

## Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948

### Tâche 2 : Rapport final

DGUHC – Convention n Y07.45-0003597

ADEME – Convention n 0704C0056



## **Auteurs :**

Sihem TASCA-GUERNOUTI – *CETE OUEST*

Julien BERTRON- *CETE OUEST*

Julien BERGER– *CETE OUEST*

Louis BOURRU- *CETE EST*

Florentine JANVIER –*INSA de Strasbourg*

## Sommaire

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | RAPPEL DES OBJECTIFS DE BATAN.....   | 6  |
| 2     | OBJECTIFS DE LA TACHE 2 : ETUDE DU COMPORTEMENT REEL D'UN PANEL DE BATIMENTS ..... | 6  |
| 3     | Protocole d'instrumentation .....  | 6  |
| 3.1   | PRINCIPE GENERALE DE LA METHODE DE RECUEIL DES DONNEES .....                       | 7  |
| 3.1.1 | DONNEES MESUREES.....  | 7  |
| 3.2   | DONNEES RELEVEES.....  | 8  |
| 3.3   | ENVIRONNEMENT EXTERIEUR .....  | 9  |
| 3.3.1 | DONNEES MESUREES.....  | 9  |
| 3.3.2 | DONNEES RELEVEES .....   | 10 |
| 3.4   | ENVIRONNEMENT INTERIEUR.....   | 10 |
| 3.4.1 | DONNEES RELEVEES .....   | 10 |
| 3.4.2 | DONNEES RELEVEES .....   | 11 |
| 3.5   | ENVELOPE DU BATIMENT.....  | 11 |
| 3.5.1 | DONNEES MESUREES.....  | 11 |
| 3.5.2 | DONNEES RELEVEES .....   | 11 |
| 3.6   | EQUIPEMENTS.....   | 11 |
| 3.6.1 | DONNEES RELEVEES .....   | 12 |
| 3.7   | CONSOMMATIONS D'ENERGIE .....  | 12 |
| 3.7.1 | DONNEES MESUREES.....  | 12 |
| 3.7.2 | DONNEES RELEVEES .....   | 12 |
| 3.8   | OCCUPATION .....   | 12 |
| 3.8.1 | DONNEES RELEVEES .....   | 12 |
| 4     | Instrumentation et materiel de mesure.....   | 13 |
| 4.1   | INSTRUMENTATION PAR LOGEMENT .....   | 13 |
| 4.2   | INSTRUMENTATION DU PANEL RESTREINT .....   | 15 |
| 4.3   | SYNTHESE MATERIEL DE MESURE.....   | 18 |
| 4.3.1 | Environnement extérieur .....  | 18 |
| 4.3.2 | Environnement intérieur .....  | 19 |
| 4.3.3 | Consommations énergétiques.....  | 21 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 5      | Traitement des données mesurées : Comparaison du rayonnement global estimé et mesuré ..                                  | 22 |
| 5.1    | Appareil de mesure.....  | 22 |
| 5.2    | Méthodologie.....  | 22 |
| 5.3    | Résultats par station météo disponible .....   | 23 |
| 5.3.1  | Bayonne : .....  | 24 |
| 5.3.2  | Londinières : .....  | 24 |
| 5.3.3  | Noisiel : .....  | 25 |
| 5.3.4  | Vazerac : .....  | 26 |
| 5.3.5  | Saudrupt : .....   | 27 |
| 5.3.6  | Bessenay : .....   | 27 |
| 5.3.7  | Pluvigner : .....  | 28 |
| 5.3.8  | Saint-Julien de Crempse : .....  | 29 |
| 5.3.9  | Carpentras .....   | 29 |
| 5.3.10 | Toutes les stations.....   | 30 |
| 6      | Etude expérimentale des parois extérieures.....  | 31 |
| 6.1    | objectifs.....   | 31 |
| 6.2    | Détermination des propriétés thermo-physiques de la paroi –période hivernale.....  | 32 |
| 6.2.1  | Phase 1 : Identification de la conductivité thermique $\lambda$ , de la masse volumique et de la capacité thermique..... | 33 |
| 6.2.2  | Phase 2 :Identification de la capacité thermique de la paroi .....   | 35 |
| 6.2.3  | cas particuliers .....   | 37 |
| 6.2.4  | résultats pour l’hiver .....   | 40 |
| 6.2.5  | Incertitude sur la conductivité.....   | 40 |
| 6.3    | Détermination des propriétés thermo-physiques de la paroi –période estivale .....  | 41 |
| 6.3.1  | Méthode sinusoïdale .....  | 43 |
| 6.3.2  | protocole adopte .....   | 43 |
| 6.3.3  | Résultats .....  | 43 |
| 6.3.4  | synthèse.....  | 43 |
| 7      | Analyse du comportement réel des batiments .....   | 44 |
| 7.1    | Rappel des typologies du panel restreint .....   | 44 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 7.2      | Consommations énergétiques .....                              | 45 |
| 7.3      | Déperditions thermiques .....                                 | 46 |
| 7.4      | Analyse des phénomènes physiques .....                        | 47 |
| 7.4.1    | Propriétés des transferts thermiques des parois opaques ..... | 47 |
| 7.4.2    | Inertie thermique des parois .....                            | 50 |
| 7.4.3    | Dynamique du bâtiment, sensibilité au climat.....             | 53 |
| 7.4.4    | Confort d’hiver et d’été .....                                | 62 |
| 8        | Retour d’expérience .....                                     | 66 |
| ANNEXE 1 | DOSSIERS PAR BATIMENT   |    |
| ANNEXE 2 | GUIDES DE VISITE ET D’INSTRUMENTATION POUR LE PANEL RESTREINT |    |
| ANNEXE 3 | QUESTIONNAIRE A DESTINATION DE L’OCCUPANT                     |    |

## 1 RAPPEL DES OBJECTIFS DE BATAN

L'étude « connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie » menée par le CETE de l'Est, Le Laboratoire des Sciences de l'Habitat (LASH - DGCB) et l'association Maisons Paysannes de France pour la DGUHC a permis de mettre en évidence trois principaux phénomènes caractérisant le comportement spécifique du bâti ancien:

### 1. Influence de l'environnement local

L'une des spécificités distinguant le bâti ancien du bâti neuf est son insertion environnementale. En effet, son implantation bioclimatique prend en compte le contexte local (micro-climat, topographie...). Ces spécificités ne sont pas prises en compte dans les modèles de calcul actuels notamment réglementaires (ThCE-ex).

### 2. Transferts de chaleur, de masse et d'humidité au sein de l'enveloppe

Le bâti ancien, s'insérant parfaitement dans son environnement, emploie d'une manière générale des matériaux de construction et des modes constructifs locaux. Les enveloppes des bâtiments anciens sont assez hétérogènes et sont composées d'éléments lourds (murs très épais, structure lourde façade-refend...) qui favorisent le phénomène d'inertie thermique. De plus elles sont très sensibles à l'humidité ce qui les rend « perspirantes ».

### 3. Rôle des occupants

Les occupants jouent un rôle important dans le fonctionnement thermique du bâtiment. Leur comportement (scénario d'occupation, scénario de chauffage, scénario de ventilation, température de consigne...) a un impact sur les consommations d'énergie. L'appréhension et la prise en compte de leur comportement sont nécessaires à l'élaboration et à la validation d'un modèle de calcul.

Partant de ces enseignements, le projet BATAN s'inscrit dans la continuité de cette étude. L'objectif de ce projet est d'étudier les phénomènes physiques qui caractérisent le comportement thermique du bâti ancien selon les trois volets cités plus haut afin de développer un nouveau modèle de calcul, adaptés aux spécificités de ce type de bâti.

## 2 OBJECTIFS DE LA TACHE 2 : ETUDE DU COMPORTEMENT REEL D'UN PANEL DE BATIMENTS

Le but de cette tâche est d'étudier le comportement réel d'un panel restreint constitué de 14 bâtiments, défini suite à l'étude typologique (tâche1). L'analyse du comportement réel de ce panel implique une étude « in-situ » et une campagne d'instrumentation approfondie des bâtiments retenus.

## 3 PROTOCOLE D'INSTRUMENTATION

Nous avons adopté une démarche systémique pour l'élaboration de ce protocole (Figure 1). Ainsi pour chaque système étudié, nous avons identifié les données à recueillir et les moyens mis en œuvre pour le faire. Les moyens de recueil sont : la mesure, la visite sur site, l'enquête auprès des occupants et la documentation technique selon la nature de la donnée à collecter. Nous distinguons

donc, deux types de données : les données « mesurées » acquises par l'instrumentation et les données « non mesurées » recueillies par visite, par questionnaire ou en ayant recours à la documentation technique.



Figure 1 : Démarche pour l'élaboration du protocole

Les systèmes retenus sont :

- **L'environnement extérieur**: Il s'agit ici de caractériser les données climatiques du site ainsi que la présence des masques proches et lointains. Ces données sont des variables d'entrée du modèle.
- **L'environnement intérieur**: Il s'agit ici d'avoir la distinction thermique des espaces et de caractériser l'ambiance intérieure des pièces représentatives retenues, afin d'appréhender le comportement thermique du bâti.
- **L'enveloppe du bâtiment** : il s'agit d'avoir les données sur la volumétrie, l'orientation et l'organisation interne ainsi que les différents plans et coupes des façades. L'enveloppe est caractérisée par la composition géométrique et les caractéristiques thermophysiques (parties opaques et transparentes avec occultations), ainsi que la perméabilité à l'air, données d'entrées du modèle. En plus et afin de comprendre les transferts thermiques au sein de l'enveloppe, une paroi se trouvant dans l'une des pièces représentatives sera instrumentée lourdement.
- **Les équipements** : Il s'agit ici de disposer des caractéristiques et des performances des équipements (chauffage, ventilation...), entrées du modèle, ainsi que de leurs consommations, sorties du modèle.
- **Les occupants** : Il s'agit de cerner l'impact exercé par le comportement de l'occupant sur le fonctionnement thermique et la consommation énergétique du bâtiment, notamment en appréhendant ses modes de chauffage et de ventilation.

Nous présentons dans ce qui suit les différentes données « mesurées » et relevées (données recueillies mais non mesurées) nécessaires à la caractérisation du comportement réel du panel étudié, pour chacun des systèmes cités ci-dessus.

### 3.1 PRINCIPE GENERALE DE LA METHODE DE RECUEIL DES DONNEES

#### 3.1.1 DONNEES MESUREES

Principalement, deux types de données sont instrumentés :

- Celles liées au comportement hygrothermique du bâtiment.
- Celles liées à la consommation énergétique du bâtiment.

Le comportement hygrothermique du bâtiment est caractérisé à la fois dans l'espace et dans le temps.

Pour caractériser le comportement hygrothermique du bâtiment en fonction des espaces qui le composent, on effectue des mesures :

- à l'extérieur du logement, afin de caractériser l'environnement de celui-ci et sa sensibilité au climat immédiat.
- à l'intérieur du logement, dans des pièces représentatives (pièce de vie et chambre) afin de caractériser l'occupation et le confort intérieur. Dans le cas de présence d'espace tampon, des mesures y ont été effectuées pour caractériser les déperditions.

Pour caractériser le comportement hygrothermique du bâtiment dans le temps (et mettre en évidence les phénomènes d'inertie):

- La durée des mesures est l'année, afin de mettre en évidence les comportements saisonniers.
- La fréquence d'enregistrement est d'une heure pour permettre d'évaluer les variations journalières.

En ce qui concerne les consommations d'énergie du bâtiment, elles sont mesurées sur les principaux postes (chauffage, ECS) afin de les comparer aux résultats du modèle. La durée d'enregistrement est l'année, et la fréquence est d'une heure.

La procédure d'instrumentation pour chacun des bâtiments retenu dans le panel restreint a fait l'objet d'un rapport (Annexe 2).

## 3.2 DONNEES RELEVÉES

Les autres données sont recueillies, mais non mesurées. Elles portent sur la caractérisation de la performance thermique du bâtiment et son mode d'occupation. Le mode de relevé se fait principalement par visite et par enquête auprès de l'occupant ou en ayant recours à la documentation technique.

Afin de faciliter le recueil des différentes données nous avons élaboré deux documents :

**1- Un guide d'inspection des bâtiments d'habitation** (Annexe 2) qui sert à récolter différentes données lors de la visite sur site. Il regroupe les éléments suivants :

- Informations générales (adresse, nom, année de construction...),
- Descriptif du bâtiment (nombre de niveaux, type de toiture, type de plancher...),
- Description des façades et isolation,
- Description des éléments pièce par pièce (dimensions, compositions des différentes parois, baies, ...),
- Équipements techniques (aération, chauffage, régulation, ECS...),
- Méthode de relevé des masques et diagrammes solaires,

**2- Un questionnaire à destination de l'occupant** (Annexe 3) s'articulant autour des volets suivants :

- Habitation: Appréhension du confort
- Utilisation des systèmes: Appréhension du mode de chauffage

- Ventilation: Appréhension de la ventilation naturelle
- Occupation du logement : Appréhension du mode d'occupation
- Electricité spécifique : estimation des consommations
- Travaux de rénovation

Remarque :

Dans la suite de ce document, les données recueillies par visite ou par questionnaire font référence respectivement, au guide de visite présenté en Annexe 2 et au questionnaire présenté en Annexe 3.

### 3.3 ENVIRONNEMENT EXTERIEUR

#### 3.3.1 DONNEES MESUREES

A l'extérieur, on mesure de façon continue sur une période annuelle (par station météo) :

- la température de l'air extérieur sous abri,
- l'humidité relative de l'air extérieur sous abri,
- le rayonnement global horizontal,
- le rayonnement global vertical (plein sud),
- La vitesse et la direction du vent.

Remarques importantes :

1- Le rayonnement diffus est un paramètre important pour calculer le rayonnement incident sur les parois extérieures. Sa mesure permet de gagner en précision sur l'élaboration du modèle. En revanche, la mesure de ce paramètre est contraignante puisqu'elle nécessite le déplacement hebdomadaire de l'anneau d'ombre. Elle implique donc une importante présence sur les différents sites (toute la France).

Par ailleurs, le recours aux données Météo-France pour ce paramètre n'est possible que pour un seul site à Carpentras (84).

Compte tenu de ces difficultés, la mesure du rayonnement direct n'a pas été retenue. A défaut, nous avons eu recours à des modèles de séparation des rayonnements direct/diffus à partir du rayonnement global qui, quant à lui est mesuré.

2- Quand la pose d'une station météo locale s'est avérée impossible (site urbain dense, toiture inaccessible...), nous avons eu recours à des données Météo-France. Les données acquises, sur une période annuelle avec un pas de temps horaire sont :

- la température sous abri,
- l'humidité relative,
- la pression atmosphérique à l'altitude de la station,
- la vitesse et la direction du vent,

- le rayonnement solaire global,
- le rayonnement solaire direct (pour certains sites).

Sur les deux derniers paramètres, nous apportons les précisions suivantes:

Météo-France dispose de 5 points de mesure pour le rayonnement direct : 2 à Carpentras (84), 1 à Mérignac - Bordeaux (33), 1 dans la Commune des Ouges (21) et enfin 1 à Trappes (78). Pour le rayonnement global, elle dispose de 273 points de mesure ne couvrant pas tous les départements (les grandes villes disposent de cette mesure).

---

### 3.3.2 DONNEES RELEVES

Les données recueillies permettant de caractériser l'environnement extérieur sont :

- le relevé saisonnier des masques,
- la description de l'environnement local (présence de lac, montagnes...),

Le relevé des masques proches et lointains, permet d'évaluer et de prendre en compte les masques (bâtiments, végétations...), permanent ou non qui risquent de s'interposer entre le rayonnement solaire et le bâtiment.

La description de l'environnement local permet la prise en compte de la topographie du site (montagnes, vallées...), du bâti environnant et mitoyen et de la nature des surfaces environnantes. Ces données peuvent avoir une influence sur la température du site, sur le régime du vent ainsi que sur l'intensité du rayonnement solaire réfléchi.

## 3.4 ENVIRONNEMENT INTERIEUR

---

### 3.4.1 DONNEES RELEVES

A l'intérieur, nous avons mesuré de façon continue sur une période annuelle:

---

#### 3.4.1.1 dans la pièce de vie principale :

- la température de l'air intérieur,
- la température résultante sèche,
- l'humidité relative de l'air intérieur,
- le taux de CO<sub>2</sub>.

---

#### 3.4.1.2 Dans la chambre

- La température de l'air intérieur,
- l'humidité relative de l'air intérieur,
- le taux de CO<sub>2</sub> (mesure réalisée une seule fois sur une durée d'une semaine voire 15 jours).

---

#### 3.4.1.3 Dans un espace tampon (s'il existe)

- La température de l'air intérieur

---

### 3.4.2 DONNEES RELEVÉES

Pour prendre en compte l'organisation intérieure du bâtiment, nous avons réalisé :

- Le zonage thermique des espaces constituant le bâtiment et les logements instrumentés.

## 3.5 ENVELOPE DU BATIMENT

---

### 3.5.1 DONNEES MESUREES

#### 3.5.1.1 Instrumentation ponctuelle

Les deux mesures suivantes ont été réalisées :

- Mesure d'étanchéité à l'air,
- Inspections par thermographie infrarouge (mesure qualitative).

La première a pour objectif de quantifier la perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment. La seconde, quant à elle a des visées qualitatives. Elle sert à visualiser : les infiltrations d'air, les hétérogénéités de l'enveloppe, la condensation dans les parois et les ponts thermiques.

#### 3.5.1.2 Instrumentation en continu d'une paroi (pièce de vie principale)

Afin d'étudier les échanges thermiques au sein d'une paroi, nous avons réalisé les mesures suivantes :

- La température de surface extérieure du mur,
- la température de surface intérieure du mur,
- les températures internes du mur à 3 profondeurs.

---

### 3.5.2 DONNEES RELEVÉES

Les éléments nécessaires à la description de l'enveloppe du bâtiment et qui représentent des données d'entrée du modèle sont :

- Le descriptif du bâtiment (nombre de niveaux, type de toiture, type de plancher...),
- la représentation 3D des parois (largeur, longueur, épaisseur),
- la constitution et propriétés thermiques des parois,
- les caractéristiques et dimensions des ouvrants

Les modes de recueil de ces données sont la visite sur site et le recours à différents documents (plans, coupes des façades, documentation technique...).

## 3.6 EQUIPEMENTS

---

### 3.6.1 DONNEES RELEVÉES

Il s'agit ici de recueillir toutes les caractéristiques techniques et les performances des différents systèmes installés dans le logement (chauffage principal, chauffage d'appoint, ECS, ventilation...).

## 3.7 CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE

---

### 3.7.1 DONNEES MESURÉES

Les consommations énergétiques représentent les sorties du modèle de calcul BATAN. Ce dernier a été calé sur la base des consommations effectives (mesurées) des 14 bâtiments.

Notre étude concerne les bâtiments résidentiels d'avant 1948 qui pour la plupart ne sont pas dotés de ventilation mécanique (absence d'auxiliaire de ventilation).

Quelle que soit l'énergie utilisée (combustible, électrique), les postes de consommations qui ont été mesurés sont :

- Le chauffage
- L'eau chaude sanitaire

Dans le cas d'un générateur combustible mixte (production de chauffage et d'ECS), les consommations du logement sont évaluées par mesure. La consommation de l'eau chaude sanitaire a été estimée à partir de la mesure de consommation du combustible en dehors de la saison de chauffe et extrapolée ensuite sur l'année.

Les besoins en chauffage sont estimés en mesurant:

- La température de départ de l'eau à la sortie du générateur,
- la température de retour de l'eau à la sortie du générateur,
- le débit dans le cas d'une pompe à vitesse constante (mesure ponctuelle).

Les besoins en chaud n'ont pas pu être mesurés à cause du débitmètre qui n'était pas adapté à ce type de bâtiments.

---

### 3.7.2 DONNEES RELEVÉES

Les postes concernés ici sont l'éclairage et les apports internes. Il s'agit de réaliser des estimations des puissances installées.

## 3.8 OCCUPATION

---

### 3.8.1 DONNEES RELEVÉES

Il s'agit ici de définir les scénarios suivants :

- Scénario d'occupation (présence-absence) sur différentes périodes types,
- Scénario de gestion du chauffage sur différentes périodes types,

- Scénario de gestion de la ventilation naturelle sur différentes périodes types.

Ces données ont été recueillies en soumettant les occupants au questionnaire présenté en annexe 3.

Les périodes types choisies sont : la journée, la semaine, et l'année.

## 4 INSTRUMENTATION ET MATERIEL DE MESURE

Nous présentons ici, d'une manière sommaire, le matériel utilisé pour l'instrumentation. La figure 2 présente le plan d'instrumentation type d'un logement. La procédure d'instrumentation détaillée est présentée dans le guide d'instrumentation (Annexe 2).

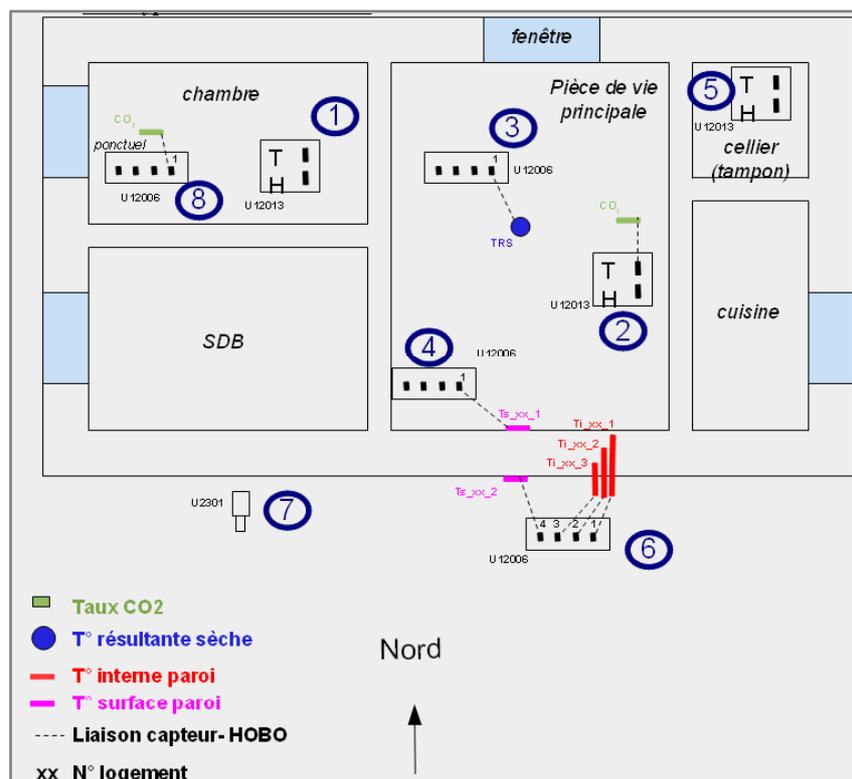


Figure 2: Plan d'instrumentation type

### 4.1 INSTRUMENTATION PAR LOGEMENT

Nous distinguons ici quatre catégories d'instrumentation :

1. Instrumentation de base (Tableau 1) : Elle s'applique à tous les logements,
2. Instrumentation « météo » (Tableau 2) : Elle s'applique par bâtiment et par site. Elle comprend l'implantation d'une station météo portable sur site ou le cas échéant l'achat de données auprès de Météo-France.
3. Instrumentation « énergie » (Tableau 3) : Elle s'applique à tous les logements selon le type d'énergie de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire (combustible ou électrique). Pour cette catégorie d'instrumentation, le matériel et le coût varient selon l'énergie utilisée.
4. Instrumentation ponctuelle : Elle s'applique à tous les logements d'une manière ponctuelle.

