique, l'échantillon est irradié sur la face avant par une brève impulsion thermique produite par un tube à éclats ou un laser pulsé. Les évolutions de la température en face arrière sont enregistrées en fonction du temps par contact généralement à l'aide d'un thermocouple de contact. La diffusivité thermique de l'échantillon peut être déduite par l'analyse du thermogramme obtenu. [37], [38], [39] Ont perfectionné le mode opératoire, l'échantillon est sollicité sur la face avant par une brève impulsion thermique produite par un tube à éclats ou un laser et un détecteur infrarouge qui mesure la température sur la face arrière.

Depuis Parker [36], cette technique a subi de nombreuses évolutions au rythme du développement technologique de l'instrumentation (lasers, outils de calcul, appareils de mesure, ...) ainsi que de l'élaboration de modèles à une ou deux dimensions avec perte ou non qui rendent mieux compte de la réalité du transfert de chaleur à l'intérieur du matériau.

La méthode la plus utilisée actuellement, pour la mesure de la diffusivité thermique de matériaux homogènes et isotrope, est la méthode flash, [40], [41], aussi la démarche naturelle pour un certain nombre de laboratoires a été d'essayer d'étendre cette technique [42], parfaitement maîtrisée, aux matériaux anisotropes.

On a également vu l'utilisation des formalismes pour la résolution de l'équation de chaleur comme celui des quadripôles ou celui de Green. On a également vu l'apparition et l'application de méthodes de calcul plus performantes pour l'identification de paramètres thermophysiques, comme les méthodes inverses.

La contribution de tous ces développements a permis de caractériser des matériaux de plus en plus complexes, comme les matériaux anisotropes (composites, céramiques), multicouches et même les liquides, ou de prendre en compte et quantifier des phénomènes physiques supposés négligeables jusque-là (échanges convectifs, résistance thermique de contact entre deux milieux,...).

### I.6.1.1 Principe de la méthode

Dans son principe, elle consiste à soumettre la face avant d'un échantillon plan à une impulsion de flux de chaleur photothermique de courte durée et à suivre l'évolution temporelle de la température (communément appelé thermogramme) en un ou plusieurs points de l'échantillon (Figure I-7, [43]).

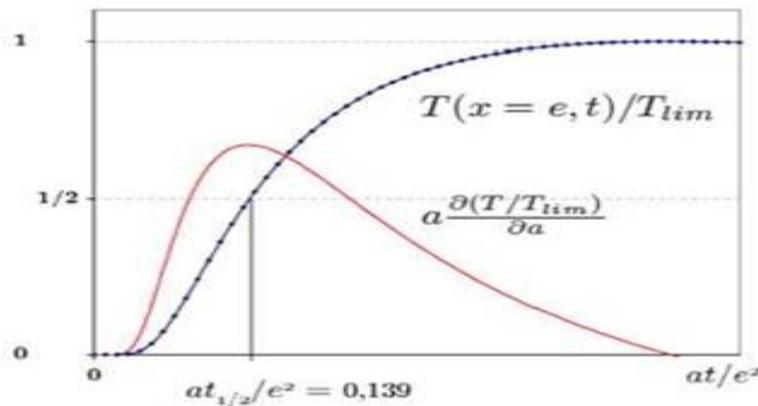


Figure I-7. Thermogramme en face arrière, courbe de sensibilité réduite et temps de demi-montée (*Techniques de l'ingénieur*)[43]

En considérant le cas expérimental idéal où la durée de l'impulsion est infiniment petite, le flux d'excitation géométriquement uniforme et les pertes thermiques négligeables, la réponse en température à une profondeur  $x$  de l'échantillon s'obtient par une méthode de séparation de variables et s'écrit :

$$T(x, t) = \frac{Q}{\rho c_p} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi}{e} x\right) \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 a t}{e^2}\right) \right] = T_{lim} \cdot f\left(\frac{x}{e}, \frac{at}{e^2}\right) \quad (I-10)$$

Où  $e$  est l'épaisseur de l'échantillon et  $Q$  l'énergie d'excitation.

Cette solution est surtout exploitée pour la mesure de la réponse en température en face arrière ( $x=e$ ) présentant l'avantage d'y être continue. Le suivi de ce signal a donné lieu

historiquement au modèle simple d'estimation de la diffusivité de Parker [36] consistant à considérer le temps de « demi-montée » du thermogramme selon :

$$a = \frac{0.139 e^2}{t_{1/2}} \quad (\text{I-11})$$

Avec  $t_{1/2}$  tel que  $\frac{T(x=e, t_{1/2})}{T_{lim}}$

Ce cas très hypothétique peut être étendu à d'autres configurations, prenant en compte par exemple les effets parasites à l'origine de biais. Quatre sources d'erreur majeures sont responsables des incertitudes de mesure de la méthode [44]:

- Les pertes thermiques radiatives et convectives de l'échantillon.
- L'inhomogénéité du flux thermique incident.
- La durée et la forme de l'impulsion.
- Les effets de non linéarité.

Cette méthode permet d'estimer la diffusivité thermique des solides. Son schéma de principe est décrit sur la figure I-8. On envoie sur l'une des faces d'un échantillon à faces parallèles un flux lumineux de forte puissance pendant un temps très court. Un thermocouple en contact avec la face arrière permet d'enregistrer l'élévation de sa température à partir du moment où la face avant a reçu le flash. Une modélisation des transferts de chaleur dans l'échantillon a permis à plusieurs auteurs de proposer des méthodes d'estimation de la diffusivité thermique à partir du thermo-gramme expérimental. La simplicité de certaines de ces méthodes a rendu la méthode flash très populaire, un certain nombre de précautions expérimentales doivent toutefois être respectées pour atteindre une bonne précision.

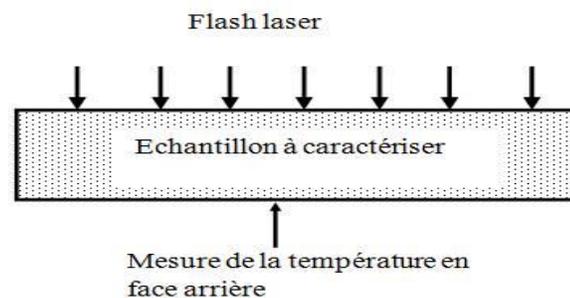


Figure I-8. Schéma de principe de la méthode flash

### I.6.1.2 Modélisation de la méthode Flash

Les hypothèses suivantes sont généralement retenues :

- Uniformité du flux radiatif absorbé sur toute la surface de l'échantillon ;
- Température uniforme et égale à la température ambiante à  $t = 0$  ;
- Coefficient d'échange convectif identique sur toutes les faces.

Nous ferons dans un premier temps l'hypothèse que les pertes latérales ont une influence négligeable sur la température mesurée au centre de la face arrière ce qui est vrai si l'épaisseur est faible par rapport aux autres dimensions.

### **I.6.2 Méthode active**

Dans le cas des méthodes par thermographie infrarouge active, une excitation thermique artificielle est nécessaire afin d'observer d'éventuelles discontinuités au sein du matériau. Il existe quatre modes d'utilisation de ce type de méthode. Ils dépendent du type et de la nature de la sollicitation appliquée :

- La thermographie pulsée: C'est l'une des techniques de stimulation thermique la plus utilisée du fait de sa rapidité [45]. Elle sert, entre autre, à la détection de fissures dans une dalle en béton [46], [47] ou à l'auscultation de pièces archéologiques [48];
- La thermographie par chauffage par palier: L'augmentation de la température de surface est contrôlée pendant la stimulation thermique par paliers de température. Cette méthode trouve des applications dans l'évaluation de structures composites [49], [50];
- La thermographie par chauffage contrôlé au laser: Cette méthode est basée sur l'étude de la réponse (en atténuation et déphasage) à la génération d'ondes thermiques à l'intérieur du matériau à l'aide d'un chauffage périodique sinusoïdal de sa surface. Elle est souvent utilisée pour l'inspection de matériaux multicouches [51], [52], [53], [54] ou pour la détection de fissures dans les céramiques ou les métaux [55];
- La vibrothermographie: Cette technique utilise le phénomène de conversion directe des ondes mécaniques en énergie thermique. La signature thermique au niveau d'une discontinuité dépend de la fréquence de l'excitation mécanique [56].

Ces méthodes s'appliquent essentiellement en laboratoire (appareillage encombrant, maîtrise de la sollicitation, taille réduite des échantillons...) et sont très difficilement utilisables sur site.

### **I.6.3 Méthode passive**

La thermographie infrarouge passive (aucun chauffage, ni refroidissement ne sont imposés) est une méthode qui permet de mettre en évidence ces différences de température entre l'environnement et l'objet étudié.

Le fait que le rayonnement soit une fonction de la puissance quatrième de la température de surface du sujet permet à la caméra de calculer et d'afficher cette température sous forme de thermogramme aux conditions que les paramètres d'influence soient correctement estimés ou puissent être négligés. La caméra infrarouge mesure le rayonnement lié à la luminance de la

surface de la scène observée. Le flux rayonné par l'objet est la somme de son émission propre, soit  $\varepsilon_0 I_0$  et de la partie du flux ambiant qui est réfléchi par l'objet, soit  $(1 - \varepsilon_0) I_e$ . La propagation de ce flux en direction de la caméra est affectée par son passage au travers de l'atmosphère, soit le coefficient de transmission de l'atmosphère. Celle-ci n'étant pas totalement transparente, elle en absorbe une partie, qu'elle va réémettre soit  $(1 - \tau_{atm}) I_{atm}$ .

L'équation radiométrique [57] permet le passage de la luminance à la température de surface de la zone d'étude :

$$I' = \underbrace{\tau_{atm} \left[ \underbrace{\varepsilon_0 I_0}_{\substack{\text{Flux émis} \\ \text{par l'objet}}} + \underbrace{(1 - \varepsilon_0) I_e}_{\substack{\text{Flux réfléchi} \\ \text{par l'objet}}} \right]}_{\substack{\text{Flux transmis au travers de l'atmosphère}}} + \underbrace{(1 - \tau_{atm}) I_{atm}}_{\substack{\text{Flux émis par} \\ \text{l'atmosphère}}} \quad (I-12)$$

Avec :

$I'$  = Rayonnement perçu par la caméra

$I_0$  = Rayonnement propre de l'objet

$I_e$  = Rayonnement de l'environnement

$I_{atm}$  = Rayonnement de l'atmosphère

$\varepsilon_0$  = Coefficient d'émissivité de l'objet

$\tau_{atm}$  = Coefficient de transmission de l'atmosphère

Une caméra infrarouge qui observe un objet opaque reçoit un rayonnement composé de trois parties : le rayonnement émis par l'objet ; le rayonnement réfléchi par l'objet, le rayonnement émis par l'atmosphère entre l'objet et le détecteur (Figure I-9, [58]).

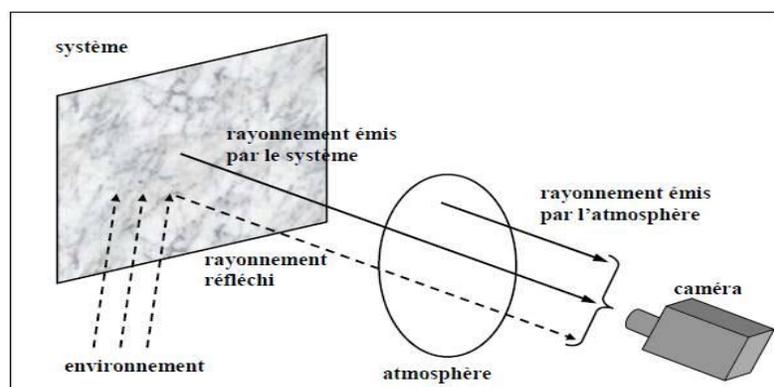


Figure I-9. Composition du rayonnement reçu par la caméra infrarouge [58]

L'influence de la température de l'environnement et les hypothèses faites sur l'homogénéité de l'objet (température et émissivité considérées constantes dans l'espace et dans le temps) rendent l'exploitation des valeurs numériques de température très délicate. Toutefois, dans le but

d'une démarche quantitative, l'analyse de comportements différentiels ou de contrastes de températures est possible. La technique de thermographie infrarouge passive semble constituer une des techniques de CND (contrôle non destructif) les plus attractives [59].

### I.6.3.1 Méthode non destructive et sans contact

La thermographie infrarouge passive est une méthode non destructive ce qui permet de conserver l'intégrité de la structure auscultée.

De plus, c'est une méthode sans contact : Il n'y a pas de contact physique entre le capteur et l'objet ausculté. De ce fait, il n'est besoin d'aucun couplant entre le dispositif de mesure et la surface du matériau. Cela implique également qu'il n'y a pas d'interaction entre l'appareil et la surface. Ainsi, les propriétés du matériau ne sont pas modifiées. En réalité, quelques interférences peuvent être causées par la caméra infrarouge elle-même, en réfléchissant ou en émettant un rayonnement propre. Cependant ces effets peuvent être considérés comme négligeables.

### I.6.3.2 Appareil de mesure

Quand aucune source extérieure de chaleur n'est nécessaire, comme c'est le cas pour la thermographie infrarouge passive, les opérations d'auscultation sont très rapides à mettre en œuvre.

La thermographie infrarouge a une capacité large d'évaluation, c'est une méthode à grand rendement. Une caméra infrarouge est capable de contrôler simultanément la température en plusieurs points à l'intérieur d'une même scène thermique. L'équipement de mesure est capable de détecter et de contrôler de façon très rapide des variations de températures à la surface d'un objet.

L'équipement de thermographie infrarouge est léger et de faibles dimensions (3,8 kg) avec batterie dont les dimensions sont de (32 x 14,1 x 15.9 cm). Il s'agit d'une caméra infrarouge CEDIP Silver™ 420 M (Figure I-10). La caméra est un équipement qu'il est possible d'utiliser de façon mobile et en enregistrant les données de façon continue.



Figure I-10. Caméra infrarouge SILVER™ 420 M

Les données sont visibles en direct, sous forme d'images thermiques, et quelques traitements peuvent être effectués sur site. Cela permet d'une part de contrôler la qualité de la prise de données, mais également d'effectuer des analyses complémentaires aux endroits suspects lors de l'inspection. Les données enregistrées peuvent être contrôlées à partir d'un micro-ordinateur, équipé d'un logiciel ALTAIR de traitement d'image spécifique développé par FLIR. Ce logiciel permet d'obtenir une analyse de l'image thermique en traçant des profils, des histogrammes de répartitions de températures ou des lignes isothermes, de suivre une donnée dans le temps, d'accéder aux données brutes du capteur ou encore de réaliser des soustractions d'images.

## **I.7 La thermographie infrarouge appliquée aux contrôles non destructifs**

Les méthodes non destructives adoptent, depuis le début des années 80, la thermographie infrarouge. La thermographie infrarouge s'améliore avec le temps, repoussant les limites de performance et de qualité. Cette évolution donne aujourd'hui plusieurs techniques reconnues. Tous les secteurs industriels sont concernés : Aéronautique, automobile, génie civil, maintenance électrique, électronique, agroalimentaire... Les principaux avantages de la thermographie infrarouge sont d'être une méthode d'auscultation surfacique et sans contact entre l'objet et la caméra [60].

Pour obtenir la température de tout objet de manière passive il est nécessaire d'utiliser la donnée de la loi de Planck. En C.N.D., cette technique, relativement simple à mettre en place, par une prise de vue, permet de dire rapidement si le comportement de l'objet est normal ou pas. L'exemple le plus simple est une pièce mécanique en fonctionnement qui chauffe à cause d'un frottement anormal. Les images I.R. montrent alors une pièce très chaude alors que rien ne l'indique d'un simple regard à l'œil nu.

La température d'un objet plus chaud peut perturber la lecture d'un autre. De nombreuses interférences peuvent gêner l'analyse, comme la plupart des sources de lumière et de chaleur. Le soleil est une source importante (7000 K à sa surface) de perturbation en extérieur. Les surfaces chauffées par le soleil peuvent masquer la chaleur produite par une pièce défectueuse par exemple, mais aussi saturer les capteurs infrarouges de la caméra. La température suivant les capacités calorifiques des matériaux.

L'autre méthode est dite "active", elle consiste à contrôler la source de chaleur pour observer les réactions du matériau. Cette méthode est très souvent utilisée dans les contrôles non destructifs (C.N.D.), car elle permet d'analyser la composition d'une paroi sans l'endommager (et sans contact pour certaines méthodes).

Il existe plusieurs sortes de sources de chaleur pour la thermographie active. Par exemple en interne par vibration ultrasonique ou en externe par rayonnement infrarouge. L'excitation est de forme différente selon que l'on emploie la thermographie pulsée ou la thermographie modulée. La

différence entre ces des deux méthodes est au niveau de la propagation de l'onde dans l'échantillon à analyser.

### **I.7.1 Thermographie modulée**

Une autre technique populaire de thermographie active a pris de l'essor récemment: la thermographie modulée (TM). La thermographie modulée est souvent appelée « lock-in » car elle fait intervenir le principe de démodulation synchrone [61], [62].

La thermographie modulée se différencie de la thermographie pulsée tant par le type de stimulation que par le traitement numérique de sa réponse thermique. La stimulation est de type périodique à une fréquence spécifique alors que le traitement numérique consiste à extraire la phase de la réponse thermique, une fois le régime permanent atteint.

Lors de ce type de diagnostic, la caméra est placée en face de la paroi et les thermogrammes sont enregistrés à intervalles réguliers. Le spécimen est soumis à une stimulation thermique sinusoïdale qui est souvent délivrée par des spots dont l'amplitude est modulée sinusoïdalement. Les ondes absorbées se diffusent à l'intérieur du spécimen. En régime permanent, la réponse thermique enregistrée à la surface du spécimen est également sinusoïdale. L'amplitude et la phase des températures de surface dépendent de la fréquence du signal d'entrée. Les images de phases sont moins sensibles aux caractéristiques optiques et infrarouges à la surface, de même qu'aux stimulations non-uniformes.

Un indicateur sensible pour une telle contribution est l'angle de phase entre le signal d'entrée et la réponse thermique à la surface du spécimen étudié. Si le champ de température est enregistré à intervalles réguliers durant plusieurs périodes, il est possible de calculer à l'aide de la transformée de Fourier, les phases et les amplitudes de chaque point de la surface de l'échantillon vu par la caméra.

Un des avantages pratiques de la TM est la facilité de positionnement des sources de stimulation, les images de phases étant peu sensibles aux non-uniformités de stimulation. L'uniformité n'étant plus une contrainte aussi stricte que pour la thermographie pulsée, cela a également pour conséquence de permettre l'inspection d'une plus grande surface pour une même acquisition, jusqu' à 4 m<sup>2</sup>. Également, ce type de stimulation périodique peut-être déployé à plusieurs mètres si les projecteurs sont ciblés et si un zoom équipe la caméra infrarouge.

Typiquement, la surface est d'abord chauffée à grande puissance pendant quelques secondes et ensuite quelques périodes de modulation sont effectuées (généralement 2) avant l'enregistrement de la réponse thermique.

## I.7.2 La thermographie pulsée

La thermographie pulsée P.T est probablement la plus populaire des approches en thermographie active. Sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre y est pour beaucoup.

La thermographie pulsée consiste à envoyer une onde thermique dans la paroi se rapprochant le plus possible d'une Impulsion de Dirac (Figure I-11, [63]). Cette sollicitation peut être appliquée par différents moyens : lampes, flashes, faisceaux laser. La durée du pulse varie de quelques  $\mu\text{s}$  à plusieurs secondes selon l'épaisseur et les propriétés thermiques du matériau à inspecter. Le front de chaleur appliqué à la surface du spécimen se diffuse ensuite vers l'intérieur. Une caméra infrarouge, placée en face de ce spécimen, enregistre les évolutions de température à des intervalles réguliers.

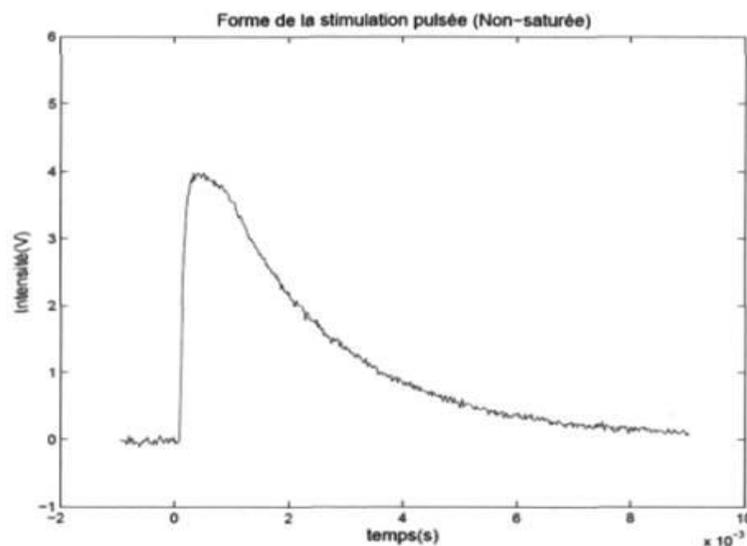


Figure I-11. Impulsion d'excitation thermique

L'un des avantages de la méthode de thermographie pulsée réside principalement dans sa rapidité d'analyse. Cette méthode a démontré son efficacité dans les secteurs de la construction et de la maintenance aéronautique [64]. Le point délicat à l'utilisation du contraste (absolu ou autre) est de connaître une zone a priori saine de l'échantillon qui sert de référence [65], [66], [67]. De plus, cette technique est facile à mettre en œuvre, puisque elle ne demande pas d'équipement très spécialisé (ex: lampes+caméra+ordinateur, figure I-12). Par rapport à la thermographie modulée, une expérience de TP est plutôt rapide, principalement à cause de son mode de stimulation impulsionnelle.

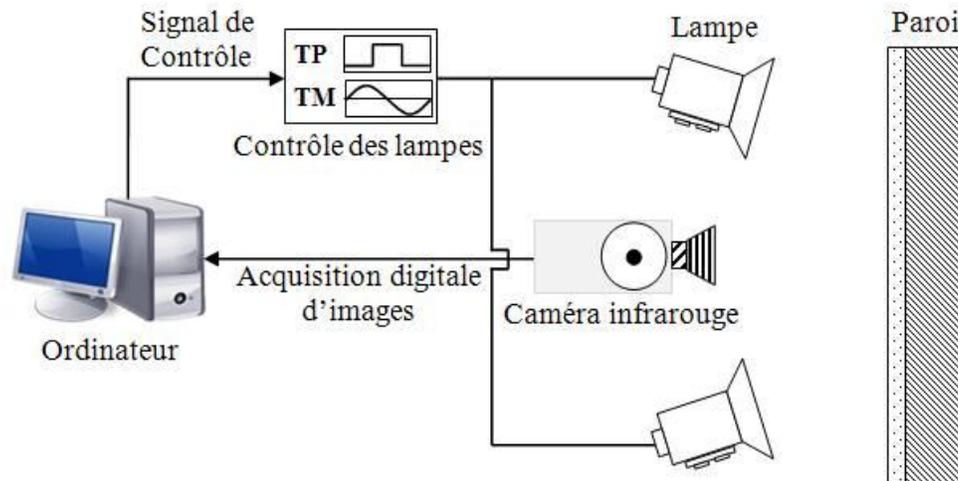


Figure I-12. Montage expérimental pour la TP, la TM ou la TPP

### I.7.3 La thermographie à phase pulsée

La Thermographie à Phase Pulsée (TPP) est basée sur la combinaison d'une sollicitation thermique impulsionnelle appliquée à la paroi à diagnostiquer et d'une analyse fréquentielle de l'évolution des phases et des amplitudes des températures. Cette méthode d'analyse est souvent présentée comme la réunion des concepts de la thermographie modulée et de la thermographie pulsée.

Le principe de cette méthode est de soumettre une paroi, initialement à une température  $T_{\text{int}}$ , à une sollicitation impulsionnelle (Figure I-13, [68]), sa température de surface augmente alors brusquement. Les premiers thermogrammes sont enregistrés à partir du moment où la température de surface de l'échantillon se retrouve dans la gamme de températures mesurables par la caméra. La décroissance de la température continue jusqu'à redevenir sensiblement  $T_{\text{init}}$ .

A partir de la série de thermogrammes enregistrés durant la phase de décroissance de la température, il est possible de calculer pour chaque point, la transformée de Fourier de cette évolution. Cette transformée étant une série complexe en fonction de la fréquence, il est possible d'obtenir des images en représentant la phase et l'amplitude en fonction de la fréquence.

Les images des amplitudes sont décrites comme étant plus sensibles aux bruits de mesure et à l'uniformité du chauffage. Les images des déphasages présentent l'avantage d'être moins affectées par l'uniformité du chauffage, les dégradations optiques des caractéristiques spectrales de la surface (variation de l'émissivité).

En Génie Civil, la thermographie à phase pulsée est une technique qui a déjà été employée. Le béton étant un matériau diffusif, la sollicitation est appliquée à la surface du spécimen à l'aide de flashes ou de radiateurs puissants. Dans cette configuration, les pertes thermiques par convection et rayonnement ne sont pas négligeables en surface et représentent un facteur

pénalisant en termes de rendement. L'utilisation de sources puissantes, supérieures à  $10\text{KW}/\text{m}^2$  conduit des températures atteintes à la surface de l'échantillon, supérieures à  $100^\circ\text{C}$ , qui ne sont pas compatibles avec le béton.

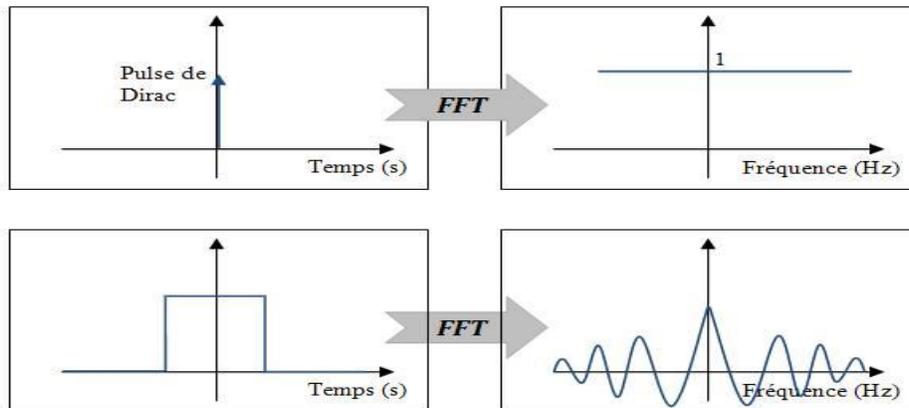


Figure I-13. FFT d'une impulsion de Dirac et de la Fonction rectange

## I.8 Méthodes in situ

L'étude de parois de bâtiments *in situ* présente un certain nombre de difficultés, c'est pourquoi elle est beaucoup moins répandue. Tout d'abord le caractère aléatoire des sollicitations microclimatiques rend complexe l'analyse qui peut en être faite. En effet on ne maîtrise pas les conditions aux limites, ni l'historique des transferts de chaleur au sein de la paroi étudiée. Ensuite il faut mettre en place une instrumentation appropriée qui résiste aux conditions climatiques. Il est intéressant de pouvoir suivre le comportement d'un système sur une période longue pour étudier l'évolution de ses paramètres thermiques. Il faut également mettre en place des procédures de traitement compatibles avec les données recueillies et les systèmes étudiés. Une méthode est proposée par Peng [69] sur un bâtiment existant de type logement, pour déterminer la résistance thermique. Cette fois-ci les deux faces des parois sont instrumentées de façon identique, c'est à dire plusieurs fluxmètres et plusieurs dizaines de thermocouples en surfaces intérieures et extérieures. Les capteurs peuvent être laissés en place pour des suivis à long terme. L'approche expérimentale est intéressante mais le traitement des données est décevant puisque principalement basé sur la méthode des moyennes. D'autre part, toutes les valeurs  $R$  évalué par les trois méthodes ont des valeurs plus petites que la valeur de conception. Ils ont observé que les valeurs de conductance obtenues expérimentalement étaient inférieures à celles calculées d'après les données de conception. La principale raison de ces différences pourrait être que les bâtiments d'essai pourraient ne pas être suffisamment secs ou ils pourraient être affectés par les ponts thermiques, tels que des poutres et des piliers. Certes, d'autres facteurs, tels que des erreurs dans les thermocouples, fluxmètres, et les enregistreurs de données peuvent également contribuer à ces différences.

Baldinelli [70] propose une méthode de calcul de la résistance thermique des composants et parois de bâtiments, basée sur les conductivités thermiques utiles ou résistances thermiques utiles appropriées des matériaux et produits concernés. La méthode s'applique aux composants et parois constitués de couches thermiquement homogènes (qui peuvent comprendre des lames d'air). La norme ISO 9869 (Organisation internationale de normalisation), ISO 6946 donne aussi une méthode approchée, qui peut être appliquée pour des couches hétérogènes, à l'exception des cas où une couche d'isolation est pénétrée par un élément métallique. Ces normes sont comparées aux résultats de la méthode plaque chaud gardée et boîte chaude. Les campagnes in situ (Figure-14) ont démontré que ISO 6946 représente une bonne approximation.

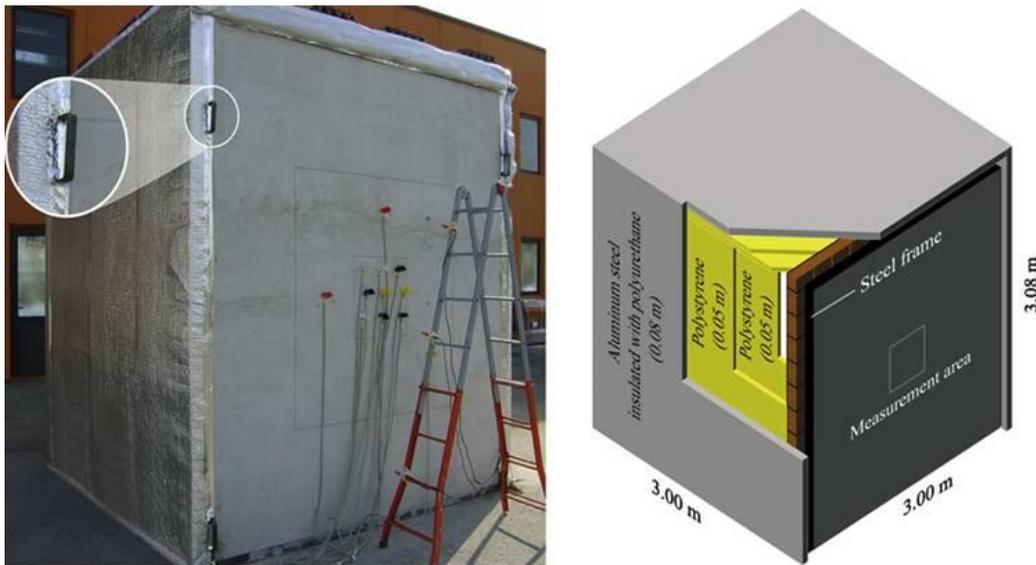


Figure I-14. Schéma et l'image de l'appareil expérimental (G. Baldinelli 2010)[70]

Une méthode normalisée des fluxmètres est présentée dans la norme EN 12494 [71]. Dans ce cas, la conductance de la paroi est obtenue à partir d'une méthode de calcul de moyennes glissantes après au moins 72h d'enregistrement.

Une autre consiste à coupler les mesures réalisées sur le bâtiment à un code de calcul de type différences finies ou éléments finis. Cucumo [72] propose une méthode basée sur ce principe qui s'apparente à une boîte chaude gardée placée en extérieur de dimensions 4m x 4m x 3m, équipée d'une climatisation réversible, fortement isolée sur trois de ses faces et conservant une face verticale pour le matériau à tester. La structure est positionnée sur une table tournante qui permet d'optimiser l'orientation de la paroi en fonction de l'ensoleillement. Il a indiqué que cette méthode avait ses limites et qu'il était important que l'énergie thermique stockée dans la paroi soit négligeable comparativement à l'énergie traversant la paroi durant la période de test. Ils ont proposé une alternative de traitement des données basée sur une modélisation en différences finies du transfert dans la paroi. Le système est assez lourd et se place à mi-chemin entre conditions contrôlées et conditions *in situ* (Figure I-15). Les mesures de flux se font à l'intérieur, les mesures de température se font à l'intérieur et à l'extérieur, elles doivent permettre de

retrouver la conductivité thermique équivalente et la capacité thermique volumique par minimisation des écarts entre le modèle en différences finies et les mesures effectuées.

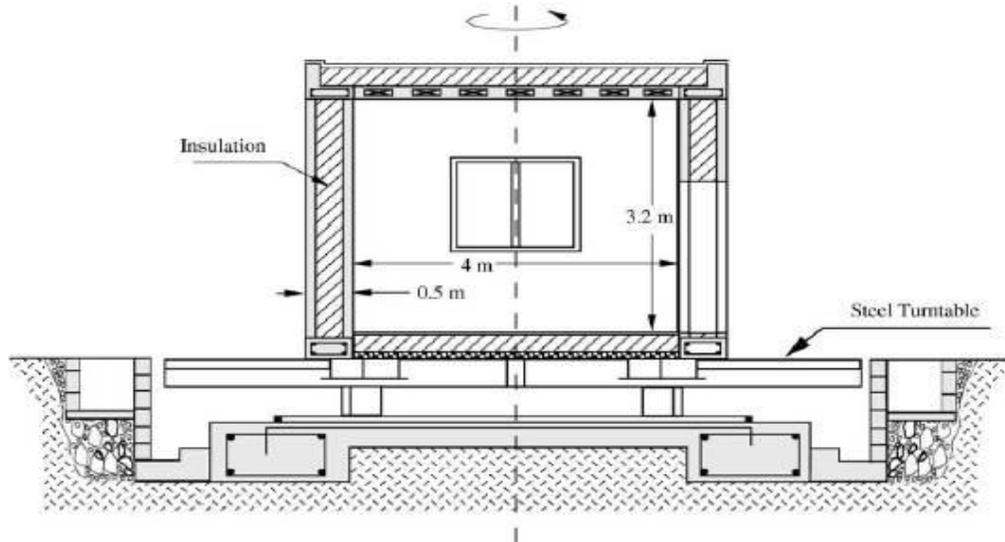


Figure I-15. Coupe verticale de la station d'essai (Université de la Calabre)[72]

Les travaux de Cabeza [73] présentent un gros investissement expérimental de réalisation *in situ* de cellules climatisées (Figure-16) et d'instrumentation pour tester différents types de parois isolantes. Les résultats montrent que l'utilisation de l'isolation est essentielle pour diminuer l'énergie exigée dans les bâtiments. L'analyse se limite aux consommations relevées dans chacune des cellules à l'aide de compteurs et à une évaluation de la transmittance du mur à partir d'une formulation en régime permanent, inadaptée aux conditions de transfert.



Figure I-16. Cellules climatisées (Puigverd de Lleida-Barcelona)[73]

Brahmi [74] a utilisé les facteurs de réponse pour calculer des flux de chaleur transitant à travers les deux faces d'une paroi soumise à des sollicitations de température variables dans le temps. Cette méthode prend en compte l'inertie thermique de la paroi ce qui permet d'obtenir un calcul exact des charges thermiques du bâtiment dans son ensemble. Certaines études se limitent

à la lecture des données brutes de flux et de températures pour analyser le comportement du bâtiment durant une période (à partir de Mars 2005 jusqu'à Aout 2006). Le système qui fonctionne en continu, a un contrôle limite de l'air intérieur. Au cours d'hiver, la variation de température était petite (typiquement de 20°C à 23°C, figure I-17, [75]) parce que les radiateurs ont des thermostats individuels. L'objectif principal de la surveillance était d'évaluer l'effet de l'air conditionné sur l'enveloppe du bâtiment.

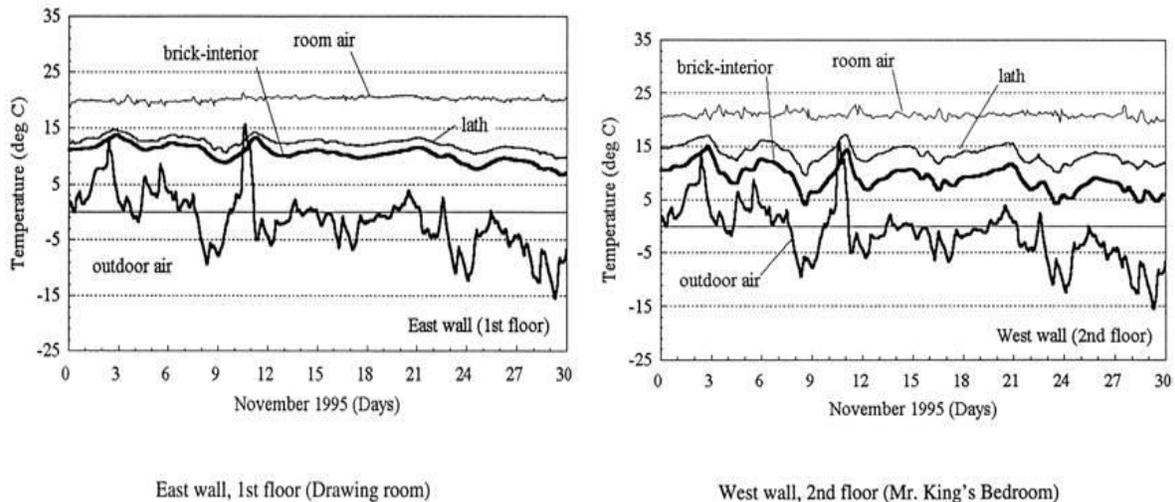


Figure I-17. Les températures extérieures, intermédiaires et intérieur de paroi en Novembre 1995[75]

Des auteurs ont montré que la thermographie infrarouge était un outil d'auscultation d'éléments de construction et qu'elle permettait l'évaluation du comportement thermique de paroi. La mesure par thermographie infrarouge présente l'avantage d'être sans contact, non intrusive et de ne pas modifier les échanges de la surface observée. Toutefois, le rayonnement reçu par la caméra est le résultat de plusieurs phénomènes (émission de la surface, réflexion par la surface et l'atmosphère, absorption par l'atmosphère) et dépend largement des conditions environnementales [76]. A notre connaissance, les applications in situ de cette technique pour la caractérisation de paroi n'ont concerné que des approches passives c'est-à-dire sans sollicitations thermiques spécifiquement mises en œuvre. Pour une exploitation quantitative de mesures réalisées, il est nécessaire de faire un certain nombre d'hypothèses dont la validité peut être discutable. Pour estimer la conductance, Albatici et al [77, 78] mesurent par thermographie infrarouge la température de surface extérieure du mur et de l'intérieur du bâtiment en ouvrant brutalement une fenêtre. La méthode impose de relever également la vitesse du vent, une température d'un objet représentant la température de l'ambiance extérieure et d'estimer l'émissivité de la surface extérieure de la paroi.

## I.9 Travaux développés dans notre laboratoire

Le laboratoire Génie Civil et géo-environnement d'Université d'Artois (LGCgE) développe depuis des années des méthodes de caractérisation thermique de matériaux basées sur les transferts thermiques. Les fonctions de transfert caractérisent les relations entre les températures et les flux considérés dans une ou plusieurs surfaces d'un système de conduction thermique dans le formalisme de l'impédance ou du quadripôle thermique. L'identification des systèmes peut conduire à la détermination de plusieurs paramètres : la conductivité, la diffusivité, l'effusivité thermique, résistance thermique ou différents groupements de paramètres. La démarche se situe dans la volonté de développer des méthodes de caractérisation des parois applicables *in situ* dans des situations où les conditions limites ne peuvent pas être contrôlées.

Des travaux ont été réalisés par D. Defer [79]. Ils concernent l'évaluation non-destructive d'une paroi de bâtiment en utilisant les signaux naturels sous sollicitation aléatoire comme source d'information. La méthode est basée sur la notion de quadripôle et d'impédance thermique, a été appliquée au contrôle d'une paroi sur site. La structure qui a fait l'objet de l'étude est une paroi tricouche béton-polystyrène-béton. Les paramètres optimisés sont l'effusivité et la résistance thermique. Les résultats ont mis en avant la difficulté liée à l'utilisation des sollicitations naturelles pour identifier le système, elles nécessitent d'utiliser de longues périodes de mesure d'environ 6 jours.

Une autre approche a été adoptée par L. Zalewski [80], En ce qui concerne les transferts thermiques par conduction au travers de la paroi stockeuse, ici, les capteurs fluxmétriques ont été largement utilisés. A l'aide des méthodes de la théorie du signal, il a pu mesurer les paramètres thermophysiques du mur ( $\lambda$ ,  $a$  et  $b$ ). A cette occasion, il a été mis en évidence une évolution de ces paramètres au cours du temps. Ces variations semblent être corrélées aux phénomènes de séchage de la paroi et aux variations saisonnières de l'humidité ambiante. Ces paramètres sont importants, car ils interviennent directement dans la capacité de la paroi à transmettre, à stocker et à restituer avec retard la chaleur récupérée. Un modèle de simulation a été établi et validé par comparaison avec 2 années d'enregistrements expérimentaux relevés sur le site.

Parmi les travaux récents concernant la caractérisation des matériaux, M. Elaoami [81] a appliqué une méthode d'identification thermophysique d'un mortier jeune qui permet le suivi de processus évolutifs complexes au cours de sa prise, en réduisant le temps d'analyse. La notion d'impédance thermique est définie dans les approches théoriques. Le cas particulier d'un système tricouche incluant l'instrumentation au système modélisé est présenté. La mesure de températures et de flux à la surface du système, ont permis d'accéder à l'impédance expérimentale. La grandeur d'effusivité thermique est obtenue par optimisation du modèle théorique d'impédance sur l'impédance expérimentale. L'avantage de la méthode développée est de proposer une instrumentation légère et fiable, disposée en surface du système étudié et ne nécessitant qu'une seule face d'accès. La méthode développée permet de suivre l'évolution de la teneur en eau locale

du mortier durci durant des processus de séchage et d'établir une loi de corrélation entre sa teneur en eau et ses caractéristiques thermiques.

Ying Gao [82] a réalisé un mémoire de thèse sur une méthode de caractérisation thermique de matériaux granulaires basée sur l'utilisation d'une sonde fluxmétrique cylindrique qui a été développée au laboratoire. L'intérêt essentiel de cette géométrie est dans le régime de conduction unidirectionnel axisymétrique qu'elle provoque. La théorie de la conduction thermique montre que dans cette situation la diffusion de la chaleur dans le matériau dépend à la fois de l'effusivité et de la diffusivité du matériau. Une caractérisation complète du matériau peut être envisagée. Même si ces approches semblent éloignées de la thermique du bâtiment, les compétences développées tant pour l'instrumentation que pour le traitement du signal sont utilisées dans d'autres domaines d'application.

D'autres études ont proposé des méthodes de mesures à longues périodes de flux et de température pour déterminer par contact l'effusivité et sa diffusivité sur les parois des bâtiments on se basant un code de calcul de type quadripôle en utilisant la méthode inverse [83].

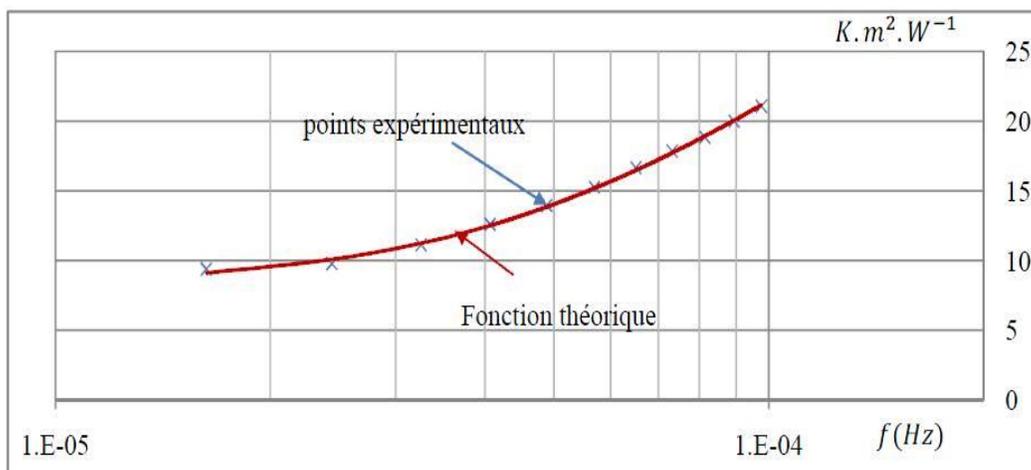


Figure I-18. Modules des fonctions  $H_1$  théorique et expérimental

La fonction  $H_1$  (Figure I-18) est calculée et les paramètres thermophysiques des expressions théoriques de  $H$  sont obtenus de façon itérative (méthode du simplexe) pour caler le modèle théorique sur les points expérimentaux. L'ajustement conduit à la détermination de la diffusivité thermique et de l'effusivité thermique équivalente globale de paroi. Wu et al [84] ont proposé une méthode basée sur un traitement fréquentiel des évolutions des flux et de températures. Elle permet une estimation de la conductance et de la capacité globale de la paroi.

Les méthodes proposées viennent en soutien de ce qui est existant, par exemple pour alimenter des bases de données de caractéristiques thermiques utilisées dans les procédures de modélisation. Elles sont également là pour compléter l'auscultation *in situ* qui est une source d'information importante et souvent négligée alors qu'elle représente la réalité de l'utilisation d'un bâtiment.

## **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons précisé dans un premier temps que ce travail de thèse s'est déroulé en étroite liaison avec le programme lancé par le bailleur social Pas de Calais Habitat.

La thermographie infrarouge reste une méthode efficace et reconnue parmi les méthodes existantes. Les facteurs de réponse, récupérés de cette méthode, sont utilisés pour le calcul des flux de chaleur transitant à travers les deux faces d'une paroi soumise à des sollicitations de température variables dans le temps. Cette méthode prend en compte l'inertie thermique de la paroi ce qui permet d'obtenir un calcul exact des charges thermiques du bâtiment dans son ensemble.

La détermination de ces facteurs de réponse s'effectue par une méthode analytique ou numérique ou tirée de mesures expérimentales dans le cas des parois constituées de couches de matériaux homogènes pour lesquelles la conductivité et la diffusivité sont connues. Dans le cas de matériaux présentant un fort niveau d'hétérogénéité, il devient alors difficile de modéliser leur comportement thermique en régime variable. Pour de telles parois les facteurs de réponse sont déduits de manière expérimentale.

Dans un deuxième temps, pour situer l'originalité de la démarche et montrer la nécessité de développer une nouvelle méthode d'identification thermo-physique, nous avons présenté les principales méthodes en matière de thermographie infrarouge active. Il en ressort que l'intérêt des traitements fréquentiels réside dans l'utilisation d'images de phase, moins sensibles à la non uniformité de la sollicitation et aux propriétés réfléchives de surface.

Jusqu'à présent, les techniques sans contact développées (méthode flash) pour la caractérisation de matériaux homogènes, avec des épaisseurs très faibles, dans des conditions contrôlées ne permettraient que d'estimer la diffusivité du matériau. Ce paramètre est bien sûr essentiel. Il est d'ailleurs la seule méthode sans contact dans un problème monodimensionnel cartésien mais l'accès à un deuxième paramètre est bien sûr indispensable. La méthode ne permet pas d'atteindre la chaleur volumique du matériau, qui permet la caractérisation complète. Parmi ces avantages, méthode simple d'estimation, facile à mettre en œuvre, ne dépend pas de la méthode inverse et offre une uniformité de flux sur toute la surface de l'échantillon.

La méthode avec contact reste une méthode classique, permet par ailleurs d'obtenir la résistance thermique, la diffusivité, l'effusivité en régime permanent de parois. Le principal défaut de la méthode en régime permanent réside dans le temps de mesure (jusqu'à 48 heures pour atteindre le régime permanent). Pour certains matériaux peu diffusifs, le régime stationnaire sera long à obtenir. L'avantage se présente dans la simplicité de la mesure : les relevés de flux et de températures suffisent par exemple à la détermination de la conductivité thermique.

Il ressort également de cette étude bibliographique que la caractérisation des propriétés thermophysiques des parois pose un grand problème. Fort de notre expérience dans l'utilisation des capteurs de flux, température et de caméra infrarouge nous allons essayer de caractériser des

différents types des parois. Le laboratoire s'est, par le passé, déjà intéressé à ce type de caractérisations avec contact. Dans ce qui a été exposé dans ce chapitre, la thermographie infrarouge peut être un élément déterminant capable de déterminer les propriétés thermophysiques des parois ? Il reste à le vérifier. Voici une question qui se pose et à laquelle nous allons essayer de répondre dans la suite de ce travail.

L'objectif suivant va consister à établir une méthode de caractérisation de propriétés thermophysiques. Nous décidons pour cela d'utiliser une caméra infrarouge placée à l'une de face d'échantillons de grande taille pour lesquelles une estimation simultanée de la conductivité et de la chaleur volumique est souhaitable. Ce type de méthode est envisagé pour des raisons pratiques.

