



## Guide de recommandations

# RÉSISTANCE THERMIQUE DES MURS DE PANS DE BOIS

**MISE EN  
ŒUVRE DE LA  
THERMOGRAPHIE  
QUANTITATIVE**  
En conditions réelles  
sur un bâti en pans de bois

*Comment utiliser la  
thermographie pour réaliser  
des relevés de température  
sur le terrain ?*

Ce guide a été réalisé dans le cadre du projet FaHeBA,  
conduit par Alphééis, le CERTES et Maisons Paysannes de France.







## LES PARTENAIRES DU PROJET FAHEBA

- **ALPHÉEIS**

Cabinet d'études et de conseils, Alphééis intervient auprès des acteurs du domaine de l'énergie et de l'environnement, notamment en lien avec la qualité environnementale et sanitaire des bâtiments. Le cabinet intervient dans le cadre de recherches, recherches-actions, ou projets opérationnels

- **Le CERTES** (Centre d'Études et de Recherche en Thermique, Environnement et Systèmes)

Le CERTES regroupe des enseignants-chercheurs de l'IUT de Créteil, de l'IUT de Sénart et de l'UFR de Sciences et Technologies. Articulé autour de la Physique des Transferts, ses compétences se déclinent dans le domaine de l'expérimentation, de la modélisation et du traitement du signal.

- **MAISONS PAYSANNES DE FRANCE**

Association nationale de sauvegarde du patrimoine rural bâti et paysager, Maison Paysannes de France aide, depuis plus de 50 ans, les particuliers et les collectivités locales dans leurs projets de restauration du bâti ancien et accompagne les projets de recherche en relation avec le bâtiment ancien.

### Un projet soutenu par l'ADEME

Le projet FaHeBA est lauréat de l'appel à projet « Vers des bâtiments responsables à l'horizon 2020 », lancé en 2013 par l'ADEME et bénéficie à ce titre d'un soutien financier de l'agence.

### Le bâtiment ancien, une cible spécifique

Ce terme regroupe généralement **les bâtiments construits avant 1948**, soit avant l'industrialisation des méthodes de construction et pour lesquels il est donc plus difficile d'accéder aux caractéristiques thermiques.

La rénovation performante de ces bâtiments n'est réalisable qu'à condition de pouvoir accéder à ces caractéristiques (comportement et résistance thermique notamment), tout en préservant leur intégrité.

### Des outils pour massifier la rénovation énergétique

La massification de la rénovation énergétique du parc immobilier français et l'atteinte des objectifs fixés par le gouvernement dans le cadre de la transition énergétique (500 000 logements rénovés par an à partir de 2017) nécessitent d'innover aussi bien au niveau technique qu'organisationnel.

Le développement d'outils de diagnostic clé en main simplifiant l'accès aux données, tel que ceux étudiés par le projet FaHeBA, s'inscrit dans cette démarche.

## LE PROJET FAHEBA

### Comment estimer le coefficient de transmission thermique des murs de façade hétérogènes des bâtiments anciens ?

L'objectif du projet FaHeBA (pour **Fa**çade **H**étérogène de **B**âtiment **A**ncien) était de produire des outils visant à apporter une aide lors de la détermination du coefficient thermique des murs, en particulier pour les bâtiments anciens, par application de la thermographie quantitative passive.

Ce projet a été devancé par 3 projets portant sur l'application de la thermographie quantitative (active puis passive) au bâtiment. L'objectif était de développer des méthodes non destructives et non invasives permettant d'obtenir les caractéristiques thermiques de parois de bâtiment, tout en se rapprochant progressivement de conditions de mise en œuvre compatibles avec les contraintes actuelles de réalisation des diagnostics et des audits.





## Thermographie Quantitative et Qualitative

La thermographie quantitative vise à faire de la caméra thermique un instrument de mesure de la température. Associé à des outils de modélisation, cette thermographie a pour but de déterminer des grandeurs physiques propres au système étudié (par exemple le coefficient de transmission thermique d'une paroi). La compréhension et l'interprétation de la thermographie quantitative nécessite de posséder un minimum de connaissances sur les phénomènes thermiques mis en jeu (convection, conduction et rayonnement).

La thermographie qualitative, méthode la plus connue, se base sur l'exploitation des clichés thermiques et des comparaisons de situations similaires. Elle sert notamment à détecter des défauts (d'homogénéité, d'isolation, etc.).