Les coûts respectifs des 4 catégories d'instrumentation citées ci-dessus sont présentes dans les tableaux : Tableau 4, Tableau 5, Tableau 6 et Tableau 7.

| Données à recueillir                       |   | Instrumentation:<br>nombre de<br>capteurs | Fréquence<br>d'instrumentation | Enregistreurs associés   |
|--|---|---|--------------------------------|--|
| <b>Intérieur (pièce de vie principale)</b> |   |   |                                |  |
|  | T air   | Sonde (2)                                 | Horaire sur 1 an               | 1 (sondes T/HR intégrées)  |
|  | Hygrométrie                                   |   |                                |  |
|  | T résultante sèche                            | Sonde (1)                                 | Horaire sur 1 an               | 1  |
|  | Taux de CO2                                   | Sonde (1)                                 | Horaire sur 1 an               | 0 (peut être connecté sur une entrée ext de l'enregistreur T/HR) sinon 1 |
| <b>Intérieur (Chambre)</b>                 |   |   |                                |  |
|  | T air   | Sonde (2)                                 | Horaire sur 1 an               | 1 (sondes T/HR intégrées)  |
|  | Hygrométrie                                   |   |                                |  |
| <b>Intérieur (Espace tampon)</b>           |   |   |                                |  |
|  | T air   | Sonde (1)                                 | Horaire sur 1 an               | 1 (sonde T intégrée à l'enregistreur)                                    |
| <b>Étude spécifique d'une paroi</b>        |   |   |                                |  |
|  | T au contact de la paroi extérieure           | Sonde (1)                                 | Horaire sur 1 an               | 1 enregistreur extérieur (étanche)                                       |
|  | Hygrométrie au contact de la paroi extérieure | Sonde (1)                                 | Horaire sur 1 an               |  |
|  | T au contact de la paroi intérieure           | Sonde (1)                                 | Horaire sur 1 an               | 1  |
|  | T interne de la paroi                         | Sonde (3)                                 | Horaire sur 1 an               | 1  |
| <b>Étude de l'enveloppe</b>                |   |   |                                |  |
|  | Étanchéité à l'air                            | blowerdoor (1)                            | Mesure ponctuelle              |  |
|  | Mesures IR                                    | camera (1)                                | Mesure ponctuelle              |  |

Tableau 1 : Instrumentation de base

| Données à recueillir |                               | Instrumentation:<br>nombre de capteurs | Fréquence<br>d'instrumentation | Enregistreurs associés |
|----------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|------------------------|
| <b>Extérieur</b>     |                               |  |                                |                        |
|                      | T air                         | Station météo (1)                      | Horaire sur 1 an               | Intégré aux stations   |
|                      | T point de rosée              |  |                                |                        |
|                      | Hygrométrie                   |  |                                |                        |
|                      | Rayonnement global horizontal |  |                                |                        |
|                      | Pression atmosphérique        |  |                                |                        |
|                      | Vent (vitesse et direction)   |  |                                |                        |
|                      | Rayonnement global vertical   | Pyranomètre (1)                        | Horaire sur 1 an               | 1                      |

Tableau 2: Instrumentation « météo »

| Données à recueillir |                 | Instrumentation<br>(nombre) | Fréquence         | Enregistreurs associés |
|----------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------|------------------------|
| <b>Générateur</b>    | T entrée fluide | Sonde (1)                   | Horaire / 1 an    | 1                      |
|                      | T sortie fluide | Sonde (1)                   | Horaire / 1 an    | 1                      |
|                      | Débit pompe     | Débitmètre à ultrason (1)   | Mesure ponctuelle |                        |
| <b>Chauffage</b>     | Consommation    | Compteur (1)                | Horaire / 1 an    | 1                      |
| <b>ECS</b>           | Consommation    | Compteur (1)                | Horaire / 1 an    | 1                      |

Tableau 3: Instrumentation « énergie »

| Matériel nécessaire à l'instrumentation de base d'un logement |                     |               |                |
|---|---------------------|---------------|----------------|
|   | Nombre par bâtiment | Coût unitaire | Coût total     |
| Enregistreurs   | 8                   | 150 €         | 1 200 €        |
| Sondes CO2  | 1                   | 1 500 €       | 1 500 €        |
| Sondes T  | 8                   | 80 €          | 640 €          |
| Sondes T globe  | 1                   | 150 €         | 150 €          |
| TOTAL € HT >  |                     |               | <b>3 490 €</b> |

Tableau 4: Coût estimatif de l'instrumentation par logement

| Matériel de mesures ponctuelles | Coût     |
|---------------------------------|----------|
| Caméra IR                       | 40 000 € |
| Blowerdoor                      | 10 000 € |
| Débitmètre à ultrason           | 3 500 €  |

Tableau 5: Coût estimatif des mesures ponctuelles

| Matériel nécessaire à l'instrumentation météo d'un bâtiment |   |            |
|---|---|------------|
| Station météo   | 1 | 5 000 € HT |
| Météo France  | 1 | 2 000 € HT |

Tableau 6: Coût estimatif de l'instrumentation « météo » par bâtiment

| Type énergie                           | Type de comptage        | prix unitaire | Installation<br>désinstallation | Total € HT |
|--|-------------------------|---------------|---------------------------------|------------|
| <b>Electricité</b>                     | Pincés ampère-métriques | 100 €         | 800 €                           | 1 050 €    |
|  | module d'enregistrement | 150 €         |                                 |            |
| <b>Fioul</b>                           | Compteurs volumétriques | 500 €         | 800 €                           | 1 450 €    |
|  | module d'enregistrement | 150 €         |                                 |            |
| <b>Gaz</b>                             | compteur                | 150 €         | 800 €                           | 1 100 €    |
|  | module d'enregistrement | 150 €         |                                 |            |
| <b>Générateur<br/>(si combustible)</b> | sonde T (2)             | 80 €          | 0 €                             | 230 €      |
|  | Enregistreur (2)        | 150 €         |                                 |            |

Tableau 7: Coût estimatif de l'instrumentation « énergie » par logement

## 4.2 INSTRUMENTATION DU PANEL RESTREINT

L'étude typologique (tâche 1) a permis la sélection de 19 logements à instrumenter :

- 5 immeubles collectifs (2 à Paris, 2 à Bayonne et 1 à Figeac),
- 2 maisons partagées,
- 7 maisons individuelles.

Ce panel comprend des modes de chauffage différents : 8 logements chauffés au gaz, 8 logements électriques, 2 logements chauffés au fioul et 1 logement disposant d'un poêle à bois.

Les modes de production de l'ECS sont également éclectiques : 8 logements utilisent l'électricité, 9 le gaz et 2 le fioul.

7 logements du panel ont été équipés de stations météo in-situ. L'acquisition de données auprès de météo-France a été nécessaires pour 4 sites : Paris, Bayonne, Figeac et Bollène.

Le tableau 8 présente le panel instrumenté ainsi que les dates des relevés bruts disponibles pour chaque bâtiment.

Les coûts estimatifs de l'instrumentation du panel retenu sont présentés dans le Tableau 9 en fonction des catégories d'instrumentation citées plus haut.

| l <sup>n</sup> logts |            | dpt | Ville                | catégorie implantation | catégorie mode constructif | catégorie matériau | matériau                 | énergie chauffage | énergie ecs | Données météo disponibles | Mesures disponibles     |
|----------------------|------------|-----|----------------------|------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|
| <b>Catégorie I</b>   |            |     |                      |                        |                            |                    |                          |                   |             |                           |                         |
| 1_1                  | Matériau 1 | 64  | Bayonne              | I                      | B                          | 1                  | calcaire extra dur       | gaz               | gaz         | [21/1/2009-05/05/2010]    | [17/12/2008-05/05/2010] |
| 1_2                  |            | 64  | Bayonne              | I                      | B                          | 1                  | calcaire extra dur       | électrique        | électrique  | [21/1/2009-05/05/2010]    | [17/12/2008-10/03/2010] |
| 2_1                  | Matériau 2 | 84  | Bollene              | I                      | A                          | 2                  | calcaire tendre          | gaz               | gaz         | [03/12/08-22/03/2010]     | [03/12/2008-22/03/2010] |
| 3_1                  | Matériau 4 | 64  | Bayonne              | I                      | C                          | 4                  | colombage rempli brique? | électrique        | gaz         | [21/1/2009-05/05/2010]    | pas de mesure           |
| 3_2                  | Matériau 4 | 64  | Bayonne              | I                      | C                          | 4                  | colombage rempli brique? | électrique        | gaz         | [21/1/2009-05/05/2010]    | [17/12/2008-05/05/2010] |
| 4_1                  | Matériau 4 | 64  | Bayonne              | I                      | C                          | 4                  | colombage rempli brique? | électrique        | électrique  | [21/1/2009-05/05/2010]    | [09/12/2008-05/05/2010] |
| 4_2                  | Matériau 4 | 64  | Bayonne              | I                      | C                          | 4                  | colombage rempli brique? | électrique        | électrique  | [21/1/2009-05/05/2010]    | [17/12/2008-05/05/2010] |
| <b>Catégorie II</b>  |            |     |                      |                        |                            |                    |                          |                   |             |                           |                         |
| 5_1                  | Matériau 1 | 75  | Paris                | II                     | A                          | 1                  | calcaire extra dur       | électrique        | électrique  | [26/11/08-23/03/2010]     | [26/11/08-23/03/2010]   |
| 5_2                  |            | 75  | Paris                | II                     | A                          | 1                  | calcaire extra dur       | gaz               | gaz         | [29/11/08-23/03/2010]     | [29/11/08-23/03/2010]   |
| 6_1                  | Matériau 2 | 75  | Paris                | II                     | A                          | 2                  | briques                  | gaz               | gaz         | [28/11/08-23/03/2010]     | [28/11/08-23/03/2010]   |
| <b>Catégorie III</b> |            |     |                      |                        |                            |                    |                          |                   |             |                           |                         |
| 7_1                  | Matériau 1 | 56  | Pluvigner            | III                    | B                          | 1                  | Granit                   | fioul             | fioul       | [25/5/2009-31/05/2010]    | [25/5/2009-31/05/2010]  |
| 8_1                  | Matériau 2 | 55  | Bar le duc           | III                    | A                          | 2                  | calcaire tendre          | gaz               | électrique  | [09/01/09-24/03/2010]     | [09/01/09-24/03/2010]   |
| 8_2                  |            | 55  | Bar le duc           | III                    | A                          | 2                  | calcaire tendre          | électrique        | électrique  | [09/01/09-24/03/2010]     | [09/01/09-24/03/2010]   |
| 9_1                  | Matériau 2 | 77  | Noisiel              | III                    | A                          | 2                  | briques                  | gaz               | gaz         | [30/11/08-23/03/2010]     | [30/11/08-23/03/2010]   |
| 10_1                 | Matériau 3 | 69  | Bessenay             | III                    | A                          | 3                  | pisé                     | bois              | électrique  | [01/12/08-23/03/2010]     | [01/12/08-23/03/2010]   |
| <b>Catégorie IV</b>  |            |     |                      |                        |                            |                    |                          |                   |             |                           |                         |
| 11_1                 | Matériau 1 | 24  | St Julien de Crempse | IV                     | A                          | 1                  | calcaire extra dur       | électrique        | électrique  | [14/1/2009-19/05/2010]    | [14/1/2009-19/05/2010]  |
| 12_1                 | Matériau 2 | 55  | Saudrupt             | IV                     | B                          | 2                  | calcaire tendre          | fioul             | fioul       | [08/01/09-23/03/2010]     | [08/01/09-23/03/2010]   |
| 13_1                 | Matériau 3 | 82  | Vazerac              | IV                     | B                          | 3                  | adobe                    | gaz               | gaz         | [09/01-05/01/2010]        | [08/1/2009-05/05/2010]  |
| 14_1                 | Matériau 4 | 76  | erre de Varenge      | IV                     | C                          | 4                  | colombage torchis        | gaz               | gaz         | [14/01/2009-19/05/2010]   | [14/01/2009-19/05/2010] |

Tableau 8: Récapitulatif du panel restreint instrumenté

| N° logement                         |            | Dept | ville                     | Chauffage    | ECS         | Instrumentation de base €HT | Instrumentation "énergie" €HT | Instrumentation "météo" €HT | Instrumentation ponctuelle |  |
|-------------------------------------|------------|------|---------------------------|--------------|-------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|
| <b>Catégorie I</b>                  |            |      |                           |              |             |                             |                               |                             |                            |  |
| 1_1                                 | Matériau 1 | 64   | Bayonne                   | Gaz naturel  |             | 3 490                       | 1 330                         |                             | 2 926                      |  |
| 1_2                                 | Matériau 1 | 64   | Bayonne                   | Electricité  | Gaz naturel | 3 490                       | 2 150                         |                             |                            |  |
| 2_1                                 | Matériau 2 | 84   | Bollene                   | Gaz          | Electricité | 3 490                       | 2 150                         | 2 000                       |                            |  |
| 3_1                                 |            | 64   | Bayonne                   | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         | 5 000                       |                            |  |
| 3_2                                 |            | 64   | Bayonne                   | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         |                             |                            |  |
| 4_1                                 | Matériau 4 | 64   | Bayonne                   | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         |                             |                            |  |
| 4_2                                 | Matériau 4 | 64   | Bayonne                   | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         |                             |                            |  |
| <b>Catégorie II</b>                 |            |      |                           |              |             |                             |                               |                             |                            |  |
| 5_1                                 | Matériau 1 | 75   | Paris                     | Gaz de ville |             | 3 490                       | 1 330                         | 2 000                       |                            |  |
| 5_2                                 | Matériau 1 | 75   | Paris                     | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         |                             |                            |  |
| 6_1                                 |            | 75   | Paris                     | Gaz          |             | 3 490                       | 1 330                         |                             |                            |  |
| 6_2                                 | Matériau 2 | 75   | Paris                     | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         |                             |                            |  |
| <b>Catégorie III</b>                |            |      |                           |              |             |                             |                               |                             |                            |  |
| 7_1                                 | Matériau 1 | 29   | Concarneau                | Poêle bois   | Electricité | 3 490                       | 1 050                         | 5 000                       |                            |  |
| 8_1                                 | Matériau 2 | 55   | Bar le duc                | Gaz          | Electricité | 3 490                       | 2 150                         | 5 000                       |                            |  |
| 8_2                                 | Matériau 2 | 55   | Bar le duc                | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         |                             |                            |  |
| 9_1                                 |            | 77   | Noisiel                   | Gaz          |             | 3 490                       | 1 330                         | 5 000                       |                            |  |
| 9_2                                 |            | 77   | Noisiel                   | Fioul        |             | 3 490                       | 1 680                         |                             |                            |  |
| 10                                  | Matériau 3 | 69   | Bessenay                  | Fioul        | Electricité | 3 490                       | 2 500                         | 5 000                       |                            |  |
| <b>Catégorie IV</b>                 |            |      |                           |              |             |                             |                               |                             |                            |  |
| 11                                  | Matériau 1 | 24   | St Julien de Crempse      | Electricité  |             | 3 490                       | 1 050                         | 5 000                       |                            |  |
| 12                                  | Matériau 2 | 55   | Saudrupt                  | Fioul        |             | 3 490                       | 1 680                         |                             |                            |  |
| 13                                  | Matériau 3 | 82   | Vazerac                   | Gaz butane   |             | 3 490                       | 1 330                         | 5 000                       |                            |  |
| 14                                  | Matériau 4 | 76   | St Pierre de Varengeville | Gaz propane  |             | 3 490                       | 1 330                         | 5 000                       |                            |  |
| <b>TOTAL €HT</b>                    |            |      |                           |              |             | 73 290                      | 29 740                        | 44 000                      | 2 926                      |  |
| <b>TOTAL€ TTC / instrumentation</b> |            |      |                           |              |             | 87 655                      | 35 569                        | 52 624                      | 3 500                      |  |
| <b>TOTAL €TTC</b>                   |            |      |                           |              |             | <b>179 348</b>              |                               |                             |                            |  |
|                                     |            |      |                           |              |             | CETE OUEST- LRA             |                               |                             |                            |  |
|                                     |            |      |                           |              |             | CETE OUEST- LRB             |                               |                             |                            |  |
|                                     |            |      |                           |              |             | CETE EST                    |                               |                             |                            |  |

Tableau 9: Estimatif des coûts de l'instrumentation du panel restreint

Remarque : Dans ce tableau, nous présentons le bâtiment 7\_1 de Concarneau prévu initialement dans le panel. Nous avons dû arrêter l'instrumentation de ce bâtiment (qui était déjà en place) à cause de gros travaux de rénovation et notamment de réhabilitation thermique. Il a été remplacé au mois de mai 2009 par un autre bâtiment de la même typologie se situant à Pluvigner.

### 4.3 SYNTHÈSE MATÉRIEL DE MESURE

#### 4.3.1 ENVIRONNEMENT EXTERIEUR

| HOBO - U23-001  |   |
|---|---|
| Enregistreur étanche avec sondes intégrées de température et d'humidité relative                              |  |
| <i>Grandeurs mesurées</i>   |   |
| Température   | -40°C à +70°C   |
| Humidité  | 0% à 100%   |
| <i>Caractéristiques générales</i>   |   |
| Précision   | ± 0.2°C de 0 à 50°C<br>± 2.5% de 10 à 90%   |
| Résolution  | 0.02°C à +25°C<br>0.03%   |
| Dérive  | 0.01°C/an<br><1%/an   |
| <i>Fournisseurs, prix</i>   |   |
| Prosensor   | www.prosensor.com   |
| Prix € HT   | 140   |
| <i>Remarques</i>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mémoire : 42000 mesures</li> <li>▪ Dimensions : 102x38 mm</li> </ul> |   |

| S-LIB-M003  |  |
|---|--|
| Sonde « SMART » pour station météo, permettant la mesure de la puissance du rayonnement solaire total.                  |   |
| <i>Grandeurs mesurées</i>   |  |
| Puissance du rayonnement solaire total sur un plan donné  | 0 à 1280 W/m <sup>2</sup><br>Spectre : 300 à 1100 nm                                   |
| <i>Caractéristiques générales</i>   |  |
| Précision   | ±10W/m <sup>2</sup> ou ±5%<br>Azimut erreur : ±2% à 45° de la verticale, rotation 360° |
| Résolution  | 1.25W/m <sup>2</sup>   |
| Dérive  | ±2% par an   |
| <i>Fournisseurs, prix</i>   |  |
| Prosensor   | www.prosensor.com  |
| Prix € HT   | 450  |
| <i>Remarques</i>  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dimension (mm) : Ø32x 41</li> <li>▪ Recalibration possible en usine</li> </ul> |  |

4.3.2 ENVIRONNEMENT INTERIEUR

| HOBO – U12-013   |   |
|--|---|
| Enregistreur miniature autonome de température et d'humidité relative  |  |
| <i>Grandeurs mesurées</i>  |   |
| Température  | -20°C à +70°C   |
| Humidité   | 5% à 95%  |
| <i>Caractéristiques générales</i>  |   |
| Précision  | ± 0.35°C de 0 à 50°C<br>± 2.5% de 10 à 90%  |
| Résolution   | 0.03°C à +25°C<br>0.03%   |
| Dérive   | 0.01°C/an<br><1%/an   |
| <i>Fournisseurs, prix</i>  |   |
| Prosensor  | <a href="http://www.prosensor.com">www.prosensor.com</a>                            |
| Prix € HT  | 120   |
| <i>Remarques</i>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 2 entrées externes pour sonde de températures, CO2, courant AC, tension AC, 4-20mA et tension DC</li> <li>▪ Mémoire : 64Kbits (43000 mesures/12bits)</li> <li>▪ Dimensions(mm) : 22x74x58 Masse :46g</li> </ul> |   |

| HOBO – U12-006  |   |
|---|---|
| Enregistreur miniature autonome à 4 entrées externes  |  |
| <i>Grandeurs mesurées</i>   |   |
| T4 prises externes  | 0 à 2.5 V DC  |
| <i>Caractéristiques générales</i>   |   |
| Précision   | ±2 mV ±2,5 % de la lecture absolue  |
| Résolution  | 0.6 mV  |
| Dérive  |   |
| <i>Fournisseurs, prix</i>   |   |
| Prosensor   | <a href="http://www.prosensor.com">www.prosensor.com</a>                              |
| Prix € HT   | 95  |
| <i>Remarques</i>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mémoire : 64Kbits (43000 mesures/12bits)</li> <li>▪ Dimensions (mm) : 22 x 74 x 58 - Masse : 46 g</li> </ul> |   |

| Thermomètre à globe noir (BN150-45 + TMC6-H-INOX)  |   |
|--|---|
| Il est constitué d'une sphère noire, de diamètre 150 mm, au centre de laquelle est placé sone externe de température sous tube inox (TMC6H-Inox).<br>Il est raccordé à un enregistreur (U12-006 ou U12-013). | <p>ø150 mm</p>  |
| <i>Grandeurs mesurées</i>  |   |
| Température  | -40°C à +120°C  |
| <i>Caractéristiques générales</i>  |   |
| Précision  | ±0,5 °C à +20 °C  |
| Résolution   |   |
| Dérive   |   |
| <i>Fournisseurs, prix</i>  |   |
| Prosensor  | <a href="http://www.prosensor.com">www.prosensor.com</a>  |
| Prix € HT  | 235   |
| <i>Remarques</i>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Câble PVC/PVC, longueur 1,80 m, Ø 4 mm</li> <li>▪ Tube Ø 6 mm, longueur 50 mm</li> </ul>  |   |

| TEL-7001  |   |
|---|---|
| Capteur qui mesure et affiche le niveau de dioxyde de carbone et la température.<br>Il est raccordé à un enregistreur (U12-006 ou U12-013).                                     |  |
| <i>Grandeurs mesurées</i>   |   |
| Taux de CO2   | 0 à 10000 ppm   |
| Température   | 0-40 °C   |
| <i>Caractéristiques générales</i>   |   |
| Précision   | ±50 ppm<br>± 1°C  |
| Résolution  | ± 1 ppm   |
| Dérive  | ±20ppm/an   |
| <i>Fournisseurs, prix</i>   |   |
| Prosensor   | <a href="http://www.prosensor.com">www.prosensor.com</a>                              |
| Prix € HT   | 750   |
| <i>Remarques</i>  |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dimensions (mm) : 38x159x76- Masse : 304g</li> <li>▪ La température mesurée n'est pas transmise à un enregistreur type HOBO</li> </ul> |   |

| <b>TMC6-HD</b>   |   |
|--|---|
| Sonde externe de température de grande précision à raccorder à un enregistreur (U12-006 ou U12-013).   |  |
| <i>Grandeurs mesurées</i>  |   |
| Température  | 40°C à +100°C dans l'air et de -40°C à +50°C dans l'eau                             |
| <i>Caractéristiques générales</i>  |   |
| Précision  | ±0,25 °C à +20 °C   |
| Résolution   | 0,03°C à 20°C   |
| Dérive   |   |
| <i>Fournisseurs, prix</i>  |   |
| Prosensor  | www.prosensor.com   |
| Prix € HT  | 40  |
| <i>Remarques</i>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Câble PVC/PVC, longueur 1,80 m, Ø 4 mm</li> <li>▪ Utiliser pour la mesure des températures des parois (mesures de surfaces et à l'intérieur de la paroi)</li> </ul> |   |

#### 4.3.3 CONSOMMATIONS ENERGETIQUES

| <b>COMPTEUR GAZ GALLUS® 2000 G4</b>  |   |
|--|---|
| Mesure précise des volumes de Gaz pour les usages domestiques, en particulier le gaz naturel, le butane, le propane et l'air comprimé. |                                 |
| <i>Grandeurs mesurées</i>  |   |
| Débit  | $Q_{\min} 0,040 \text{ m}^3 / \text{h} - Q_{\max} 6 \text{ m}^3 / \text{h}$   |
| <i>Caractéristiques générales</i>  |   |
| Température de fonctionnement  | -20°C à + 50°C  |
| Température de stockage  | -40°C à + 60°C  |
| Pression maximale  | 0,5 bars pour les compteurs à enveloppe tôle d'acier<br>1,5 bars pour les compteurs à enveloppe moulée en aluminium |
| Volume cyclique  | 1,2 dm3   |
| <i>Remarques</i>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le compteur a été installé par GRDF est raccordé à un enregistreur type HOBO</li> </ul>       |   |

## 5 TRAITEMENT DES DONNEES MESUREES : COMPARAISON DU RAYONNEMENT GLOBAL ESTIME ET MESURE

La connaissance de la fraction diffuse de l'irradiation solaire sur les sites instrumentés est très importante pour la réalisation du bilan thermique des bâtiments. Cette donnée d'entrée n'est pas disponible directement par la mesure. Cependant, l'irradiation globale sur une surface horizontale est mesurée ajoutée à d'autres variables climatiques (température ambiante, humidité relative) ainsi que l'irradiation globale sur un plan vertical.

A partir de ces données mesurées, l'objectif est d'évaluer les algorithmes de séparation du rayonnement solaire global en ses fractions diffuse et directe en comparant les données mesurées à celles simulées.

### 5.1 Appareil de mesure

Les caractéristiques des pyranomètres utilisés pour mesurer l'irradiation globale (horizontale ou verticale) sont présentées ci-dessus.

### 5.2 Méthodologie

Plusieurs sites instrumentés disposent d'une station météo qui mesure entre autre le rayonnement global horizontal ainsi que le vertical plein sud. Le tableau 12 présente les stations météo étudiées.