Nous nous sommes orientés sur un principe qui consiste à solliciter thermiquement une face d'accès d'une paroi en imposant un flux de chaleur sous forme d'un créneau et à mesurer la température moyenne de surface sans contact de l'autre face en utilisant une caméra infrarouge. A partir de signaux de flux et de températures mesurés aux limites de la paroi, les propriétés thermophysiques de la paroi seront estimées par méthode inverse basée sur la modélisation numérique du transfert dans la paroi. L'identification de la conductivité thermique et de la chaleur volumique de la paroi sera réalisée en optimisant le groupement de paramètres qui permet de minimiser l'écart entre la température normalisée mesurée et la température normalisée simulée. Le schéma d'inversion sera construit autour d'un modèle numérique décrivant la réponse de la paroi suivant la méthode des différences finies en 1D.

Enfin, avant d'entreprendre une expérimentation quelconque, il apparaît évident de réaliser une étude théorique des transferts thermiques au sein du mur monocouche ou multicouche. Dans le chapitre suivant, nous présenterons, une modélisation des transferts thermiques dans un échantillon de mur. Cette modélisation sera suivie par des essais préliminaires visant à valider et optimiser la modélisation.

**Chapitre II:**  
**Aspects théoriques**

## II.1 Introduction

Les parois dont nous allons analyser le comportement thermique peuvent être classées en trois types : la paroi monocouche homogène, multicouche et la paroi équivalente homogène. On considérera à plusieurs reprises le cas du « mur » monodimensionnel, bien que cette hypothèse simplificatrice ne soit pas toujours de règle dans le bâtiment.

Différentes méthodes d'analyse vont être utilisées, selon le but recherché. Il s'agit :

- de la méthode des différences finies pour la caractérisation dynamique des parois afin de déterminer les paramètres pertinents caractérisant le comportement thermique ;
- d'un modèle numérique unidirectionnel déterminant les propriétés thermophysiques d'une paroi homogène ;
- d'une approche numérique modélisant le transfert thermique à travers un mur en trois couches ;
- d'une approche numérique déterminant les propriétés thermophysiques d'une paroi équivalente ;
- d'un algorithme simplex, Levenberg Marquardt et l'algorithme génétique pour l'optimisation d'une paroi.

### II.1.1 Formulation de problème

Le rapport présente une application de thermographie infrarouge active destinée à la détermination des propriétés thermophysiques d'une paroi in situ. La procédure consiste à imposer un flux de chaleur uniforme sous la forme d'un créneau sur la face avant. Cette sollicitation produit une variation de température de la surface arrière de la paroi enregistrée à l'aide d'une caméra IR. L'objectif du traitement des données élaboré dans ce travail est de rechercher les paramètres thermophysiques de la paroi qui permettront de reproduire le plus exactement possible l'évolution de température sur la face arrière de la paroi. L'identification des paramètres thermiques de la paroi peut être réalisée en passant par une démarche d'inversion. Ceci conduit à rechercher un groupement de paramètres qui minimise numériquement l'écart entre les températures mesurées et les températures simulées. Dans ce but, un modèle numérique dit « direct » décrivant la réponse de la paroi suivant la méthode des différences finies en 1D est élaboré. Il est intégré dans un schéma d'inversion dont le rôle est d'identifier les paramètres physiques de la paroi testée.

Les parois de bâtiment ont le plus souvent une épaisseur finie (notée « e » dans ce travail) très faible devant leurs dimensions transversales. Cette configuration géométrique permet de justifier l'hypothèse d'unidirectionnalité du transfert thermique sur laquelle s'appuie le modèle

1D développé dans ce travail. Cette hypothèse se vérifie aisément dans la partie courante de la paroi (loin des bords et des éléments d'ossature) et montre l'intérêt de cette première approche.

La partie bibliographique a montré que des techniques permettant de caractériser les parois in situ existaient déjà mais qu'elles nécessitaient des essais de longues durées pas toujours adaptés à des objectifs d'auscultation. Une des contraintes fixées dans ce travail est de limiter les essais à une durée de l'ordre de la journée.

Le souci de proposer une mise en œuvre aisée in situ nous a conduit à limiter la technique à l'exploitation de la réponse à un créneau bien que tout type de sollicitation puisse être envisagé. Une sollicitation de type tout ou rien est la plus simple à réaliser in situ. Elle ne nécessite pas de pilotage spécifique du signal de commande. Les premiers essais ont été effectués sur des parois homogènes en conditions contrôlées de laboratoire.

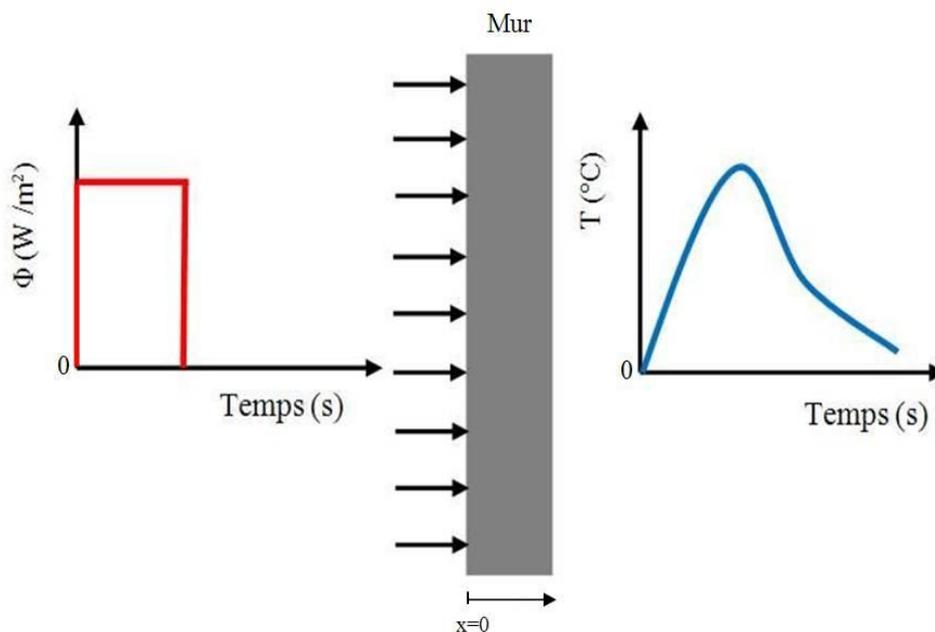


Figure II-1. Schéma principe d'étude

Un modèle numérique permettant de calculer la température de la surface de la paroi en réponse à une sollicitation de flux sur l'autre face a été élaboré. Dans les échanges que nous devons modéliser, les trois modes de transfert de chaleur, conduction, rayonnement et la convection entrent en jeu [85]. Un bref rappel des notions utiles des transferts de chaleur sont présentées dans la partie suivante.

## II.2 Transferts de la chaleur

Dans le cas où les transferts de masse sont négligeables et que l'on n'observe pas de phénomènes de diffusion de matière, de changement de phase, de réaction chimique, le transfert de chaleur résulte de la superposition des trois modes prédominants :

- La conduction

Ce mode de transfert intéresse essentiellement les solides. La chaleur se transmet de molécule en molécule sans déplacement apparent de matière par contact direct entre les particules d'un corps ou entre des corps ayant des niveaux énergétiques différents, suite au mouvement de ces particules élémentaires. Il s'agit du seul mode de propagation de la chaleur rencontré dans les solides homogènes ou pas.

- Le rayonnement

Tous les corps, même à basse température, émettent de la chaleur par rayonnement (ondes électromagnétiques). L'énergie émise croît très vite avec la température du corps. Le phénomène de rayonnement thermique constitue une forme particulière de transfert thermique dans lequel le porteur d'énergie n'est plus représenté par des particules de substance, mais par des ondes électromagnétiques ayant pour origine l'agitation atomique à la surface d'un corps. Le rayonnement thermique n'exige pas de support matériel, il se produit ainsi dans le vide.

- La convection

Elle intéresse les fluides et s'opère avec déplacement apparent de matière. Élever la température, c'est accroître l'agitation moléculaire du corps. Par exemple, au contact d'une paroi chaude, l'air s'échauffe, l'agitation moléculaire augmente, le nombre de molécules par  $m^3$  diminue, donc la densité décroît et l'air monte. Il est remplacé par de l'air plus frais, ce qui crée un courant de convection dite naturelle. La convection est un mode de transfert qui implique un déplacement de matière dans le milieu, par opposition à la conduction thermique. Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides, (liquides ou gaz) en mouvement.

Dans notre cas, la paroi à étudier est le siège d'une conduction pure. En face arrière, la chaleur est échangée avec l'environnement à la fois par convection et rayonnement par un échange surfacique qui intervient comme condition limite de la paroi.

## II.3 Mise en équations des phénomènes

### II.3.1 Conduction

#### II.3.1.1 Loi de Fourier

Un milieu homogène soumis à un champ de température décrit par une fonction de l'espace et du temps  $T(x, y, z, t)$  est caractérisé par un vecteur flux. Si dans ce milieu homogène, les variations de températures ne sont pas trop importantes, les propriétés thermiques sont des constantes et on rend compte localement des phénomènes par la loi de Fourier qui indique que le vecteur de densité de flux  $\vec{q}$  est égal à :

$$\vec{q}(x, y, z, t) = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}T(x, y, z, t) \quad (\text{II-1})$$

La loi de Fourier relie linéairement la densité de flux de chaleur au gradient de température local. Notre étude est effectuée sur des murs de surface plane et d'épaisseur limitée, le système en coordonnées cartésiennes est retenu. Le terme  $\lambda$  est la conductivité thermique du matériau, paramètre de référence dans l'étude du transfert en régime permanent, et s'exprime en  $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$ . Une variation de température selon une direction de l'espace provoquera un flux de chaleur dans cette même direction mais de sens opposé (pris par convention du chaud vers le froid).

#### II.3.1.2 Equation de la chaleur

Lorsqu'un flux de chaleur traverse un matériau isotrope et homogène, l'équation de conservation de l'énergie en conduction pure s'écrit :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div} \phi = 0 \quad (\text{II-2})$$

Où  $\rho$  est la densité volumique de matériau  $[\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ , et  $c$  est la chaleur massique  $[\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{Kg}^{-1}]$ .

Compte tenu de la loi de Fourier, l'équation précédente devient :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \overrightarrow{\text{grad}}T) \quad (\text{II-3})$$

Pour une plage de variations des températures restreinte, la conductivité est considérée comme constante et on obtient:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T \quad \text{avec} \quad a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{II-4})$$

C'est l'équation de la chaleur où le symbole  $\Delta$  désigne le Laplacien et le coefficient  $a$  est appelé diffusivité thermique du milieu exprimé en  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Il traduit l'aptitude d'un matériau à propager plus ou moins rapidement une sollicitation thermique.

### II.3.1.3 Echanges surfaciques et conditions limites

Les conditions aux limites (CL) peuvent avoir plusieurs formes. Elles traduisent les transferts entre les différentes parties du corps et son milieu environnant. Les conditions imposées aux frontières du milieu peuvent être classées en trois catégories. Elles sont distinguées ci-dessous:

- CL de 1<sup>e</sup> type ou de Dirichlet qui fixent la température  $T_s$  à la surface du corps (ou sur une partie de la surface) à chaque instant. La température à la surface extérieure du volume a une valeur déterminée qui peut, bien sûr, elle-même varier dans le temps et l'espace. Les conditions de première espèce désignent le cas où l'évolution de la température est imposée. Une condition limite de première espèce en  $x = 0$  s'écrit:

$$T(x_0, t) = T_0(t) \quad (\text{II-5})$$

- CL de 2<sup>e</sup> type ou de Neumann qui impose le flux sur la surface, spécifient la connaissance du flux surfacique dans chaque point de la surface du corps étudié et à chaque instant. Les conditions de deuxième espèce correspondent au cas où l'évolution de la densité de flux thermique est connue en surface. Le cas se présente, par exemple en  $x=0$ , lorsque la surface d'un mur est soumise à un rayonnement solaire déterminé:

$$q(x_0, t) = q_0(t) \quad (\text{II-6})$$

- CL de 3<sup>e</sup> type ou de Fourier (ou encore mixte) donne la température environnante du corps  $T_e$  et la loi qui décrit le transfert thermique entre le corps et son environnement. Ce type de transfert qui a lieu à la surface du corps est très complexe à modéliser et implique un grand nombre de variables. La loi de Newton établit la relation entre la densité de flux thermique transférée à la surface du corps, de température  $T_s$ , vers son milieu environnant  $T_e$ . Elle correspond à un échange par rayonnement et convection avec le milieu extérieur supposé à une température moyenne. Il est nécessaire de distinguer 2 types de transferts superficiels par convection et par rayonnement:

$$q(x_0, t) = q_e(t) = h_g(T(x_0, t) - T_e) \quad (\text{II-7})$$

Le coefficient d'échange surfacique global  $h_g$  [W/m<sup>2</sup>.K] tient compte des échanges par rayonnement et par convection. C'est cette condition qui se rencontre le plus souvent dans la réalité.

Cette configuration correspond à notre situation expérimentale et cette formulation a été retenue comme modèle de connaissance. Pour les essais in situ, le chauffage est appliqué du côté extérieur. Le suivi de la température de surface par thermographie infrarouge est réalisé côté intérieur dans un environnement stable. De cette façon, le coefficient d'échange peut être considéré comme constant pendant toute la durée de l'essai.

### II.3.1.4 Conditions initiales

La simulation d'un phénomène de transfert pendant une certaine durée d'observation dépend des sollicitations qui lui sont imposées durant cet essai. Elles sont intégrés dans notre cas sous la forme de conditions limites (pas de génération de chaleur, pas de réaction chimique ni de changement de phase). La simulation dépend aussi des caractéristiques géométriques et thermophysiques des éléments du système modélisé. L'état initial du champ de température est essentiel. Il s'agit d'un problème délicat dans la pratique. S'il est aisé de connaître les températures de surface en début d'essai, il est très difficile de connaître le champ interne qui dépend de l'historique de sollicitation auquel le système a été soumis préalablement. Si les sollicitations n'ont pas été enregistrées, il est nécessaire de faire des hypothèses et de faire le nécessaire dans la procédure expérimentale pour qu'elles rendent compte de l'état réel de la manière la plus proche possible.

En condition de laboratoire, le problème est simple. L'ambiance est stable et à l'état initial, la paroi est à l'équilibre thermodynamique à une température uniforme mesurée en surface et introduite dans le modèle numérique.

In situ, si du côté intérieur la température ambiante varie généralement peu et lentement, du côté extérieur, les variations microclimatiques imposent avant l'essai des sollicitations fortement variables qui affectent le champ de température interne de la paroi. Pour pouvoir s'affranchir du suivi préalable sur une longue durée des sollicitations, nous avons opté pour le protocole expérimental suivant : Plusieurs dizaines de minutes (voire plusieurs heures si nécessaire) avant le début de l'essai, le système de chauffage (il sera décrit plus en détail dans la partie expérimentale) est mis en place du côté extérieur. La résistance chauffante plane est plaquée sur la paroi et maintenue par une épaisse couche d'isolant thermique qui va limiter l'influence des sollicitations extérieures. De cette manière, le champ de température interne de la paroi auscultée va tendre vers un régime permanent. L'observation des températures des deux surfaces et du flux entrant côté extérieur permet d'apprécier la validité de l'hypothèse et définir le moment du début de l'essai. Dans ces conditions, à l'état initial, le profil de température interne de la paroi est considéré comme stable et variant linéairement entre les deux surfaces de la paroi. A l'instant initial ( $t=0s$ ), la température  $T(x, 0)$  peut s'écrire sous la forme :

$$T(x, 0) = T_e + (T_s - T_e) * \left(\frac{x}{e}\right) \quad \text{pour tout } 0 < x < e \quad (\text{II-8})$$

### II.3.2 Modèle direct

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour simuler la température de face arrière à partir des grandeurs enregistrées (flux de sollicitation, température d'environnement) et des différentes propriétés thermophysiques. La théorie des quadripôles peut permettre dans le domaine de Laplace de déterminer des réponses impulsionnelles par transformation inverse de Laplace (algorithme de Gaver-Stehfest par exemple) puis de calculer la température de face

arrière en effectuant des produits de convolution. Dans le domaine de Fourier, les quadripôles peuvent permettre de calculer le spectre de la température de sortie et d'en déduire son évolution temporelle par transformée de Fourier inverse. Ces solutions sont attractives, efficaces et bien adaptées à ce type de problème 1D. Toutefois, nous leur avons préféré une modélisation numérique car elle pourrait permettre par la suite d'aborder des problèmes plus complexes de type 2D voire 3D. Nous avons opté dans ce travail pour une modélisation en différences finies. L'algorithme a été programmé en environnement Matlab<sup>®</sup>.

Cette partie est consacrée à la présentation des différentes étapes qui ont permis les différents modèles numériques utilisés dans ce travail. Les simulations qu'ils permettront d'effectuer ont plusieurs objectifs. Elles aident à la compréhension des phénomènes de transferts de chaleur lors d'une dissipation de chaleur par la résistance électrique. Le modèle peut également aider à optimiser les paramètres expérimentaux tels que la durée d'essai, le type de sollicitation et à déterminer dans quelles conditions les propriétés thermophysiques recherchées peuvent être identifiées.

### **II.3.2.1 Notions de différences finies**

#### **II.3.2.1.1 Cas du transfert de chaleur pour un système monodirectionnel cartésien**

Notre travail se situe dans le cadre d'un transfert unidirectionnel. Dans ce cas, les lignes de flux peuvent être schématisées par des droites parallèles à la direction de propagation et les surfaces isothermes par des plans perpendiculaires à cette direction.

Ainsi, le domaine auquel nous nous intéressons pour résoudre l'équation de la chaleur est une paroi plane, d'épaisseur  $e$  dont les dimensions transversales sont infinies ou suffisamment grandes devant l'épaisseur pour que les évolutions des grandeurs soient indépendantes des coordonnées transversales ( $y$  et  $z$ ) (Figure II-2). En coordonnées cartésiennes, les grandeurs thermiques ne dépendent que de l'abscisse  $x$ .

La modélisation en différences finies permet de représenter le système thermique sous la forme d'un maillage définissant des cellules élémentaires dont les valeurs aux nœuds sont représentatives de l'état thermique du matériau. La méthode classique consiste d'une part à discrétiser l'espace en divisant l'épaisseur  $e$  en  $m$  tranches le plus généralement d'égales épaisseurs, d'autre part à considérer l'état du système à intervalles réguliers, aux temps  $n \cdot \Delta t$  où  $\Delta t$  est le pas de temps choisi par l'opérateur et  $n$ , un entier variant de 0 à l'infini.

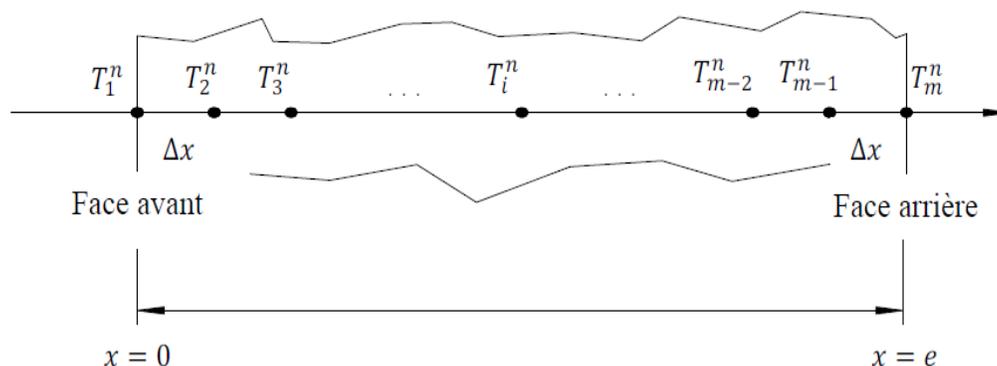


Figure II-2. Discrétisation de mur en  $m$  points pour  $0 \leq x \leq e$

Comme le montre la figure ci-dessus, nous discrétisons le champ spatial par le pas axial  $\Delta x$  ; La région  $0 < x < e$  discrétiser en  $m$  couches d'épaisseur  $\Delta x$  identique :

$$\Delta x = \frac{e}{m} \quad (\text{II-9})$$

et le champ temporel par le pas de temps  $\Delta t$ . Une température à un instant donné sera repérée par l'abscisse  $x = i \cdot \Delta x$  du point et le temps  $t = n \cdot \Delta t$  auquel il est considéré.

L'équation de diffusion de la chaleur dans ce cas s'écrit, pour un milieu isotrope et dans une région  $0 \leq x \leq e$  :

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq e, \quad t > 0 \quad (\text{II-10})$$

Il existe plusieurs techniques pour résoudre cette équation. Si on considère que le champ de température est modélisé sur un temps long, la méthode explicite est inadaptée à cause du critère de stabilité qui obligerait à calculer un nombre très important de points. Dans ce cas, la méthode implicite s'impose. Elle autorise le choix sans contrainte du pas de discrétisation spatiale et du pas de temps.

Un schéma de différentiation centrale au second ordre a été utilisé. L'espace de dérivation est discrétisé au moment  $n+1$  comme suit :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{i,n+1} = \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + 0[(\Delta x)^2] \quad (\text{II-11})$$

Où  $T(x, t) = T(i\Delta x, n\Delta t) = T_i^n$

La dérivation en fonction du temps au premier ordre est estimée par :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{i,n+1} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} + 0[\Delta t] \quad (\text{II-12})$$

Si on introduit les expressions numériques des dérivées partielles, dans l'équation de la chaleur en condition unidirectionnelle cartésienne, on obtient l'approximation de cette équation sous la forme suivante :

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = a \cdot \frac{T_{i-1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad \text{pour } i = 2,3,4 \dots m - 1 \quad (\text{II-13})$$

Dont la précision est de l'ordre de  $0 [(\Delta x)^2, \Delta t]$ , et cette équation est inconditionnellement stable. Dans le cas d'un schéma implicite, à chaque pas de temps, les équations sont résolues simultanément jusqu'à la détermination de la température du dernier point.

La figure II-3 met en évidence les relations entre le point  $(i, n+1)$  et les points voisins.

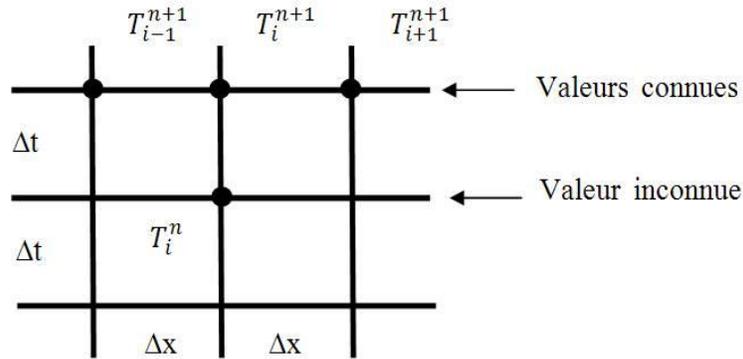


Figure II-3. Schéma aux différences finies implicite

On peut en tirer  $T_i^n$  :

$$T_i^n = -rT_{i-1}^{n+1} + (2r + 1)T_i^{n+1} - rT_{i+1}^{n+1} \quad \text{pour } i = 2,3,4 \dots m - 1 \quad (\text{II-14})$$

Où

$$r = \frac{a\Delta t}{(\Delta x)^2}, \quad a = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (\text{II-15})$$

Pour l'ensemble du modèle, ces équations conduisent à  $m-2$  relations. Deux relations supplémentaires sont nécessaires pour que le nombre d'équations soit égal au nombre d'inconnues ; on introduit les conditions aux limites en  $i = 1$  et  $i = m$  pour compléter le système. Si les densités de flux sont précisées à ces limites, les équations ci-dessus seront suffisantes pour calculer les températures aux nœuds inconnus  $T_i^n$ , avec  $i = 2,3,4 \dots m - 1$ .

### II.3.3 Application à notre situation expérimentale

Dans notre étude, l'échantillon est initialement à la température stable  $T(x, 0)$ . En début d'essai, elle est considérée comme variant linéairement entre les faces et peut être considérée comme uniforme dans le cas de l'essai en laboratoire. Ce mur est soumis sur sa face d'accès ( $i=1$ ), dite "face avant", à une excitation thermique sous la forme d'un créneau de densité de flux ( $q_0$ ) dissipé uniformément sur la surface avant par une résistance électrique. Cette sollicitation produit une diffusion de chaleur dans la paroi suivie par l'observation du champ de température de la paroi.

#### II.3.3.1 Cas de la paroi monocouche

Pour illustrer l'étude théorique, nous avons retenu ici l'épaisseur de la paroi en plâtre étudiée dans la partie expérimentale (épaisseur 6.5cm). Un flux est imposé face avant et un échange surfacique avec l'environnement s'effectue en face arrière. Un pas de 20 secondes a été retenu.

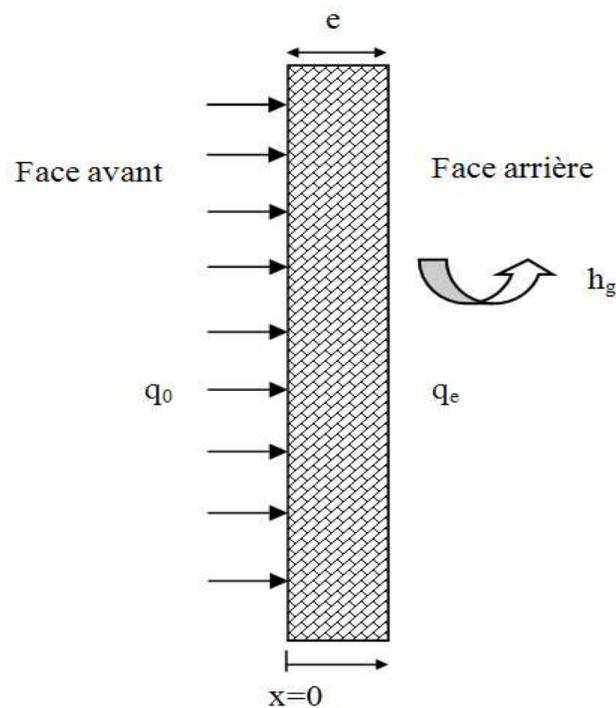


Figure II-4. Schéma principe d'étude

Dans notre cas, on va utiliser la différence finie centrale:

$$\frac{df(x_i)}{dx} \cong \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x} \equiv \Delta_x^0 f_i \quad (\text{II-16})$$

Donc pour  $i = 2$ , on obtient l'expression pour la condition limite à la face avant du mur :

$$-\lambda \frac{T_3^{n+1} - T_1^{n+1}}{2\Delta x} = q_0 \quad (\text{II-17})$$

On obtient la température à la surface avant du mur suivante :

$$T_1^{n+1} = T_3^{n+1} + \frac{2\Delta x}{\lambda} q_0 \quad (\text{II-18})$$

Ainsi que la condition limite à la face arrière du mur pour  $i = m - 1$ :

$$-\lambda \frac{T_m^{n+1} - T_{m-2}^{n+1}}{2\Delta x} = q_e \quad (\text{II-19})$$

On retire  $T_m^{n+1}$  :

$$T_m^{n+1} = T_{m-2}^{n+1} + \frac{2\Delta x}{\lambda} q_e \quad (\text{II-20})$$

Selon la règle de Taylor, l'équation à l'ordre 2 est plus précise que l'équation à l'ordre 1. En se basant sur l'équation (II-14), quand  $i = 2$ , on a :

$$T_2^n = -rT_1^{n+1} + (2r + 1)T_2^{n+1} - rT_3^{n+1} \quad (\text{II-21})$$

On introduit l'équation (II-18) à l'équation (II-21), la température pour  $i = 2$  peut s'écrire, à l'ordre 2 :

$$T_2^n + \frac{2r\Delta x}{\lambda} q_0 = (2r + 1)T_2^{n+1} - 2rT_3^{n+1} \quad (\text{II-22})$$

En se basant sur l'équation (II-14), pour le point  $i = m - 1$  :

$$T_{m-1}^n = -rT_{m-2}^{n+1} + (2r + 1)T_{m-1}^{n+1} - rT_m^{n+1} \quad (\text{II-23})$$

On introduit l'équation (II-20) à l'équation (II-23), on obtient la température pour ( $i = m - 1$ ) :

$$T_{m-1}^n + \frac{2r\Delta x}{\lambda} q_e = -2rT_{m-2}^{n+1} + (2r + 1)T_{m-1}^{n+1} \quad (\text{II-24})$$



La figure II-5 présente le résultat d'une simulation de la température en face arrière pour un créneau de flux imposé en face avant de  $134 \text{ W/m}^2$  pendant 40 minutes. Les températures étaient supposées uniformes initialement tout comme la température d'ambiance qui reste fixée à  $20^\circ\text{C}$  pendant tout l'essai. La sollicitation entraîne une élévation de température en face arrière avec un certain retard et une certaine dynamique qui dépendent de la nature de la paroi, de son épaisseur et des conditions d'échanges surfaciques. Pour des temps très longs (non représentés ici), la chaleur injectée dans la paroi est complètement transmise à l'environnement et la température diminue jusqu'à  $20^\circ\text{C}$ .

Dans un premier temps, l'étude numérique d'un modèle monocouche a été élaborée et vient d'être présentée (Figure II-5). Il est évident que l'approche peut être étendue à des systèmes multicouches que l'on rencontre plus généralement dans les parois réelles.

### II.3.3.2 Cas de la paroi multicouche

Le cas d'une paroi constituée de trois couches d'épaisseur  $e_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) est considéré. Il s'agit d'un modèle qui a été utilisé dans ce travail. Il est représenté schématiquement sur la figure II-6. La généralisation à  $n$  couches ne pose pas de problème.

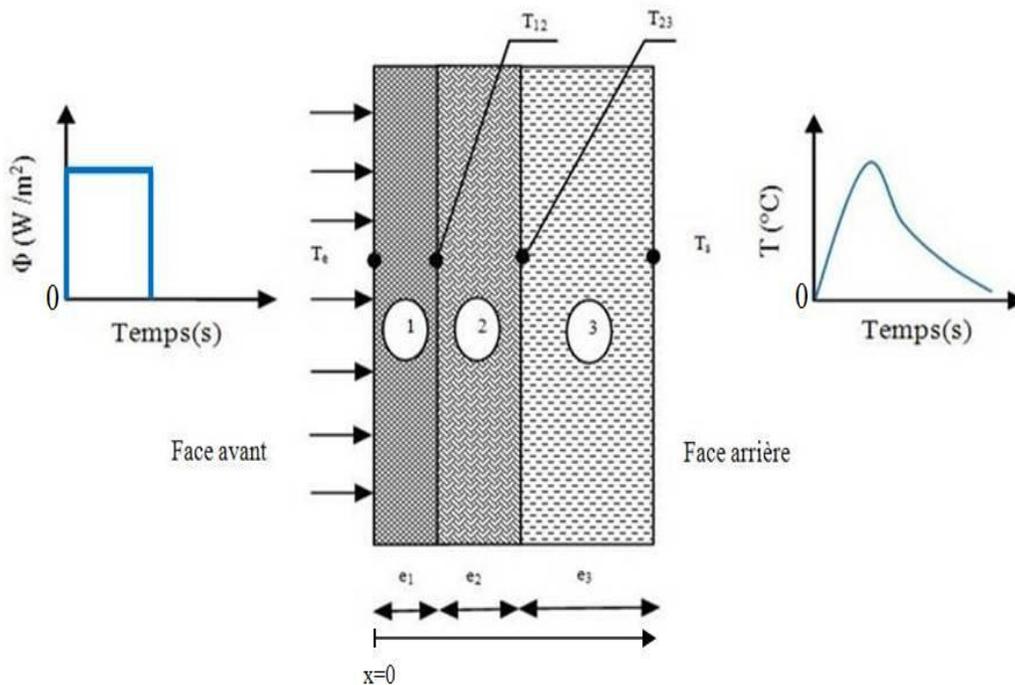


Figure II-6. Schéma d'une paroi multicouche

### II.3.3.2.1 Equation aux interfaces de différents matériaux

Les nœuds placés à l'intérieur des milieux ou placés entre 2 milieux solides sont soumis à des phénomènes de conduction pure. Cette partie est consacrée à l'écriture des relations qui traitent de l'interface entre deux matériaux différents. Entre ces deux milieux,  $T_i$  représente la température d'interface.

Le bilan thermique au niveau de chaque nœud interne  $i$  s'écrit de la façon suivante:

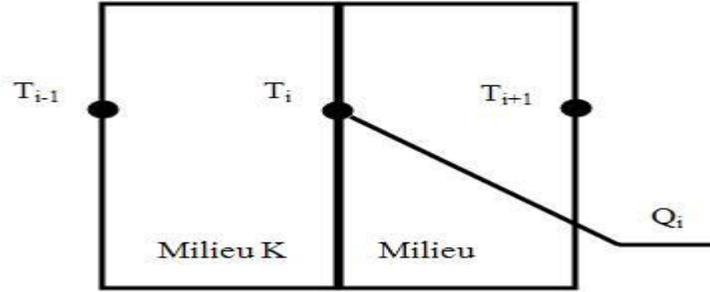


Figure II-7. Modélisation par différences finies de l'interface entre deux matériaux

$$C_{k,k+1} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{(T_{i-1} - T_i)}{R_k} - \frac{(T_i - T_{i+1})}{R_{k+1}} + Q_i \quad (\text{II-26})$$

$C_{k,k+1}$  : Capacité thermique associée au nœud  $i = \frac{c_k + c_{k+1}}{2}$  (J/K)

$R_k ; R_{k+1}$  : Résistance thermique entre les nœuds  $i, i-1$  et  $i+1$  (K/W)

$U_k ; U_{k+1}$  : Conductance thermique entre les nœuds  $i, i-1$  et  $i+1$  ( $\text{W.K}^{-1}$ )

$Q_i$  : Apports énergétiques (interne ou solaire) au nœud  $i$ .

On résout l'équation en utilisant un schéma implicite :

$$C_{k,k+1} \frac{(T_i^{n+1} - T_i^n)}{\Delta t} = \frac{(T_{i-1}^{n+1} - T_i^{n+1})}{R_k} - \frac{(T_i^{n+1} - T_{i+1}^{n+1})}{R_{k+1}} + Q_i^{n+1} \quad (\text{II-27})$$

Dans notre cas,  $Q_i^{n+1} = 0$

A partir de cela, on peut aussi s'écrire pour  $T_i^n$  :

$$T_i^n = \left[ \frac{-\Delta t U_k}{C_{k,k+1}} \right] T_{i-1}^{n+1} + \left[ \frac{\Delta t (U_k + U_{k+1}) + C_{k,k+1}}{C_{k,k+1}} \right] T_i^{n+1} - \left[ \frac{\Delta t U_{k+1}}{C_{k,k+1}} \right] T_{i+1}^{n+1} \quad (\text{II-28})$$

avec  $U_k = \frac{1}{R_k}$  et  $U_{k+1} = \frac{1}{R_{k+1}}$

Cette équation peut être exprimée sous la forme  $[A].[T]= [B]$  où  $[T]$  est la matrice représentant la température des différents nœuds;  $[A]$  la matrice représentant les coefficients associés aux différents nœuds;  $[B]$  rassemble les termes restants, c'est-à-dire les apports énergétiques (Flux solaires, chauffages, etc...) et le terme concernant la température du nœud étudié au pas de temps précédent.

### II.3.3.2 Le système

On suppose chaque couche homogène avec des paramètres thermophysiques  $\lambda_i$ ,  $\rho_i$  et  $c_i$  constants. On suppose que les couches sont en contact parfait. Entre deux milieux,  $T_{12}$  et  $T_{23}$  représentent la température d'interface.  $T_e$  la température d'entrée de la paroi à  $x=0$ ,  $T_s$  la température de sortie à  $x=e$ .

Equation au niveau du nœud intérieur d'une surface (1<sup>ère</sup> couche), "face avant",  $x=0$ :

On peut directement employer l'équation (II-21) pour calculer leur valeur au nœud  $i=2$ :

$$T_2^n + \frac{2r_1\Delta x_1}{\lambda_1} q_0 = (2r_1 + 1)T_2^{n+1} - 2r_1T_3^{n+1} \quad (\text{II-29})$$

Où

$$r_1 = a_1 \frac{\Delta t}{(\Delta x_1)^2}, \quad a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \quad \text{et} \quad \Delta x_1 = \frac{e_1}{ND_1}$$

Première interface :

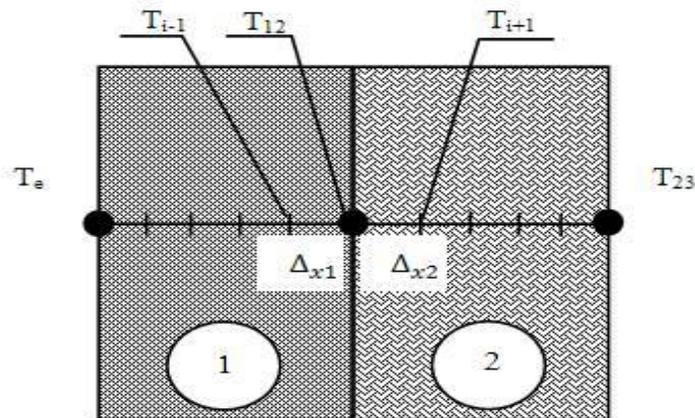


Figure II-8. Schéma implicite en différence finies à l'interface 1 et 2

A partir l'équation (II-28), on peut obtenir la température d'interface  $T_{12}^n$ :

$$T_{12}^n = A_{12}T_{i-1}^{n+1} + B_{12}T_{12}^{n+1} + C_{12}T_{i+1}^{n+1} \quad (\text{II-30})$$

Où

$$A_{12} = \left[ \frac{-\Delta t U_1}{c_{12}} \right], \quad B_{12} = \left[ \frac{\Delta t (U_1 + U_2) + c_{12}}{c_{12}} \right], \quad C_{12} = \left[ \frac{-\Delta t U_2}{c_{12}} \right]$$

$$c_{12} = \frac{(c_1 + c_2)}{2}, \quad R_1 = \frac{\Delta x_1}{\lambda_1}, \quad R_2 = \frac{\Delta x_2}{\lambda_2}, \quad U_1 = \frac{1}{R_1}, \quad U_2 = \frac{1}{R_2} \quad \text{et} \quad \Delta x_2 = \frac{e_2}{ND2}$$

### Deuxième interface

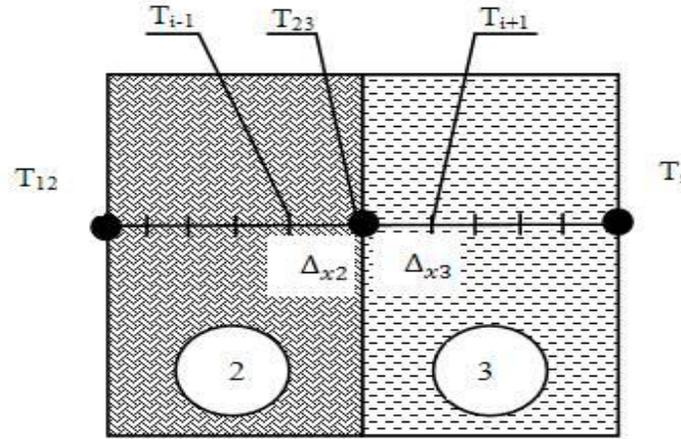


Figure II-9. Schéma implicite en différence finies à l'interface 2 et 3

Dans un souci de simplification, on pose les expressions des trois termes ci-dessous :

$$A_{23} = \left[ \frac{-\Delta t U_2}{c_{23}} \right], \quad B_{23} = \left[ \frac{\Delta t (U_2 + U_3) + c_{23}}{c_{23}} \right], \quad C_{23} = \left[ \frac{-\Delta t U_3}{c_{23}} \right]$$

$$c_{23} = \frac{(c_2 + c_3)}{2}, \quad U_3 = \frac{1}{R_3} \quad \text{et} \quad R_3 = \frac{\Delta x_3}{\lambda_3}$$

Donc l'expression de  $T_{23}^n$  peut s'écrire sous la forme :

$$T_{23}^n = A_{23} T_{i-1}^{n+1} + B_{23} T_{23}^{n+1} + C_{23} T_{i+1}^{n+1} \quad (\text{II-31})$$

Equation au niveau du nœud intérieur d'une surface (3<sup>ème</sup> couche), "face arrière",  $x=e$ :

D'après l'équation (II-24), on obtient :

$$T_{m-1}^n + \frac{2r_3 \Delta x_3}{\lambda_3} q_e = -2r_3 T_{m-2}^{n+1} + (2r_3 + 1) T_{m-1}^{n+1} \quad (\text{II-32})$$

$$\Delta x_3 = \frac{e_3}{ND3}, \quad r_3 = a_3 \frac{\Delta t}{(\Delta x_3)^2}, \quad a_3 = \frac{\lambda_3}{\rho_3 c_3}$$



Pour l'étape allant de  $n$  vers  $n+1$ , les différentes équations écrites pour chaque nœud peuvent être regroupées sous la forme matricielle suivante :

$$[A] * [T]_i^{n+1} = [T]_i^n \quad (\text{II-34})$$

Avec l'équation (II-33, II-34), nous pouvons calculer le champ de température en tout point et à tout instant.

Elle est basée sur l'observation de la réponse en température d'une surface "face arrière" suite à la sollicitation par un créneau de flux sur sa "face avant". Les simulations réalisées correspondent au cas d'une dissipation uniforme de chaleur sur la face avant de la paroi testée. Après avoir calculé les températures inconnues du système complet, le flux en  $x=0$  permet de calculer la température ( $T_s$ ) en  $x=e$ .

Les paramètres thermophysiques de la paroi seront identifiés par une procédure inverse qui vise à caler cette simulation de la température de sortie sur la température de surface de parois testé observée par la caméra infrarouge.

Généralement la constitution d'une paroi est connue. Pour des parois neuves, les informations sont disponibles. Pour des parois anciennes, le nombre de couches et leurs épaisseurs peuvent souvent être recherchés par sondage local (perçage, démontage de prise électrique,...). Dans le cas exceptionnel de l'auscultation d'une paroi « à l'aveugle », la constitution interne n'est pas déterminée. Les épaisseurs voire même le nombre de couches peuvent être inconnus. Différentes approches ont été imaginées pour appréhender ce type de problème. Il est par exemple possible de construire un modèle dont le nombre  $n$  de couches est inconnu et le considérer comme un paramètre à identifier. Cette approche nécessite des développements très importants au niveau de la phase d'optimisation et n'a pas été abordée dans ce travail.

Nous avons seulement envisagé la définition d'une paroi homogène équivalente. Il a été montré théoriquement [86], [87] que, sauf cas particuliers de parois à constituants de mêmes effusivités, le comportement thermique d'une paroi multicouche ne pouvait pas être reproduit par une paroi homogène. Nous avons quand même testé cette solution car l'objectif n'est pas ici de simuler le comportement dans toutes les dynamiques de transfert mais en priorité de déterminer la conductivité de la paroi (sa résistance) et sa capacité. Notre caractérisation s'effectue pour une sollicitation bien spécifique de type créneau.

La partie suivante introduit cette définition de mur équivalent.

### II.3.3.3 Définition du mur équivalent

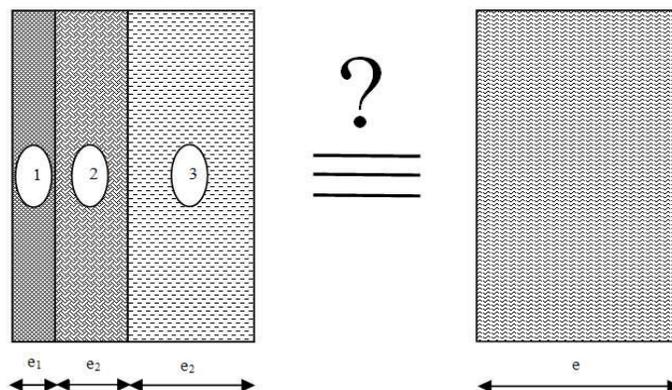


Figure II-10. Schéma d'une paroi multicouche et la paroi monocouche équivalente

Si on considère la modélisation en différences finies, le comportement dynamique d'une paroi monocouche ou multicouche se traduit par les différents termes qui permettent d'écrire la matrice de transfert « tridiagonale ». Dans le cas d'un multicouche, les termes de la diagonale ne sont pas constants. Il en est de même pour la sur-diagonale et la sous-diagonale. Mathématiquement, il est impossible de définir des termes constants pour chacune de ces lignes qui permettraient à une matrice équivalente d'effectuer la même opération matricielle que celle d'origine. On peut toutefois se poser la question. Une telle matrice pourrait-elle reproduire approximativement le même effet sur un signal test bien particulier comme dans le cas présent et permettre d'estimer la conductivité et la chaleur volumique ? Une telle matrice pourrait-elle permettre de reproduire approximativement l'évolution de la température sur la "face arrière" de la paroi ? Nous avons essayé de donner des éléments de réponse à ces interrogations en nous appuyant sur des essais.

Considérons une paroi à trois couches schématisée sur la figure II-10. Elle a une épaisseur ( $e=e_1+e_2+e_3$ ). Chaque constituant  $i$  a pour caractéristiques  $\lambda_i$  et  $(\rho c)_i$ . Sa résistance globale  $Rg$  est la somme de résistance et sa capacité globale  $Cg$  est la somme des capacités.

$$Rg = \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}$$

$$Cg = (\rho_1 c_1 * e_1 + \rho_2 c_2 * e_2 + \rho_3 c_3 * e_3)$$

On calcule ces mêmes résistance et capacité à partir de la paroi équivalente d'épaisseur  $e$  par :

$$Rg = \frac{e}{\lambda_{(eq)}}$$

$$Cg = (\rho c)_{(eq)} * e$$

Ceci est réalisé lorsque les caractéristiques thermophysiques  $\lambda_{(eq)}$  et  $(\rho c)_{(eq)}$  du matériau équivalent sont obtenus par les moyennes pondérées suivantes :

$$\lambda_{(eq)} = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{e_i}{\lambda_i}\right)} = \frac{(e_1+e_2+e_3)}{\left(\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}\right)} \quad (\text{II-35})$$

$$(\rho c)_{(eq)} = \left(\frac{1}{L}\right) \sum_{i=1}^n (\rho_i c_i * e_i) = \frac{(\rho_1 c_1 * e_1 + \rho_2 c_2 * e_2 + \rho_3 c_3 * e_3)}{(e_1+e_2+e_3)} \quad (\text{II-36})$$

L : L'épaisseur totale de la paroi

Dans ce travail, l'identification des paramètres thermiques de la paroi est réalisée en passant par une démarche d'inversion. Elle vise à déterminer le groupement des paramètres d'un modèle qui permet de minimiser numériquement l'écart entre les températures de surface mesurées et simulées. Cet objectif peut être atteint si la réponse en température est très « affectée » par les différentes valeurs des paramètres. L'étude de sensibilité qui est immédiatement effectuée dès que les modèles numériques sont implémentés est un passage indispensable pour permettre de discuter ce point.

## II.4 Etude de sensibilité aux paramètres

L'objectif de cette étude est de discuter de la possibilité d'une identification simultanée des paramètres thermiques et de déterminer les paramètres identifiables par notre approche inverse. Elle se base sur le constat suivant : si on opère une variation sur un paramètre d'entrée dans le modèle numérique et qu'elle n'entraîne qu'une faible variation du résultat du calcul, alors il semble difficile, en étudiant la réponse du modèle de « remonter » à la valeur du paramètre. Par contre, si une variation d'un paramètre d'entrée s'accompagne d'une modification significative de la réponse alors on dira que celle-ci est « sensible » à ce paramètre et qu'il est envisageable d'estimer le paramètre en question. La qualité de l'estimation sera d'autant meilleure que la sensibilité de la réponse à ce paramètre sera forte. Le degré de corrélation entre les paramètres doit également être étudié. Ceci nous permet d'apprécier la possibilité d'identifier les paramètres en même temps.

Ainsi après avoir analysé les sensibilités de la réponse aux différents paramètres qui interviennent dans la simulation numérique, il sera possible de connaître les paramètres identifiables.

### II.4.1 Passage à la température normalisée

La température de surface "face arrière" suivie par la caméra est mesurée avec une certaine incertitude. L'erreur de mesure est liée aux caractéristiques de la caméra, à la connaissance imprécise de l'émissivité de la surface et à celle des paramètres environnementaux. Comme il

sera montrée dans la partie expérimentale, en utilisant la température de surface normalisée  $\theta(t)$ , il est possible de minimiser les erreurs systématiques. Elle est définie de la façon suivante :

$$\theta(t) = \frac{(T(t)-T(0))}{(T_{Max}-T(0))} \quad (\text{II-37})$$

Dans le reste du travail, c'est la température normalisée qui a été exploitée et c'est sur cette base qu'a été réalisée l'étude de sensibilité. Les échelles sont alors normalisées entre 0 et 1. Sur toute la durée de l'essai,  $\theta$  varie de 0 au temps  $t=0$  et atteint 1 pour ensuite décroître.

Le principe de l'étude de sensibilité consiste à calculer une variation  $\delta\theta$  de la réponse en température à une sollicitation en flux consécutive à une variation  $\delta p_i$  d'un des paramètres  $p_i$  du modèle.

La fonction de sensibilité [88, 89, 90] de la température normalisée au paramètre  $p_i$  est définie par la relation suivante :

$$X_{p_i}(t) = \frac{\frac{\Delta\theta(p_1, p_2, \dots, p_n, t)}{\theta(p_1, p_2, \dots, p_n, t)}}{\frac{\Delta p_i}{p_i}} \quad (\text{II-38})$$

Elle exprime le rapport entre une variation relative de la réponse et une variation relative du paramètre concerné.

