

## Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948

Tâche 3 : Elaboration du modèle de calcul BATAN

Rapport final

Février 2011

DGUHC – Convention n Y07.45-0003597

ADEME – Convention n 0704C0056



## Auteurs

Richard CANTIN	ENTPE
Gérard GUARRACINO	ENTPE
Andrea KINDINIS	ENTPE
Bassam MOUJALLED	ENTPE (jusqu'au 13 novembre 2009)

Les auteurs de ce rapport remercient pour leurs contributions Dan Rotari, Isabelle Pereyron et les élèves ingénieurs de la Voie d'Approfondissement Bâtiment de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE).

## Sommaire

1	Rappel du cahier des charges de la Tache 3.....	5
1.1	Objectifs de la tâche 3 .....	5
1.2	Architecture du modèle BATAN .....	6
2	Données disponibles .....	8
3	Elaboration des modèles thermo aérauliques .....	10
3.1	Modélisation avec TRNSYS-COMIS.....	10
3.1.1	Principes de modélisation .....	10
3.1.2	Les entrées .....	12
3.1.3	Les sorties.....	13
3.2	Modélisation avec HEAT 3.....	13
3.2.1	Problématique de modélisation des parois hétérogènes .....	13
3.2.2	Principe de modélisation avec HEAT 3 .....	14
3.2.3	Les entrées .....	14
3.2.4	Les sorties .....	15
4	Calage des modèles thermo aérauliques .....	16
4.1	Les principales incertitudes étudiées .....	16
4.2	Les autres facteurs d'influence .....	17
4.3	La prise en compte de critères saisonniers .....	18
5	Modèles thermo aérauliques calés .....	20
6	Plan d'expériences .....	21
6.1	Bref rappel du cahier des charges.....	21
6.2	Etapes préliminaires à l'élaboration des modèles Batan .....	22
6.3	Facteurs et niveaux .....	23
6.4	Forme des modèles BATAN pour la période hivernale .....	26
6.5	Forme des modèles BATAN pour la période estivale .....	27
6.6	Définitions des paramètres considérés .....	27
6.7	Compléments sur la définition des plages de variation des paramètres.....	30
7	Résultats BATAN – Logements dans un immeuble collectif.....	32
7.1	Modèle 1 - Cas 1.1 et 1.2 : immeuble en pierre coquillée (Bayonne).....	32
7.2	Modèle 3 - Cas 3.1 et 3.2 : immeuble en moellons, torchis et colombages (Bayonne).....	34
7.3	Modèle 4 - Cas 4.1 et 4.2 : immeuble en torchis et colombages (Bayonne).....	36
7.4	Modèle 5 - Cas 5.1 et 5.2 : immeuble haussmannien en pierres (Paris).....	38
7.5	Modèle 6 - Cas 6.1 : immeuble haussmannien en briques et pierres (Paris).....	40
8	Résultats BATAN – Maisons individuelles .....	42
8.1	Modèle 2 - Cas 2 : maison en calcaire tendre (Bollène).....	42
8.2	Modèle 7 - Cas 7 : maison en granit (Pluvigner).....	44
8.3	Modèle 8 - Cas 8.1 et 8.2 : maison en calcaire tendre (Bar-le-Duc).....	46
8.4	Modèle 9 - Cas 9 : maison partagée en briques (Noisiel).....	48
8.5	Modèle 10 - Cas 10 : maison mitoyenne en pierre et pisé (Bessenay) .....	50
8.6	Modèle 11 - Cas 11 : maison en calcaire extra dur (St Julien Crempse) .....	53
8.7	Modèle 12 - Cas 12 : maison en calcaire tendre (Saudrupt) .....	55
9	Résultats RT 2005 .....	58
10	Confrontation des résultats.....	59

11	Annexes .....	60
11.1	Rappel des chiffres disponibles avant BATAN (en 2005).....	61
11.2	Rappel des chiffres disponibles après l'étude « Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie » (en 2007).....	62
11.3	Exemples de résultats obtenus avec TRNSYS COMIS .....	65
11.4	Exemples de résultats obtenus avec HEAT 3.....	68
11.5	Guide d'utilisation des modèles BATAN.....	87
11.6	Cahier des charges du modèle BATAN .....	91

## 1 RAPPEL DU CAHIER DES CHARGES DE LA TACHE 3

### 1.1 Objectifs de la tâche 3

La tâche 3 du projet BATAN a pour objectif de développer un modèle permettant une évaluation globale du comportement thermique du bâti ancien en prenant en compte les modes constructifs et les spécificités du bâti ancien (cf. cahier des charges en annexe).

Le modèle doit intégrer les données fournies par l'étude typologique de la tâche 1, et converger vers le comportement réel des logements étudiés lors de la tâche 2.

La tâche 3 comporte 4 étapes qui suivent un procédé itératif par confrontation, à chaque étape, avec l'étude du comportement réel. Les étapes sont les suivantes :

1. Elaboration du cahier des charges du modèle (validé en février 2009, en annexe)
2. Formalisation du modèle
3. Simulation sur le panel restreint de bâtiments
4. Confrontation des résultats et analyse de la convergence du modèle BATAN

La figure 1.1 illustre les principales étapes du projet BATAN et situe la tâche 3.

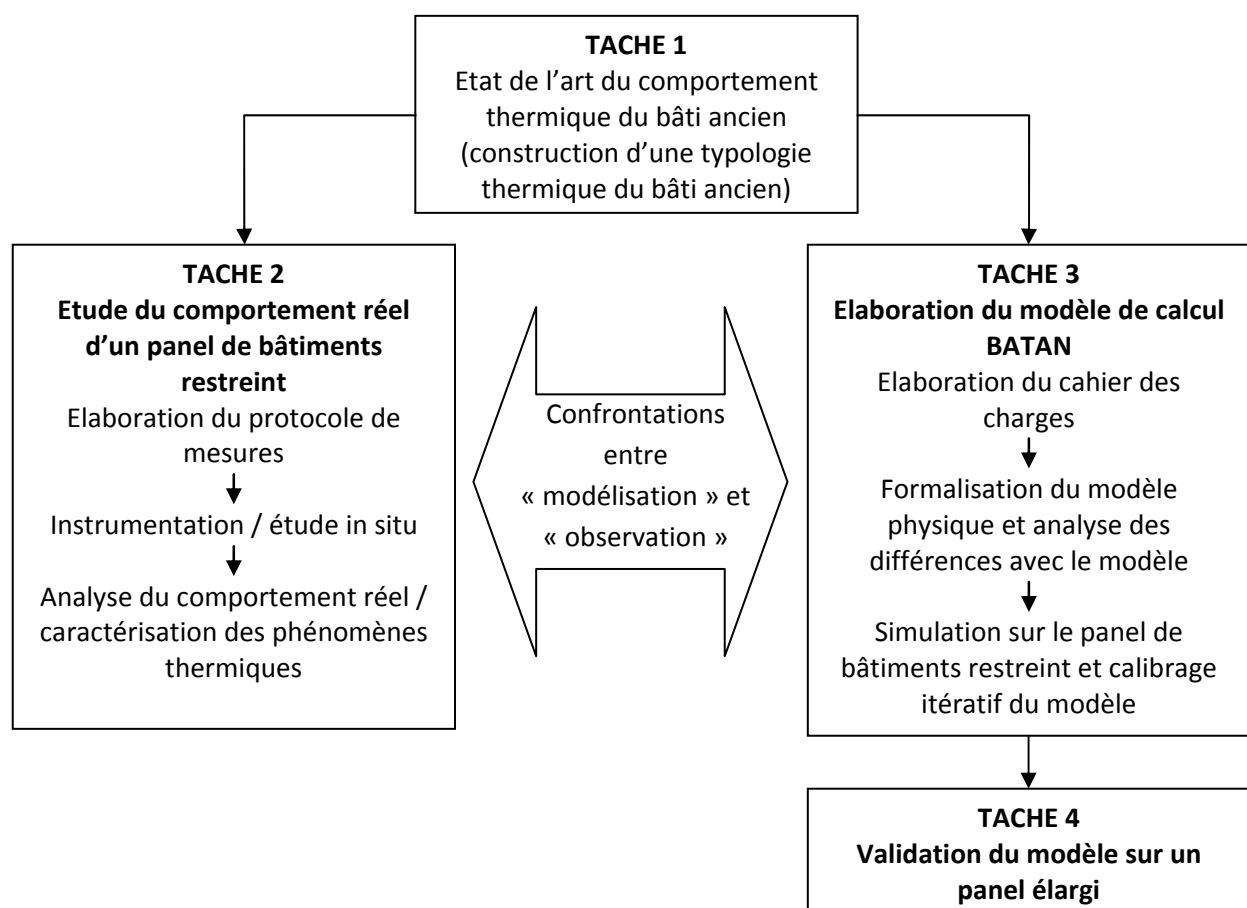


Figure 1.1 : Déroulement des principales tâches

## 1.2 Architecture du modèle BATAN

L'architecture du modèle BATAN répond au cahier des charges élaboré avec la maîtrise d'ouvrage du projet BATAN (cf. annexe). Ainsi, les objectifs ont été formalisés de la façon suivante :

- Une prise en compte des modes constructifs anciens à travers la typologie thermique proposée par la tâche 1. Cette typologie permet de définir les entrées du modèle.
- Une intégration de l'ensemble des spécificités du bâti ancien notamment l'hétérogénéité tridimensionnelle des parois, l'inertie thermique, le zonage thermique et la ventilation naturelle.
- Une évaluation globale du comportement thermique définissant les sorties du modèle (besoin de chauffage et confort thermique en été).

Pour décrire l'architecture du modèle BATAN, il faut préciser l'approche méthodologique retenue pour la construction du modèle. Le modèle doit être capable de prendre en compte les particularités de l'enveloppe du bâti ancien, le zonage thermique, l'inertie thermique et la ventilation naturelle.

Le choix d'une modélisation thermo-aéraulique dynamique et multizonale s'impose pour l'élaboration de ce modèle afin de prendre en compte les différents phénomènes.

La littérature propose un grand nombre d'outils qui permettent une modélisation dynamique du comportement thermo-aéraulique du bâtiment. Il s'agit de choisir parmi les outils lesquels correspondent au contexte du bâti ancien et de les combiner afin de parvenir à satisfaire aux objectifs du modèle BATAN. Le choix des outils permet d'explicitier l'architecture du modèle et de préciser les différentes entrées du modèle (voir figure 1.2).

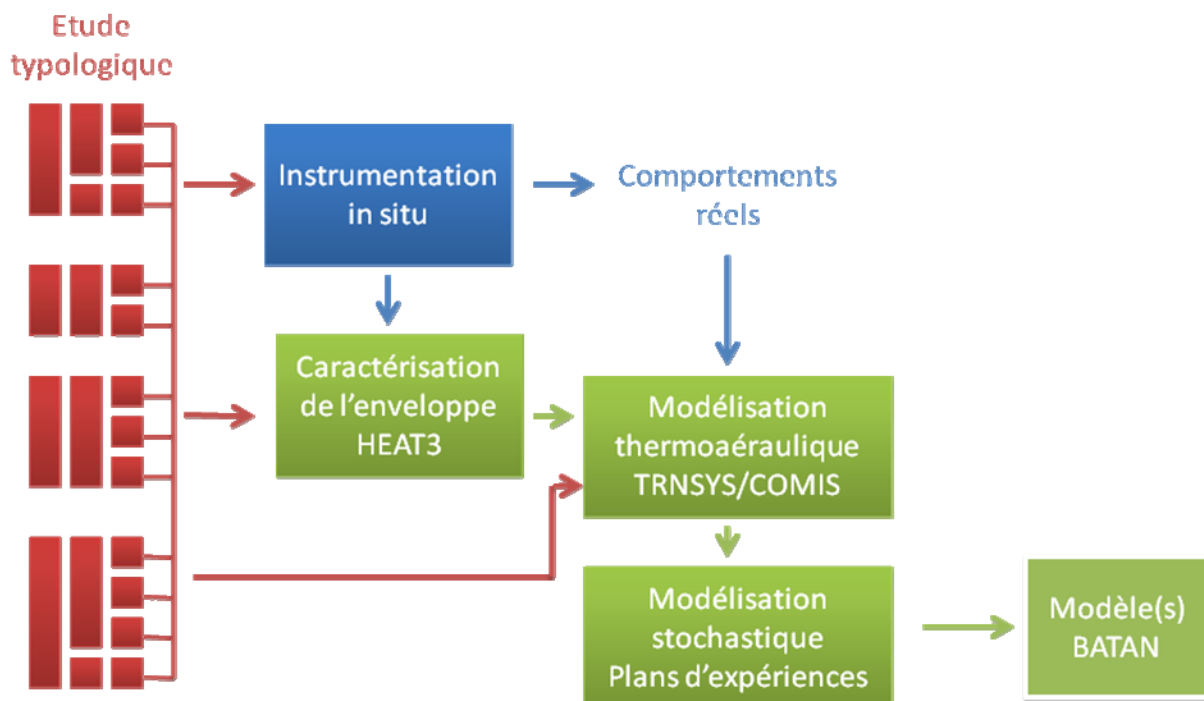


Figure 1.2 : Méthodologie adoptée pour développer le modèle BATAN.

D'une part, la détermination des caractéristiques thermiques des parois multicouches et hétérogènes nécessite l'utilisation d'un outil de calcul pour les coefficients de transmission à travers les parois et les liaisons entre les parois. L'outil HEAT 3 a été retenu pour cette tâche. Il permet de modéliser les flux conductifs tridimensionnels en régime variable et permanent. D'autre part, la modélisation dynamique du comportement thermo-aéraulique du bâti ancien est assurée en couplant l'outil de simulation thermique TRNSYS avec l'outil de simulation aéraulique COMIS. L'utilisation de TRNSYS avec COMIS présente un environnement de modélisation dynamique et flexible prenant en compte les différents phénomènes thermo-aérauliques dans un bâtiment multizonal avec la possibilité de modéliser un très grand nombre de dispositifs thermiques et climatiques grâce à la bibliothèque enrichie dont dispose TRNSYS.

Pour chaque type de bâtiment du panel restreint retenu par l'étude typologique, un modèle thermo-aéraulique est créé avec TRNSYS-COMIS. Chaque modèle est calibré par confrontation avec le comportement réel observé. Les modèles construits sont ensuite analysés par la méthode des plans d'expériences. Cette méthode permet de mener une étude paramétrique pour évaluer l'importance relative des éléments du bâtiment ainsi que les interactions qui peuvent exister entre ces éléments.

Les entrées du modèle BATAN sont notamment les variables qui ont été utilisées pour construire l'étude typologique de la tâche 1. Cinq sous-systèmes ont été identifiés, parmi lesquels trois ont été retenus pour l'étude typologique (cf. tâche 1). Pour chaque sous-système, nous pouvons identifier ensuite la liste des variables d'entrée nécessaires pour construire les modèles thermo-aérauliques dans les outils de simulations indiqués ci-avant. Les sous-systèmes retenus sont les suivants :

- Environnement/implantation
- Enveloppe
- Modes constructifs

Les variables d'entrée ne sont pas les mêmes selon l'étape de travail. Pour la modélisation avec TRNSYS-COMIS, ce sont les variables nécessaires pour la construction des modèles thermo-aérauliques. Pour les plans d'expériences, les variables d'entrée sont les facteurs influençant le comportement thermique du bâtiment (implantation du bâtiment, fenêtres, murs opaques, toiture, ventilation, inertie, etc.). Ces variables permettent de calculer le comportement de chaque bâtiment.

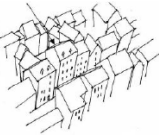
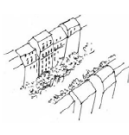
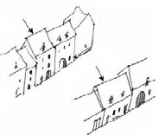
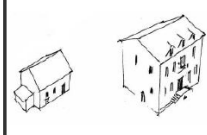
Les sorties du modèle sont les performances thermiques et énergétiques du bâtiment. En hiver, le comportement thermique du bâtiment est caractérisé par les besoins et les consommations du chauffage. En été, le comportement thermique est caractérisé par le niveau du confort thermique. Les variables de sortie caractérisant le comportement thermique des bâtiments sont les mêmes pour la modélisation thermo aéraulique et pour les plans d'expériences :

- Le besoin de chauffage pour caractériser la performance thermique en hiver,
- Le confort thermique en été. L'indicateur retenu pour mesurer le confort thermique est le nombre d'heures pendant lesquelles la température est en dehors de la zone de confort.



## 2 DONNEES DISPONIBLES

Les données utilisées pour élaborer les modèles sont fournies par les tâches 1 et 2. Initialement, les études de cas étaient numérotées de 1 à 14. Le tableau 2.1 précise les études de cas du panel restreint dans la matrice présentant la typologie thermique du bâti ancien (Tâche1).

Implantation		I/ îlots fermés de centre ancien				II/ haussmannien		II/ 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		3		5		7				11			
	2		2			6		8/9				12			
	3							10				13			
	4			3		4									14

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 cuite	Pierre/Bois hourdis	Bois
B	Lourd	Lourde	Moyenne	Pierre/Brique/Terre cuite	Bois	Bois
C	Moyen	Moyenne	Légère	Torchis	Tous types	Tous types

Tableau 2.1 : Typologie du panel restreint

Deux bâtiments n'ont pas permis de développer une étude complète :

- L'étude de cas n°13 est un bâtiment situé à Vazerac (82). Les données recueillies sont inexploitable pour l'hiver en raison d'incohérences relevées lors du dépouillement en phase de modélisation, notamment pour les systèmes de production et de distribution de chaleur : par exemple, les températures d'eau du retour vers la chaudière étaient supérieures aux températures de sortie de la chaudière.
- L'étude de cas n°14 est un bâtiment ayant subi une très lourde rénovation, dont les données relatives au chauffage étaient incomplètes. Par ailleurs, compte tenu de l'importante rénovation, il est hors du champ d'étude du projet BATAN, son comportement thermique n'étant pas représentatif des bâtiments anciens avant réhabilitation.

L'étude de cas n°7 était initialement un bâtiment situé à Concarneau (29). Pour des raisons liées à l'occupation du logement, cette étude a été abandonnée en 2009. Un nouveau bâtiment répondant aux exigences du panel restreint a été recherché. Il s'agit d'une maison en granit à Pluvigner (56). Le changement de bâtiment en cours d'instrumentation a décalé les recueils de données et leur exploitation (modélisation et calage du modèle).



Les données sont complètes pour établir les modèles pour 12 bâtiments numérotés de 1 à 12. Les bâtiments 1 à 6 (à l'exception du cas 2) sont des immeubles collectifs, et les bâtiments 2, et 7 à 12, sont des maisons individuelles.