Dans un premier temps, les fractions diffuse et directe sur un plan horizontal sont calculées à partir du rayonnement global mesuré. Ensuite le rayonnement global vertical sud est reconstitué à partir de l'estimation des rayonnements diffus et direct sur une surface verticale. Les différents algorithmes utilisés sont présentés dans le tableau 10. Tous les calculs sont réalisés avec TRNSYS 16 (type 16). Enfin, la dernière étape consiste à comparer le rayonnement global vertical calculé à celui mesuré.

|   |        |  |
|---|--------|--|
| Estimation du rayonnement diffus à partir de la mesure du rayonnement global horizontal | Mode 1 | Indice de clarté, hauteur du soleil            |
|   | Mode 2 | Indice de clarté, hauteur du soleil, Text, %HR |
| Estimation du rayonnement diffus sur une surface inclinée                               | Mode 1 | Ciel isotropique                               |
|   | Mode 2 | Modèle de Hay& Davies                          |
|   | Mode 3 | Modèle de Reindl                               |
|   | Mode 4 | Modèle de Perez                                |

Tableau 10: Algorithmes -TRNSYS-TYPE 16<sup>1</sup>

Les indicateurs statistiques utilisés pour la comparaison du rayonnement mesuré/ calculé sont :

<sup>1</sup> TRNSYS 16-Mathematical Reference; pp[5-286 to 5-295]

1- Erreur type: RMSE

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (I_{GVestimé,j} - I_{GVmesuré,j})^2}{N}}$$

2- Moyenne des écarts: MBE

$$\frac{\sum_{j=1}^N (I_{GVestimé,j} - I_{GVmesuré,j})}{N}$$

| Ville       | Latitude    | Longitude   | Relevé               | Période simul  | début simul | fin simul |
|-------------|-------------|-------------|----------------------|----------------|-------------|-----------|
| Bayonne     | 43.29 Nord  | 1.475 Ouest | 21-01-09 au 05-05-09 | 21-01 au 14-04 | 480         | 2472      |
| Noisiel     | 48.85 Nord  | 2.628 Est   | 29-11-08 au 04-06-09 | 01-01 au 04-06 | 0           | 3696      |
| Londinières | 49.83 Nord  | 1.4 Est     | 14-01-09 au 01-10-09 | 15-01 au 01-10 | 336         | 6552      |
| Vazerac     | 44.191 Nord | 1.285 Est   | 08-01-09 au 07-07-09 | 09-01 au 07-07 | 192         | 4488      |
| Saudrupt    | 48.7 Nord   | 5.068 Est   | 08-01-09 au 11-06-09 | 09-01 au 11-06 | 192         | 3864      |
| St Julien   | 44.952 Nord | 0.525 Est   | 06-01-09 au 17-09-09 | 30-04 au 18-06 | 2856        | 4032      |
| Bessenay    | 45.777 Nord | 4.555 Est   | 02-12-08 au 09-06-09 | 03-12 au 28-12 | 8064        | 8664      |
| Pluvigner   | 47.766 Nord | 3.016 Ouest | 28-05-09 au 22-09-09 | 29-05 au 22-09 | 3552        | 6336      |
| Carpentras  | 44.05 Nord  | 5.048 Est   | 03-12-08 au 09-06-09 | 29-03 au 09-06 | 2112        | 3840      |

Tableau 11 : Stations météo étudiées

Remarque : les données d'ensoleillement utilisées pour la ville de CARPENTRAS sont issues d'une station de météo France. Cette station dispose du rayonnement diffus horizontal mesuré ce qui nous a permis, dans ce cas de le comparer directement au rayonnement diffus calculé.

| STATION  | NOM        | DATE et heure GMT+0        | T° sous abri (°C) | Pression (hPa) | vitesse du vent m/s | direction du vent sur une rose de 360° | HR % | rayont global horizontal en J/cm² | rayont solaire direct horizontal en J/cm² | rayont solaire diffus horizontal en J/cm² | rayont global horizontal en W/m² | rayont direct horizontal en W/m² | rayont diffus horizontal en W/m² |
|----------|------------|----------------------------|-------------------|----------------|---------------------|--|------|-----------------------------------|---|---|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 84031001 | CARPENTRAS | 03/12/2008 : 00            | 0,1               | 1001,1         | 1,6                 | 220                                    | 78   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 9        | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 01 | -0,1              | 1000,5         | 2,3                 | 260                                    | 80   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 4        | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 02 | -1,3              | 1000,2         | 0,6                 | 150                                    | 88   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 5        | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 03 | -1,9              | 999,0          | 1,3                 | 250                                    | 89   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 6        | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 04 | -2,6              | 999,2          | 1,7                 | 90                                     | 93   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 7        | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 05 | -2,8              | 998,7          | 1,4                 | 80                                     | 92   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 8        | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 06 | -3,1              | 998,6          | 1                   | 190                                    | 92   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 9        | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 07 | -2,6              | 998,4          | 0                   | 0                                      | 89   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 10       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 08 | -1,4              | 998            | 1,6                 | 170                                    | 86   | 10                                | 18  | 27,8                                      | 50,04                            | 0                                | 0                                |
| 11       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 09 | 1,4               | 997,9          | 1,3                 | 80                                     | 75   | 34                                | 14  | 94,52                                     | 38,92                            | 0                                | 0                                |
| 12       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 10 | 3                 | 997,6          | 0,5                 | 40                                     | 74   | 25                                | 0   | 69,5                                      | 0                                | 0                                | 0                                |
| 13       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 11 | 3,5               | 997,2          | 0,6                 | 140                                    | 82   | 25                                | 0   | 69,5                                      | 0                                | 0                                | 0                                |
| 14       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 12 | 4,3               | 996            | 3,2                 | 70                                     | 88   | 0                                 | 0   | 100,08                                    | 0                                | 0                                | 0                                |
| 15       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 13 | 4,8               | 995,6          | 2,5                 | 80                                     | 91   | 26                                | 0   | 72,28                                     | 0                                | 0                                | 0                                |
| 16       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 14 | 5,7               | 994,7          | 2,4                 | 80                                     | 85   | 16                                | 0   | 41,7                                      | 0                                | 0                                | 0                                |
| 17       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 15 | 6,1               | 994,0          | 2,1                 | 100                                    | 84   | 6                                 | 0   | 16,68                                     | 0                                | 0                                | 0                                |
| 18       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 16 | 6                 | 994,9          | 1,3                 | 110                                    | 85   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 19       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 17 | 5,7               | 995,3          | 0                   | 0                                      | 87   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 20       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 18 | 4,3               | 996,2          | 1,6                 | 280                                    | 93   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 21       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 19 | 3,6               | 996,3          | 0,6                 | 150                                    | 96   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 22       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 20 | 3,3               | 996,3          | 1                   | 200                                    | 97   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 23       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 21 | 1,8               | 996,3          | 0,5                 | 10                                     | 98   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 24       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 22 | 0,9               | 996,5          | 0,7                 | 140                                    | 99   | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 25       | 84031001   | CARPENTRAS 03/12/2008 : 23 | 1                 | 997            | 0,9                 | 100                                    | 100  | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 26       | 84031001   | CARPENTRAS 04/12/2008 : 00 | 0,8               | 997,1          | 1                   | 100                                    | 100  | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 27       | 84031001   | CARPENTRAS 04/12/2008 : 01 | 1,3               | 997,3          | 0                   | 0                                      | 100  | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 28       | 84031001   | CARPENTRAS 04/12/2008 : 02 | 1,7               | 997,4          | 0,8                 | 170                                    | 100  | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |
| 29       | 84031001   | CARPENTRAS 04/12/2008 : 03 | 2,1               | 998,7          | 1,3                 | 80                                     | 100  | 0                                 | 0   | 0   | 0                                | 0                                | 0                                |

Figure 3 : Données METEO-France pour la ville de Carpentras

5.3 Résultats par station météo disponible

Nous présentons dans ce qui suit, les résultats obtenus pour les différentes stations météo étudiées. Les calculs ont été réalisés en combinant les deux modes (mode 1 et mode 2) d'estimation de la fraction diffuse sur un plan horizontal aux 4 modes (1,2,3 et 4) d'estimation de l'irradiation globale sur un plan incliné (dans notre cas, il s'agit du plan vertical).

Par exemple, le mode 12 est la combinaison du mode 1 pour l'estimation du rayonnement diffus à partir du global horizontal mesuré et du mode 2 de l'estimation de l'irradiation globale sur un plan vertical.

### 5.3.1 BAYONNE :

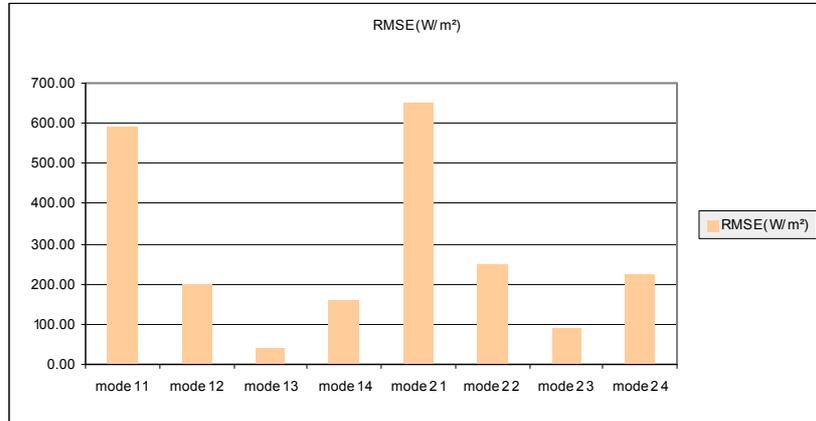


Figure 4 : Erreur type-Bayonne

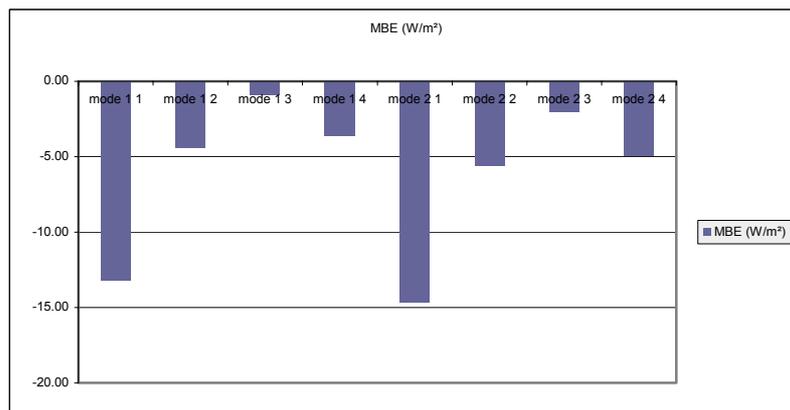


Figure 5 : Moyenne des écarts-Bayonne

Sur la période de mesure disponible, les figures ci-dessus montrent que les modes 1 et 3 permettent d'obtenir les écarts les plus faibles.

### 5.3.2 LONDINIÈRES :

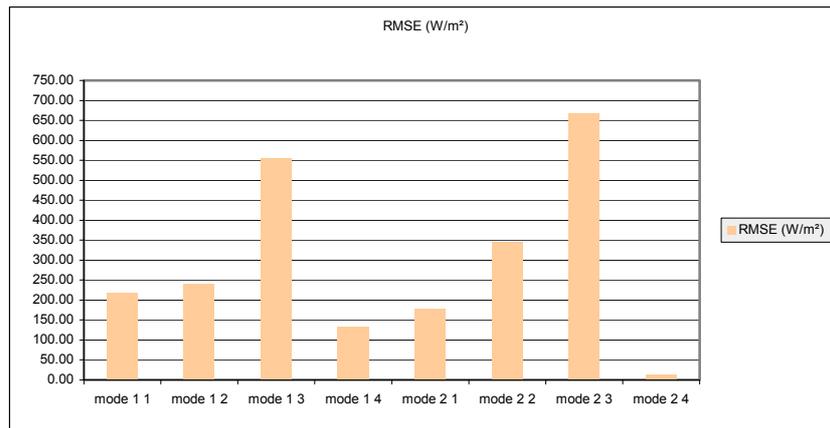


Figure 6 : Erreur type- Londinières

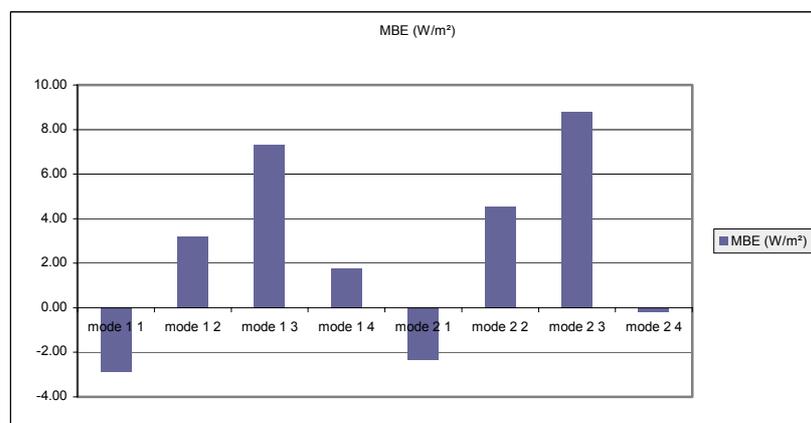


Figure 7 : Moyenne des écarts – Londinières

Sur la période de mesure disponible, les figures ci-dessus montrent que les modes 2 et 4 permettent d’obtenir les écarts les plus faibles.

### 5.3.3 NOISIEL :

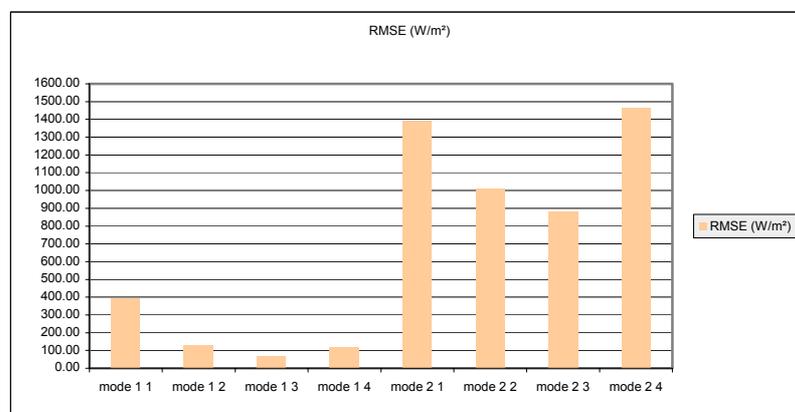


Figure 8 : Erreur type - Noisiel

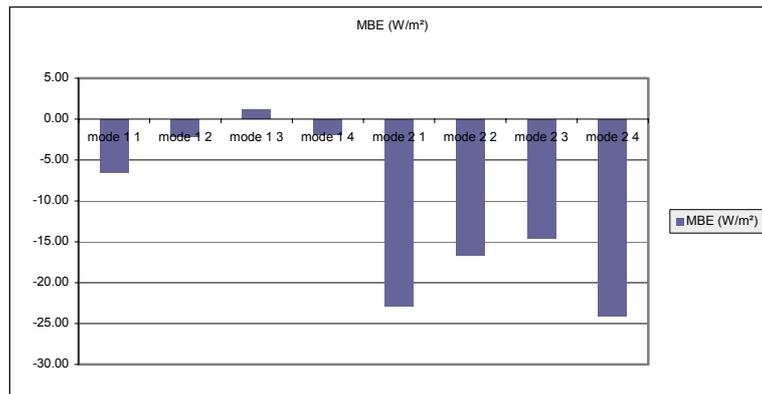


Figure 9 : Moyenne des écarts –Noisiel

Sur la période de mesure disponible, les figures ci-dessus montrent que les modes 1 et 3 permettent d’obtenir les écarts les plus faibles.

5.3.4 VAZERAC :

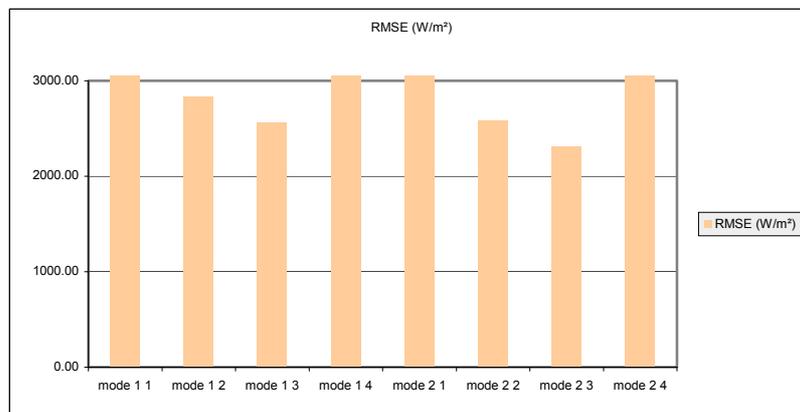


Figure 10 : Erreur type - Vazerac

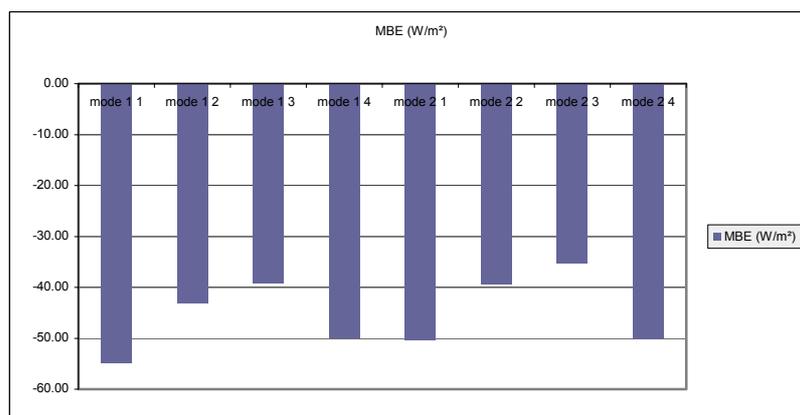


Figure 11 : Moyenne des écarts -Vazerac

Cette station météo présente des écarts importants dus peut être à un mauvais fonctionnement. Aucune conclusion ne peut être émise. Il faudra tester d’autre période de mesures.

5.3.5 SAUDRUPT :

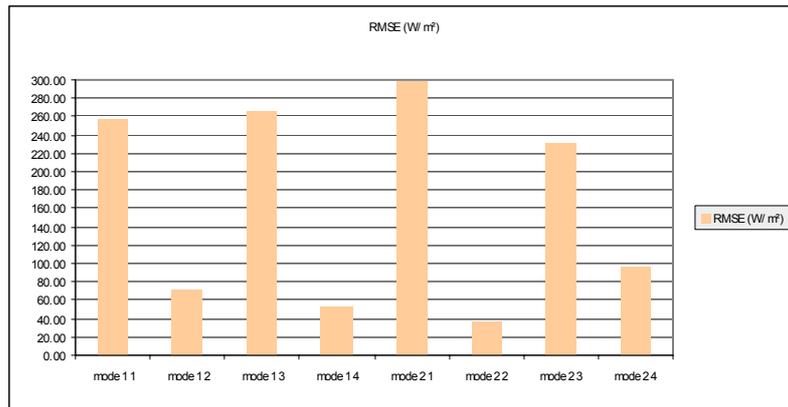


Figure 12 : Erreur type - Saudrupt

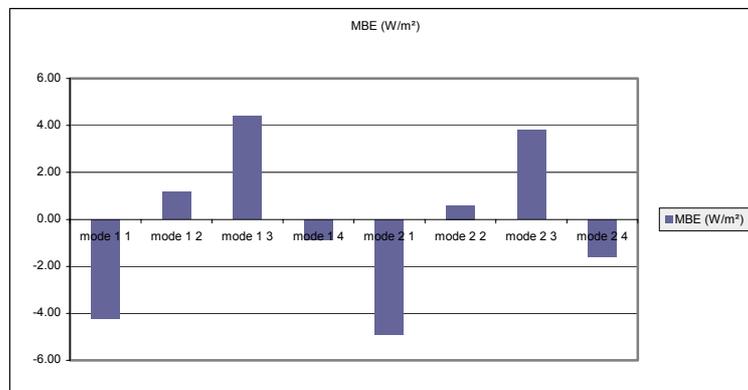


Figure 13 : Moyenne des écarts -Saudrupt

Sur la période de mesure disponible, les figures ci-dessus montrent que les modes 1 et 4 et les modes 2 et 2 permettent d'obtenir les écarts les plus faibles.

5.3.6 BESSEY : :

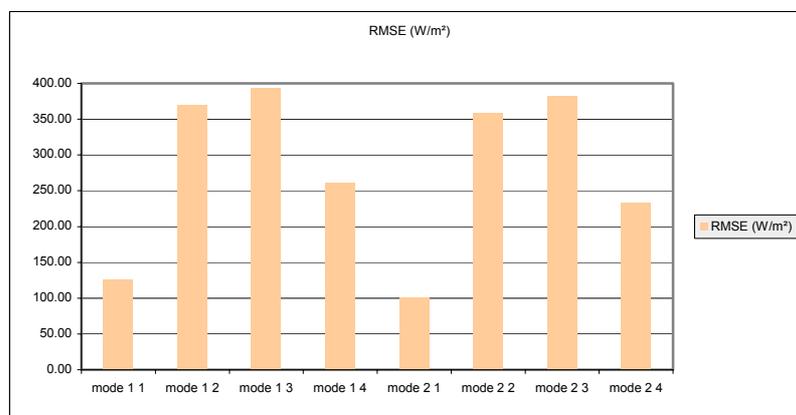


Figure 14 : Erreur type- Bessey

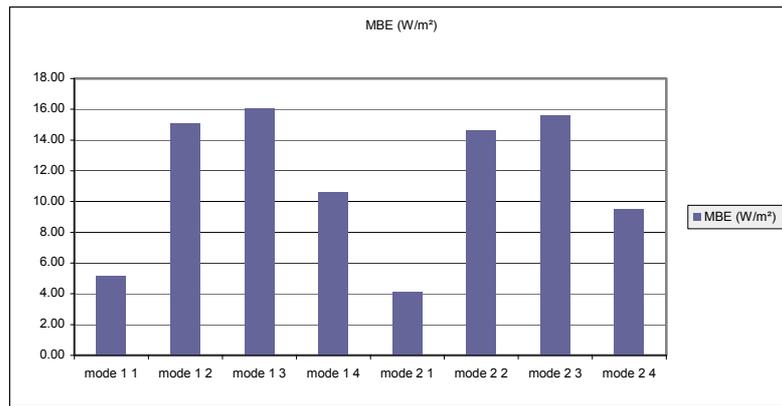


Figure 15 : Moyenne des écarts – Bessenay

Sur la période de mesure disponible, les figures ci-dessus montrent que les modes 2 et 1 permettent d’obtenir les écarts les plus faibles.

5.3.7 PLUVIGNER :

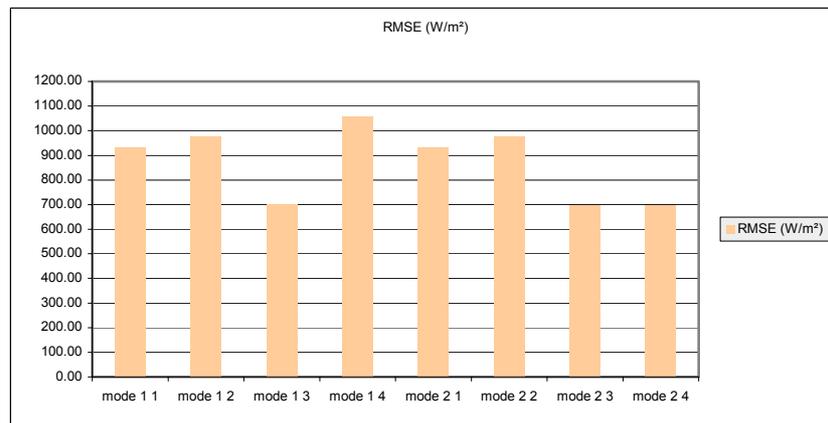


Figure 16 : Erreur type- Pluvigner

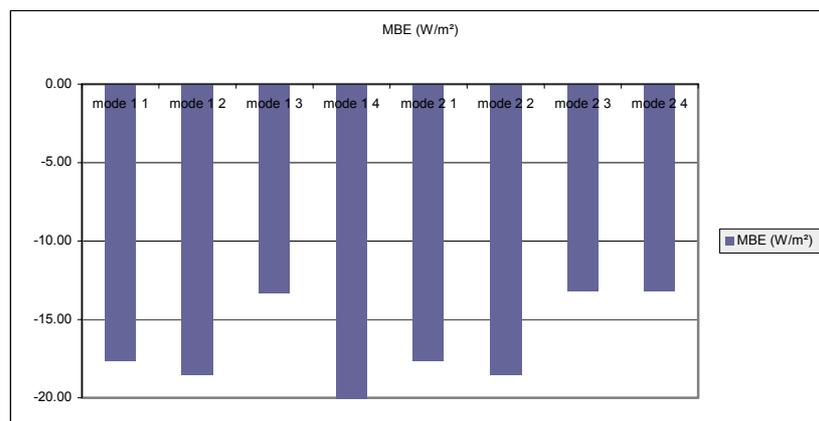


Figure 17 : Moyenne des écarts -Pluvigner

Sur la période de mesure disponible, les figures ci-dessus montrent que les écarts sont importants. Néanmoins, 3 combinaisons de modes semblent mieux estimer le rayonnement global sur un plan vertical : les modes 1-3 ; 2-3 et 2-4.