## II.4.2 Cas d'un mur monocouche

Le modèle numérique élaboré pour ce travail comporte trois paramètres à identifier: la conductivité thermique  $\lambda$ , la chaleur volumique  $\rho c$  et le coefficient d'échange global  $h_g$ . Le paramètre géométrique "e" désignant l'épaisseur e du mur est connu. Nous allons étudier la sensibilité du modèle aux trois paramètres thermophysiques.

### II.4.2.1 Fonctions de sensibilité

D'après leur définition, il est évident que les fonctions de sensibilité dépendent des valeurs nominales des paramètres retenus pour leur calcul. Ceux-ci sont a priori inconnus car l'objectif est de les déterminer. L'étude de sensibilité peut être réalisée car les fonctions de sensibilités sont utilisées de façon qualitative. Elles servent à définir quels sont les paramètres identifiables et à quel moment de l'essai l'identification peut être effectuée de façon optimale. Si les valeurs utilisées pour l'étude préalable de sensibilité sont simplement du même ordre de grandeur que celles à identifier alors l'étude reste pertinente. Ce point peut être vérifié a posteriori lorsque l'identification est aboutie. La présente étude a été menée en considérant le cas d'un mur homogène en carreaux de plâtre de 6.5cm. Il s'agit de la paroi retenue comme premier support d'expérimentation. Les paramètres initiaux des modèles sont donc :

$$\lambda = 0.31 \text{ (W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}), \rho c = 1.2 \cdot 10^6 \text{ (J K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}), h_g = 7.5 \text{ (W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$$

Les variations  $\delta p_i$  imposées aux paramètres initiaux  $p_i$  du modèle pour le calcul ont été fixés à 5%. Nous avons vérifié que ce paramètre n'avait ici aucune incidence sur les conclusions de l'étude. La modélisation est réalisée avec un pas de temps de 20 secondes. Les résultats qui correspondent à un essai de 4h30 min ont été obtenus sur la base d'une sollicitation d'une densité de flux d'entrée égal à  $134 \text{ W.m}^{-2}$  (valeur obtenue expérimentalement) sous la forme d'un créneau pendant 40 minutes. Le système est initialement à la température uniforme de  $0^\circ\text{C}$ . La température ambiante qui pilote les échanges reste à  $0^\circ\text{C}$ .

Sur le graphique des figures II-11 sont représentées les fonctions de sensibilité aux trois paramètres thermophysiques recherchés. Le temps est représenté en abscisse. La sensibilité étant définie par un rapport de deux variations relatives, l'ordonnée donne la valeur de la sensibilité sans unité. Pour réaliser une étude comparative, les courbes des différentes fonctions de sensibilité ont été superposées sur la figure II-11. Pour faciliter, l'exploitation des résultats, la courbe de température normalisée a été ajoutée. L'ordonnée correspondante se situe à droite du graphique.

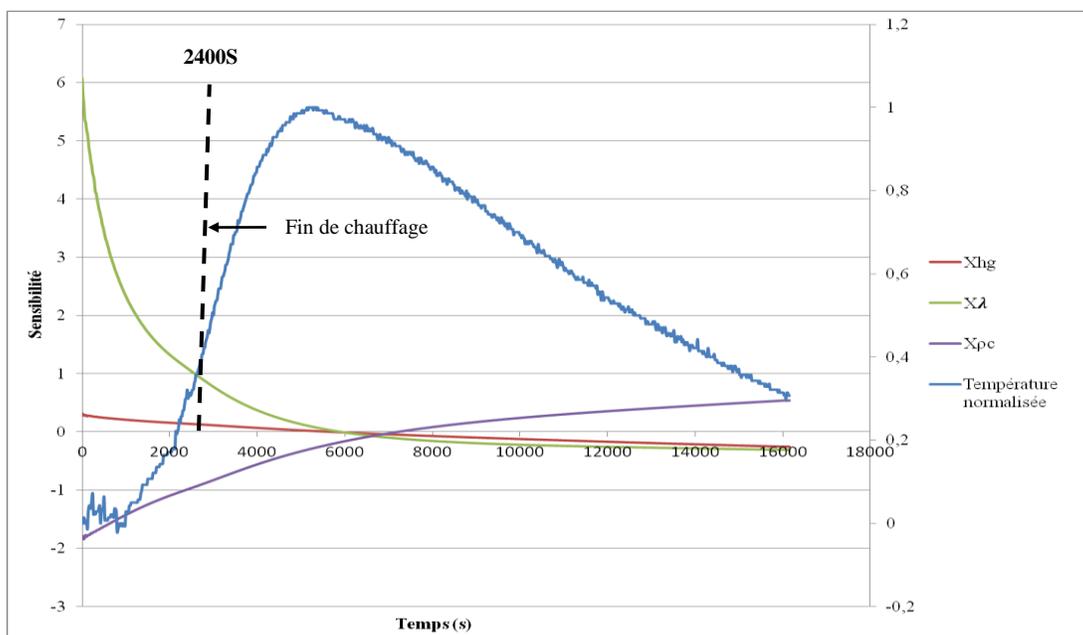


Figure II-11. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres

La figure II-11 montre que la température normalisée est sensible aux trois paramètres. Ceci laisse supposer que l'identification simultanée des trois paramètres est envisageable.

Sur la figure II-12, les fonctions de sensibilités ont été représentées pour les 5300 premières secondes (phase montante de la température dans notre cas). L'étude de sensibilité indique que la période, durant laquelle la température normalisée croît, semble être adaptée aux objectifs. Durant cette période, la conductivité thermique de la paroi, sa chaleur volumique et le coefficient

d'échange global influencent sensiblement la sortie. Les amplitudes des 3 fonctions de sensibilité sont importantes. On constate également que les courbes ne sont pas proportionnelles. Ceci laisse supposer que l'identification simultanée des trois paramètres est envisageable. La possibilité d'une identification simultanée de la conductivité thermique, de la chaleur volumique et de coefficient d'échange de la paroi en carreaux de plâtre est liée à des éventuelles sensibilités corrélées de la réponse aux différents paramètres. Ce point va être discuté dans l'étude de corrélation.

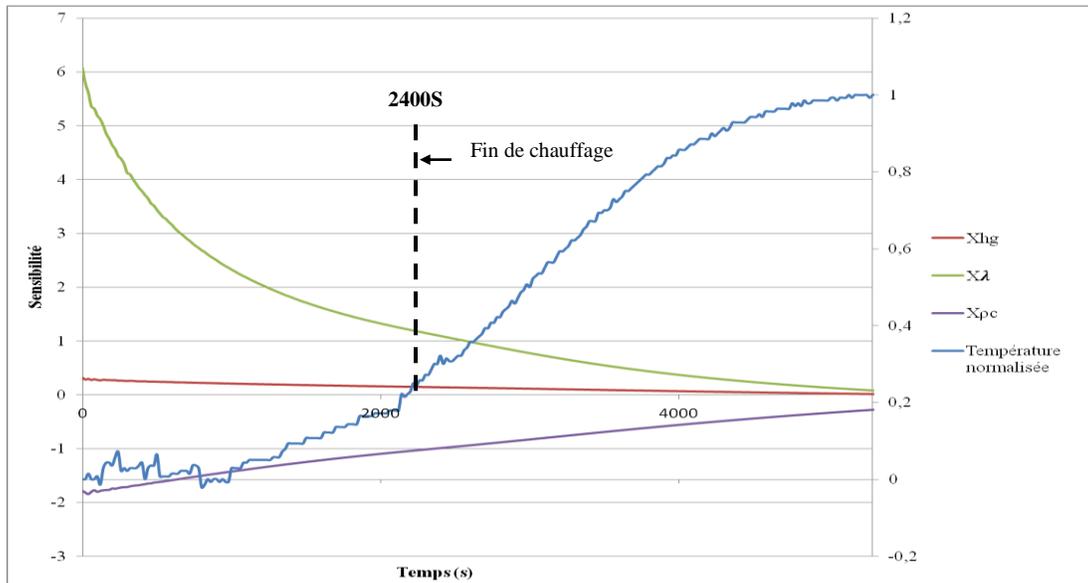


Figure II-12. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (temps de montée)

On peut même remarquer que pendant cette phase, la température normalisée est surtout sensible à la conductivité et à la chaleur spécifique qui sont les paramètres les plus importants à identifier dans ce travail. C'est pendant cette phase « montante » que les sensibilités aux paramètres d'intérêt sont les plus élevées. Cette remarque est très intéressante dans la perspective du passage aux conditions in situ. S'il est confirmé que l'observation peut se limiter à la phase montante de la température normalisée alors cela signifie qu'il n'est pas nécessaire d'observer toute la durée de la manifestation en sortie du créneau injectée. La phase de refroidissement qui pourrait s'étaler sur un temps trop long peu adapté à une auscultation peut être ignorée. Cela signifie également que le moment où la température commence à décroître indique que l'essai peut être interrompu. Ceci est un réel atout pour une définition claire de la procédure expérimentale.

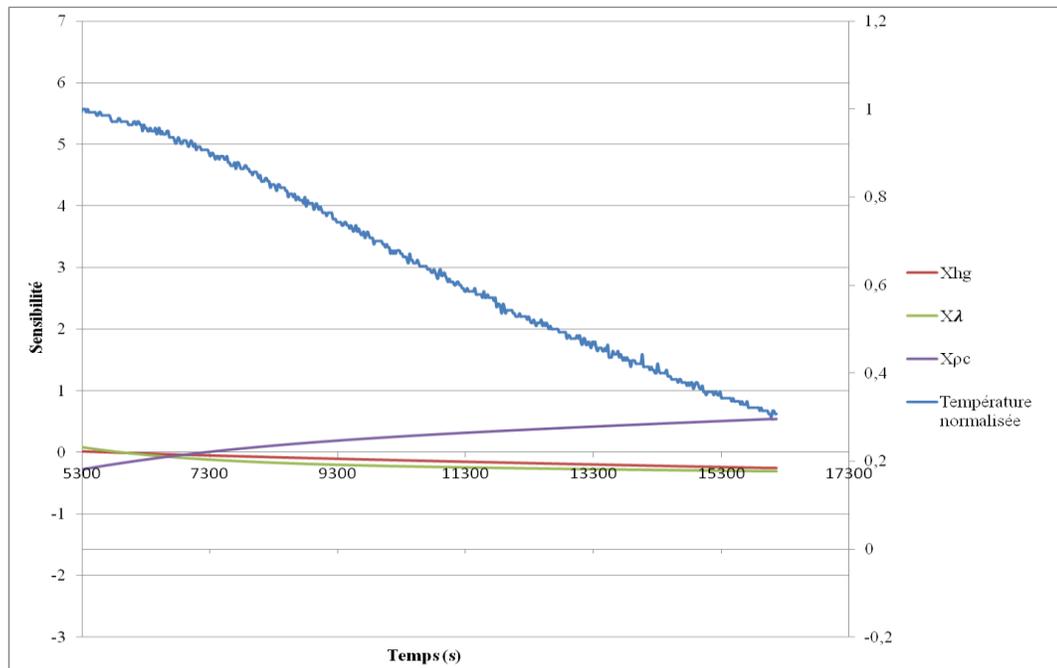


Figure II-13. Sensibilité des paramètres pour la période de refroidissement

La figure II-13 montre que l'identification de paramètres devient difficile pour la période de refroidissement car les sensibilités aux paramètres croissent mais parallèlement. Durant cette seconde phase, c'est essentiellement le coefficient d'échange global qui influence la dynamique de décroissance. Il régit le retour à l'équilibre lorsque la paroi cède à l'environnement la chaleur qui lui a été apportée.

#### II.4.2.2 Corrélation des paramètres

On montre que s'il y a une corrélation entre plusieurs paramètres, leurs sensibilités sont liées par une combinaison linéaire et leurs fonctions sont proportionnelles. Dans le cas d'un couple de paramètres, on peut effectuer une étude graphique. Elle consiste à tracer une des fonctions de corrélation en fonction de l'autre et à vérifier que le tracé obtenu ne correspond pas à une portion de droite passant par l'origine. Lors de la tentative d'identification simultanée de plusieurs paramètres, on peut être confronté au non unicité de la solution, c'est-à-dire, que l'on peut rencontrer plusieurs groupements de paramètres qui donneraient la même fonction réponse (i.e. la température de sortie). L'étude de corrélation est une façon de vérifier que cette situation peut ou non se produire.

Le développement suivant permet de comprendre l'approche graphique pour deux paramètres. En supposant que les paramètres, notés  $p$  et  $q$ , soient corrélés, il existe alors plusieurs groupements différents de ces deux paramètres qui donnent la même réponse  $F$  pour une sollicitation identique. Dans notre cas, on peut supposer par exemple la même évolution de la

température en fonction du temps. Considérons deux groupements  $(p_1, q_1)$  et  $(p_2, q_2)$  donnant la même réponse.

On peut écrire :

$$F(t, p_1, q_1) = F(t, p_2, q_2) \quad (\text{II-39})$$

Les relations entre ces deux couples de paramètres sont :

$$\begin{aligned} p_2 &= p_1 + \Delta_p \\ q_2 &= q_1 + \Delta_q \end{aligned} \quad (\text{II-40})$$

Où  $\Delta_p$  ou  $\Delta_q$  représente une variation du paramètre concerné.

Le développement limité au 1er ordre de la fonction  $F(t, p_1, q_1)$  s'écrit :

$$F(t, p_1, q_1) = F(t, p_1 + \Delta_p, q_1 + \Delta_q) = F(t, p_1, q_1) + \Delta_p \cdot \frac{\partial F}{\partial p} + \Delta_q \cdot \frac{\partial F}{\partial q} \quad (\text{II-41})$$

Avec la relation d'égalité ci-dessus, nous obtenons :

$$\Delta_p \cdot \frac{\partial F}{\partial p} + \Delta_q \cdot \frac{\partial F}{\partial q} = 0 \quad (\text{II-42})$$

En introduisant les fonctions de sensibilités  $X_p$  et  $X_q$  telles qu'elles ont été définies en II-40, l'équation II-42 peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{X_p(t)}{X_q(t)} = -\frac{\Delta_q}{\Delta_p} \cdot \frac{p}{q} \quad (\text{II-43})$$

Le terme de gauche est défini comme étant le rapport de deux fonctions dépendant du temps alors que celui de droite en est indépendant. Cette égalité n'est possible que lorsque le rapport des fonctions de sensibilité est constant, c'est-à-dire lorsqu'elles sont proportionnelles. Si l'on trace une fonction par rapport à l'autre, la représentation graphique est linéaire. Les points se situent bien sur une droite passant par l'origine.

Les courbes ci-dessous montrent des exemples de la corrélation entre des sensibilités aux paramètres du mur en carreaux de plâtre, les uns en fonction des autres.

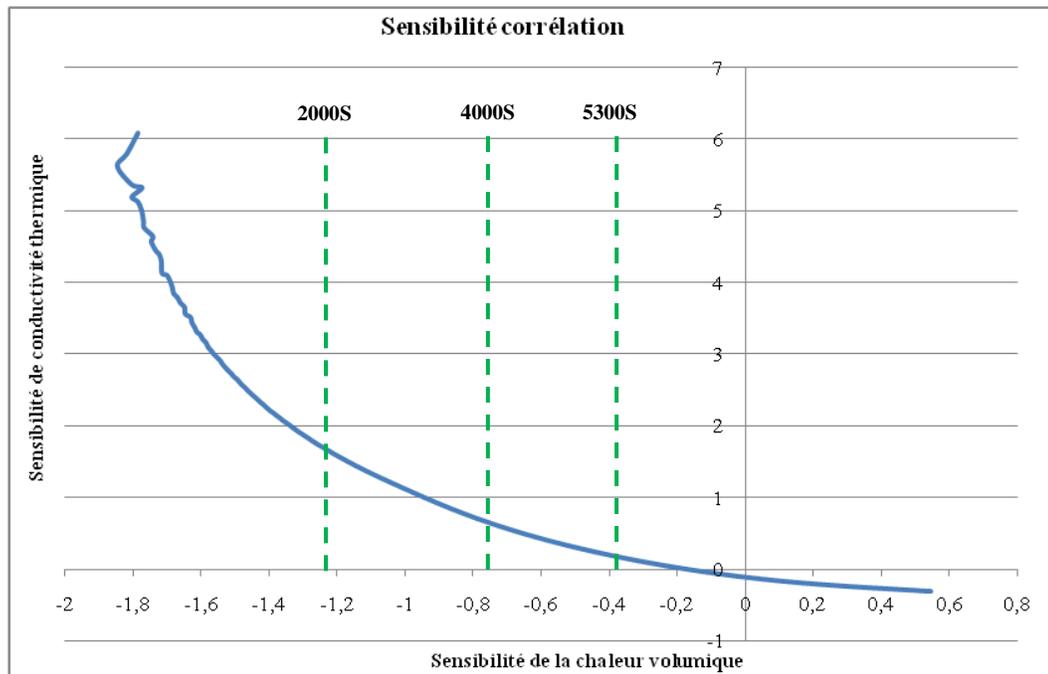


Figure II-14. Evolution de la sensibilité de la conductivité thermique en fonction de la chaleur volumique

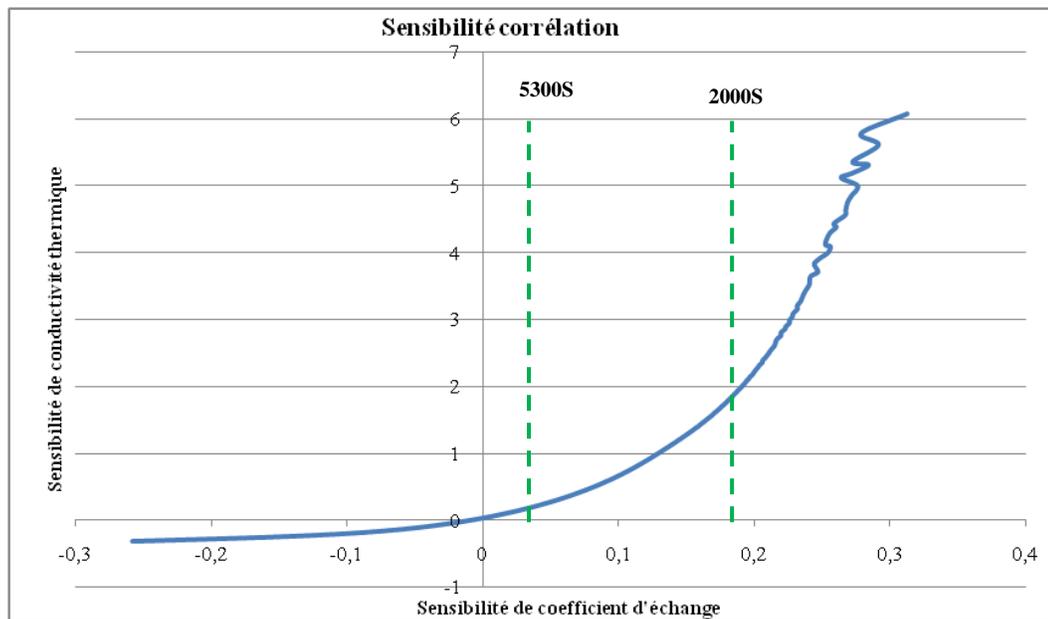


Figure II-15. Evolution de la sensibilité de la conductivité thermique en fonction du coefficient d'échange

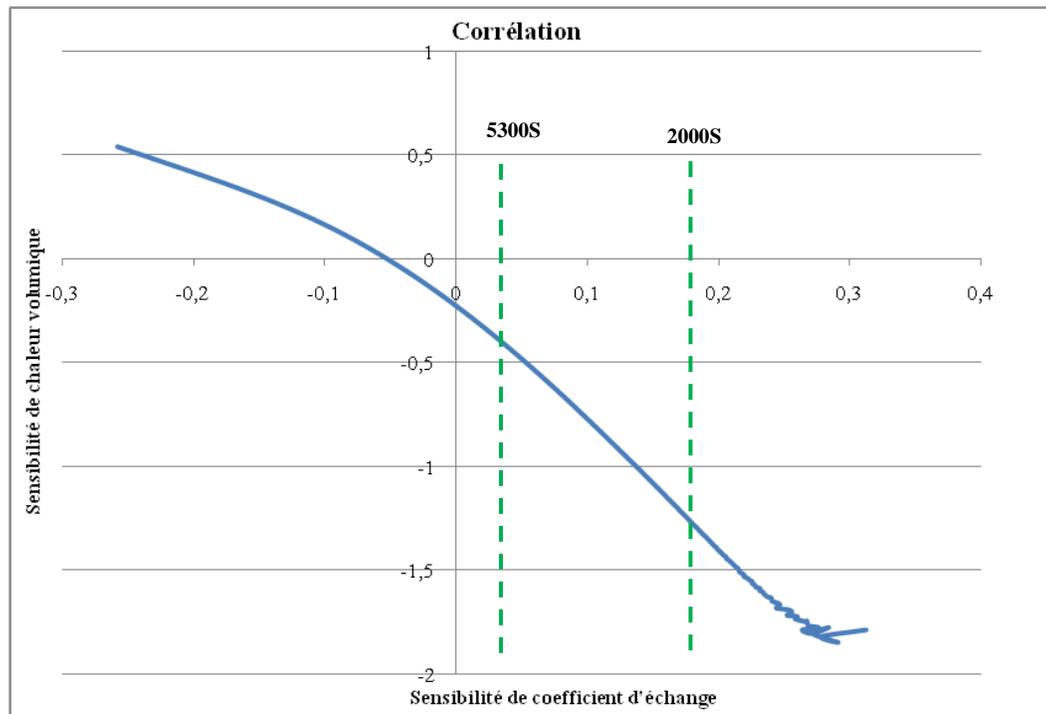


Figure II-16. Evolution de la sensibilité de la chaleur volumique en fonction du coefficient d'échange

Sur la courbe de la figure II-14, la sensibilité de la réponse à la conductivité thermique a été tracée en fonction de la sensibilité de la chaleur volumique. Les intervalles du temps sont également repérés sur le graphe. On constate qu'après 5300s la courbe tend vers une droite passant par l'origine. Ils sont quasiment corrélés. Il semble qu'il est impossible d'identifier simultanément la conductivité thermique et la chaleur volumique du mur en carreaux de plâtre si on se limite à cette période. Par contre avant 5300s, à l'évidence, il n'y a pas de proportionnalité entre les deux fonctions donc pas de corrélation entre les paramètres [91].

D'après la figure II-15 et II-16, des tracés similaires avec la fonction de sensibilité au coefficient d'échange global ont conduit aux mêmes conclusions.

Il convient donc d'exploiter au maximum cette fenêtre temporelle pour aboutir à une solution unique. Lors des expérimentations, l'intervalle de temps [20s ; 5300s] a été retenu.

Une corrélation potentielle entre les 3 paramètres peut aussi exister dans ce cas. Elle s'étudie numériquement. Il faut alors vérifier qu'il n'existe pas de triplet de paramètres  $(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  tel que :

$$\alpha_1 \cdot X_{p1}(t) + \alpha_2 \cdot X_{p2}(t) + \alpha_3 \cdot X_{p3}(t) = 0 \quad (\text{II-44})$$

Ceci ne peut se faire que numériquement en tentant de réaliser cette égalité à tout instant. Les tentatives menées numériquement ont conduit à conclure que ce triplet de paramètres n'existe pas et qu'il n'y a pas de corrélation.

Pour la paroi monocouche, l'étude de corrélation des sensibilités semble indiquer qu'il est possible de déterminer la conductivité thermique, la chaleur volumique et le coefficient d'échange global simultanément.

L'étude théorique du cas de la paroi homogène est encourageante. Elle semble indiquer que la méthode envisagée doit pouvoir permettre la caractérisation visée. Comme nous l'avons fait précédemment, nous considérons maintenant le passage à une configuration multicouche. Elle ne peut pas être traitée d'une façon générale. Comme cela a été fait pour la présentation du modèle en différences finies, le cas particulier d'une configuration tricouche est choisi à titre d'illustration mais aussi parce qu'il a été utilisé dans la partie expérimentale.

### II.4.3 Cas d'une paroi tricouche

Là encore, pour calculer les fonctions de sensibilité, les paramètres doivent être fixés à des valeurs nominales et les fonctions de sensibilité sont liées au groupement de paramètres injectés pour l'étude. L'exploitation qualitative qui en est faite permet de se satisfaire d'ordre de grandeurs des paramètres.

#### II.4.3.1 Fonctions de sensibilité

Deux constitutions de parois ont été retenues. Elles correspondent à des cas traités expérimentalement. Elles comportent toutes les deux une plaque de plâtre (couche 1) et un carreau de plâtre (couche 3). Entre les 2 parois, seule la nature et l'épaisseur de la couche intermédiaire (couche 2) change. Il s'agit dans un premier cas d'une épaisseur de polystyrène et dans l'autre de béton cellulaire. La première paroi a une épaisseur de totale 10.5cm. L'épaisseur de chaque couche est connue. On a  $e_1=1\text{cm}$ ,  $e_2=3\text{cm}$  et  $e_3=6.5\text{cm}$ . La deuxième d'épaisseur globale de 12.5 cm se décompose en trois épaisseurs à  $e_1=1\text{cm}$ ,  $e_2=5\text{cm}$  et  $e_3=6.5\text{cm}$ . Pour l'étude théorique, le coefficient d'échange global est fixé à  $7.5 \text{ (W. m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$  dans les 2 cas. Il s'agit d'une valeur classique pour ce type de configuration.

##### II.4.3.1.1 Premier cas

Les paramètres initiaux des modèles sont donc :

| Matériaux        | Épaisseur (cm) | Conductivité thermique ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | Chaleur volumique ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ) |
|------------------|----------------|---|--|
| Plaque de plâtre | 1              | 0.15  | $6.6 \cdot 10^3$   |
| Polystyrène      | 3              | 0.037   | $1.76 \cdot 10^4$  |
| Plâtre           | 6.5            | 0.31  | $1.2 \cdot 10^6$   |

Tableau II-1. Les valeurs initiales testées

Si on peut admettre facilement que l'épaisseur globale de la paroi est connue, il peut être discutable de considérer que les épaisseurs sont connues de façon individuelle. Dans la pratique, cela signifierait que l'on dispose d'informations sur la géométrie. Cette hypothèse n'est pas complètement irréaliste car dans le contexte d'une rénovation un sondage par perçage peut être effectué et dans le contexte d'une construction récente voire neuve les épaisseurs sont généralement des données connues. Sur la base de cette hypothèse, la réponse en température dépend de sept paramètres thermophysiques indépendants inconnus. Il s'agit des caractéristiques thermophysiques des trois matériaux (conductivités de la plaque de plâtre, de l'isolant et du carreau de plâtre et des chaleurs volumiques de la plaque de plâtre, de l'isolant et du carreau de plâtre) et du coefficient d'échange surfacique.

La simulation correspond à un essai effectué pendant une durée de 15 h 30 minutes, avec un pas de temps de 20 secondes et à un créneau de flux de  $115 \text{ W.m}^{-2}$  imposé pendant 2h10 minutes et mesuré par le fluxmètre en "face avant". On voit en vert la courbe normalisée de température qui évolue de 0 à 1.

La figure II-17 ci-après représente les fonctions de sensibilités de la réponse en température aux 7 paramètres pour la première paroi.

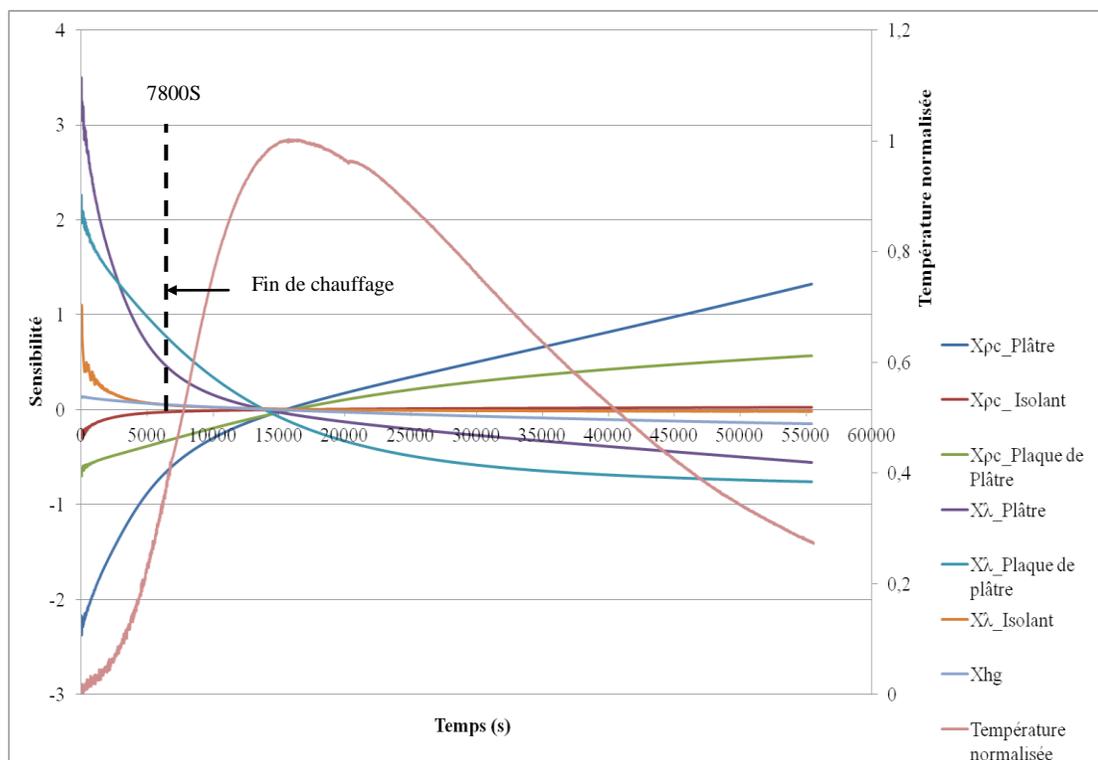


Figure II-17. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (paroi tri-couche)

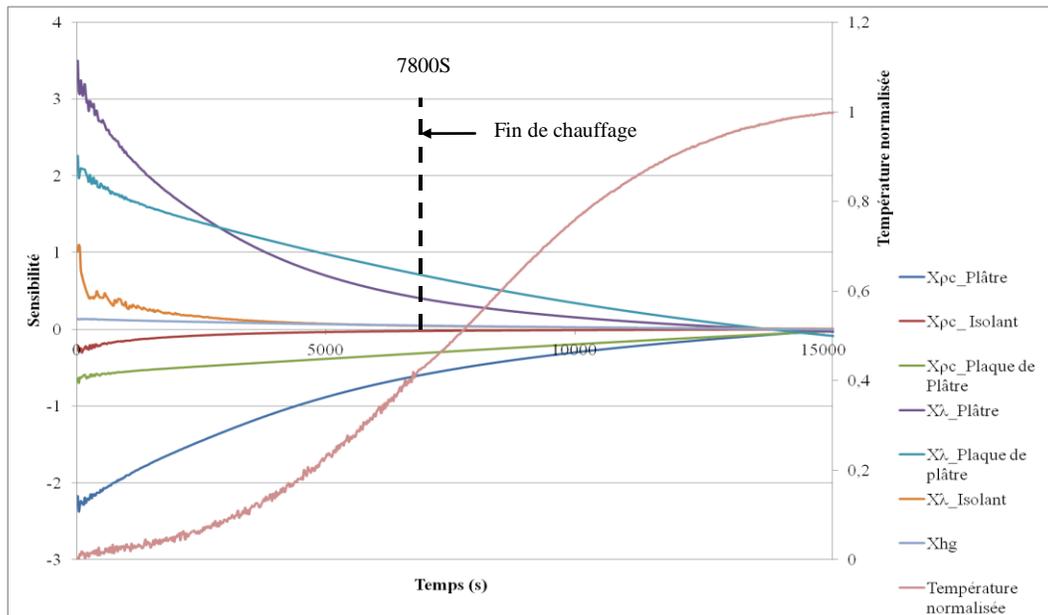


Figure II-18. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (temps de montée)

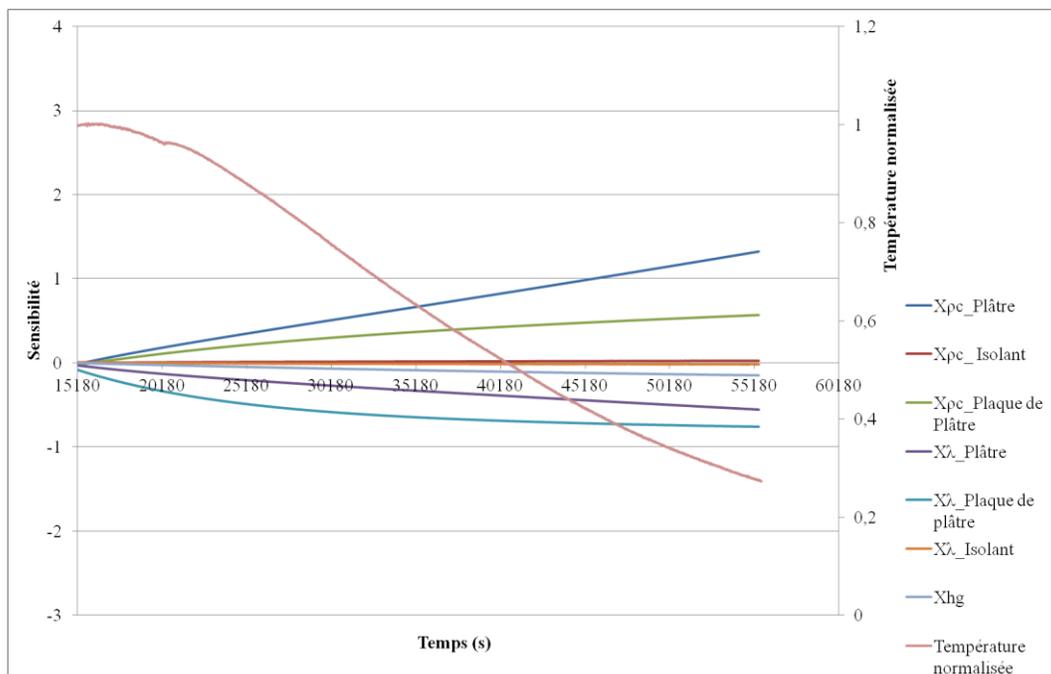


Figure II-19. Sensibilité des paramètres pour la période de refroidissement

La figure II-18 « zoom » montre la partie montante. Les fonctions de sensibilités ont été représentées pour les 15180 premières secondes. La courbe apporte un élément positif en ce sens où elle montre que pendant la période d'évolution croissante de la température, les propriétés

thermophysiques des trois constituants ont une influence sur la réponse. Toutefois les allures très similaires des fonctions mettent également en évidence un risque de corrélation entre les paramètres qui doit être étudié.

La figure II-19 montre que l'identification de paramètres devient difficile pour la période 15180 secondes et la fin d'essai.

#### II.4.3.1.1.1 Etude de corrélation entre paramètres

Dans le dernier cas, le modèle théorique dépend de sept paramètres. Pour s'assurer qu'il n'y a pas de corrélation entre les paramètres, il faut s'assurer qu'il n'existe pas 2 groupements des 7 paramètres  $(t, p_1, q_1, j_1, h_1, k_1, m_1, n_1)$  et  $(t, p_2, q_2, j_2, h_2, k_2, m_2, n_2)$  qui différencieraient par au moins deux paramètres et qui amèneraient à la même réponse F en température normalisée de sortie. On aurait alors :

$$F(t, p_1, q_1, j_1, h_1, k_1, m_1, n_1) = F(t, p_2, q_2, j_2, h_2, k_2, m_2, n_2) \quad (\text{II-45})$$

Conformément à ce qui a été développé pour le cas monocouche, cela revient à vérifier qu'il n'existe pas pour toute valeur de t, de combinaison linéaire possible entre les sensibilités de la forme :

$$\alpha_p \cdot X_p(t) + \alpha_q \cdot X_q(t) + \alpha_j \cdot X_j(t) + \alpha_h \cdot X_h(t) + \alpha_k \cdot X_k(t) + \alpha_m \cdot X_m(t) + \alpha_n \cdot X_n(t) = 0 \quad (\text{II-46})$$

Cette éventualité a été testée en essayant de trouver une solution par voie numérique. Tout en nous en approchant d'une solution, il n'a pas été possible de trouver les constantes  $\alpha_p, \alpha_q, \alpha_j, \alpha_h, \alpha_k, \alpha_m, \alpha_n$  non nulles satisfaisant cette équation sur tout la durée de l'essai. Soit il n'y a effectivement pas de corrélation théorique entre les paramètres, soit l'algorithme de minimisation essayé numériquement n'a pas été assez performant mais dans tous les cas, la simple observation des allures semblables des 7 fonctions de sensibilité montrent que l'identification de tous les paramètres est difficile.

#### II.4.3.1.2 Fonctions de sensibilité et corrélations pour le deuxième cas

Rappelons la constitution de la deuxième paroi tricouche.

| Matériaux        | Epaisseur (cm) | Conductivité thermique (W/m. K) | Chaleur volumique (J/ K.m <sup>3</sup> ) |
|------------------|----------------|---------------------------------|--|
| Plaque de plâtre | 1              | 0.15                            | 6.6*10 <sup>5</sup>                      |
| Béton cellulaire | 5              | 0.24                            | 2.9*10 <sup>5</sup>                      |
| Plâtre           | 6.5            | 0.31                            | 1.2*10 <sup>6</sup>                      |

Tableau II-2. Les valeurs initiales testées

L'étude est réalisée sur le même modèle que pour la première paroi. Sur la figure II-20, les fonctions de sensibilité de la température normalisée aux différents paramètres thermophysiques du modèle (paramètres thermophysiques de plaque de plâtre, de béton cellulaire et de plâtre) ont été représentées ainsi que la courbe de température normalisée qui a été superposée. Les résultats

correspondent à un essai de 22h13 min lors duquel une sollicitation de flux d'entrée égal à 293 W.m-2 (valeur obtenue expérimentalement) sous la forme d'un créneau a été appliquée pendant 1h30 minutes.

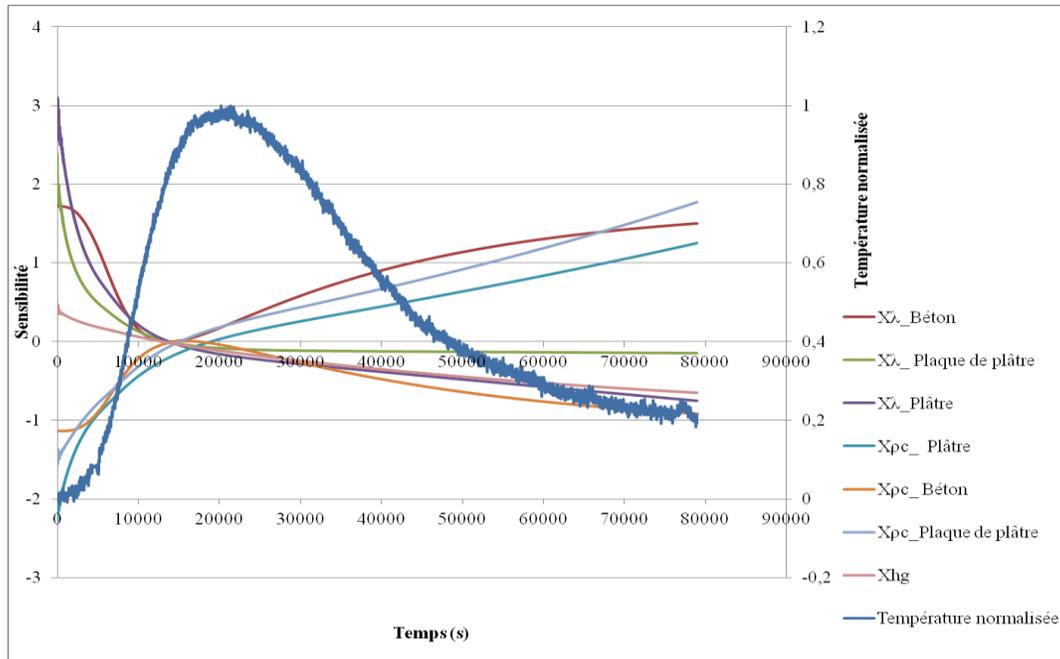


Figure II-20. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres

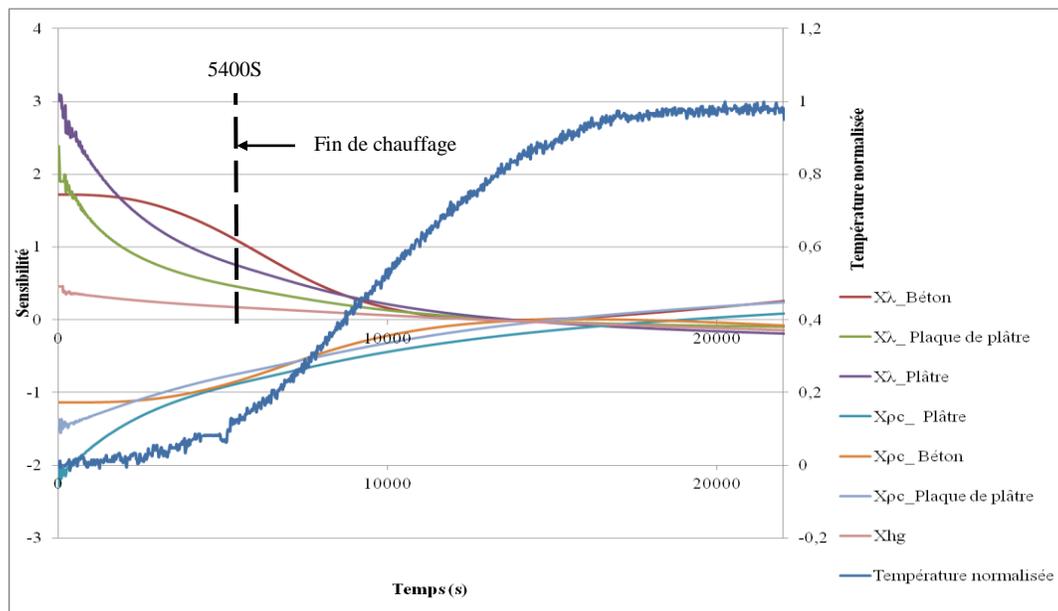


Figure II-21. Fonctions de sensibilité de la température normalisée aux paramètres (phase montante de la température de sortie)

La figure II-21, les fonctions de sensibilités ont été représentées sur la partie montante pour les 22000 premières secondes. On constate que la température normalisée est sensible aux sept paramètres. Dans ce cas là, les sensibilités présentent des allures plus variées. Cette observation, quoique que très qualitative, laisse supposer que l'identification simultanée des paramètres thermo-physiques peut être plus accessible que dans le cas de la première paroi.

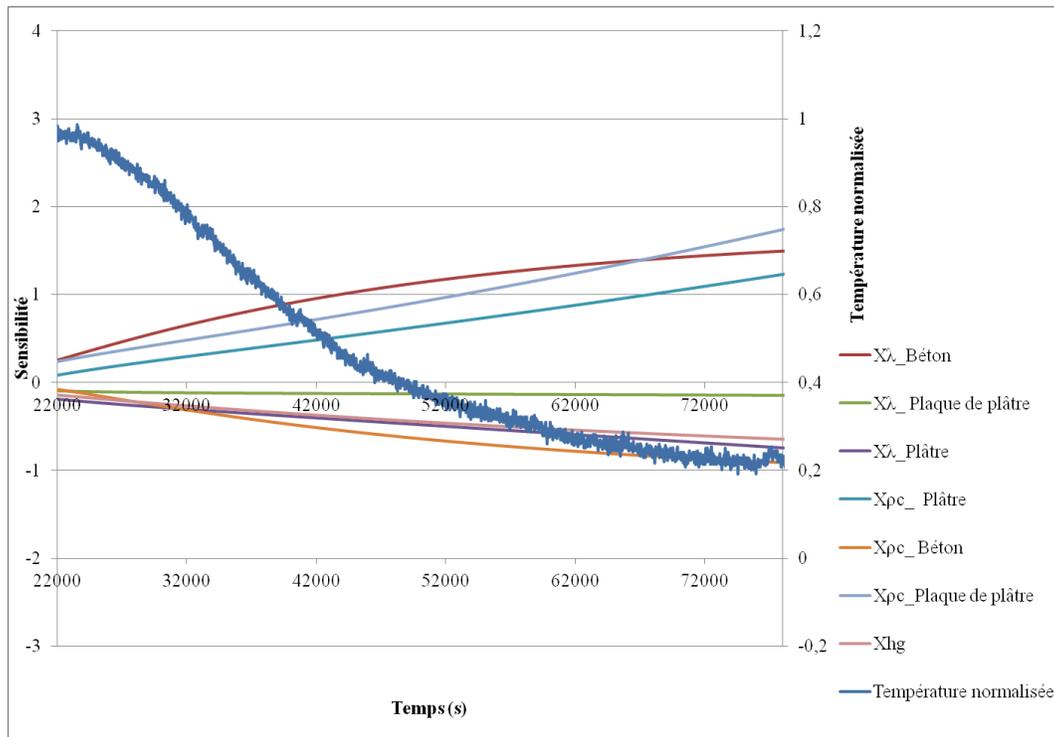


Figure II-22. Sensibilité des paramètres pour la période entre 22000 secondes et la fin de l'essai

La figure II-22 montre que l'identification de paramètres devient là aussi difficile pour les temps longs car les sensibilités aux paramètres thermophysiques deviennent quasiment proportionnelles et donc fortement corrélées.

L'étude théorique concernant la simulation de la réponse en température « face arrière » par un modèle en différences finies indique que la démarche d'identification envisagée est intéressante pour les parois homogènes mais devient vite délicate dès que le nombre de couches augmente.

La solution du passage à une paroi homogène équivalente pourrait s'avérer intéressante. Une étude préliminaire purement numérique a été entreprise pour tester ses potentialités.

## II.5 Etude numérique des plusieurs cas avec un mur équivalent

Comme le schématise la figure II-23, le principe de l'étude est le suivant :

- Définition d'une série de parois « type »
- Simulation de la température en face « arrière » à l'aide du modèle en différences finies 1D.
- Identification des paramètres  $\rho c_{(eq)}, \lambda_{(eq)}$  d'une paroi homogène équivalente à partir de la température simulée normalisée
- Comparaison entre les conductivités et chaleurs volumiques équivalentes de la paroi multicouche et celles identifiées sur la base d'une paroi homogène équivalente.

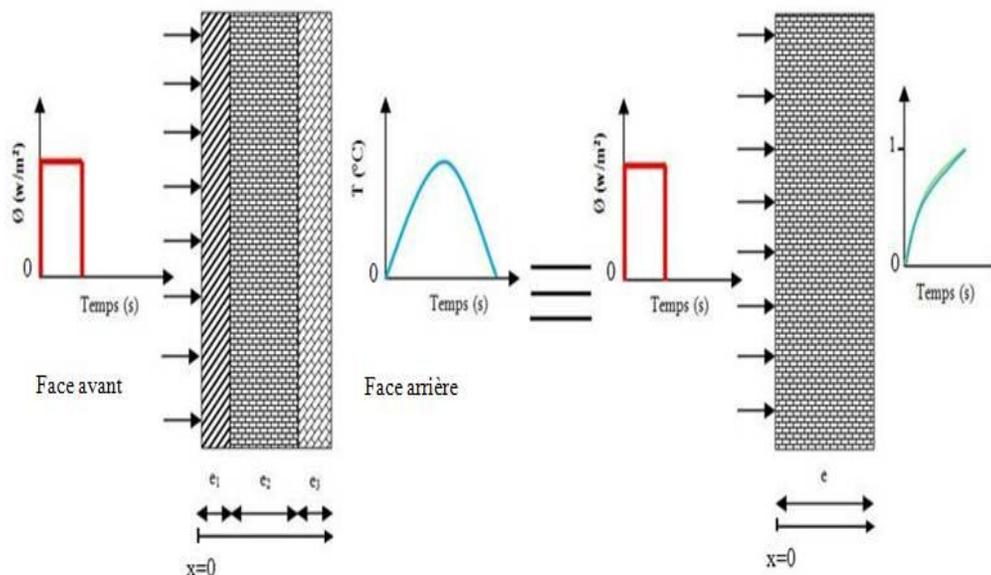


Figure II-23. Schéma d'étude numérique

Le choix de parois représentatives pour effectuer cette étude n'est pas simple. Après exploration de la bibliographie existant sur le sujet, nous avons choisi de nous reporter aux travaux de Tsilingiris [92] qui a défini neuf parois type utilisés sur le pourtour méditerranéen pour effectuer ces travaux. En anticipant le résultat de l'étude, nous les avons répartis suivant qu'elles contiennent une couche isolante ou non dans les tableaux II-3, II-4. Ceux-ci donnent le détail de leur constitution depuis l'extérieur vers l'intérieur et les paramètres thermophysiques retenus pour chaque matériau.

| Parois | Matériaux          | Epaisseur (cm) | $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | $\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> ) | C (J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) |
|--------|--------------------|----------------|---|------------------------------|--|
| N°1    | Brique             | 10             | 1.20  | 1900                         | 850                                      |
|        | Parpaing           | 20             | 0.85  | 2000                         | 920                                      |
|        | Plâtre             | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
| N°2    | Plâtre             | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
|        | Béton              | 20             | 1.70  | 2300                         | 920                                      |
|        | Plâtre             | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
| N°3    | brique             | 10             | 1.20  | 1900                         | 850                                      |
|        | Brique             | 9              | 0.6   | 1400                         | 880                                      |
|        | Plâtre             | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
| N°4    | Revêtement de bois | 2              | 0.2   | 460                          | 1400                                     |
|        | Panneau de fibre   | 2              | 0.28  | 500                          | 1300                                     |
|        | Plaque de plâtre   | 2              | 1.25  | 1900                         | 1100                                     |
| N°5    | Plâtre             | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
|        | Brique             | 9              | 0.6   | 1400                         | 880                                      |
|        | Brique             | 9              | 0.6   | 1400                         | 880                                      |
| N°6    | Brique             | 9              | 0.6   | 1400                         | 880                                      |
|        | Brique             | 9              | 0.6   | 1400                         | 880                                      |
|        | Plâtre             | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |

Tableau II-3. Les différents murs de références sans isolant (P.T. Tsilingiris 2004)[92]

| Parois | Matériaux | Epaisseur (cm) | $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | $\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> ) | C (J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) |
|--------|-----------|----------------|---|------------------------------|--|
| N°7    | Brique    | 9              | 0.6   | 1400                         | 880                                      |
|        | Isolant   | 4              | 0.041   | 40                           | 850                                      |
|        | Plâtre    | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
| N°8    | Brique    | 20             | 1.20  | 1900                         | 850                                      |
|        | Isolant   | 4              | 0.041   | 40                           | 850                                      |
|        | Plâtre    | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
| N°9    | Plâtre    | 2              | 1.39  | 2000                         | 1085                                     |
|        | Isolant   | 4              | 0.041   | 40                           | 850                                      |
|        | Béton     | 20             | 1.70  | 2300                         | 920                                      |

Tableau II-4. Les différents murs de références avec isolant (P.T. Tsilingiris 2004)[92]

## II.5.1 Paroi sans isolant

Dans cette étude, les parois sans isolant ont été utilisées. Conformément à ce qui a été conclu au paragraphe II.4.2.1, la phase montante est la zone la plus propice à l'identification des paramètres. Sa durée dépend de la sollicitation imposée et de la nature de la paroi.