## Thermographie Active et Passive

La thermographie est active lorsqu'elle est associée à un processus de stimulation du système observé. On mesure alors la réponse à cette stimulation afin d'obtenir des informations sur ce système. On parle également de mesure provoquée ou de thermographie stimulée.

Dans le cas de la thermographie passive, on se contente d'observer le système à l'aide de la caméra, sans intervenir ni modifier le phénomène mesuré.

## POURQUOI CE GUIDE ?

### Diffuser les bonnes pratiques...

Ce guide vise à diffuser les bonnes pratiques en matière de prise de vue en thermographie quantitative. Cette méthode requiert effectivement, lors de la prise de vue, une grande précision et un bon contrôle des paramètres extérieurs afin de s'assurer de la validité des mesures et de leur exploitation.

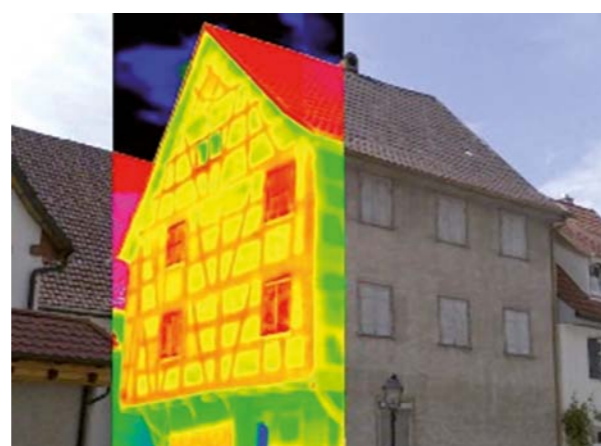
La suite du document présente les précautions à prendre lors de la prise de vue. Les bonnes pratiques présentées peuvent également être appliquées à la thermographie qualitative afin d'améliorer les prises de vues.

L'exploitation des mesures, qui est un élément à part entière du projet FaHeBA, ne sera pas détaillée dans ce guide mais abordée succinctement en fin d'ouvrage.

### ... auprès des acteurs de la maîtrise d'œuvre

Ce guide s'adresse en premier lieu aux acteurs de la maîtrise d'œuvre, pour lesquels la thermographie peut être un outil de terrain (diagnostic, audit, contrôle de mise en œuvre, etc.): bureaux d'études, diagnostiqueurs, chauffagistes, professionnels du gros œuvre, etc.

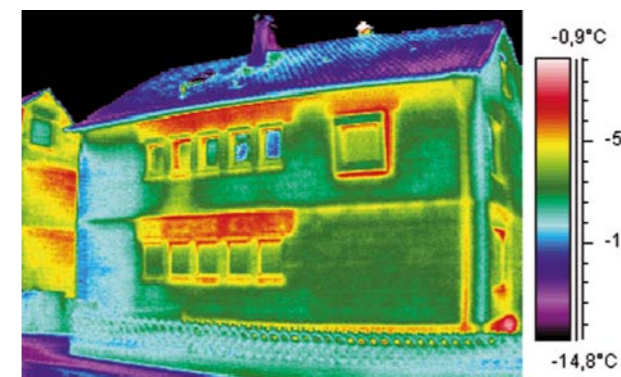
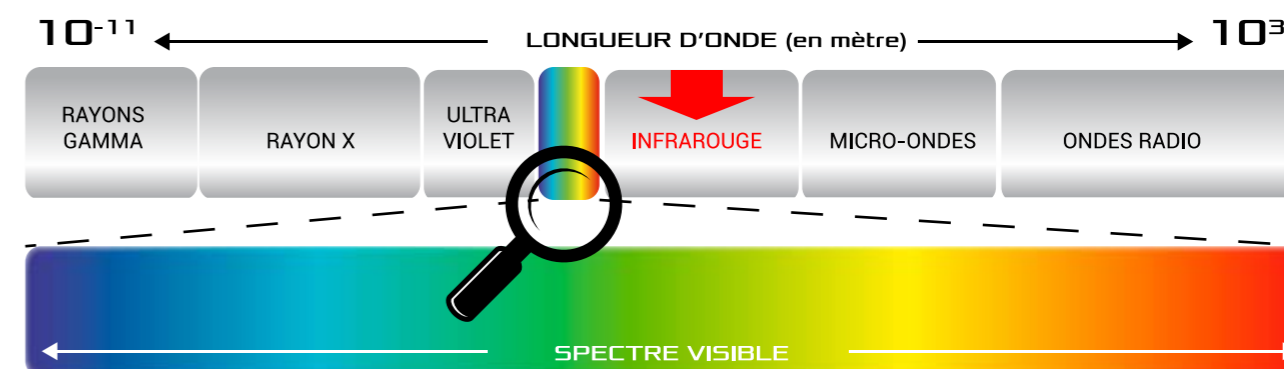
Bien qu'ils ne constituent pas la cible première de ce guide, les acteurs de la maîtrise d'ouvrage peuvent également le consulter afin de s'informer sur la thermographie, et en particulier sur les conditions de sa bonne mise en œuvre.