Au total, 17 logements anciens dans 12 bâtiments ont pu être modélisés (Tableau 2.2).

Logement	Ville
1.1	Bayonne
1.2	Bayonne
2	Bollene
3.1	Bayonne
3.2	Bayonne
4.1	Bayonne
4.2	Bayonne
5.1	Paris
5.2	Paris
6.1	Paris
7	Pluvigner
8.1	Bar-le-Duc
8.2	Bar-le-Duc
9	Noisiel
10	Bessenay
11	St Julien Crempse
12	Saundrupt

*Tableau 2.2 : liste des logements modélisés*

### 3 ELABORATION DES MODELES THERMO AERAIQUES

#### 3.1 Modélisation avec TRNSYS-COMIS

##### 3.1.1 Principes de modélisation

L'élaboration des modèles TRNSYS-COMIS est schématisée avec la figure 3.1.

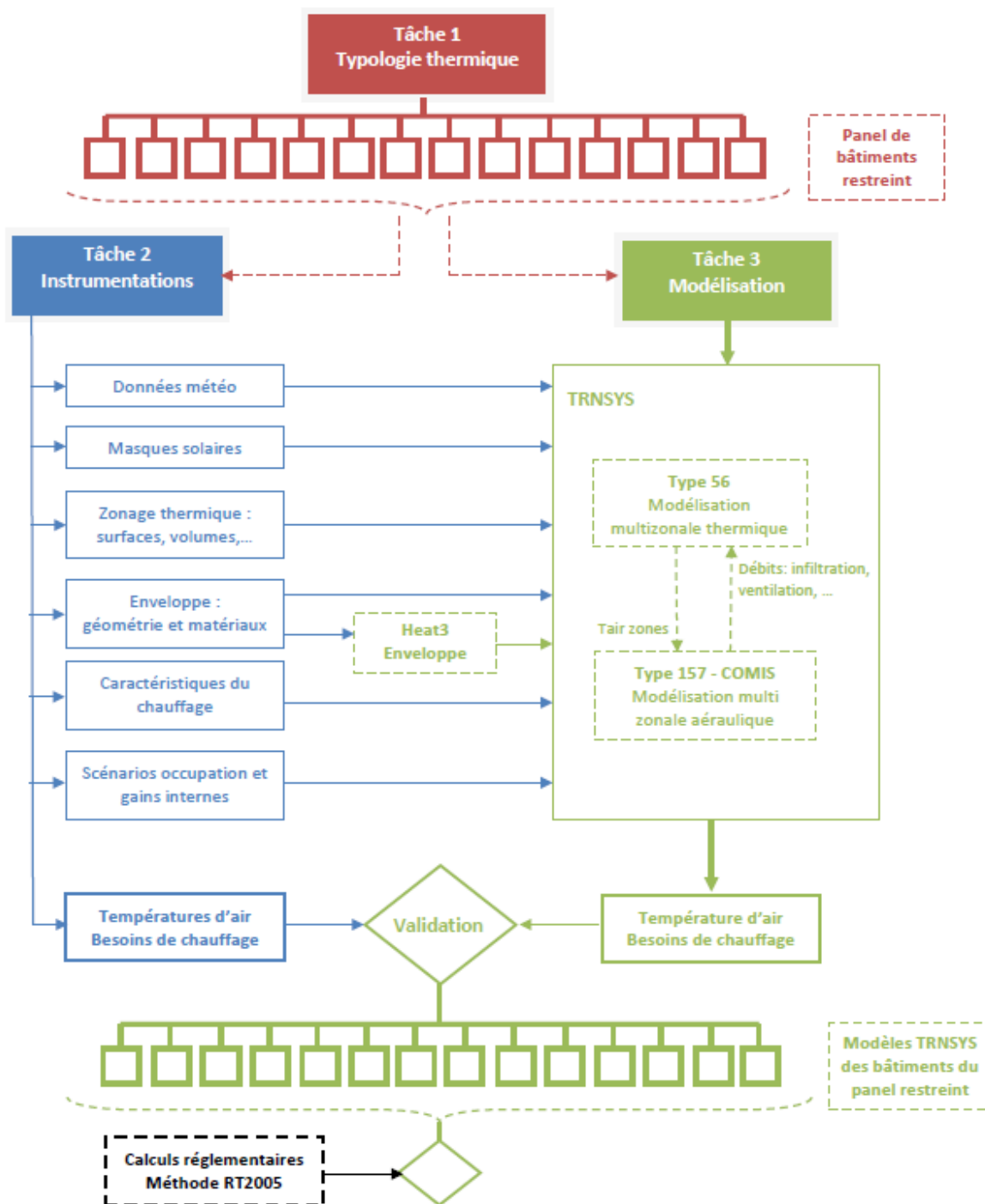


Figure 3.1. Elaboration des modèles TRNSYS-COMIS pour le panel restreint

Chaque logement du panel restreint est modélisé avec l'outil de simulation thermique TRNSYS (version 16) couplé avec l'outil de calcul aéraulique COMIS (version 2.0).

Les modèles développés avec TRNSYS/COMIS sont calés et validés avec les mesures et données fournies par la tâche 2.

La construction des modèles nécessite l'assemblage de plusieurs sous-programmes « Types » et routines internes permettant de définir les données climatiques, les masques solaires, les parois, et les transferts thermiques et aérauliques dans les bâtiments (Figure 3.2).

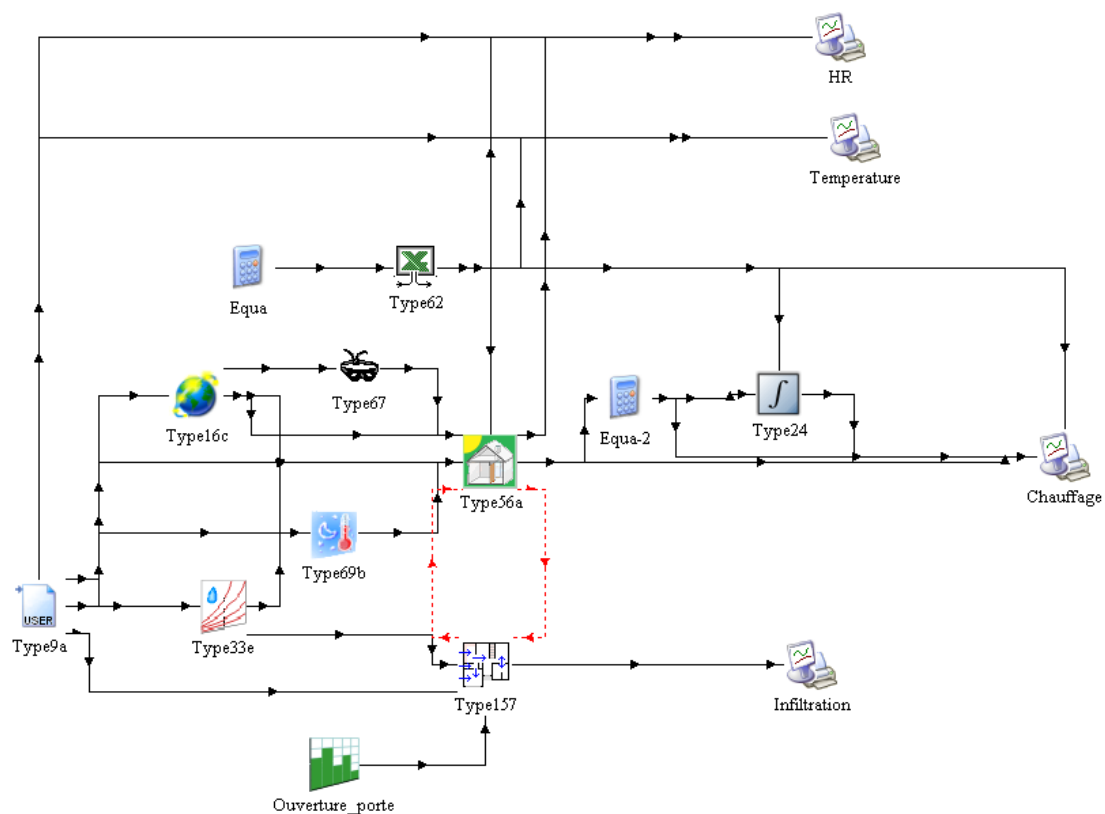


Figure 3.2 : Assemblage de Types avec TRNSYS (Exemple logement collectif)

Les principaux modules « Types » utilisés sont:

- Type 9, 16, 33,69 : lecture et traitement des données climatiques
- Type 67 : modélisation des masques solaires lointains. Il calcule le rayonnement total incident en fonction des masques lointains. Les valeurs obtenues sont utilisées dans le calcul des transferts thermiques (Type56)
- Type 62: lecture des températures de consigne
- Type 56 : modélisation thermique multizone du logement
- Type 157 : modélisation aéraulique multizone couplée au Type 56. A chaque pas de temps, les températures obtenues avec le Type56 sont prises en compte dans le calcul des débits d'air entre les zones. Ces débits d'air sont utilisés par le Type 56 pour déterminer les températures
- Types 24 et 65: sorties du modèle.

### 3.1.2 Les entrées

Les dimensions de chaque bâtiment sont saisies dans le modèle conformément aux données fournies par les guides d'inspection (Tâche 2).

Les hypothèses liées au développement des modèles thermiques avec TRNSYS sont:

- La transmission monodimensionnelle de la chaleur à travers les parois et les planchers
- La conductivité et la capacité thermique sont considérées constantes
- La température de l'air est constante dans chaque zone
- Le profil d'occupation (charges internes) est le même chaque jour
- Les températures des appartements ou espaces contigus sont considérées avec un profil constant si elles sont inconnues

Les hypothèses pour le calcul des transferts aérauliques avec COMIS sont les suivantes :

- les portes intérieures sont ouvertes selon les informations obtenues avec les questionnaires
- les fenêtres sont fermées
- pour le calcul des infiltrations, les fissures dans les murs extérieurs (par l'enveloppe) sont déterminées selon les mesures de perméabilité in situ.

Les données d'entrée des modèles ont été classées en deux catégories : les données descriptives nécessaires à la construction des modèles pour chaque étude de cas du panel restreint, et les données issues des mesures in situ nécessaires pour le calage et la validation des modèles développés.

Ces données descriptives permettant de modéliser le bâtiment avec TRNSYS concernent :

- le site et l'implantation du bâtiment (orientation et masques)
- le zonage thermique (organisation des espaces intérieurs, volumétrie et usages)
- la description des parois verticales et horizontales des différentes zones (composition et épaisseur)
- la description des fenêtres et des portes fenêtres (type et épaisseur du vitrage, menuiserie, protection solaire interne et externe)
- la description du système de ventilation (type de ventilation, position et dimensions des entrées et des sorties d'air)
- la description du système de chauffage (espaces chauffés, type d'émetteurs, consignes et régulation)
- la description des gains internes (profil d'occupation, questionnaires, nombre d'occupants, puissances des équipements et de l'éclairage).

Les données issues des mesures in situ nécessaires au développement des modèles aérauliques avec COMIS sont :

- Le zonage et la volumétrie
- Le coefficient de pression au vent de chaque façade
- Le coefficient de débit d'air et le coefficient exposant de l'écoulement
- La longueur et le diamètre des différents conduits d'aération (par exemple, cheminée)

Les données d'entrée utilisées pour le calage et la validation du modèle sont :

- les données climatiques (Température et humidité relative de l'air, vitesse et direction du vent, rayonnement solaire direct et diffus)
- la perméabilité à l'air de la façade
- les températures et humidités relatives dans les différentes zones

D'autres données d'entrée spécifiques aux études de cas du panel sont également utilisées, comme, par exemple, les caractéristiques des ponts thermiques ou les conditions aux limites particulières liées à l'occupation.

### 3.1.3 Les sorties

Pour chaque étude de cas, le modèle TRNSYS/COMIS fournit, avec un pas de temps horaire:

- La température dans chaque zone
- La température de surface de chaque paroi
- L'humidité de chaque zone
- Les débits d'air entre les zones et les débits entrant par l'enveloppe
- Les besoins de chauffage pour chaque zone

Chaque modèle peut être utilisé pour simuler les comportements thermiques du bâtiment sur une année.

## 3.2 Modélisation avec HEAT 3

### 3.2.1 Problématique de modélisation des parois hétérogènes

La modélisation du comportement thermique des bâtiments nécessite la connaissance des caractéristiques des différents composants de l'enveloppe. La plupart des outils de calcul thermique du bâtiment considère une conduction unidirectionnelle à travers les parois. Les règles de calcul Th-U de la réglementation thermique permettent de déterminer les caractéristiques thermiques unidirectionnelles des parois en régime stationnaire (coefficients de transmission surfacique et linéique). Les valeurs fournies dans les catalogues s'appliquent aux parois courantes rencontrées dans les bâtiments récents.

Dans le cas des bâtiments anciens, les parois sont souvent hétérogènes. Elles sont composées d'un assemblage d'éléments définissant des modes constructifs anciens. Il est parfois difficile de distinguer, dans certains cas, les parties courantes, les points singuliers ou les ponts thermiques intégrés. Pour évaluer les caractéristiques thermiques de ces éléments de l'enveloppe, une modélisation des transferts thermiques tridimensionnels est réalisée avec le logiciel Heat 3 (version 3.5). Ce calcul est effectué conformément à la norme européenne NF EN ISO 10211, et prend en compte les échanges de chaleur en régime permanent et dynamique.

Le calcul en régime dynamique permet de caractériser l'inertie thermique des parois. Les transferts de masse à travers la paroi (humidité) et le couplage entre les transferts de masse et de chaleur à l'intérieur de la paroi ne sont pas pris en compte avec Heat 3. Le comportement hygroscopique des parois est pris en compte dans la modélisation thermique du bâtiment avec TRNSYS lors du calcul de l'humidité dans chaque zone.

### 3.2.2 Principe de modélisation avec HEAT 3

Le logiciel Heat 3 est conçu pour résoudre les problèmes tridimensionnels de conduction thermique, aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent. Il se base sur la méthode de calcul aux éléments finis pour résoudre l'équation de la chaleur.

L'outil de calcul Heat 3 est utilisé pour déterminer les caractéristiques thermiques des parois hétérogènes en régime dynamique, notamment la résistance thermique et l'inertie thermique. Il permet l'étude de ponts thermiques, de flux thermiques à travers les angles d'une menuiserie, et des pertes de chaleur d'un plancher vers le sol. Les informations ainsi produites sont indispensables à la modélisation des parois hétérogènes rencontrées dans le panel restreint de bâtiments anciens.

La modélisation s'effectue en 3 étapes. Tout d'abord, la géométrie du problème (paroi hétérogène ou jonction entre 2 ou plusieurs parois) est définie. Puis, les matériaux composant chaque élément de cette géométrie et les conditions aux limites spécifiques à la situation étudiée sont précisés.

Pour définir les conditions climatiques, il est possible d'importer différents formats de données climatiques pour réaliser des simulations dynamiques.

La figure 3.3 présente le principe de modélisation d'une paroi hétérogène avec Heat 3.

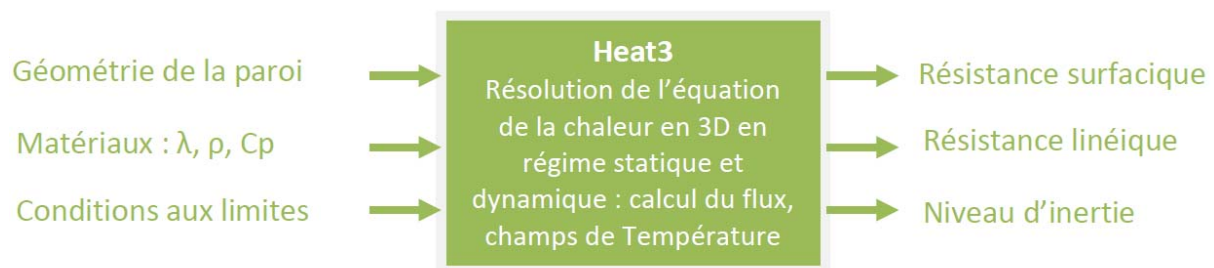


Figure 3.3: Principe de modélisation thermique avec Heat 3

### 3.2.3 Les entrées

#### 3.2.3.1 Description de la géométrie et du maillage du modèle thermo aéraulique

Pour décrire la géométrie de l'enveloppe, il est nécessaire de connaître les assemblages et les dimensions des différents éléments la composant. Les données décrivant la géométrie des parois hétérogènes et des assemblages sont recueillies lors des visites ou à partir des plans (Tâche 2). Ces données sont complétées par les informations trouvées dans la littérature sur les types constructifs concernés.

---

### 3.2.3.2 Description des matériaux

Les matériaux sont caractérisés par les propriétés thermo physiques suivantes : la conductivité thermique  $\lambda$  (W/m.K), la masse volumique  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), et la capacité thermique massique à pression constante  $C_p$  (J/kg.K).

Ces trois grandeurs peuvent être déterminées en première approche à partir du catalogue des matériaux de la réglementation thermique. La valeur de la conductivité thermique  $\lambda$  est validée par comparaison avec la valeur déterminée à partir des mesures réalisées in situ (Tâche 2).

---

### 3.2.3.3 Conditions aux limites

Heat 3 propose différentes options pour caractériser les conditions aux limites. Il est possible de spécifier soit un flux de chaleur, soit une température avec une résistance de surface.

---

## 3.2.4 Les sorties

Les résultats obtenus avec Heat 3 sont des flux thermiques correspondant à des surfaces déterminées, le flux thermique ou la température en un ou plusieurs points dont les coordonnées sont renseignées. Ces résultats permettent de déterminer les coefficients de transmission surfacique et linéique.

La connaissance du flux de chaleur à travers une paroi hétérogène permet de calculer sa résistance thermique et la transmission linéique des ponts thermiques. L'inertie thermique est caractérisée par l'amortissement et le déphasage du flux transmis à partir de la surface extérieure de la paroi soumise à une onde thermique sinusoïdale vers la surface intérieure.



## 4 CALAGE DES MODELES THERMO AERAIQUES

### 4.1 Les principales incertitudes étudiées

Le calage vise à identifier et réduire les éventuelles erreurs de modélisation, les incertitudes, les inconnues, ou les imprécisions qui peuvent affecter tout modèle.