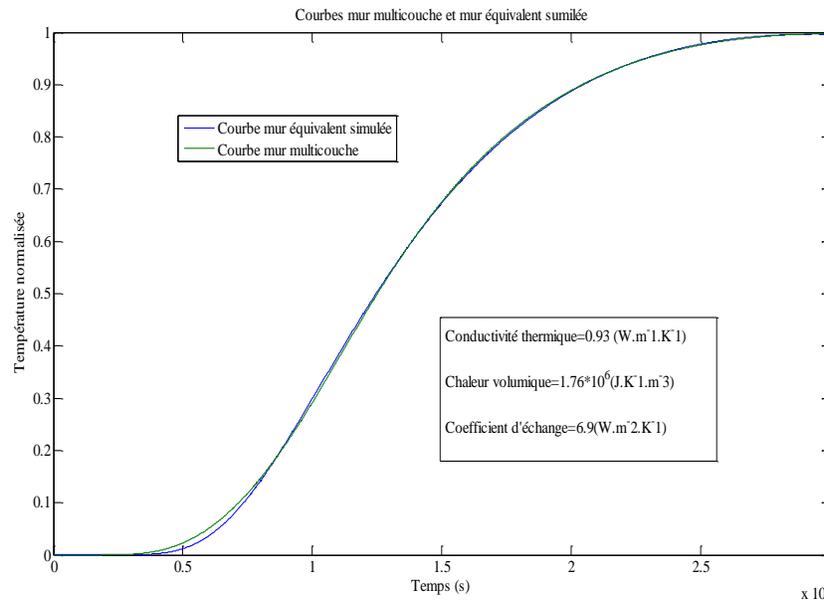


Figure II-24. Cas d'une paroi simulée par méthode inverse

La figure II-24 présente le résultat de l'ajustement de la réponse obtenue sur le tricoche n°1 par une paroi homogène équivalente soumise au même créneau de flux en face avant. On constate sur les températures normalisées une bonne superposition.

Cette paroi est composée d'une couche de brique de 10cm d'épaisseur puis d'un parpaing de 20 cm et d'une couche de plâtre de 2 cm. A partir des valeurs de conductivités et de chaleur volumique que nous avons retenus, cette paroi présente une conductivité moyenne (notée  $\lambda_{(eq)}$ ) de :

$$\lambda_{(eq)} = 0.96 \text{ W/(m.K)} \text{ et une chaleur volumique moyenne } (\rho c)_{(eq)} = 1.79 * 10^6 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$$

L'identification des paramètres de la paroi homogène équivalente a donné :

$$\lambda_{(optimisée)} = 0.93 \text{ W/(m.K)} \text{ et } (\rho c)_{(optimisée)} = 1.76 * 10^6 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$$

Soient des écarts de 3% pour la conductivité et de 2% pour la chaleur spécifique. Dans ce cas, le passage à une paroi homogène équivalente semble tout à fait pertinent car il conduit à des estimations très satisfaisantes des caractéristiques globales de la paroi. Pour les objectifs visés

dans ce travail, une estimation des propriétés thermiques globales de la paroi est suffisante. Nous avons reproduit la même démarche pour l'ensemble des parois choisies.

| Parois | Valeurs de références |                   |   | Résultats de la procédure d'inversion |                          |                 | Erreurs (%) |          |   |
|--------|-----------------------|-------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|-----------------|-------------|----------|---|
|        | $\lambda_{(eq)}$      | $(\rho c)_{(eq)}$ | h | $\lambda_{(optimisée)}$               | $(\rho c)_{(optimisée)}$ | $h_{optimisée}$ | $\lambda$   | $\rho c$ | h |
| N°1    | 0.96                  | $1.79 \cdot 10^6$ | 7 | 0.93                                  | $1.76 \cdot 10^6$        | 6.9             | 3           | 2        | 1 |
| N°2    | 1.63                  | $2.12 \cdot 10^6$ | 7 | 1.67                                  | $2 \cdot 10^6$           | 6.48            | 2           | 5        | 7 |
| N°3    | 0.84                  | $1.5 \cdot 10^6$  | 7 | 0.81                                  | $1.41 \cdot 10^6$        | 6.5             | 3           | 6        | 7 |
| N°4    | 0.32                  | $1.1 \cdot 10^6$  | 7 | 0.297                                 | $1.1 \cdot 10^6$         | 6.78            | 6           | 0        | 3 |
| N°5    | 0.63                  | $1.3 \cdot 10^6$  | 7 | 0.66                                  | $1.25 \cdot 10^6$        | 7.12            | 4           | 3        | 1 |
| N°6    | 0.63                  | $1.3 \cdot 10^6$  | 7 | 0.647                                 | $1.41 \cdot 10^6$        | 6.82            | 2           | 7        | 2 |

Tableau II-5. Tableau de synthèse des résultats par la méthode inverse

Le tableau II-5 présente les valeurs obtenues pour les 6 parois sans isolant. La comparaison des résultats de chaleur volumique et de conductivité thermique montre tout l'intérêt du concept de paroi homogène équivalente pour cette série de parois. On observe des écarts de 2 à 7% par rapport aux valeurs de références.

## II.5.2 Paroi avec isolant

La même démarche a été reproduite par la deuxième série de parois multicouche. Le résultat de l'ajustement pour la paroi n°7 est présenté figure II-25.

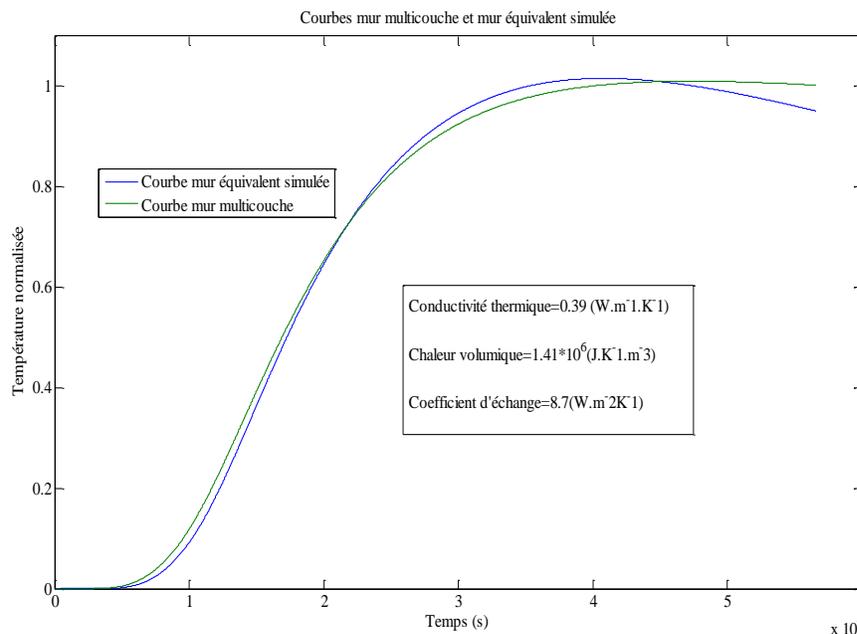


Figure II-25. Courbes d'un mur multicouche par le mur équivalent

Cette paroi est composée d'une couche de brique de 9 cm d'épaisseur puis d'une couche isolante de 4 cm et d'une couche de plâtre de 2 cm.

La figure II-25 présente le résultat de l'essai de calage de la température normalisée d'un mur homogène équivalent sur la courbe de température normalisée simulée avec la composition de la tricouche n°7. Dans ce cas, on constate que la superposition n'est pas satisfaisante.

A partir des valeurs de conductivités et de chaleur volumique que nous avons retenus, cette paroi présente une conductivité moyenne (notée  $\lambda_{(eq)}$ ) de :

$$\lambda_{(eq)} = 0.13 \text{ W/(m.K)} \text{ et une chaleur volumique moyenne } (\rho c)_{(eq)} = 1.03 * 10^6 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$$

L'identification des paramètres de la paroi homogène équivalente a donné :

$$\lambda_{(optimisée)} = 0.39 \text{ W/(m.K)} \text{ et } (\rho c)_{(optimisée)} = 1.41 * 10^6 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$$

Soient des écarts de 200 % pour la conductivité et de 37 % pour la chaleur spécifique. Il apparait clairement que le recourt à une paroi homogène équivalente n'est pas possible dans cette situation. Il est possible que la phase d'optimisation n'ait pas abouti. Il est possible aussi que le modèle du matériau homogène ne permette pas de reproduire de façon satisfaisante la réponse d'un multicouche à propriétés contrastées.

| Parois | Valeurs de références |                   |   | Résultats de la procédure d'inversion |                          |                   | Erreurs (%) |          |    |
|--------|-----------------------|-------------------|---|---------------------------------------|--------------------------|-------------------|-------------|----------|----|
|        | $\lambda_{(eq)}$      | $(\rho c)_{(eq)}$ | h | $\lambda_{(optimisée)}$               | $(\rho c)_{(optimisée)}$ | $h_{(optimisée)}$ | $\lambda$   | $\rho c$ | h  |
| N°7    | 0.13                  | $1.03 * 10^6$     | 7 | 0.39                                  | $1.41 * 10^6$            | 8.7               | 200         | 37       | 24 |
| N°8    | 0.22                  | $1.41 * 10^6$     | 7 | 0.8                                   | $1.5 * 10^6$             | 6.5               | 260         | 6        | 7  |
| N°9    | 0.23                  | $1.78 * 10^6$     | 7 | 0.57                                  | $1.65 * 10^6$            | 7.7               | 147         | 7        | 10 |

Tableau II-6. Tableau de synthèse des résultats de caractérisation des parois 7 à 9 par une paroi homogène équivalente

Le tableau II-6 reprend les valeurs que nous avons obtenues pour les 3 parois comportant une couche isolante. On constate que pour ces 3 cas, le recourt à une paroi homogène équivalente peut conduire à de très importantes erreurs.

Cette étude semble indiquer que pour des parois multicouches dont les composants ont des propriétés du même ordre de grandeur, considérer une paroi homogène équivalente est une façon simple et performante de caractériser le comportement thermique. Dès qu'un contraste important existe entre les composants, l'homogénéisation ne doit pas être recherchée. Dans le contexte d'une caractérisation à l'« aveugle », il ne faut pas s'orienter vers une paroi équivalente. Des techniques plus élaborées doivent être élaborées comme par exemple des modèles à nombres de couches inconnues. Cette voie n'a pas été explorée dans ce travail. Nous avons considéré que dans la grande majorité des situations, la constitution de la paroi était une donnée connue.

Dans ce paragraphe, nous avons mis en œuvre la méthode d'identification basée sur un schéma d'inversion. La technique nécessite de minimiser une fonction d'erreur entre une courbe

donnée et une courbe simulée paramétrable. Le paragraphe suivant présente les techniques d'optimisation qui ont été utilisées dans ce travail.

## II.6 Procédure inverse

La détermination des paramètres thermophysiques s'opère en minimisant l'écart entre la température obtenue par la simulation numérique et celle mesurée. En entrée du modèle numérique, un groupement de paramètres est testé. On considère que les paramètres thermophysiques sont identifiés quand la température simulée est la « plus proche » de la température mesurée. Il existe de nombreuses méthodes numériques qui permettent de réaliser cette minimisation. Cette partie est consacrée à la présentation des principes de techniques inverses utilisées dans le domaine thermique, ainsi les différents algorithmes utilisés dans notre travail. Nous avons utilisé la méthode du simplexe, une minimisation au sens des moindres carrées de Levenberg Marquardt et un couplage avec un algorithme génétique.

### II.6.1 Problème inverse

Une définition plus concrète est qu'un problème inverse consiste à déterminer des causes [93] connaissant des effets. Ainsi, ce problème est l'inverse de celui appelé problème direct, consistant à déduire les effets, les causes étant connues.

La résolution du problème inverse passe en général par une étape initiale de modélisation du phénomène, dite problème direct qui décrit comment les paramètres du modèle se traduisent en effets observables expérimentalement. C'est ce que nous avons vu dans la première partie de ce chapitre. Ensuite, à partir des mesures obtenues sur le phénomène réel, dans notre cas la température normalisée en face « arrière », la démarche va consister à approximer au mieux les paramètres qui permettent de les reconstituer. Cette résolution se fait dans notre cas par l'intermédiaire des modèles en différences finies. Plus généralement dans le cadre de la métrologie thermique, la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles permet d'obtenir une solution analytique ou numérique à partir des conditions aux limites, des conditions initiales et de la connaissance des propriétés thermophysiques des matériaux, c'est ce que l'on appelle « le problème direct ».

Les problèmes inverses traitent de deux types de cas : l'un consiste à estimer un nombre fini de paramètres à partir d'une mesure ou de plusieurs mesures ; l'autre à identifier une fonction, une condition limite comme un flux de surface, par exemple, à partir d'une ou de plusieurs mesures internes ou de domaines étudiés. Dans notre cas, il s'agit du premier type de problème inverse : l'estimation de paramètres.

Le succès dans la résolution d'un problème inverse est lié aux éléments spécifiques de ce problème et il n'existe pas de procédure ou de technique qui surclassent toutes les autres. Certaines d'entre elles ont un champ d'applicabilité étendu comme par exemple la méthode des

moindres carrés, linéaires ou non linéaires qui est souvent la première approche essayée pour un problème inverse. Dans notre cas, nous sommes confrontés à un problème inverse non linéaire et nous nous concentrerons sur l'identification des paramètres définies dans les équations II-25 et II-33.

Selon [94], un système physique est composé d'éléments en interaction et soumis à l'influence de grandeurs externes appelées excitation (ou grandeurs d'entrée). L'observation des effets résultants de ces excitations sur le système est appelée la réponse (ou grandeur de sortie). Le modèle du système est constitué par un ensemble de relations causales entre les excitations et les réponses. Ces relations sont considérées dans un sens très large : fonction, mais aussi équation (différentielle, aux dérivées partielles, intégral-différentielle...).

Dans notre étude, la modélisation numérique du transfert unidirectionnel est basée sur les équations en différences finies. Elle a été décrite dans ce chapitre au paragraphe II-3.

On introduit alors une « distance » entre la réponse calculée  $\theta_{p1,p2,p3,\dots,pn}$  fonction de  $n$  paramètres  $p1, p2, p3, \dots, pn$  et celle mesurée  $\theta_{exp}$  du système. Dans diverses applications, on utilise largement le critère de moindres carrés :

$$F(\lambda, \rho c, h) = \sum_{i=1}^n (\theta_{\lambda, \rho c, h}(i) - \theta_{exp}(i))^2 \quad (\text{II-47})$$

$F(p1, p2, p3, \dots, pn)$  est une fonction des variables du système. Il existe de nombreuses méthodes numériques qui visent à minimiser des fonctions. Les paramètres  $p1, p2, p3, \dots, pn$  sont dans notre cas les paramètres thermophysiques des matériaux (conductivités thermiques, chaleurs volumiques, et coefficient d'échange global).

### II.6.1.1 Schéma du problème inverse

La figure II-26, décrit le principe de la procédure d'inverse.

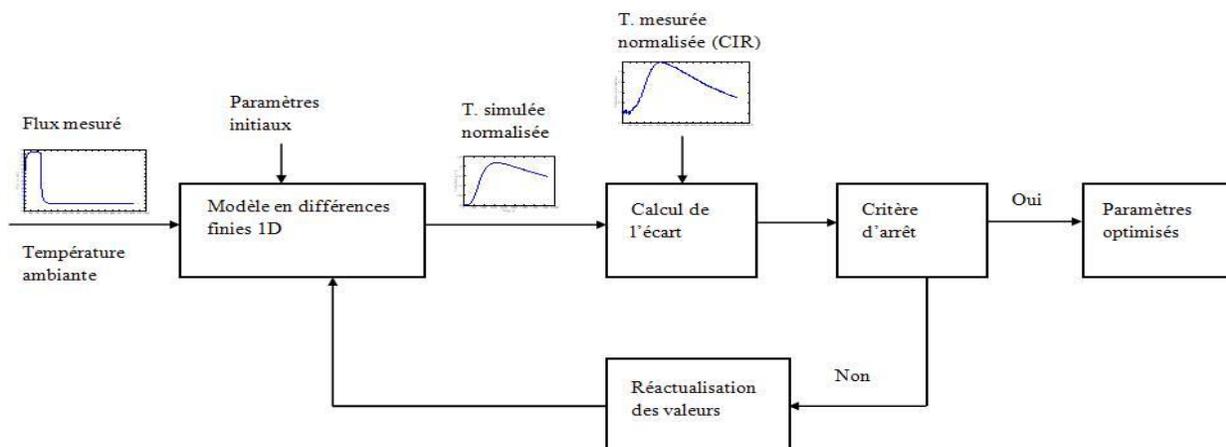


Figure II-26. Schéma de principe de la procédure d'inversion

La détermination des paramètres thermophysiques s'opère en minimisant l'écart entre l'évolution de la température obtenue par la simulation numérique et celle mesurée. Initialement, un groupement de paramètres est injecté dans le modèle (paramètres initiaux). De façon itérative, ces paramètres sont modifiés jusqu'à ce que la température normalisée simulée soit la plus proche possible de la température normalisée mesurée on considère alors que les paramètres sont identifiés. Pour y parvenir, il existe de nombreuses méthodes numériques qui permettent de réaliser cette minimisation.

## **II.6.2 Les différentes méthodes d'optimisation**

Les méthodes d'optimisation peuvent être réparties en deux grandes familles selon le mode de recherche de l'optimum.

### **II.6.2.1 Les méthodes déterministes**

Pour cette famille, pour un problème donné et pour un point de départ donné, ces méthodes convergent toujours vers le même optimum en parcourant de la même manière l'espace des solutions.

#### **II.6.2.1.1 La méthode du simplexe**

En 1962, Spendley et al [95], [96] ont introduit la méthode initiale du simplexe, une méthode d'optimisation itérative. En 1965, Nelder et Mead [97] ont amélioré cette méthode. Ils ont donné leurs noms à la méthode Nelder-Mead. Elle est encore appelée méthode de minimisation du simplexe modifié ou méthode downhill simplexe. La méthode Nelder-Mead est une méthode de minimisation non linéaire sans contraintes. C'est une méthode de recherche directe, facile à programmer car elle ne nécessite pas le calcul de gradient numérique et entraîne des temps de calcul réduits par rapport aux autres méthodes.

##### **II.6.2.1.1.1 Méthode simplexe initial**

La méthode simplexe initial est facile à comprendre et à appliquer. Elle débute dans notre cas par le test de groupements initiaux. Le nombre de calculs initiaux est égal au nombre de variables plus un. Dans l'espace des groupements de paramètres, les points initiaux forment une figure géométrique dans l'espace à  $n+1$  dimensions ( $n$  est le nombre de paramètres) appelée simplexe.

Si une seule variable est recherchée, le simplexe forme un segment de droite. Pour deux variables, il forme un triangle. On passe à un tétraèdre pour trois variables. Au-delà, l'interprétation géométrique est plus difficile mais les descriptions géométriques représentées dans la figure II-27 peuvent aider à la compréhension de la démarche d'optimisation.

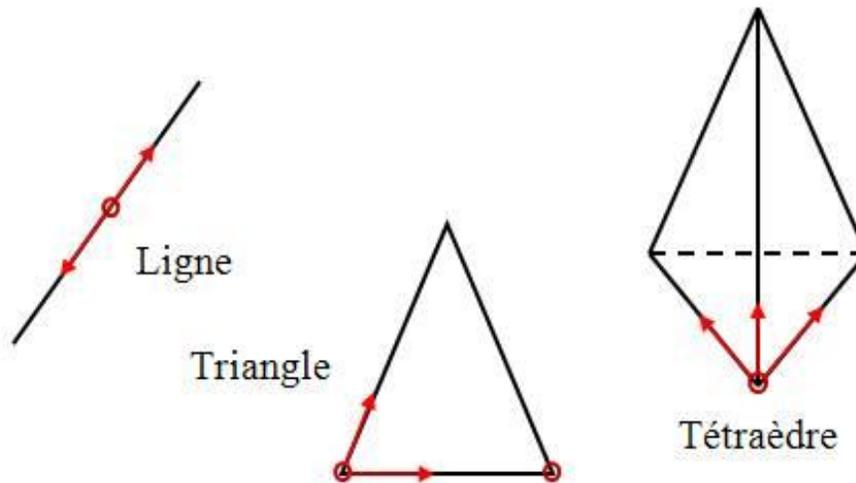


Figure II-27. Interprétations géométriques du simplexe en petites dimensions

Les deux principales règles de la méthode simplexe initial sont :

- Rejeter le jeu de paramètres qui a donné la réponse la plus défavorable dans le simplexe en cours. Un nouveau groupement de variables est défini. Il remplace dans le nouveau simplexe, le groupement qui a donné le plus mauvais résultat. Le nouveau point est choisi en réfléchissant celui qu'il remplace par rapport au plan défini par le reste du simplexe en cours. Le simplexe est retourné. A chaque étape, le plus mauvais point est éliminé. Les étapes successives de calcul vont guider le simplexe vers une zone favorable de l'espace ou la figure va se stabiliser.
- Ne jamais retourner sur le groupement de variable qui vient juste d'être rejeté.

Le nouveau groupement obtenu par réflexion peut produire un résultat plus mauvais. Sans cette seconde règle, le simplexe peut osciller entre les deux points.

Le schéma synoptique suivant décrit le fonctionnement de l'algorithme du simplexe. Pour tous les simplexes, P désigne le plus mauvais groupement ou le groupement rejeté, M correspond à la meilleure solution en cours alors que  $V_M$  correspond à la seconde.

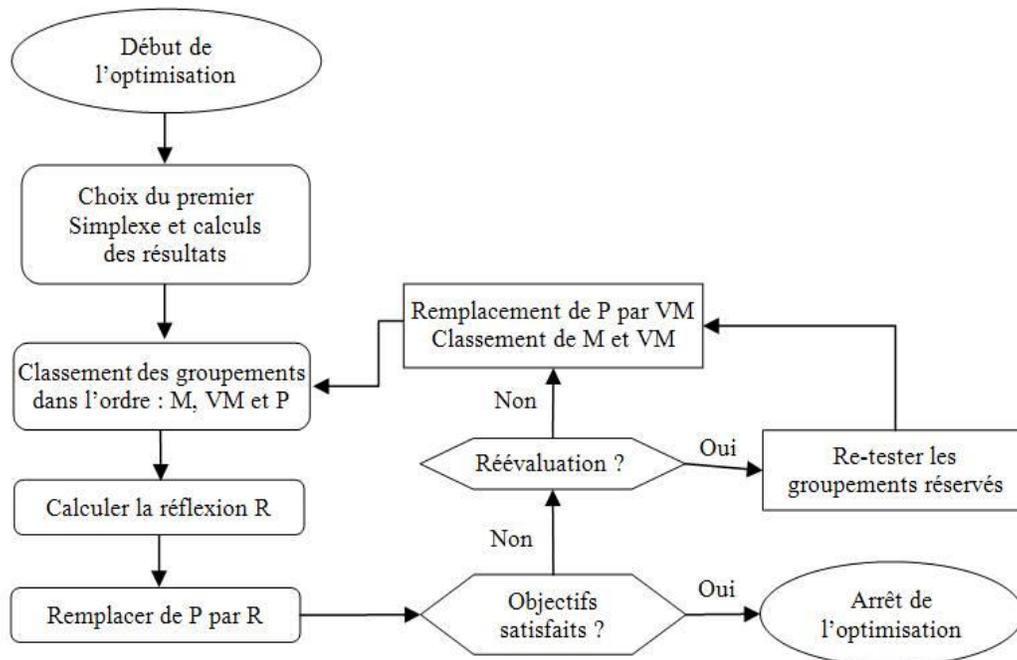


Figure II-28. Schéma de la méthode du simplexe initial

#### II.6.2.1.1.2 Méthode Nelder-Mead

La méthode Nelder-Mead [Annexe II-1] utilise le concept du simplexe qui est un polytope de  $N+1$  sommets dans un espace à  $N$  dimensions. Soit  $N$  la dimension de l'espace où  $f$  prend ses valeurs. On démarre avec un simplexe de cet espace. La première étape consiste à enlever le point du simplexe où la fonction est maximale et à le remplacer par la réflexion de ce point par rapport au centre de gravité des  $N$  points restants. Si ce point est meilleur, on étire le simplexe dans cette direction. Sinon, on est dans une vallée, et on réduit le simplexe par une similitude centrée sur le point du simplexe où la fonction est minimale. Ces procédures consécutives d'extension et contractions permettent souvent d'atteindre la zone optimale plus rapidement que la méthode simplexe initial et de trouver un résultat plus précis.

Ces méthodes géométriques utilisent uniquement les valeurs de la fonction objectif. Elles explorent l'espace des solutions par essais successifs en recherchant les directions les plus favorables sans qu'il n'y ait besoin de calculer des dérivées numériques. La convergence des méthodes géométriques reste « locale » mais elle présente une bonne robustesse en particulier si la fonction à optimiser est faiblement bruitée ou discontinue. Le principal inconvénient de ces méthodes réside dans l'augmentation du coût de calcul lorsque le nombre de variables de conception augmente.

Nous avons traité les premiers essais en utilisant la méthode de Nelder-Mead. Les nombres limités de paramètres (3) et le choix de groupements initiaux suffisamment proches de la solution

ont permis des convergences systématiques vers les « bonnes » solutions. Dès que nous avons retenu des modèles plus complexes impliquant un nombre plus important de paramètres, la méthode a été prise en défaut et nous a amené à l'abandonner.

### II.6.2.1.2 Méthode Levenberg Marquardt

L'algorithme Levenberg Marquardt est une technique itérative qui localise le minimum d'une fonction de plusieurs variables qui exprimée comme la somme des carrés des fonctions non linéaires réelles [98], [99]. Elle garantit réellement qu'une convergence « locale », converge rapidement surtout quand on dispose d'une expression des dérivées partielles. Elle est devenue une technique standard pour la minimisation par méthode des moindres carrés de problèmes non linéaires.

L'algorithme de Levenberg-Marquadt (aussi connu sous le nom de LMBP pour Levenberg-Marquadt Back Propagation) est une variation de la méthode de Newton qui a été conçue pour minimiser des fonctions qui sont des sommes du carré d'autres fonctions non-linéaires.

Cet algorithme jouit actuellement d'une grande popularité vu sa vitesse de convergence quadratique et sa robustesse. Grossièrement, l'algorithme tente d'utiliser une direction de Gauss-Newton (quadratique) pour modifier ses paramètres. S'il constate qu'il ne parvient pas à réduire l'indicateur de performance, il change graduellement la direction du pas jusqu'à atteindre la direction de la plus forte pente. Ceci lui procure une convergence presque quadratique si la fonction s'y porte, et lui assure une convergence au moins linéaire si la topologie de la fonction ne permet pas la convergence quadratique.

- Elles ne garantissent réellement qu'une convergence « locale » et se laissent aisément « piégées » par des optima locaux dans le cas de problèmes multimodaux. Cette caractéristique oblige généralement le concepteur à réaliser plusieurs optimisations avec des configurations initiales distinctes pour s'assurer de la convergence ;
- Elles sont applicables à des problèmes continus.

Les méthodes gradient présentent toutefois deux avantages très intéressants. Le premier est qu'elles convergent rapidement surtout quand on dispose d'une expression symbolique exacte des dérivées partielles [100]. Le second est qu'elles possèdent des critères de convergence exacts. Il est donc possible de dire avec quelle précision un optimum est atteint. Ceci permet d'obtenir de bonnes solutions en ajustant la précision de convergence.

Dans la présente étude, une méthode d'itération Levenberg Marquardt est utilisée pour identifier les inconnues.

La méthode Levenberg-Marquadt est une méthode standard basée sur le calcul numérique de dérivées partielles de second ordre. Elle permet de minimiser une fonction non linéaire de paramètres comme la fonction d'erreur (équation II-47).

Par rapport à d'autres méthodes similaires comme Gauss-Newton ou la méthode du gradient, elle converge plus facilement mais elle peut converger vers un minimum local si le point de départ est mal choisi.

Pour essayer de contourner ce problème, on peut la coupler avec une première approche qui permet de sélectionner les points de départs intéressants. C'est ce que nous avons fait avec l'algorithme génétique

## II.6.2.2 Les méthodes stochastiques

Les méthodes stochastiques sont basées sur une prospection aléatoire de l'espace des solutions à l'aide de règles de transition probabilistes. Ainsi, pour des optimisations distinctes avec les mêmes configurations de départ, le trajet vers l'optimum peut être différent. Parmi les algorithmes stochastiques couramment utilisés, on trouve les algorithmes génétiques.

### II.6.2.2.1 Algorithme génétique

Un des objectifs de notre travail consiste à optimiser les paramètres thermiques d'une paroi multicouche. Nous allons utiliser un algorithme génétique pour faire cette optimisation multi-objectif.

L'algorithme génétique est une technique d'optimisation qui s'est inspirée des théories de l'évolution et de la sélection naturelle des espèces.

En résumé, un individu d'une population a des caractéristiques que l'on peut coder sur un génotype. Pour nous, ce sera les  $n$  paramètres thermophysiques à identifier. On génère de façon aléatoire une population répartie dans l'espace des paramètres. Puis en fonction de l'adaptation des différents individus, c'est-à-dire des valeurs prise par la fonction d'erreur associée, ils participeront ou non à la génération de la population suivante dite population enfant. Des phénomènes aléatoires de type mutation ou génération spontanée permettent de couvrir au mieux tout l'espace des solutions. Le principe de la méthode est simple mais elle nécessite un grand nombre de réglages comme le choix de la taille des populations, le nombre de génération, les modes de sélection, de croisement, etc... Je n'ai pas étudié de façon très approfondie l'impact de ces différents facteurs. L'objectif était d'en extraire une population finale qui pour chaque individu me donnait un point de départ pour mon optimisation par Levenberg – Marquardt.

Les algorithmes génétiques sont des méthodes stochastiques de recherche qui imitent l'évolution biologique de la nature [101]. Ces algorithmes opèrent sur une population de solutions potentielles d'un problème en appliquant le principe de survie des plus adaptées qui produisent par croisement de meilleures solutions au problème. Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données.

Pour résumer, nous pouvons mentionner:

- Les algorithmes génétiques utilisent un code des paramètres, et non les paramètres eux-mêmes ;
- Les algorithmes génétiques travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique ;
- Les algorithmes génétiques n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire ;
- Les algorithmes génétiques utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes ;
- La méthode est applicable aussi bien aux problèmes continus qu'aux problèmes discrets ou mixtes ;
- Ils n'utilisent que la valeur de la fonction objectif (et non pas sa dérivée ou un calcul intermédiaire) ;
- Les éventuelles discontinuités de la fonction objectif ont peu d'effet sur la convergence de ces algorithmes ;
- Ils se laissent difficilement piéger par des optima locaux ;
- Ils peuvent traiter un grand nombre de paramètres, et sont très bien adaptés au calcul parallèle.

Une description du fonctionnement d'un algorithme génétique est faite en [\[annexe II-2\]](#).

## **II.7 Conclusion**

Dans cette partie, il a été présenté des méthodes d'identifications de paramètres thermophysiques de matériaux à partir d'une procédure inverse en utilisant différents algorithmes. La modélisation de champ de température dans les matériaux sera effectuée par un modèle numérique en différences finies en 1D. Le couplage de ce modèle numérique avec un algorithme de minimisation de fonction permettra d'identifier certains paramètres thermophysiques du système. Ceci se fera par l'intermédiaire d'algorithmes capables de faire varier de façon itérative les paramètres thermiques afin d'ajuster au mieux la température simulée à la réponse mesurée par la caméra infrarouge.

Une étude de sensibilité a permis de montrer qu'il était possible d'identifier simultanément les paramètres thermophysiques de la paroi.

L'utilisation d'un mur équivalent a montré qu'il est possible de déterminer les propriétés thermophysiques d'une paroi multicouche, mais dans certaines conditions.

# **Chapitre III:**

## **Aspects expérimentaux**

## III.1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter les différents cas étudiés, les différentes phases des essais et le traitement des données. Pour développer la méthode de caractérisation de parois *in-situ*, la démarche a consisté dans un premier temps, à tester la méthode sur des parois "connues" en laboratoire. La version la plus simple et la plus facile à appréhender est la paroi homogène monocouche. Au regard des enveloppes de bâtiments, les parois constituées d'un matériau unique sont devenues peu courantes mais plutôt composées de plusieurs matériaux. Par conséquent, avant d'aller sur le terrain, la méthode a été confrontée à deux parois tri-couches de nature différente.

Les parois de laboratoire nous sont "connues" car une étude classique préalable de caractérisation en laboratoire à partir d'un banc de conduction nous permet de déterminer les propriétés thermophysiques comme la conductivité thermique ou la capacité calorifique. La masse volumique est également facilement accessible par un calcul de volume et la réalisation d'une pesée. Ce troisième chapitre débute donc par la caractérisation préalable des matériaux constituant les parois étudiées en laboratoire.

## III.2 Chaîne de mesures et capteurs

La détermination des paramètres thermiques implique la mesure simultanée dans un même plan de la densité de flux thermique et de la température de surface. Les sollicitations sont de la nature aléatoire en conditions *in situ*, ou déterministes en laboratoire. Cette mesure simultanée des deux grandeurs est rendue possible par l'utilisation du capteur de flux et de température que nous présentons.

### III.2.1 Chaîne de mesures

#### III.2.1.1 Multimètres

Les mesures en laboratoire sont réalisées à l'aide d'un multimètre scrutateur numérique de précision. Les différents capteurs, thermocouples et fluxmètres sont reliés à un multimètre (KEITHLEY 2700) multivoies adapté à la mesure de signaux bas niveau. Cet appareil est capable d'accueillir vingt signaux d'entrée. Il est relié à un ordinateur par une liaison RS232. Un programme développé avec l'interface « TestPoint » gère les acquisitions et permet le transfert de données. Le stockage des données s'effectue à pas régulier sous forme de fichier « texte ». Nous utilisons ce logiciel d'acquisition pour suivre en temps réel l'évolution des différentes mesures effectuées. L'acquisition des données se fait toutes les 20 secondes pour l'ensemble de nos essais.



Figure III-1. KEITHLEY 2700

Ce multimètre autorise un balayage très rapide des voies, ce qui permet de réduire considérablement l'intervalle de temps entre les acquisitions et donc de procéder à des mesures avec des fréquences d'échantillonnage élevées.

### III.2.1.2 Centrale d'acquisition

Les mesures *in situ* sont réalisées à l'aide d'une centrale d'acquisition de mesure autonome avec la possibilité de relier des modules déportés. L'importance prise par les mesures *in situ* a permis de développer les capacités offertes par les centrales d'acquisition. La résolution 16 bits permet d'atteindre des précisions de l'ordre du microvolt. La rapidité et la facilité de branchement permet de mettre en place le dispositif expérimental dans un temps relativement court. La centrale est autonome et permet la lecture des températures et des flux en temps réel directement sur la centrale (nous avons choisi un pas de temps de 20 Secondes). Les données peuvent être récupérées en continu ou à la fin de l'essai via un port série RS232.



Figure III-2. Centrale d'acquisition IDL100

La figure III-2 montre un exemple de centrale de type IDL 100 de marque GANTNER avec son module déporté utilisés lors des campagnes de mesures sur site.

### III.2.1.3 Caméra SILVER 420M

Les essais de laboratoire et *in situ* sont réalisés à partir de protocoles expérimentaux basés sur la thermographie infrarouge. La caméra employée est une SILVER 420 de la marque CEDIP

Infrared reliée à micro-ordinateur qui assure le pilotage de la caméra à l'aide du logiciel « ALTAIR » développé par FLIR. Elle est équipée d'un détecteur matriciel de réponse et de type de refroidissement 320x256 pixels, détecteurs en InSb<sup>1</sup>, dont la sensibilité spectrale se situe dans l'infrarouge moyen 3-5  $\mu\text{m}$ . Le NETD<sup>2</sup> est inférieur à 25mK et donné typiquement à 20mK. Lors des essais, la caméra est placée en face de la zone sollicitée à une distance de 1 mètre. Ceci induit une zone d'intérêt vue par la caméra de 370x300 mm<sup>2</sup>. La caméra est équipée d'un capteur matriciel composé de 320x256 détecteurs quantiques. Chaque zone élémentaire vue par le détecteur de la caméra correspond ainsi à des zones élémentaires de 0.86x0.85mm<sup>2</sup>. Les thermogrammes sont enregistrés avec un pas de temps de 20 secondes.



Figure III-3. Caméra SILVER 420M

### III.2.2 Les capteurs

Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services ...), de nombreux paramètres physiques (température, flux, force, position, vitesse, ...) ont besoin d'être contrôlés. Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques. Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable. Notre travail porte sur l'étude des transferts thermiques. Les sollicitations peuvent être de nature aléatoire en conditions *in situ*, ou déterministes en laboratoire. La mesure simultanée de la température et du flux est rendue possible par l'utilisation de thermocouples et de capteur de flux. Ils sont décrits ci-après.

---

<sup>1</sup> Quantique en Indium antimonide

<sup>2</sup> Sensibilité thermique (caméra infrarouge haute résolution)

### III.2.2.1 Les thermocouples

Il existe plusieurs types de thermocouples [102, 103]. Tous sont utilisés pour une gamme précise allant de quelques degrés à quelques milliers de degrés. Les signaux électriques de ces sondes sont de l'ordre du microvolt jusqu'au millivolt et non linéaires. L'avantage du thermocouple est la fiabilité, son faible encombrement et sa facilité de mise en œuvre.

Les mesures de températures ont été réalisées à l'aide de thermocouples de type T (cuivre constantan). Dans le cas où l'on effectue une mesure simultanée de flux et de température, un thermocouple de type T est intégré au fluxmètre par dépôt électrolytique de cuivre sur une piste de constantan. Ceci permet une mesure de température dans le plan de mesure du flux avec une perturbation négligeable.



Figure III-4. Thermocouple de type T et Résistance de platine Pt100

La Figure III-5 présente le principe de la mesure de température par thermocouples. Les deux métaux (cuivre et constantan), de natures différentes, sont reliés par deux jonctions (formant ainsi un thermocouple) aux températures  $T_1$  et  $T_2$ . Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les jonctions,  $T_1 - T_2$ . Notons que les Thermocouples ne mesurent pas à proprement parler une température mais une différence de température. Pour mesurer une température inconnue, l'une des deux jonctions doit être maintenue à une température connue, par exemple celle de la glace fondante ( $0^\circ\text{C}$ ). Dans notre cas, il s'agit de la température d'une masse métallique suivie par une sonde platine.

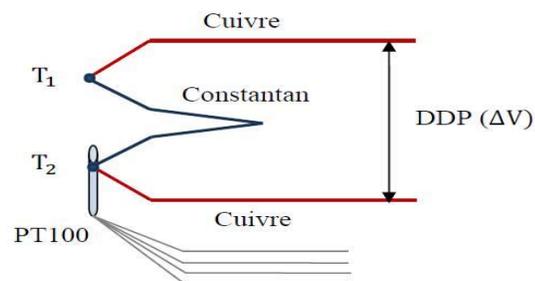


Figure III-5. Branchement différentiel de thermocouples

La température est donc obtenue en deux temps en ajoutant la température de la masse thermique et la différence de température entre celle-ci et le capteur conformément à la Figure III-5. Le branchement différentiel des thermocouples délivre une DDP de laquelle un écart de température est déduit. Il est donc nécessaire de connaître la réponse du thermocouple utilisé en fonction de la température pour pouvoir relier la différence de potentiel électrique à la différence de température.

Dans notre configuration expérimentale, le montage différentiel délivre une tension  $\Delta V$ , fonction de l'écart entre  $T_{ref}$  (température de la masse thermique) et  $T$  (température de la sonde).

Pour obtenir des mesures de température précises, il faut que les erreurs commises soient les plus faibles possibles. Ici, le montage choisi permet de mesurer une différence de potentiel fonction de la différence de températures entre le lieu de la mesure et un système de référence. Une sonde de platine (PT100 ou PT1000) mesure la température du système de référence thermiquement stable (masse thermique placée dans une boîte isolée) avec précision. Le thermocouple  $T_{ref}$  est collé près de la PT100 sur la masse thermique (figure III-7). Toutes les mesures de températures sont ainsi réalisées par l'intermédiaire de thermocouples branchés en différentiel (cf. figure III-6).

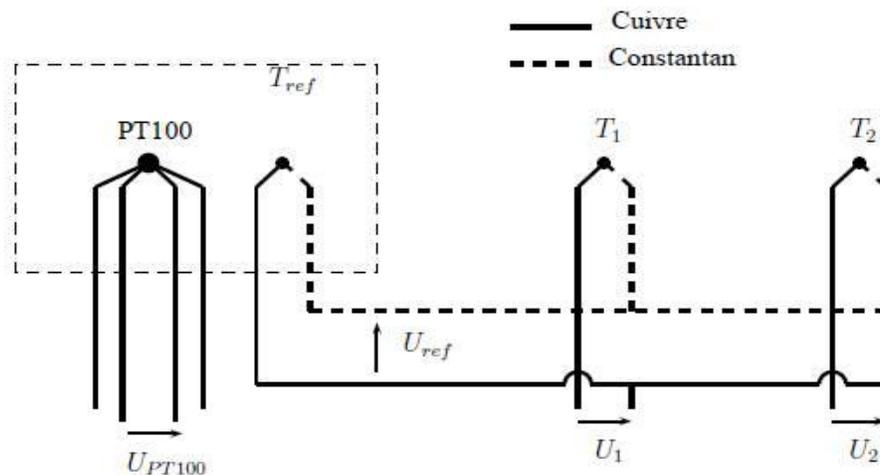


Figure III-6. Montage pour mesure de température avec référence extérieur

Chaque tension  $U_1$  et  $U_2$  dépend des différences de températures entre la référence et les thermocouples respectifs n°1 et n°2. Grâce aux formules III-1, III-2 et III-3, on peut retrouver la tension au thermocouple et donc la température de la jonction.



Figure III-7. Masse thermique à température constante

À partir des tables qui fournissent les écarts de tensions en fonction des écarts de température pour une référence à 0°C. Nous avons établi l'approximation polynomiale suivante :

$$U_{thréf} = 7.10^{-5}.T^3 + 0.0361.T^2 + 38.731.T \quad [\mu\text{v}] \quad (\text{III-1})$$

$$\text{Avec} \quad T = T_{pt100} = 2.5734 * R_{pt100} - 257.38$$

Où T est la température d'une jonction du thermocouple (l'autre étant à 0°C) et  $U_{thréf}$  la tension délivrée par le montage différentiel. La tension qui serait mesurée si la référence était stabilisée à 0°C vaudrait :

$$U_i = U_{thréf} + \Delta V_i \quad (\text{III-2})$$

Avec  $\Delta V_i$  : Valeurs mesurées par le KEITHLEY 2700.

À partir de  $U_i$ , on peut déduire la température de la sonde en utilisant l'expression réciproque soit :

$$T_i = 4.10^{-12}.U_i^3 - 6.10^{-7}.U_i^2 + 0.0258.U_i \quad [^\circ\text{C}] \quad (\text{III-3})$$

### III.2.2.2 Les fluxmètres

Pour mesurer simultanément les flux et les températures dans un même plan, des fluxmètres plans à gradients tangentiels [Annexe III-1] ont été utilisés. Les fluxmètres thermiques traditionnels sont conçus pour la mesure des échanges par conduction thermique dans les milieux solides. La mesure d'un flux thermique est habituellement ramenée à la mesure d'une différence de température entre les faces d'une paroi auxiliaire [104]. Cet écart de température, mesuré par une thermopile uniformément distribuée sur la surface du capteur, est représentatif de la densité locale de flux thermique (moyennée sur la surface du capteur).

Le fluxmètre thermique à gradient tangentiel a été conçu pour avoir à la fois une sensibilité élevée et une épaisseur réduite de quelques dixièmes de millimètre [105], [106]. Un autre avantage est dû essentiellement au mode de fabrication qui permet la réalisation industrielle de capteurs souples de grandes surfaces (plusieurs  $\text{dm}^2$ ) tout en maintenant la qualité obtenue avec de petites dimensions (quelques  $\text{cm}^2$ ). Ces capteurs ont fait l'objet de nombreux travaux [107], [108].

Le fluxmètre peut être caractérisé par sa sensibilité qui exprime la quantité de signal fournie par le capteur (des  $\mu\text{V}$ ) par unité de la grandeur à mesurer : des  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Son épaisseur et les propriétés thermophysiques intrinsèques influent sur la perturbation induite par le capteur sur la densité de flux à mesurer. Cette perturbation dépend essentiellement de la résistance thermique du fluxmètre en régime permanent et de sa capacité thermique en régime transitoire. Ces deux quantités sont directement proportionnelles à l'épaisseur du capteur qui est de l'ordre de 0,2 mm. La sensibilité est elle de l'ordre de  $110 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$  pour un capteur de surface  $15 \times 15 \text{ cm}^2$ , figure III-8. Ces capteurs sont bien connus. Ils ont été mis au point par notre laboratoire il y a plusieurs années et ont fait l'objet de développements réguliers permettant d'obtenir un instrument de mesure très fiable. Ces fluxmètres sont étalonnés par nos soins à l'aide de résistances électriques planes de dimensions rigoureusement égales à celles des capteurs.

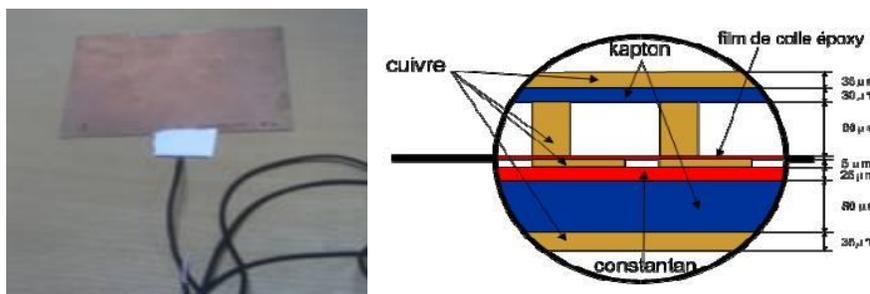


Figure III-8. Exemple d'un capteur ( $15 \times 15$ ) et coupe d'une cellule de fluxmètre

Les capteurs utilisés au cours des différents travaux ont les mêmes surfaces actives. Les mesures réalisées en laboratoire se font principalement à partir de fluxmètres de  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ . En ce qui concerne les mesures *in situ*, des fluxmètres de mêmes dimensions ont été utilisés. Une procédure d'étalonnage est indispensable, elle permet d'interpréter la tension délivrée par les capteurs pour la convertir en densité de flux thermique.

### III.3 Caractérisation préalable

Dans cette partie, les principales caractéristiques du matériel et matériaux utilisés seront données ainsi que les procédures d'étalonnage et de mise en œuvre des capteurs de mesure.

### III.3.1 Etalonnage

Avant toute expérimentation il est nécessaire de bien connaître le comportement des capteurs placés dans le contexte de la mesure. Une procédure d'étalonnage est indispensable pour obtenir des mesures fiables et précises [109]. Pour les deux types de capteurs utilisés ici, des protocoles particuliers sont utilisés et validés depuis plusieurs années au laboratoire. Elle permet d'interpréter la tension délivrée par les capteurs pour la convertir en flux thermique.