## LA THERMOGRAPHIE

### Le rayonnement infrarouge

Nos yeux ne captent qu'une fraction du spectre électromagnétique de la lumière, partie que l'on qualifie de « visible ». Une grande partie de la lumière nous est invisible, notamment le rayonnement infrarouge. Dans le spectre électromagnétique, l'infrarouge se situe entre le visible et les micro-ondes. La source principale de rayonnement infrarouge est la chaleur (également appelé rayonnement thermique). Ainsi tout objet émet un rayonnement dans la plage des infrarouges. Observer le rayonnement infrarouge d'un objet permet donc de se renseigner sur la température de cet objet.



## L'imagerie thermique

La caméra thermique enregistre l'intensité du rayonnement infrarouge et la convertit en image visible qui permet d'observer les différences de températures à l'aide d'une échelle de couleurs. Chaque pixel de l'image correspond ainsi à une mesure de température.



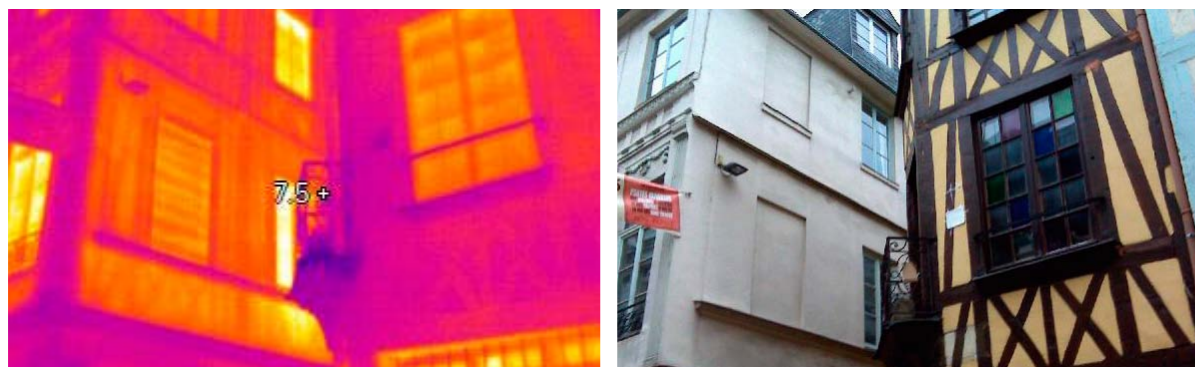
## LES APPLICATIONS DE LA THERMOGRAPHIE DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT

La thermographie qualitative, procédé non invasif, constitue un outil très intéressant de diagnostic d'une installation, permettant notamment de localiser et d'identifier rapidement des défaillances (bâtiment, réseau électrique, panneau solaire, etc.). Dans le secteur du Bâtiment, la thermographie est notamment exploitée pour :

- Visualiser les déperditions de chaleur. Certaines collectivités réalisent par exemple des thermographies aériennes de leur territoire afin de sensibiliser les particuliers à la rénovation énergétique.
- Détecter des défauts d'isolation et fuite d'air.
- Identifier des ponts thermiques dans une paroi.
- Détecter des éléments cachés d'une paroi, tels qu'un mur en colombage recouvert de plâtre, des montants en métal, etc.

La thermographie qualitative peut également être utilisée pour la détection d'humidité, de canalisation d'alimentation et de chauffage urbain, d'infiltration d'eau, de fuites chauffage dans le sol, etc.