Quatre types d'incertitudes sont plus particulièrement étudiés lors du calage des modèles TRNSYS/COMIS :

#### a) Les incertitudes liées à la modélisation du logement et du bâtiment

La décomposition d'un logement considéré comme un système complexe permet de créer plusieurs modèles simples. Avec ces modèles, il est possible d'isoler différentes variables constitutives du modèle global. A partir des données fournies par la tâche 2, une étude paramétrique permet d'évaluer l'influence de différentes sources d'incertitudes liées à ces variables. Par exemple, l'étude de l'impact des incertitudes des variations des transferts thermiques liées à la conductivité des matériaux peut être faite (Figure 4.1).

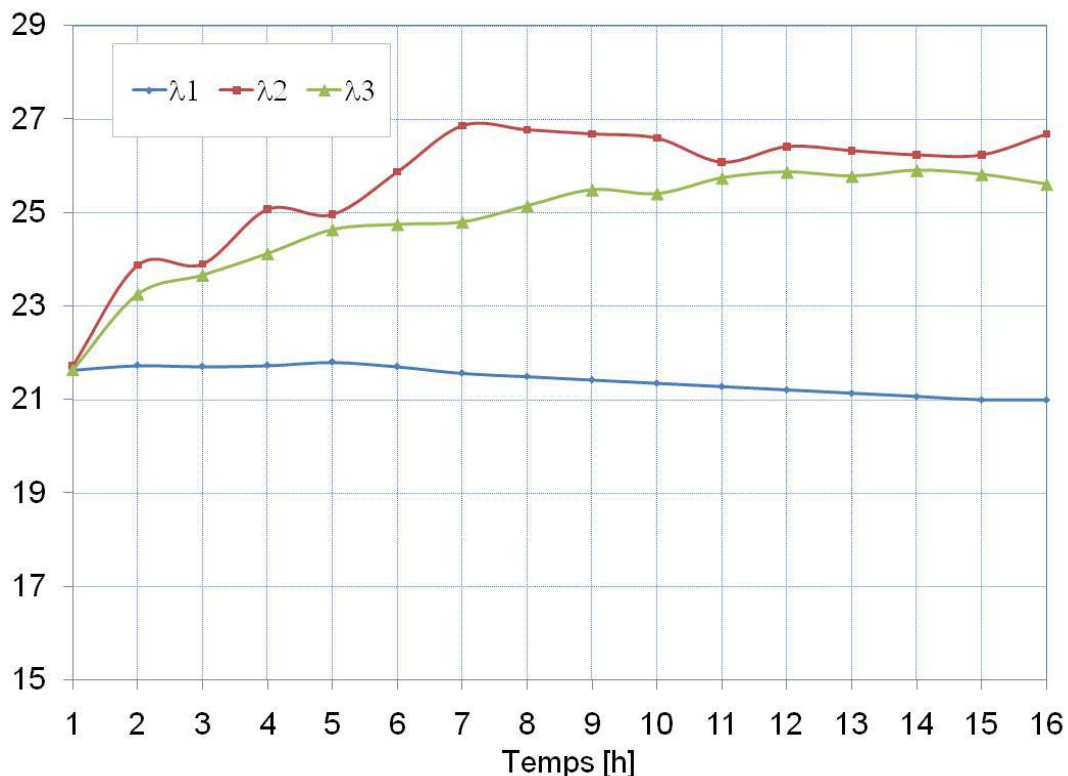


Figure 4.1 : Exemple de variation de la température de surface en fonction du temps et de la conductivité  $\lambda$  des matériaux

### b) Les incertitudes liées à l'occupation

Les données recueillies en matière d'occupation par la tâche 2 sont analysées pour permettre la saisie de scénarios moyens d'occupation. Par exemple, une étude paramétrique d'un scénario d'occupation nocturne peut considérer que les appareils électriques sont éteints et les fenêtres fermées.

### c) Les incertitudes liées au renouvellement d'air

L'influence des incertitudes liées à la ventilation et aux infiltrations est étudiée. Les résultats des modèles thermo-aérauliques TRNSYS/COMIS sont comparés avec les mesures in situ. La cohérence des ordres de grandeur est vérifiée (Figure 4.2).

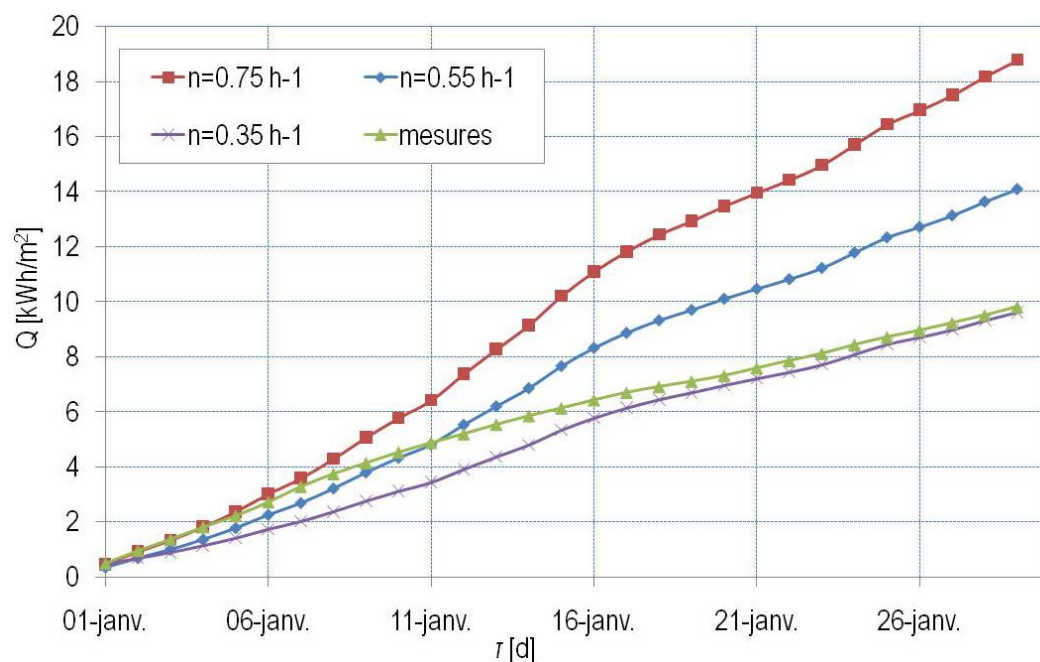


Figure 4.2 : Exemple d'influence des infiltrations sur les besoins de chauffage

### d) Les incertitudes liées aux ouvertures

La réduction des incertitudes liées à la modélisation des ouvertures nécessite une évaluation des périodes d'ouvertures des portes et fenêtres ainsi que des débits d'air associés, à partir des données fournies par la tâche 2.

En raison des objectifs de modélisation du projet BATAN, et selon la disponibilité des données fournies par la tâche 2, le calage se fait différemment selon la période considérée (hiver, été).

## 4.2 Les autres facteurs d'influence

En complément des incertitudes précédemment citées, d'autres facteurs influençant la modélisation peuvent être analysés selon les caractéristiques des logements modélisés.

- La méconnaissance des températures des espaces mitoyens d'un logement, chauffé ou non, est une source d'erreurs à prendre en compte : étage supérieur, inférieur, escaliers, espaces non chauffés.
- La méconnaissance du profil de consommation d'eau chaude sanitaire est également une difficulté pour distinguer les différents usages énergétiques et les besoins de chauffage d'un logement (Figure 4.3).

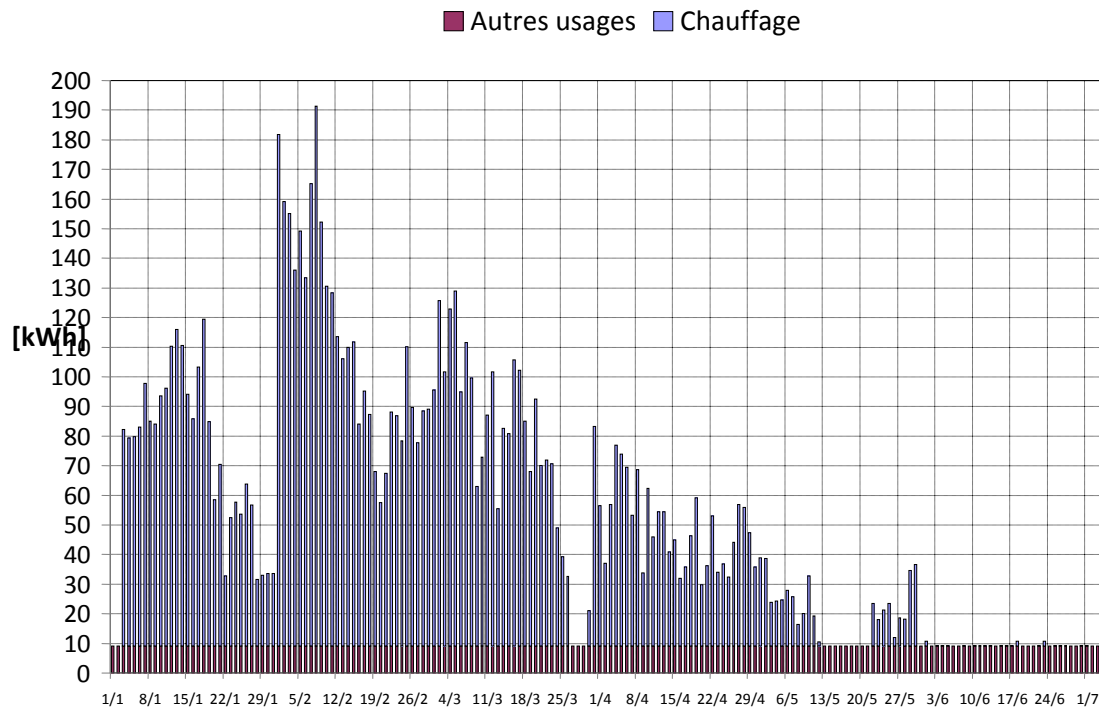


Figure 4.3 : Exemple des consommations de gaz couvrant tous les usages

- Il existe également une source d'erreurs liée à la méconnaissance des rendements exacts des appareils produisant ou distribuant l'énergie : système de chauffage, chauffe-eau, récupération des apports liés aux déperditions, eau chaude, etc.

### 4.3 La prise en compte de critères saisonniers

Les critères de calage sont différents en hiver et en été.

Pour la période hivernale, l'analyse est conduite avec l'objectif d'optimiser le modèle de calcul du besoin de chauffage pour l'étude de cas. Le calage est alors effectué en imposant les températures intérieures, qui sont celles mesurées dans les différentes zones ou des températures estimées à partir de celles mesurées pour les zones où les mesures n'ont pas été effectuées. Ce calage s'appuie sur une comparaison des besoins de chauffage calculés par simulation et des besoins calculés à partir de la consommation énergétique finale mesurée.

La référence pour le calage hivernal correspond généralement au mois le plus froid.

Le critère de calage pour la saison hivernale est défini par l'erreur hivernale  $err_{hiver}$  (en %) :

$$err_{hiver} = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{i,sim} - Q_{i,mes}|}{\sum_{i=1}^n Q_{i,mes}}$$

Avec  $Q_{i,sim}$  le besoin de chauffage calculé au pas de temps  $i$

Et  $Q_{i,mes}$  le besoin de chauffage au pas de temps  $i$  calculé à partir de la consommation mesurée

Le pas de temps horaire  $i$  est compté de 1 à  $n$ , la somme pouvant être étendue sur l'ensemble de la période considérée.

Ce critère caractérise l'écart entre le besoin de chauffage calculé à partir de la consommation mesurée in situ et le besoin de chauffage calculé par le modèle et la simulation. Les températures mesurées (intérieures et extérieures) sont les températures de référence pour les calculs.

Pour la période estivale, l'analyse est différente. L'objectif du modèle pour la période estivale est une évaluation de l'inconfort thermique. Les études de cas du panel restreint étant caractérisées par l'absence de systèmes de refroidissement, la comparaison a été faite à l'aide des températures. Compte tenu des hétérogénéités possibles des températures dans les différentes pièces d'un logement notamment en raison de la course du soleil, le calage est réalisé à l'aide de la température opérative de la pièce la plus exposée au soleil. L'inconfort estival est déterminé à partir du nombre d'heures pendant lesquelles la température opérative dépasse 27°C pendant la période la plus chaude. Le critère de calage pour la saison estivale est l'erreur estivale  $err_{été}$  (en %) :

$$err_{été} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^n i}$$

Avec :

$$g_i = \begin{cases} 1 & \text{si } (t_{op})_{i,mes} > 27 \\ 0 & \text{si } (t_{op})_{i,mes} \leq 27 \end{cases}$$

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{si } |(t_{op})_{i,mes} - (t_{op})_{i,sim}| > 1 \\ 0 & \text{si } |(t_{op})_{i,mes} - (t_{op})_{i,sim}| \leq 1 \end{cases}$$

Où

$t_{op}$  indique la température opérative et les indices mes et sim font référence respectivement à une valeur issue des mesures et à une valeur issue des simulations.

Ce critère de calage estival est exprimé par une différence moyenne entre la température mesurée et la température calculée par le modèle quand la température de la pièce dépasse la limite supérieure de confort. Les différences de température sont considérées dans l'intervalle d'inconfort thermique.

## 5 MODELES THERMO AERAIQUES CALES

Les résultats des calages des modèles pour les bâtiments anciens du panel restreint sont donnés dans le tableau 5.1 ci-dessous, avec l'erreur en pourcentage, pour deux saisons, l'hiver et l'été.

Les modèles thermiques réalisés avec TRNSYS-COMIS sont calés avec une précision variant de 4,8 à 13,9% pour les besoins de chauffage des logements collectifs, et de 6,4 à 13,3% pour les besoins de chauffage les maisons individuelles.

La précision des résultats de la modélisation des besoins de chauffage pour l'ensemble des cas d'études du panel restreint est la meilleure avec les 2 logements de l'immeuble haussmannien en pierres n°5 situé à Paris (4,8 et 5,2%). Les résultats sont moins satisfaisants pour les deux logements de l'immeuble n°3 situé dans le centre ville de Bayonne (13,9%). Pour la période estivale, ces modèles sont calés avec une précision variant de 4,3 à 13,1% pour les logements collectifs, et de 5,9 à 11,2% pour les maisons individuelles. La précision est la meilleure pour un logement de l'immeuble haussmannien n°5 à Paris et une maison individuelle n°9 située à Noisiel (respectivement 4,3 et 5,9%). Les résultats sont moins satisfaisants pour les deux logements de l'immeuble n°1 situé dans le centre ville de Bayonne (13,1%).

Logement	Ville	Hiver	Eté
1.1	Bayonne	12,8	13,1
1.2	Bayonne	12,8	13,1
2	Bollene	7,8	9,3
3.1	Bayonne	13,9	8,3
3.2	Bayonne	13,9	8,3
4.1	Bayonne	8,1	12,4
4.2	Bayonne	8,1	12,4
5.1	Paris	5,2	4,3
5.2	Paris	4,8	9,4
6.1	Paris	7,9	11,1
7	Pluvigner	13,3	10,6
8.1	Bar-le-Duc	8,9	9,2
8.2	Bar-le-Duc	8,9	9,2
9	Noisiel	7,3	5,9
10	Bessenay	11,5	6,6
11	St Julien Crempse	6,4	9,5
12	Saudrupt	8,6	11,2

Tableau 5.1 : Résultats du calage des modèles thermo aérauliques (erreur en %)

Pour une étude de cas (un logement ou une maison), il faut compter environ 3 semaines pour effectuer la saisie complète et détaillée des données, les calculs, l'analyse et le calage d'un modèle TRNSYS-COMIS.

## 6 PLAN D'EXPERIENCES

### 6.1 Bref rappel du cahier des charges

Les données fournies par les tâches 1 et 2 ont permis d'élaborer des modèles déterministes représentant chacun le comportement thermique d'une étude de cas du panel restreint. Ces modèles TRNSYS-COMIS prennent en compte d'une façon dynamique l'impact de l'ensemble des facteurs contribuant au comportement thermique du bâtiment. Chaque modèle est spécifique à une étude de cas du panel. Les simulations faites avec TRNSYS-COMIS représentent le comportement du logement en question.

Pour passer de ces modèles à un modèle représentatif de la typologie du bâti ancien considéré, la méthode des plans d'expériences est mise en application. Cette méthode a l'avantage de prendre en compte, dans la modélisation, l'incertitude des facteurs et de leur influence sur le comportement du bâti ancien. Cette méthode permet d'élaborer un modèle qui quantifie l'influence des différents facteurs incertains, quantitatifs et qualitatifs.

La méthode de plans d'expériences consiste à étudier un système (un bâtiment ancien) caractérisé par les grandeurs à observer qui sont les réponses du système. Les variables ayant une influence sur les réponses du système sont appelées les facteurs. La méthode détermine d'une façon expérimentale le modèle empirique exprimant la relation entre chacune des réponses et les différents facteurs étudiés.

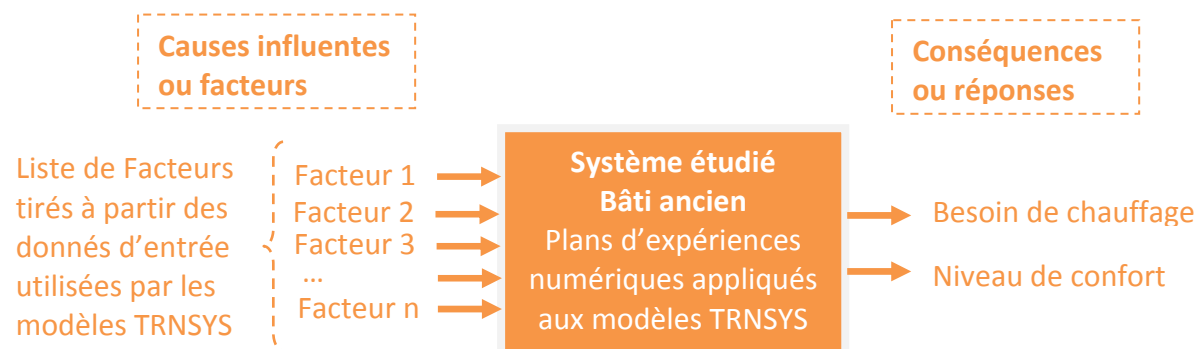


Figure 6.1 : Modélisation par les plans d'expériences numériques

La méthode des plans d'expériences numériques est utilisée pour planifier et exploiter les résultats des simulations obtenues à partir des modèles TRNSYS/COMIS, de type déterministe :

- Les réponses étudiées sont le besoin de chauffage et le niveau de confort estival
- Les facteurs sont déterminés à partir de l'ensemble des variables d'entrée utilisées par les modèles TRNSYS/COMIS en les triant et les hiérarchisant (implantation du bâtiment, éléments du bâtiment: fenêtre, murs opaques, toiture, ventilation, inertie)

Les plans d'expériences permettent ensuite d'élaborer, à partir d'un nombre relativement faible d'expériences, les modèles mathématiques de la performance thermique en fonction des facteurs dominants. Ces modèles paramétriques servent à étudier le comportement du système dans l'ensemble du domaine d'étude, et servent à mettre en évidence les variables les plus influentes.