Il existe plusieurs méthodes pour les étalonner [110]. Nous avons utilisé la méthode dite « à flux nul » [109]. Considérant la figure III-9, la méthode consiste à réinjecter une puissance dans une résistance auxiliaire jusqu'à l'obtention d'un flux nul dans le capteur mesurant les pertes vers l'isolant. Ceci est possible grâce à un régulateur PID (Proportionnel Intégral Dérivé) qui ajuste la puissance nécessaire délivrée par la résistance auxiliaire.

Le principe de fonctionnement est le suivant : le fluxmètre à étalonner est recouvert d'une résistance chauffante (primaire) qui dissipe une quantité de chaleur connue  $P=U^2/R$ . Le système est disposé sur un puits thermique afin d'assurer le maximum de transfert de flux dans le capteur à étalonner et sous un isolant thermique afin de minimiser les pertes par le fluxmètre et résistance auxiliaires. Le fluxmètre et la résistance auxiliaires ( $R_{\text{auxiliaire}}$ ) servent à maintenir un flux nul au niveau du capteur auxiliaire signe d'une annulation des pertes. Toute la chaleur dissipée par la résistance primaire passe dans le fluxmètre à étalonner.

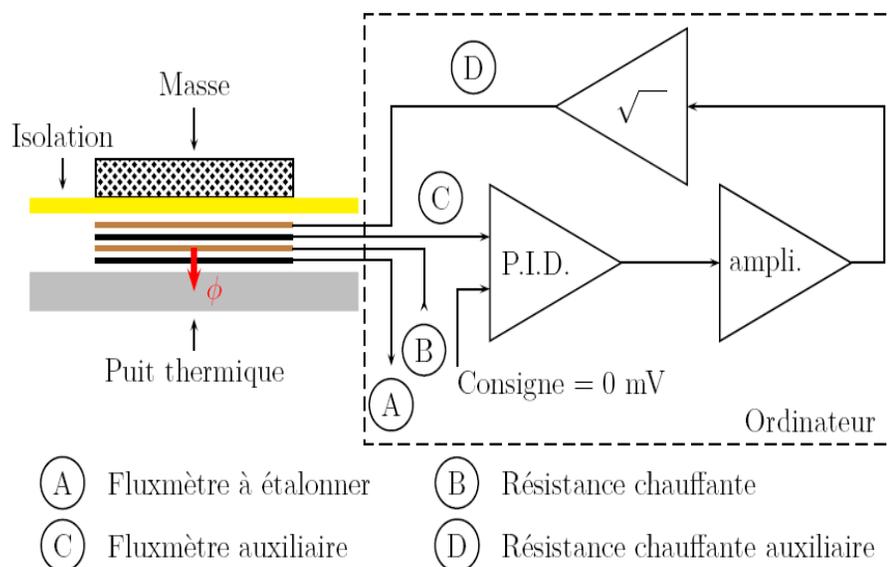


Figure III-9. Etalonnage flux métrique par la méthode du flux nul

Nous mesurons aux bornes du fluxmètre une différence de potentiel « V » qui est proportionnelle au flux traversant le capteur. Cela permet de déterminer la sensibilité K à partir de la relation suivante :

$$K = \frac{VS}{P} \quad (\text{III-4})$$

Avec P : Puissance fournie par la résistance chauffante en W

S : Surface active du capteur en m<sup>2</sup>

La sensibilité du fluxmètre correspond donc à la tension de sortie obtenue pour une densité de flux unitaire. Elle s'exprime en ( $\mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ).

Cette procédure est répétée pour différentes valeurs de puissance, de quelques  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  jusqu'à  $400\text{-}500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . On obtient ainsi, une évolution de la ddp (Différence De Potentiel) en fonction de la puissance injectée est obtenue. La sensibilité du capteur est obtenue en calculant la pente de la droite de régression du nuage de points mesurés.

La caractérisation de matériaux par l'intermédiaire d'un banc de conduction nécessite la disposition d'un fluxmètre sur chaque face du matériau. La figure III-10 présente les résultats d'une procédure d'étalonnage pour deux capteurs utilisés dans cette phase de caractérisation.

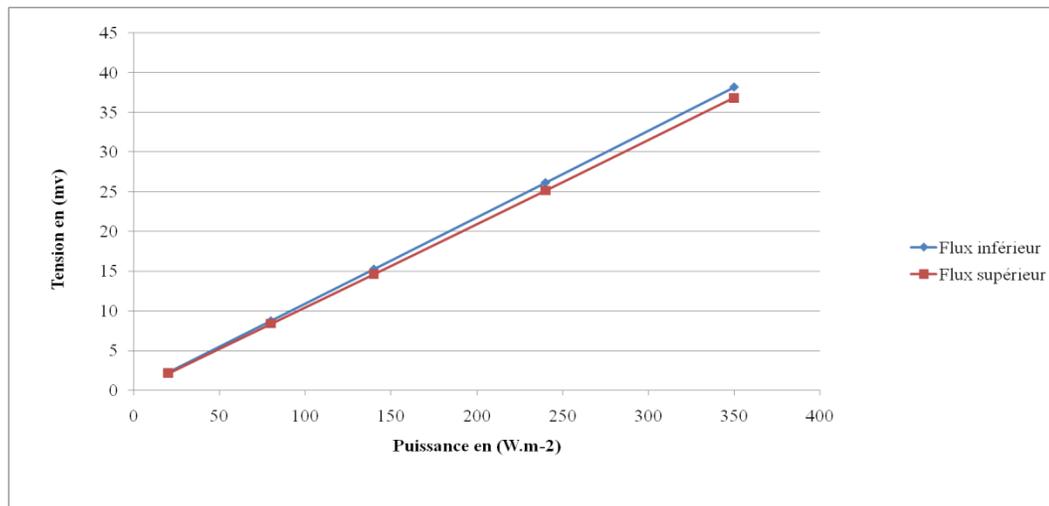


Figure III-10. Réponse en tension en fonction de la densité de flux

Le tableau ci-dessous donne la sensibilité établie pour les deux fluxmètres (15x15cm) utilisé :

| Flux           | Sensibilité ( $\mu\text{V} \cdot (\text{m}^2/\text{W})$ ) |
|----------------|---|
| Flux inférieur | 109.42  |
| Flux supérieur | 104.77  |

Tableau III-1. Sensibilité des fluxmètres utilisés

La différence de sensibilité constatée entre les deux capteurs s'explique par la procédure de fabrication. Celle-ci n'est pas automatisée et les opérations de couplage ou de collage des différentes parties qui constituent un fluxmètre peuvent varier légèrement d'un capteur à l'autre.

L'histoire des contraintes mécaniques et thermiques appliqués au capteur est aussi un paramètre qui peut influencer sa sensibilité.

Selon des études menées par [111], la sensibilité du fluxmètre est indépendante vis-à-vis du sens du flux. D'autres paramètres susceptibles d'avoir une influence sur la sensibilité du capteur tels que ; la pression exercée par le vérin pneumatique ou les variations de la température, sont sans effet significatif sur la sensibilité du capteur, dans nos domaines d'investigation.

Après avoir déterminé la sensibilité de deux fluxmètres, ceux-ci vont être utilisés pour mesurer les grandeurs thermiques (conductivité thermique et la capacité calorifique) de matériaux intervenant dans notre étude.

### III.3.2 Caractérisation des grandeurs thermiques

#### III.3.2.1 Matériaux étudiés

Notre objectif est de déterminer les propriétés thermophysiques des différents matériaux. Cette mesure est dispensable pour la phase de modélisation et pour l'analyse des résultats futurs.



Figure III-11. Carreau de plâtre      Figure III-12. Béton cellulaire

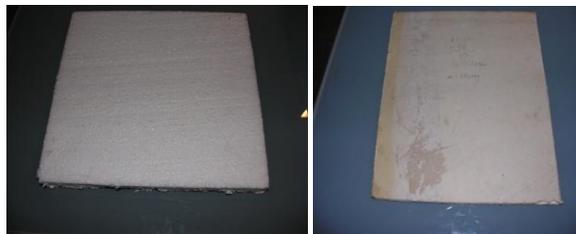


Figure III-13. Polystyrène      Figure III-14. Plaque de plâtre

Les propriétés thermiques des matériaux en régime stationnaire peuvent être mesurées par plusieurs méthodes d'essai normalisées ; le choix de la méthode la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'éprouvette. La norme NF EN 12664 s'applique à la méthode de la plaque chaude gardée [112] et la méthode fluxmétrique. La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction. Elle est directement liée à la résistance thermique et représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température.

Le dispositif utilisé est le banc de conduction. Il permet d'imposer des gradients de température entre les deux faces par l'intermédiaire de deux plaques échangeuses. Les flux et températures sont mesurés par les capteurs fluxmétriques munis de thermocouples afin de déterminer la conductivité et la capacité thermique du matériau étudié. Les procédures de détermination de ces propriétés thermophysiques sont décrites ci-après.

Le dispositif expérimental utilisé est représenté Figure III-15.

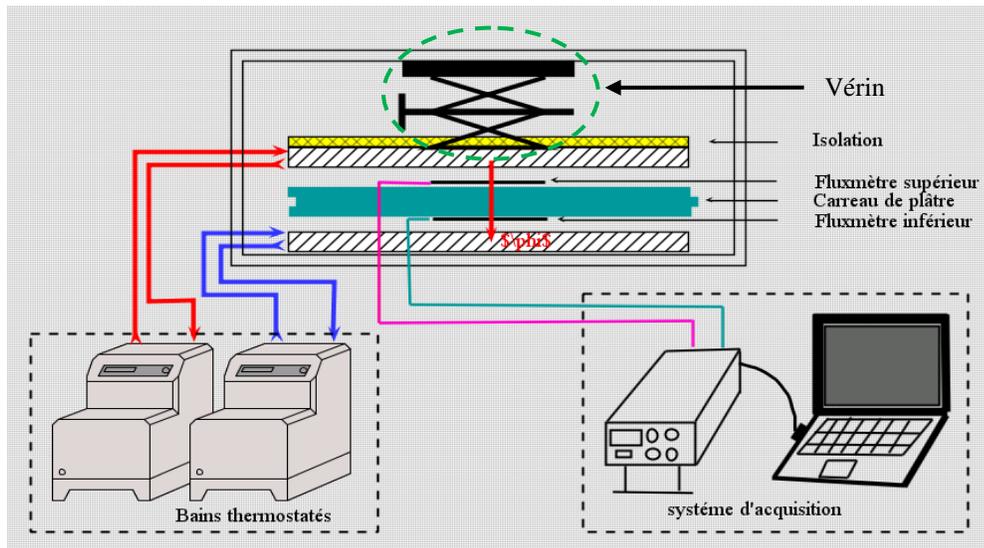


Figure III-15. Dispositif expérimental de mesure pour caractériser un carreau de Plâtre

### III.3.2.2 Principe de détermination de la conductivité thermique

Les plaques échangeuses sont maintenues à des températures différentes ( $\theta_1$  et  $\theta_2$ ). En introduisant les grandeurs généralisées [109]. Il est possible de distinguer deux modes d'échange, indépendants, caractéristiques des processus de transferts et de stockage de chaleur. Les grandeurs généralisées  $\sum \Phi$  et  $\Delta\theta$  caractérisent le processus de transfert et sont liées par la relation (III- 5) où  $R_{th}$  représente la résistance thermique de l'échantillon.

$$\sum \Phi = \frac{2\Delta\theta}{R_{th}} \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (\text{III-5})$$

L'intérêt de cette méthode réside dans la réduction du temps de mesure, par rapport aux méthodes classiques en régime permanent comme celle de plaque chaude gardée [113]. En effet, la méthode montre que la somme des flux se stabilise très rapidement et à une constante de temps quatre fois plus faible que celle d'un flux élémentaire. La conductivité thermique  $\lambda$  de l'échantillon est déduite des relations suivantes :

$$\sum \Phi = \frac{2\Delta\theta}{R_{th}} \quad \lambda = \frac{e}{R_{th}} \quad [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})] \quad (\text{III-6})$$

Avec  $e$ : L'épaisseur de l'échantillon

En posant :  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$  [°C] et  $\sum\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$  [W/m<sup>2</sup>]

### III.3.2.3 Principe de détermination de la capacité thermique

La chaleur massique  $C$  (J. Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>) est déterminée à partir de la quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un degré la température de l'unité de masse d'un système. Elle traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner de la chaleur. La méthode consiste à effectuer une étude de l'énergie emmagasinée entre deux états d'équilibre.

Dans notre cas, le dispositif de mesure est identique, seules les sollicitations thermiques imposées changent. Le système échantillon-fluxmètres est tout d'abord soumis au champ de température des plaques échangeuses portées à des valeurs identiques ( $\theta_1 = \theta_2$ ), c'est l'état initial stable ( $t_{initial}$ ). Ensuite, nous faisons évoluer l'échantillon vers un autre état d'équilibre ( $t_{final}$ ) avec  $\theta'_1 = \theta'_2 \neq \theta_1$ .

Entre les deux états d'équilibre thermique, l'échantillon a stocké une quantité d'énergie  $Q$  mesurée par les capteurs fluxmétriques

$$Q = \int_{t_{initial}}^{t_{final}} \Delta\Phi \cdot dt \quad [J] \quad (III-7)$$

On peut également la relier aux températures moyennes  $\sum\theta_{initial}$  et  $\sum\theta_{final}$

La capacité thermique  $C$  est sous la forme suivante :

$$C = \frac{Q}{\Delta\theta} \quad [J/K] \quad (III-8)$$

On en déduit la chaleur massique  $c$  de l'échantillon :

$$c = \frac{C}{\rho S e} \quad [J/Kg \cdot K] \quad (III-9)$$

Avec  $\rho$  : Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>) de l'échantillon.

$e$  : l'épaisseur de l'échantillon (m).

$S$  : la section d'échantillon (m<sup>2</sup>).

### III.3.2.4 Résultats de caractérisation en laboratoire

Les figures III-16 et III-17 montrent deux essais de caractérisation réalisés sur un matériau. Le premier permet la détermination de sa conductivité thermique et le second sa capacité calorifique.

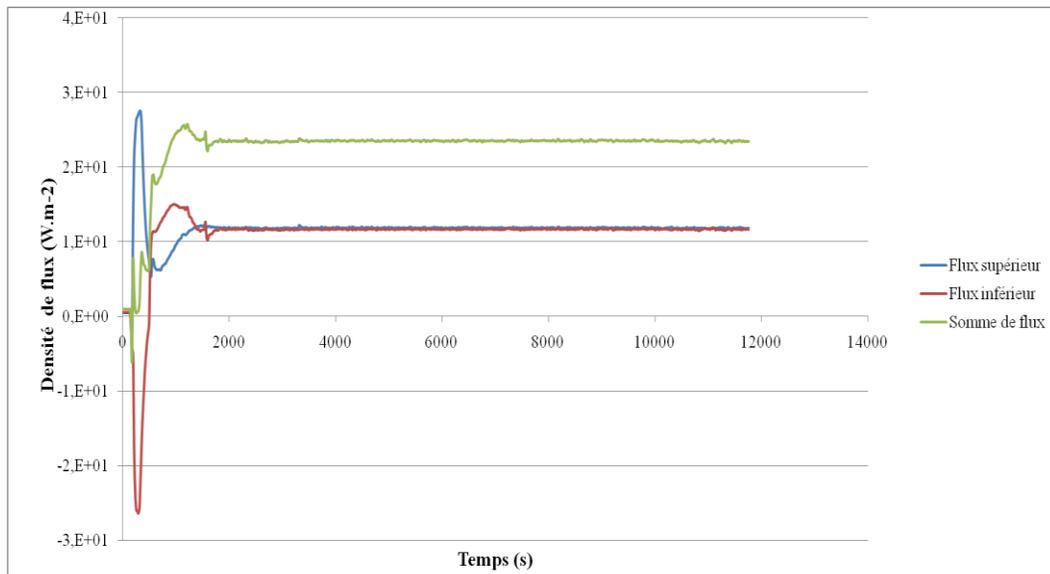


Figure III-16. Exemple d'évolution des flux au cours de la détermination de la conductivité thermique

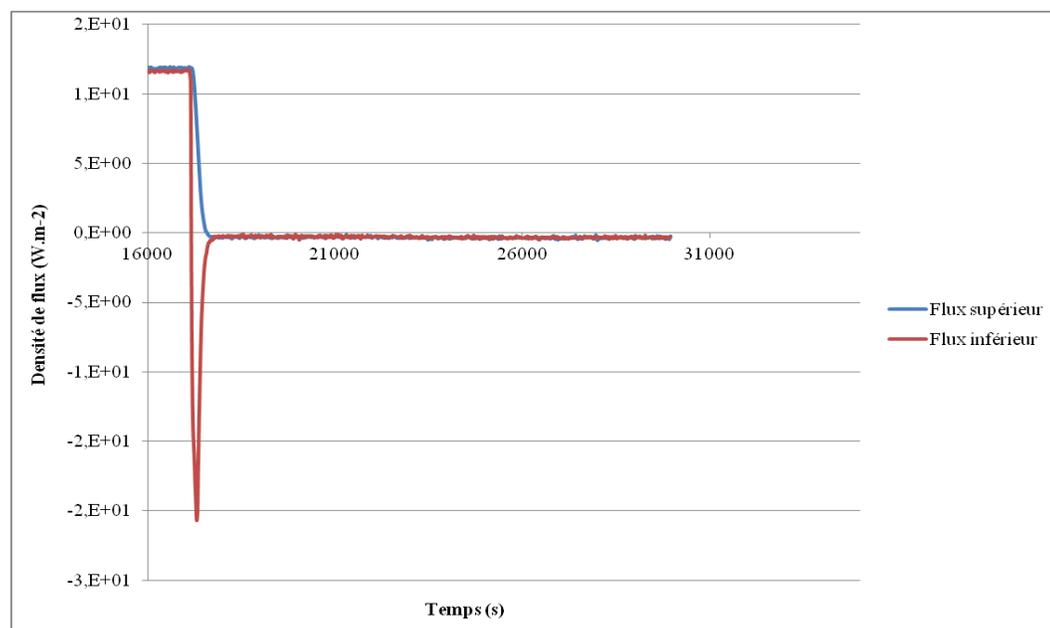


Figure III-17. Exemple d'évolution des flux au cours de la détermination de la chaleur massique

Les matériaux testés ont fait l'objet d'une caractérisation thermophysique suivant la Norme NF EN 12664 basée sur l'utilisation d'un banc fluxmétrique. Le tableau ci-dessous regroupe les caractéristiques thermophysiques des matériaux étudiés. Ces caractéristiques sont indispensables dans la phase de modélisation. Le produit  $\rho c$  intervient également dans la modélisation et est de ce fait évalué dans le tableau de synthèse ci-dessous. Ce produit  $\rho c$  est appelé "chaleur volumique" et s'exprime en  $J.m^{-3}.K^{-1}$ .

| L'échantillon     | L'épaisseur (cm) | $\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> ) | C (J .Kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ) | $\rho c$ (J.m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ) | $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|------------------|------------------------------|--|---|---|
| Carreau de plâtre | 6.5              | 1028                         | 1178                                       | 1.2*10 <sup>6</sup>                           | 0.31  |
| Polystyrène       | 3                | 12                           | 1467                                       | 1.76*10 <sup>4</sup>                          | 0.037   |
| Plaque de plâtre  | 1                | 652                          | 1013                                       | 6.6*10 <sup>5</sup>                           | 0.15  |
| Béton cellulaire  | 5                | 650                          | 449  | 2.92*10 <sup>5</sup>                          | 0.24  |

Tableau III-2. Synthèse des résultats des différents paramètres thermophysiques

### III.4 Caractérisation des parois par thermographie infrarouge active

#### III.4.1 Introduction

Un des aspects du diagnostic concerne l'enveloppe. La connaissance du comportement thermique réel des parois est problématique. La composition exacte des parois n'est pas toujours connue de façon précise et ses propriétés thermiques sont quoiqu'il arrive toujours très imprécises. Cette technique présente l'avantage de permettre des mesures à distance. Pourtant, malgré une apparente facile utilisation, la thermographie infrarouge implique deux types de problèmes : le premier lié à la détection d'un rayonnement par un dispositif complexe (caméra infrarouge) et le second, relatif aux transferts radiatifs entre la scène thermique, dans son environnement, et le détecteur. Les caméras infrarouges fournissent une image thermique. Le contraste dans une image infrarouge est proportionnel au contraste thermique de l'objet observé. Il est bien évident que l'observation est d'autant plus intéressante que le système caméra est capable de discriminer des «écarts de température faibles ». Cette capacité est liée à la résolution thermique du système infrarouge.

La caméra infrarouge employée pour l'étude et présentée dans ce chapitre est une caméra haut de gamme de marque CEDIP Infrared de type SILVER 420M. Le travail qui m'a été confié avait pour objectif de mettre au point une méthode de caractérisation thermique in situ d'enveloppes de bâtiment basée sur une application de la thermographie infrarouge active. La démarche expérimentale envisagée consiste à solliciter une face de la paroi avec un créneau de flux et à observer les modifications du champ de température sur l'autre face par l'intermédiaire de la caméra infrarouge. Dans un premier temps, pour développer la méthode de caractérisation, plusieurs essais en laboratoire ont été réalisés. Pour cela plusieurs types de paroi ont été construits au sein du laboratoire.

## III.4.2 Paroi monocouche

### III.4.2.1 Mesures en laboratoire

Les résultats des propriétés thermophysiques des différents matériaux obtenus par l'intermédiaire du banc de conduction et présentés dans le paragraphe précédent seront considérés comme valeurs de référence et confrontés aux résultats obtenus par la méthode de caractérisation basée sur les mesures de thermographie infrarouge active.

Les essais réalisés en laboratoire sur les différentes parois ont été effectués en conditions contrôlées à partir de sollicitations déterministes.

#### III.4.2.1.1 Caractérisation d'une paroi constituée d'un carreau de plâtre – Première approche

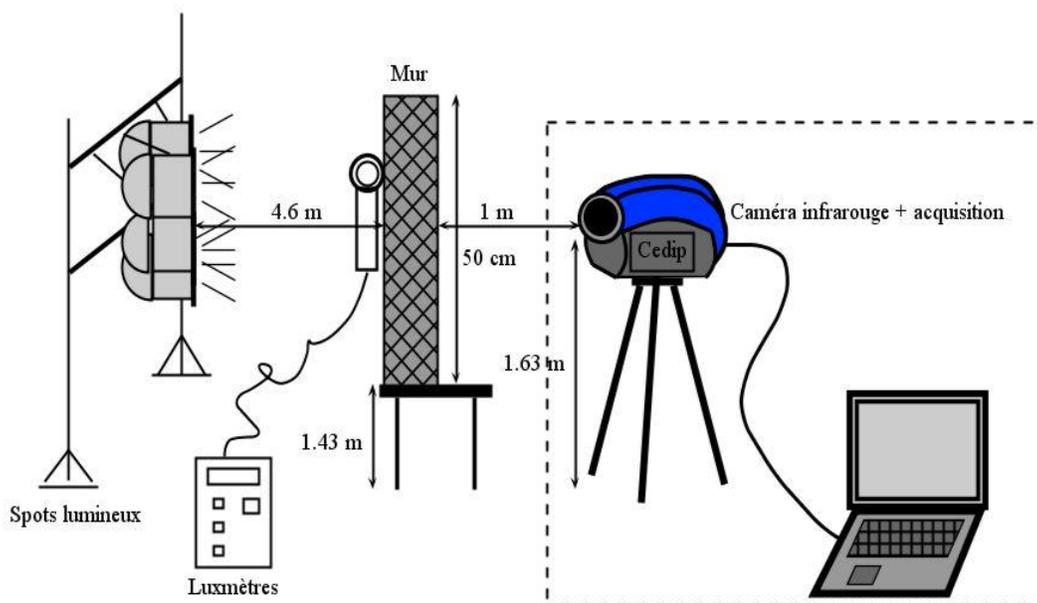


Figure III-18. Dispositif expérimental

La figure III-18 présente le dispositif expérimental mis en place dans un premier temps. Le carreau de plâtre que nous souhaitons caractériser a une épaisseur de 6.5cm pour une surface de  $67 \times 50 \text{ cm}^2$ . Pour solliciter sa face avant en flux, quatre spots de 1000W, positionnés sur un portique placé à une distance de 4.6 mètres, l'ont éclairé pendant 10 minutes. Pendant ce temps, la caméra infrarouge CEDIP visait la face arrière de la paroi à une distance de 1 mètre et enregistrait son évolution en température avec un pas de temps de 5 secondes. Plusieurs essais ont été réalisés. La première difficulté à surmonter a été de rechercher la meilleure orientation, la meilleure disposition des sources et la distance adéquate qui permettaient d'obtenir une sollicitation uniforme sur la face avant.

La figure III-19 représente un des nombreux essais réalisés sur un carreau de plâtre pour essayer d'obtenir l'uniformité de la source en face arrière. Un luxmètre a été utilisé pour vérifier l'uniformité de la sollicitation en réalisant un maillage régulier de points de mesure d'éclairagements.

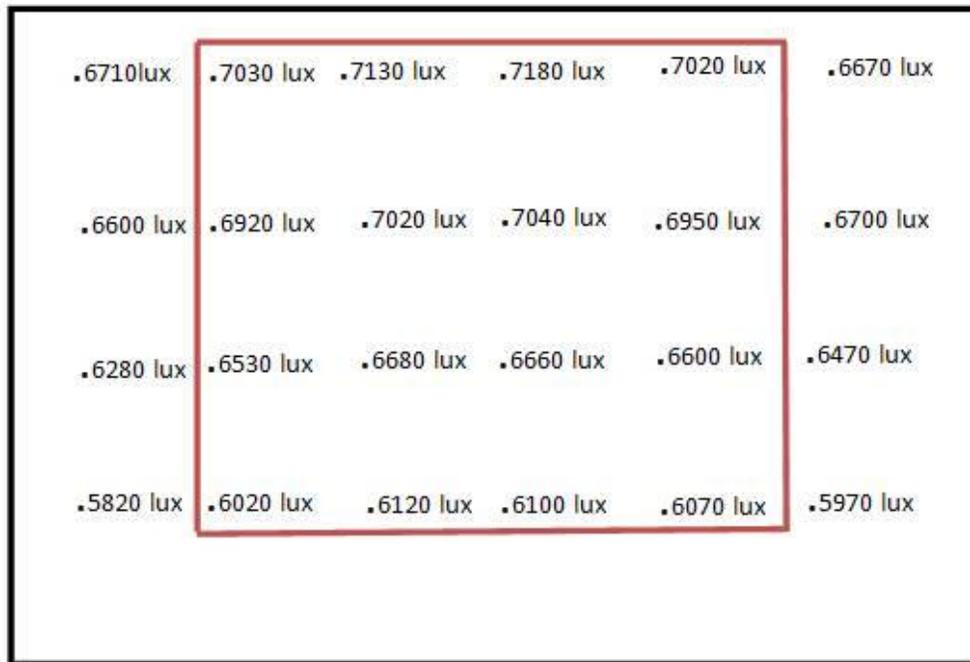


Figure III-19. Mesure de l'éclairagement par le luxmètre

Dans cette configuration, l'indice d'uniformité  $\mu$  est de 17.3 %. Il a été défini par :

$$\mu = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{moy}} \quad [\%] \quad (\text{III-10})$$

$E_{max}$ ,  $E_{min}$  et  $E_{moy}$  représentent respectivement l'éclairagement maximal, l'éclairagement minimal et l'éclairagement moyen dans la zone centrale qui correspond à la zone observée par la caméra en face arrière. Cette zone est matérialisée sur le dessin par un cadre rouge (37x30cm<sup>2</sup>).

Cet essai montre la difficulté à obtenir l'homogénéité de la source. De plus, les lampes ne permettent pas facilement de faire varier le flux de chaleur imposé à la paroi et les conditions climatiques (vent, soleil) risquaient de venir ajouter des contraintes supplémentaires. Devant tous ces obstacles, nous avons abandonné cette solution et avons recherché un dispositif plus adapté.

### III.4.2.1.2 Caractérisation d'une paroi constituée de carreaux de plâtre

#### III.4.2.1.2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est présenté sur la figure III-20.

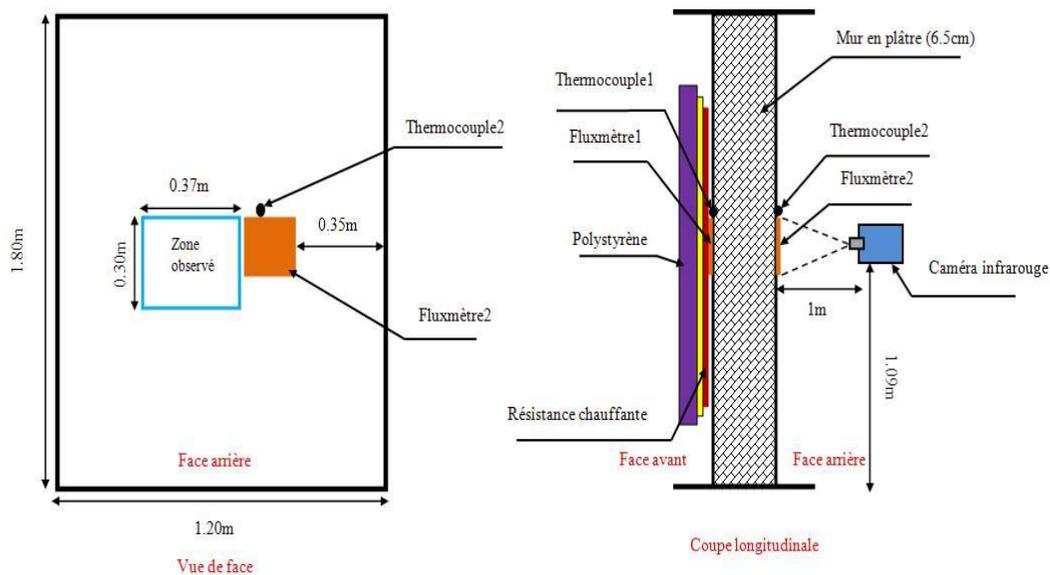


Figure III-20. Schéma de principe expérimental associé

La figure III-20 présente le dispositif expérimental que nous avons mis en place. Le mur en carreaux de plâtre que nous souhaitons caractériser à une épaisseur de 6.5 cm pour une surface de  $1.8 \times 1.2 \text{ m}^2$ . Le carreau de plâtre a fait l'objet d'une caractérisation préalable (Tableau III 2). Nous avons obtenu  $\lambda = 0.31 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $\rho c = 1.2 \cdot 10^6 \text{ J. K}^{-1}.\text{m}^{-3}$ . Ces valeurs sont considérées comme les références dans ce travail.

Sur la face avant (du côté de la sollicitation), une surface de  $0.9 \times 1.1 \text{ m}$  est couverte par une résistance chauffante plane. Elle est plaquée sur la paroi par un panneau de polystyrène de (18cm) d'épaisseur. L'isolant oriente l'essentiel de la puissance dissipée par la résistance dans la paroi à tester sur une surface de  $0.9 \times 1.1 \text{ m}^2$ . Cette large surface sollicitée garantit un régime de conduction unidirectionnel dans la zone centrale d'observation. Afin de mesurer le flux de chaleur qui traverse notre paroi, un fluxmètre ( $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) à gradient tangentiel [Annexe III-1] de 0.2 mm d'épaisseur est inséré entre la résistance et la paroi afin de mesurer la densité de flux entrant dans la paroi. Cette densité de flux mesurée à l'entrée de la paroi est prise comme condition limite dans le modèle numérique. Le fluxmètre a été étalonné préalablement. La résistance est connectée à un générateur de tension continue pilotable. Dans le cadre de ce travail, la résistance a été alimentée par des créneaux de tension. D'autres formes de sollicitations pourraient être envisagées.

La température résultante de l'ambiance du côté sortie (ou côté face arrière) est mesurée à l'aide d'une sonde de type "boule noire". Cette température résultante mesurée est utilisée dans la simulation numérique pour déterminer l'échange surfacique global entre la paroi et son environnement.

Du côté de la sortie, une caméra infrarouge est positionnée à 1 m de la paroi. La caméra est connectée à un ordinateur portable qui enregistre les images. Le pilotage s'effectue via le logiciel ALTAIR développé par FLIR. L'axe de visée de la caméra est perpendiculaire à la surface. Le démarrage de l'acquisition des images par la caméra est synchronisé avec le démarrage de la sollicitation. De façon à éviter les effets de bord, seule la partie centrale de l'image correspondant à une zone d'observation de 30cm x 37cm est retenue pour le traitement des données. La température retenue dans le calcul est obtenue en faisant la moyenne des températures de chaque pixel de la zone observée. Un fluxmètre a été collé à la limite de cette zone. Il est utilisé dans ce travail afin de valider l'estimation du coefficient d'échange surfacique [114, 115] sur la face de sortie par méthode inverse. Il a été recouvert d'un revêtement très fin ayant les mêmes caractéristiques d'émissivité que la paroi.

Des thermocouples de type T ont également été placés sur la surface de sortie pour valider la qualité de la température normalisée obtenue à partir de la mesure par thermographie infrarouge. Les thermocouples et les fluxmètres sont connectés à un multimètre scrutateur Keithley 2700 qui permet la mesure des basses tensions avec précision. Plusieurs essais ont été réalisés. Pour éviter les problèmes de correction de soudure froide dans le multimètre, les températures sont mesurées en différentiel par rapport à une masse thermique dont la température est suivie à l'aide d'une sonde platine de précision (cf. III.2.2.1. Les thermocouples).

#### III.4.2.1.2.2 L'uniformité de flux de chaleur

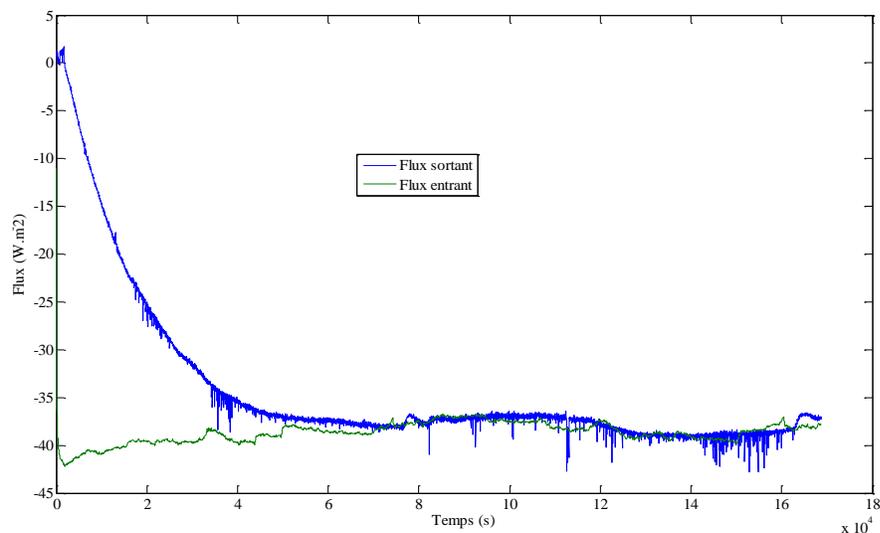


Figure III-21. Courbe de flux entrant et sortant en régime permanent

La figure III-21 représente l'évolution du flux entrant dans la paroi en carreaux de plâtre "face avant" et sortant "face arrière" après une période de chauffage de plusieurs heures (50 heures). Si on excepte les légères variations du flux sortant dues aux perturbations des conditions

d'échanges avec l'environnement, on constate qu'il y a superposition des flux à partir d'une durée de 8 heures d'essai ; le régime permanent est alors atteint.

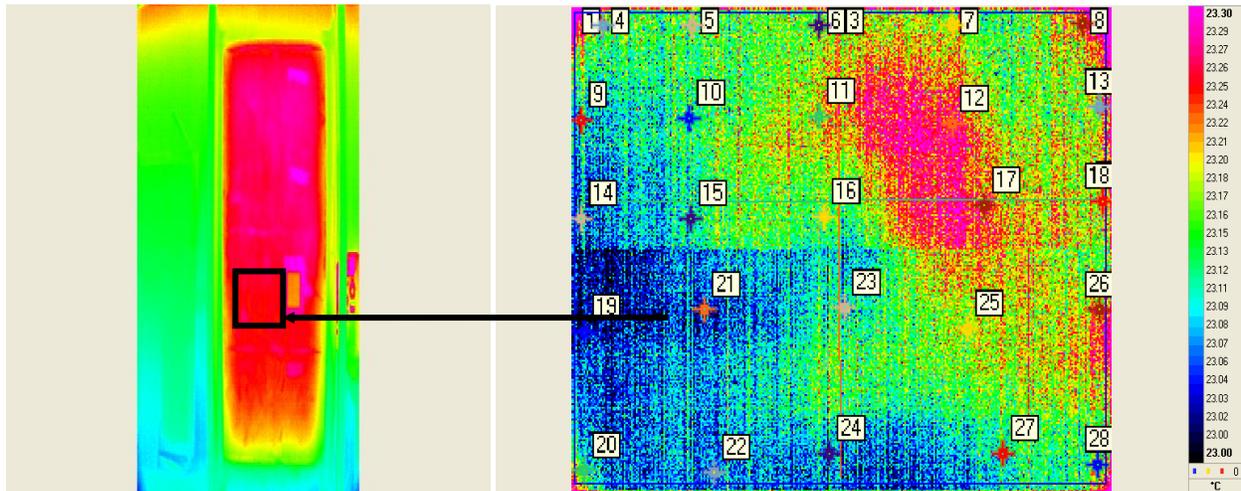


Figure III-22. Scène thermique

Figure III-23. la zone centrale

| Label | Niveau ... | Emissi... | X (px) | Y (px) | Couleur | Données label | Verrouiller | Cad |
|-------|------------|-----------|--------|--------|---------|---------------|-------------|-----|
| 4     | 24.05      | 1.00      | 18     | 9      |         | Aucun         |             |     |
| 5     | 24.01      | 1.00      | 71     | 9      |         | Aucun         |             |     |
| 6     | 24.05      | 1.00      | 146    | 9      |         | Aucun         |             |     |
| 7     | 24.09      | 1.00      | 225    | 9      |         | Aucun         |             |     |
| 8     | 24.07      | 1.00      | 302    | 8      |         | Aucun         |             |     |
| 9     | 23.97      | 1.00      | 5      | 59     |         | Aucun         |             |     |
| 10    | 23.96      | 1.00      | 69     | 58     |         | Aucun         |             |     |
| 11    | 24.10      | 1.00      | 146    | 57     |         | Aucun         |             |     |
| 12    | 24.13      | 1.00      | 225    | 61     |         | Aucun         |             |     |
| 13    | 24.09      | 1.00      | 312    | 52     |         | Aucun         |             |     |
| 14    | 23.91      | 1.00      | 5      | 111    |         | Aucun         |             |     |
| 15    | 24.02      | 1.00      | 70     | 111    |         | Aucun         |             |     |
| 16    | 24.06      | 1.00      | 149    | 110    |         | Aucun         |             |     |
| 17    | 24.10      | 1.00      | 244    | 104    |         | Aucun         |             |     |
| 18    | 24.04      | 1.00      | 314    | 102    |         | Aucun         |             |     |
| 19    | 23.85      | 1.00      | 7      | 171    |         | Aucun         |             |     |
| 20    | 23.94      | 1.00      | 7      | 244    |         | Aucun         |             |     |
| 21    | 23.93      | 1.00      | 78     | 159    |         | Aucun         |             |     |
| 22    | 23.94      | 1.00      | 84     | 245    |         | Aucun         |             |     |
| 23    | 24.04      | 1.00      | 161    | 158    |         | Aucun         |             |     |
| 24    | 23.95      | 1.00      | 152    | 235    |         | Aucun         |             |     |
| 25    | 24.09      | 1.00      | 234    | 169    |         | Aucun         |             |     |
| 26    | 24.08      | 1.00      | 312    | 159    |         | Aucun         |             |     |
| 27    | 23.94      | 1.00      | 255    | 235    |         | Aucun         |             |     |
| 28    | 23.94      | 1.00      | 311    | 241    |         | Aucun         |             |     |

Figure III-24. Température de la paroi après 50h de chauffage

La figure III-22 montre l'intégralité de la paroi (scène thermique). La figure III-23 montre la zone centrale qui correspond à un rectangle de 37 cm de large sur 30 cm de haut. Sur cette figure, 28 points ont été positionnés. L'extrait de tableur reproduit figure III-24 indique les valeurs des températures de ces 28 points en fin d'essai. On remarque un maximum d'écart de 0.2 degré Celsius, ce qui montre une bonne homogénéité de la sollicitation et valide l'hypothèse de l'unidirectionnalité des échanges.

#### III.4.2.1.2.3 Ecart type

La température retenue par le calcul est la moyenne des températures dans la zone d'observation ( $30 \times 37 \text{ cm}^2$ ). L'homogénéité de la zone a été étudiée en fonction du temps. L'écart

type calculé à chaque pas de temps entre les températures de chaque pixel (320x256) reste inférieur à 0.12 K.

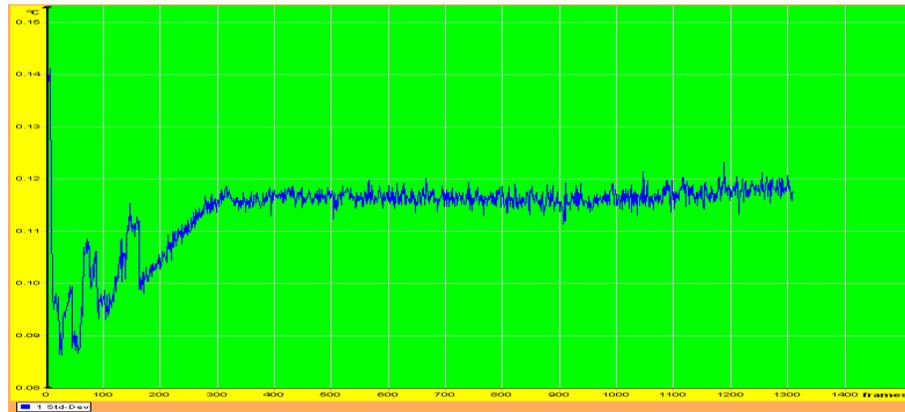


Figure III-25. L'écart type

Cette étude d'uniformité de la température dans la zone d'étude révèle que les écarts observés sont du même ordre de grandeur que la résolution de la caméra.

#### III.4.2.1.2.4 Températures normalisées

La température de surface face arrière suivie par la caméra est mesurée avec une incertitude liée essentiellement aux caractéristiques de la caméra, à la connaissance imprécise de l'émissivité de la surface et à l'interaction de l'environnement.

La figure III-26 présente la réponse en température sur la face arrière mesurée par la caméra infrarouge et le thermocouple placé en sortie de la paroi en carreau de plâtre lorsqu'elle est soumise à un créneau de flux d'une durée de 40 minutes. Dans cet essai, nous avons choisi un pas de temps de 20 Secondes.

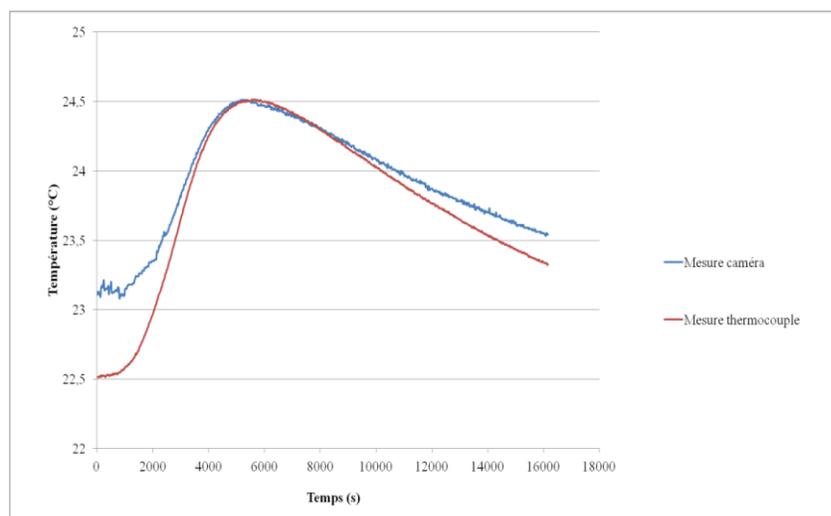


Figure III-26. Température mesurée par caméra et thermocouple d'une paroi monocouche

Sur le graphe III-26 on voit que les mesures par thermocouple et thermographie infrarouge donnent des évolutions qui ont la même dynamique mais elles sont relativement différentes. Le thermocouple donne une mesure ponctuelle de la température de surface et perturbe localement les échanges. La caméra est elle influencée par les conditions environnementales et le calcul de la température nécessite de faire certaines hypothèses. A noter, que la température donnée par caméra est ici la moyenne des températures de chaque pixel de la zone observée. On constate des écarts significatifs entre ces températures brutes qui nous ont amené à l'utilisation de températures normalisées.

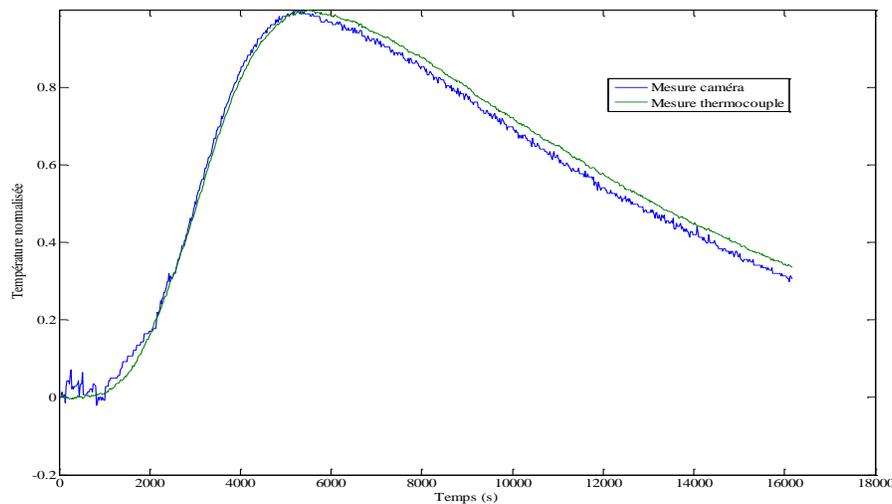


Figure III-27. *Température normalisée mesurée par caméra et thermocouple d'une paroi monocouche*

La figure III-27 montre que les températures normalisées calculées à partir des températures relevées par la caméra infrarouge et celles données par le thermocouple sont quasiment superposées. Ces résultats montrent que les températures normalisées obtenues par mesures thermographiques et utilisées dans le traitement ont la même dynamique que les températures mesurées par l'intermédiaire du thermocouple. Ces résultats confirment que la caméra infrarouge est un outil capable de mesurer sans contact la température de surface de parois. On se rend compte sur ce graphe que le passage aux températures normalisées permet d'éliminer l'essentiel des erreurs systématiques. C'est donc uniquement sous cette forme que nous exploiterons les températures mesurées par la caméra. Sur la durée d'un essai,  $\theta(t)$  varie entre 0 et 1 (lors de l'échauffement maximum) : cf figure III-27.

### III.4.2.1.2.5 Procédure expérimentale de déroulement de l'essai

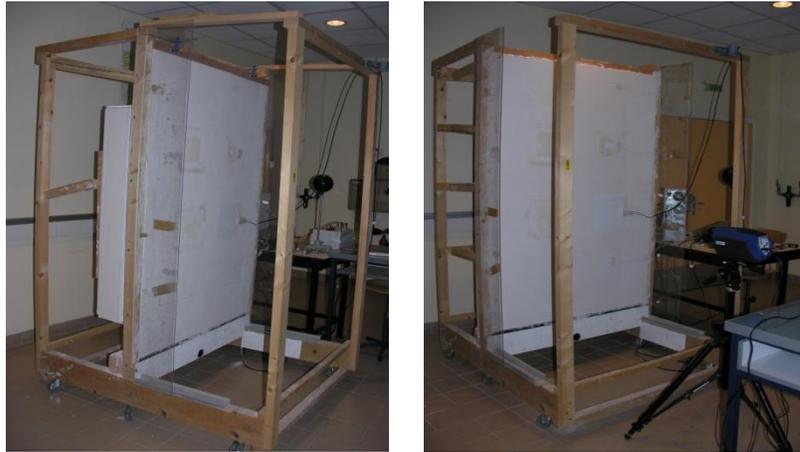


Figure III-28. Procédure expérimentale

Le dispositif expérimental Figure III-28 comporte une résistance chauffante plane, qui excitée pendant un temps de 40 minutes dissipe un flux uniforme sur la face avant de la paroi. Dès l'alimentation des résistances, la caméra infrarouge CEDIP Silver 420M enregistre la séquence de thermogrammes de la surface arrière de la paroi. La durée de chauffage dépend de l'épaisseur et du type du matériau à caractériser, elle est, par ailleurs, liée à la température de la "face avant" du mur que l'on garde inférieure à 80 °C pour éviter tout risque de détérioration de l'isolant ou de surchauffe au contact résistance-isolant. Des essais préliminaires nous ont permis de déterminer les propriétés thermophysiques ; ces valeurs trouvées ont servi de référence pour plusieurs simulations, à partir desquelles nous avons pu définir le temps de chauffage optimum.