5.3.8 SAINT-JULIEN DE CREMPSE :

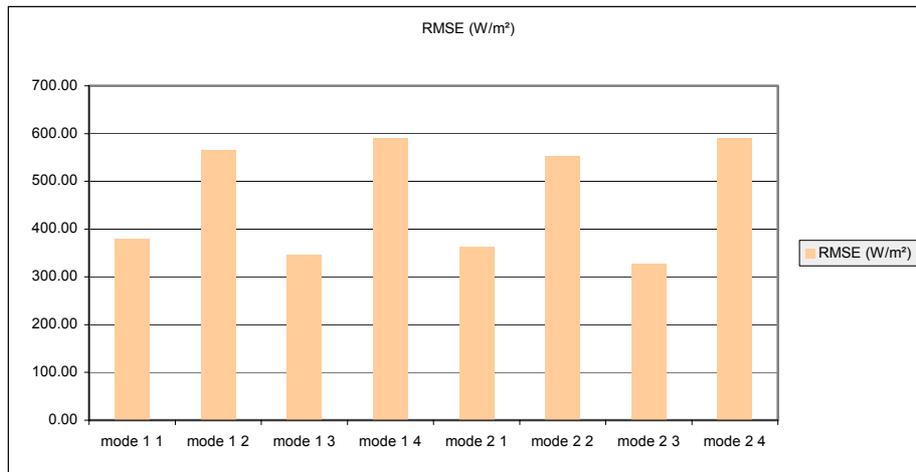


Figure 18 : Erreur type- Saint-Julien de Crempse

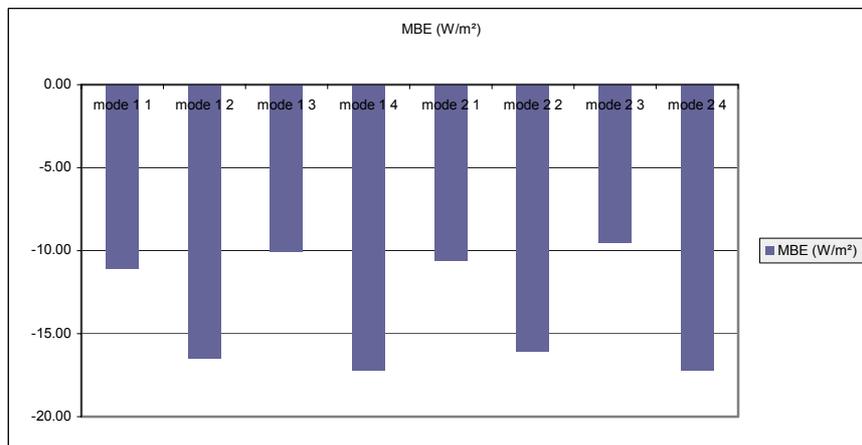
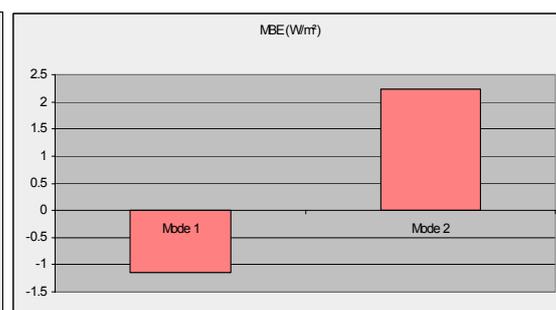
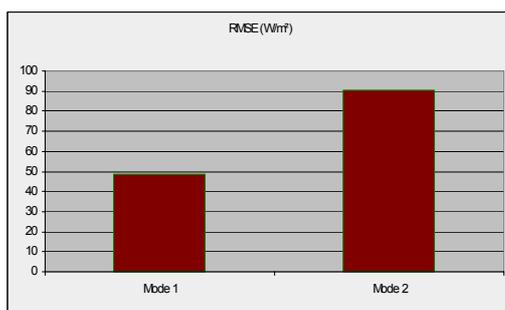
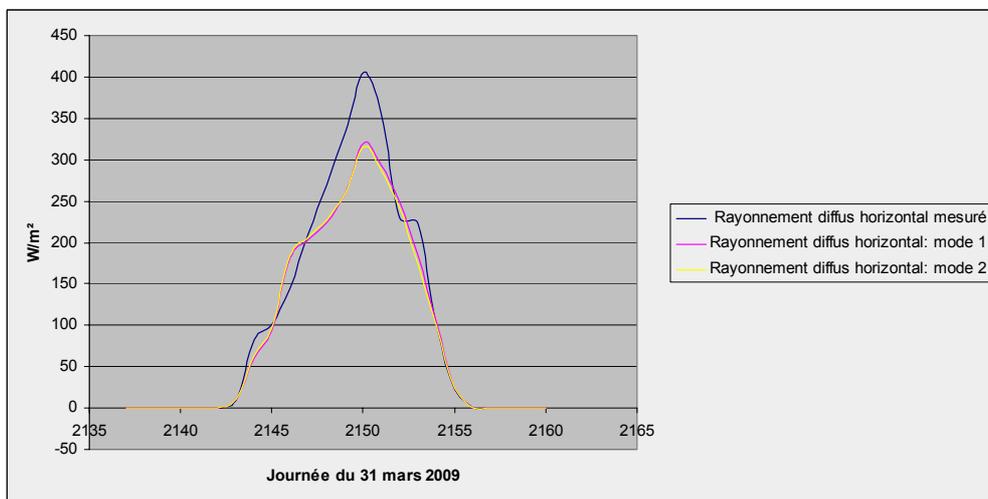
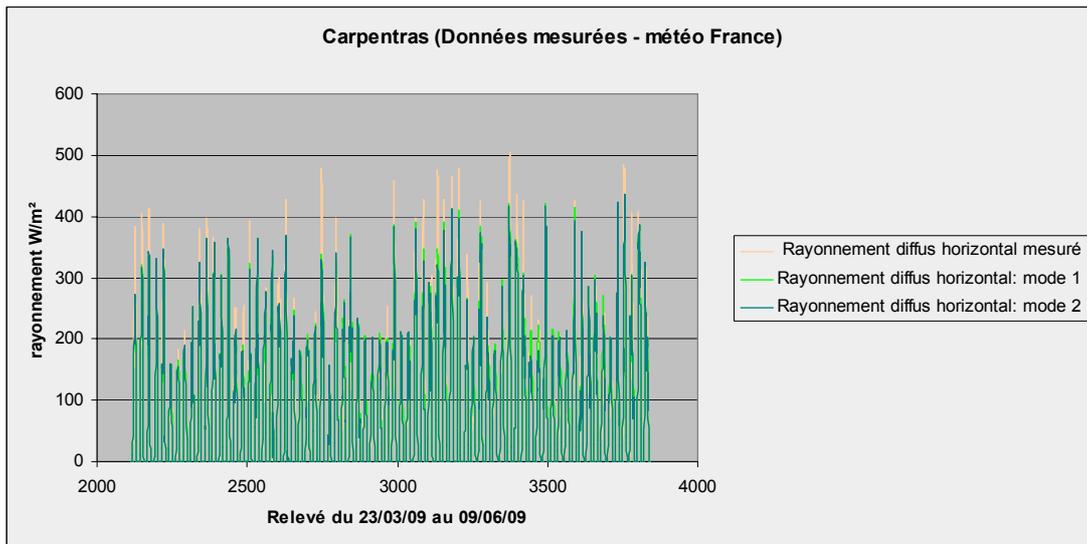


Figure 19 : Moyenne des écarts- Saint-Julien de Crempse

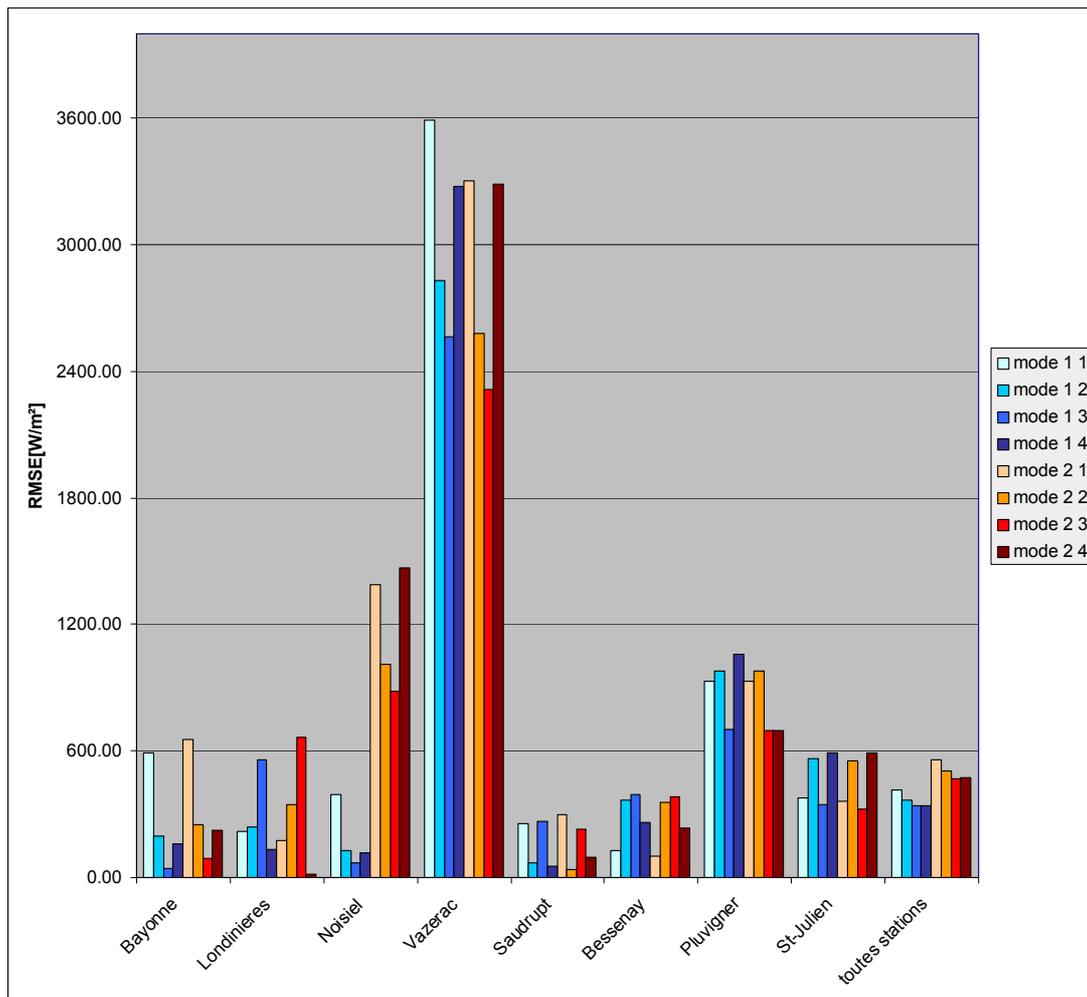
Sur la période de mesure disponible, les figures ci-dessus montrent que 3 combinaisons de modes semblent mieux estimer le rayonnement global sur un plan vertical : les modes 1-3 ; 2-1 et 2-3.

5.3.9 CARPENTRAS



Pour la station météo de Carpentras, Nous avons comparé directement le diffus horizontal calculé et celui mesuré par METEO-France. Nous remarquons sur les courbes ci-dessus que, les deux modes d'estimation 1 et 2 sous-estiment la densité du flux diffus horizontal. Cependant, le mode 1 semble mieux estimer ce flux.

### 5.3.10 TOUTES LES STATIONS



La synthèse des résultats obtenus est présentée dans la figure ci-dessus. Si nous excluons les stations météo de Vazerac et de Pluvigner, nous pouvons constater que les écarts moyens sont inférieurs à 600W/m<sup>2</sup>. Toutefois ; les résultats sont très disparates et ne nous permettent pas de conclure quant au mode de calcul à utiliser. Ces hétérogénéité de calcul peuvent provenir des périodes de simulation qui ne sont pas les mêmes pour toutes les stations météo. Il peut également exister un biais du aux masques solaires qui ne sont pas pris en compte dans les calculs.

## 6 ETUDE EXPERIMENTALE DES PAROIS EXTERIEURES

### 6.1 objectifs

La modélisation thermo-aéraulique des bâtiments nécessite la connaissance des propriétés thermo-physiques des parois extérieures (Figure 20).

La méthode adoptée pour l'identification de ces caractéristiques a été développée par l'INSA de Strasbourg et le CETE de l'Est dans le cadre d'une étude du comportement thermique d'un lycée construit avant 1948. Elle a été adaptée et améliorée par le CETE de l'ouest en collaboration avec le CETE de l'est et l'INSA de Strasbourg afin de l'utiliser pour le projet BATAN. Elle s'appuie sur des mesures in-situ.

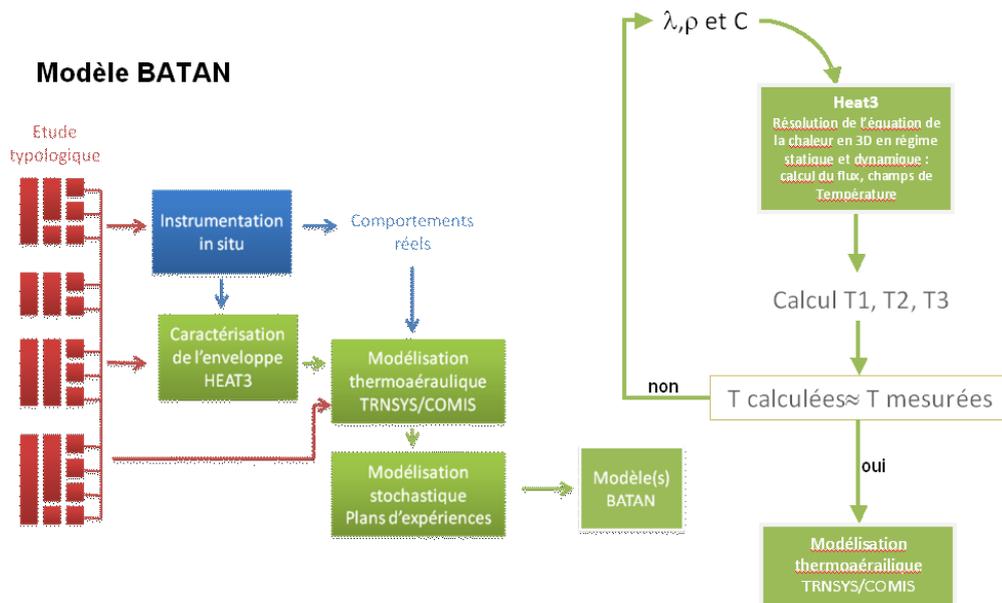


Figure 20: Liens entre modélisation et instrumentation

## 6.2 Détermination des propriétés thermo-physiques de la paroi –période hivernale

Chaque bâtiment instrumenté dispose de cinq points expérimentaux de températures pour une paroi extérieure (L'étude menée par le CETE de l'est et l'INSA de Strasbourg a montré que l'orientation de la paroi n'avait pas d'incidence sur la détermination des propriétés thermo-physiques). Nous avons donc opté pour l'instrumentation de la paroi la plus ensoleillée.

Les cinq points de mesure concernent les températures superficielles intérieure et extérieure de la paroi ainsi que les températures à trois profondeurs de la paroi.

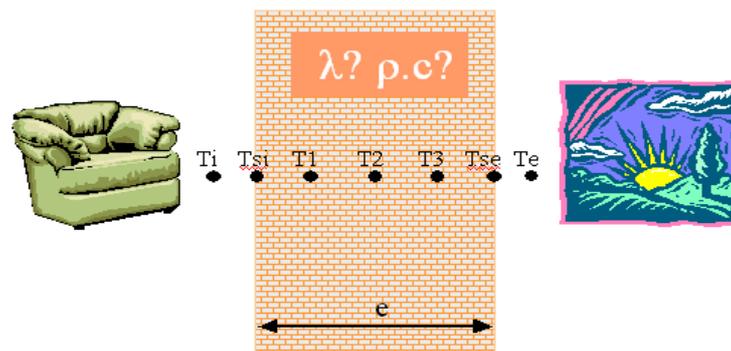


Figure 21 : Points de mesure d'une paroi extérieure

La méthode consiste, tout d'abord à identifier la conductivité thermique  $\lambda$  sous la forme d'un domaine de variation permettant de vérifier la continuité des flux de chaleur au niveau de la face intérieure de la paroi.

Ensuite, l'identification de la capacité thermique  $\rho.C_p$  se fait à partir d'un modèle aux différences finies du comportement thermique du mur, par comparaison entre les valeurs expérimentales et

celles issues du modèle et ce en fixant des valeurs de conductivité thermique compte tenu du domaine de variation établi précédemment.

Dans ce qui suit, nous allons commencer par présenter la méthode d'identification de la conductivité thermique pour l'hiver. Nous présenterons ensuite le modèle développé qui permet de confirmer ou de réévaluer les valeurs retenues pour les paramètres thermo-physiques de la paroi. Enfin, nous exposerons le protocole adopté pour l'exploitation des données mesurées et la réalisation des calculs pour déterminer  $\lambda$  et  $\rho.C_p$ , afin de répondre au cahier des charges du modèle BATAN. Une synthèse des résultats obtenus sera également présentée.

### 6.2.1 PHASE 1 : IDENTIFICATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE $\lambda$ , DE LA MASSE VOLUMIQUE ET DE LA CAPACITE THERMIQUE

Le flux de chaleur  $Q_v$  échangé par convection entre la surface de la paroi à la température  $T_{si}$  et l'air ambiant dans la pièce à la température  $T_i$  s'écrit :

$$Q_{cv} = h_i(T_{si} - T_i)$$

Où  $Q_{cv}$  est en  $W/m^2$  et  $h_i$  est le coefficient d'échange convectif à l'intérieur en  $W/m^2C$ .

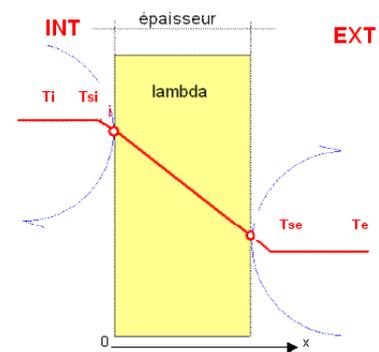
Au contact de la paroi les échanges sont exclusivement conductifs et l'échange de chaleur par conduction vaut :

$$Q_{cd} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}$$

Où  $\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0}$  est le gradient de température normal à la paroi.

Au voisinage de la paroi il y a égalité de ces deux flux.

$$h_i(T_i - T_{si}) = -\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad (1.)$$



La conductivité thermique est évaluée à chaque heure sur la période de chauffe (où le gradient de température entre l'extérieur et l'intérieur est le plus important) grâce à l'équation (1), qui traduit la continuité du flux au niveau de la face intérieure de la paroi.

La dérivée  $dT/dx$  au voisinage de la paroi intérieure est déterminée par régression linéaire à partir des relevés de température  $T_{si}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ . Cette méthode d'ordre 1 a l'avantage d'être simple et de correspondre aux hypothèses d'homogénéité du mur entraînant un gradient de température constant dans celui-ci.

Outre, cette méthode prend en compte :

- La température de surface intérieure du mur, surface sur laquelle est effectuée le bilan thermique.
- Les 3 températures mesurées dans le mur

Afin d'évaluer la qualité de la régression linéaire, le coefficient de corrélation linéaire de Pearson ( $r_{xy}$ ) est calculé :

$$r_{xy} = \frac{cov_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

où

$$cov_{xy} = \sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \sigma_x = \sigma_{xx} \text{ et } \sigma_y = \sigma_{yy}.$$

$r_{xy}$  est alors un nombre compris entre -1 et 1. On considère que l'approximation par la droite des moindres carrés est de bonne qualité si  $|r_{xy}|$  est proche de 1.

En pratique, on estime souvent la régression comme acceptable lorsque  $|r_{xy}| \geq \frac{\sqrt{60}}{2}$ .

---

#### 6.2.1.1 Méthode et résultats

La conductivité thermique n'est évaluée que si l'écart de température ( $T_i - T_{si}$ ) est supérieur à 1°C. Dans le cas contraire, nous considérons que le calcul n'est plus représentatif de la réalité.

La méthode d'évaluation de la conductivité thermique apparente de la paroi instrumentée se décompose en 4 étapes :

- 1- Calcul du flux  $\varphi = h_i(T_{int} - T_{si})$  toutes les heures (avec  $h_i = 7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ),
- 2- Calcul de  $\frac{\partial T}{\partial x}$  toutes les heures,
- 3- Calcul de  $\lambda$  toutes les heures ( $\lambda = \frac{-\varphi}{\frac{\partial T}{\partial x}}$ )
- 4- Sélection des plages de variation des valeurs de  $\lambda$ .

Pour cela, l'intervalle des valeurs de  $\lambda$  allant de 0 à  $\lambda_{max}$  est séparé en plages de 0.25 W/m.K. Les occurrences de valeurs  $\lambda$  calculées comprises dans chacune de ces plages sont calculées ainsi que le pourcentage par rapport au nombre total de valeur considérés.

Les plages de valeur de  $\lambda$  retenues correspondent alors à celle dont le pourcentage d'occurrence est supérieur 10% (figure 22).

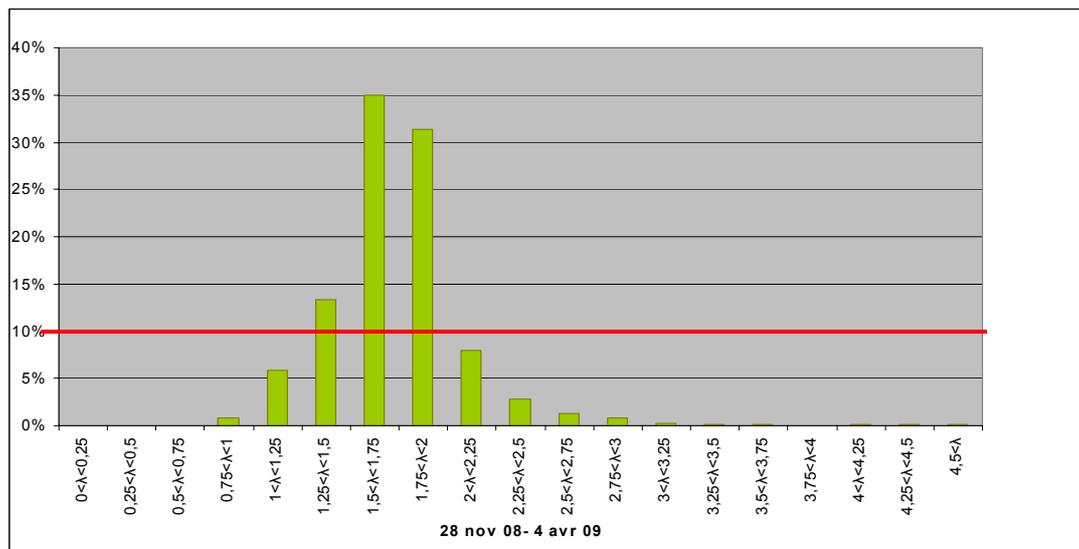


Figure 22 : Plage de variation de la conductivité-logement 6-1

## 6.2.2 PHASE 2 : IDENTIFICATION DE LA CAPACITE THERMIQUE DE LA PAROI

Après avoir établi le domaine de variation de  $\lambda$ , l'étape suivante consiste à identifier la capacité thermique  $p.Cp$ .

L'identification se fait par comparaison de l'évolution spatiale de la température au sein de la paroi issue des relevés expérimentaux et d'une modélisation aux différences finies.

Nous faisons, alors varier séparément  $\lambda$  et  $p.Cp$  pour faire converger les valeurs de températures calculées aux valeurs expérimentales.

### 6.2.2.1 Hypothèse du modèle

- Le modèle développé est issu de la méthode des différences finies en régime instationnaire.
- La paroi est considérée comme homogène.
- Le coefficient d'échange superficiels (convection et rayonnement) intérieur  $h_i$  a une valeur de  $7 \text{ W/m}^2.\text{K}$ .

### 6.2.2.2 Conditions initiales

Les simulations du comportement thermique d'une paroi sont réalisées sur la saison de chauffage. Pour la première semaine de simulation, les conditions initiales sont les valeurs obtenues par mesure :  $T_i, T_e, T_{si}, T_{se}, T_1, T_2, T_3$  (figure 21).

### 6.2.2.3 Calculs effectués

- Calcul des températures dans le mur.
- Comparaisons des 3 températures mesurées au sein de la paroi aux valeurs calculées correspondantes.

### 6.2.2.4 Données d'entrée/ sortie du modèle aux différences finies

**Les données d'entrée du modèle sont :**

- La température de surface intérieure.
- La température de surface extérieure.
- Le coefficient d'échange intérieur  $W/m^2K$ .

**Les paramètres d'entrée à faire varier sont :**

- La masse volumique  $\rho$ , choisie dans la littérature.
- La conductivité thermique  $\lambda$ , déterminée à l'issue de la phase 1.
- La capacité thermique massique  $C_p$ , choisie dans la littérature.

**Les données de sortie du modèle sont :**

- Les températures au sein du mur à  $\Delta x$  d'intervalle.

---

#### 6.2.2.5 Calcul des températures

Le pas de discrétisation  $\Delta x$  du mur est défini de sorte à respecter la condition de stabilité (équation 3). Sa valeur est calculée comme suit :

$$\Delta x \geq \sqrt{\frac{2\lambda_{\max} \Delta t}{(\rho C)_{\max}}} \quad (2.)$$

Après plusieurs tests de sensibilité, le pas de temps des simulation ( $\Delta t$ ) a été fixé à 300 secondes. La condition de stabilité est définie comme suit :

$$F0 \leq 1/2 \quad (3.)$$

avec :

Nombre de Fourier :  $F0 = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}$  ( $\alpha$  : diffusivité thermique,  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C}$  )

- La température d'un point de maillage situé à l'intérieur du mur à une distance  $x$  et à l'instant  $n$  ( $T_x^n$ ) est obtenue grâce à l'équation suivante :

$$T_x^n = F0 T_{(x-\Delta x)}^{(n-1)} + (1-2F0) T_x^{(n-1)} + F0 T_{(x+\Delta x)}^{(n-1)} \quad (4.)$$

Les nœuds de surface sont connus puisque nous disposons des températures de surface des parois par mesure.

---

#### 6.2.2.6 Comparaison des températures simulées et mesurées

Les températures simulées correspondant à celles mesurées sont obtenues par interpolation linéaire. L'écart entre les températures mesurées et simulées est calculé selon l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{1}{\Delta t T_{Mmesurée}} \int_0^{\Delta t} (T_M(t) - T_S(t))^2 dt \quad (5.)$$

Où :

- $\Delta t$  = durée de la simulation en minutes
- $T_{Mmesurée}$  = moyenne des températures mesurées sur la période  $\Delta t$ ,
- $T_M$  : température mesurée à l'instant  $t$ ,
- $T_S$  : température simulée à l'instant  $t$ .
- $dt$  = pas de temps = 5min

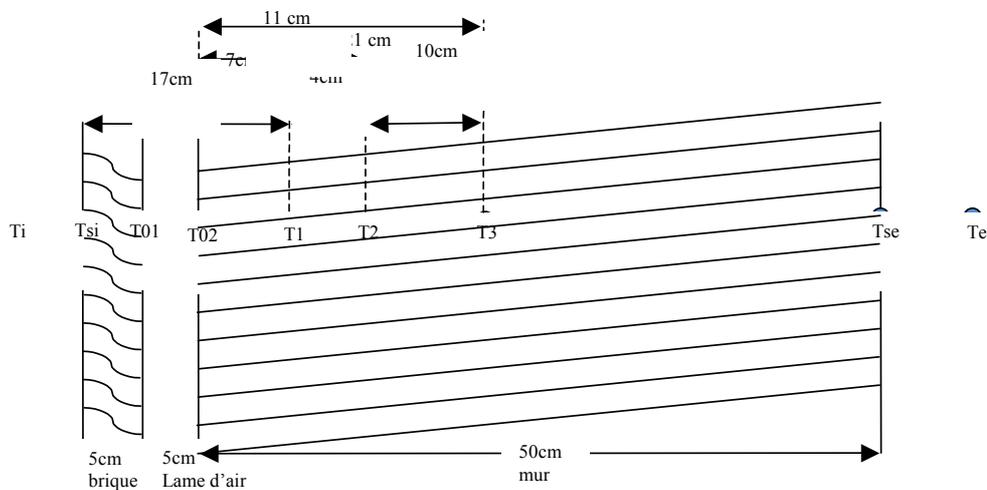
A l'issue de cette analyse, des domaines de variation des valeurs de  $\lambda$  et  $\rho.C_p$  correspondant aux écarts les plus faibles sont retenues.