## 6.2 Etapes préliminaires à l'élaboration des modèles Batan

A chaque étude de cas correspond une typologie. Lorsqu'un modèle TRNSYS-COMIS est calé, il est nécessaire de procéder à sa généralisation pour obtenir les relations paramétriques capables d'exprimer, pour une typologie de bâtiments, les besoins de chauffage et l'inconfort estival. Pour cela, un plan d'expériences est mis en place. A chaque expérience correspond un logement dans un environnement donné. Ainsi, le plan d'expériences permet de réaliser plusieurs centaines d'expériences pour chaque typologie.

Avant de mettre en œuvre le plan d'expériences, chaque modèle TRNSYS-COMIS doit être modifié pour permettre le passage de conditions d'utilisation particulières du logement du panel restreint à des conditions d'utilisation standard:

- Les profils d'occupation sont déterminés à partir des questionnaires remplis par les occupants. Les variations de l'occupation sont analysées pour définir un profil standard d'occupation représentant deux journées types, un jour de travail et un jour férié, pour chaque saison.
- Dans les profils d'occupation sont définis les profils d'utilisation : gains internes, contrôles actifs sur la ventilation et le rayonnement solaire, gains indirects (appareils).
- La température de consigne du chauffage est fixée dans la journée à 20°C, et la nuit elle est de 16°C ou plus (elle dépend du logement et se définit à partir de la moyenne de la température mesurée in situ par la tâche 2).
- Les conditions aux limites de référence sont standardisées, les logements mitoyens étant alors considérés comme normalement utilisés.

Les réponses du modèle TRNSYS-COMIS sont testées en faisant varier différents facteurs. Ces facteurs peuvent être de plusieurs types :

- Des conditions aux limites, comme celles concernant le climat (température extérieure, irradiation)
- Des facteurs géométriques (rapport de surface déperditive, volume chauffé, surface de fenêtres)
- Des facteurs caractérisant le comportement des matériaux (conductivité)
- Des facteurs décrivant des particularités constructives (matériaux, techniques constructives, géométries ou infiltrations)
- Des facteurs décrivant le rôle des occupants, actif ou passif (occupation et utilisation).

Ainsi, les tests ont permis de mettre en évidence les facteurs les plus influents. Ces facteurs sont intégrés dans les modèles paramétriques. Les paramètres sont de nature différente : thermique, géométrie et condition d'utilisation.



### 6.3 Facteurs et niveaux

La valeur de la grandeur, représentant la réponse du modèle TRNSYS-COMIS, dépend de plusieurs facteurs.

Chaque facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (figures suivantes)

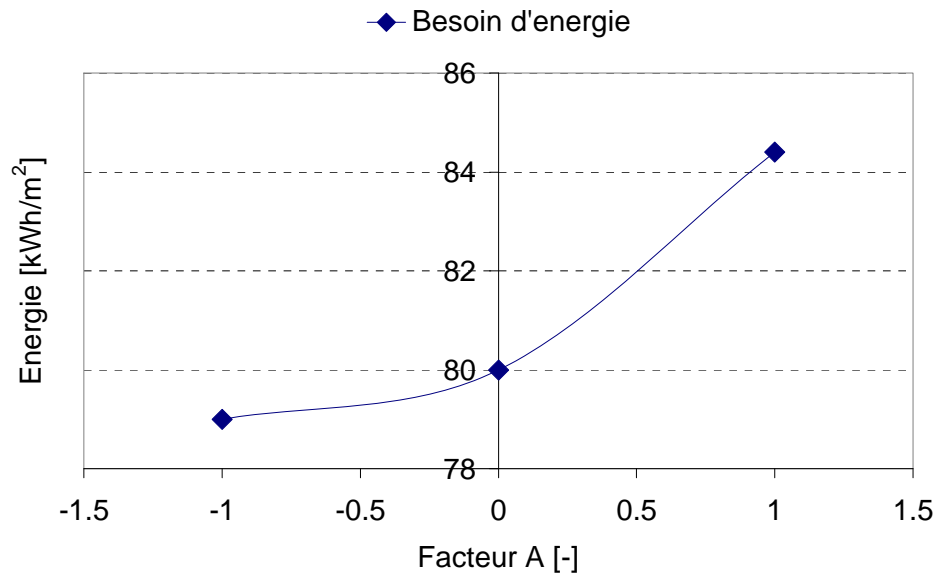


Figure 6.2 : Exemple de représentation des 3 niveaux d'un facteur

La figure 6.3 donne un exemple de représentation des trois niveaux de conductivité des parois,  $\lambda$  (W/m.K).

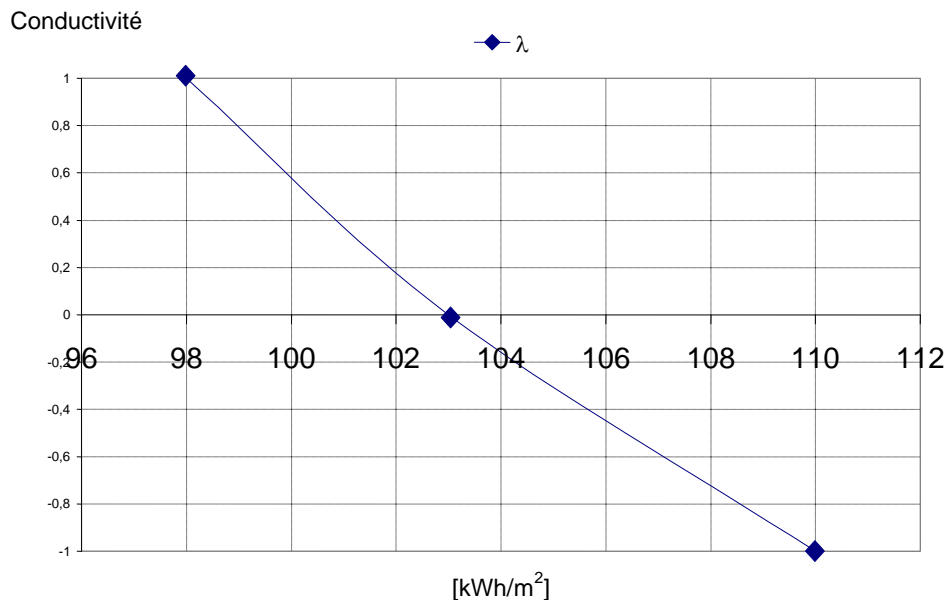


Figure 6.3 : Niveaux du facteur « Conductivité »

La figure 6.4 donne un exemple de représentation de la capacité définie selon trois niveaux.

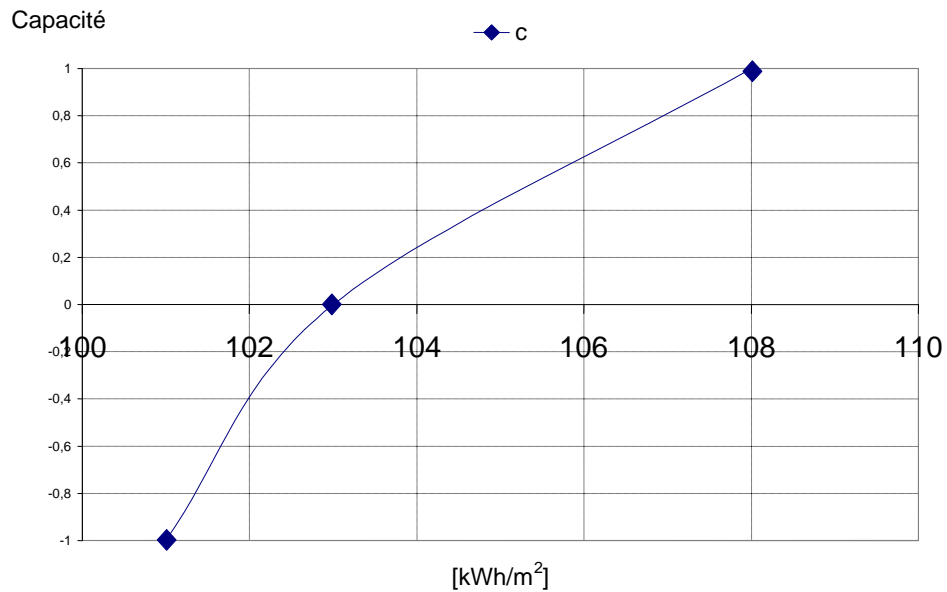


Figure 6.4 : Niveaux du facteur « Capacité »

La figure 6.5 donne une représentation des 3 niveaux pour le facteur infiltration :

- Pas d'infiltration
- Infiltrations modélisées
- Infiltrations avec la surface d'infiltration double

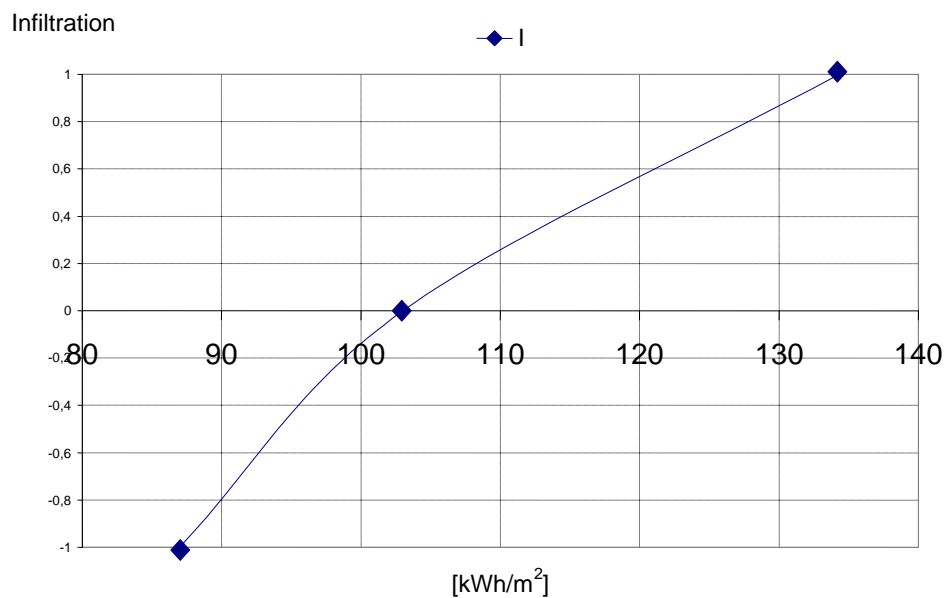


Figure 6.5 : Niveaux du facteur « Infiltration »

La figure 6.6 donne un exemple des 3 niveaux du facteur 'apports internes':

- Pas d'apports
- Apports modélisés
- Apports internes doublés

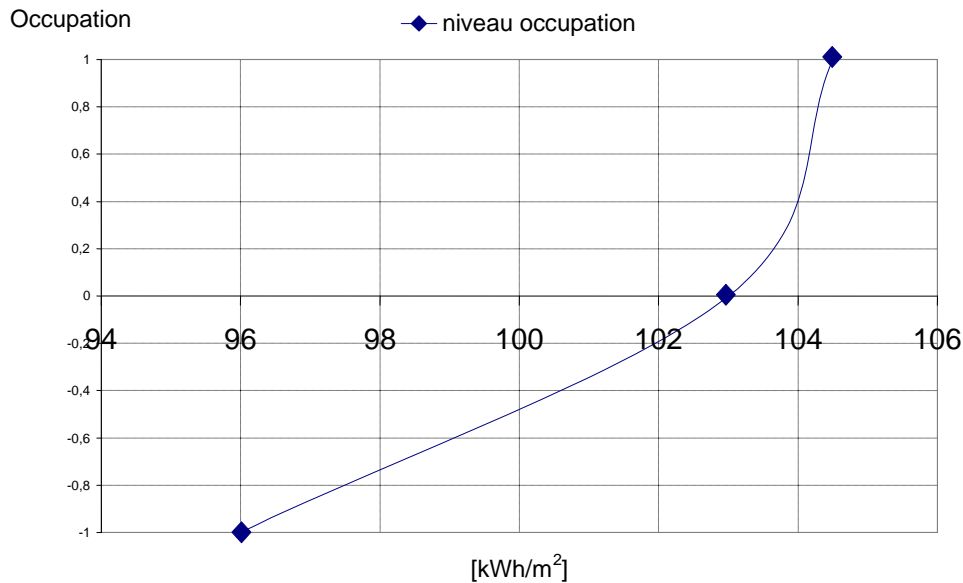


Figure 6.7 : Niveaux du facteur « Occupation »

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, ses variations sont limitées à deux ou trois niveaux. Le niveau inférieur est le niveau bas. Le niveau supérieur est le niveau haut. L'éventuel troisième niveau est le niveau nul. Le niveau bas est noté  $-1$ , le niveau haut  $+1$ , le niveau nul  $0$ .

L'ensemble des valeurs, prises par le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, est le domaine de variation du facteur. S'il y a plusieurs facteurs, le regroupement des domaines des facteurs définit le domaine d'étude.

Lorsque les facteurs et les niveaux ont été définis, la matrice d'expériences est construite. Elle est l'objet mathématique qui représente l'ensemble des expériences, des simulations à réaliser. C'est un tableau constitué de  $N$  lignes (qui correspondent à  $N$  expériences) et  $k$  colonnes (qui correspondent au nombre de facteurs).

## 6.4 Forme des modèles BATAN pour la période hivernale

La fonction mathématique retenue pour relier la réponse aux facteurs est le développement limité de la série de Taylor Mac Laurin.

Un modèle BATAN prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^{i=12} a_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^{i=12} \sum_{j=1}^{j=12} b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j$$

Avec Y la réponse représentant le besoin de chauffage en kWh/m<sup>2</sup>.an

X<sub>i</sub> est défini à partir du niveau attribué au facteur i lors de l'expérience. Sa valeur comprise entre -1 et 1 est déduite de la plage bornée par le niveau minimum et le niveau maximum.

a<sub>0</sub> et a<sub>i</sub> sont les coefficients de premier ordre du modèle mathématique. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés avec les expériences.

b<sub>ij</sub> sont les coefficients correspond aux effets croisés des facteurs i et j.

La valeur 12 correspond au nombre de facteurs pour une maison individuelle (11 pour le logement collectif) (tableau 6.1).

L'intérêt de modéliser la réponse par un polynôme est de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

A titre d'exemple, en considérant un bâtiment dans la période hivernale, chaque simulation détermine une valeur Y de la réponse. Cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients a et b sont les inconnues à déterminer.

La démarche conduisant à la généralisation du modèle calé se fait selon les étapes suivantes :

- Choix des facteurs à étudier
- Pour chaque facteur, choix du domaine de variation du facteur et du domaine d'étude
- Choix de la typologie de plan d'expériences (complet ou partiel)
  - o Le nombre de lignes d'un plan complet ayant h facteurs à 2 niveaux, et k facteurs à 3 niveaux est égal à  $N = 2^h \times 3^k$ . En conséquence, si on considère un nombre important de facteurs, le nombre de lignes de la matrice d'expériences devient très grand. Pour cette raison des plans d'expérience partiels ont été développés.
- Construction de la matrice d'expériences
- Expériences
- Calcul des coefficients du modèle

## 6.5 Forme des modèles BATAN pour la période estivale

Pour déterminer le niveau de confort en période estivale, l'expression dérivée par le plan d'expérience est la suivante :

$$h_{inc} = c_0 + \sum_{i=1}^{i=11} c_i \cdot Z_i + \sum_{i=1}^{i=11} \sum_{j=1}^{j=11} d_{ij} \cdot Z_i \cdot Z_j$$

Avec  $h_{inc}$  le nombre d'heures d'inconfort en été

Les  $Z_i$  sont les paramètres semblables à ceux utilisés pour la période hivernale

$c_0$  et  $c_i$  sont les coefficients de premier ordre identifiés par le plan d'expériences

$d_{ij}$  les coefficients de deuxième ordre.

La valeur 11 correspond au nombre de facteurs (tableau 6.1).

## 6.6 Définitions des paramètres considérés

Les paramètres considérés dans les plans d'expériences ont été déterminés à partir des travaux des tâches 1 et 2 relatives à la connaissance du bâti ancien.

Pour les logements collectifs, 11 paramètres ont été définis pour les périodes hivernale et estivale. Pour les maisons individuelles, 12 paramètres ont été définis pour l'hiver et 11 pour l'été.

Paramètres considérés	Nombre de niveaux	Période hivernale		Période estivale	
		Collectif	Individuel	Collectif	Individuel
Conductivité thermique	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Capacité thermique	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Infiltration	3	✓	✓	✓	✓
Occupation	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Ratio $S_D/V_c^*$	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Coefficient de dispersion*	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Surface vitrée nord	2	✓	✓	✓	✓
Surface vitrée autre que nord	2	✓	✓	✓	✓
Température extérieure*	3	✓	✓	✓	✓
Radiation sur le plan horizontal	3	✓	✓	✓	✓
Etage	3	✓			
Température intérieure	3		✓		
Ventilation nocturne	4			✓	✓
Facteur d'utilisation	3		✓		

\* Deux définitions utilisées

Tableau 6.1 : paramètres considérés dans les plans d'expériences

Les plages de variation pour chaque facteur ont été choisies pour représenter au mieux le type de bâtiment considéré, les variations possibles en termes de caractéristiques géométriques et thermo-physiques ou de conditions aux limites (occupation, climat, situation du logement dans le bâtiment).

- **Conductivité thermique:** conductivité moyenne des parois opaques verticales extérieures (le toit n'est pas compris) [W/(m.°C)].