**L'exigence requise par la thermographie quantitative (précision et contrôle des paramètres extérieurs) est telle que cette méthode est aujourd'hui souvent pratiquée uniquement en laboratoire.**



Mise en évidence d'un colombage caché (projet FaHeBA Rouen 2015)



Mise en évidence d'un pont thermique (projet DPE\_IITI Noisiel 2013)

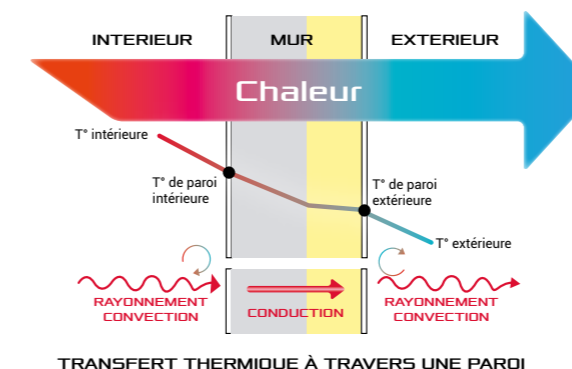
## LA THERMOGRAPHIE DANS LE PROJET FAHEBA

### Déterminer les caractéristiques thermiques d'une paroi afin de l'isoler efficacement

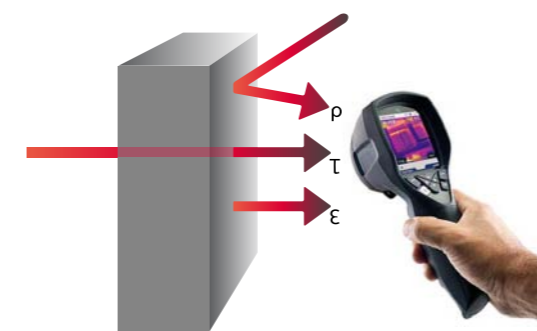
Le projet FaHeBA vise à exploiter la thermographie quantitative afin de déterminer le coefficient de transmission thermique d'une paroi. Il s'agit donc de mesurer les températures de surface d'un mur (ainsi que d'autres éléments tels que la température de l'air et la température du rayonnement réfléchi) pour en déterminer les caractéristiques physiques.

Cette démarche trouve tout son sens dans le domaine de la rénovation thermique des bâtiments anciens.

La connaissance du coefficient de transmission thermique d'une paroi permet ensuite, dans le cadre d'un chantier de rénovation thermique, de préconiser le type de travaux le plus adapté à la paroi (nature et épaisseur de l'isolant).



TRANSFERT THERMIQUE À TRAVERS UNE PAROI



EMISSIVITÉ, RÉFLEXIVITÉ ET TRANSMISSIVITÉ

### La paroi d'un bâtiment, siège d'un échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur

La différence de température entre l'intérieur du bâtiment et l'extérieur va engendrer un transfert de chaleur dans les parois, de l'environnement le plus chaud vers le plus froid (typiquement de l'intérieur vers l'extérieur en hiver et inversement en été).

Le transfert de chaleur à travers la paroi d'un bâtiment met en œuvre les trois modes de transmission de la chaleur :

- • Conduction, dans la paroi : propagation de la chaleur à travers les matériaux en contact direct
- ↻ • Convection, au niveau des façades : transfert de chaleur au moyen d'un fluide intermédiaire, ici l'air
- ~ • Rayonnement, au niveau des façades : flux de chaleur dû au rayonnement infrarouge

### Qu'enregistre une caméra thermique ?

Le rayonnement enregistré par la caméra thermique se compose de trois composantes :

- Le rayonnement infrarouge émis par les objets se trouvant dans le champ visuel de la caméra (capacité propre au matériau, caractérisé par l'**ÉMISSIVITÉ**, notée  $\epsilon$ )
- Le rayonnement infrarouge émis par l'environnement et réfléchi par ces objets (**RÉFLECTIVITÉ** du matériau, notée  $\rho$ )
- Le rayonnement infrarouge émis par l'environnement et transmis à travers les objets ciblés par la caméra (**TRANSMISSIVITÉ** du matériau, notée  $\tau$ )

Dans la pratique, cette troisième composante joue rarement un rôle, la plupart des matériaux n'étant pas perméables aux infrarouges.

Dans le cas de la thermographie quantitative, il va donc être nécessaire de connaître la température du rayonnement réfléchi pour déterminer la température de la paroi.