### 6.2.3 CAS PARTICULIERS

Le panel de bâtiments étudiés présentait deux parois particulières : les parois 12-1 et 8-1. Le calcul est détaillé dans ce qui suit :

#### 6.2.3.1 Etude de la paroi 12-1

La particularité de cette paroi par rapport aux cas classiques est la présence d'une contre-cloison en brique avec une lame d'air légèrement ventilée à l'intérieur du mur dont on cherche la conductivité. La composition de la paroi de l'intérieur vers l'extérieur ainsi que les profondeurs d'implantation, des sondes sont présentées dans les tableaux 13 et 14.



| Matériau       | Papier peint | brique | Lame d'air | Pierre calcaire tendre |
|----------------|--------------|--------|------------|------------------------|
| Épaisseur (cm) | négligeable  | 5      | 5          | 50                     |

Tableau 12 : Composition de la paroi 12-1

| N°         | 1       | 2     | 3     | 4     |
|------------|---------|-------|-------|-------|
| Profondeur | surface | 17 cm | 21 cm | 31 cm |

Tableau 13 Profondeurs d'implantation des sondes

Outre, sur la période de mesure choisie pour le calcul de la conductivité, les températures T1 et T3 mesurées dans le mur n'étaient pas exploitables. Seule la température T2 était cohérente par rapport à toutes les autres températures relevées (Tint, Tsi, Tse, Te).

Nous avons choisi donc, comme données d'entrée les températures : Ti, Tsi, T2 et Tsext. Par ailleurs, nous avons opté pour les hypothèses suivantes :

- $\lambda_{\text{brique}} = 0,44 \text{ W/m.K}$  (conductivité thermique de la brique plâtrière de 5cm, brique creuse à 1 alvéole)<sup>2</sup> ;
- $R_{\text{air}} = 0,075 \text{ m}^2.\text{K/W}$  (résistance thermique de la lame d'air faiblement ventilée)<sup>3</sup>.

**La méthode adoptée pour le calcul de la conductivité thermique consiste à :**

- Calculer le flux de chaleur à partir de Ti et Tsi :  $\text{Flux} = h_i \times (T_i - T_{si})$
- Calculer la température To1 d'interface brique-lame d'air par la formule :

$$T_{o1} = T_{si} - (e_{\text{brique}} / \lambda_{\text{brique}}) \times \text{Flux}$$

- Calculer la température To2 d'interface lame d'air-mur calcaire par la formule :

$$T_{o2} = T_{o1} - R_{\text{lame d'air}} \times \text{Flux}$$

- Calculer le gradient  $\frac{\partial T}{\partial x}$  par régression linéaire sur les 3 points To2, T2, Tsext.

- Calculer la conductivité thermique du mur  $\lambda_{\text{mur}}$  par la formule :  $\lambda_{\text{mur}} = - \frac{\phi}{\frac{\partial T}{\partial x}}$

Nous avons ensuite effectué un calcul de vérification en ne se servant pas des hypothèses sur la brique et la lame d'air. C'est à dire que nous calculons la température To2 par extrapolation à partir de T2 et Tsext. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont très proches, ce qui conforte les hypothèses faites sur la lame d'air et la brique.

Les résultats sont donnés en utilisant les occurrences supérieures à 10% sur des plages de 0,25 W/m.K.

Les résultats avec  $R_{\text{lame d'air}} = 0$  et  $0,15 \text{ m}^2.\text{K/W}$  sont donnés à titre indicatif pour montrer la faible sensibilité du résultat à la valeur prise pour  $R_{\text{lame d'air}}$ .

| Méthode utilisée | $\lambda_{\text{min}}$<br>(W.m.K) | $\lambda_{\text{max}}$<br>(W.m.K) | $\lambda_{\text{moyen}}$<br>(W.m.K) | Coefficient de corrélation<br>moyen de la régression<br>linéaire dT/dx |
|------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--|
|                  |                                   |                                   |                                     |  |

<sup>2</sup> valeur issue de la documentation technique (Imerys, Sico) croisée avec les Th-U

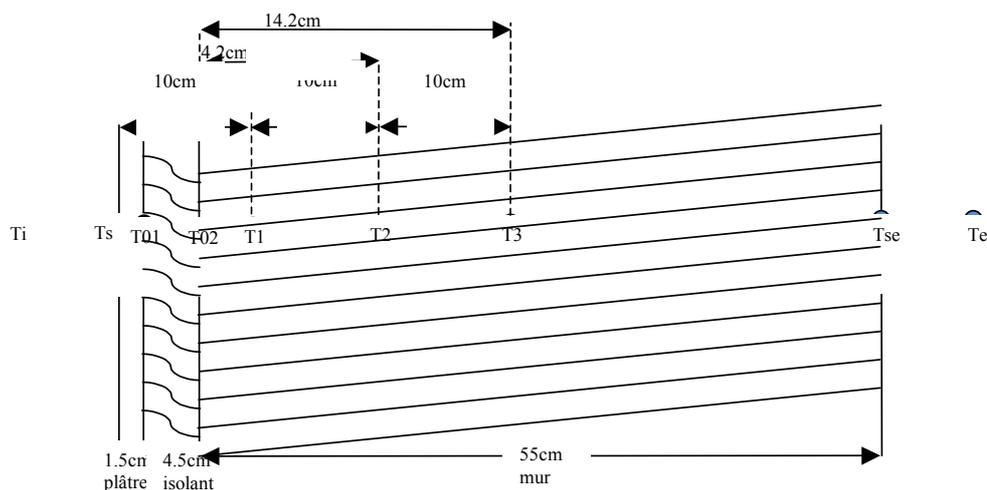
<sup>3</sup> valeur issue des Th-U fascicule 4, chapitre 2.1.2.2 a.2

|  |      |      |      |              |
|--|------|------|------|--------------|
| Méthode 1 (calcul)                             | 0,43 | 1,43 | 1,19 | 0,94         |
| Méthode 2 (vérification)                       | 0,42 | 1,42 | 1,34 | Non appliqué |
| Méthode 1 avec $R_{\text{lampe d'air}} = 0,15$ | 0,44 | 1,44 | 0,95 | 0,81         |
| Méthode 1 avec $R_{\text{lampe d'air}} = 0$    | 0,80 | 1,80 | 1,40 | 0,96         |

Tableau 14 : Synthèse des résultats de la 1<sup>ère</sup> phase de calcul de la conductivité thermique pour la paroi 12-1-

### 6.2.3.2 Etude de la paroi 8-1

La particularité de cette paroi par rapport aux cas classiques est la présence d'isolant dans le mur dont on cherche la conductivité. La composition de la paroi de l'intérieur vers l'extérieur ainsi que les profondeurs d'implantation des sondes sont présentées dans les tableaux 16 et 17.



| Matériau       | Plaque de plâtre | Isolant polystyrène | Mur calcaire |
|----------------|------------------|---------------------|--------------|
| Épaisseur (cm) | 1,3              | 4,5                 | 55 cm        |

Tableau 15 : Composition de la paroi 12-1

| N°         | 1       | 2    | 3     | 4     |
|------------|---------|------|-------|-------|
| Profondeur | surface | 10cm | 20 cm | 30 cm |

Tableau 16 Profondeurs d'implantation des sondes

Pour le calcul de la conductivité thermique de cette paroi, nous utilisons les mesures de températures suivantes :  $T_i$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  en faisant l'hypothèse sur les valeurs de conductivité du plâtre ( $\lambda_{\text{plâtre}}$ ) et de l'isolant ( $\lambda_{\text{isolant}}$ ).

La méthode de détermination de la conductivité du mur consiste alors à :

- Calculer la température T02 à l'interface de l'isolant et du mur en calcaire en utilisant la régression linéaire sur les températures T1, T2 et T3.

- Calculer le flux par la formule suivante : 
$$\phi = \frac{T_i - T_{02}}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_{\text{plâtre}}}{\lambda_{\text{plâtre}}} + \frac{e_{\text{isolant}}}{\lambda_{\text{isolant}}}}$$

- Calculer  $\frac{\partial T}{\partial x}$  par régression linéaire sur T1, T2 et T3.

- Calculer  $\lambda_{\text{mur}}$  en utilisant la continuité du flux à l'interface entre le polystyrène et le mur :

$$\lambda_{\text{mur}} = \frac{-\phi}{\frac{\partial T}{\partial x}}$$

Les valeurs prises pour le calcul sont :  $\lambda_{\text{plâtre}} = 0.35 \text{ W/(m.K)}$  et  $\lambda_{\text{isolant}} = 0.04 \text{ W/(m.K)}$ .

La sélection de la plage de  $\lambda$  et la 2<sup>ème</sup> phase de calcul se déroule de la même façon que pour une paroi classique sans isolant (cf. paragraphes 6.2.1 et 6.2.2).

#### 6.2.4 RESULTATS POUR L'HIVER

Les résultats obtenus pour la période hivernale sont présentés dans le tableau 12. Il est important ici de souligner que ces résultats n'ont pas la prétention de déterminer les propriétés thermophysiques des matériaux anciens mais plutôt la conductivité et la thermiques apparentes de la paroi instrumenté. C'est à dire d'une paroi homogène équivalente au mur étudié.

| Id Bat | Matériaux                    | BATAN         |      |                        |      | RT 2005/ autres sources |      |                |      |
|--------|------------------------------|---------------|------|------------------------|------|-------------------------|------|----------------|------|
|        |                              | Lambda (W/mK) |      | Rho * C (10^6) (J/m3K) |      | Lambda                  |      | Rho * C (10^6) |      |
|        |                              | Min           | Max  | Min                    | Max  | Min                     | Max  | Min            | Max  |
| 1.1    | Moellons et pierre brute     | 1.75          | 2.25 | 2.00                   | 2.60 | 1.70                    | 2.30 | 2.20           | 2.60 |
| 1.2    | Moellons et pierre brute     | 2.00          | 2.50 | 2.00                   | 2.60 | 1.70                    | 2.30 | 2.20           | 2.60 |
| 2      | Calcaire tendre              | 0.50          | 0.75 | 1.50                   | 2.70 | 0.85                    | 1.10 | 1.60           | 1.80 |
| 3.1    | Torchi                       | Pas de mesure |      |                        |      | 0.12                    | 1.05 | 0.30           | 1.80 |
| 3.2    | Torchi                       | 0.10          | 0.60 | 1.10                   | 1.90 | 0.12                    | 1.05 | 0.30           | 1.80 |
| 4.1    | Torchi                       | Pas de mesure |      |                        |      | 0.12                    | 1.05 | 0.30           | 1.80 |
| 4.2    | Torchi                       | 0.50          | 1.00 | 1.00                   | 1.80 | 0.12                    | 1.05 | 0.30           | 1.80 |
| 5.1    | Pierre calcaire extra-dure   | 2.50          | 3.75 | 1.40                   | 2.90 | 1.70                    | 2.30 | 2.20           | 2.60 |
| 5.2    | Pierre calcaire extra-dure   | 0.75          | 2.25 | 0.30                   | 1.50 | 1.70                    | 2.30 | 2.20           | 2.60 |
| 6.1    | Brique terre cuite et pierre | 1.25          | 2.00 | 0.30                   | 2.70 | 0.34                    | 1.04 | 1.00           | 2.40 |
| 7      | Pierre granite               |               |      |                        |      | 2.80                    | 2.80 | 2.50           | 2.70 |
| 8.1    | Calcaire tendre              | 0.34          | 1.09 | 0.10                   | 0.60 | 0.85                    | 1.10 | 1.60           | 1.80 |
| 8.2    | Calcaire tendre              | Pas de mesure |      |                        |      | 0.85                    | 1.10 | 1.60           | 1.80 |
| 9      | Brique cuite                 | 0.50          | 0.75 | 0.80                   | 1.50 | 0.34                    | 1.04 | 1.00           | 2.40 |
| 10     | Pisé terre crue              | 0.75          | 1.75 | 1.30                   | 4.20 | 0.47                    | 0.93 | 1.50           | 1.90 |
| 11     | Calcaire                     | 1.50          | 2.75 | 0.50                   | 1.90 | 0.85                    | 1.10 | 1.60           | 1.80 |
| 12     | Calcaire tendre              | 0.45          | 1.20 | 1.00                   | 3.00 | 0.85                    | 1.10 | 1.60           | 1.80 |
| 13     | Brique terre crue            | 2.34          | 2.84 | 0.70                   | 1.60 | 0.47                    | 0.93 | 1.50           | 1.90 |
| 14     | Torchi                       | 0.10          | 1.00 | 0.50                   | 1.90 | 0.12                    | 1.05 | 0.30           | 1.80 |

Tableau 17: Récapitulatif des résultats obtenus

#### 6.2.5 INCERTITUDE SUR LA CONDUCTIVITE

Comme nous l'avons vu plus haut, la conductivité thermique se calcule comme suit :

$$\lambda = \frac{h \times (T_{int} - T_{si})}{\frac{dT}{dx}} = \frac{h \times \Delta T_1 \times \Delta x}{\Delta T_2}$$

avec  $\Delta T_1 = T_{int} - T_{si}$  et  $\Delta T_2 = T_{profondeur 2} - T_{profondeur 3}$

L'erreur absolue de la conductivité thermique est déterminée comme suit :

$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial h} dh + \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T_1} d\Delta T_1 + \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta x} d\Delta x + \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta T_2} d\Delta T_2$$

$$d\lambda = \frac{\Delta x \times \Delta T_1}{\Delta T_2} dh + \frac{h \times \Delta x}{\Delta T_2} d\Delta T_1 + \frac{h \times \Delta T_1}{\Delta T_2} d\Delta x - \frac{h \times \Delta T_1 \times \Delta x}{\Delta T_2^2} d\Delta T_2$$

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta x \times \Delta T_1}{\Delta T_2} \Delta h + \frac{h \times \Delta x}{\Delta T_2} \Delta\Delta T_1 + \frac{h \times \Delta T_1}{\Delta T_2} \Delta\Delta x + \frac{h \times \Delta T_1 \times \Delta x}{\Delta T_2^2} \Delta\Delta T_2$$

L'incertitude élémentaire sur les mesures de température dans l'air (grandeur  $T_i$ ) est de  $\pm 0,35$  °C, et celle des sondes de contact (grandeurs  $T_{si}$ ,  $T_2$  ou  $T_3$ ) est de  $\pm 0,25$  °C. Celle sur la mesure de profondeur est de  $\pm 1$ cm. L'incertitude sur le coefficient  $h$  est considérée comme nulle car cette grandeur n'est pas mesurée (hypothèse de calcul).

|                                       |                                    |                                       |                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| $\Delta\Delta T_2 = \mp 0,50$ °C      | $\Delta\Delta x = \pm 0,02$ m      | $\Delta\Delta T_1 = 0,60$ °C          | $\Delta h = 0$ W/m <sup>2</sup> . °C |
| $\Delta T_{2 \text{ moyen}} = 5,0$ °C | $\Delta x_{\text{moyen}} = 0,25$ m | $\Delta T_{1 \text{ moyen}} = 5,0$ °C | $h = 7$ W/m <sup>2</sup> . °C        |
| $\Delta\lambda = 0,52$ W/m. °C        |                                    |                                       |                                      |

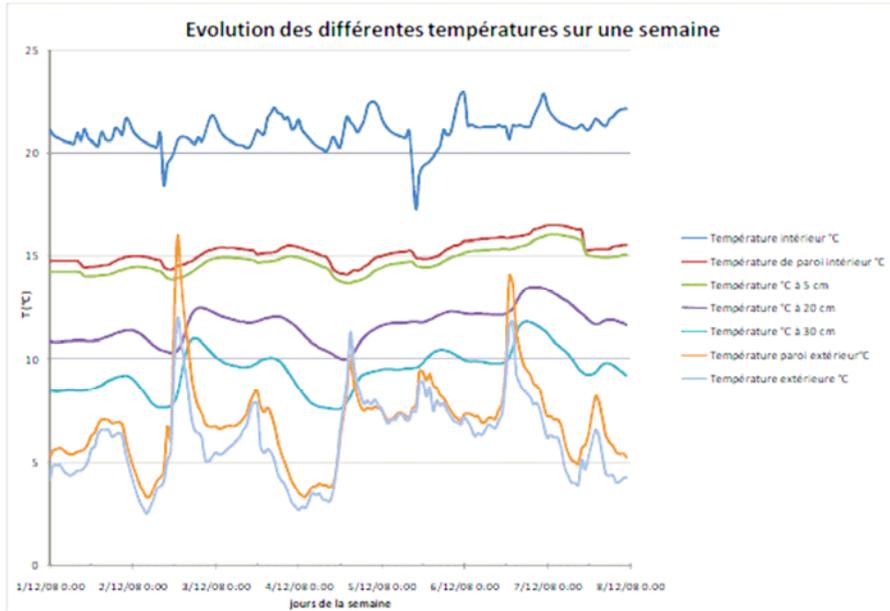
### 6.3 Détermination des propriétés thermo-physiques de la paroi –période estivale

Contrairement aux mesures effectuées en hiver, les relevés de températures dans le mur durant l'été montrent des oscillations régulières en temps et en amplitude (figure 23). Ces oscillations rendent difficilement exploitables la méthode de calcul de la conductivité thermique utilisée pour la période hivernale. En effet, cette dernière est basée sur l'hypothèse de la linéarité du gradient de température.

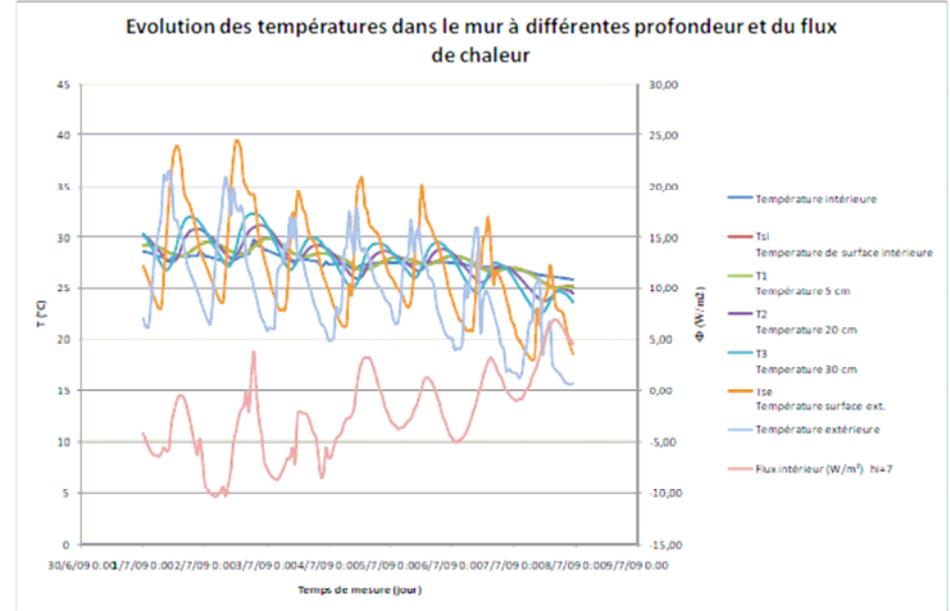
Il est donc très difficile de sélectionner des plages de mesure dont les caractéristiques permettent d'étudier  $\lambda$  de la même façon qu'en hiver :

- Stabilité relative des températures
- Décroissance des températures dans le mur en allant de l'intérieur vers l'extérieur.

Fort de ce constat et afin d'exploiter le caractère sinusoïdal des courbes de températures, nous avons opté pour le développement d'une méthode sinusoïdale pour déterminer la conductivité thermique. La méthode choisie permet une exploitation des relevés de températures pour toute la période d'été.



Hiver



Ete

Figure 23: Evolution de la température au sein d'une paroi durant l'été et l'hiver  
 Logement 5-2 (mur en pierre calcaire dur de 48 cm, orienté sud-est)

### 6.3.1 METHODE SINUSOÏDALE

Cette méthode consiste à résoudre l'équation de la chaleur en cherchant une solution de la forme :

$$T(x, t) = Ae^{-\nu x} \sin(\omega t - \mu x) + B$$

Où  $\omega$  et  $\mu$  sont respectivement la pulsation et l'amortissement.

La diffusivité est alors égale à :  $a = \frac{\Delta x}{2\Delta t \nu}$

Avec comme fréquence :

$$\nu = \frac{\ln\left(\frac{T_1(x_1, t) - T_{10}}{T_2(x_2, t) - T_{20}}\right)}{x_1 - x_2}$$

### 6.3.2 PROTOCOLE ADOPTE

- 1- Identification d'une première plage de variation de la diffusivité. Les plages à retenir sont celles dont les occurrences sont supérieures à 10%.
- 2- En prenant les mêmes valeurs de variation  $\rho$  et  $C_p$  que pour l'hiver (il s'agit des valeurs qui nous ont servi à faire les calculs et non les valeurs retenues pour l'hiver), déduire la plage de variation de la conductivité.
- 3- Application de la méthode des différences finies pour le calcul des températures au sein du mur et détermination des écarts entre la mesure et la simulation.

### 6.3.3 RESULTATS

La méthode a été appliquée à un cas d'étude. Les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants. L'incertitude calculée est du même ordre de grandeur que la valeur de la diffusivité thermique identifiée. Nous pensons que ceci est dû en partie aux sondes de températures utilisées.

### 6.3.4 SYNTHESE

Nous avons développé, dans le cadre du projet BATAN, deux méthodes expérimentales pour la détermination des propriétés thermo-physiques des parois anciennes. Nous avons fait la distinction entre l'été et l'hiver compte tenu du comportement thermique de ce type de bâti qui est différent selon les saisons<sup>4</sup>.

Les résultats obtenus (tableau 12) pour l'hiver et pour les parois des spécimens de bâtiments étudiés sont cohérents avec les valeurs de la réglementation thermique. Cette constatation n'a pas valeur de validation de ce résultat car les valeurs BATAN sont obtenues **pour des parois considérées comme homogènes**, ce qui n'est pas le cas dans la réalité alors que les valeurs RT2005 sont données pour caractériser thermiquement les matériaux de construction.

Les résultats obtenus ne concernent donc que les parois étudiées ou celles qui leurs ressembleraient (même composition).

<sup>4</sup> Connaissance du bâti ancien-BATAN1, 2005-2007. CETE est, LASH, MPF

Cette méthode expérimentale à l'échelle 1 nous a permis de constater qu'il est difficile de s'atteler à un tel calcul avec des sollicitations internes et externes que nous ne maîtrisons pas. En effet, plusieurs phénomènes inter-dépendants se produisent en même temps sans que l'on soit capable de les isoler. Par ailleurs, il aurait été plus judicieux de mesurer directement le flux traversant la paroi en plus des mesures de températures. Cela nous aurait permis de valider les coefficients d'échange intérieurs choisis.

La méthode développée doit être améliorée d'une part, en prenant en compte les transferts de masse dans la paroi. D'autre part, elle doit être enrichie par une méthode d'optimisation afin de trouver le triplet ( $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $C_p$ ) le plus approprié au cas étudié.

La méthode développée pour l'été nécessite quant à elle, d'être testée sur d'autres cas et d'être approfondie notamment en améliorant la mesure des températures dans le mur (utilisation de sondes PT100 ou thermocouples).

Dans les deux (hiver, été), des mesures en cellules expérimentales avec des conditions intérieures et extérieures (T, %HR) maîtrisées sont nécessaires pour pouvoir comprendre le comportement hygro-thermique des parois anciennes.

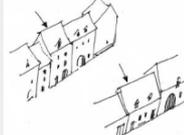
## 7 ANALYSE DU COMPORTEMENT REEL DES BATIMENTS

L'analyse du comportement réel de chaque bâtiment s'appuie sur l'ensemble des données recueillies. Chaque bâtiment dispose d'un dossier complet comprenant cette analyse (Annexe 1).

Le comportement thermique réel d'un bâtiment est évalué au regard:

- Des consommations énergétiques réelles mesurées et exprimées en kWh ep /m<sup>2</sup>.an (couvrant les postes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire).
- Des déperditions thermiques à travers l'enveloppe du bâtiment.
- Des différents relevés effectués in situ (température, humidité, etc.)
- Des questionnaires d'enquête soumis aux occupants.

### 7.1 Rappel des typologies du panel restreint

| Implantation     | I/ îlots fermés de centre ancien  |     |     | II/ îlots haussmanniens   |        | III/ îlots fermés bas ou maisons alignées  |     |        | IV/ maisons isolées ou dispersées   |      |      |      |      |  |      |
|------------------|---|-----|-----|---|--------|--|-----|--------|---|------|------|------|------|--|------|
|                  |  |     |     |  |        |  |     |        |  |      |      |      |      |  |      |
| Mode constructif | A et B  |     | C   | A   | A et B |  | C   | A et B |   | C    |      |      |      |  |      |
| Matériaux        | 1   | 1_1 | 1_2 |   | 5_1    | 5_2  |     | 7_1    |   |      | 11_1 |      |      |  |      |
|                  | 2   |     | 2_1 |   |        | 6_1  |     | 8_1    | 8_2   | 9_1  |      | 12_1 |      |  |      |
|                  | 3   |     |     |   |        |  |     |        |   | 10_1 |      |      | 13_1 |  |      |
|                  | 4   |     |     | 4_1   | 4_2    | 3_1  | 3_2 |        |   |      |      |      |      |  | 14_1 |

#### Matériaux: 4 catégories thermiques

1. Les roches très denses : granit, basalte et gneiss + grès quartzeux, calcaire extra-dur, ardoise et schiste.
2. Les matériaux de densité moyenne :calcaire tendre, brique de terre cuite pleine.

3. Les terres crues et roches extra-tendres : pisé, adobes, bauge, calcaire extra-tendre.
4. Les matériaux de faible densité: pierre poreuse naturelle, et bois et sans doute torchis.

**Modes constructifs: 3 catégories thermiques**

| Catégories |            | Classe d'inertie quotidienne | Classe d'inertie séquentielle | Murs                     | Plancher bas        | Plancher haut |
|------------|------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------|
| A          | Très lourd | Très lourde                  | Lourde                        | Pierre/Brique/Terre crue | Pierre/Bois hourdis | Bois          |
| B          | Lourd      | Lourde                       | Moyenne                       | Pierre/Brique/Terre crue | Bois                | Bois          |
| C          | Moyen      | Moyenne                      | Légère                        | Torchis                  | Tous types          | Tous types    |

**7.2 Consommations énergétiques**

Les étiquettes énergie et climat pour chaque logement ont été déterminées à partir des consommations réelles mesurées. Dans certains cas, la consommation mesurée comprend celle liée à la cuisson. Pour déduire cette part du relevé global, nous avons considéré qu'en moyenne la consommation pour la cuisson est de 1,5kWh/jour.