Pour calculer la conductivité moyenne d'une paroi contenant plusieurs matériaux, la conductivité équivalente à une paroi homogène est déterminée. Par exemple, si la surface déperditive A ( $S_A$ ) est constituée de deux couches, la conductivité équivalente  $\lambda_{eq,A}$  de la surface A est:

$$\lambda_{eq,A} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (e_1 + e_2)}{\lambda_1 \cdot e_2 + \lambda_2 \cdot e_1}$$

Avec  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  les conductivités thermiques des matériaux des couches 1 et 2  
Et  $e_1$  et  $e_2$  les épaisseurs des couches 1 et 2

Et, si la surface déperditive B ( $S_B$ ) a une conductivité équivalente  $\lambda_{eq,B}$ , l'épaisseur et la conductivité équivalentes moyennes des parois A et B sont :

$$e_{moyenne} = \frac{e_A \cdot S_A + e_B \cdot S_B}{S_A + S_B}$$

$$\lambda_{moyenne} = \frac{(S_A + S_B) \cdot e_{moyenne}}{\frac{e_A}{\lambda_{eq,A}} \cdot S_A + \frac{e_B}{\lambda_{eq,B}} \cdot S_B}$$

La conductivité varie selon les plages mises en évidence par la variabilité de la conductivité étudiée dans la tâche 2. Les variations peuvent être attribuées au rôle de l'humidité, à des effets tridimensionnels et à l'hétérogénéité des caractéristiques thermo-physiques des matériaux. En été, sont considérés 2 niveaux et en hiver 3 niveaux sauf si la plage de variation est petite.

- **Capacité thermique:** c'est la capacité thermique [J/°C] de toutes les parois extérieures et intérieures (cloisons, plafond et plancher bas); il s'agit de donner des valeurs approximatives pour prendre en compte l'inertie du logement (forte, moyenne ou faible).

La capacité thermique C d'une paroi ayant une surface S et contenant n couches est définie comme suit:

$$C = S \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot c_i \cdot e_i$$

Avec  $\rho_i$  la masse volumique du matériau de la couche i [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_i$  la chaleur thermique massique du matériau de la couche i [J/(kg. °C)]  
et  $e_i$  l'épaisseur de la couche i [m].

Pour les planchers hauts, la capacité de la moitié de l'épaisseur est utilisée ou, s'il y a une couche d'isolant, l'épaisseur sous l'isolant. Pour les planchers bas, c'est le contraire. En été, 3 niveaux sont considérés. Le calage des modèles montre que 2 niveaux sont suffisants pour quelques études de cas.

- **Infiltration:** Il s'agit de caractériser un débit volumique de l'air par heure et par surface habitable [ $\text{m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ]. La valeur est déterminée selon la plage de variation indiquée. La valeur basse de la plage correspond au minimum d'infiltration et la valeur haute au maximum d'infiltration. La plage de variation concernant les infiltrations a été choisie selon les valeurs de référence des tests de perméabilité. Si, par exemple la valeur réelle mesurée est plus grande que la valeur proposée dans la réglementation thermique, alors la valeur mesurée a été choisie comme valeur maximum. Trois niveaux sont considérés.
- **Occupation (gains internes):** il s'agit de caractériser la moyenne des gains internes par surface habitable [ $\text{Wh}/\text{m}^2$ ]. Les gains internes sont fonction du nombre d'occupants et de l'utilisation du logement. L'étude commencée avec 3 niveaux a montré que 2 niveaux étaient suffisants.
- **Ratio  $S_D/V_{\text{chauffé}}$  \* (2 définitions):** ratio entre la surface déperditive extérieure ( $S_D$ ) et le volume d'air chauffé dans le logement ( $V_{\text{chauffé}}$ ). [ $\text{m}^{-1}$ ]  
Le volume chauffé fait référence au volume d'air contenu dans les pièces du logement, sans tenir compte des balcons, caves et garages.  
Dans le cas des logements collectifs, la surface déperditive est celle des parois verticales.  
Dans le cas des maisons individuelles, cette surface compte également la toiture.  
L'étude considère par défaut 3 niveaux mais 2 niveaux sont suffisants si la plage de variation est petite.
- **Coefficient de dispersion absolu  $\Sigma(S_D \cdot U)$  \* (2 définitions):** somme, pour chaque surface donnant sur l'extérieur, du produit de la surface (opaque ou transparente) et du coefficient de transmission surfacique  $U$ . [ $\text{W}/^\circ\text{C}$ ]  
Dans le cas des logements collectifs, la surface est celle des parois verticales. Dans le cas des maisons individuelles, cette surface compte également la toiture.  
L'étude considère par défaut 3 niveaux mais 2 niveaux sont suffisants si la plage de variation est petite.
- **Surface vitrée nord:** surfaces vitrées donnants au Nord (NE, N, NO) [ $\text{m}^2$ ]. Deux niveaux sont considérés.
- **Surface vitrée autre que nord:** surface vitrée totale moins les surfaces vitrées orientées au Nord [ $\text{m}^2$ ]. Deux niveaux sont considérés.
- **Température extérieure \* (2 définitions) :** il s'agit du nombre de degrés jours unifiés (DJU) pour la période hivernale, ou du nombre de degrés heures de refroidissement pour la période estivale, la base étant de  $27^\circ\text{C}$  pour la période du 1 juin au 30 septembre. Trois niveaux sont considérés.



- **Radiation sur le plan horizontal:** il s'agit de la radiation globale sur le plan horizontal pour la période considérée [ $\text{J/m}^2$ ]. Trois niveaux sont considérés.
- **Etage:** ce paramètre représente les conditions aux limites. Trois niveaux sont considérés donnant une valeur de 1 à 3 à ce paramètre:
  - 1 : Dernier étage
  - 2 : Rez-de-chaussée
  - 3 : Etage intermédiaire
- **Température interne moyenne:** température moyenne dans les pièces de la maison pendant la période considérée [ $^{\circ}\text{C}$ ].
- **Ventilation nocturne :** selon le scénario de ventilation nocturne, la valeur de ce paramètre varie de 0 à 3 :
  - 0 : il n'y a pas de ventilation nocturne
  - 1 : il y a une ventilation nocturne uniquement les premières heures de la nuit (jusqu'à minuit)
  - 2 : les pièces les plus chaudes dans la journée ont des fenêtres ouvertes pendant toute la nuit
  - 3 : il y a une ventilation nocturne intensive.
- **Facteur d'utilisation volumique:** rapport entre volume de l'air contenu dans les pièces effectivement chauffées et le volume d'air contenu dans toutes les pièces de la maison [-].

Les plages de variation des paramètres thermo-géométriques comme le coefficient de transmission absolue, les grandeurs géométriques comme le ratio  $S/V$  et les surfaces vitrées sont calculés à partir de la géométrie du logement. Les valeurs pour les conditions aux limites ont été déterminées en considérant l'architecture et les caractéristiques de l'étude de cas et de la typologie du bâtiment.

## 6.7 Compléments sur la définition des plages de variation des paramètres

Les plages de variation pour chaque paramètre ont été choisies pour représenter au mieux le type de bâtiment considéré, et les variations possibles en termes de caractéristiques géométriques et thermo-physiques ou de conditions aux limites (occupation, climat, situation dans le bâtiment).

**La conductivité** peut varier pour les plages proposées par la tâche 2 du projet BATAN. Elles ont mis en évidence la variabilité de la conductivité. Les raisons peuvent être attribuées à l'action de l'humidité, à des effets tridimensionnels et à l'hétérogénéité des caractéristiques thermo-physiques des matériaux et des parois.

La plage de variation de la **capacité thermique** a été déterminée selon les variations de la masse volumique et de la chaleur spécifique proposées par la tâche 2 et selon les variations géométriques de l'enveloppe.

Les plages de variation **concernant les infiltrations** ont été choisies selon les valeurs de référence des tests de perméabilité. Si par exemple, la valeur réelle mesurée était très grande et au delà de la valeur proposée dans la réglementation thermique, alors la valeur mesurée a été choisie comme étant la valeur maximum de la plage de variation.

La plage de variation des **gains internes** est la même pour toutes les études de cas. La limite maximale est estimée à partir d'un nombre élevé mais raisonnable d'occupants, en comptant les apports liés aux occupants et à une utilisation importante des équipements. La limite minimale est estimée en considérant l'inoccupation des locaux avec un fonctionnement réduit des équipements.

Les plages de variation des **différents paramètres thermo-géométriques** sont déterminées à partir de la géométrie des logements. Ces paramètres sont par exemple le coefficient de transmission absolue, le ratio S/V ou les surfaces vitrées. Chaque plage de variation est définie selon la typologie du logement et l'architecture du bâtiment. Les variations possibles sont déterminées en respectant la structure fondamentale du bâtiment et en conservant la cohérence et la compatibilité de l'ensemble des paramètres.

## 7 RESULTATS BATAN – LOGEMENTS DANS UN IMMEUBLE COLLECTIF

Les paramètres de chaque étude de cas sont rappelés et les coefficients polynomiaux sont donnés dans des tableaux.

Les polynômes ont été obtenus à partir des modèles thermo aérauliques des bâtiments, avec un nombre d'expériences variable selon les études de cas.

### 7.1 Modèle 1 - Cas 1.1 et 1.2 : immeuble en pierre coquillée (Bayonne)

Caractéristiques typologiques :

- Logements dans un immeuble collectif en pierre coquillée (Bayonne)
- Implantation : îlots fermés de centre ancien
- Mode constructif : lourd
- Matériaux : roches très denses

#### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernent les conditions aux limites suivantes:

- Zones escalier + 2 zones internes non chauffées
- Bâtiments contigus
- Etage rez-de-chaussée
- Toiture

Concernant le profil d'occupation, les hypothèses ont été faites sur les points suivants :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermeture des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation supposée rationnelle des volets

#### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/1-15/03

Période de calage été : 21/06-10/07

Modèle Comis :        basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.  
                              Nombre de zones considérés 9+1extérieure

#### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 426 / Eté : 426

#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tache 2 et selon les variations de paramètres  $S/V$ ,  $SU$ ,  $S_{Vitrée}$
- $S/V$  selon la variation de volumes internes sans que le facteur  $SU$  puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon la géométrie et la structure de ce type de bâtiment

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	2,1	1,14	2,39
Capacité Thermique	176558396	153529040	199587752
Infiltration	4	0	5,6721
Occupation	4,5	0	12
S/V	0,19	0,11859014	0,19765024
SU	245,265763	169,562942	262,128541
Sv Nord	4	0	29,45
Sv autre	15	0	35
Température ext.	1400	0	4000
Radiation	853200	0	6900000000
Etage	3	1	3

Tableau 7.1.1 : Paramètres du modèle Hiver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	100,3	b1b2	1,1	c0	0,95	d1d2	1,3
a1	29,47	b1b3	8,23	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,8	b1b7	7,52	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	45,3	b1b8	4,56	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-4,57	b1b9	9,96	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	17,5	b3b4	-5,8	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	22,4	b3b11	1,96	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	41,7	b5b7	21,3	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	36,8	b10b11	0,95	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	55,96	b9b11	-1,3	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-7,48	b7b11	1,89	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	-18,222	b4b11	0,46	c11	-8,3	d4d11	-5,36
		b6b7	9,45			d6d7	8,11
						d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 7.1.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	2,1	1,14	2,39
Capacité Thermique	176558396	153529040	199587752
Infiltration	4	0	5,6721
Occupation	4,5	0	12
S/V	0,19	0,11859014	0,19765024
SU	245,265763	169,562942	262,128541
Sv Nord	4	0	29,45
Sv autre	15	0	35
Température ext.	431	0	1400
Radiation	853200	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	3	0	3

Tableau 7.1.3 : Paramètres du modèle Eté

## 7.2 Modèle 3 - Cas 3.1 et 3.2 : immeuble en moellons, torchis et colombages (Bayonne)

Caractéristiques typologiques :

- Logements dans un immeuble collectif en moellons, torchis et colombages
- Implantation : îlots fermés de centre ancien
- Mode constructif : lourd
- Matériaux : roches très denses et de faible densité (2 catégories)

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Le plan est rectangulaire avec le petit côté donnant sur l'extérieur. Par conséquent les hypothèses principales concernent les conditions aux limites suivantes:

- Zones
- Bâtiments contigus

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermeture des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Chauffage ponctuel (appoint avec la cuisinière gaz)

### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver\* : 21/12-15/03

Période de calage été : 21/06-10/07

\*A la différence des autres cas, le calage a tout d'abord été effectué sur la période estivale puis ensuite le modèle a été utilisé en hiver car il n'y a pas de mesures pour le système de chauffage.

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 426 / Eté : 426

### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
  - Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{\text{Vitrée}}$
  - S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
  - $S_{\text{Vitrée}}$  variation choisie selon les dimensions de la façade extérieure.
- Les difficultés rencontrées concernent surtout la modélisation du comportement des occupants.

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,6	0,1	1
Capacité Thermique	28432800	20850720	36014880
Infiltration	0,8	0	11,5
Occupation	1,45	0	12
S/V	0,21818182	0,16363636	0,27272727
SU	18,8181818	4,09647495	26,4114833
Sv Nord	3,0388	0	4,8
Sv autre	1,274	0	4,8
Température ext.	838	0	4000
Radiation	853200	273821400	2738214000
Etage	3	0	3

Tableau 7.2.1 : Paramètres du modèle Hiver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	113,44	b1b2	-0,3	c0	1,96	d1d2	1,3
a1	1,87	b1b3	13,9	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,2	b1b7	14,34	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	35,3	b1b8	12,22	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-2,25	b1b9	9,76	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	2,45	b3b4	0,32	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	12,3	b3b11	1,98	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	13,75	b5b7	4,9	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	4,7	b10b11	0,22	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	43,2	b9b11	12,34	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-6,5	b7b11	13,43	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	-15,375	b4b11	0,03	c11	-8,3	d4d11	-5,36
		b6b7	7,4			d6d7	8,11
						d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 7.2.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,6	0,1	1
Capacité Thermique	28432800	20850720	36014880
Infiltration	0,8	0	11,5
Occupation	1,45	0	12
S/V	0,21818182	0,16363636	0,27272727
SU	18,8181818	4,09647495	26,4114833
Sv Nord	3,0388	0	4,8
Sv autre	1,274	0	4,8
Température ext.	431	0	1400
Radiation	853200	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	3	0	3

*Tableau 7.2.3 : Paramètres du modèle Eté*

### 7.3 Modèle 4 - Cas 4.1 et 4.2 : immeuble en torchis et colombages (Bayonne)

Caractéristiques typologiques :

- Logements dans un immeuble collectif en torchis et colombages
- Implantation : îlots fermés de centre ancien
- Mode constructif : moyen
- Matériaux : de faible densité

#### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernent les conditions aux limites suivantes:

- Conditions limites avec les espaces mitoyens
- Ventilation naturelle par conduit (dimensions des sections indisponibles)
- Etanchéité à l'air par mesures
- Masques solaires lointains estimés.

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes

#### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 21/06-10/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.

#### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 426 / Eté : 426



#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{Vitrée}$
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon les dimensions de la façade extérieure.

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,08	0,58	1,08
Capacité Thermique	2000000	2000000	2600000
Infiltration	0,8	0	3,1
Occupation	1	0	12
S/V	0,10443864	0,07832898	0,1305483
SU	57,6	39	57,6
Sv Nord	10,028	0	35
Sv autre	0	0	70
Température ext.	150	0	4000
Radiation	1506017700	273821400	2738214000
Etage	3	0	3

Tableau 7.3.1 : Paramètres du modèle Hiver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	165,98	b1b2	1,9	c0	2,3	d1d2	1,3
a1	1,87	b1b3	13,29	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,2	b1b7	0,98	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	35,3	b1b8	2,3	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-2,25	b1b9	2,6	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	2,45	b3b4	9,8	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	12,3	b3b11	1,9	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	13,75	b5b7	0,7	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	4,7	b10b11	0,034	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	43,2	b9b11	1,97	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-6,5	b7b11	1,89	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	-15,375	b4b11	0,9	c11	-8,3	d4d11	-5,36
		b6b7	9,12			d6d7	8,11
						d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 7.3.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,08	0,58	1,08
Capacité Thermique	2000000	2000000	2600000
Infiltration	0,8	0	3,1
Occupation	1	0	12
S/V	0,10443864	0,07832898	0,1305483
SU	57,6	39	57,6
Sv Nord	10,028	0	35
Sv autre	0	0	70
Température ext.	431	0	1400
Radiation	1506017700	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	3	0	3

*Tableau 7.3.3 : Paramètres du modèle Eté*

## 7.4 Modèle 5 - Cas 5.1 et 5.2 : immeuble haussmannien en pierres (Paris)

Caractéristiques typologiques :

- Logements dans un immeuble collectif haussmannien en pierres
- Implantation : îlots haussmanniens
- Mode constructif : très lourd
- Matériaux : roches très denses

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernent les conditions aux limites suivantes:

-Conditions limites avec les espaces mitoyens, l'étage inférieur ayant des conditions différentes

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes

### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 1/07-16/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 426 / Eté : 426

### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

-Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2

- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{\text{Vitrée}}$
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{\text{Vitrée}}$  variation choisie selon les dimensions de la façade extérieure.
- Géométrie : modélisation de façades-fenêtres avec HEAT 3, ponts thermiques
- Température intérieure hétérogène
- Profil d'occupation déterminé par questionnaires et analyse des profils de CO<sub>2</sub>.

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,9	0,79	2,79
Capacité Thermique	309050353	154000	154525177
Infiltration	0,6	0	3,1
Occupation	4	0	12
S/V	0,26	0,2	0,6
SU	253,6	120	5000
Sv Nord	1,08	0	35
Sv autre	34,58	0	70
Température ext.	2504	0	4000
Radiation	1380000000	273821400	2738214000
Etage	2	0	3

Tableau 7.4.1 : Paramètres du modèle Hlver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	181,264	b1b2	1,2	c0	0,25	d1d2	1,3
a1	1,87	b1b3	12,4	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,2	b1b7	9,3	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	35,3	b1b8	1,12	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-2,25	b1b9	1,77	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	2,45	b3b4	1,67	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	12,3	b3b11	1,18	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	13,75	b5b7	1,3	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	4,7	b10b11	0,4	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	43,2	b9b11	0,4	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-6,5	b7b11	1,11	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	-15,375	b4b11	0,78	c11	-8,3	d4d11	-5,36
		b6b7	3,4			d6d7	8,11
						d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 7.4.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,9	0,79	2,79
Capacité Thermique	309050353	154000	154525177
Infiltration	0,6	0	3,1
Occupation	4	0	12
S/V	0,26	0,2	0,6
SU	253,6	120	5000
Sv Nord	1,08	0	35
Sv autre	34,58	0	70
Température ext.	431	0	1400
Radiation	1380000000	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	2	0	3

*Tableau 7.4.3 : Paramètres du modèle Eté*

## 7.5 Modèle 6 - Cas 6.1 : immeuble haussmannien en briques et pierres (Paris)

Caractéristiques typologiques :

- Logements dans un immeuble collectif haussmannien en pierre
- Implantation : îlots haussmanniens
- Mode constructif : très lourd
- Matériaux : de densité moyenne

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernent les conditions aux limites suivantes:

- Conditions limites avec les espaces mitoyens
- Etanchéité à l'air par mesures
- Evaluation des infiltrations avec l'espace de circulation (escalier)

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes

### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 1/07-16/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 426 / Eté : 426

#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{\text{Vitrée}}$
- Infiltrations et renouvellement d'air par ventilation naturelle et extraction par conduit
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{\text{Vitrée}}$  variation choisie selon les dimensions des façades extérieures.
- Profil d'occupation déterminé par questionnaires et analyse des profils de CO<sub>2</sub>.