Parallèlement, des thermocouples ont été disposés sur les deux faces de la paroi, afin de suivre la température d'entrée et de sortie de la paroi. Deux fluxmètres (15x15cm<sup>2</sup>) ont été collés à la paroi en carreaux de plâtre sur les deux faces afin de mesurer le flux entrant pour l'un et le flux sortant pour l'autre. Il est important de noter que les températures mesurées par les thermocouples ne sont pas utilisées dans la procédure de traitement des données. La température en sortie est comparée à la température (normalisée) enregistrée par la caméra et nous permet de déterminer, en association avec le fluxmètre, le coefficient d'échange global expérimental. Ce coefficient estimé de façon expérimentale peut ensuite être comparé à la valeur du coefficient d'échange calculé par méthode inverse.

Les conditions initiales du modèle numérique correspondent à un régime permanent de conduction. Chaque essai débute après un temps de repos suffisamment long pour garantir que le champ de température est invariant dans la paroi. Cette condition est facile à obtenir en laboratoire. Pour les essais in situ, il faut installer la résistance chauffante et la plaque d'isolant sur la face extérieure de la paroi plusieurs heures avant l'essai pour que celle-ci ne soit pas soumise aux conditions extérieures souvent très variables. Les conditions ambiantes intérieures

sont beaucoup plus stables et permettent de réaliser l'essai dans de bonnes conditions. La caméra infrarouge est mise sous tension environ deux heures avant l'essai pour limiter les risques d'une éventuelle dérive en température pendant la mesure. Les enregistrements des flux en face avant et arrière, de la température résultante de l'ambiance côté arrière et des thermogrammes sont lancés simultanément. Pour les essais dont les résultats sont présentés dans ce travail, les acquisitions sont effectuées toutes les 20 secondes.

#### III.4.2.1.2.6 Mesures expérimentales

La résistance chauffante est alimentée par un créneau de tension pendant 40 minutes. La figure III-29 représente la densité de flux entrant dans la paroi homogène en carreaux de plâtre mesurée par le fluxmètre.

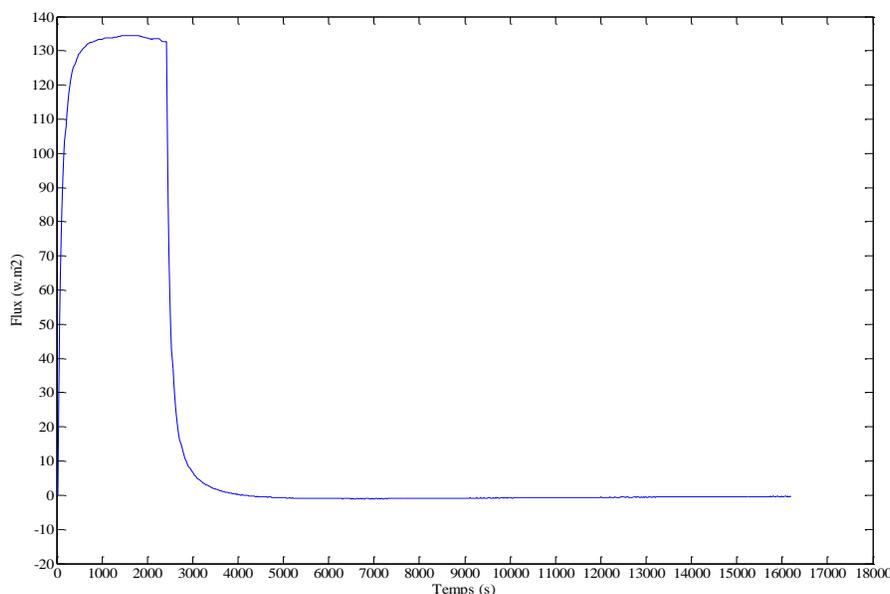


Figure III-29. Courbe de flux entrant sous forme d'un créneau

La Figure III-29 illustre le fait qu'il est important de mesurer la densité de flux parce que le créneau de tension injectée dans la résistance ne se traduit pas pratiquement par un créneau de flux. C'est cette courbe de flux présentant des phases transitoires qui sera injectée dans le modèle comme sollicitation. Il faut remarquer également qu'à la fin du créneau en tension, la valeur de la densité de flux revient rapidement à zéro du fait de la présence de l'épaisse couche d'isolant.

La figure III-30, montre l'évolution de température normalisée de la face arrière de la paroi en carreaux de plâtre mesurée au centre de l'image par la caméra infrarouge. Pour montrer les évolutions complètes des flux et des températures, les données ont été enregistrées pendant plus de 4h30 mais pour le traitement, seule la phase d'élévation de la température est exploitée. Rappelons que cette phase décrite au paragraphe II.4.2.1 est la zone la plus propice à

l'indentification des paramètres. Elle dure environ 1H30 pour la paroi testée dans le cas présent. Cette durée dépend de la sollicitation imposée et de la nature de la paroi.

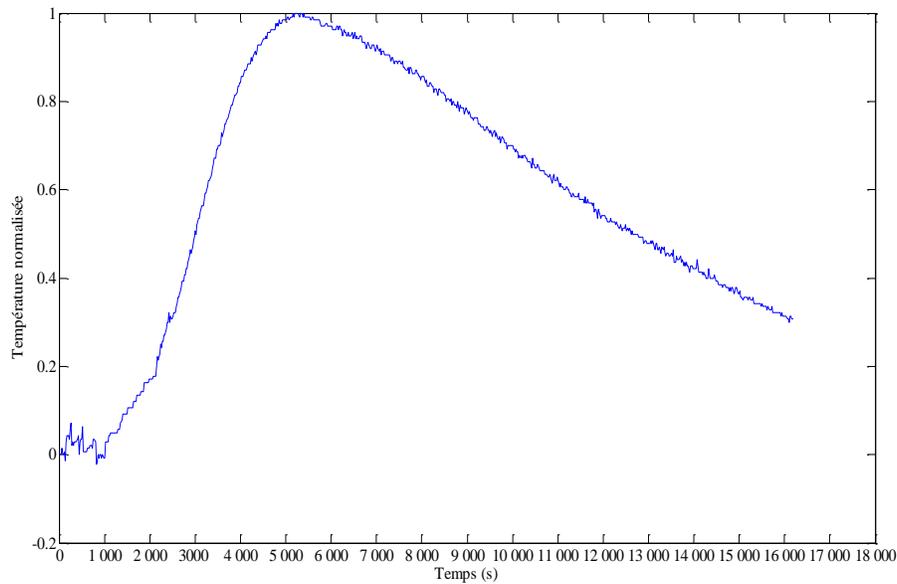


Figure III-30. Courbe d'évolution de la température normalisée (mesure infrarouge)

#### III.4.2.1.2.7 Les résultats du Mur en carreaux de plâtre

La Figure III-31 représente les températures normalisée expérimentale et simulée de la paroi en carreaux de plâtre issue des procédures d'inversion et d'optimisation.

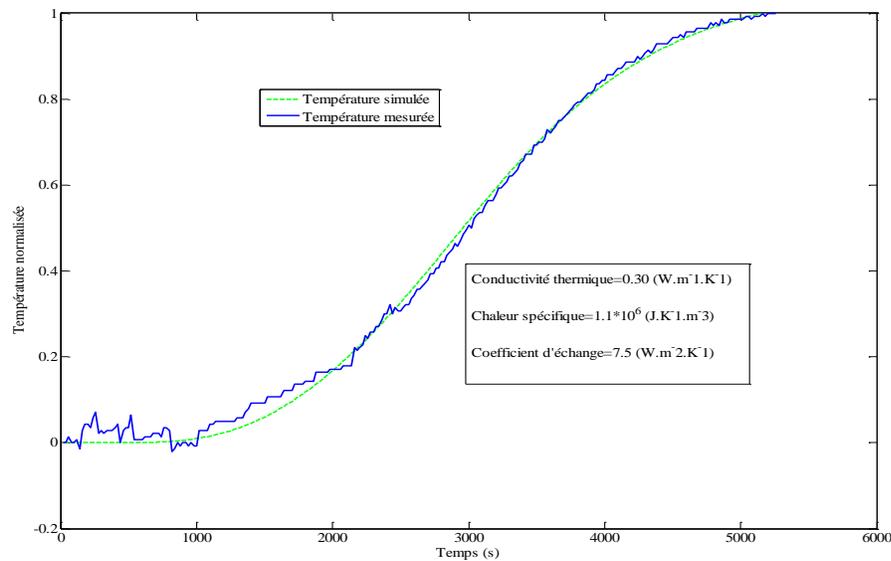


Figure III-31. Courbes normalisées mesurée et simulée de carreau de plâtre

Sur la figure III-31, la température normalisée mesurée et la température normalisée optimisée ont été représentées. La courbe de la température simulée a été obtenue à partir des valeurs optimisées obtenues et injectées dans le modèle. Les valeurs de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et du coefficient d'échange global ont été optimisées dans la phase de montée en température. Le schéma d'inversion est mis en œuvre pour déterminer les paramètres thermophysiques qui permettent d'ajuster la température normalisée de sortie simulée sur celle mesurée. Pour cet essai, la technique d'optimisation par méthode du simplexe a été essayée. C'est une méthode classique largement répandue, facile à comprendre et à programmer. La technique a donné des résultats satisfaisants dans ce cas de figure où peu de paramètres doivent être identifiés. Pour le cas du mur monocouche où je n'ai que trois paramètres à identifier (la conductivité, chaleur spécifique et coefficient d'échange), je pouvais me limiter à cette méthode qui a donné de bons résultats. La température normalisée optimisée a été obtenue pour les valeurs:  $\lambda = 0.30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $\rho c = 1.1 \cdot 10^6 \text{ J. K}^{-1}.\text{m}^{-3}$  et  $h = 7.5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . L'écart est inférieur à 4% pour la conductivité par rapport à la référence et de 8% pour la chaleur spécifique. La plus forte sensibilité de la température de sortie à la conductivité explique la meilleure précision sur ce paramètre. Les courbes de températures normalisées simulée et mesurée présentant une très bonne superposition. Les résultats obtenus confirment l'étude de sensibilité puisque les paramètres recherchés ont été évalués avec une bonne précision.

La qualité de l'ajustement peut être chiffrée par la valeur de la fonction d'erreur que nous avons choisi de normaliser par le nombre de points de mesure considérés pour pouvoir comparer différents essais. La fonction d'erreur quadratique moyenne est écrite ici:

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{\lambda, \rho c, h}(i) - \theta_{exp}(i))^2}{\text{nombre de points}} \quad (\text{III-11})$$

L'erreur quadratique moyenne égale à 0.03 pour cet essai. Dès que nous sommes passés à un nombre plus élevés de paramètres, nous avons dû nous tourner vers des techniques plus élaborées (Levenberg Marquardt, algorithme génétique).

#### **III.4.2.1.2.7.1 Influence du coefficient d'échange**

Pour apprécier la qualité de l'estimation du coefficient d'échange global, le coefficient  $h_g$  a été calculé à chaque acquisition à partir de la relation II-7 en utilisant les mesures de températures et de flux en face arrière de la paroi réalisé pendant l'essai.

Notre graphe (figure III-32) représente l'évolution du flux sortant de la paroi après une période de chauffage de 40 minutes, ainsi que la température ambiante et la température mesurée par la caméra infrarouge face arrière. On peut donc à chaque instant calculer un coefficient d'échange en faisant le rapport du flux sur la différence de température (figure III-33).

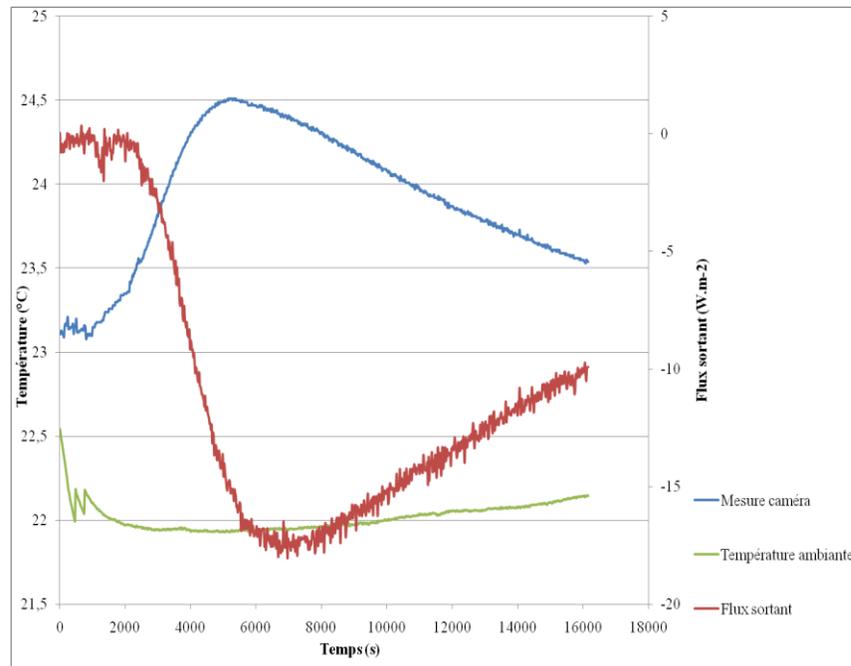


Figure III-32. Courbe d'un essai en regime transitoire

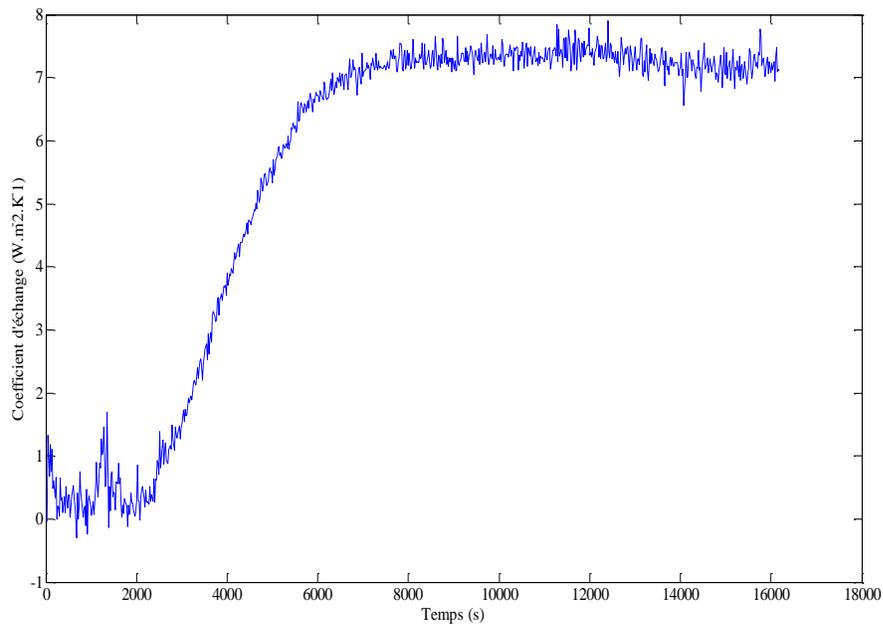


Figure III-33. La courbe de coefficient d'échange en fonction de temps

Sur la figure III-33, on distingue l'évolution du coefficient d'échange global  $h_g$  calculé durant l'essai. On remarque que le coefficient d'échange est pratiquement nul car le flux échangé entre la paroi et l'ambiance est nul; le flux injecté en face avant de la paroi n'a pas encore atteint la face arrière. Ensuite, lorsqu'il y parvient, la température de la face arrière de la paroi augmente,

le flux augmente, le coefficient d'échange qui est lié à l'écart de température augmente aussi jusqu'à atteindre une valeur stable. Après que la face arrière ait atteint sa température maximale, on remarque une décroissance du flux et de la température de surface. Pendant cette phase, le coefficient d'échange est constant. Il atteint une valeur voisine de  $7,3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .

Dans le modèle numérique, les échanges entre la paroi et l'ambiance sont définis selon la même relation (II-7) que celle utilisée pour le calcul de  $h_g$  expérimental mais avec une valeur constante tout au long de l'identification. Il est donc logique que la valeur de  $h_g$  identifiée dans le modèle soit proche de la valeur constante expérimentale de fin d'essai. La variation du flux dans le modèle durant l'essai ne dépend alors que de la différence de température entre la paroi et l'ambiance. Lorsque l'écart de température entre la paroi et l'ambiance est nul dans la première partie de l'essai, le flux est nul, quelle que soit la valeur du coefficient  $h_g$ .

Il faut également rappeler que la connaissance de la valeur de ce coefficient  $h_g$  n'est pas de première importance puisque lors de l'étude de sensibilité aux paramètres, il a été démontré que ce coefficient était très peu impactant sur les résultats durant la phase d'identification.

Dans le cas présent, la valeur moyenne expérimentale calculée pour des temps supérieurs à 6000s est égale à  $7.3 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ . Elle est en bon accord avec la valeur identifiée [ $7.5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ] pour cet essai. L'écart est inférieur à 3%. Il est intéressant de constater que la méthode permet d'estimer le coefficient d'échange.

Pour étudier la répétabilité de la procédure d'identification, six essais ont été menés sur la paroi en carreaux de plâtre dans des conditions quasiment identiques. Les valeurs du coefficient d'échange expérimental  $y$  sont également répertoriées. Les résultats sont consignés dans le tableau III-3.

| Essai      | Paramètres identifiés                       |  |  | Paramètre expérimental |
|------------|---|--|--|------------------------|
|            | $\lambda \text{ (W. m}^{-1}.\text{K}^{-1})$ | $\rho c \text{ (J. K}^{-1}.\text{m}^{-3})$ | Coefficient d'échange global $\text{(W.m}^{-2}.\text{K}^{-1})$ | $h$                    |
| N°1        | 0.30  | $1.1 \cdot 10^6$                           | 7.5  | 7.3                    |
| N°2        | 0.29  | $1.1 \cdot 10^6$                           | 7.4  | 7.8                    |
| N°3        | 0.28  | $1.15 \cdot 10^6$                          | 7  | 7.5                    |
| N°4        | 0.31  | $1.16 \cdot 10^6$                          | 7.1  | 7.7                    |
| N°5        | 0.31  | $1.2 \cdot 10^6$                           | 6.5  | 7.1                    |
| N°6        | 0.32  | $1.2 \cdot 10^6$                           | 6.8  | 7.3                    |
| Moyenne    | 0.30  | $1.15 \cdot 10^6$                          | 7.04   | 7.45                   |
| Ecart type | 0.012                                       | 0.04                                       | 0.34   | 0.24                   |

Tableau III-3. Tableau de synthèse des résultats des différents essais

Les essais ont été réalisés en laboratoire, les coefficients d'échanges varient d'un essai à l'autre du fait des conditions ambiantes différentes d'un essai à l'autre. On observe donc une dispersion plus importante de la valeur de  $h$ . Les valeurs du tableau III-3 montrent une bonne répétabilité de la procédure d'identification.

|   | Valeurs de références | Résultats de la procédure d'inversion | Erreur moyenne |
|---|-----------------------|---------------------------------------|----------------|
| <b>Epaisseur (cm)</b>                           | 6.5                   | valeur supposée connue                |                |
| $\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 0.31                  | 0.30                                  | 3%             |
| $\rho c$ (J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )  | 1.2*10 <sup>6</sup>   | 1.15*10 <sup>6</sup>                  | 4%             |
| $h_g$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )     | 7.4                   | 7.0                                   | 5.5%           |

Tableau III-4. Les résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion

Le tableau III-4 reprend les valeurs moyennes que nous avons obtenues lors de cette optimisation (méthode simplexe). La technique a donné des résultats proches des valeurs retenues comme référence avec des écarts de 3% pour la valeur moyenne de la conductivité et de 4% pour la valeur moyenne de la chaleur spécifique. Bien que les valeurs du coefficient d'échange global  $h$  dépendent fortement des conditions ambiantes des essais, l'écart entre la valeur moyenne optimisée et la valeur moyenne expérimentale reste faible (5.5%). Par contre, il faut rappeler que la chaleur volumique et la conductivité thermique de référence des carreaux de plâtre ont été déterminées par la méthode de banc fluxmétrique conformément à la norme ISO NF EN 12664 [2].

Comme cela a été cité dans la partie bibliographique, PARKER (cf. { I.6.1.1) avait développé une technique d'estimation de la diffusivité adaptée à la méthode flash. Bien que notre sollicitation en créneau de flux s'écarte de cette méthode, nous avons voulu vérifier si cette méthode simple était applicable à notre série d'essai.

#### III.4.2.1.2.7.2 Méthode d'estimation de Parker

La mesure de l'évolution de la température en face arrière  $x=e$  permet de déterminer la valeur de la diffusivité. Dans ce cas, en considérant le temps de demi-montée  $t_{1/2}$  de la courbe de température (méthode simple d'estimation de Parker). On estime la valeur de la diffusivité par la relation :

$$a = \frac{0.139 e^2}{t_{1/2}} \quad (\text{III-12})$$

Ou  $t_{1/2}$  : est l'abscisse du point d'ordonnée  $\frac{T_M}{2}$  avec  $T_M$  la température maximale

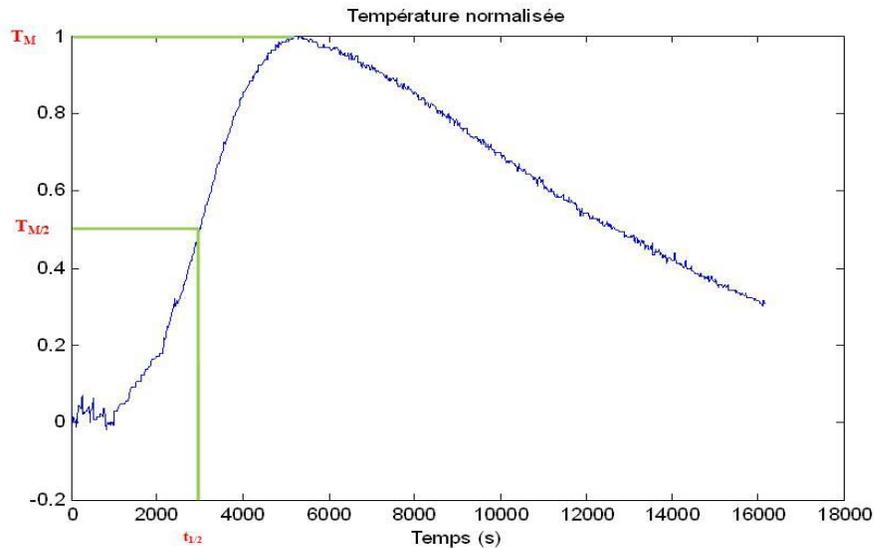


Figure III-34. Courbe expérimentale (Méthode flash)

Le Tableau III-5 présente les valeurs estimées de la diffusivité par la méthode de PARKER ainsi que les valeurs de la diffusivité calculées à partir des valeurs de référence pour les six essais réalisés.

| Essais | $t_{\frac{1}{2}}$ (s) | $a$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ ) $10^{-7}$ (Parker) | $a$ ( $\text{m}^2 \cdot \text{S}^{-1}$ ) $10^{-7}$ (référence) |
|--------|-----------------------|---|--|
| N°1    | 2980                  | 2   | 2.7  |
| N°2    | 2580                  | 2.27  | 2.6  |
| N°3    | 2740                  | 2.14  | 2.4  |
| N°4    | 2800                  | 2.09  | 2.6  |
| N°5    | 2720                  | 2.15  | 2.5  |
| N°6    | 2600                  | 2.25  | 2.7  |

Tableau III-5. Valeurs de la diffusivité de référence et issues de la méthode Parker

La valeur moyenne de diffusivité de référence est égale à  $2.5 \times 10^{-7}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), la valeur moyenne de diffusivité obtenue par la méthode de Parker est égale à  $2,15 \times 10^{-7}$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) (écart de 14%). On constate que l'approche de Parker permet de nous renseigner sur l'ordre de grandeur de la diffusivité sans traitement complexe. Cette estimation grossière peut aider à fixer les valeurs de départ lors de la procédure d'optimisation.

Les premiers résultats obtenus en laboratoire étant très encourageants, nous avons voulu très rapidement transposer la méthode sur une paroi réelle de bâtiment *in situ* conformément à l'objectif du travail.

### III.4.2.2 Mesures in situ

#### III.4.2.2.1 Paroi en béton armé

La paroi étudiée dans cette partie est un voile en béton armé de la Faculté des Sciences Appliquées de Béthune.

##### III.4.2.2.1.1 Instrumentation



Figure III-35. Procédure expérimentale d'une paroi en béton armé

Le dispositif expérimental illustré par les photographies de la Figure III-35, comporte une résistance chauffante ( $90 \times 110 \text{ cm}^2$ ) collées sur un isolant thermique de 18 cm d'épaisseur en polystyrène. Cet isolant est lui-même fixé sur une plaque de bois servant de support afin d'assurer le maintien et maximiser la part du flux dissipé vers la paroi en béton armé. La durée de chauffage est de 120 minutes. Dès la mise en chauffe de la résistance, la caméra infrarouge enregistre toutes les 20 secondes un thermogramme de la face arrière de la paroi. L'acquisition des données dure 22 heures.

Le fluxmètre de dimension  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  mesure le flux entrant dans la paroi à caractériser. La mesure de température d'entrée est contrôlée à l'aide de trois thermocouples placés entre la paroi et la résistance chauffante. Une sonde de température (boule noire) a été placée dans la salle, côté face arrière de la paroi, afin d'enregistrer la température ambiante. Cette température résultante mesurée est utilisée dans la simulation numérique. Toutes ces mesures sont enregistrées à chaque pas de temps de 20 secondes par une centrale d'acquisition IDL 100. Un micro-ordinateur a été prévu pour assurer le pilotage de la caméra infrarouge.

### III.4.2.2.1.2 Mesures expérimentales

La figure III-36 montre l'allure de la sollicitation en flux imposée sur la face avant de la paroi en béton armé et mesurée par le fluxmètre.

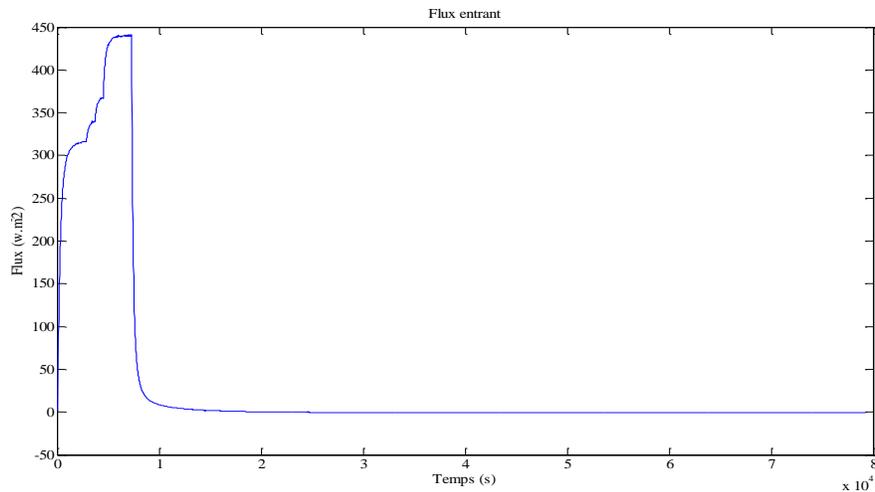


Figure III-36. Courbe de flux entrant

L'allure de la sollicitation ne correspond pas rigoureusement à un créneau parce que le suivi de la température de la surface d'entrée permet d'agir en temps réel sur la sollicitation. Dans le cas présent, comme l'amplitude de température était faible en face avant, la puissance injectée a été augmentée. Cela permet de garantir la meilleure dynamique possible pour les grandeurs thermiques et limiter l'impact des erreurs de mesures. D'autre part ceci est possible car le flux d'entrée utilisé dans la simulation est mesuré par le fluxmètre. Il s'agit d'un des atouts de la méthode qui peut être appliquée avec n'importe quel type de sollicitation.

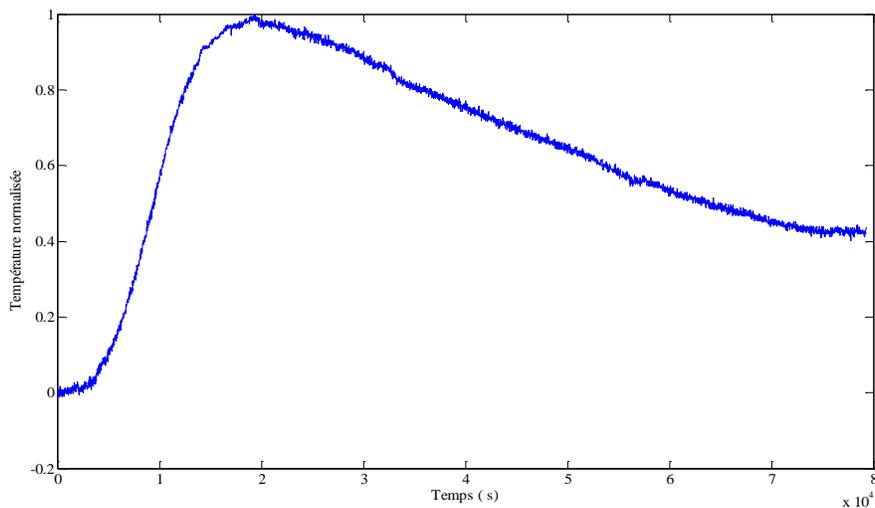


Figure III-37. Courbe de la température normalisée (mesure caméra)

La figure III-37 montre l'évolution de la température de la face arrière de la paroi en béton armé mesurée au centre de l'image par la caméra infrarouge. Nous allons maintenant passer à la phase de caractérisation de ces deux parois.

### III.4.2.2.1.3 Résultats de la paroi en béton armé

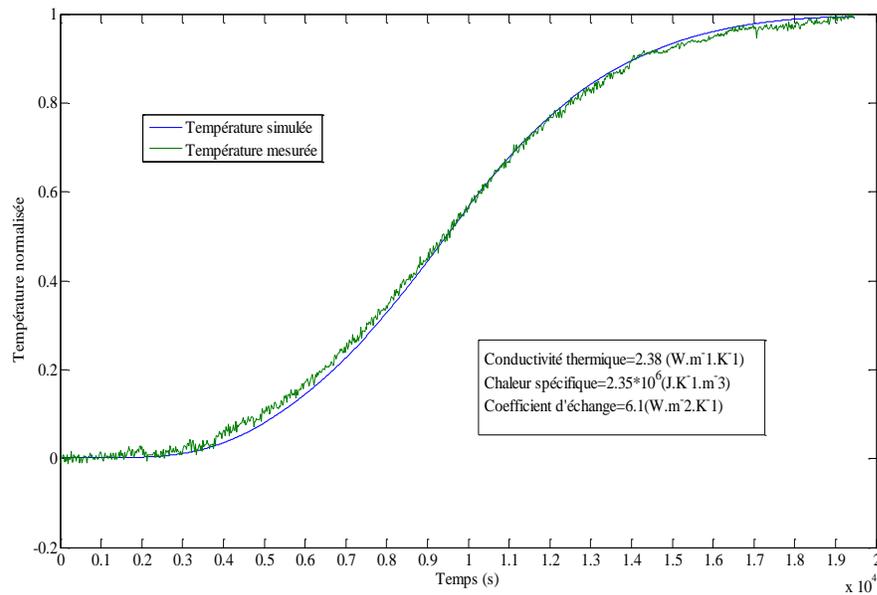


Figure III-38. Courbes mesurée et simulée d'un mur en béton armé

Les courbes de température optimisée et mesurée de notre paroi en béton armé présentant une très bonne superposition et montre que la méthode présente un potentiel intéressant. Ces résultats justifient la faible erreur quadratique moyenne de 0.024.

| Essais         | $\lambda$ (W. m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | $\rho c$ (J .K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> ) | $h$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) |
|----------------|--|---|---|
| N°1            | 2.38   | 2.35*10 <sup>6</sup>                            | 6.1                                       |
| N°2            | 2.5  | 2.25*10 <sup>6</sup>                            | 5.64                                      |
| <b>moyenne</b> | 2.44   | 2.3*10 <sup>6</sup>                             | 5.9                                       |

Tableau III-6. Tableau de synthèse des résultats de deux essais

|  | Résultats de références | littérature         | Résultats de la procédure d'inversion |
|--|-------------------------|---------------------|---------------------------------------|
| L'épaisseur (cm)                                 | 20.5                    | -                   | Valeur supposée connue                |
| $\lambda$ (W. m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | inconnue                | 2.5                 | 2.44                                  |
| $\rho c$ (J. K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )  | inconnue                | 2.4*10 <sup>6</sup> | 2.3*10 <sup>6</sup>                   |
| $h_g$ (W. m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )     | inconnue                | -                   | 5.9                                   |

Tableau III-7. Les résultats de la procédure d'inversion

Les tableaux III-6 et III-7 présentent les résultats obtenus pour deux essais *in situ* sur la paroi en béton armé de la Faculté des Sciences Appliquées. Les résultats obtenus pour le mur en béton armé sont proches aux valeurs existents dans la littérature.

### **III.4.2.3 Discussions**

La caractérisation des paramètres thermophysiques d'une paroi homogène peut être obtenue en imposant un flux sur une de ses faces et en analysant l'évolution de sa température sur l'autre face. Un modèle en différences finies peut être utilisé pour simuler la réponse en température. Par méthode inverse, la conductivité thermique, la chaleur spécifique de la paroi et le coefficient d'échange surfacique global entre la paroi et son environnement peuvent être identifiés. Cette méthode permet en quelques heures de caractériser les propriétés thermophysiques de la paroi de façon non destructive à partir d'un dispositif léger, facile à mettre en œuvre et conçu de façon à être transportable et à envisager des essais *in situ*.

Sur une première série de 6 essais réalisés sur une paroi monocouche en carreaux de plâtre, les estimations de la conductivité et de la chaleur spécifique ont été obtenues avec une bonne reproductibilité et avec des écarts de 3 à 4 % par rapport aux valeurs de référence. L'essai réalisé sur le voile en béton a lui aussi été encourageant, nous allons maintenant nous intéresser à des parois multicouches.

### **III.4.3 Parois multicouches**

Les enveloppes de bâtiments sont de manière générale constituées de plusieurs matériaux. Elles comprennent une partie principale exerçant une fonction structurelle ou de remplissage associée à des enduits de surface et fréquemment à un isolant thermique.

Cette partie sera donc consacrée à l'étude de parois tri-couches. La première paroi tri-couche étudiée est constituée d'une plaque de plâtre, d'un isolant et d'une couche en carreaux de plâtre. La seconde paroi est quant à elle formée d'une plaque de plâtre, d'un béton cellulaire et d'une couche en carreaux de plâtre.

#### **III.4.3.1 Caractérisation en laboratoire de parois tri-couches**

##### **III.4.3.1.1 Paroi : plaque de plâtre-isolant-carreau de plâtre**

###### **III.4.3.1.1.1 Dispositif expérimental**

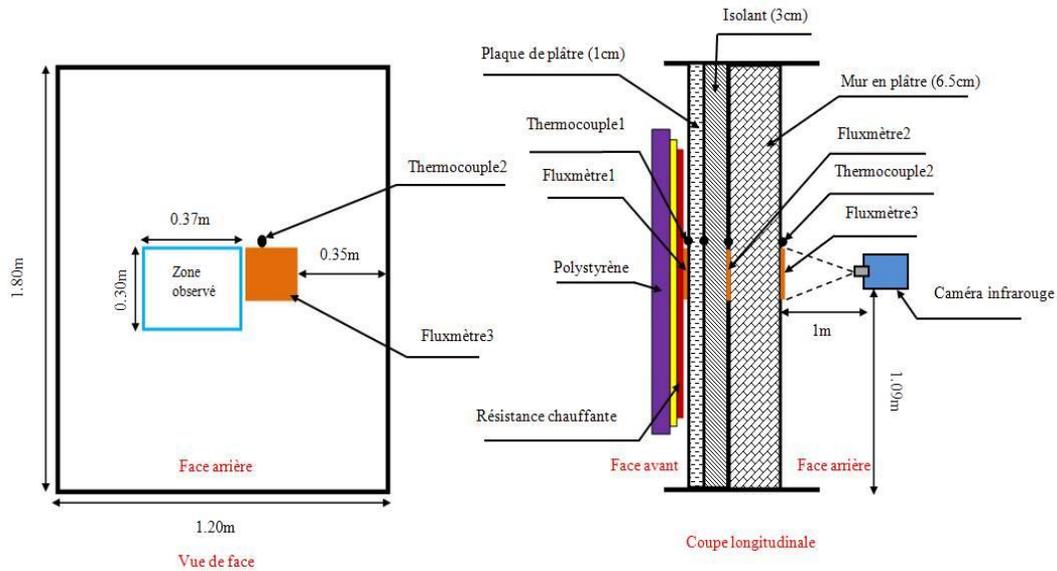


Figure III-39. Dispositif expérimental d'une paroi tri-couche

Le mur en plaque de plâtre (1cm), polystyrène (3cm) et en carreaux de plâtre (6.5cm), que nous souhaitons caractériser, a une épaisseur totale de 10.5 cm pour une surface de  $180 \times 120 \text{ cm}^2$ . Comme pour les expérimentations précédentes, le complexe isolant-résistance chauffante de 90 cm de haut et de 110 cm de large a été positionné en face avant de la paroi. Pour mesurer simultanément la densité de flux et la température, trois fluxmètres ( $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) et six thermocouples de type T ont été disposés de part et d'autre de la paroi.

#### III.4.3.1.1.2 Vérification de l'uniformité de flux de chaleur

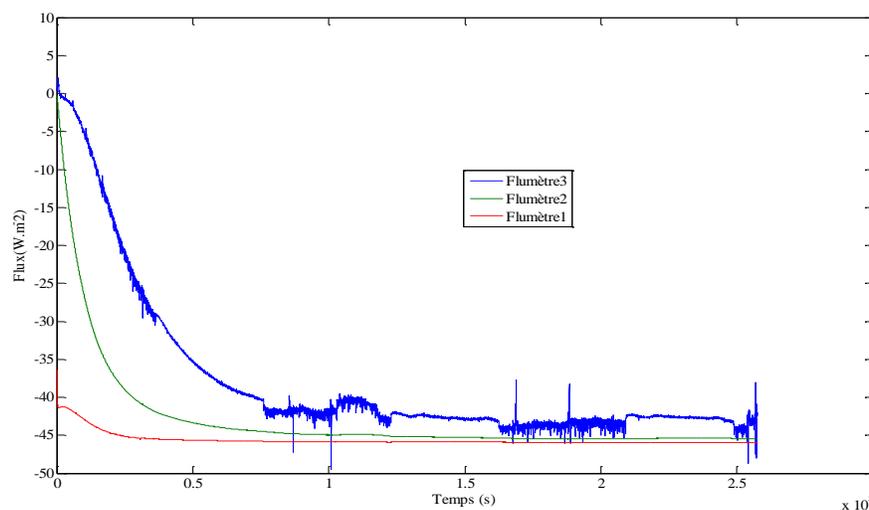


Figure III-40. Courbe de flux entrant et sortant en régime permanent d'une paroi tri-couche

En premier lieu, un essai de chauffage long (régime quasi-permanent) a été effectué afin de vérifier l'homogénéité de la dissipation de chaleur par la résistance (90x110 cm<sup>2</sup>). La figure III-40 représente l'évolution du flux entrant dans la paroi (fluxmètre1), entre la couche d'isolant et le plâtre (fluxmètre2) et sortant (fluxmètre3). Si on excepte les variations du flux sortant dues aux perturbations des conditions d'échanges avec l'environnement, on remarque qu'il y a une perte de 4.5% par rapport au flux entrant. La stabilité des flux en fin d'essai, surtout les flux 1 & 2, montre que le régime est alors quasi-permanent.

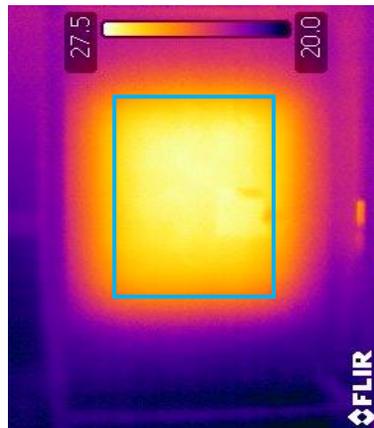


Figure III-41. Température de la paroi après 70h de chauffage

La figure III-41 représentant la température de la paroi observée après une période de chauffage de plusieurs heures (70 heures) et enregistrée par la caméra infrarouge, montre une bonne homogénéité de la scène thermique (90x110cm<sup>2</sup>), cette zone est matérialisée sur le dessin par un cadre bleu.

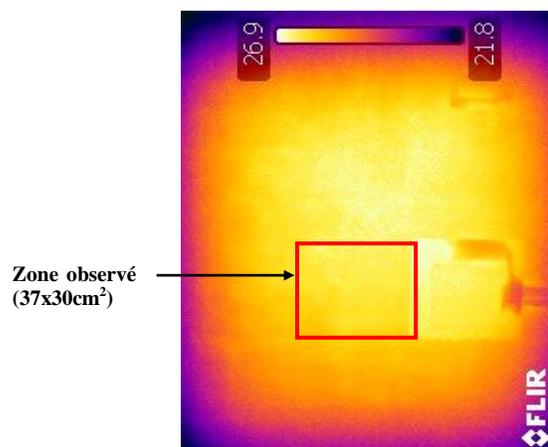


Figure III-42. La zone d'observation

La figure III-42 illustre la zone centrale correspondant à un rectangle de 37 cm de large sur 30 cm de haut et indique la très bonne homogénéité de la sollicitation.

### III.4.3.1.1.3 Courbes normalisées

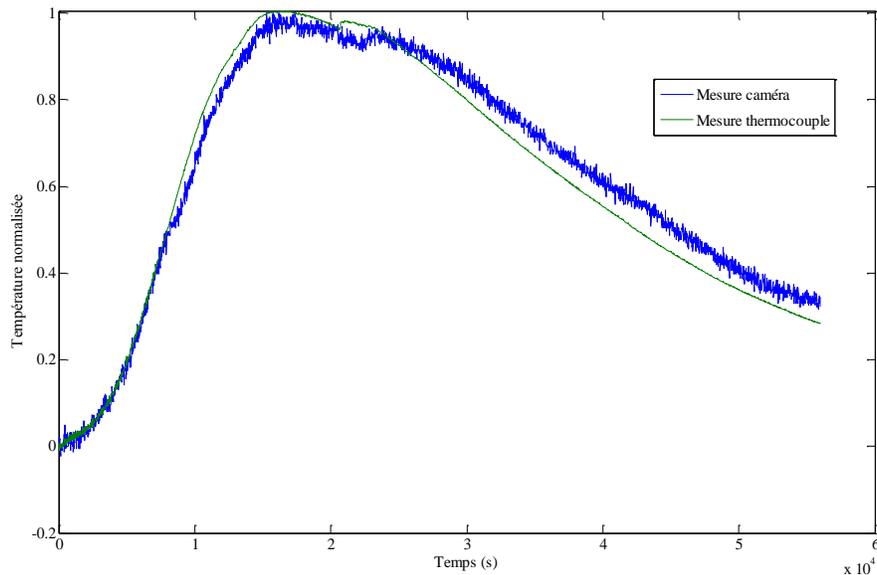


Figure III-43. *Courbes de température normalisée caméra et thermocouple d'une paroi tri-couche*

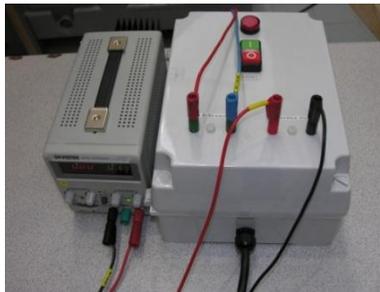
La figure III-43 montre l'évolution de la température normalisée de la face arrière mesurée par la caméra infrarouge et celle du thermocouple. Ce résultat montre que ces deux températures ont la même dynamique. Une étude d'uniformité de la température dans la zone de traitement des données a montré que les écarts observés étaient du même ordre de grandeur que la résolution de la caméra. Rappelons que la température retenue dans le calcul est obtenue en faisant la moyenne des températures de chaque pixel de cette zone observée.

### III.4.3.1.1.4 Procédure expérimental



Figure III-44. *Procédure expérimentale d'une paroi tri-couche*

La procédure expérimentale concernant la paroi tri-couches (cf. Figure III-44) consiste à dissiper pendant 2 heures et 10 minutes un flux uniforme sous forme d'un créneau. Dès l'allumage des sources, la caméra infrarouge CEDIP enregistre la séquence de thermo grammes (une image toutes les 20s) de la surface arrière de la paroi. Pour assurer la tension injectée, une boîte et un régulateur de tension ont été mis en place afin de contrôler le flux entrant (figure III-45). Lors de l'essai, la caméra est placée en face de la zone sollicitée à une distance de 1 m et à une hauteur de 1.09 m. Un micro-ordinateur a été prévu pour assurer le pilotage de la caméra infrarouge.



*Figure III-45. Photographie du système d'alimentation*

Des thermocouples ont été disposés sur les faces de chaque couche de la paroi testée, afin de suivre la température d'entrée, d'interfaces et de sortie. Ces trois températures ne sont pas utilisées dans la procédure de traitement des données. Trois fluxmètres ( $15 \times 15 \text{ cm}^2$ ) ont été mis en place afin de mesurer le flux entrant, le flux échangé entre la couche d'isolant et celle du plâtre ainsi que le flux sortant.

De la même façon que les essais précédents, une boule noire a été placée dans le laboratoire afin d'enregistrer la température ambiante. Pour éviter les problèmes de correction de soudure froide dans le multimètre, les températures sont mesurées en différentiel par rapport à une masse thermique dont la température est suivie à l'aide d'une sonde platine de précision. Les capteurs sont connectés à un multimètre scrutateur numérique de précision (type KEITHLEY 2700) piloté par un ordinateur qui assure le stockage des données.

#### **III.4.3.1.5 Mesures expérimentales**

La courbe III-46 montre le flux mesuré par le fluxmètre1 sur la face avant de la paroi tri-couches issu de la sollicitation en créneau de puissance imposé par la résistance.

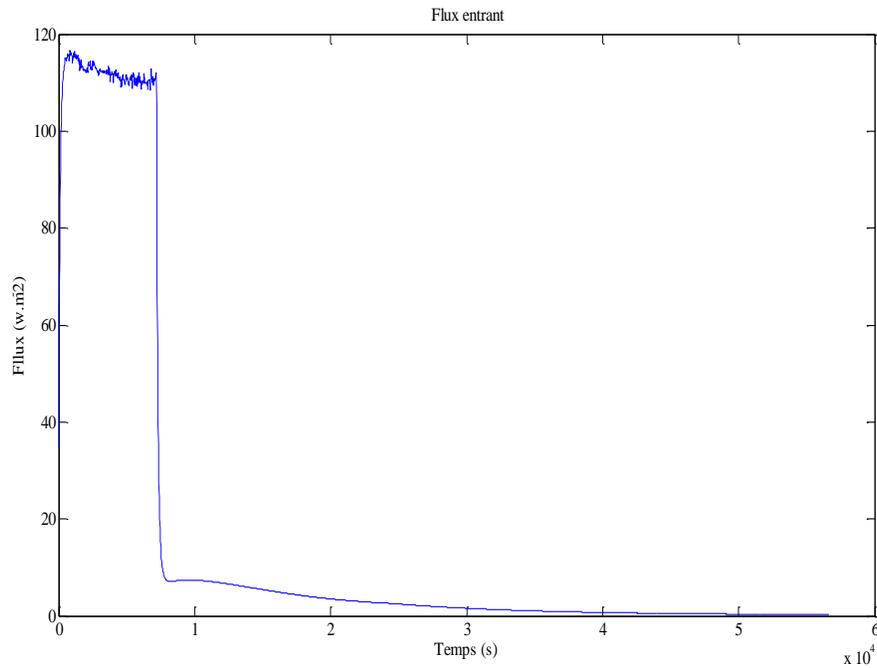


Figure III-46. Courbe d'un créneau de flux

La courbe III-47 montre l'évolution de température normalisée de la face arrière de la paroi tri-couche mesurée au centre de l'image par la caméra infrarouge.

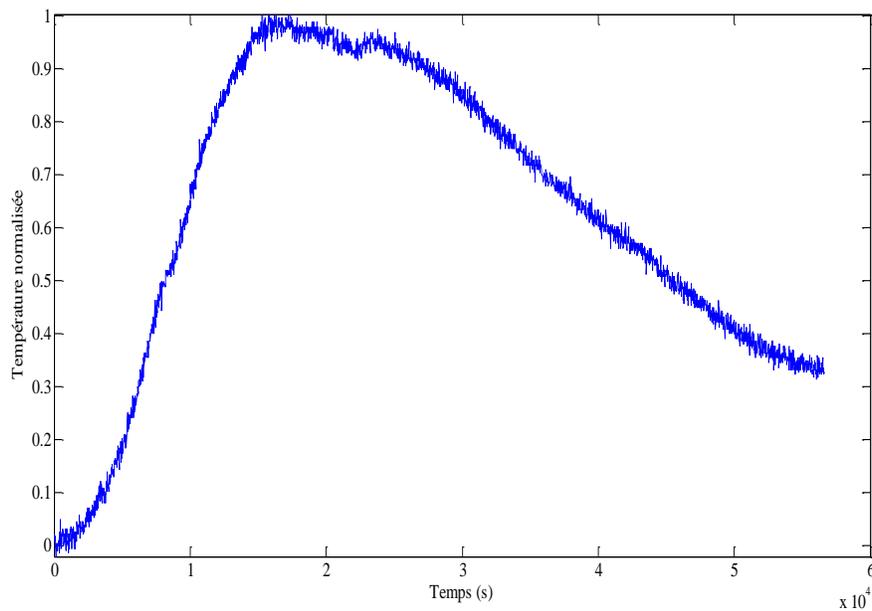


Figure III-47. Courbe d'évolution de la température normalisée d'une paroi tri-couche (mesure infrarouge)

### III.4.3.1.1.6 Résultats de la paroi tri-couche : plaque de plâtre-isolant-plâtre

Pour caractériser cette paroi, sept paramètres sont à identifier : conductivité thermique et chaleur volumique pour chaque matériau et le coefficient d'échange global entre la paroi et l'ambiance. Cela suppose que l'on connaisse les épaisseurs de chaque couche de matériau. Cette hypothèse est réaliste dans la pratique car il est souvent possible de connaître la géométrie de la paroi par sondage ou inspection locale. Le nombre de paramètres reste important et la méthode du simplex n'a pas permis d'aboutir à un résultat satisfaisant. De ce fait, dans un premier temps, l'algorithme génétique (méthode stochastique) est utilisé pour cibler les zones de l'espace des paramètres à investiguer (sélectionner les points de dépôts intéressants). Dans un second temps, celles-ci fournissent les paramètres initiaux testés avec la méthode de Levenberg Marquardt.