Les facteurs de conversion « climat » sont issus de l'annexe 4 de l'arrêté du 15 septembre 2006 relatif au diagnostic de performance énergétique pour les bâtiments existants proposés à la vente en France métropolitaine.

| Batiment  |                                       |                         |                      |         |                  |                             |                        |                         |                                  |                        |                       |
|---|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|---------|------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Designation                                     | 1_1                                   | 1_2                     | 2_1                  | 3_1     | 3_2              | 4_1                         | 4_2                    | 5_1                     | 5_2                              | 6_1                    | 7_1                   |
| Typologie                                       | I B 1                                 |                         | IA 2                 | I C 4   |                  | I C 4                       |                        | II A 1                  |                                  | II A 2                 | III B 1               |
| Matériaux                                       | Calcaire                              |                         | Calcaire             | Torchis |                  | Colombage rempli de briques |                        | Calcaire extra-dur      |                                  | Brique de terre cuite  | Pierre granit         |
| Occupation                                      | Permanente                            | Permanente              | Permanente           | -       | Permanente       | Permanente                  | Permanente             | Permanente              | Permanente                       | Permanente             | Permanente            |
| Source d'énergie pour le chauffage              | Chaudière gaz individuelle production | Pompe à chaleur air/air | Chaudière gaz murale | -       | Pas de chauffage | Radiateurs électriques      | Radiateurs électriques | Convecteurs électriques | Chaudière individuelle gaz mixte | Chaudière murale mixte | Chaudière mixte fioul |
| Consommations réelles kWh/m²/an (chauffage+ECS) | 85                                    | -                       | 209                  | -       | 63*              | -                           | -                      | 63                      | 219                              | 275**                  | 63                    |
| GES (kgeq CO2/m²/an)                            | 20                                    | -                       | 49                   | -       | 15               | -                           | -                      | 5                       | 51                               | 64                     | 19                    |
| Etiquette DPE                                   |                                       | -                       |                      | -       |                  | -                           | -                      |                         |                                  |                        | -                     |
| Etiquette GES                                   |                                       | -                       |                      | -       |                  | -                           | -                      |                         |                                  |                        | -                     |
| H (m 3/m².h)                                    | 3.37                                  | 2.8                     | 2                    | 3.5     | 1.9              | 2.6                         | 2.2                    | 0.83                    | 1.7                              | 1.2                    | -                     |

\* ECS seulement; \*\* Consommation poêle à bois non prises en compte; \*\*\* Chauffage solaire (4m²)+utilisation cheminée; \*\*\*\* Occupation irrégulière, Tconsigne=17°C

| Batiment  |  |                         |  |  |  |  |  |  |
|---|---|-------------------------|---|---|---|--|---|---|
| Désignation   | 8_1   | 8_2                     | 9_1   | 10_1  | 11_1  | 12_1   | 13_1  | 14_1  |
| Typologie   | III A 2   |                         | III A 2   | III A   | IV A 1  | IV B 2   | IV B 3  | IV C 4  |
| Matériaux   | Calcaire tendre   |                         | Brique cuite  | Pisé terre crue   | Calcaire  | Pisé terre crue  | Brique terre crue   | Pisé terre crue   |
| Occupation  | Permanente  | Journée                 | Permanente  | Permanente  | Permanente  | Permanente   | Permanente  | Permanente  |
| Source d'énergie pour le chauffage  | Chaudière gaz individuelle  | Convecteurs électriques | Chaudière gaz mixte   | Chaudière bois mixte  | Convecteurs électriques   | Chaudière fioul mixte  | Chaudière gaz mixte (ECS Solaire)   | Chaudière gaz   |
| Consommations réelles kWh/m <sup>2</sup> /an (chauffage+ECS)  | 258   | -                       | 213   | 128   | -   | -  | 30***   | 49****  |
| GES (kgeq CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /an)  | 59  | -                       | 50  | 2   | -   | -  | 7   | 10  |
| Etiquette DPE   |  | -                       |  |  | -   | -  |  |  |
| Etiquette GES   |  | -                       |  |  | -   | -  |  |  |
| I4 (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h)  | 3   | 5.6                     | 0.77  | -   | 3.4   | 2.6  | 1.1   | 4   |
| <small>* ECS seulement; ** Consommation poêle à bois non prises en compte; ***Chauffe eau solaire (4m<sup>2</sup>)+utilisation cheminée; ****Occupation irrégulière, Tconsigne=17°C</small> |   |                         |   |   |   |  |   |   |

En excluant les bâtiments dont la consommation est inférieure à 50kWh/m<sup>2</sup>/an qui ne sont pas représentatifs de la réalité à cause de disfonctionnement du matériel ou des modes de vie particuliers, les consommations énergétiques liées au chauffage et l'ECS ne dépassent pas 300 kWh/m<sup>2</sup>/an. Ce constat vient confirmer des résultats d'études déjà menées qui ont montré que les bâtiments d'avant guerre ne sont plus énergivores que les bâtiments existants plus contemporains. Ceci est dû à leur architecture (compacité, orientation, agencement des pièces, etc.) ainsi qu'à leurs propriétés thermiques (forte inertie, parois perspirantes, etc.).

### 7.3 Déperditions thermiques

Les déperditions thermiques ont été calculées pour l'ensemble des logements du panel restreint, les résultats sont présentés dans la figure 24. Le calcul n'a pas été réalisé pour le logement 3\_1, la locataire ne souhaitant pas qu'on accède chez elle.

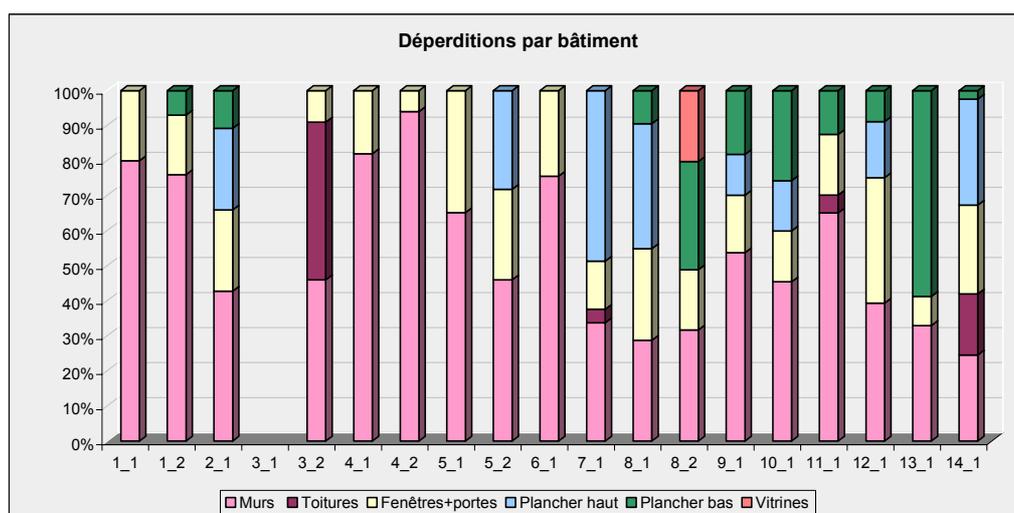


Figure 24 : Détails des déperditions par bâtiment

Sur l'ensemble des 18 logements étudiés (figure 25), les murs représentent le premier poste de déperditions (53%) suivi des menuiseries (20%). Les toitures et planchers hauts représentent 14%.

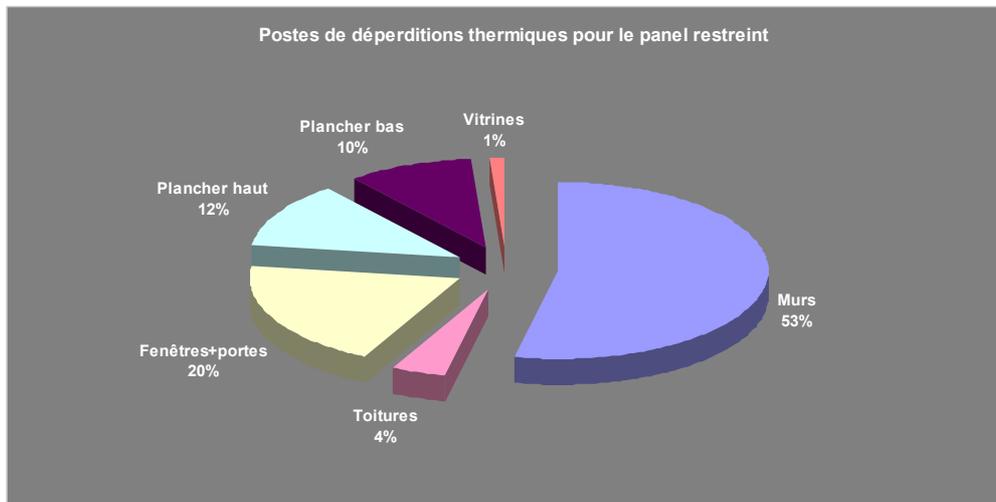


Figure 25 : Postes des déperditions thermiques pour l'ensemble des bâtiments

Ce résultat montre que l'isolation représente un important gisement d'économie d'énergie dans ce type de bâti. Toutefois, elle doit se faire dans les règles de l'art sans dégradation des propriétés thermiques et hydriques intrinsèques qu'ont les murs anciens.

## 7.4 Analyse des phénomènes physiques

Chaque spécimen du panel restreint a bénéficié d'une analyse d'un ensemble de phénomènes physiques. Ces analyses visaient à mieux comprendre le comportement hygro-thermique du bâti ancien en hiver et en été.

Nous tentons ici de faire une synthèse des résultats obtenus et de dégager des tendances communes à tous les bâtiments étudiés.

### 7.4.1 PROPRIETES DES TRANSFERTS THERMIQUES DES PAROIS OPAQUES

#### 7.4.1.1 Lien entre humidité et conductivité thermique

Il s'agit ici de mettre en évidence une relation entre les conditions hydriques intérieure et extérieure et la performance thermique de l'enveloppe. Pour cela, nous étudions l'évolution temporelle de l'humidité intérieure et extérieure et de la conductivité thermique calculée pour la paroi instrumentée (c.f. 6.2.1)

Afin de s'affranchir de l'effet de la température, l'humidité spécifique ( $H_s$ ) est calculée à partir de deux données de mesure : la températures ( $^{\circ}\text{C}$ ) et l'humidité relative HR (%) (dans la pièce de vie et à l'extérieur).

$$H_s = \frac{0.622 * P_{sat}(T) * HR}{101325 - P_{sat}(T) * HR}$$

La pression de vapeur saturante qui est la valeur maximale que peut atteindre la pression partielle de la vapeur à la température T est calculée selon la norme NF EN 138788 de la manière suivante :

- Pour  $T \geq 273.5K$  :

$$P_{sat} = 610.5 \exp\left(\frac{17.269 * T - 4717.03}{T - 35.85}\right)$$

- Pour  $T < 273.5K$  :

$$P_{sat} = 610.5 \exp\left(\frac{21.875 * T - 5975.16}{T - 7.65}\right)$$

Nous avons également évalué les transferts de masse et le risque de condensation dans les parois étudiées en traçant le diagramme de pression partielle de vapeur d'eau. Nous avons procédé comme suit :

1. Détermination du diagramme de pression de vapeur saturante ( $P_{sat}(int)$  ;  $P_{sat}(1)$ ,  $P_{sat}(2)$ ,  $P_{sat}(3)$ ,  $P_{sat}(ext)$ ) correspondant à chaque relevé de température ( $T_{si}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_{se}$ ).
2. Détermination du diagramme de pression partielle de vapeur d'eau à l'intérieur de la paroi. Il s'agit de la droite  $P_{v,int}$ - $P_{v,ext}$ . Ces deux pressions sont calculées de la manière suivante :

$$P_v(T) = \frac{P_{sat}(T) * HR}{100}$$

Deux cas sont alors à distinguer :

- La droite  $P_{v,int}$ - $P_{v,ext}$  ne coupe pas la courbe de pression saturante et se situe en dessous. C'est à dire que la pression partielle de la vapeur d'eau n'atteint pas la saturation. Les températures dans le mur restent supérieures à la température de rosée. Dans ce cas il n'y a pas de condensation dans le mur.
- La droite  $P_{v,int}$ - $P_{v,ext}$  coupe la courbe de pression saturante. Dans ce cas, la pression de vapeur partielle devient supérieure à la pression saturante et il y a condensation dans le mur.

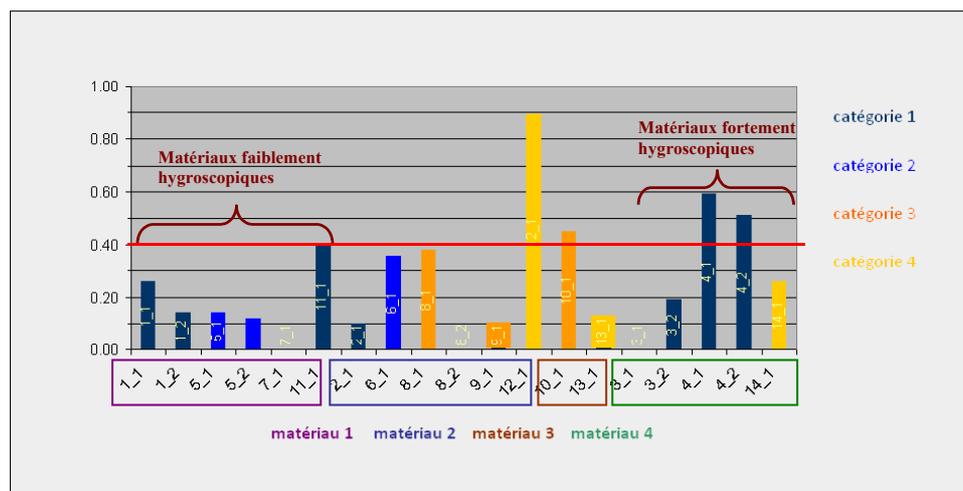


Figure 26 : Coefficient de corrélation entre la conductivité calculée pour l'hiver et l'écart d'humidité intérieure-extérieure

Dans l'ensemble, les parois étudiées étaient saines sauf pour deux parois (bâtiments 7 et 14) pour lesquelles le calcul a montré qu'il y avait un problème de condensation dans les murs. Le diagnostic réalisé sur le terrain a corroboré ce résultat puisque des dégradations liées à l'humidité ont été

observées. Ces désordres sont dus soit à un problème d'infiltration d'eau de pluie, à des remontées capillaires ou à des masques solaires qui empêcheraient le mur de bénéficier du soleil pour sécher (évaporation de l'eau contenue dans le mur). Une visite sur site est indispensable pour identifier la (les) source(s) du problème.

Par ailleurs, nous avons constaté que la présence d'eau à l'état liquide dans la paroi pourrait influencer le comportement thermique de celle-ci et ce même pour des matériaux considérés comme peu hygroscopiques. Ainsi, pour la paroi 7 en granit, les courbes d'évolution de la conductivité thermique et des humidités intérieure et extérieure ont révélé une forte corrélation entre les échanges thermique et hydrique.

La figure 26 présente les coefficients de corrélation obtenus entre la conductivité thermique calculée pour l'hiver et l'écart d'humidité spécifique. L'analyse a été menée sur deux journées froides.

Au premier abord, nous pouvons distinguer deux types de familles de matériaux : ceux sensibles à l'humidité ou à forte hygroscopie (coefficient de corrélation  $>0.4$ ) et ceux moins sensibles à l'humidité ou peu hygroscopique ((coefficient de corrélation  $<0.4$ ). Les valeurs du facteur de résistance à la vapeur d'eau données dans la littérature pour les familles de matériaux 1 et 4 confirment cette observation. Par exemple, le calcaire extra-dur (bâtiment 5) a une résistance à la vapeur d'eau de 250 contrairement au torchis (bâtiment 4) qui est de  $10^5$  pour une densité de  $1600 \text{ kg/m}^3$ .

Mais, les logements 9\_1 et 13\_1, construits respectivement en brique de terre cuite et en brique terre crue, ont un comportement qui contredit la première observation. En effet, ces deux matériaux ont des facteurs de résistance à la vapeur d'eau respectifs de 40 et de 10. *A priori*, ils devraient faire partie des matériaux à forte hygroscopie. L'histogramme de la figure 2 montre le contraire.

Afin de comprendre ce résultat, nous nous sommes intéressé à l'étanchéité à l'air mesurée (figure 27). Nous remarquons que les bâtiments 9 et 13 présentent le moins de défauts liés à l'étanchéité à l'air par rapport à l'ensemble des bâtiments étudiés. Cela veut dire que les échanges d'air (sec et humide) se font soit à travers l'enveloppe, selon ses propriétés hydrique et thermique intrinsèques, soit par ventilation.

Nous avons donc calculé, à partir des questionnaires un pourcentage hebdomadaire de ventilation par ouverture des fenêtres pour chaque logement. C'est un calcul approximatif basé sur les réponses des occupants et entaché par pas mal d'incertitudes, il vise seulement à nous donner un ordre de grandeur. Les taux de ventilation hebdomadaire en hiver pour les logements 9\_1 et 10\_1 sont respectivement de 8% et 4%. Comparativement aux autres bâtiments, ces logements sont relativement bien aérés en hiver. Ceci, pourrait expliquer la faible corrélation entre les propriétés thermiques des parois étudiées et l'humidité, c'est à dire, que les échanges hydriques se sont principalement par l'ouverture des fenêtres.

Pour le bâtiment 12 en pierre calcaire tendre, nous constatons qu'il existe une forte influence des échanges hydriques sur la conductivité thermique (figure 26). Cette maison isolée a un indice  $I_4$  de  $2.6 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$  (étanchéité moyenne) et un taux de ventilation hebdomadaire de 1%. Cela veut dire que les échanges d'air et de vapeur d'eau se feraient principalement par à travers la paroi.

Par ailleurs, la période d'analyse choisie (2 jours) semble trop courte pour donner des conclusions pertinentes. Malheureusement, il nous a été difficile de réaliser des analyses sur des périodes plus longues en hiver car nous ne disposons pas de valeurs de la conductivité thermique sur de longues périodes en continue. En effet, la conductivité thermique est calculée, toutes les heures, quand l'écart de température entre la surface du mur et l'air ambiant est supérieur à  $1^\circ\text{C}$  et quand le

---

<sup>5</sup> <http://www.citemaison.fr/scripts/bibliotheque-materiaux.php>

coefficient de corrélation de la régression linéaire des températures Tsi, T1, T2 et T3 est supérieur à 0.85. Ces conditions ne sont pas toutes réunies sur des périodes longues en continue.

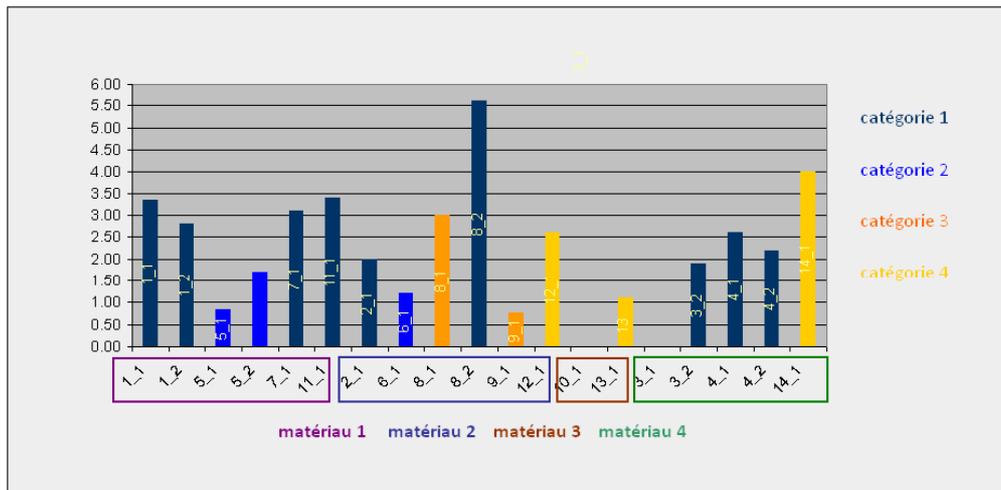


Figure 27 : Indice de perméabilité à l'air Ia (m³/h.m²)

Finalement, cette analyse nous a permis de constater que pour les parois faiblement hygroscopiques étudiées ici, les échanges hygriques n'influencent pas d'une manière forte le comportement thermique tant qu'il n'y a pas de condensation dans la paroi. Ainsi, la présence d'eau sous sa forme liquide dans la paroi pourrait influencer la conductivité thermique.

Concernant les parois hygroscopiques, il semblerait que l'influence de l'humidité sur la conductivité thermique n'est pas systématique. Deux parois avec des propriétés hydro-thermiques semblables peuvent se comporter de manière différente puisque la régulation de l'humidité dans le logement dépend également des conditions de ventilation et de la perméabilité à l'air. Il est indispensable donc, pour étudier l'influence de l'humidité sur la conductivité thermique de disposer de la teneur en eau dans la paroi.

#### 7.4.2 INERTIE THERMIQUE DES PAROIS

Chaque bâtiment dispose d'une paroi orientée au sud équipée de cinq capteurs de température.

Afin de mettre en évidence l'inertie thermique des parois anciennes, nous avons présenté pour chacune des parois (cf. Dossier par bâtiment, paragraphe X.2.1) les relevés de mesure pour les quatre périodes suivantes:

- L'hiver 2009-2010
- La semaine la plus froide pendant l'hiver
- L'été 2010
- La semaine la plus chaude pendant l'été

Dans l'ensemble, sur tous les spécimens étudiés, nous avons constaté les types de comportements suivants selon la saison :

- En hiver, les mesures de température ont mis en évidence la stratification thermique dans la paroi de l'intérieur vers l'extérieur. En général, les températures aux profondeurs 1 et 2 ne sont pas influencées par les conditions climatiques extérieures. La température de surface du mur est généralement inférieure à la température de l'air ambiant à l'intérieur. La figure 29

présente le pourcentage de temps en hiver durant lequel l'écart de température est supérieur à 5°C. Si nous excluons les logements 5-1 et 6-1, ce pourcentage ne dépasse pas 30%.

- En mi-saison, les mesures ont mis en évidence l'inertie des parois étudiées. Elles continuent à bénéficier de la chaleur emmagasinée tout en long de l'hiver même après l'arrêt du chauffage.
- En été, les mesures de température ont mis en évidence la forme sinusoïdale de la réponse de la paroi identique à celle des sollicitations extérieures mais avec un déphasage temporel et une atténuation de l'amplitude. D'une manière générale, les températures mesurées aux trois profondeurs sont très proches. Le mur permet dans la majorité des cas à rafraîchir le logement.

Nous avons également étudié les relevés des températures de surface des parois pour mettre en évidence certaines de leurs propriétés physiques telles que l'effusivité thermique.

Nous rappelons que cette dernière caractérise la capacité d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. En pratique, les matériaux ayant une faible effusivité thermique se réchauffent plus vite, c'est à dire que leur température de surface s'adapte rapidement à l'environnement. A contrario, les matériaux qui ont une importante effusivité demandent un plus grand flux de chaleur sur un temps de contact plus long pour que s'installe une sensation de confort.

Le tableau 18 présente les valeurs de l'effusivité thermique pour les matériaux anciens issues de la réglementation thermique 2005.

Nous avons donc, dans un premier temps, tenter de mettre en évidence cette propriétés et l'inconfort qui pourrait être engendré pour l'ensemble des spécimens étudiés (cf. Dossier par bâtiment, paragraphe X.2.2). Pour cela, nous avons tracé les courbes suivantes :

- L'évolution de la température de l'air intérieur et la température de surface d'une paroi pour l'année 2009.
- L'évolution de l'écart de température entre l'intérieur et la surface du mur en hiver.
- L'évolution de l'écart de température entre l'intérieur et la surface du mur en été.

Dans un second temps, nous avons procédé à la quantification de cette propriété en utilisant les valeurs de conductivité et de capacité thermique déterminées dans le chapitre 6 (tableau 10). L'effusivité « b » en  $J/(m^2.K.s^{1/2})$  est calculée comme suit :  $b = \sqrt{\lambda\rho C_p}$

| MATERIAUX                      | Diffusivité thermique<br>$a=\lambda/\rho.C_p$<br>$.10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ | Effusivité thermique<br>$b=(\lambda.\rho.C_p)^{1/2}$<br>$\text{J}/\text{m}^2.\text{K}.\text{s}^{1/2}$ | Résistance thermique<br>$R=e/\lambda$<br>$\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ | Déphasage temporel<br>$T=e/(\pi^2.a)$<br>heures | Facteur de résistance à la vapeur d'eau :<br>$\mu$ sec sans unité |
|--------------------------------|--|---|---|---|---|
| Granit                         | 3,9  | 2698  | 0,18  | 6h30  | 10000   |
| Basalte et gneiss              | 4,4  | 3158  | 0,14  | 5h30  | 10000   |
| Marbre                         | 4,5  | 3130  | 0,14  | 5h30  | 10000   |
| Grès durs                      | 3,2  | 2445  | 0,22  | 8h  | 40  |
| Calcaire extra dur             | 3,2  | 2445  | 0,22  | 8h  | 250   |
| Ardoise et schiste             | 3,3  | 2298  | 0,23  | 7h30  | 1000  |
| Brique terre cuite pleine      | 2,2  | 1265  | 0,5   | 11h30   | 40  |
| Calcaire tendre                | 2,2  | 1407  | 0,45  | 11h30   | 40  |
| Terre crue (adobe)             | 1,9  | 1100  | 0,63  | 13h20   | 10  |
| Calcaire extra-tendre          | 1,9  | 1160  | 0,59  | 13h20   | 30  |
| Pierre poreuse naturelle, lave | 1,2  | 938   | 0,91  | 21h10   | 20  |
| Bois                           | 0,58   | 449   | 1,11  | 7h  | 200   |
| Béton moyen                    | 2,3  | 1438  | 0,17  | 1h45  | 100   |
| Béton haute densité            | 3  | 2190  | 0,1   | 1h20  | 130   |

Tableau 18 : Propriétés physiques des matériaux anciens (RT2005)

La figure 28 présente les résultats obtenus à partir des valeurs moyennes de conductivité et de capacité thermique calculées dans le cadre de BATAN pour l'hiver et celles issues de la littérature.