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,9	1,27	2,02
Capacité Thermique	215216290	150150900	280281680
Infiltration	0,6	0	3,1
Occupation	4	0	10
S/V	0,19873996	0,14905497	0,24842495
SU	155,96	124	161
Sv Nord	4,788	0	35
Sv autre	15,0075	0	70
Température ext.	2504	0	4000
Radiation	1380000000	273821400	2738214000
Etage	2	0	3

Tableau 7.5.1 : Paramètres du modèle Hiver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	192,472	b1b2	1,3	c0	0,76	d1d2	1,3
a1	1,87	b1b3	12,6	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,2	b1b7	0,57	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	35,3	b1b8	1,1	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-2,25	b1b9	3,5	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	2,45	b3b4	1,6	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	12,3	b3b11	1,4	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	13,75	b5b7	0,2	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	4,7	b10b11	0,08	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	43,2	b9b11	1,13	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-6,5	b7b11	1,24	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	-15,375	b4b11	0,19	c11	-8,3	d4d11	-5,36
		b6b7	7,56			d6d7	8,11
						d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 7.5.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,9	1,27	2,02
Capacité Thermique	215216290	150150900	280281680
Infiltration	0,6	0	3,1
Occupation	4	0	10
S/V	0,19873996	0,14905497	0,24842495
SU	155,96	124	161
Sv Nord	4,788	0	35
Sv autre	15,0075	0	70
Température ext.	431	0	1400
Radiation	1380000000	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	2	0	3

Tableau 7.5.3 : Paramètres du modèle Eté

## 8 RESULTATS BATAN – MAISONS INDIVIDUELLES

### 8.1 Modèle 2 - Cas 2 : maison en calcaire tendre (Bollene)

Caractéristiques typologiques :

- Habitation individuelle dans une maison en calcaire tendre
- Implantation : îlots fermés de centre ancien
- Mode constructif : lourd
- Matériaux : de densité moyenne

#### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernant les conditions aux limites sont les suivantes:

- Zones chauffées, non chauffées et espaces tampons
- Bâtiments contigus

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation rationnelle des volets

#### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 5/12-15/03

Période de calage été : 21/06-10/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.  
Nombre de zones considérées 8

#### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 544 / Eté : 426

#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{Vitrée}$
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon de critères de compatibilité géométrie-structure
- Le facteur d'utilisation et la température moyenne ont été développés à cause des hétérogénéités des températures dans les pièces.

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,6	0,5	0,75
Capacité Thermique	76112400	67957500	126854000
Infiltration	1,99	0,5	3
Occupation	3	0	12
S/V	0,72856284	0,54642213	0,91070356
SU	1014,30883	923,698835	1104,91883
Sv Nord	0	0	10
Sv autre	16,31	0	30
Température ext.	1285	0	4000
Radiation	8961100	0	6900000000
Tint moyenne	19,3	18	23
Facteur d'utilisation	0,7	0	1

Tableau 8.1.1 : Paramètres du modèle Hiver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	16,9	b1b3	2,9	c0	0,59	d1d2	1,3
a1	9,4	b1b7	0,98	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	-7,3	b1b8	1,23	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	24,56	b1b9	1,97	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-3,47	b1b11	2,3	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	4,97	b3b4	-3,7	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	8,46	b3b9	4,97	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	13,75	b4b11	-2,4	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	8,7	b5b7	1,35	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	26,4	b6b7	0,94	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-9,81	b7b11	4,7	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	19,78	b9b12	11,48	c11	-8,3	d4d11	-5,36
a12	19,23	b10b11	4,9			d6d7	8,11
		b11b12	3,4			d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 8.1.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,6	0,5	0,75
Capacité Thermique	76112400	67957500	126854000
Infiltration	1,99	0,5	3
Occupation	3	0	12
S/V	0,72856284	0,54642213	0,91070356
SU	1014,30883	923,698835	1104,91883
Sv Nord	0	0	10
Sv autre	16,31	0	30
Température ext.	431	0	1400
Radiation	2500	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	2	0	3

*Tableau 8.1.3 : Paramètres du modèle Eté*

## 8.2 Modèle 7 - Cas 7 : maison en granit (Pluvigner)

Caractéristiques typologiques :

- Un logement dans une maison individuelle
- Implantation : îlots fermés bas ou maisons alignées
- Mode constructif : très lourd
- Matériaux : très denses

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernant les conditions aux limites sont les suivantes:

- Zones chauffées, non chauffées et espaces tampons
- Bâtiments contigus
- Température sous toiture

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation rationnelle des volets

### 2-Périodes de mesure retenues fiables :

Période de calage hiver : 22/09-10/06

Période de calage été : 1/07-16/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.  
Nombre de zones considérées 10

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 544 / Eté : 426



#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

-Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{\text{Vitrée}}$

-S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer

- $S_{\text{Vitrée}}$  variation choisie selon la géométrie et la structure de ce type de bâtiment

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,1	0,34	1,9
Capacité Thermique	10064040	2875440	17252640
Infiltration	3	1	3
Occupation	2,5	0	12
S/V	0,19826455	0,15	0,6
SU	57,0447504	20,5954966	85,5710015
Sv Nord	0	0	30
Sv autre	11,26	0	30
Température ext.	1248	0	4000
Radiation	593483760	0	6900000000
Tint moyenne	19,2	18	22
Facteur d'utilisation	3	1	3

Tableau 8.2.1 : Paramètres du modèle Hiver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	169,56	b1b2	1,3	c0	0,56	d1d2	1,3
a1	8,65	b1b3	9,95	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,21	b1b7	9,45	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	32,97	b1b8	6,79	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-5,2	b1b9	4,8	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	16,79	b3b4	-1,4	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	19,9	b3b11	27,9	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	21,46	b5b7	7,32	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	19,64	b10b11	-2,4	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	41,45	b9b11	12,4	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-8,2	b7b11	9,46	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	19,3	b4b11	-5,36	c11	-8,3	d4d11	-5,36
a12	-21,3	b6b7	8,11			d6d7	8,11
		b2b4	2,1			d2d4	2,1
		b8b10	-3,35			d8d10	-3,35
		b7b11	4,11				

Tableau 8.2.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,1	0,34	1,9
Capacité Thermique	10064040	2875440	17252640
Infiltration	3	1	3
Occupation	2,5	0	12
S/V	0,19826455	0,15	0,6
SU	57,0447504	20,5954966	85,5710015
Sv Nord	0	0	30
Sv autre	11,26	0	30
Température ext.	431	0	1400
Radiation	593483760	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	3	0	3

*Tableau 8.2.3 : Paramètres du modèle Eté*

### 8.3 Modèle 8 - Cas 8.1 et 8.2 : maison en calcaire tendre (Bar-le-Duc)

Caractéristiques typologiques :

- Maison de ville : commerce au rez-de-chaussée et logement à l'étage
- Implantation : îlots fermés bas ou maisons alignées
- Mode constructif : lourd
- Matériaux : de densité moyenne

#### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernant les conditions aux limites sont les suivantes:

- Zones chauffées, non chauffées et espaces tampons
- Bâtiments contigus
- Température sous toiture (combles non isolées)
- Température constante de la voute

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation rationnelle des volets

#### 2-Périodes de mesure retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 1/07-16/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.  
Nombre de zones considérées 8

#### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 544 / Eté : 426

#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{Vitrée}$
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon la géométrie et la structure de ce type de bâtiment
- Le facteur d'utilisation et la température moyenne ont été développés à cause des hétérogénéités des températures dans les pièces.

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,1	0,34	1,9
Capacité Thermique	10064040	2875440	17252640
Infiltration	3	1	3
Occupation	2,5	0	12
S/V	0,19826455	0,15	0,6
SU	57,0447504	20,5954966	85,5710015
Sv Nord	0	0	30
Sv autre	11,26	0	30
Température ext.	1248	0	4000
Radiation	593483760	0	6900000000
Tint moyenne	19,2	18	22
Facteur d'utilisation	3	1	3

Tableau 8.3.1 : Paramètres du modèle Hiver

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	169,56	b1b2	1,3	c0	0,56	d1d2	1,3
a1	8,65	b1b3	9,95	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,21	b1b7	9,45	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	32,97	b1b8	6,79	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-5,2	b1b9	4,8	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	16,79	b3b4	-1,4	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	19,9	b3b11	27,9	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	21,46	b5b7	7,32	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	19,64	b10b11	-2,4	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	41,45	b9b11	12,4	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-8,2	b7b11	9,46	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	19,3	b4b11	-5,36	c11	-8,3	d4d11	-5,36
a12	-21,3	b6b7	8,11			d6d7	8,11
		b2b4	2,1			d2d4	2,1
		b8b10	-3,35			d8d10	-3,35
		b7b11	4,11				

Tableau 8.3.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,1	0,34	1,9
Capacité Thermique	10064040	2875440	17252640
Infiltration	3	1	3
Occupation	2,5	0	12
S/V	0,19826455	0,15	0,6
SU	57,0447504	20,5954966	85,5710015
Sv Nord	0	0	30
Sv autre	11,26	0	30
Température ext.	431	0	1400
Radiation	593483760	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	3	0	3

*Tableau 8.3.3 : Paramètres du modèle Eté*

## 8.4 Modèle 9 - Cas 9 : maison partagée en briques (Noisiel)

Caractéristiques typologiques :

- Maison partagée en briques
- Implantation : îlots fermés bas ou maisons alignées
- Mode constructif : très lourd
- Matériaux : de densité moyenne

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernant les conditions aux limites sont les suivantes:

- Zones chauffées, non chauffées et espaces tampons
- Bâtiments contigus
- Température sous toiture (combles non isolées)
- Température cave voute

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation rationnelle des volets

### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 1/07-15/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.  
Nombre de zones considérées 8

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 544 / Eté : 426

#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{Vitrée}$
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon la géométrie et la structure de ce type de bâtiment

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,75	0,43	0,93
Capacité Thermique	12580050	11287544	34505280
Infiltration	0,77	0,5	3
Occupation	5	0	12
S/V	0,41459043	0,15	0,6
SU	193,1355	144,851625	241,419375
Sv Nord	10	0	20
Sv autre	6,53	0	10
Température ext.	1475	0	4000
Radiation	773974800	0	6900000000
Tint moyenne	19,2	18	22

Tableau 8.4.1 : Paramètres du modèle Hiver

Remarque : Comme tenu des données fournies, le paramètre Facteur d'Utilisation a été considéré comme n'étant pas utile dans cette étude de cas.

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	165,98	b1b2	1,9	c0	2,1	d1d2	1,3
a1	1,87	b1b3	13,29	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,2	b1b7	0,98	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	35,3	b1b8	2,3	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-2,25	b1b9	2,6	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	2,45	b3b4	9,8	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	12,3	b3b11	1,9	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	13,75	b5b7	0,7	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	4,7	b10b11	0,034	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	43,2	b9b11	1,97	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-6,5	b7b11	1,89	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	-15,375	b4b11	0,9	c11	-8,3	d4d11	-5,36
		b6b7	9,12			d6d7	8,11
						d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 8.4.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,75	0,43	0,93
Capacité Thermique	12580050	1,1287544	34505280
Infiltration	0,77	0,5	3
Occupation	5	0	12
S/V	0,41459043	0,15	0,6
SU	193,1355	144,851625	241,419375
Sv Nord	10	0	20
Sv autre	6,53	0	10
Température ext.	431	0	1400
Radiation	593483760	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	1	0	3

*Tableau 8.4.3 : Paramètres du modèle Été*

## 8.5 Modèle 10 - Cas 10 : maison mitoyenne en pierre et pisé (Bessenay)

Caractéristiques typologiques :

- Habitation individuelle dans une maison mitoyenne en pierre et pisé
- Implantation : îlots fermés bas ou maisons alignées
- Mode constructif : très lourd
- Matériaux : terres crues et roches extra-tendres

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernant les conditions aux limites sont les suivantes:

- Zones chauffées, non chauffées
- Infiltrations par les cheminées
- Température sous toiture (combles non isolées)
- Température de la cave ventilée

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation rationnelle des volets

### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 21/06-10/07

Modèle Comis : basé sur les principes théoriques et sur l'analyse faite pendant le calage

Nombre de zones considérés 18 + 3 zones (caves)

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 544 / Été : 426

#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{Vitrée}$
- Techniques constructives des murs en pisé (recours à HEAT 3).
- Incertitudes des données climatiques, rayonnement direct et diffus, débits d'infiltration
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon la géométrie, la structure et l'architecture de ce type de bâtiment
- Le facteur d'utilisation et la température moyenne ont été développés à cause des hétérogénéités des températures dans les pièces.

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,2	0,34	1,9
Capacité Thermique	333900000	139950000	686350000
Infiltration	2,8	1	4
Occupation	4	0	12
S/V	0,45	0,3	0,7
SU	447,567568	215,447071	738,219274
Sv Nord	10,9	5	30
Sv autre	12,4	5	30
Température ext.	1248	0	4000
Radiation	593483760	0	6900000000
Tint moyenne	18,8	18	21
Facteur d'utilisation	0,8	0,5	1

*Tableau 8.5.1 : Paramètres du modèle Hiver*

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	141,56	b1b2	1,3	c0	0,81	d1d2	1,3
a1	9,18	b1b3	9,95	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	1,89	b1b7	9,45	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	32,97	b1b8	6,79	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-4,89	b1b9	4,8	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	19,7	b3b4	-1,4	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	21,3	b3b11	27,9	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	9,46	b5b7	7,32	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	8,56	b10b11	-2,4	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	36,8	b9b11	12,4	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-7,9	b7b11	9,46	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	22,4	b4b11	-5,36	c11	-8,3	d4d11	-5,36
a12	-18,6	b6b7	8,11			d6d7	8,11
		b2b4	2,1			d2d4	2,1
		b8b10	-3,35			d8d10	-3,35
		b7b11	4,11				

Tableau 8.5.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,2	0,34	1,9
Capacité Thermique	333900000	139950000	686350000
Infiltration	3	1	3
Occupation	4	0	12
S/V	0,45	0,3	0,7
SU	447,567568	215,447071	738,219274
Sv Nord	10,9	5	30
Sv autre	12,4	5	30
Température ext.	431	0	1400
Radiation	593483760	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	1	0	3

Tableau 8.5.3 : Paramètres du modèle Eté



## 8.6 Modèle 11 - Cas 11 : maison en calcaire extra dur (St Julien Crempse)

### Caractéristiques typologiques

- Maison individuelle en calcaire extra-dur
- Implantation isolée
- Mode constructif : très lourd
- Matériaux : roche très dense

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernant les conditions aux limites sont les suivantes:

- Zones chauffées, non chauffées
- Bâtiments contigus
- Température du sol
- Température sous toiture (combles non isolées)

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation rationnelle des volets

### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 1/07-16/07

Modèle Comis :        basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.  
                              Nombre de zones considérés 10

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 544 / Eté : 426

### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres  $S/V$ ,  $SU$ ,  $S_{Vitrée}$
- $S/V$  selon la variation de volumes internes sans que le facteur  $SU$  puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon la géométrie et la structure de ce type de bâtiment
- Le facteur d'utilisation et la température moyenne ont été développés à cause des hétérogénéités des températures dans les pièces
- Incertitudes sur les mesures prises sur site

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,9	1,5	2,75
Capacité Thermique	337883969	233023427	442744511
Infiltration	3,6	2,3	4
Occupation	4,9	0	12
S/V	0,39600188	0,29700141	0,6
SU	365,426903	304,96958	425,884226
Sv Nord	3,7311	0	30
Sv autre	25	0	50
Température ext.	510	510	4000
Radiation	179336520	0	6900000000
Tint moyenne	18	17	23
Facteur d'utilisation	0,956	0,5	1

Tableau 8.6.1 : Paramètres du modèle Eté

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	25,4	b1b3	6,5	c0	1,23	d1d2	1,3
a1	12,96	b1b7	5,64	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	0,123	b1b8	4,63	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	25,456	b1b9	9,76	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-4,85	b1b11	10,15	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	6,47	b3b4	-4,56	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	6,32	b3b9	2,96	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	15,9	b4b11	0,4	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	8,48	b5b7	3,65	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	47,2	b6b7	1	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-12,7	b7b11	7,01	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	19,4	b9b12	9,73	c11	-8,3	d4d11	-5,36
a12	14,56	b10b11	-9,8			d6d7	8,11
		b11b12	13,9			d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 8.6.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	1,9	1,5	2,75
Capacité Thermique	337883969	233023427	442744511
Infiltration	3,6	2,3	4
Occupation	4,9	0	12
S/V	0,39600188	0,29700141	0,6
SU	365,426903	304,96958	425,884226
Sv Nord	3,7311	0	30
Sv autre	25	0	50
Température ext.	431	0	1400
Radiation	179336520	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	1,5	0	3

Tableau 8.6.3 : Paramètres du modèle Été

## 8.7 Modèle 12 - Cas 12 : maison en calcaire tendre (Saudrupt)

Caractéristiques typologiques

- Grande demeure individuelle en calcaire tendre
- Implantation isolée sur la parcelle
- Mode constructif : lourd
- Matériaux : densité moyenne

### 1-Hypothèses principales utilisées pour la modélisation TRNSYS-COMIS

Les hypothèses principales concernant les conditions aux limites sont les suivantes:

- Zones chauffées, non chauffées et espaces tampons (étage inhabité)
- espaces contigus (serre)

Concernant le profil d'occupation les hypothèses suivantes ont été prises :

- Questionnaires pour toutes les informations données concernant les ouvertures et fermetures des portes
- Ouverture de fenêtres chaque jour pendant 45 minutes
- Utilisation rationnelle des volets

### 2-Périodes de mesures retenues fiables :

Période de calage hiver : 21/12-15/03

Période de calage été : 21/06-10/07

Modèle Comis : basé sur les mesures d'étanchéité à l'air sur site.