## A QUELS TYPES DE MURS SONT APPLICABLES CES RECOMMANDATIONS ?

### Le mur à colombage comme terrain d'expérimentation

Le projet FaHeBA, consacré aux façades hétérogènes de bâtiment ancien, s'est concentré sur les **murs en pan de bois** (ou murs à colombage). Les bâtiments à pan de bois sont constitués d'une ossature bois et d'un matériau de remplissage. Le matériau de remplissage peut varier en fonction de la région et de la période de construction : torchis, brique, pierre, etc.

### Les types de parois « compatibles » avec la méthode

Les bonnes pratiques décrites dans ce guide à propos des précautions à prendre lors de prises de vues à l'aide d'une caméra thermique peuvent être appliquées quel que soit le bâtiment étudié.

**Les modèles numériques développés dans le cadre du projet FaHeBA pour la détermination du coefficient de transmission thermique de la paroi nécessite toutefois qu'il n'y ait pas de lame d'air dans la paroi étudiée.** Il convient donc de faire attention aux doublures rapportées sur des murs plus anciens (par exemple les doublures en briques).



Attention, la connaissance des principales caractéristiques constructives de la paroi étudiée (matériaux constitutifs, ordre de grandeur des épaisseurs, etc.) est indispensable au bon déroulement des mesures et de leur analyse. Elle permet par exemple :

- d'assurer la validité de la prise de vue (la zone ciblée est-elle représentative du bâtiment ?)
- d'interpréter les résultats et identifier d'éventuelles erreurs (les résultats sont-ils cohérents avec la composition de la paroi ?)

Penser à vous renseigner auprès des propriétaires du bâtiment.



## Caméra thermique Caméra infrarouge

Bien que les deux équipements fonctionnent sur le même principe (enregistrement des rayonnements infrarouges), ils n'ont pas le même champ d'application.

**La caméra thermique** sert avant tout à mesurer les émissions thermiques d'une cible.

**La caméra infrarouge** est employée, accompagnée d'un éclairage additionnel, afin de capter des images dans l'obscurité.

## L'utilisation de thermo-puces

Il est parfois possible de compléter les prises de vues par des relevés de températures réalisés à l'aide de **thermo-puces** (comme cela a été fait dans le cadre du projet).

Placées sur le mur à étudier, **elles permettent un enregistrement continu des températures sur un temps plus long que celui de la prise de vue**. Les données sont ensuite récupérables sur un ordinateur.

Une thermo-puce peut également être placée à proximité de la paroi pour mesurer la température de l'air.

Attention à l'endroit de la façade où l'on place les thermo-puces : ne pas cibler les ponts thermiques ou les défauts d'homogénéité. Une prise de vue avec la caméra thermique permet de s'assurer que l'emplacement des puces est représentatif de l'ensemble de la paroi.

Attention à l'interprétation des données : contrairement aux mesures réalisées avec la caméra thermique, on ne connaît pas nécessairement les conditions extérieures sur la durée de l'enregistrement (alors que ces conditions peuvent avoir un impact non négligeable sur les mesures, voir pages suivantes).

## QUEL MATÉRIEL UTILISER POUR LA PRISE DE VUE ?

Il existe une grande variété de caméras thermiques, adaptées aux différentes applications de la thermographie et terrain de mise en œuvre (laboratoire, extérieur, etc.).

Dans le cadre du projet FaHeBA, dans un souci de reproductibilité en situation de travail par les acteurs du Bâtiment, les partenaires ont choisi de réaliser les mesures à l'aide d'une **caméra thermique portable haute définition**.

Ce choix constitue un bon compromis entre performance (la thermographie quantitative nécessite une grande qualité de mesure afin de pouvoir exploiter les mesures) et simplicité d'utilisation (les prises de mesure nécessitent de se déplacer dans et autour du bâtiment).



Caméra thermique portable haute définition et thermo-puces utilisées dans le cadre du projet FaHeBA (thermo-puces avec leur lecteur et thermo-puces collées sur un mur intérieur).

## QUELLES SONT LES CONDITIONS À VÉRIFIER AVANT DE SE DÉPLACER SUR SITE ?

Dans le cas de figure qui nous intéresse, à savoir **déterminer le coefficient de transmission thermique** d'une paroi, **il est nécessaire, au moment des mesures, que la température en chaque point de la paroi soit stable**. On parle de **régime permanent**, les températures en chaque point de la paroi n'évoluent alors pas dans le temps.