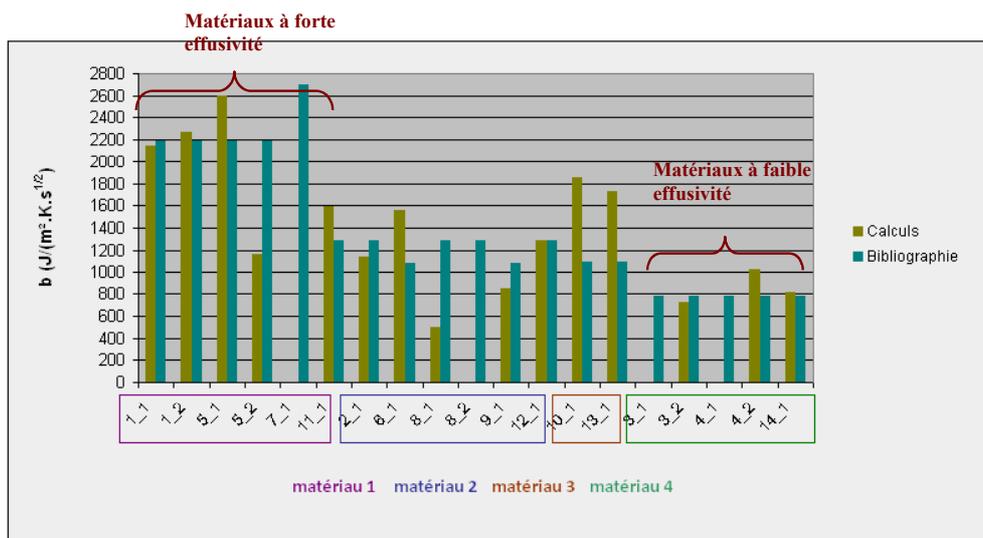


Figure 28 : Comparaison des valeurs de l'effusivité thermique calculées et tabulées

Nous remarquons que les parois denses ont les plus grandes valeurs d'effusivité et inversement pour les parois moins denses. Ceci confirme les valeurs théoriques des propriétés des matériaux. Pour les parois à base de terre crue, les valeurs expérimentales sont supérieures aux théoriques. Les parois en terre crue, à l'instar des parois en calcaire extra-dur (1-1,1-2, 5-1) posséderaient donc une forte inertie par absorption.

Afin de mettre en évidence une autre propriété des parois ancienne qui est l'inertie thermique par transmission, nous avons procédé, d'une part à la détermination du déphasage temporel à partir des courbes de températures pour la journée la plus chaude en été et d'autre part au calcul de ce

déphasage en heures selon la formule suivante :  $T = \frac{e^2}{\pi^2.a}$  où « e » est l'épaisseur de la paroi et « a »

la diffusivité thermique calculée à partir valeurs de conductivité et de capacité thermique déterminées dans le chapitre 6 (tableau 10).

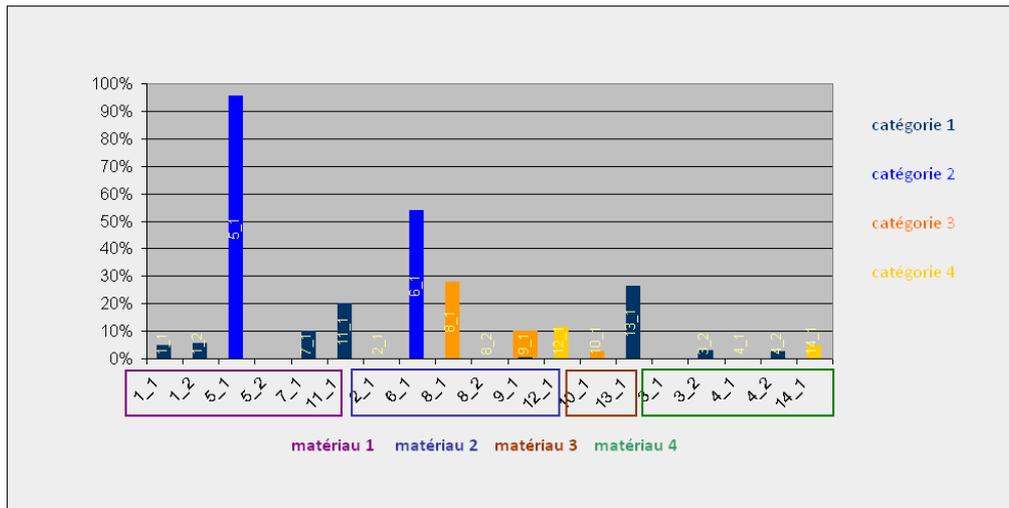


Figure 29 : Ecart de températures >5°C (hiver)

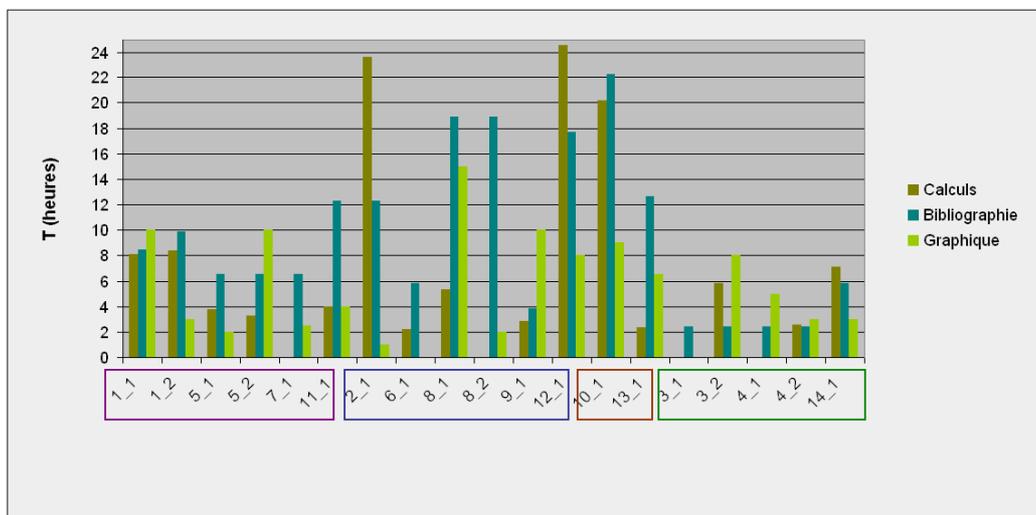


Figure 30 : Comparaison des déphasages thermiques

La figure 30 qui présente le déphasage temporel calculé sur la base des caractéristiques thermo-physiques hivernales et des valeurs de la réglementation RT2005 ainsi que celui déterminé graphiquement à partir des courbes de températures.

Avant d'interpréter cette figure, nous précisons que sur l'ensemble des bâtiments étudiés, le phénomène d'inertie a été mis en évidence à la lecture des courbes de températures intérieur extérieur pendant la semaine la plus chaude en été. En revanche, ce qui a été le plus dur à déterminer, pour certains bâtiments, c'était l'inertie quotidienne. En effet, les courbes de température intérieure ne présentaient pas de grandes amplitudes ce qui rendait difficile la tâche de détermination du déphasage d'une manière graphique (de pic à pic entre  $T_{ext}$  et  $T_{int}$ ).

Par ailleurs, les résultats de la figure 30 ne nous permettent pas de dégager des tendances de comportement par famille de matériaux ou par catégorie d'implantation. Les valeurs de déphasage calculées et déterminées graphiquement sont très différentes. Ce résultat était prévisible étant donné de l'utilisation de valeurs de conductivité et capacité thermiques identifiées pour l'hiver.

### 7.4.3.1 Lien entre l'humidité intérieure et extérieure

L'humidité de l'air intérieur dépend de l'humidité de l'air extérieur du fait des dispositifs de renouvellement d'air. Elle dépend également, d'une manière non exhaustive, du nombre de personnes présentes, de leur type d'activité, des ouvertures (fenêtres, portes), etc.

Pour chaque site instrumenté, nous disposons de la mesure d'humidité relative intérieure et extérieure.

Afin de mettre en évidence la sensibilité au climat des bâtiments anciens et notamment en ce qui concerne l'humidité, nous avons tracé les courbes suivantes pour l'ensemble des spécimens du panel restreint:

- L'évolution des humidités relatives intérieure et extérieure.
- L'évolution des pressions partielles de vapeur d'eau à l'intérieur et à l'extérieur.
- L'évolution des pressions partielles et des humidités relatives pour les journées les plus froides.
- L'évolution des pressions partielles et des humidités relatives pour les journées les plus chaudes.

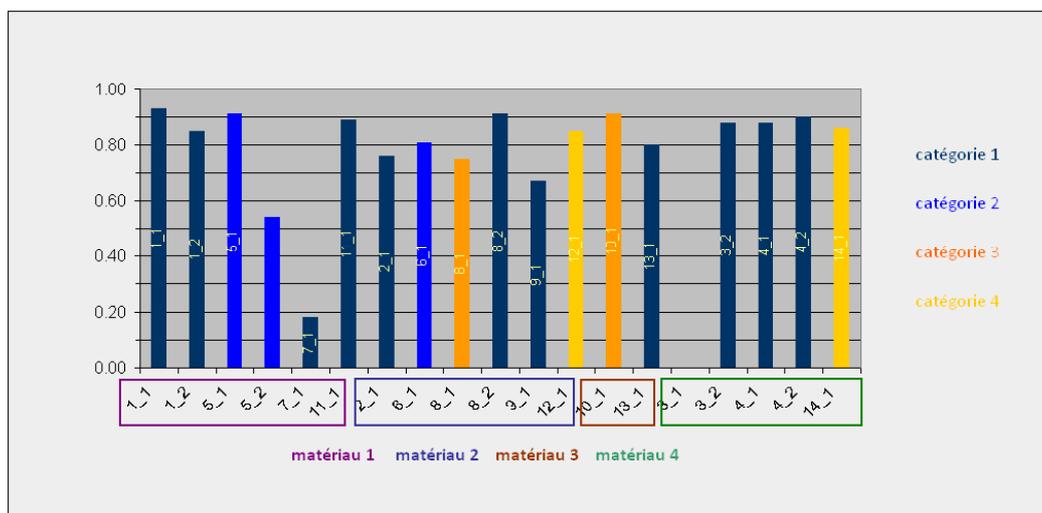


Figure 31: Coefficient de corrélation entre les pressions partielles de vapeur d'eau intérieure et extérieure

La figure 30 présente les coefficients de corrélation des pressions de vapeur d'eau intérieure et extérieure. Nous remarquons, que globalement le lien est fort entre les conditions d'humidité extérieure et intérieure. La seule faible corrélation concerne le logement 7. Ce dernier est en granit, matériau peu hygroscopique. D'après le questionnaire, les occupants n'aèrent pas ou peu l'hiver. Les seules échanges d'humidité se font par les défauts d'étanchéité ce qui pourrait expliquer la corrélation trouvée.

### 7.4.3.2 Lien entre les température de l'air ambiant intérieur et extérieur

A partir des relevés de températures in-situ nous avons tenté de mettre en évidence la dépendance du bâti ancien vis-à-vis du climat en calculant la corrélation entre les températures extérieure et intérieure en mi-saison sans chauffage.

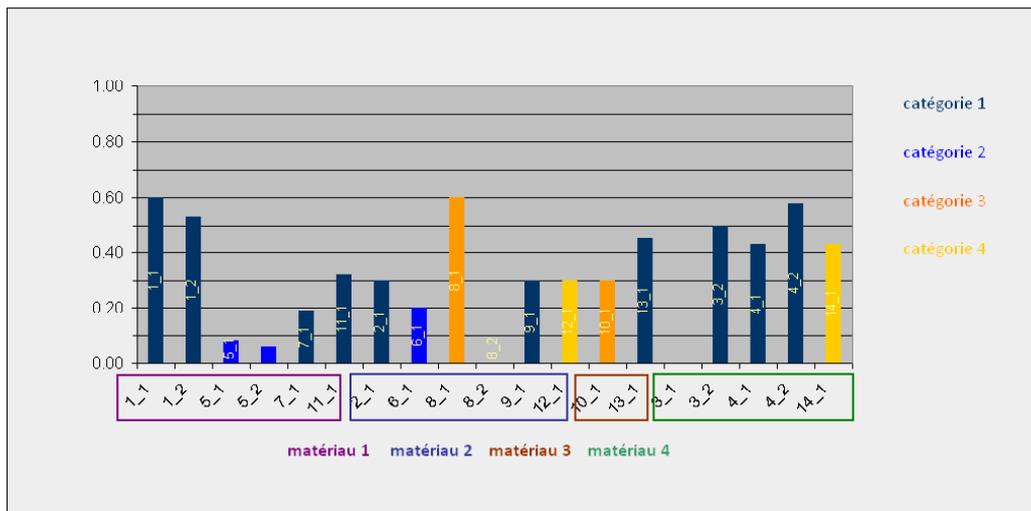


Figure 32: Coefficient de corrélation entre les températures ambiantes intérieure et extérieure

La figure 32 présente les résultats obtenus pour l'ensemble des bâtiments étudiés. L'inertie n'a pas été prise en compte ce qui pourrait expliquer les résultats des bâtiments 5 et 6. Il aurait été intéressant ici de comparer ces résultats à ceux d'un bâtiment contemporain étanche pour monter valider les corrélations trouvées.

#### 7.4.3.3 Lien entre les besoins de chauffage et la température de l'air extérieur, le rayonnement solaire et les apports internes

L'instrumentation des bâtiments nous a permis de recueillir, au pas de temps horaire, les données suivantes :

- La température extérieure.
- Les consommations de chauffage.
- Le rayonnement solaire reçu (global horizontal et parfois vertical sud).

A partir de ces données, nous avons décidé d'étudier les 3 aspects suivants pour chaque spécimen du panel restreint :

1) La relation entre la consommation de chauffage quotidienne et le nombre de degrés jours pour la période de chauffe.

L'énergie consommée pour le chauffage à chaque heure est additionnée pour obtenir la consommation sur chaque journée (24h).

Les degrés jours unifiés sont calculés comme suit :  $DJU = 18^{\circ}C - (T_{min} + T_{max})/2$

2) Le lien entre la consommation de chauffage quotidienne et le rayonnement solaire reçu par le bâtiment. Afin de s'affranchir de l'effet des variations de température extérieure, on ne conserve que des journées dont le nombre de DJU est proche pour étudier l'effet du rayonnement. Le rayonnement solaire cumulé sur la journée est calculé à partir des données horaires.

Les données disponibles sont le rayonnement global horizontal, ou bien le rayonnement vertical sud dans le cas où une station météo aurait été installée.

Il n'est pas fait de considération sur l'orientation du bâtiment, étant donné que de toute façon, l'évolution du rayonnement sur chaque façade est proportionnelle à la valeur mesurée à l'horizontal. Donc si un lien existe avec les consommations de chauffage, il sera visible en utilisant le global horizontal brut ou le vertical sud (sans faire de calculs d'orientation et de surface réceptrice).

3) L'étude du décalage temporel entre les consommations de chauffage et les températures extérieures. L'idée ici est d'étudier si un déphasage temporel peut être identifié entre les pics de températures extérieures (minima ou maxima) et la consommation de chauffage.

Bien souvent, les données horaires disponibles pour la consommation de combustible mêlent le chauffage et l'eau chaude sanitaire voire même la cuisson, dans le cas où le logement serait relié au gaz. Partant du principe que le chauffage reste prépondérant, les courbes de consommation ont été quand même étudiées telles qu'elles, le dépouillement étant trop imprécis compte tenu des informations disponibles pour chaque logement.

La connaissance de la répartition dans le temps des apports interne (équipements, occupants) n'était pas suffisante pour permettre l'étude de l'influence de cet aspect sur les consommations de chauffage. De même pour la nébulosité extérieure, la synthèse des analyses réalisées sur l'ensemble des bâtiments montre que le rayonnement solaire a peu d'influence sur la consommation.

Cette analyse nous a permis de constater, d'une manière générale que:

1. L'étude de la signature énergétique du bâtiment est intéressante, car dans la plupart des cas apparaît une relation linéaire visible entre consommations et DJU. Les équations obtenues, pour certains bâtiments, entre l'année 2009 et l'année 2010 restent stables. La figure 33 présente les coefficients de corrélation obtenus pour le chauffage combustible.
2. Il n'apparaît pas clairement de déphasage temporel entre la sollicitation extérieure et la consommation énergétique du bâtiment. Ceci est probablement dû au mode de suivi global.

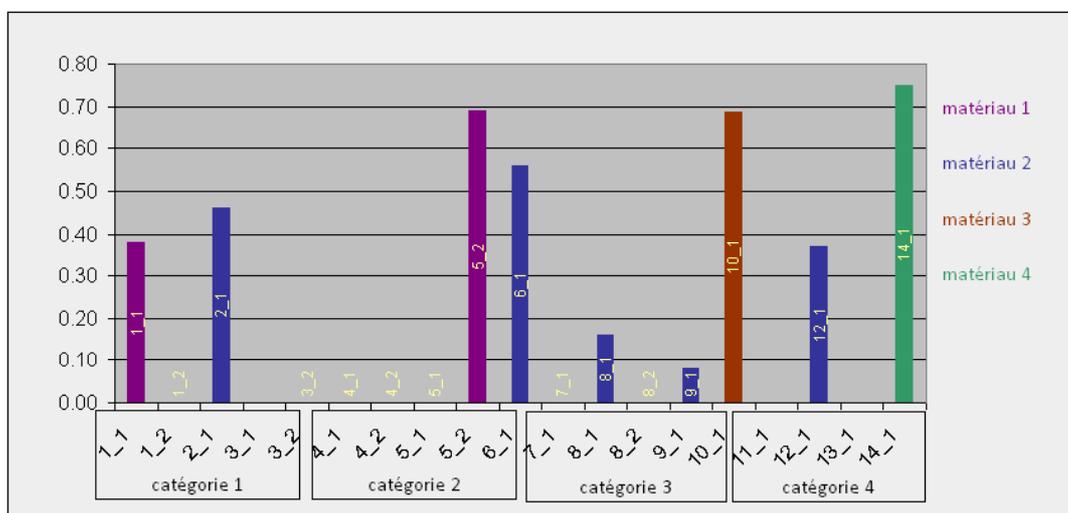


Figure 33: Coefficient de corrélation entre consommations et DJU

#### 7.4.3.4 Étude des espaces tampons

L'instrumentation des bâtiments nous a permis de recueillir, au pas de temps horaire, les données suivantes :

- La température extérieure,

- les températures intérieures du séjour et de la chambre,
- la température de locaux non-chauffés, dit tampons.

A partir de ces paramètres, nous avons analysé les déperditions entre le local chauffé, le local tampon et l'extérieur.

Nous avons utilisé le coefficient  $b = (T_{int} - T_{tampon}) / (T_{int} - T_{ext})$  pour vérifier si les locaux non chauffés jouent un rôle de « tampon » permettant ainsi de réduire les déperditions thermiques en hiver et d'atténuer l'onde de chaleur en été.

L'analyse a été scindée selon 3 périodes d'étude : été, hiver et mi-saison. La figure 34 permet de comprendre les critères choisis pour les différents cas d'analyse.

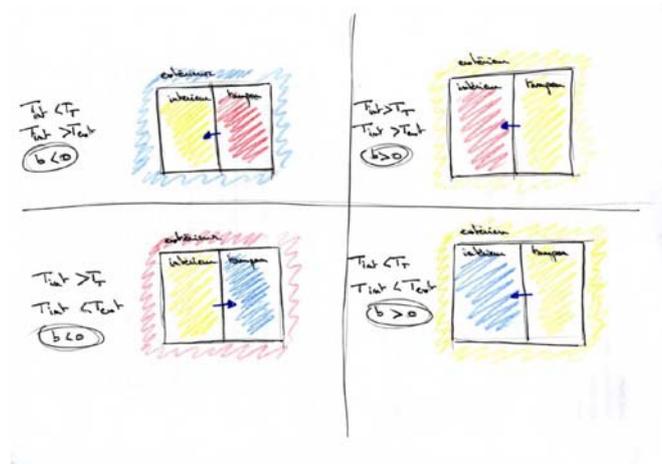


Figure 34: Etude des espaces tampons

#### Cas été, du 1er juin au 31 août

Pour la période estivale, nous avons choisi 2 critères d'études :

- Le nombre d'heures où  $T_{int} > T_{tampon}$  ; traduisant un rafraîchissement du bâtiment par la pièce tampon.
- La valeur moyenne du coefficient  $b$  lorsque  $T_{int} < T_{tampon}$  ; traduisant l'atténuation de la transmission de chaleur au bâtiment grâce à l'espace tampon.

#### Cas hiver, du 1er décembre au 28 février

Pour la période hivernale, nous avons choisi 2 critères d'études :

- Le nombre d'heures où  $T_{int} < T_{tampon}$  ; traduisant une restitution de chaleur de la pièce tampon au bâtiment.
- La valeur moyenne de  $b$  lorsque  $T_{int} > T_{tampon}$  ; traduisant la réduction de la perte de chaleur du bâtiment grâce à l'espace tampon.

#### Cas mi-saison, du 1er mars au 31 mai

Pour la période de mi-saison, nous avons choisi 2 critères d'études :

- Le nombre d'heures où  $T_{ext} > T_{int} > T_{tampon}$  ; traduisant un rafraîchissement du bâtiment par la pièce tampon.
- Le nombre d'heure où  $T_{ext} < T_{int} < T_{tampon}$ ; traduisant un réchauffement du bâtiment par le stockage d'énergie dans l'espace tampon.

Cette analyse a été menée pour 3 bâtiments du panel restreint. Ces bâtiments disposaient d'un local non chauffé (espace tampon) mitoyen à la pièce où l'on mesure la température intérieure. Il s'agit des bâtiments 2\_1, 13\_1 et 10\_1.

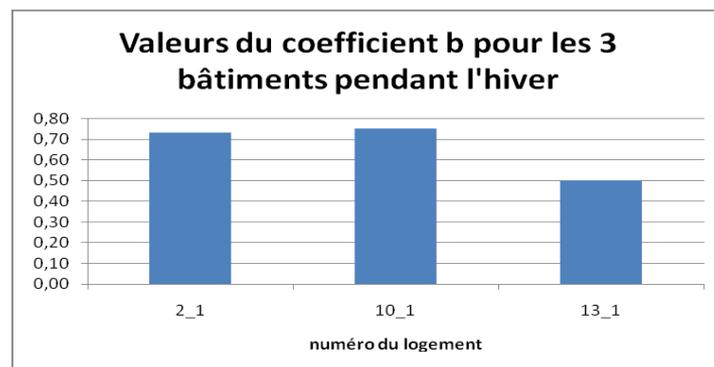


Figure 35: Valeur de b pour l'hiver

La figure 35 présente les résultats obtenus. En période hivernale, la réduction des déperditions thermiques par les espaces tampons est plus importante pour le bâtiment 13\_1 que pour les bâtiments 10\_1 et 2\_1. Deux hypothèses sont plausibles pour expliquer ces différences. Tout d'abord, l'espace tampon du bâtiment 13\_1 ne dispose pas d'ouvertures extérieures. Ceux des bâtiments 10\_1 et 2\_1 disposent de plusieurs fenêtres dont certaines orientées au nord (bâtiment 10\_1). La présence de ces ouvertures augmente les déperditions de l'espace tampon et par conséquent augmente la valeur du coefficient b pour ces bâtiments.

Deuxième piste qui pourrait expliquer cette différence est l'étanchéité à l'air des bâtiments. En effet, celle des bâtiments 10\_1 et 2\_1 ( $Q_{4,Pa,surf} = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ ) est moins bonne que celle du bâtiment 13\_1 ( $Q_{4,Pa,surf} = 1.15 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ ). Les infiltrations d'air dans les espaces tampons des bâtiments 10\_1 et 2\_1 augmentent leurs déperditions énergétiques. La valeur du coefficient b en est augmentée.

Pour la période estivale, le mécanisme de rafraîchissement par les espaces tampons est différent pour les 3 bâtiments. L'espace tampon du bâtiment 2\_1 rafraîchit moins que ceux des bâtiments 10\_1 et 13\_1. La raison de tel comportement pourrait provenir de l'inertie des parois mitoyennes entre l'espace de vie et l'espace tampon. L'inertie de cette paroi est très lourde pour le bâtiment 10\_1, lourde pour le bâtiment 13\_1 et légère pour le bâtiment 2\_1.

Finalement, ce travail nous a permis de constater qu'en hiver, les espaces tampons permettent la réduction des déperditions. Cette dernière est de l'ordre de 25% pour les bâtiments 10\_1 et 12\_1 ( $b=0.75$ ) et de 50% pour le bâtiment 13\_1 ( $b=0.50$ ).

En période estivale, les espaces tampons rafraîchissent les bâtiments pour les cas 10\_1 et 13\_1. Pour le cas 2\_1, celui-ci apporte de la chaleur sur toute la période estivale. Mais l'apport de chaleur est atténué de l'ordre de 85% ( $b=0.14$ ) par rapport à l'extérieur.

#### 7.4.3.5 Lien entre les besoins en chauffage et la direction et vitesse du vent

L'instrumentation des bâtiments nous a permis de recueillir, au pas de temps horaire, les données suivantes :

- La vitesse du vent et la température extérieure à partir d'une station météorologique locale,
- La température de l'air intérieur dans la pièce de vie principale,
- Les besoins de chauffage pour chaque logement étudié.