Nombre de zones considérés 8

### 3-Nombre d'expériences

Hiver : 544 / Été : 426

#### 4-Principaux critères utilisés pour définir les plages de variation des paramètres

- Conductivité évaluée selon les plages fournies par la Tâche 2
- Capacité thermique obtenue selon les plages fournies par la Tâche 2 et selon les variations de paramètres S/V, SU,  $S_{Vitrée}$
- bâtiment partiellement rénové, isolé et par conséquent modification de la masse thermique interne
- S/V selon la variation de volumes internes sans que le facteur SU puisse changer
- $S_{Vitrée}$  variation choisie selon la géométrie et la structure de ce type de bâtiment
- Le facteur d'utilisation et la température moyenne ont été développés à cause des hétérogénéités des températures dans les pièces
- Incertitudes sur les mesures prises sur site

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,6	0,43	1,18
Capacité Thermique	155210900	155210900	465632700
Infiltration	2,64	0,5	3
Occupation	5,3	0	12
S/V	0,36517789	0,27388342	0,45647237
SU	90,6214233	82,8573544	189,006915
Sv Nord	46	0	55
Sv autre	65	0	162,5
Température ext.	1263	0	4000
Radiation	157046	0	6900000000
Tint moyenne	18,5	17	23
Facteur d'utilisation	0,61	0	1

*Tableau 8.7.1 : Paramètres du modèle Hiver*

Hiver				Eté			
Coefficients ai		Coefficients bij		Coefficients ci		Coefficients dij	
a0	117,98	b1b3	1,92	c0	0,98	d1d2	1,3
a1	18,98	b1b7	3,2	c1	4,3	d1d3	9,95
a2	-1,3	b1b8	13,9	c2	28,9	d1d7	9,45
a3	21,4	b1b9	14,34	c3	-18,3	d1d8	6,79
a4	-7,9	b1b11	12,22	c4	3,1	d1d9	4,8
a5	2,45	b3b4	-2,84	c5	1,98	d3d4	-1,4
a6	12,3	b3b9	3,2	c6	4,3	d2d11	-27,9
a7	12,57	b4b11	1,98	c7	2,8	d5d7	7,32
a8	8,98	b5b7	4,9	c8	14,9	d10d11	-2,4
a9	28,45	b6b7	0,22	c9	45,9	d9d11	12,4
a10	-6,5	b7b11	12,34	c10	11,1	d7d11	9,46
a11	15,47	b9b12	13,43	c11	-8,3	d4d11	-5,36
a12	29,3	b10b11	0,03			d6d7	8,11
		b11b12	11,79			d2d4	2,1
						d8d10	-3,35

Tableau 8.7.2 : Coefficients ai, bij, ci et dij pour les modèles Hiver et Eté

Paramètres	Valeur	Min	Max
Conductivité	0,6	0,43	1,18
Capacité Thermique	155210900	155210900	465632700
Infiltration	2,64	0,5	3
Occupation	5,3	0	12
S/V	0,36517789	0,27388342	0,45647237
SU	90,6214233	82,8573544	189,006915
Sv Nord	46	0	55
Sv autre	65	0	162,5
Température ext.	431	0	1400
Radiation	1506017700	273821400	2738214000
Ventilation nocturne	1	0	3

Tableau 8.7.3 : Paramètres du modèle Eté

## 9 RESULTATS RT 2005

Une évaluation des performances de quelques logements et maisons du panel restreint a été réalisée selon la réglementation RT 2005 (cf cahier des charges en annexe). L'évaluation a été conduite avec le logiciel ClimaWin développé par la société BBS SLAMA. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant.

Logement Panel restreint	Ville	Cep (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Cep ref (kWh/m <sup>2</sup> .an)	Tic (°C)	Tic ref (°C)
1.1	Bayonne	125	76	34,4	28,4
1.2	Bayonne	203	138	31,6	30
2	Bollène	179	59	35,2	30,8
3.2	Bayonne	280	152	28,8	27,6
4.1	Bayonne	134	131	31	27,7
4.2	Bayonne	144	127	29,9	28
6.1	Paris	158	115	34,5	30,4
8.1	Bar-le-Duc	281	180	30,1	29,5
9	Noisiel	159	61	31,4	29,1
10	Bessenay	421	414	40,9	34,1
11	St Julien Cr.	231	71	34	33
12	Saudrupt	375	116	35,6	30,5

*Tableau 9.1 : Résultats obtenus par application de ClimaWin RT 2005*

L'application de la RT 2005 à des bâtiments anciens pose les problèmes semblables à eux identifiés lors de la précédente étude « Connaissance des bâtiments anciens » achevée en 2007 : coefficient Cep parfois élevé et coefficient Tic toujours très élevée.

Les difficultés générales de modélisation du comportement des bâtiments anciens sont liées aux modèles de calcul utilisés et à certains manquements quant à la prise en compte des nombreuses caractéristiques spécifiques du bâti ancien.

La durée moyenne de saisie des données, à partir des rapports fournis, est variable. Pour une étude de cas, c'est-à-dire pour une maison ou un logement, étant entendu que les rapports de diagnostics fournissent la totalité des données nécessaires, il faut compter, pour une saisie des données et les calculs avec ClimaWin de 5 à 8 jours.

## 10 CONFRONTATION DES RESULTATS

Avec la tâche 3, 24 modèles BATAN (12 modèles Hiver et 12 modèles Eté) ont été élaborés à partir de 12 bâtiments (17 logements) du panel restreint.

Une confrontation des résultats obtenus avec ces modèles est faite pour différents bâtiments du panel. Le tableau 10.1 fournit un récapitulatif des besoins énergétiques mesurés et calculés avec les modèles TRNSYS-COMIS et BATAN. Les besoins pour tous les bâtiments (sauf le cas 3) sont exprimés en kWh/m<sup>2</sup> pour la période testée. Les résultats du cas 3 (Bayonne) sont exprimés en heures d'inconfort thermique (Température >27°C) sur la période testée.

Les périodes testées ont été déterminées en fonction de la disponibilité et de la qualité des données fournies par la tâche 2 (données climatiques, caractéristiques des bâtiments, mesures disponibles, etc.).

Panel restreint	Ville	Mesures (kWh/m <sup>2</sup> )	TRNSYS/COMIS (kWh/m <sup>2</sup> )	BATAN (kWh/m <sup>2</sup> )	Période testée
1	Bayonne	23	26	19	24/01-15/03
2	Bollene	92	85	87	4/12-15/03
3	Bayonne	66*	58*	54*	1/06-7/07
4	Bayonne	1.6	1.9	2	28/02-28/04
5	Paris	74	78	75	30/11-15/03
6	Paris	87	91	82	30/11-15/04
7	Pluvigner	395	342	318	22/09-10/06
8	Bar-le-Duc	112	110	114	09/01-10/06
9	Noisiel	68	75.1	73	14/01-4/06
10	Bessenay	104	98	100	3/12-11/04
11	St Julien Crempse	3	4	4	7/1-12/02
12	Saudrupt	62	61	64	8/01-09/04

\*Heures d'inconfort

*Tableau 10.1 : Evaluation des résultats des modèles (période testée)*

La confrontation des résultats montre que les modèles BATAN fournissent des résultats proches des mesures.

Le temps de saisie des données avec les modèles BATAN est d'un ou deux jours, alors qu'il faut compter au moins 3 semaines pour modéliser et caler précisément un logement ancien avec les modèles TRNSYS-COMIS. Il faut également disposer de données recueillies in situ pour le calage des modèles TRNSYS-COMIS.

Les modèles BATAN (hiver et été) ont été élaborés à partir de plus de 11 000 expériences, correspondant à autant de configurations possibles de bâtiments anciens. Ces modèles BATAN sont utilisables lorsque les données (valeurs des paramètres) appartiennent aux plages de variations définies à partir des typologies correspondant au panel restreint de bâtiments anciens issu des tâches 1 et 2.

## 11 ANNEXES

11.1 Rappel des chiffres disponibles avant BATAN (en 2005)

11.2 Rappel des chiffres disponibles après l'étude « Connaissance des Bâtiments Anciens » (en 2007)

11.3 Exemples de résultats obtenus avec TRNSYS-COMIS

11.4 Exemples de résultats obtenus avec HEAT 3

11.5 Guide d'utilisation des modèles BATAN

11.6 Cahier des charges du modèle BATAN



### 11.1 Rappel des chiffres disponibles avant BATAN (en 2005)

De nombreuses études et autres statistiques font apparaître deux catégories de bâtiments :

- les bâtiments « neufs », construits selon les réglementations thermiques (RT) 1975 et suivantes
- les bâtiments « existants », antérieures à ces réglementations (<1975).

Secteur	Usage	Bâtiments <1975	Bâtiments neufs	Ensemble actuel
Résidentiel	Chauffage kWh/m <sup>2</sup> /an	328	80 à 100	210
	ECS <sup>1</sup> kWh/m <sup>2</sup> /an	36	40	37,5
	Electricité à usage spécifique (kWh/pers/an)	1000	1000	1000
Tertiaire	Chauffage kWh/m <sup>2</sup> /an	209	155	196
	ECS <sup>1</sup> kWh/m <sup>2</sup> /an	19	40	29
	Electricité à usage spécifique (kWh/m <sup>2</sup> /an)	?	?	96

*Répartition des consommations énergétiques des bâtiments / confusion des bâtiments construits avant 1975 – Source INSEE 2003*

On estime que les logements anciens (<1948) représentent un tiers du parc existant :

	Logements construits avant 1948	Logements construits entre 1949 et 1979	Logements Construits entre 1975 et 1998	Total
<b>PART</b>	33 %			
	soit près de 10 Millions de logements	33 %	34 %	100% = 29,6 Millions

*Répartition du nombre de logements existants, par année de construction, en 2002 (source MELTLM – compte logement)*

## **11.2 Rappel des chiffres disponibles après l'étude « Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie » (en 2007)**

L'un des objectifs de l'étude « Connaissance des bâtiments anciens et économies d'énergie » (étude initiée en 2005 parfois nommée BATAN 1) était d'évaluer :

- l'adéquation entre le comportement réel du bâtiment et le comportement simulé,
- la prise en compte des propriétés thermiques du bâti ancien par des méthodes de calcul actuelles.

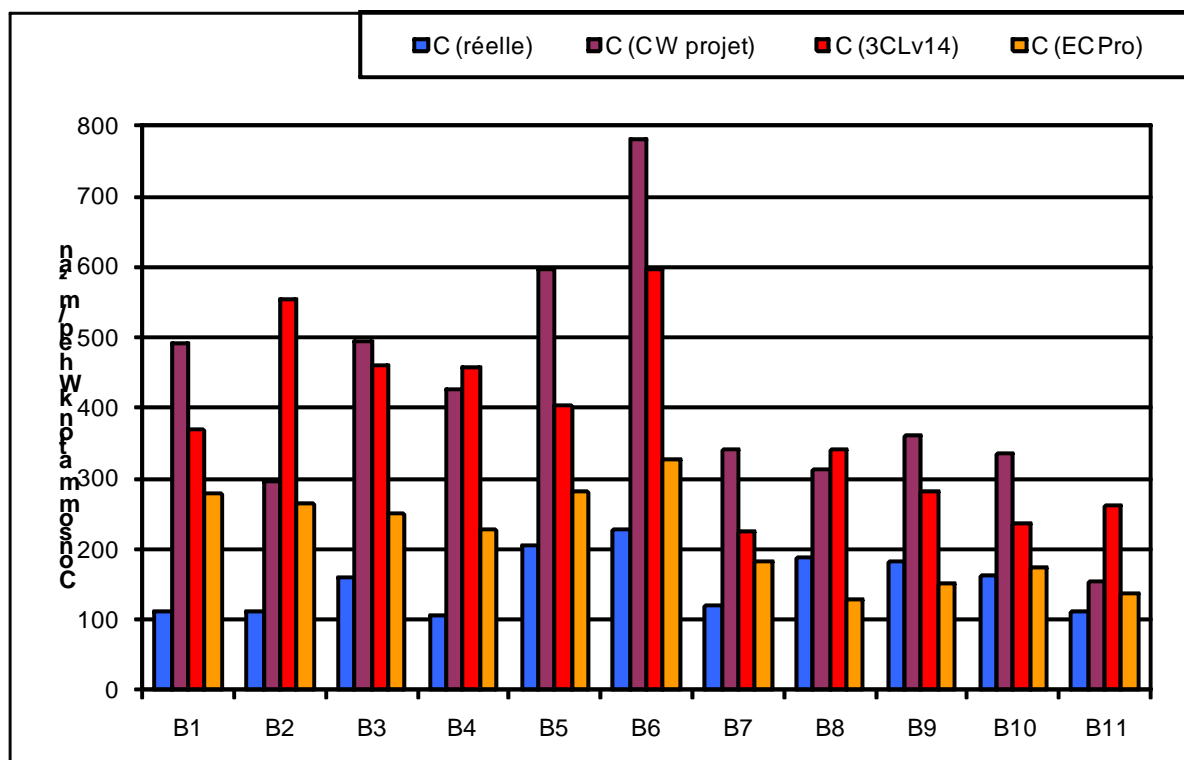
Plusieurs logiciels ont été utilisés :

- logiciel 3CL (versions 11 et 14) et méthodes 3CL. Il s'agit d'un logiciel développé pour le diagnostic de performance énergétique. Il fait appel à deux méthodes : l'une pour les logements collectifs, l'autre pour les maisons individuelles. Il est le logiciel retenu initialement dans cette étude pour évaluer la prise en compte des propriétés thermiques du bâti ancien.
- logiciel ClimaWin version 3.2 et méthodes RT2000. Ce logiciel ClimaWin, applicable pour le bâtiments neufs, a été utilisé pour compléter l'évaluation précédente du logiciel 3CL, en proposant une comparaison avec le bâtiment récent n°11.
- logiciel EC-Pro version prototype et méthodes de calcul. Le logiciel ECPro, issu d'un projet de recherche européen, a été développé pour la certification des maisons individuelles. Il a été utilisé, avec sa version prototype, pour compléter l'évaluation de 3CL.

Les 3 logiciels ne demandent pas les mêmes informations en entrée, et les niveaux de saisie sont différents. La durée moyenne de saisie des données, à partir des rapports fournis, est très variable. Pour une étude de cas, c'est-à-dire pour une maison ou un logement, étant entendu que les rapports de diagnostics fournissent la totalité des données nécessaires, il faut compter, pour une saisie des données et les calculs :

- avec 3CL, plusieurs dizaines de minutes
- avec ClimaWin, de 5 à 15 jours
- avec EC-Pro, de 3 à 6 jours

La durée la plus courte correspond à une très bonne maîtrise des logiciels.



*Figure a : Comparaison synthétique des consommations réelles et des consommations simulées sous les différents logiciels*

D'une façon générale, il convient de noter, pour tous les bâtiments anciens du panel, **l'écart important entre les consommations réelles et les consommations simulées.**

- Pour les logements collectifs anciens (B1 à B5) : l'écart est particulièrement fort puisque les valeurs simulées sous 3CL et sous ClimaWin présentent un écart relatif de 350% en moyenne par rapport aux consommations réelles
- Pour les maisons individuelles anciennes (B6 à B10) : l'écart relatif est moindre ; il atteint tout de même 90% en moyenne pour 3CL et 140% en moyenne pour ClimaWin.

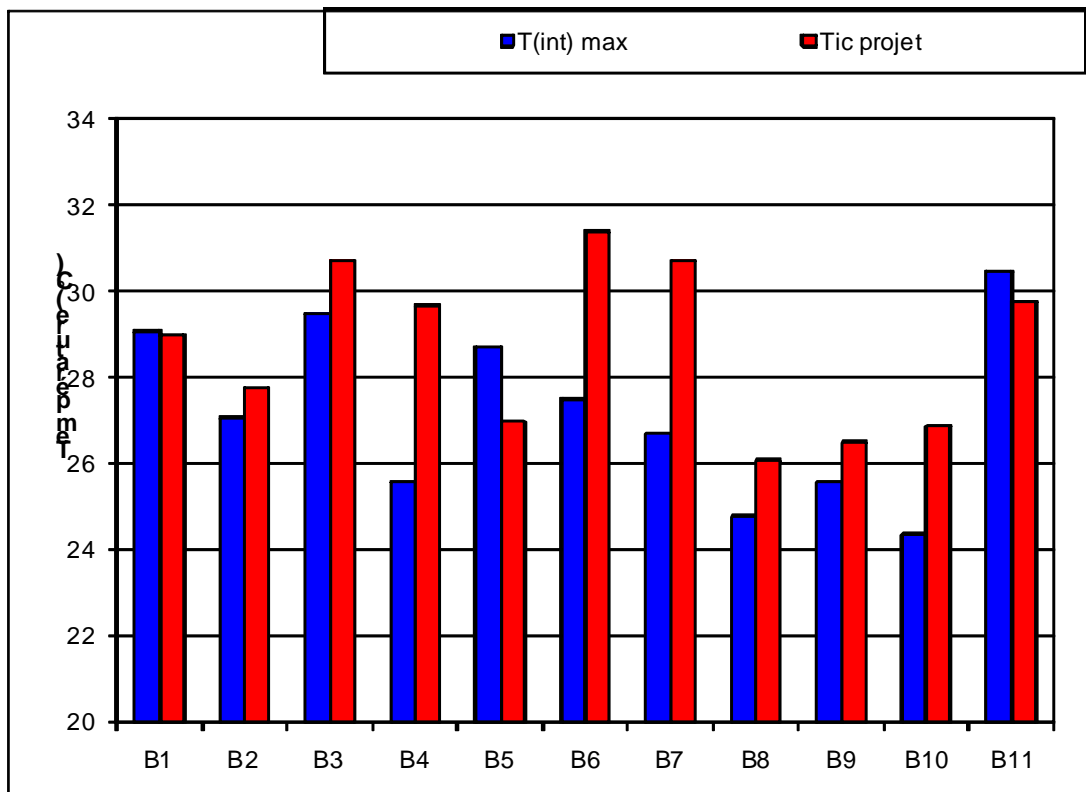
A l'inverse, pour le logement témoin, les consommations calculées sous la méthode réglementaire ClimaWin se rapprochent beaucoup plus des consommations réelles.

Parmi les logiciels utilisés, seul « ClimaWin » permet de simuler le comportement d'été d'un bâtiment.

L'approche se fait par le calcul de la température intérieure conventionnelle d'été (référence et projet).

Appelé Tic, cet indicateur représente la valeur maximale de la température résultante intérieure du bâtiment, en période estivale.

Le graphique ci-dessous présente, pour les 11 bâtiments de l'étude, les températures conventionnelles simulées et les températures résultantes maximales enregistrées in situ, pendant la saison estivale.