Être en régime permanent (ou stationnaire) signifie alors que les flux de chaleur reçus par chacune des surfaces de la paroi n'évoluent pas dans le temps (ni les températures, ni les rayonnements de chaleur reçus). Ces conditions sont difficilement atteignables hors laboratoire, mais il est tout de même possible de se rapprocher de ces conditions.

### A propos des jours qui précèdent les prises de vues

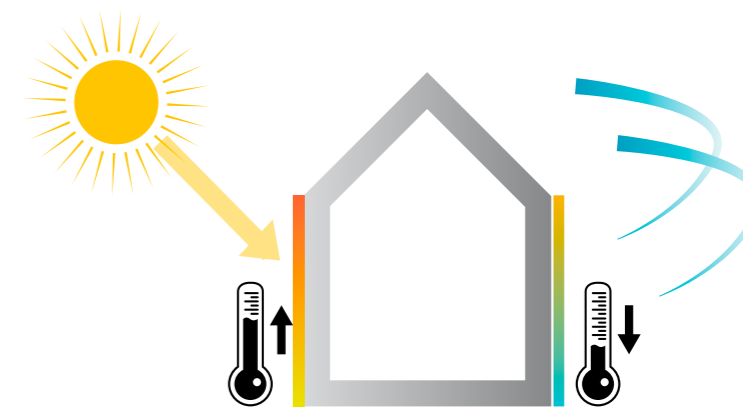
Afin de garantir des conditions « stables » à l'**extérieur** du bâtiment, **il convient de s'assurer, avant de se déplacer sur site, que les variations de la température extérieure ont été inférieures à 3°C au cours des 2 ou 3 jours qui précèdent les mesures**. Ces conditions sont typiquement réunies pour des journées couvertes en hiver.

Afin de garantir des conditions « stables » à l'**intérieur** du bâtiment, **il est indispensable que la température de consigne soit stable au cours des 2 ou 3 jours qui précèdent les mesures**. Attention aux réduits de température la nuit ou en cas d'absence. Ce point devra être discuté avec les occupants du bâtiment en amont des mesures, afin de s'assurer que cette condition est respectée (il pourra parfois être nécessaire de leur demander de ne pas modifier la température de consigne dans la pièce et de veiller à la programmation du thermostat).

### A propos du jour des prises de vue

Afin de garantir la qualité des mesures, les conditions suivantes doivent être réunies :

- **Absence de vent** : celui-ci pourrait diminuer la température de surface de la paroi étudiée (augmentation du flux convectif)
- **Absence d'ensoleillement direct** sur la paroi : celui-ci pourrait augmenter la température de surface
- **Ciel couvert** afin de diminuer le rayonnement infrarouge « parasite » provenant du ciel.