De plus, une mesure d'étanchéité à l'air de l'enveloppe sur l'ensemble des bâtiments a été réalisée.

A partir de ces paramètres, nous avons étudié l'influence du vent sur les besoins de chauffage de chaque bâtiment du panel restreint.

Pour cela, nous avons utilisé le modèle d'équilibre des pressions sur chaque façade et l'intérieur du bâtiment, défini dans la réglementation thermique RT 2005 (Th CE 2005, chapitre VIII, calculs des débits d'air à partir des normes NF EN 12 831 et NF 15 242).

A partir de la vitesse du vent, des températures intérieures et extérieures et de la mesure d'étanchéité à l'air, les débits entrant dans le bâtiment liés aux défauts d'étanchéité à l'air de l'enveloppe sont calculés heure par heure.

Les déperditions horaires  $Q_{\text{étanchéité}}$  (en W) liées aux défauts d'étanchéité de l'enveloppe sont calculées comme suit:

$$Q_{\text{étanchéité}} = 0,34 \times (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) * q_{\text{entrant}}$$

Où  $T_{\text{int}}$  est la température intérieure,  $T_{\text{ext}}$  est la température extérieure et  $q_{\text{entrant}}$  le débit entrant, liés aux infiltrations par les défauts d'étanchéité.

Pour s'affranchir des effets d'inertie du bâtiment et des variables spatio-temporelles des émetteurs de chaleur des bâtiments, nous avons décidé d'étudier le phénomène de façon hebdomadaire.

Ainsi, nous calculons, les déperditions hebdomadaires  $Q_{\text{étanchéité}}$  liées aux infiltrations d'air à travers l'enveloppe et les besoins de chauffage hebdomadaires  $Q_{\text{chauffage}}$  du bâtiment. Nous traçons le nuage de points et la courbe de tendance  $Q_{\text{chauffage}} = f(Q_{\text{étanchéité}})$  pour étudier les corrélations.

Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de la courbe de tendance sert d'indicateur pour apprécier l'influence des déperditions par défauts d'étanchéité à l'air sur les besoins de chauffage. Nous avons établi l'échelle suivante :

| Valeur du coefficient $R^2$  | Aucune courbe de tendance | $R^2 < 0,4$ | $0,4 < R^2 < 0,7$ | $0,7 < R^2 < 0,9$ | $0,9 < R^2$     |
|------------------------------|---------------------------|-------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Qualification de l'influence | Nulle (n)                 | Faible (f)  | Moyenne (m)       | Forte (F)         | Très forte (TF) |
| Echelle de l'influence       | 0                         | 1           | 2                 | 3                 | 4               |

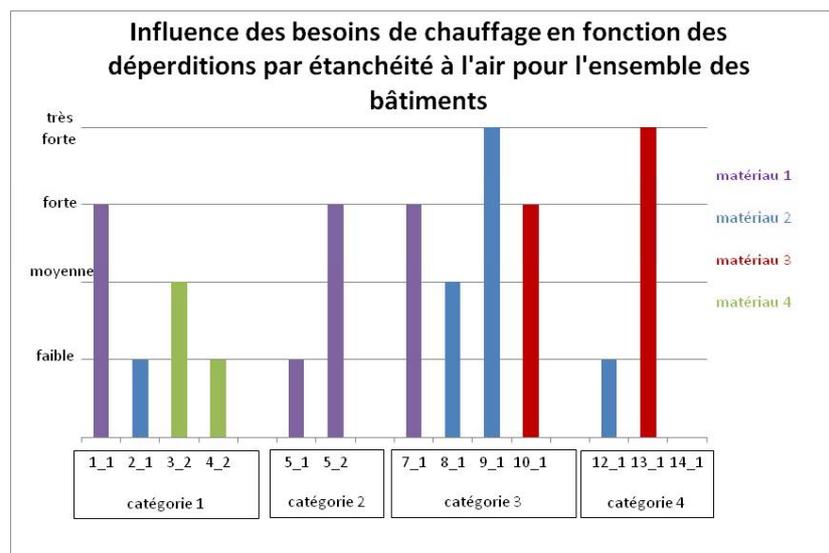
Pour illustrer l'influence des déperditions liées à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe sur les besoins de chauffage, nous étudions l'évolution horaire de  $Q_{\text{chauffage}}$  et  $Q_{\text{étanchéité}}$  sur la semaine la plus ventée et/ou la plus froide. Ce choix permet de traiter les cas où la perméabilité à l'air est susceptible de présenter un impact maximal sur les besoins de chauffage.

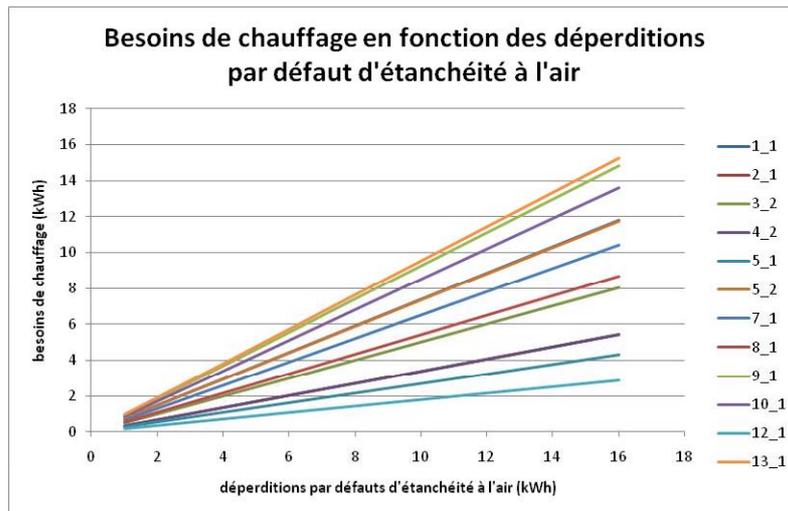
Il est à noter que l'orientation du vent n'est pas un paramètre d'entrée du calcul des débits d'infiltrations par défauts d'étanchéité à l'air.

Le tableau suivant donne un aperçu des résultats pour l'ensemble des bâtiments du projet BATAN.

| Id.                  | matériau   |                         | Q4,Pa,surf<br>(m3/h.m <sup>2</sup> ) | Surface<br>déperditive<br>Atbat (m <sup>2</sup> ) | Influence<br>$\frac{Q_{\text{chauffage}}}{f(Q_{\text{étanchéité}})}$ |
|----------------------|------------|-------------------------|--------------------------------------|---|--|
| <b>Catégorie I</b>   |            |                         |                                      |   |  |
| 1_1                  | Matériau 1 | calcaire extra dur      | 3                                    | 139   | F  |
| 1_2                  |            | calcaire extra dur      | -                                    | -   | NE   |
| 2_1                  | Matériau 2 | calcaire tendre         | 2                                    | 232   | f  |
| 3_1                  | Matériau 4 | colombage rempli brique | -                                    | -   | NE   |
| 3_2                  |            | colombage rempli brique | 3                                    | 20  | m  |
| 4_1                  | Matériau 4 | colombage rempli brique | -                                    | -   | NE   |
| 4_2                  |            | colombage rempli brique | 2,2                                  | 35  | f  |
| <b>Catégorie II</b>  |            |                         |                                      |   |  |
| 5_1                  | Matériau 1 | calcaire extra dur      | 0,83                                 | 552   | f  |
| 5_2                  |            | calcaire extra dur      | 1,7                                  | 334   | F  |
| 6_1                  | Matériau 2 | briques                 | -                                    | -   | NE   |
| <b>Catégorie III</b> |            |                         |                                      |   |  |
| 7_1                  | Matériau 1 | granit                  | 3,14                                 | 270   | m  |
| 8_1                  | Matériau 2 | calcaire tendre         | 3                                    | 290   | moyenne  |
| 8_2                  |            | calcaire tendre         | 5,6                                  | 231   | n  |
| 9_1                  | Matériau 2 | briques                 | 0,77                                 | 251   | TF   |
| 10_1                 | Matériau 3 | pisé                    | 2                                    | 232   | F  |
| <b>Catégorie IV</b>  |            |                         |                                      |   |  |
| 11_1                 | Matériau 1 | calcaire extra dur      | -                                    | -   | NE   |
| 12_1                 | Matériau 2 | calcaire tendre         | 2,6                                  | 381   | f  |
| 13_1                 | Matériau 3 | adobe                   | 1,15                                 | 451   | TF   |
| 14_1                 | Matériau 4 | colombage torchis       | 10,2                                 | 241   | n  |

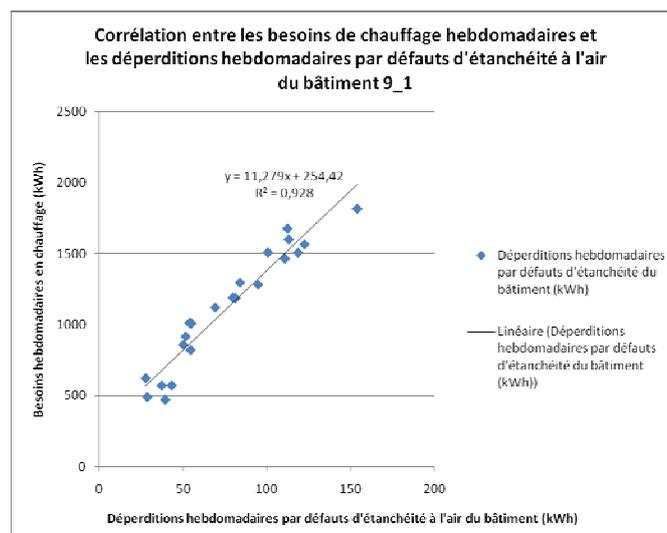
\* NE : non étudié





Certains bâtiments n'ont pas pu être étudiés. Les bâtiments 1\_2, 3\_1, 6\_1 et 11\_1 ne disposaient pas de données d'instrumentation suffisantes. Le bâtiment 8\_2 a été exclu de l'étude car il était inoccupé pendant une longue période.

Pour certains bâtiments de ce panel, les défauts d'étanchéité à l'air ont une très forte influence sur les besoins de chauffage.



Dans l'ensemble, les résultats montrent que les défauts d'étanchéité ont un impact (de moyen à fort) sur les besoins de chauffage.

Toutefois cette analyse présente certaines limites. En effet, le protocole d'instrumentation prévoit la comptage des besoins de chauffage en amont de la chaudière au pas de temps horaire. Certains bâtiments disposent de cheminée. Le protocole ne prévoit qu'une estimation sur la période hivernale des apports calorifiques par les cheminées.

Le modèle proposé étudie l'influence des besoins de chauffage en fonction des déperditions par défauts d'étanchéité à l'air. Les apports par les cheminées ne sont pas pris en compte dans les besoins de chauffage. Ainsi, il est possible que notre modèle démontre une influence faible des déperditions par infiltrations sur les besoins en chauffage. Mais en réalité, il se peut que l'occupant ait choisi de palier aux déperditions par un apport supplémentaire en chauffage par la cheminée.

La deuxième limite de l'étude porte sur le biais induit par les hypothèses de calcul des déperditions par défauts d'étanchéité. Ce dernier considère trois faces d'exposition au vent (face exposée, face sous le vent et face latérale). La direction du vent n'est pas prise en compte dans le modèle. Ainsi, pour une heure donnée, la façade exposée au vent peut être une façade étanche à l'air, sur laquelle nous observons peu d'infiltrations ou une façade mitoyenne avec un autre bâtiment. En pratique il y a donc peu de déperditions liées aux infiltrations par ces façades. Le modèle ne prend pas en compte ces paramètres. Quelque soit la direction du vent, quelque soit la présence ou non d'infiltration sur la façade exposée, le modèle considère qu'il y a des infiltrations.

#### 7.4.4 CONFORT D'HIVER ET D'ETE

Les occupants des bâtiments du panel restreint ont répondu à un questionnaire afin d'apprécier le niveau de confort dans leurs logements (cf : annexe 3 ; tableau 14).

2-Quel est votre avis sur le confort thermique à l'intérieur de votre logement ?

|                    | Confortable | Légèrement confortable | Inconfortable | Très inconfortable | insupportable |
|--------------------|-------------|------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| En été, le matin   |             |                        |               |                    |               |
| En été, le soir    |             |                        |               |                    |               |
| En hiver, le matin |             |                        |               |                    |               |
| En hiver, le soir  |             |                        |               |                    |               |

Tableau 19: Sondage sur le confort

Les résultats issus de ce questionnaire montrent que globalement les gens sont satisfaits des conditions hygro-thermiques dans leurs habitations (figure 36 ).

Néanmoins, nous pouvons constater que les conditions thermiques sont meilleurs l'été ( 86% des occupants du panel restreint déclarent que la température est confortable l'été).





Figure 36: Résultats des questionnaires- confort

|       | Confortable | Légèrement confortable | Inconfortable | Très inconfortable | Insupportable |
|-------|-------------|------------------------|---------------|--------------------|---------------|
| Eté   | 86.11%      | 11.11%                 | 0.00%         | 2.78%              | 0.00%         |
| Hiver | 47.22%      | 33.33%                 | 2.78%         | 13.89%             | 2.78%         |

Tableau 20 : Confort d'hiver et d'été perçu par les occupants

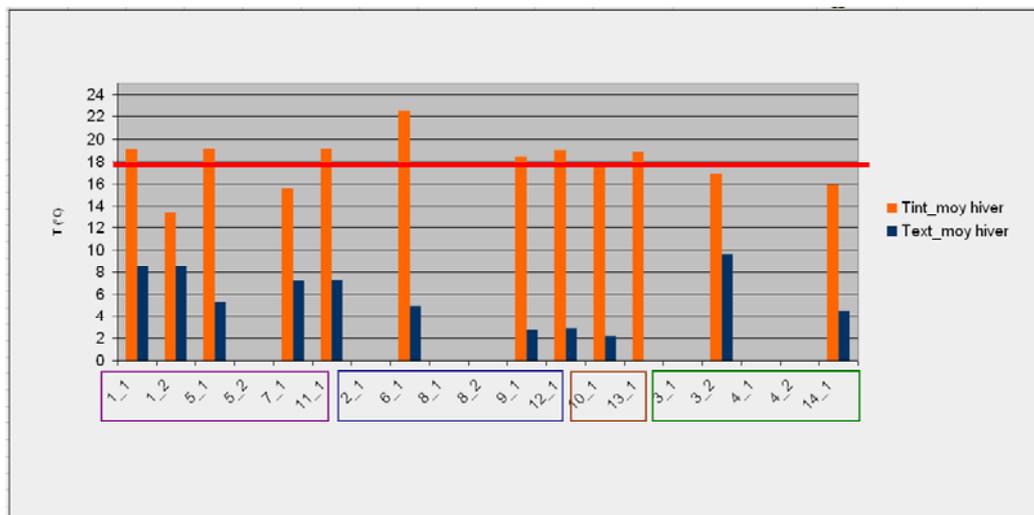


Figure 37: Moyennes des températures en hiver

La figure 37 présente les moyennes des températures extérieures et intérieures. Nous remarquons que dans l'ensemble la moyenne de la température intérieure est aux alentours des 18°C. Les logements ne sont pas tous chauffés en continu. La température moyenne dans le logement 1-2 équipé d'une PAC air-air, ne dépasse pas 14°C. D'après le questionnaire, le chauffage fonctionne en intermittence la journée et en continu la nuit et ne fonctionne pas pendant les longues absences. L'examen des courbes de température en hiver de ce logement nous permet d'émettre deux

hypothèses pour expliquer la chute de la température moyenne: Une longue absence des occupants ou une panne de la PAC. L'autre cas atypique à citer ici est le logement 3-2 qui n'est pas chauffé et *a priori*, avec peu d'apports internes. En effet, même si la personne âgée qui y vit n'est pas satisfaite des conditions climatiques intérieurs en hiver, la température moyenne est de 16.9°C avec un écart type de 1.04.

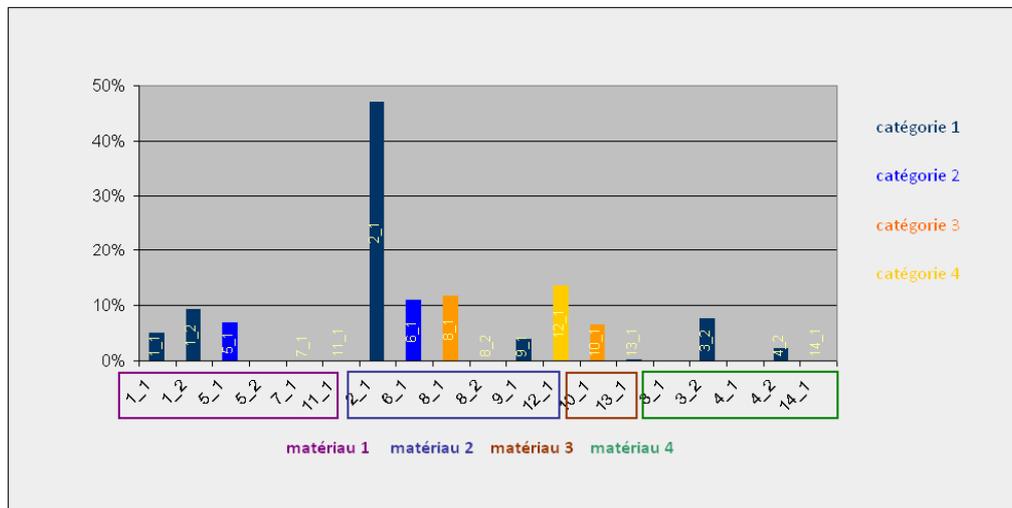


Figure 38: Confort d'été - % de dépassement du seuil de 26°C

## 8 CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Dans le cadre du projet BATAN, la tâche 2 « **Etude du comportement réel d'un panel de bâtiments restreint** » a permis de mener une grande campagne de mesures sur un panel de 14 bâtiments occupés (21 logements) issu de la tâche 1. L'instrumentation de ces bâtiments répondait à deux besoins : 1) alimenter les données d'entrées/ sorties du modèle BATAN. 2) disposer de données mesurées (ou recueillies) importantes pour améliorer les connaissances sur le comportement thermique du bâti ancien et celui des occupants qui y résident.

Ainsi, un protocole de mesure et de recueil de données non mesurées a été rédigé en adéquation avec le cahier des charges du modèle BATAN (tâche 3). Chaque logement instrumenté a bénéficié, en plus du guide d'instrumentation, d'un diagnostic approfondi. Les occupants ont été soumis à un questionnaire pour mieux appréhender leur comportement. Les différents scénarios (occupation, ventilation) déduits de ces questionnaires ont servi à alimenter la modélisation. Ces questionnaires, quand ils étaient bien remplis, nous ont été d'une grande utilité également, pour comprendre certains comportements révélés par les relevés de mesures.

Une méthode expérimentale d'identification des propriétés physiques des parois anciennes étudiées a été développée. Les résultats ont été utilisés pour l'élaboration des modèles BATAN pour l'hiver.

L'exploitation des données mesurées nous a permis de constater que pour les spécimens étudiés :

- La moyenne des consommations annuelles des bâtiments résidentiels suivis (collectifs et MI) est de 157,60 kWh/m<sup>2</sup>. Cette valeur exclut les consommations inférieures à 50 kWh/m<sup>2</sup> car nous considérons qu'elles ne sont pas représentatives de la réelle consommation du bâtiment à cause de mesures erronées, d'utilisation du bois ou d'occupation irrégulière.
- Les murs sont le premier poste de déperditions thermiques (53%) suivi par les fenêtres (20%).

Pour mieux comprendre le comportement thermique et hygrique du panel de logements instrumentés, nous avons réalisé plusieurs analyses :

- A l'échelle de la paroi pour mettre en évidence les mécanismes de transferts de chaleur et de masse à travers l'enveloppe des bâtiments anciens.
- A l'échelle du bâtiment pour mettre en évidence l'interaction du bâtiment avec son environnement

Compte tenu du contexte du suivi (conditions climatiques, occupation...), il a été difficile, à l'échelle de la paroi de mettre en évidence l'impact qu'ont les échanges de masse sur les échanges thermiques. Néanmoins, nous avons pu observer une corrélation entre la conductivité thermique et l'humidité spécifique plus ou moins forte selon le caractère hygroscopique de la paroi. Nous avons ainsi mis en évidence trois types de parois dans notre panel : à forte hygroscopie (matériau 1), à faible hygroscopie (matériau 4) et à hygroscopie moyenne (matériaux 2 et 3). Par ailleurs, la présence d'eau dans la paroi sous forme liquide pourrait influencer les propriétés thermiques de celle ci surtout pour des parois qui sont peu sensibles à l'humidité (granit).

De la même manière, l'inertie des parois anciennes a été mise en évidence grâce à la détermination du déphasage (inertie par transmission) et l'effusivité thermique (inertie par absorption). Nous avons ainsi établi trois types de paroi : à forte effusivité (matériau 1), à faible effusivité (matériau 4) et à effusivité moyenne (matériaux 2 et 3). Nous n'avons pu déterminer le déphasage d'une manière précise mais toutes les parois étudiées présentaient ,a minima un déphasage de 2 heures. Globalement, le fonctionnement constaté des ces parois est qu'en hiver elles stockent la chaleur pour la restituer quand le chauffage est éteint ou en mi-saison après l'arrêt du chauffage. En été, elles stoppent le front de chaleur pour le restituer avec une amplitude moindre ; ceci coupler à la ventilation nocturne pratiquée pour l'ensemble du panel permet de garder le logement frais même avec des températures extérieures élevées.

A l'échelle du bâtiment, l'analyse des corrélations entre les conditions thermiques et hygrique extérieure et intérieure a permis de montrer et de confirmer le fort lien qui existe entre le bâti ancien et son environnement. Ainsi, le caractère « perspirant » des parois, leur propriété d'inertie, les défauts de perméabilité et l'ouverture des fenêtres permettent au système « bâtiment » d'échanger de l'air et de l'humidité avec son environnement extérieur et de réguler ses conditions hygro-thermiques en fonction de celles à l'extérieur.

Nous avons montré également que pour le panel de bâtiments instrumentés, la perméabilité à l'air a un fort impact sur les besoins de chauffage surtout pour les catégories 3 et 4 selon la typologie BATAN (maisons en bandes et maisons isolées). Nous n'avons pas réussi à dégager une tendance par type de paroi (matériau).

Finalement, toutes les propriétés que nous avons mises en évidence font du bâti ancien un système vivant tentant de trouver un équilibre entre ses environnements extérieur et intérieur. Ce dernier dépend du mode d'occupation. L'occupant joue ainsi un rôle important dans la gestion énergétique de son logement. D'après les questionnaires, 86% des occupants du panel restreint trouvent leur logement confortable en été contre 47% en hiver. Nous ne disposons pas d'assez d'éléments pour comprendre le nombre important d'insatisfaits en hiver. Comme les relevés de températures n'ont pas décelé de grandes anomalies en hiver, nous supposons que ce nombre est du à une sensation d'inconfort liée aux courants d'air induits par les infiltrations et/ou la sensation de paroi froide. Une analyse plus fine des conditions hygro-thermiques est nécessaire pour mieux appréhender le confort d'hiver.

Pour conclure, la tâche 2 du projet BATAN a permis de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes physiques et de comportements du panel de bâti ancien étudié. Elle a collaboré ainsi à améliorer et/ou à confirmer des connaissances sur le comportement thermique du bâti ancien.

Les résultats obtenus, surtout ceux qui concernent les transferts dans les parois demandent à être approfondis notamment en cellules expérimentales et en laboratoire. En effet, nous avons montré ici les limites d'une étude in-situ pour caractériser le comportement hygro-thermique de l'enveloppe et le couplage avec le comportement global du bâtiment.

## 9 RETOURS D'EXPERIENCE

Dans le cadre du projet BATAN, une grande campagne de mesure a été menée sur des bâtiments d'habitation occupés. Nous citons dans ce qui suit d'une manière non exhaustive et sans aucun ordre de priorité quelques problèmes rencontrés.

### 1- La Mesure

- Nous avons rencontré des difficultés lors de l'emploi des capteurs « Wattnode » pour la mesure de consommations électriques. Ce matériel nous a été fourni par la société CHOFFEL. Il a été conçu pour des circuits monophasés or les logements instrumentés étaient en triphasés. Les données relevées n'étaient pas fiables.
- Les besoins de chauffage à la sortie de la chaudière n'ont pas pu être mesurés à cause du débitmètre à ultrason qui n'était pas compatible avec les types de canalisation que nous avons dans le panel restreint. Ce matériel nous a été fourni par la même société citée plus haut.
- Un problème récurrent de déchargement prématuré des piles de la station météorologique de Bayonne (1 mois d'autonomie) a été constaté. Ce défaut a été attribué à un anémomètre. Des données n'ont pu être enregistrées et ont dû être remplacées par des données achetées auprès de Météo France.

### 2- L'instrumentation dans des bâtiments occupés

- L'installation de capteurs portatifs à demeures dans des logements occupés présente un inconvénient majeur qui est la possibilité de les déplacer. En effet, nous avons été confronté à ce problème où l'occupant déplaçait fréquemment le capteur de température. Cela à entraîner des données non exploitables pour le projet.
- L'exemple de l'installation à Concarneau est difficile car des travaux majeurs ont été mené cinq mois après que l'instrumentation ait été mise en place. Cela a conduit à l'abandon de ce site au profit du site de Pluvigner.
- Les agents du CETE n'avaient pas le droit d'intervenir sur tableau électrique car ils ne sont pas habilités à le faire (une habilitation est en cours pour plusieurs agents).
- Nous avons eu énormément de difficultés à trouver des artisans pour des interventions à faible coût.
- La diversité des configurations d'installation a rendu la gestion et la supervision des sites très complexe.
- Les délais inhérents aux procédures de marché public ont provoqué des retards dans la mise en place de l'instrumentation au début du projet BATAN.