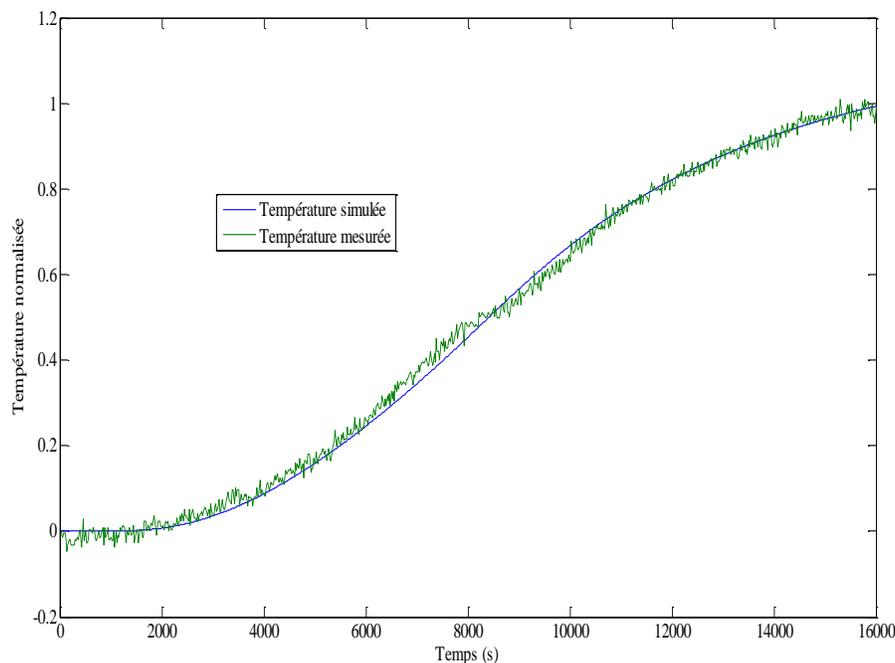


Figure III-48. Courbe simulée et mesurée sur toute la montée

La figure III-48 montre la bonne superposition des courbes de températures normalisées simulées et mesurées pour cette paroi tri-couche avec une erreur quadratique moyenne de 0.06. Le Tableau III-8 présente les résultats de la procédure d'inversion et d'optimisation permettant l'identification des propriétés thermophysiques de la paroi et du coefficient d'échange. Les résultats de cette procédure sont comparés aux résultats obtenus en laboratoire par l'intermédiaire du banc de conduction en ce qui concerne les propriétés thermophysiques des matériaux. En ce qui concerne le coefficient d'échange global  $h_g$ , la valeur de référence a été obtenue suivant la méthode décrite dans le paragraphe III.4.2.2.1.

|   | Les paramètres thermo-physiques                   | Résultats de références | Résultats de la procédure d'inversion | Ecart (%) |
|---|---|-------------------------|---------------------------------------|-----------|
| Plaque de plâtre                            | $\lambda_1$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 0.15                    | 0.16                                  | 6%        |
|   | $\rho c_1$ (J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )  | 6.6*10 <sup>5</sup>     | 6.8*10 <sup>5</sup>                   | 3%        |
| polystyrène                                 | $\lambda_2$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 0.037                   | 0.042                                 | 8%        |
|   | $\rho c_2$ (J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )  | 1.76*10 <sup>4</sup>    | 1.84*10 <sup>4</sup>                  | 3%        |
| Plâtre                                      | $\lambda_3$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 0.31                    | 0.34                                  | 9%        |
|   | $\rho c_3$ (J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )  | 1.2*10 <sup>6</sup>     | 1.23*10 <sup>6</sup>                  | 2%        |
| $h_g$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) | $h_g$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )       | 7.5                     | 7                                     | 6%        |

Tableau III-8. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion

Les écarts indiqués dans le tableau entre les valeurs de référence et celles identifiées montrent que la méthode d'inversion, d'optimisation et nos hypothèses de travail sont valides et efficaces.

Après avoir étudié cette première paroi tri-couches, une seconde paroi a été réalisée. Dans cette nouvelle paroi, l'isolant thermique a été remplacé par du béton cellulaire afin d'obtenir une paroi de résistance thermique différente de la précédente et avec des matériaux de propriétés thermophysiques moins contrastées.

### III.4.3.1.2 Paroi en plaque de plâtre-béton cellulaire-carreau de plâtre

#### III.4.3.1.2.1 Dispositif

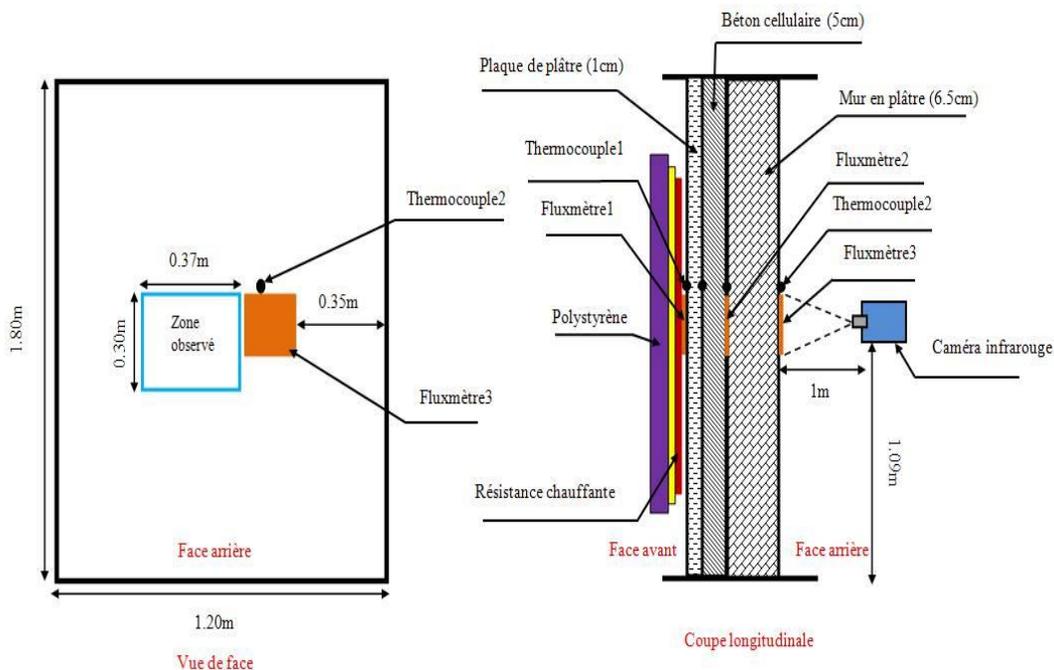


Figure III-49. Dispositif expérimental d'une paroi tri-couche

Cette deuxième paroi tri-couches est constituée d'une plaque de plâtre (1cm), d'éléments en béton cellulaire (5cm) et de carreaux de plâtre (6.5cm). L'épaisseur totale de la paroi à caractériser a une épaisseur totale de 12.5 cm pour une surface de 180x120cm<sup>2</sup>. Le dispositif et les capteurs de mesure sont identiques à l'essai précédent.

De façon à éviter les effets de bord, seule la partie centrale de l'image correspondant à une zone d'observation de 30cm x 37cm est retenue pour le traitement des données. Une étude d'uniformité de la température dans cette zone a montré que les écarts observés étaient du même ordre de grandeur que la résolution de la caméra. La comparaison de la température normalisée de la face dite arrière de la paroi tri-couches mesurée par la caméra infrarouge avec la température enregistrée par le thermocouple montre une dynamique semblable et une bonne superposition. Les paramètres thermophysiques seront une nouvelle fois optimisés en s'intéressant à la phase de montée de la température de la face arrière.

#### III.4.3.1.2.2 Procédure expérimentale



*Figure III-50. Procédure expérimentale*

La procédure expérimentale de la paroi tri-couches représentée consiste à chauffer la paroi pendant 1H30 minutes. L'enregistrement des thermogrammes, mesures de flux (figure III-45) et températures s'effectue une nouvelle fois toutes les 20 secondes. La durée d'acquisition s'est poursuivie pendant 22 heures et 40 minutes.

#### III.4.3.1.2.3 Mesures expérimentales

La figure III-51 montre le signal de flux de la face avant de la paroi en plaque de plâtre, béton cellulaire et une couche de carreaux de plâtre mesuré au centre de la zone d'observation par le fluxmètre1.

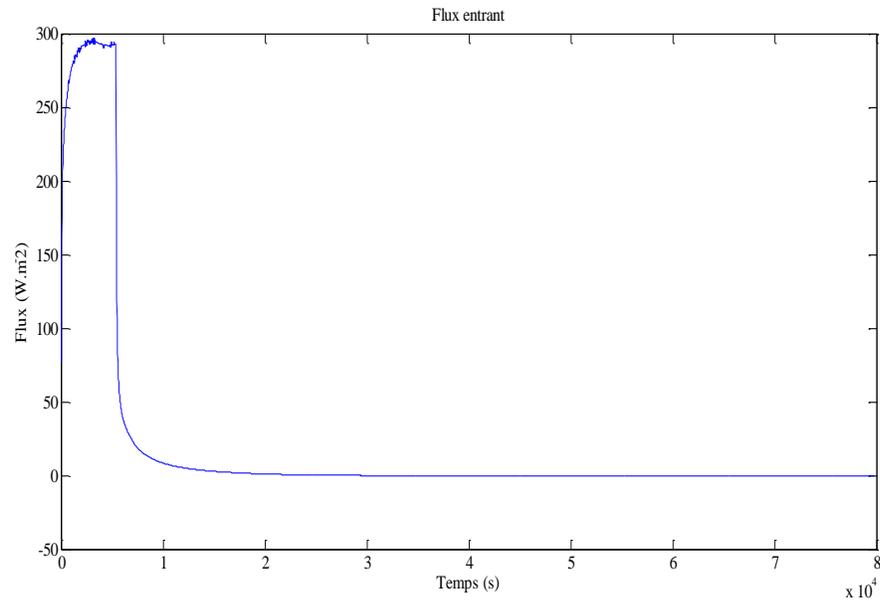


Figure III-51. Flux sous forme d'un créneau

Suite à ce flux injecté par la résistance chauffante, la caméra infrarouge CEDIP mesure l'évolution de température de la face arrière de la paroi tri-couche mesurée au centre de l'image (cf figure III-52).

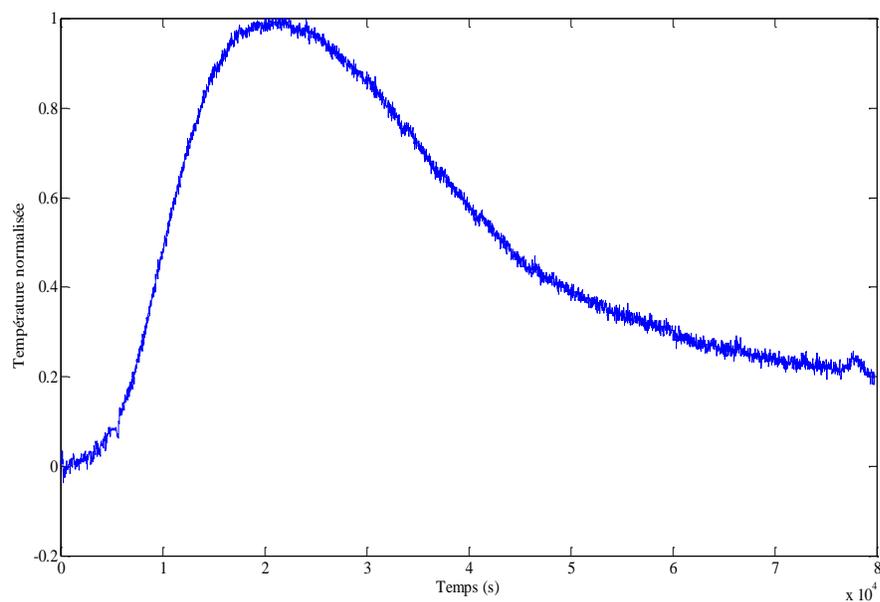


Figure III-52. Courbe de température normalisée

### III.4.3.1.2.4 Résultats de la paroi : plaque de plâtre-béton cellulaire-plâtre

Le nombre de paramètres à identifier est identique au cas précédent tout comme la méthode d'identification.

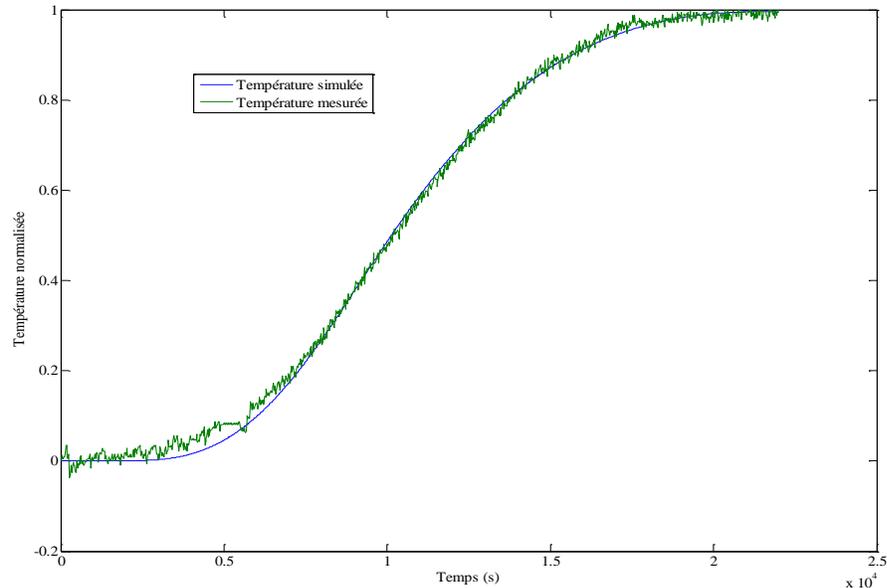


Figure III-53. Courbe de température normalisée mesurée et simulée

Encore une fois, l'évolution des courbes de températures normalisées expérimentale et simulée sont très proches. Ceci se vérifie par la faible erreur quadratique moyenne de 0.04. Les valeurs des propriétés thermophysiques identifiées sont présentées dans le tableau suivant :

|  | Les paramètres thermo-physiques                      | Résultats de références | Résultats de la procédure d'inversion | Erreur    |
|--|--|-------------------------|---------------------------------------|-----------|
| <b>Plaque de plâtre</b>                                | $\lambda_1$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )    | 0.15                    | 0.15                                  | <b>0%</b> |
|  | $\rho c_1$ (J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )     | 6.6*10 <sup>5</sup>     | 6.85*10 <sup>5</sup>                  | <b>4%</b> |
| <b>Béton cellulaire</b>                                | $\lambda_2$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )    | 0.24                    | 0.23                                  | <b>4%</b> |
|  | $\rho c_2$ (J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )     | 2.9*10 <sup>5</sup>     | 2.95*10 <sup>5</sup>                  | <b>1%</b> |
| <b>Plâtre</b>  | $\lambda_3$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )    | 0.31                    | 0.31                                  | <b>0%</b> |
|  | $\rho c_3$ (J.K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> )     | 1.2*10 <sup>6</sup>     | 1.28*10 <sup>6</sup>                  | <b>6%</b> |
| <b>h<sub>g</sub> (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>)</b> | h <sub>g</sub> (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 7.5                     | 7.41                                  | <b>1%</b> |

Tableau III-9. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion

Dans le tableau III-9, on remarque que les propriétés thermophysiques obtenues par la méthode inverse sont très proches de celles de référence.

Pour les deux parois caractérisées en laboratoire, les résultats obtenus se montrent très satisfaisants. L'étape suivante consiste donc à essayer de caractériser des parois multicouches *in situ*.

### **III.4.3.2 Caractérisation in situ de paroi multicouche**

Dans le cadre du projet européen Intereg IFORE (Innovation for Renewal), le laboratoire collabore avec des chercheurs de l'université de BRIGHTON et avec les équipes R&D de deux bailleurs sociaux : PAS-DE-CALAIS HABITAT (français) et AMICUS HORIZON (anglais). Le projet vise à réhabiliter 100 logements individuels de chaque côté de la Manche. La première phase consiste à réfléchir à la faisabilité du projet dans une démarche et de mise en œuvre de solutions techniques innovantes. En amont, de cette première étape, un diagnostic thermique de l'existant a été réalisé (mesures par thermographie, perméabilité à l'air des logements, mesures de température et humidité des ambiances, etc). La caractérisation thermique des enveloppes de bâtiments existants est nécessaire pour faire un état des lieux des performances énergétiques des bâtiments en place afin d'évaluer l'efficacité (ou les gains) des solutions futures envisagées. Cela passe par des simulations numériques dans lesquelles il est indispensable d'entrer les caractéristiques des matériaux constituant les parois. L'importance de la connaissance de ces caractéristiques montre l'intérêt de notre démarche.

#### **III.4.3.2.1 Logement rue Georges BRAQUES**

La première paroi étudiée in-situ constituait l'enveloppe d'une maison individuelle située dans le Pas de Calais à Outreau. D'après les plans de la maison, toutes les parois de l'enveloppe étaient constituées de quatre couches. Sur place, il a été constaté que la maison était constituée de deux types de paroi : la première, constituée d'une plaque de plâtre, d'un polystyrène, d'une mousse phénolique armée et d'un revêtement en crépi (mortier); la seconde constituée d'un revêtement en crépi, d'un voile de 15 cm en béton, d'un isolant de 4cm de mousse phénolique associée à une plaque de plâtre de 1 cm. C'est ce second type de paroi qui a été choisi pour la caractérisation du fait de sa facilité d'accès et le dérangement moindre des locataires. La paroi sera considérée comme une tri-couche : béton, isolant et plaque de plâtre.

##### **III.4.3.2.1.1 Mise en place de l'instrumentation**

Les températures ambiante du logement, de la face extérieure de la paroi ainsi que le flux injecté dans la paroi sont enregistrés par une centrale d'acquisition autonome de type IDL-100 : toutes ces mesures sont enregistrées au pas de temps de 20 secondes et stockées sur une carte mémoire. Un micro-ordinateur pilote la caméra infrarouge et stocke les thermogrammes. Le dispositif expérimental mis en place in-situ et identique à celui utilisé en laboratoire.



Figure III-54. *Le support et son positionnement*

Pour cette paroi, la résistance électrique a été alimentée pendant 125 minutes.

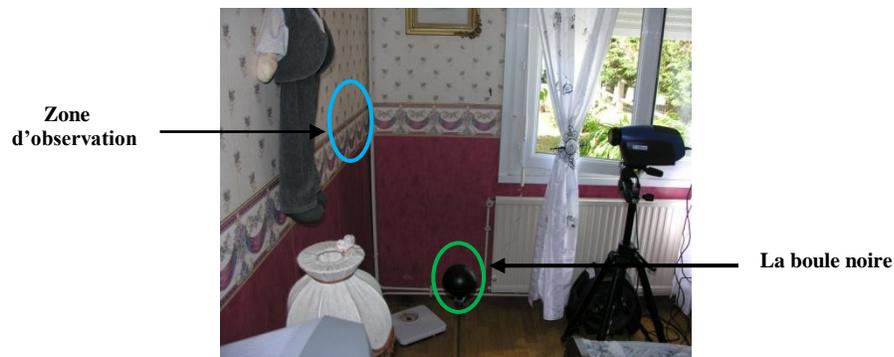


Figure III-55. *La face extérieure et le positionnement de la caméra*

La caméra est placée en face de la zone sollicitée à une distance de 1 mètre. Les thermogrammes sont enregistrés à chaque 20 secondes pendant 6 heures et 40 minutes. Une boule noire relève la température de l'ambiance.



Figure III-56. *Le système d'acquisition à l'extérieur de logement*

La figure III-56 montre le système d'alimentation, la centrale d'acquisition autonome installée à l'extérieur du bâtiment.

### III.4.3.2.1.2 Mesures expérimentales

La figure III-57 montre le flux imposé sur la face extérieure du bâtiment et mesuré par le fluxmètre.

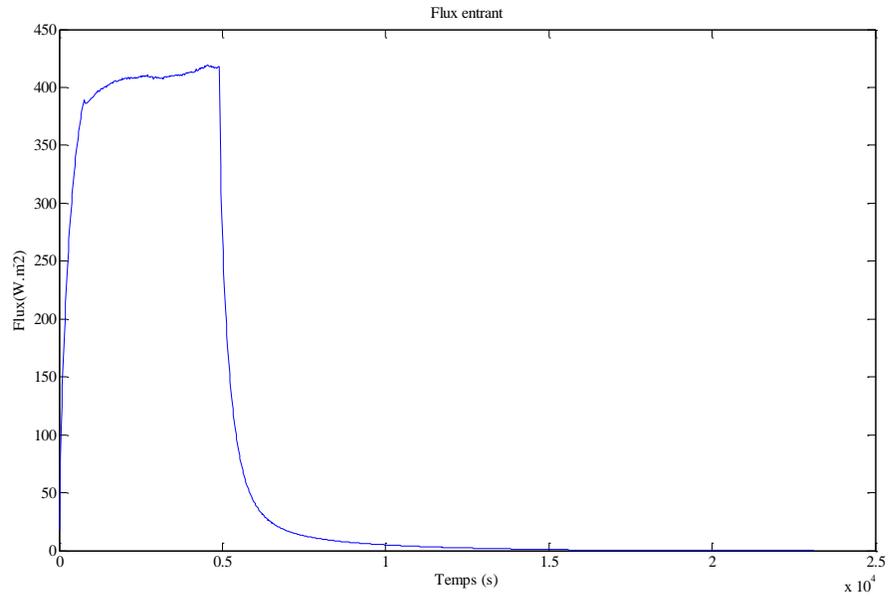


Figure III-57. Le flux entrant sous forme d'un créneau

La figure III-58 montre l'évolution de température de la face arrière de la paroi du bâtiment mesurée au centre de l'image par la caméra infrarouge.

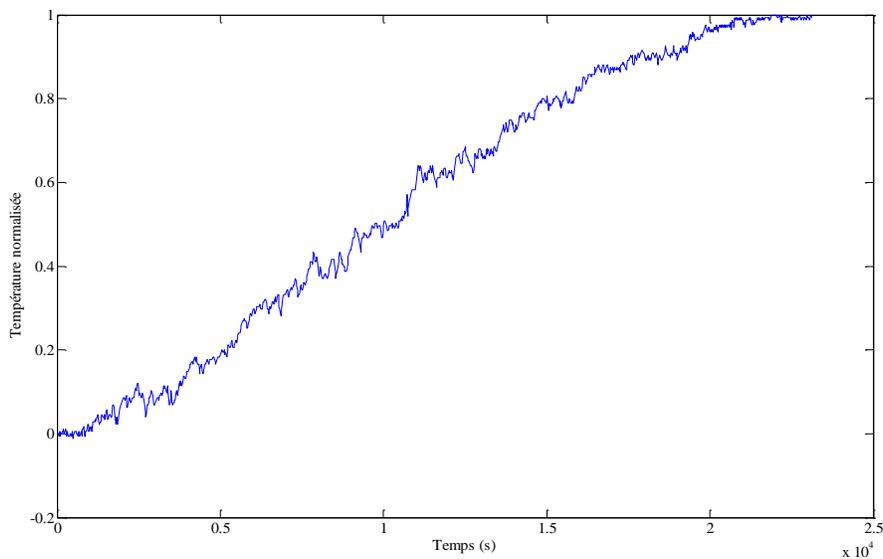


Figure III-58. La température normalisée ( mesure caméra)

### III.4.3.2.1.3 Résultats paroi rue Georges BRAQUES

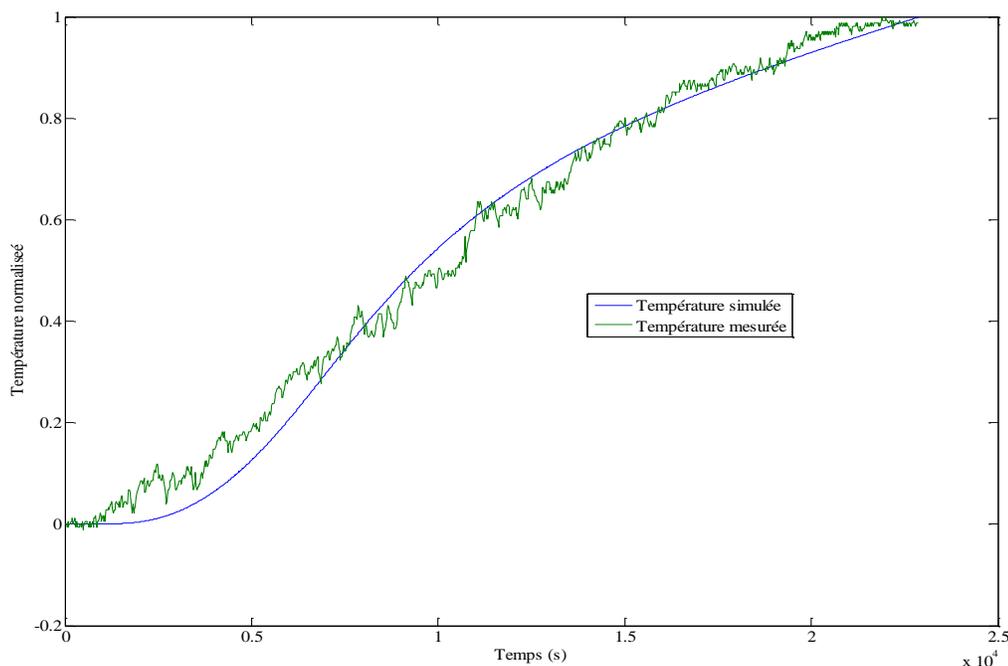


Figure III-59. Courbe de température normalisée mesurée et simulée

Les résultats de l'essai concernant la paroi rue Georges BRAQUES sont représentés par la figure III-59 et le Tableau III-10. La figure III-59 fait apparaître une certaine différence entre les courbes des températures normalisées simulée et mesurée. La dynamique du comportement thermique de la paroi est assez mal représentée par la courbe simulée. La valeur de l'erreur quadratique moyenne est beaucoup plus grande, elle vaut ici 0.46. Le tableau III-10 révèle des écarts notables entre les paramètres identifiés ici et les valeurs obtenues lors des études antérieures. On peut ainsi citer les valeurs de la conductivité, le produit  $\rho c$  pour le béton ou les propriétés thermophysiques de la plaque de plâtre.

|                   | Résultats de la procédure d'inversion            |   |   | Littérature |                     |
|-------------------|--|---|---|-------------|---------------------|
|                   | $\lambda$ (W. m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) | $\rho c$ (J. K <sup>-1</sup> .m <sup>-3</sup> ) | $h_g$ (W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ) | $\lambda$   | $\rho c$            |
| Béton armé        | 1.6  | 1.9*10 <sup>6</sup>                             | 8.2   | 2.5         | 2.4*10 <sup>6</sup> |
| Mousse phénolique | 0.09   | 2.5*10 <sup>4</sup>                             |   | 0.022       | 4.2*10 <sup>4</sup> |
| Plaque de plâtre  | 0.45   | 9*10 <sup>5</sup>                               |   | 0.15        | 6.6*10 <sup>5</sup> |

Tableau III-10. Résultats de la procédure d'inversion

Nous savons par expérience que les propriétés thermophysiques des matériaux évoluent dans le temps et d'autant plus lorsqu'ils sont soumis à des conditions climatiques extérieures. Les

propriétés thermophysiques du béton peuvent également être différentes en fonction de leur mise en œuvre ou de la quantité d'acier qu'ils contiennent. Ceci étant, les courbes expérimentales et simulées issues de la paroi étudiée in-situ ne sont pas vraiment concordantes. Il faut expliquer ce résultat par une méthode d'optimisation à perfectionner du fait du nombre important de paramètres à identifier ou par un protocole expérimental à éprouver sur un nombre d'essais plus conséquent.

Cet essai n'est pas très satisfaisant et il est probable que le dispositif de chauffage n'a pas été mis en place suffisamment longtemps avant l'essai. Nous avons pu refaire un essai in situ sur une paroi bicouche.

### III.4.3.2.2 Maison individuelle

La deuxième paroi étudiée in-situ constituait l'enveloppe d'une maison individuelle. Cette enveloppe est composée d'une couche d'enduit de 2.5cm, d'un parpaing de 19.5 cm. Cette paroi bicouche est de 22 cm d'épaisseur au total. Le dispositif expérimental mis en place in situ et identique à celui utilisé en laboratoire.

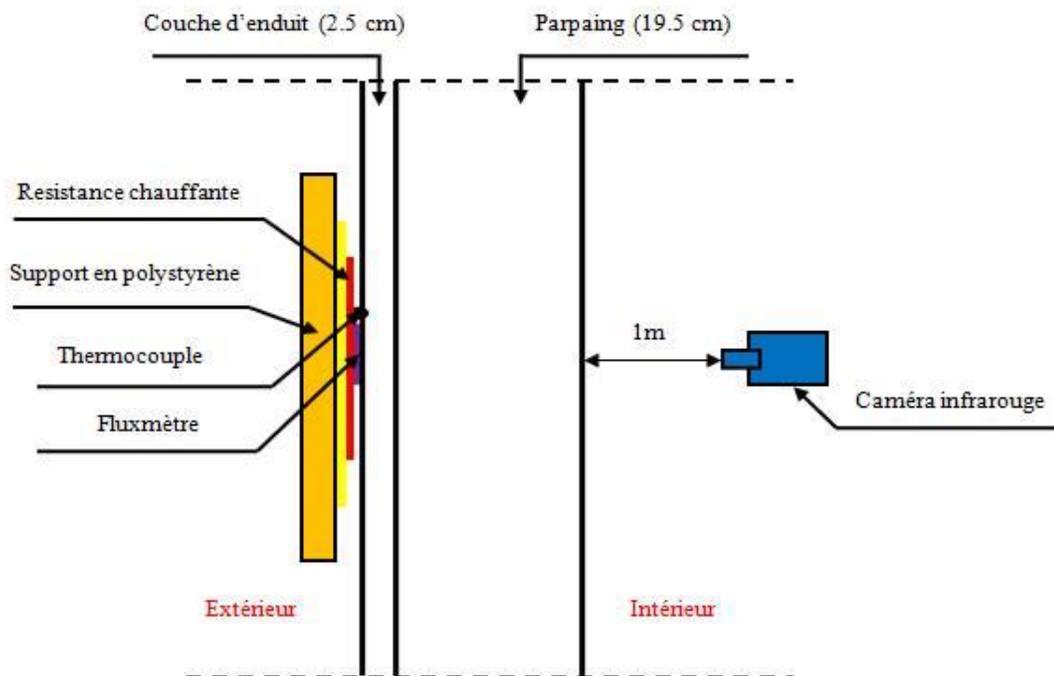


Figure III-60. Paroi bicouche

#### III.4.3.2.2.1 Mesures expérimentale

La figure III-61 montre la densité de flux injectée dans la paroi bicouche pendant 5400 secondes sur la face extérieure.

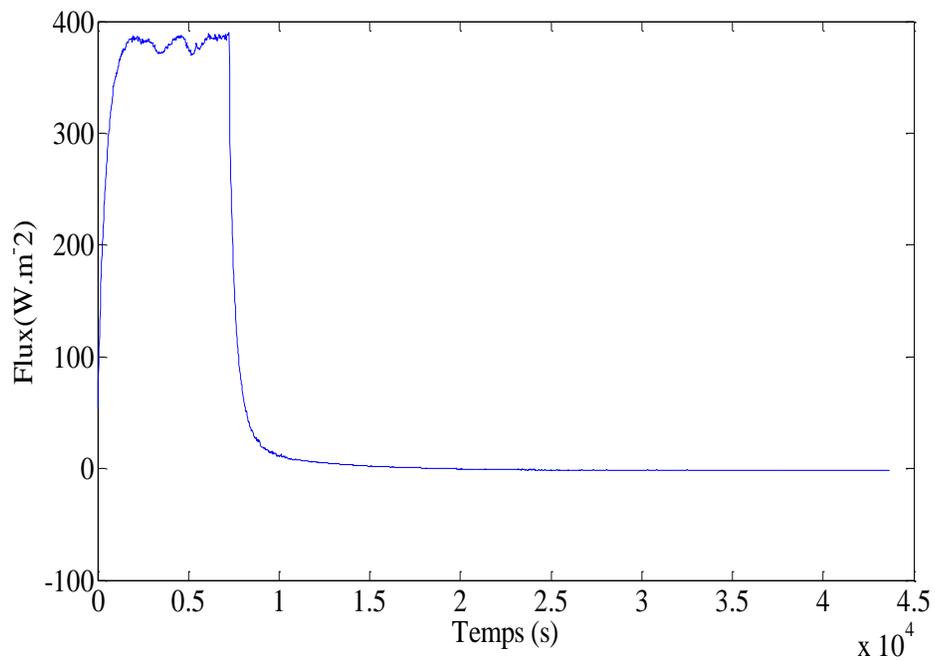


Figure III-61. Le flux entrant sous forme d'un créneau

La courbe III-62 montre l'évolution de température normalisée de la face intérieure de la paroi bicouche mesurée au centre de l'image par la caméra infrarouge.

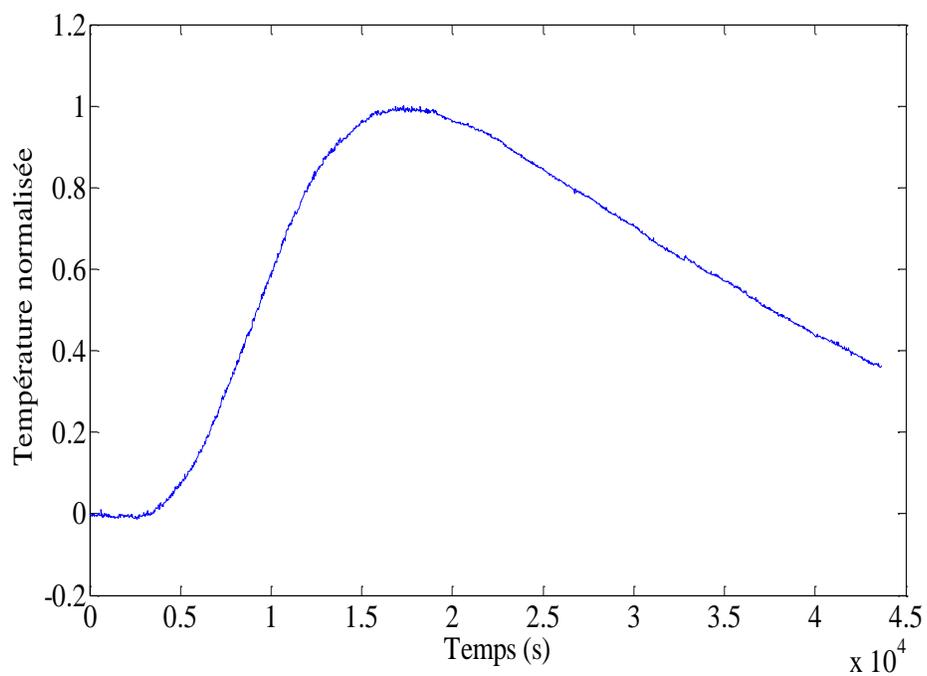


Figure III-62. La température normalisée ( mesure caméra)

### III.4.3.2.2 Résultats

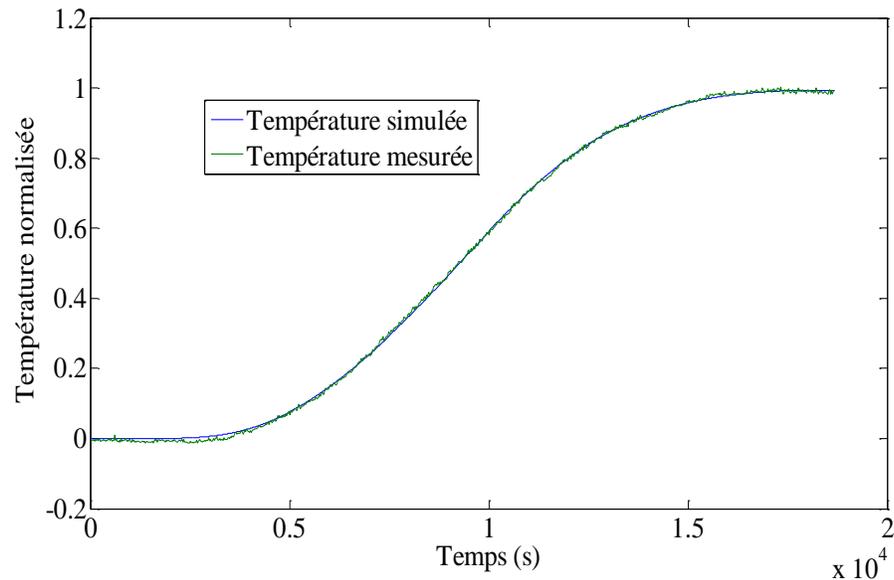


Figure III-63. Courbe de température normalisée mesurée et simulée

La même procédure décalage a été réalisée. La figure III-63 montre que les courbes des températures normalisées simulée et mesurée sont très proches. La valeur de l'erreur quadratique moyenne est très faible, on obtient  $EQM=0.008$ . On remarque également dans le tableau III-11 des écarts de moins de 16% entre les paramètres identifiés et des valeurs les plus défavorables issues de la littérature.

| Matériaux | Paramètres                                  | Littérature                        | Procédure inverse | Erreur (%) |
|-----------|---|------------------------------------|-------------------|------------|
| Enduit    | $\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) | 0.9                                | 0.98              | 9          |
|           | $\rho c$ ( $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$ )  | $1900 \cdot 1000 = 1.9 \cdot 10^6$ | $2.15 \cdot 10^6$ | 13%        |
| Parpaing  | $\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) | 1.15                               | 1.32              | 15%        |
|           | $\rho c$ ( $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$ )  | $400 \cdot 1000 = 4 \cdot 10^5$    | $4.63 \cdot 10^5$ | 16%        |
|           | $h$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )       | inconnue                           | 8.9               |            |

Tableau III-11. Résultats de la procédure d'inversion

### III.4.3.3 Résultats et discussions d'une paroi multicouche

Il faut rappeler que l'optimisation est réalisée à partir d'un modèle numérique monodimensionnel en différences finies et basée sur l'observation de la réponse en température de la paroi soumise à un créneau de flux. Les résultats obtenus sur ces deux parois tri-couches en laboratoire montrent que les paramètres thermophysiques peuvent être déterminés de manière correcte. Ici pour les deux parois tri-couche étudiées, sept paramètres doivent être identifiés en supposant que les épaisseurs des différents matériaux soient connues. Pour les parois existantes in

situ, ce n'est pas toujours le cas et le nombre de paramètres à optimiser devient trop conséquent pour aboutir à un résultat précis, les épaisseurs des matériaux ne sont pas toujours connues. Le nombre de matériaux constitutifs peut souvent être supérieur à 3 et il y a alors trop de paramètres à identifier pour aboutir à un résultat précis. La composition des parois peut être différente de celle donnée sur les plans. Par contre la paroi bicouche in situ a conduit à une meilleure qualité d'optimisation. Les résultats montrent que les propriétés thermophysiques peuvent être estimées à quelques pourcents près, du fait qu'auront moins des paramètres.

La suite de ce travail consiste donc à étudier la possibilité d'assimiler une paroi tri-couche à une paroi monocouche afin de diminuer le nombre de paramètres à identifier tout en étant capable de reproduire le comportement thermique réelle de la paroi.

### III.4.4 Mur équivalent

#### III.4.4.1 Paroi de laboratoire

##### III.4.4.1.1 Paroi plaque de plâtre-isolant-plâtre

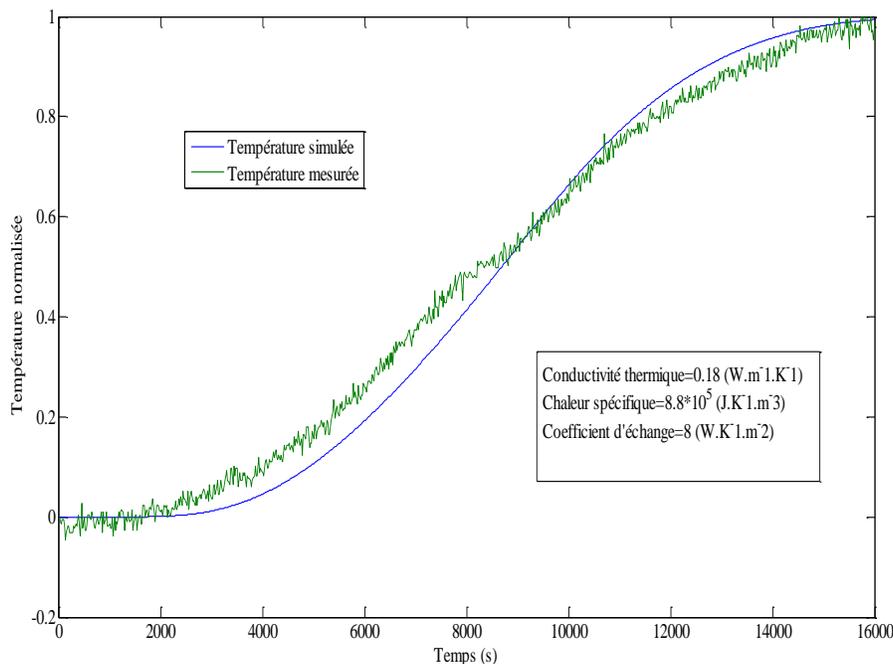


Figure III-64. Courbe normalisée simulée et mesurée de mur équivalent

Les résultats de l'essai concernant la tri-couche : plaque de plâtre, polystyrène et carreaux de plâtre sont représentés par la figure III-64 et le Tableau III-12. La figure III-64 fait apparaître une différence notable entre les courbes des températures normalisées simulée et mesurée. La

dynamique du comportement thermique de la paroi est très mal représentée par la courbe simulée. La valeur de l'erreur quadratique moyenne est beaucoup plus grande est égale à 0.35. Le tableau III-12 indique un écart très net entre la valeur de référence et la valeur issue de l'optimisation en ce qui concerne la conductivité thermique.

|  | $\lambda_{(eq)} (W.m^{-1}.K^{-1})$ | $\rho c_{(eq)} (J.K^{-1}.m^{-3})$ | $h_g (W.m^{-2}.K^{-1})$ |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| <b>Résultats de références</b>               | 0.1                                | $8.2*10^5$                        | 7.5                     |
| <b>Résultats de la procédure d'inversion</b> | 0.18                               | $8.8*10^5$                        | 8                       |
| <b>Erreur</b>                                | <b>90%</b>                         | <b>7%</b>                         | <b>6%</b>               |

Tableau III-12. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion

La même démarche est maintenant appliquée à la paroi tri-couche constituée d'une plaque de plâtre, de béton cellulaire et d'un carreau de plâtre. L'objectif de cette configuration étant de voir s'il est possible d'identifier des matériaux dont les caractéristiques thermophysiques sont assez proches les unes des autres contrairement à la paroi précédente.

#### III.4.4.1.2 Paroi plaque de plâtre-béton cellulaire-plâtre

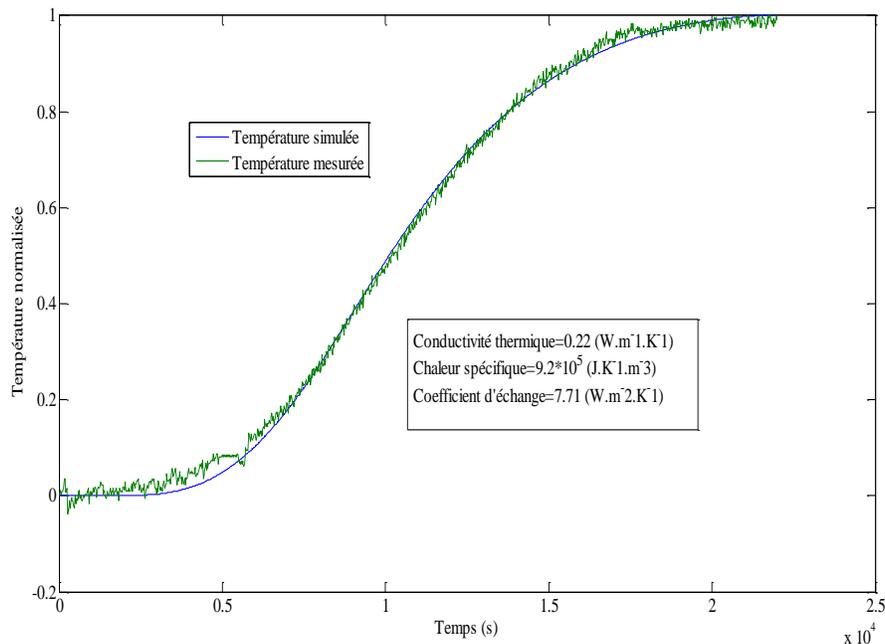


Figure III-65. Courbes normalisées simulée et mesurée

Les courbes de températures normalisées simulée et mesurée présentent une assez bonne superposition. La valeur de l'erreur quadratique moyenne est égale à 0.04 pour cet essai. Le

tableau III-13 présente les propriétés thermophysiques équivalentes de la paroi tri-couche obtenues lors de l'optimisation.

|  | $\lambda_{(eq)}$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | $\rho c_{(eq)}$ ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | $h_g$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ) |
|--|---|--|--|
| <b>Résultats de références</b>               | 0.25  | $8.1 \cdot 10^5$   | 7.5  |
| <b>Résultats de la procédure d'inversion</b> | 0.22  | $9.2 \cdot 10^5$   | 7.71   |
| <b>Erreur</b>                                | <b>13%</b>  | <b>13%</b>   | <b>3%</b>  |

Tableau III-13. Résultats expérimentaux et de la procédure d'inversion

Le résultat de l'optimisation du coefficient d'échange est très satisfaisant. Les écarts entre les valeurs de référence et optimisées de la chaleur volumique et de la conductivité thermique sont de l'ordre de 13%.

L'étude menée sur les deux parois tri-couche de laboratoire a permis de constater que les résultats obtenus en considérant un mur équivalent sont moins bons que ceux obtenus lorsque la paroi est considérée comme trois couches distinctes. Ceci est d'autant plus vrai lorsque la paroi contient un matériau avec un fort contraste thermique (isolant thermique).

#### III.4.4.2 Parois in situ

#### III.4.4.3 Paroi Georges BRAQUES

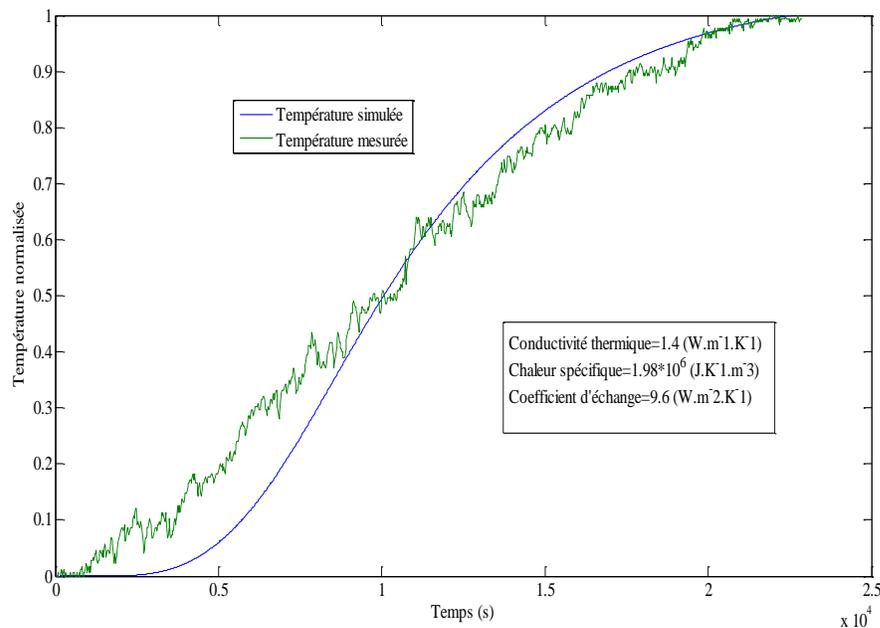


Figure III-66. Courbes de température normalisée simulée et mesurée

Les résultats d'un essai de calage de la température modélisée sur la courbe expérimentale normalisée est tracé sur la Figure III-66 ; la superposition est très médiocre. La valeur de l'erreur quadratique moyenne est égale à 0.56. Cet essai réalisé in situ confirme le résultat obtenu sur la paroi tri-couche de laboratoire incorporant un isolant thermique, il n'est pas possible de reproduire le comportement thermique d'une tri-couche en le considérant comme un matériau homogène monocouche.

|  | $\lambda_{(eq)} (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$ | $\rho c_{(eq)} (J \cdot K^{-1} \cdot m^{-3})$ | $h_g (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$ |
|--|--|---|-------------------------------------|
| <b>Résultats de références</b>               | 0.08   | $1.6 \cdot 10^6$                              | inconnue                            |
| <b>Résultats de la procédure d'inversion</b> | 1.4  | $1.98 \cdot 10^6$                             | 9.6                                 |

Tableau III-14. Résultats de la méthode d'inversion

Le tableau III-14, reprend les valeurs de conductivité, de chaleur spécifique équivalente et de coefficient d'échange global issues de la procédure d'inversion d'un mur équivalent. Les valeurs obtenues sont éloignées de celles que l'on trouve dans la littérature.