IMPACT DES ÉLÉMENTS EXTÉRIEURS  
SUR LA TEMPÉRATURE DE SURFACE D'UNE PAROI

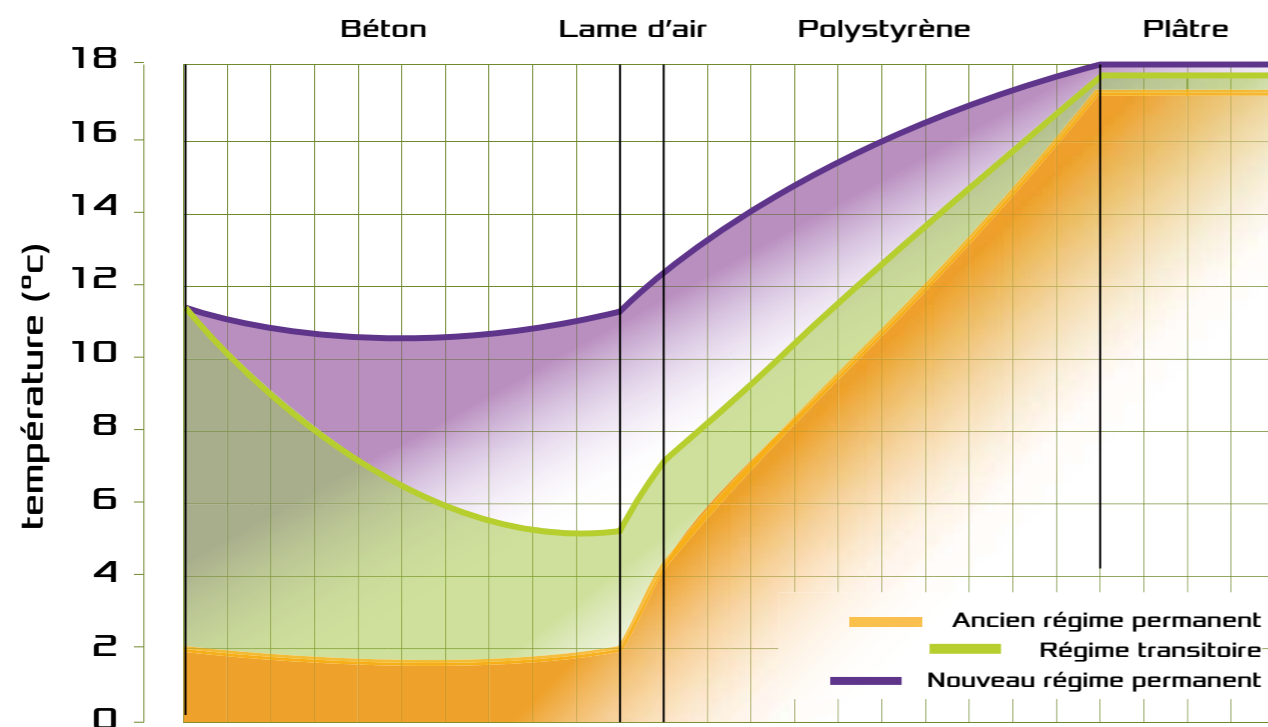
## POURQUOI CHERCHER À ATTEINDRE LE RÉGIME PERMANENT DANS LA PAROI ?

Hors régime permanent, il est très difficile de faire le lien entre la température de surface d'une paroi et le transfert de chaleur qui s'effectue à l'intérieur de celle-ci.

Prenons l'exemple d'une augmentation de la température extérieure : Sous l'effet de cette augmentation, la surface extérieure de la paroi va se réchauffer puis le flux de chaleur va se propager progressivement dans la paroi, de l'extérieur vers l'intérieur, jusqu'à atteindre un nouveau régime stationnaire.

Compte tenu de l'inertie des matériaux constitutifs de la paroi (cette inertie varie d'un matériau à l'autre), le passage d'un régime stationnaire à un autre dure plusieurs heures voire jours.

Des mesures réalisées sur la surface des parois durant ce régime « transitoire » ne seraient pas représentatives du phénomène de transferts thermiques à travers la paroi (la variation de chaleur ne s'étant pas propagée totalement à travers la paroi).

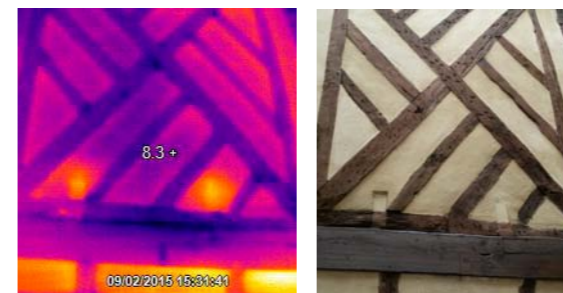


### A RETENIR

- Privilégier des journées couvertes en hiver (aussi bien pour la prise de vue que pour les jours qui précèdent)
- S'assurer que la température de consigne est restée constante dans le bâtiment
- Vérifier qu'il n'y a pas de vent le jour des mesures

## COMMENT S'ASSURER DE LA QUALITÉ DES MESURES SUR PLACE ?

- Penser à réaliser des mesures à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment
- La connaissance des caractéristiques thermiques de la paroi nécessite de connaître les températures de surface de chaque côté de la paroi.
- Multiplier les prises de vues
- Cibler un élément représentatif de la paroi. Il est important d'éviter les « particularités » de la paroi telles que ponts thermiques, portion de mur située derrière un radiateur, fuite d'air, etc. L'élément ciblé doit être représentatif de la structure de la paroi et de son comportement thermique.
- Ne pas hésiter à passer du temps sur une façade. Il est recommandé de passer au minimum 30 minutes par paroi à étudier.