### III.4.5 Conclusion

Ce chapitre III était voué à la mise en application des méthodes et théories développées dans le chapitre précédent. Rappelons que celles-ci doivent permettre l'identification des paramètres thermophysiques de matériaux sur la base d'un calage des réponses en température expérimentales et simulées d'une paroi soumise à une sollicitation en flux. L'objectif final étant de caractériser thermiquement les enveloppes de bâtiment in situ.

Pour ce faire, nous avons recherché et développé un dispositif expérimental innovant, léger, maniable, transportable et simple qui nous permette d'imposer une sollicitation en flux sur la face extérieure de la paroi à caractériser. Les atouts du système mis en œuvre sont sa capacité à évaluer la quantité de flux réelle injectée dans la paroi en fonction du temps et de mesurer la température de l'interface dispositif-paroi afin d'éviter tout risque de surchauffe. La sollicitation en flux mesurée devenant ensuite la condition limite qui sera injectée dans le modèle numérique nécessaire à l'identification des paramètres thermophysiques des matériaux constituant la paroi.

La démarche adoptée pour éprouver les méthodes d'identification a été dans un premier temps de les tester sur des parois de laboratoire construites avec des matériaux dont les propriétés thermophysiques étaient connues. En effet, avant leur incorporation dans les parois à tester, chaque matériau a été caractérisé dans un banc de conduction suivant des méthodes classiques utilisées dans notre laboratoire. Les parois étudiées ont été de type monocouche et ensuite tri-couche avec à chaque fois au moins une application en laboratoire et une application in situ. La paroi monocouche a permis sur un cas simple de bien expliquer le protocole expérimental, les capteurs utilisés, les mesures par thermographie infrarouge et de discuter du coefficient d'échange entre la paroi et l'ambiance intérieure du bâtiment. Les résultats très satisfaisants obtenus sur une

paroi monocouche en carreaux de plâtre testée en laboratoire et sur un voile béton caractérisé dans des conditions in-situ nous ont permis d'envisager l'étude de parois multicouches et bicouche. Dans la réalité, les enveloppes de bâtiment sont souvent constituées de plusieurs couches dont une première partie est porteuse ou sert de remplissage, une deuxième partie est isolante et un dernier élément en plâtre forme le parement intérieur. Nous avons considéré dans ce travail que le parement extérieur souvent en enduit pouvait être intégré à la première partie et que de ce fait, dans un premier temps, les enveloppes de bâtiment pouvaient être assimilées à une tri-couche. Dans une démarche identique à l'étude de la paroi monocouche, nous avons débuté par l'étude de parois tri-couches en laboratoire ; la première composée d'un matériau ayant une capacité thermique identifiable à une paroi structurelle ou de remplissage, un isolant thermique et une plaque de plâtre ; la seconde une paroi tri-couche mais avec des caractéristiques thermophysiques moins contrastées. Une nouvelle fois, les résultats acquis se sont montrés très corrects en ce qui concerne les deux parois tri-couches de laboratoire étudiée et la paroi bicouche in situ. L'identification de la paroi in situ s'est montrée beaucoup plus délicate. Bien que nous ne connaissions pas les paramètres thermophysiques de la paroi in situ, la reproduction du comportement thermique de cette paroi par le modèle à partir des paramètres identifiés montre que le résultat n'est pas satisfaisant. L'approche in situ semble donc plus délicate du fait que la paroi doit être dans un état thermique stable au départ de l'essai, de la maîtrise nécessaire du flux à injecter dans la paroi ou encore du nombre de paramètres à identifier. Le souci que nous avons rencontré est que nous n'avons pas pu multiplier les essais du fait de l'occupation des locaux et de notre volonté de ne pas déranger les locataires déjà fort sollicités dans le cadre du projet IFORE. Toutefois, cette expérience nous a permis d'établir qu'il fallait travailler en amont sur la durée, le type de sollicitation, la puissance à injecter mais aussi peut-être sur le protocole d'essai (durée de la mise en place du dispositif avant le début de l'essai notamment).

Dans la dernière partie du chapitre, nous avons voulu voir s'il était possible d'assimiler des parois tri-couches à une paroi monocouche. La caractérisation d'une paroi tri-couche nécessite l'identification de sept paramètres et à chaque fois qu'une couche est ajoutée, deux paramètres de plus sont à identifier. On risque donc d'être confronté très rapidement à un problème d'optimisation devant le nombre trop important de paramètres à identifier. Les résultats observés nous ont permis de constater qu'assimiler une paroi tri-couche à une paroi monocouche n'était pas une bonne voie et notamment dans le cas où la paroi contenait un isolant thermique.

## Conclusion et Perspectives

Dans ce travail, une méthode d'identification de propriétés thermophysiques d'une paroi a été développée. L'objectif était de proposer une méthode transposable in situ et permettant une caractérisation en quelques heures. Le principe consiste à imposer un flux sur un côté d'une paroi (à l'extérieur) et à observer l'évolution de la température sur l'autre face (à l'intérieur) avec une caméra infrarouge. Les paramètres recherchés sont identifiés par inversion de la température normalisée de la surface sortie. L'approche s'apparente à la méthode flash qui existe depuis de nombreuses années et qui est largement répandue. Dans notre cas, les dimensions de l'objet de l'étude et l'environnement non contrôlé de la mesure nécessitaient un nouveau développement de cette approche. La sollicitation est assurée par une résistance chauffante de grandes dimensions qui permet d'imposer un flux d'entrée uniforme difficilement réalisable avec une source rayonnante. Point important : Le flux entrant dans la paroi est mesuré par un fluxmètre collé sur la résistance. De ce fait, aucune hypothèse concernant la condition limite à l'entrée de la paroi ne doit être faite car c'est le flux mesuré qui est injecté dans le modèle pour les simulations. Il nous est alors possible d'utiliser toute forme de signal de commande et d'agir en temps réel sur la sollicitation. Nous nous sommes pour l'instant limités à une excitation en créneau qui par sa forme « tout ou rien » est la plus simple à mettre en œuvre sur site. La connaissance du champ de température initial interne à la paroi constitue une des difficultés pour les applications in situ car il dépend de l'historique des sollicitations antérieures. Une épaisse plaque d'isolant assurant l'application de la résistance sur la face extérieure de la paroi est un moyen de maîtriser les conditions initiales si elle est mise en place suffisamment longtemps avant l'essai.

Les premières expérimentations ont montré que les mesures de température par thermographie infrarouge dans nos conditions d'essai étaient entachées de fortes incertitudes. Le passage aux températures normalisées moins sensibles aux erreurs systématiques s'est imposé.

L'inversion passe par une minimisation de l'écart entre la température normalisée mesurée et celle simulée. Dans ce travail, un modèle en différences finies a été choisi et élaboré pour réaliser la simulation.

Les premières applications ont été conduites sur une paroi homogène en carreaux de plâtre qui a été érigée en laboratoire. Dans ce cas, la conductivité et la chaleur spécifique du matériau ainsi que le coefficient d'échange en face arrière ont été identifiés de façon précise. L'étude d'une paroi réelle homogène en béton armé d'un bâtiment a permis de vérifier que la technique était transposable in situ. Un dispositif de chauffage léger, transportable a été conçu, réalisé et s'est révélé bien adapté à une utilisation sur site. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de la méthode pour les parois homogènes.

Le passage aux parois multicouches implique l'accroissement du nombre de paramètres à identifier. Ceci rend la minimisation plus délicate. Les premiers résultats ont été obtenus en recourant au couplage d'un algorithme génétique et d'un algorithme de Levenberg-Marquardt. La caractérisation sous la forme d'une paroi homogène équivalente a été envisagée pour sa simplicité. Elle a donné des résultats variables selon les compositions de paroi et semble devoir être évitée pour les parois constituées de matériaux aux propriétés très contrastées.

Deux types de parois tri-couches ont été testés en laboratoire et une paroi bicouche in situ. Les caractéristiques thermiques de chaque constituant ont été estimées à quelques pourcents près. Un autre essai in situ a ensuite été effectué sur un logement occupé. Cette dernière expérimentation a donné des résultats largement améliorables et montre que la procédure expérimentale et le traitement des données pourraient encore être perfectionnés.

Ce travail constitue une première étude au sein du laboratoire. Les résultats obtenus sont encourageants et nous invitent à la poursuivre. Plusieurs perspectives émergent à l'issue de cette étude. Au niveau du traitement des données, la phase de minimisation doit pouvoir être améliorée. De nombreuses techniques existent et n'ont pas été explorées. La température d'entrée qui est mesurée en même temps que le flux n'a pas été exploitée dans ce travail. Cette information complémentaire doit pouvoir contribuer à la caractérisation.

La sensibilité de la réponse en température de sortie aux paramètres thermophysiques dépend de la forme du signal de sollicitation. Il n'a pas été optimisé dans ce travail. Il est probable que l'identification pourra être améliorée en modifiant la forme du flux imposé par la résistance chauffante.

La méthode a été envisagée ici en considérant un transfert unidirectionnel dans des matériaux homogènes placés en série. Le fait que nous suivions l'évolution de température de la paroi par une caméra infrarouge sur une zone étendue nous permet d'envisager la caractérisation de d'enveloppe de bâtiments soumis à des transferts multidimensionnels plus complexes comme par exemple des parties maçonnées.

# Bibliographie

- [1] DGEMP 2008, «Direction Générale et d'Energie et des Matières Premières».
- [2] AFNOR, «Association Française de Normalisation,» Juillet 2001.
- [3] Les Cahiers du CLIP, Club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement, «Habitat et développement durable,» n°13, Meudon, Avril 2001.
- [4] J. Orselli, «Recherche et Développement sur les économies d'énergies et les substitutions entre énergies dans les bâtiments,» Rapport pour le Conseil General des Ponts et Chaussée, 2005.
- [5] Prebat, «Synthèse: Comparaison Internationale Bâtiment et Energie,» Rapport intermédiaire, Ademe/PUCA/PREBAT/CSTB, » 2006.
- [6] Eurlex, «Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 Décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments,» 2003.
- [7] Cen, «Method for expressing energy performance and for energy certification of building,» *EN 15217 Energy Performnace of Building,»* 2006a.
- [8] Cen, «Assesment of energy use and definition of energy ratings,» *EN 15603 Energy Performance of Buildings, p. p. 50, 2006B.*
- [9] Conseil Europeen, «Directive 2002/91/CE du Parlement Européen et du Conseil du 16 Décembre 2002 sur le performance énergétique des bâtiments,» Journal officiel des Communautés Européennes, 2002.
- [10] Ademe, «Le diagnostic de performance énergétique,» 2006.
- [11] Le Nouvel Observateur, «Grenelle de l'environnement: quelques propositions consensuelles, mais statu quo sur le nucléaire et les OGM,» AP , n°15, 2007.
- [12] Ministère de l'Industrie, «Une nouvelle régulation thermique pour le batiment,» 2006.
- [13] A. Degiovanni, «Conductivité et diffusivité thermique des solides,» *In Techniques de l'ingénieur, p. p. 32, vol. RC3, 1994.*
- [14] C. Lorrette, «Outils de caractérisation thermophysique et modèles numériques pour les composites thermostructuraux à haute température,» Thèse De Doctorat, Université Bordeaux 1, 2007.
- [15] Y. Jarny, «Problèmes inverses et estimation de grandeur en thermique,» Ecole d'hiver METTI'99, 1999.
- [16] A. Degiovanni, M. Laurent, «Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode Flash,» *Revue de Physique Appliquée, 1986.*

- 
- [17] A. Degiovanni, «Détermination des propriétés thermophysiques : conductivité et diffusivité thermique,» *Ecole de Printemps GUT - CNRS - Aussois*, 20, 25 Mars 1995.
- [18] Norme Française NF A 09-400 . AFNOR, Thermographie infrarouge. Vocabulaire relatif à la caractérisation de l'appareillage, AFNOR, Décembre 1991.
- [19] G. Gaussogues, «La thermographie infrarouge: Principes-techniques-applications,» Quatrième édition revue et argumentée, ISB, n°2-7430-0290-5, technique et documentation, Lavoisier (Paris), 1999.
- [20] Pajani, «Mesure par thermographie infrarouge,» Chap1, Introduction, ISBN 2-9504171-0-8, 1989a.
- [21] Pajani, «Mesure par thermographie infrarouge, chap.8,» Les applications de la thermographie, ISBN 2-9504171-0-8, 1989b.
- [22] S. Guibert, «La thermographie infrarouge à détection synchrone appliquée aux matériaux composites,» Thèse de doctorat, QUÉBEC, 2007.
- [23] J. C. Maréchal, J. M. Devisme, «Métrologie thermique des matériaux isolants par mesure de flux en régime transitoire. Cas du système plan à températures imposées, Matériaux de construction,» n°1 n°41, p. p. 1-8, 1974.
- [24] L. Boukhattem, R. Mir, M. Kourchi, A. Bendou, «Caractérisation thermophysique du mortier à base du ciment et de sable,» *Revue internationale d'héliotechnique energie-environnement*, n°1 n° 36, 03 Décembre 2007.
- [25] I. Aboubou, L. Diabatié, G. Menguy, «Détermination de la conductivité thermique de matériaux locaux de construction à Bamako,» *Journal des sciences pour l'ingénieur*, n°1 n° 4, p. p. 1-6, 2004.
- [26] D. Defer, E. Antczak and B. Duthoit, «Measurement of low-thermal effusivity of building materials using thermal impedance method,» *Measurement Science and Technology*, vol. 12, n°1 n° 5, p.p. 49, Janvier 2001.
- [27] E. Antczak, «Identification par impédance thermique application à la caractérisation des géomatériaux,» Thèse de doctorant, Université d'Artois, Béthune, 1996.
- [28] Y. Gao, D. Defer, E. Antczak, O. Carpentier, «Mise au point d'une sonde destinée à la mesure simultanée de l'effusivité et de la diffusivité thermiques d'un matériau granulaire,» *XXVI Rencontres Universitaires de Génie Civil, Nancy*, 4 au 6 juin 2008.
- [29] J. Shen , D. Defer, E. Antczak, B. Duthoit, «Characterization of a Humid Concrete by Study of Thermal Impedance,» *Materials Transactions*, vol. 2, n°153, p. p. 270-273, 2012.
- [30] Y. Jannot, "Théorie et pratique de la métrologie thermique", Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), Octobre 2011.

- 
- [31] B. Ladevie, «Mise au point de dispositif de caractérisation thermophysique de matériaux isolants solides ou pateux.Extension aux fluides cisailés,» Thèse de doctorat, ENSAM Bordeaux, 1998.
- [32] J. M. Goyhénèche, «Modélisation et caractérisation thermique à très haute température de matériaux poreux en carbone destinés à l'isolation des corps de rentrée dans l'atmosphère,» Thèse de doctorat, INSA Lyon, 1997.
- [33] J. C. K. Krapez, B. Hay, D. Demange, G. Gardette, «Méthodes en flash avant. Optimisation de l'expérience pour un monocouche et un bicouche.,» *In Congrès Français de thermique*, Juin 2002.
- [34] F. Rigollet, «Caractérisation thermophysique d'un revêtement à l'aide d'une méthode photothermique impulsionnelle associée à la résolution d'un problème inverse,» Thèse de doctorat, Université de Provence, 1999.
- [35] J. L. Battaglia, «Méthodes d'identification de modèles à dérivées d'ordre non entiers et de réduction nodale. application à la résolution de problèmes thermiques inverses dans des systèmes industriels,» HDR, Laboratoire TREFLE,2002.
- [36] W. J. Parker, R. J. Jenkins, B. P. Butter, B. L. Abbot, «Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity,» *J.Appl. Physics*, vol. 32(9), p. p. 1679-1684, 9 September 1961.
- [37] A. Degiovanni, «Diffusivité et méthode flash,» *Rev. Gen. Therm. Fr.*, n°1 n°185, 1977.
- [38] D. Maillet, S. Andre, A. Degiovanni, «Les erreurs sur la diffusivité thermique mesurée par la méthode flash : confrontation théorie-expérience,» *J. Physics.III*, p. p. 883-909, April 1993.
- [39] H. W. Deem, W. D. Wood, «Flash Thermal-Diffusivity Measurements Using a Laser,» *Rev.Sci.Instrum*, vol, n°33, p. p. 1107-1109, 1962.
- [40] A. Degiovanni , «Diffusivité et Méthode flash,» *Rev. Gén. Therm*, n° 185, Mai 1977.
- [41] A. Digiovanni, M. Laurent, «Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode de flash,» *Revue de phys. Appli. 21*, p. p. 229-237, 1986.
- [42] D. Demange, «New application of the flash method,» *Proceeding of the 15 th ECTP*, p. p. 5-9, Septembre 1999.
- [43] B. Hay, Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash, R2 995, Paris: Techniques de l'ingénieur.
- [44] J. C. Batsale, «Mesure de la diffusivité thermique par méthode flash,» *In. Technique de l'ingénieur*, vol. 12. RC3, 2004.
- [45] V. Vilov, «Optimization of heating protocol in thermal NDT, short and long heating pulses: a discussion,» *Research in non-destructive evaluation*, vol. 6, p. p. 1-17, 1994.

- 
- [46] M. Starnes, N. Corino, E. Kausel, «Preliminary thermography studies for quality control of concrete structures strengthened with fiber-reinforced polymer composites,» *Journal of materials in civil engineering*, p. p. 266-273, May 2003.
- [47] F. Weritz, «Investigation of concrete structures with pulse phase thermography,» *International Symposium of Non-Destructive testing in Civil Engineering*, n° 1, communication n0080, Septembre 2003.
- [48] F. Scudieri, F. Mercuri, R. Volterri, «Non-invasive analysis of artistic heritage and archaeological findings by time resolved IR thermography,» *Journal of thermal analysis and calorimetry*, vol. 66, p. p. 307-314, 2001.
- [49] R. Ossianer, J. M. Spicer, J. Murphy, «Analysis method for full-field time resolved infrared radiometry, thermosense XVIII, SPIE,» *International Society for Optical Engineering*, vol. 2766, p. p. 218-227, 1996.
- [50] R. Ossianer, J. M. Spicer, «Time-resolved infrared radiometry with step heating,» *Revue Générale de thermique*, vol. 37, p. p. 680-692, Septembre 1998.
- [51] D. Wu, W. Karpen, G. Zenzinger, B. Schonbach, W. Rippel, «Applications of lock-in-thermography methods,» *Review of progress in quantitative non-destructive evaluation*, vol. 15, p. p. 511-519, 1996.
- [52] D. Wu, J. Sembach, X. Maldague, J. Rantala, G. Busse, «Lockin thermography inspection of wood particles boards,» *Thermosense XIX, SPIE proceedings*, vol. 3056, p. p. 230-234, 1997.
- [53] T. Sakagami, S. Kubo, «Development of a new non-destructive testing technique for quantitative evaluations of delamination defect in concrete structures based on phase delay measurement using lock-in thermography,» *Infrared Physics et Technology*, vols. 1 sur 2 issues 3-5, p. p. 311-316, Juin 2002.
- [54] H. Wigganhauser, «Active IR-applications in civil engineering,» *Infrared Physics et Technology*, vols. 1 sur 2 vol. 43 issues 3-5, p. p. 233-238, June 2002.
- [55] A. Salerno, D. Wu, G. Busse, J. Rantala, «Thermographie inspection with ultrasonic excitation,» *Review of progress in quantitative non-destructive evaluation*, vol. 16, p. p. 345-352, 1997.
- [56] E. Henneke, S. Russel, «Vibrothermography, non-destructive testing handbook,» Second edition, vol. 9, 1994.
- [57] T. Hamrelius, «Accurate temperature measurement in thermography,» *An overview of relevant features, parameters and definitions, SPIE*, vols.1 sur 2, vol. 1467, Thermosense XIII, p. p. 448-457, 1991.
- [58] D. Breysse, O. Abraham, *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, Paris: Association Française de Génie Civil, 2005.

- 
- [59] G. Forest , «Essais non- destructifs -choix d'une méthode de controle,» *AFNOR*, ISBN°2-12-4501119, p. p. 126, 1992.
- [60] X. Maldague, «Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing,» 1 edition, April 2000.
- [61] O. Breitenstein, M. Langenkamp , «Lock-in thermography basics and use for evaluating electronic devices and materials,» *Springer*, 2003.
- [62] T. Sakagami , «Applications of pulse heating thermography and lock-in thermography to quantitative non-destructive evaluations,» *Infrared physics et technology*, vol. 43, p. p. 211-218, Juin 2002.
- [63] S. Guibert, «La thermographie infrarouge à détection synchrone appliquée aux matériaux composites,» Mémoire, la Faculté des études supérieures de l'Université Laval QUÉBEC, 2007.
- [64] N. P. Avdelidis, D. P. Almond, A. Dobbinson, B.C. Hawtin , C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague , «Aircraft composites assessment by means of transient thermal NDT,» *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 40, p. p. 143-162, Avr 2004.
- [65] A. Gleiter, C. Spiessberger, G. Busse, «Decay time analysis in pulse thermography,» *Eur. Phys. J. Special Topics*, vol. 153, p. p. 377–381 , 2008.
- [66] C. Maierhofer, A. Brink, «Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region,» *Infrared Physics Technology*, vol. 43, p. p. 271-278, 2002.
- [67] D. Gonzalez, C. Ibarra-Castanedo, F. Madruga, X. Maldague, «Differentiated absolute phase contrast algorithm for the analysis of pulsed thermographic sequence,» *Infrared physics et technology*, vol. 48, p. p. 16-21, Avr. 2006.
- [68] X. Maldague, S. Marinetti, «Pulse phase infrared thermography,» *J. Appl. Phys*, vol. 79, p. 2694, 1996.
- [69] C. Peng, Z. Wu, «In situ measuring and evaluating the thermal resistance of building construction,» *Energy and Buildings*, vol 40, p. p. 2076-2082, 2008.
- [70] G. Baldinelli, «A methodology for experimental evaluations of low-e barriers thermal properties: Field tests and comparison with theoretical models,» *Building and Environment*, vol. 45, p. p. 1016–1024, 2010.
- [71] EN 12494, «European Standard Building Components and Elements. In situ measurement of the surface to surface thermal resistance,» chez *CEN*, Brussels, August, 1996.
- [72] M. Cucumo, A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, V. Marinelli, «A method for the experimental evaluation in situ of the wall conductance,» *Energy and Buildings*, vol. 38, p. p. 238-244, 2006.

- 
- [73] L. F. Cabeza , A. Castell, M. Medrano, I. Martorell, G. Pérez, I. Fernandez, «Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction,» *Energy and Buildings*, vol. 42, p. p. 630–636, 2010.
- [74] Z. Brahami, «Adaptation du montage boite chaude gardée à l'étude du comportement thermique dynamique de parois de batiment,» 13èmes Journées Internationales de Thermique, Albi, France, 2007.
- [75] M. N. A. Said, W. C. Brown, C. J. Shirliffe, A. H. P. Maurenbrecher, «Monitoring of the building envelope of a heritage house: a case study,» *Energy and Buildings*, vol. 30, p. p. 211–219, 1999.
- [76] M. Y. L. Chew, «Assessing building façades using infra-red thermography,» *Structural Survey*, vol. 16, p. p. 81-86, 1998.
- [77] R. Albatici, A. M. Tonelli, «Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site,» *Energy and Buildings*, vol. 42, p. p. 2177–2183, 2010.
- [78] R. Albatici, F. Passerini, «Bioclimatic design of buildings considering heating requirements in Italian climatic conditions. A simplified approach,» *Building and Environment*, vol. 45, p. p. 1624-1631, 2011.
- [79] D. Defer, «Theorie du signal appliquée à la caractérisation thermique et au controle non destructif des ouvrages in situ sous sollicitations aleatoires,» Thèse de Doctorat, Lille, 1994.
- [80] L. Zalewski, «Etude thermique expérimentale et simulation et numérique d'un mur solaire composite optimisation des performances énergétiques,» Thèse de Doctorat, Béthune, 1996.
- [81] M. Elaoami, «Etude expérimentale de l'évolution des propriétés thermophysiques d'un mortier par impédance thermique,» Thèse de Doctorat, Béthune, 2005.
- [82] Y. Gao, «Caractérisation thermophysique de matériaux granulaires par sonde fluxmétrique cylindrique,» Thèse de Doctorat, Béthune, 2008.
- [83] T. WU, «Formalisme des impedances thermiques généralisées. Application à la caractérisation thermique de parois de batiments,» Thèse de Doctorat, Béthune, 17 Juin 2011.
- [84] T. Wu, E. Antczak, D. Defer, T. Chartier, «Thermal characteristics in situ monitoring of detached house wall constituted by raw clay,» *European Journal of Environmental and Civil engineering*, vol. 14, p. p. 653-667, 2010.
- [85] P. Chemillier, Sciences et batiment, la démarche scientifique appliquée à la construction, C. d. l. N. d. p. e. Chaussées, Éd., Paris, 11 Mars 1957.

- 
- [86] P. T. Tsilingiris, «Technical note On the transient thermal behaviour of structural walls the combined effect of time varying solar radiation and ambient temperature,» *Renewable Energy*, p. p. 319–336, 2002.
- [87] P. T. Tsilingiris, «Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures,» *Energy and Buildings*, p. p. 1200–1211, 2006.
- [88] O. Carpentier, D. Defer, E. Antczak, A. Chauchois, B. Duthoit, «In situ thermal properties characterization using frequential methods,» *Energy and Buildings*, vol. 40, p. p. 300–307, 2008.
- [89] A. Chauchois, «Modèles d'ordres non entiers appliqués à la caractérisation thermique de milieux évolutifs par méthode inverse,» Béthune, 2002.
- [90] A. Chauchois, E. Antczak, D. Defer, O. Carpentier, «Formalism of thermal waves applied to the characterization of materials thermal effusivity,» *Rev Sci Instrum.*, p. p. 82 (7), Jul 2011.
- [91] T. DU, «Thermographie infrarouge active par induction électromagnétique application à l'auscultation d'éléments en béton renforcé,» Thèse de Doctorat, Béthune, 29 Juin 2010.
- [92] P. T. Tsilingiris, «On the thermal time constant of structural walls,» *Applied Thermal Engineering*, p. p. 743–757, 2004.
- [93] J. B. Keller, «Invese problemes,» *Amer. Math. Monthly*, 1976.
- [94] Y.J. army, D. Maillet, «Problème inverse et estimation de grandeurs en thermique,» *métrologie thermique et technique inverse*, vol. 1, p. p. 1-50, Janvier 1999.
- [95] Robert J. Schilling, Sandra L. Harris, «Direct search generalized simplex algorithm for optimizing non-linear functions,» Avril. 1995.
- [96] H. Shekrforoush, M. Berthod, J. Zerubia, «Direct search generalized simplex algorithm for optimizing non-linear fuctions,» *Institute national de recherché en informatique et en automatique*, p. p. 2535, Avril 1995.
- [97] J. A. Nelder, R. Mead, «A simplex method for function minimization,» *Computer Journal*, vol. 7, n° 4, p. p. 308-313, 1965.
- [98] K. Levenberg, «A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares,» *Quarterly of Applied Mathematics*, vol 2 (2), p. p. 164–168, Jul. 1944.
- [99] D. W. Marquardt, «An Algorithm for the Least-Squares Estimation of Non linear Parameters,» *SIAM Journal of Applied Mathematics*, vol 11(2), p. p. 431–441, Jun 1963.
- [100] F. Wurtz, «Une nouvelle approche pour la conception sous contraintes de machines électriques,» Thèse de doctorat, INPG, Mai 1996.
- [101] D. Goldberg, «Algorithmes génétiques,» Addison-Wesley, France, 1994.
- [102] J. Bert, «Physique des capteurs,» Belin , 982.

- 
- [103] N. Ichinose, T. Kobayashi, «Guide pratique des capteurs,» Masson, 1990.
- [104] P. Hérin, P. Théry, «Measurements on the thermoelectric properties of thin layers of two metals in electrical contact. Application for designing new heat flow sensors,» *Meas. Sci. Technol.*, p. 158 - 163, 1993.
- [105] P. Théry, B. Duthoit, J. Pauquet, «Propriétés thermoélectriques des systèmes à deux couches minces superposées,» *Application à la mesure de flux thermique*, 1980.
- [106] M. Yala-Aithammouda, «Étude et réalisation de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium,» Université des Sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [107] P. Théry, B. Duthoit, «New heat flow sensors for thermal non destructive testing of wall sections in their natural environment,» chez *IMEKO TC7, Int'l Symp. on AIMAC 91*, Kyoto, Japon.
- [108] D. Leclercq, P. Théry, «Apparatus for simultaneous temperature and heat flow measurements under transient conditions,» *Revue Sc. Instr.*, n°54, 1983.
- [109] L. Oter Duthoit, «Application des méthodes de la théorie des systèmes à la simulation de l'évolution des flux thermiques sur les faces d'entrée et de sortie d'une paroi multicouche,» Lille, USTL 1985.
- [110] S. Güths, «Anémomètre à effet Peltier et fluxmètre thermique. Conception et réalisation. Application à l'étude de la convection naturelle,» Université d'Artois, Bethune, 1994.
- [111] E. Antczak, «Identification par impédance thermique application à la caractérisation des géomatériaux,» Thèse de doctorant, Université d'Artois, Béthune, 1996.
- [112] J. Haldik, «Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux,» *Masson*, 1990.
- [113] S. E. Gustafsson, E. Karawaski and N. N. Khan, «Determination of the thermal conductivity tensor and the heat capacity of insulating solids with the transient hot-strip method,» *J. Phys.*, vol. 52 (4), p. 2596-2600, 1981.
- [114] L. Zalewski, M. Chantant, S. Lassue, B. Duthoit, «Experimental thermal study of a solar wall of composite type,» *Energy and Buildings, Elsevier Science*, vol. 55, p. 8-17, février 1997.
- [115] S. Lassue, S. Güths, L. Zalewski, «Measurement of local convective exchange coefficient with heat flux sensors,» *ASME PVP Conf.*, vol. 446, p. 203-210, 2002.
- [116] H. J. Mathews and K. F. Kurtis, «Methods using Matlab Prentice Hall,» 4th Edition, 2004.

# **Annexes**

# Annexe II-1

## *Méthode de Nelder-Mead*

La méthode simplexe permet de déterminer un minimum d'une fonction de plusieurs variables. Cet algorithme a été inventé par Nelder et Mead. [116] Pour deux variables, un simplexe est un triangle et la méthode consiste à rechercher un modèle qui compare des valeurs de fonction aux trois sommets d'un triangle. Le sommet, où  $f(x, y)$  est la plus grande, est rejeté et remplacé avec un nouveau sommet. Un nouveau triangle est formé et la recherche se poursuit. Le processus produit des séquences de triangles (qui peuvent avoir des formes différentes), pour lesquelles la fonction calculée aux sommets devient de plus en plus petite. Un critère d'arrêt sur la taille des triangles stoppe le processus itératif et permet de déterminer les coordonnées du point qui minimise cette fonction.

Cet algorithme est appelé « simplexe » (un triangle généralisé en N dimensions) L'algorithme est exposé en utilisant le terme de simplexe et permet de trouver le minimum d'une fonction de plusieurs variables. C'est un algorithme efficace et compact.

- Triangle Initial BGW

Soit  $f(x, y)$  la fonction à minimiser. Au départ, les trois sommets du triangle sont donnés par  $V_k = (x_k, y_k)$  avec  $k = 1, 2, 3$ . La fonction  $f(x, y)$  est alors évaluée à chacun des trois points :  $z_k = f(x_k, y_k)$  for  $k = 1, 2, 3$ . Les indices sont réordonnés de manière à ce que les indices  $z_1 \leq z_2 \leq z_3$ .

Nous utilisons la notation suivante comme moyen mnémotechnique :  $B = (x_1, y_1)$ ,  $G = (x_2, y_2)$ , et  $W = (x_3, y_3)$  pour se souvenir que B est le meilleur sommet, G est le bon (à côté du mieux) et W le pire.

- Milieu du Bon Côté M

Le processus de construction utilise le milieu du segment joignant B et G. Il est déterminé par la moyenne des coordonnées :

$$M = \frac{B+G}{2} = \left( \frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2} \right) \quad (II.1)$$

- Réflexion utilisant le Point R

La fonction diminue quand on se déplace le long du côté du triangle de W vers B et il diminue quand on se déplace le long du côté de W à G. Ainsi, il est possible que  $f(x, y)$  prenne des valeurs plus petites aux points qui sont loin de W sur le côté opposé de la ligne entre B et G. Un point d'essai R est choisi en prenant le symétrique par rapport au côté  $\overline{BG}$ . Pour déterminer R, nous déterminons d'abord le milieu M du côté  $\overline{BG}$ . Il faut alors dessiner le segment allant de W à M et appeler sa longueur d. Ce dernier segment est prolongé d'une distance d jusqu'à M pour placer le point R (voir la figure II-1).

La formule vectorielle pour R est :

$$R = M + (M - W) = 2M - W \quad (II-2)$$

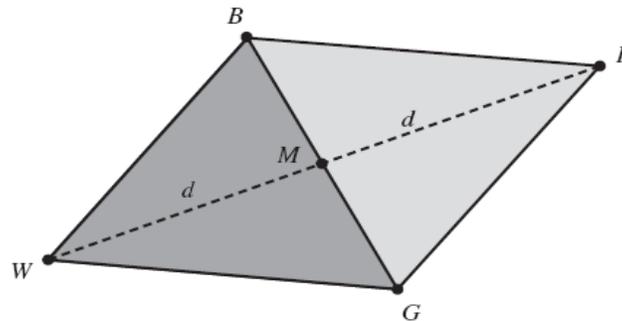


Figure II-2-1. Triangle  $\triangle BGW$  et Milieu du Bon Côté  $M$  et Réflexion utilisant le Point  $R$

- Expansion utilisant le Point E

Si la valeur de la fonction en R est plus petite que la valeur de fonction en W, alors nous nous sommes déplacés dans la bonne direction vers le minimum. Peut-être que le minimum est juste un peu plus éloigné que le point R. Donc nous prolongeons le segment par M et R jusqu'au point E. Cela forme un triangle étendu BGE. Le point E est déterminé en se déplaçant d'une distance supplémentaire d, le long de la ligne joignant M et R (voir la figure II-2-2). Si la valeur de la fonction en E est plus petite que la valeur de la fonction en R, alors nous avons trouvé un meilleur sommet que R. La formule vectorielle pour E est :

$$E = R + (R - M) = 2R - M \quad (II-3)$$

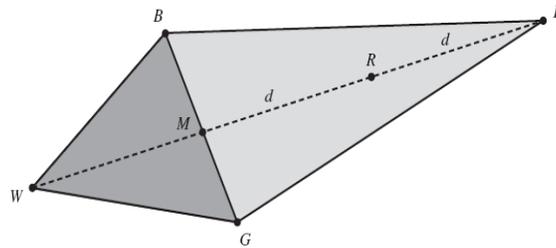


Figure II-2-2. Triangle  $\triangle BGW$  et point  $R$  et Expansion utilisant le Point  $E$

- Contraction utilisant le Point  $C$

Si les valeurs de la fonction en  $R$  et en  $W$  sont les mêmes, un autre point doit être évalué. Peut-être que la fonction est plus petite en  $M$ , mais nous ne pouvons pas remplacer  $W$  par  $M$  car nous devons avoir un triangle. Considérons les deux milieux respectifs  $C_1$  et  $C_2$  des segments  $\overline{WM}$  et  $\overline{MR}$ , (voir la figure II-2-3). Le point ayant la valeur la plus petite est appelé  $C$ , et le nouveau triangle est  $BGC$ .

Note : Le choix entre  $C_1$  et  $C_2$  pourrait sembler inopportun pour le cas bidimensionnel, mais c'est important dans des dimensions plus hautes.

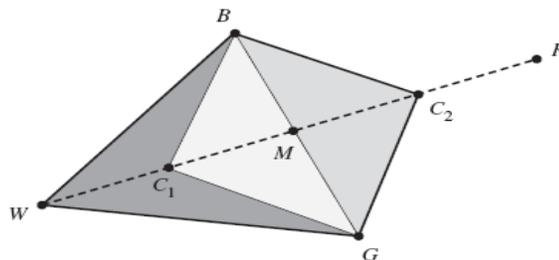


Figure II-2-3. Contraction utilisant le Point  $C_1$  et  $C_2$  Réduction vers  $B$

Si la valeur de la fonction en  $C$  n'est pas plus petite que la valeur en  $W$ , les points  $G$  et  $W$  doivent être réduits en direction de  $B$  (voir la figure II-2-4) Le point  $G$  est remplacé par  $M$  et  $W$  est remplacé par  $S$ , qui est le milieu du segment joignant  $B$  avec  $W$ .

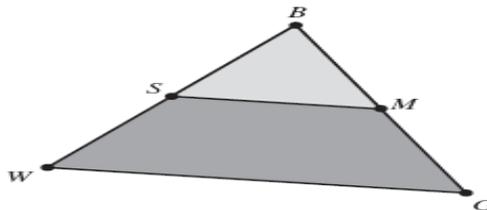


Figure II-2-4. Réduction vers  $B$

## Annexe II-2

### *Description du fonctionnement d'un algorithme génétique*

Le fonctionnement d'un algorithme génétique passe par la création de manière aléatoire d'une population initiale. Pour passer d'une génération à l'autre, différentes opérations sont effectuées : le classement, la sélection, le croisement, la mutation et l'insertion.

#### **1. LE CLASSEMENT**

Les individus d'une génération sont d'abord évalués suivant la fonction objectif. Ensuite un classement par notation des individus évalués se fait en utilisant une fonction d'adaptation ou

« Fitness » définie par l'utilisateur. L'adoption d'une notation doit se faire de manière judicieuse car la convergence de l'algorithme en dépend. Une notation trop sévère entraîne une convergence prématurée de l'algorithme génétique alors qu'une notation trop lâche risque une convergence trop lente ou une non-convergence de l'algorithme.

#### **2. LA SÉLECTION**

La sélection d'un individu détermine sa capacité à se reproduire. Plusieurs techniques de sélection existent dans la littérature. Nous ne présentons ici que deux méthodes : la roulette et l'élitisme.

##### **2.1 LA ROULETTE**

La sélection des individus par le système de la roulette s'inspire des roues de loterie. A chacun des individus de la population est associé un secteur d'une roue dont l'angle du secteur est proportionnel à la qualité de l'individu qu'il représente. Les tirages des individus sont ainsi pondérés par leur qualité. Donc, les meilleurs individus ont plus de chance d'être sélectionnés pour participer à l'opération de croisement.

##### **2.2 L'ÉLITISME**

Cette méthode de sélection permet de mettre en avant les meilleurs individus de la population.

Ce sont donc les individus les plus prometteurs qui vont participer à l'amélioration de notre population. Cette méthode a l'avantage de permettre une convergence (plus) rapide des solutions, mais au détriment de la diversité des individus. On prend en effet le risque d'écarter des individus de piètre qualité, mais qui auraient pu apporter de quoi créer de très bonnes solutions dans les générations suivantes. Cette méthode est extrêmement sensible à la présence d'optima locaux, c'est à dire à la présence de solutions paraissant optimales tant que l'on ne s'en éloigne pas trop - le véritable optimum pouvant alors être situé dans une toute autre partie du domaine de recherche. Une autre possibilité relevant aussi du domaine de l'élitisme, pour s'assurer que les

---

meilleurs individus feront effectivement partie de la prochaine génération, est tout simplement de les sauvegarder pour pouvoir les rajouter à coup sûr dans la population de la future génération.

### **3. CROISSEMENT**

L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Le croisement est l'opération qui va permettre de créer à partir de deux individus (les parents) deux nouveaux individus (les fils) ayant un mélange de caractères de leurs parents. La technique de croisement utilisé dépend en général du codage car cette technique doit assurer la production d'individus génétiquement corrects. Toutefois, un individu sélectionné lors de la reproduction ne subit pas nécessairement l'action d'un croisement. Ce dernier ne s'effectue qu'avec une certaine probabilité. Plus cette probabilité est élevée et plus la population subira de changement.

### **4. LA MUTATION**

Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité d'un composant de l'individu. La mutation est une autre solution pour créer de nouveaux individus. Elle consiste à modifier des individus déjà existants. Il peut s'avérer efficace de modifier aléatoirement quelques individus de notre population en modifiant un gène ou un autre. Un individu muté apportera des possibilités supplémentaires qui pourraient bien être utiles pour la création de bonnes solutions. La technique de mutation dépend de l'utilisateur avec comme seule contrainte que l'individu muté doit être génétiquement correct. Cet opérateur est donc d'une grande importance.

### **5. L'INSERTION**

On doit sélectionner parmi les nouveaux individus créés par croisement et/ou par mutation ceux qui vont continuer à participer à l'amélioration de la population. La méthode d'insertion dépend de l'utilisateur. Une méthode relativement efficace consiste à insérer les nouveaux individus dans la population, à trier cette population selon l'évaluation de ses membres, et à ne conserver que les meilleurs. La nouvelle population ainsi obtenue subit les mêmes opérations jusqu'à atteindre le critère d'arrêt. Les critères les plus utilisés sont :

- L'arrêt après un certain nombre de générations
- L'arrêt lorsque le meilleur individu n'a pas été amélioré depuis un certain nombre de générations
- L'arrêt lorsqu'il y a perte de diversité génétique

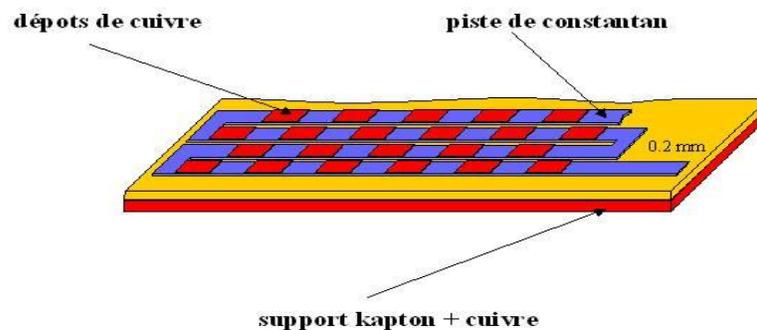
## Annexe III-1

### *Fluxmètres thermique à gradient tangentiel*

Les capteurs de flux thermique sont des fluxmètres à gradient tangentiel. Ils sont conçus pour la mesure des échanges thermiques par conduction dans les milieux solides. La mesure d'un flux thermique est habituellement ramenée à la mesure d'une différence de température entre les faces d'une paroi auxiliaire. Cet écart de température, mesuré à l'aide de thermopile uniformément distribuées sur les faces du capteur, est proportionnel à la densité locale de flux thermique (moyennée sur la surface du capteur). La sensibilité, déterminée par étalonnage, est la tension de sortie obtenue pour une densité de flux unitaire. Elle s'exprime en  $[\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2]$ .

Un fluxmètre thermique à gradient tangentiel comporte une thermopile planaire représentée dans le Figure III-1-1.

La thermopile est constituée par un ruban métallique (constantan) de faible épaisseur ( $25\mu\text{m}$ ) gravé en forme de grecque sur support isolant souple (kapton ou mylar). Pour obtenir une thermopile planaire, le ruban métallique est recouvert par un grand nombre de dépôts électrolytiques (cuivre ou or) régulièrement espacés sur le ruban de constantan. Dans les régions recouvertes par les électrodes plaquées, les propriétés du circuit sont celles du matériau de placage et le circuit se comporte comme un grand nombre de thermocouples connectés électriquement en série, les jonctions thermoélectriques étant localisées sur les lignes frontières des dépôts électriques. La mise en œuvre des techniques de photolithographie et de gravure chimique utilisées pour la fabrication des circuits imprimés permet de réaliser des thermophiles planaires comportant une densité de thermocouples de l'ordre de  $3300 \text{ unités}/\text{dm}^2$ .



*Figure III-1-1. Thermophile planaire*

On referme le capteur en apposant un collecteur muni de cales conductrices de la chaleur ayant pour fonction de canaliser le flux thermique qui génère, entre les jonctions de chacun des thermocouples, une différence de température proportionnelle au flux thermique à mesurer. Une feuille de cuivre d'épaisseur ( $\sim 35\mu\text{m}$ ) assure l'uniformité de la température à la surface du capteur. Le schéma d'une cellule fluxmétrique est représenté sur la Figure III-1-2. Lorsque la

chaleur traverse le capteur en partant de la face supérieure, il y a constriction des lignes de flux thermique vers les régions où il y a contact thermique et la différence de température entre jonction thermoélectriques dépend de l'épanouissement des lignes de flux dans l'épaisseur de la thermopile et de son support.

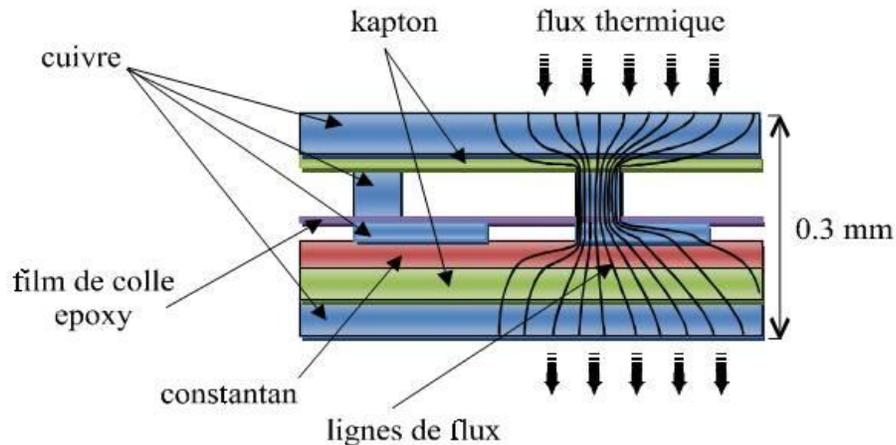


Figure III-1-2. Cellule flux métrique

En pratique, le plot de constriction est gravé sur une surface cuivrée représentée sur la Figure III-1-3, et les contacts thermiques sont réalisés en collant, après positionnement correct, la partie supérieure du capteur sur la surface de la thermopile planaire.

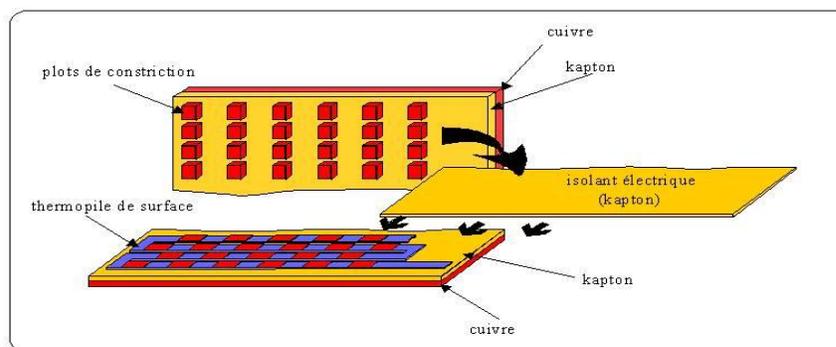


Figure III-1-3. Méthode de fabrication

### Caractéristique :

La sensibilité est déterminée par une procédure d'étalonnage, qui consiste à faire passer un flux thermique à travers la surface active du capteur placé sur une plaque à température constante. La densité surfacique de thermoéléments étant uniforme, la sensibilité est directement proportionnelle à la surface du capteur. Elle est voisine de  $50 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$  pour un fluxmètre de surface égale à  $1 \text{ dm}^2$ . Pour comparer les fluxmètres indépendamment de leur surface, on utilise

la responsivité (sensibilité par unité de surface) qui représente en fait la tension de sortie réduite par un flux de 1 W injecté à travers la surface active du capteur.

Les fluxmètres thermiques ayant l'avantage d'avoir une résistance électrique relativement faible, de l'ordre de  $200 \Omega/\text{dm}^2$  de surface active, la tension de sortie minimale détectable dépend de la résolution de l'amplificateur ou du microvoltmètre utilisé pour effectuer la mesure.

L'avantage essentiel des fluxmètres à gradient tangentiel est de leur faible épaisseur. Non seulement des perturbations dues à la présence du capteur sont réduites au minimum, mais aussi, ils sont souples et peuvent être appliqués sur des surfaces courbes ce qui permet d'étendre leur domaine d'utilisation.