Mise en évidence de ponts thermiques (tâches orangées), non représentatif de la structure de la paroi. (Paris 2015 projet FaHeBA)

### Avant les mesures, déterminer la température du rayonnement réfléchi par la paroi

La température du rayonnement réfléchi peut être déterminée à l'aide d'une feuille d'aluminium froissée puis dépliée. Il suffit de placer la feuille à proximité de la paroi et de la cibler avec la caméra thermique (avec une émissivité réglée sur 1)

Cette température, appelée **RTC** (Reflected Temperature Compensation), est indispensable pour s'assurer de la qualité des mesures. Elle est à saisir dans la caméra thermique.

### Penser à mesurer la température de l'air ambiant

La température de l'air ambiant (extérieur comme intérieur) peut être mesurée à l'aide d'un morceau de carton peint en noir et placé à quelques centimètres de la paroi. Peint en noir, le morceau de carton ne reflétera pas le rayonnement infrarouge émis par l'environnement. Le seul rayonnement capté par la caméra sera ainsi celui du carton, qui sera à la température de l'air.



Mesures température de rayonnement réfléchi et d'air (Paris 2016 projet FaHeBA)



Mesures des températures de rayonnement réfléchi et d'air en intérieur et en extérieur (Rouen 2015 projet FaHeBA)



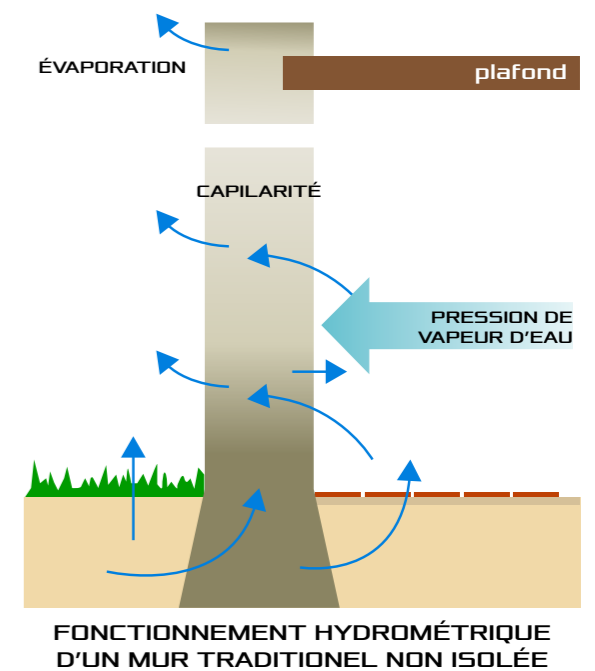
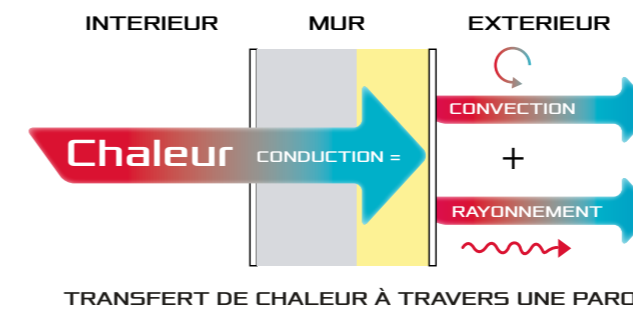


## L'EXPLOITATION DES MESURES DANS LE PROJET FAHEBA

Comment sont exploitées les mesures ?

En régime permanent, le flux thermique qui traverse la paroi (par conduction) est égal au flux thermique qui sort de la paroi au niveau des façades (par convection et rayonnement).

Dans le cadre du projet, des modèles ont été développés pour estimer le coefficient de transmission thermique de la paroi mais également son épaisseur, la conductivité thermique de chaque composant et les coefficients de transfert convectif de chaque côté de la paroi.



### Les limites de cette méthode

Les modèles développés dans le cadre du projet FaHeBA dans le but de déterminer les caractéristiques thermiques de la paroi rencontrent quelques limites que des recherches ultérieures pourront étudier. Les principales limites actuelles sont :

- Le régime permanent rarement atteint en pratique ;
- L'incertitude sur le coefficient de transfert convectif, qui possèdent de nombreuses formulations ;
- L'absence de prise en compte de l'humidité dans la paroi, qui est un élément très important des parois de bâtiments anciens.