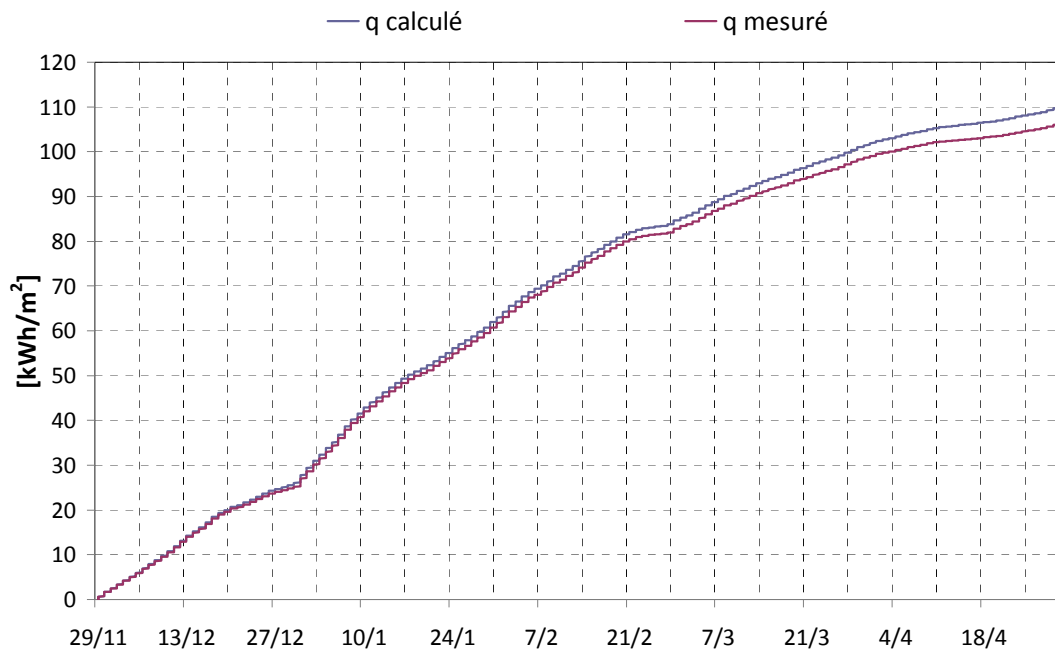
*Figure b : Comparaison des valeurs de Tic simulée et de la température résultante intérieure maximale mesurée in situ, pour chacun des bâtiments du panel.*

Comme pour le comportement d'hiver, nous pouvons constater sur ce graphique des écarts importants entre les valeurs simulées et les valeurs réelles.

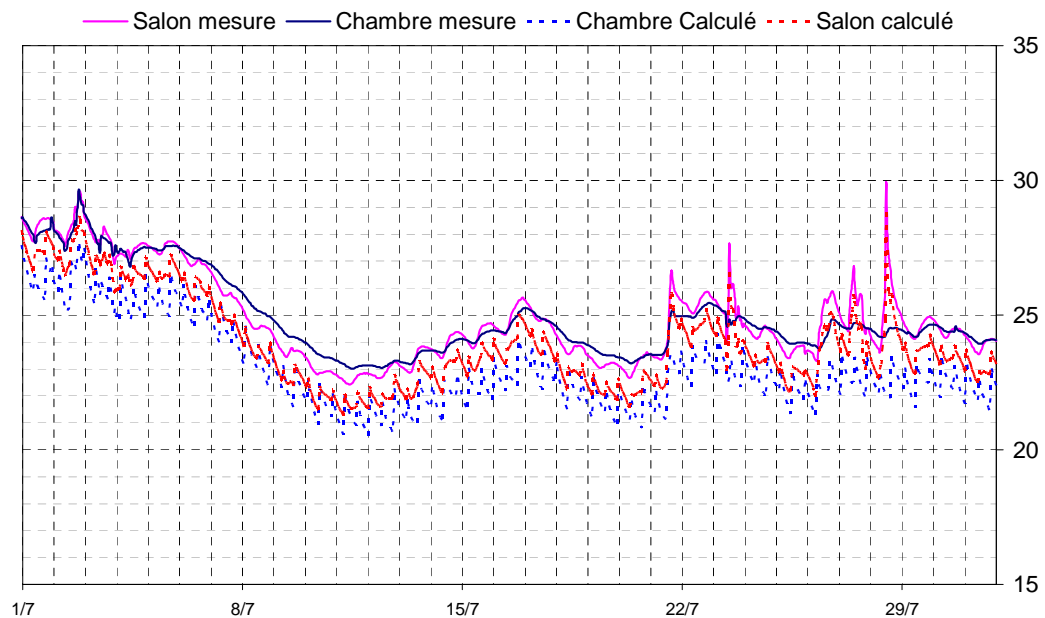
Les bâtiments 4, 6, 7, 8, 9 et 10 en particulier, possédant une inertie très importante due notamment à des parois verticales massives, présentent ainsi des performances réelles supérieures aux simulations.

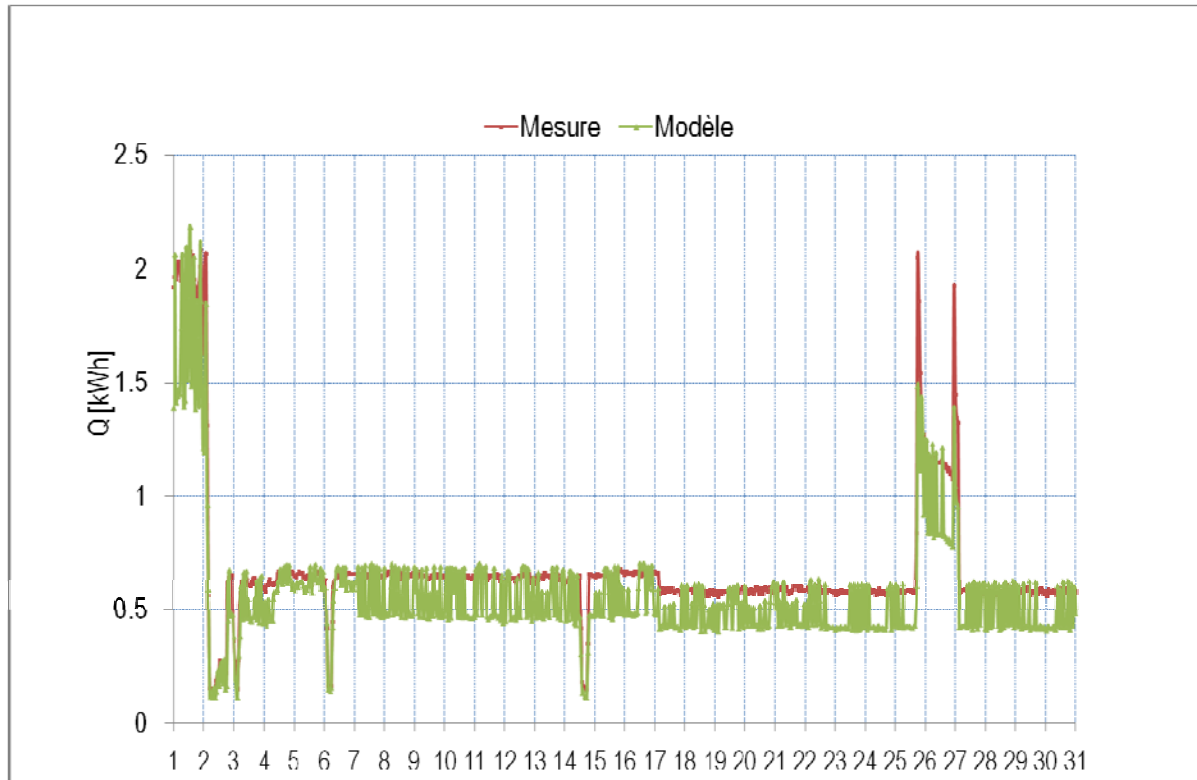
### 11.3 Exemples de résultats obtenus avec TRNSYS COMIS

#### Evaluation des consommations (Hiver)

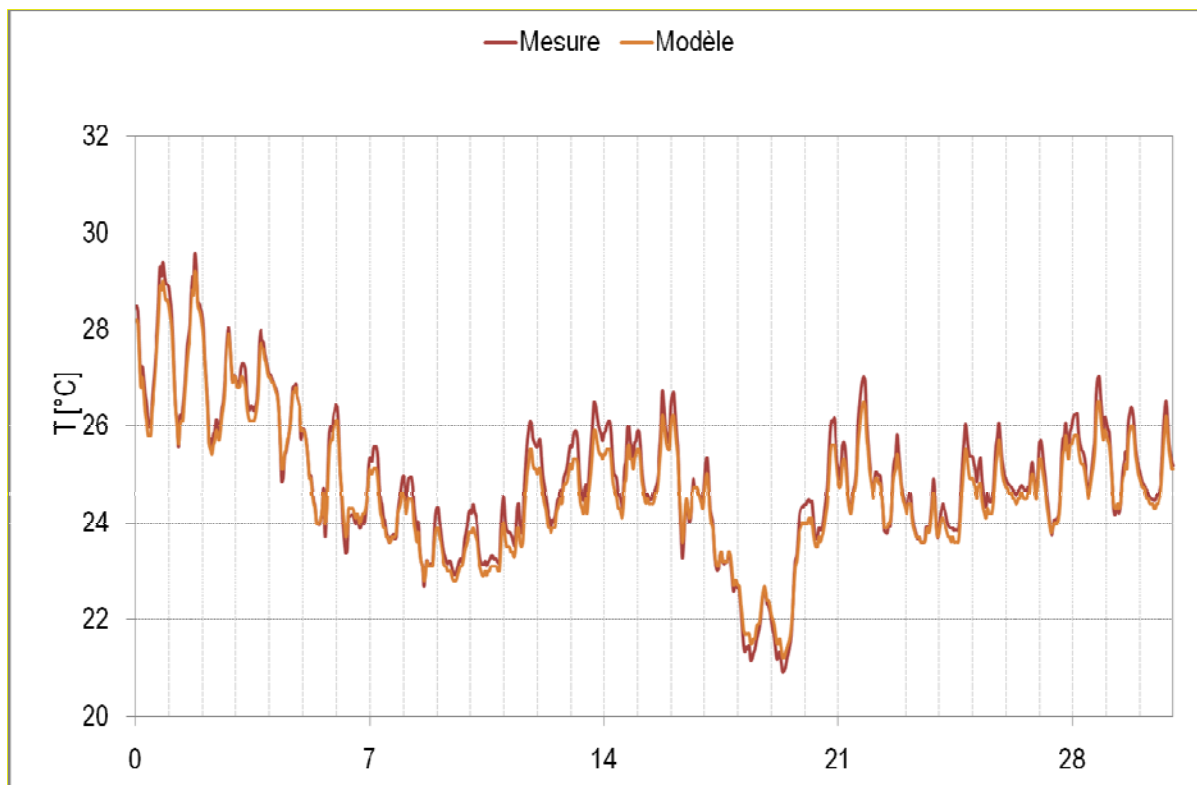


#### Evaluation des températures (été)



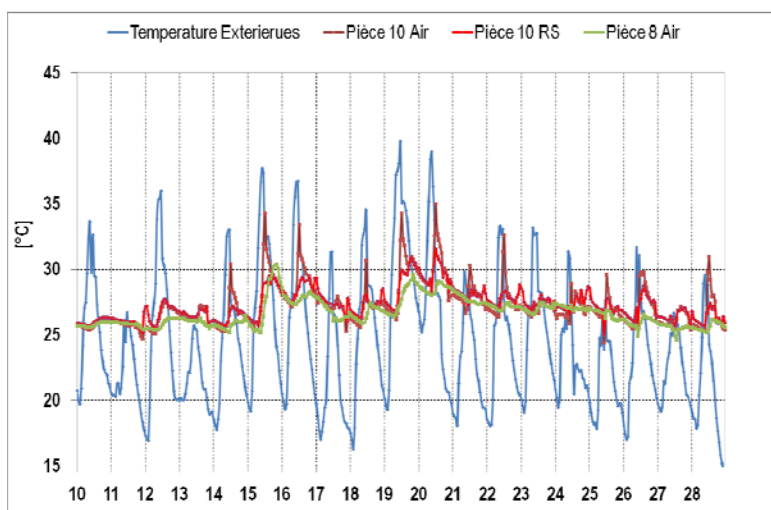
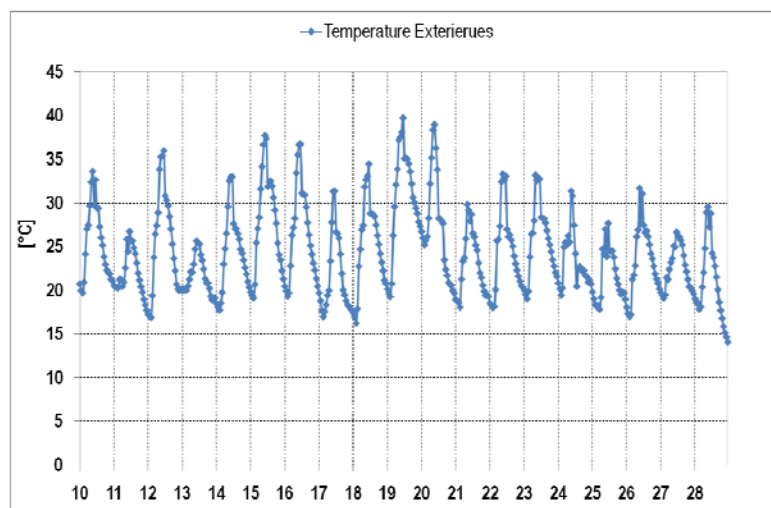
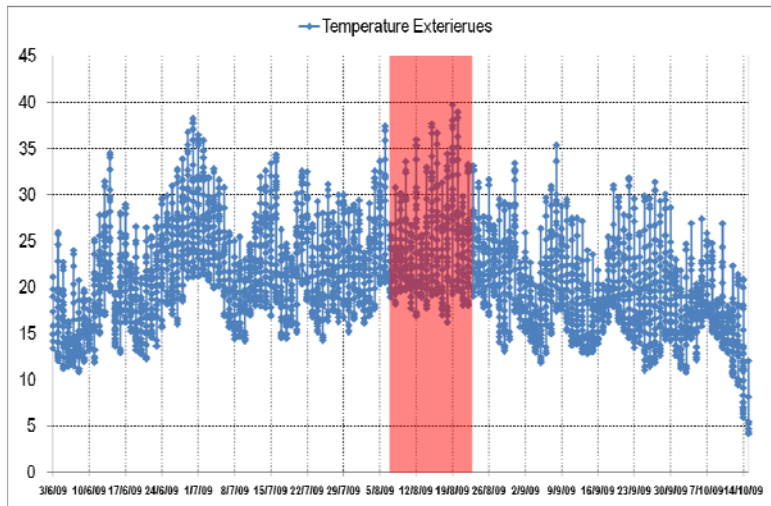


Calage : comparaison des besoins énergétiques mesurés et calculés (hiver)

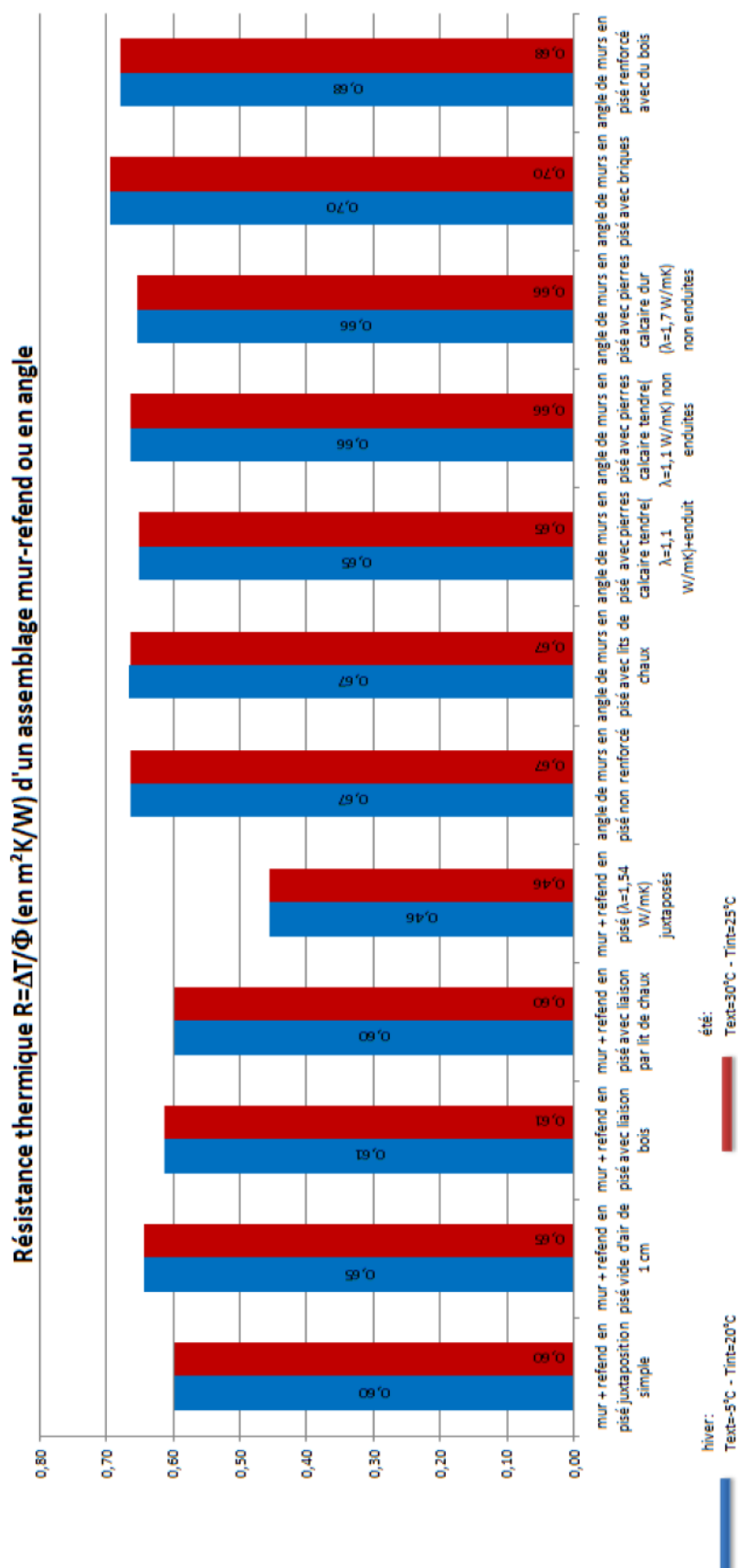


Calage : comparaison des températures mesurées et calculées (été)

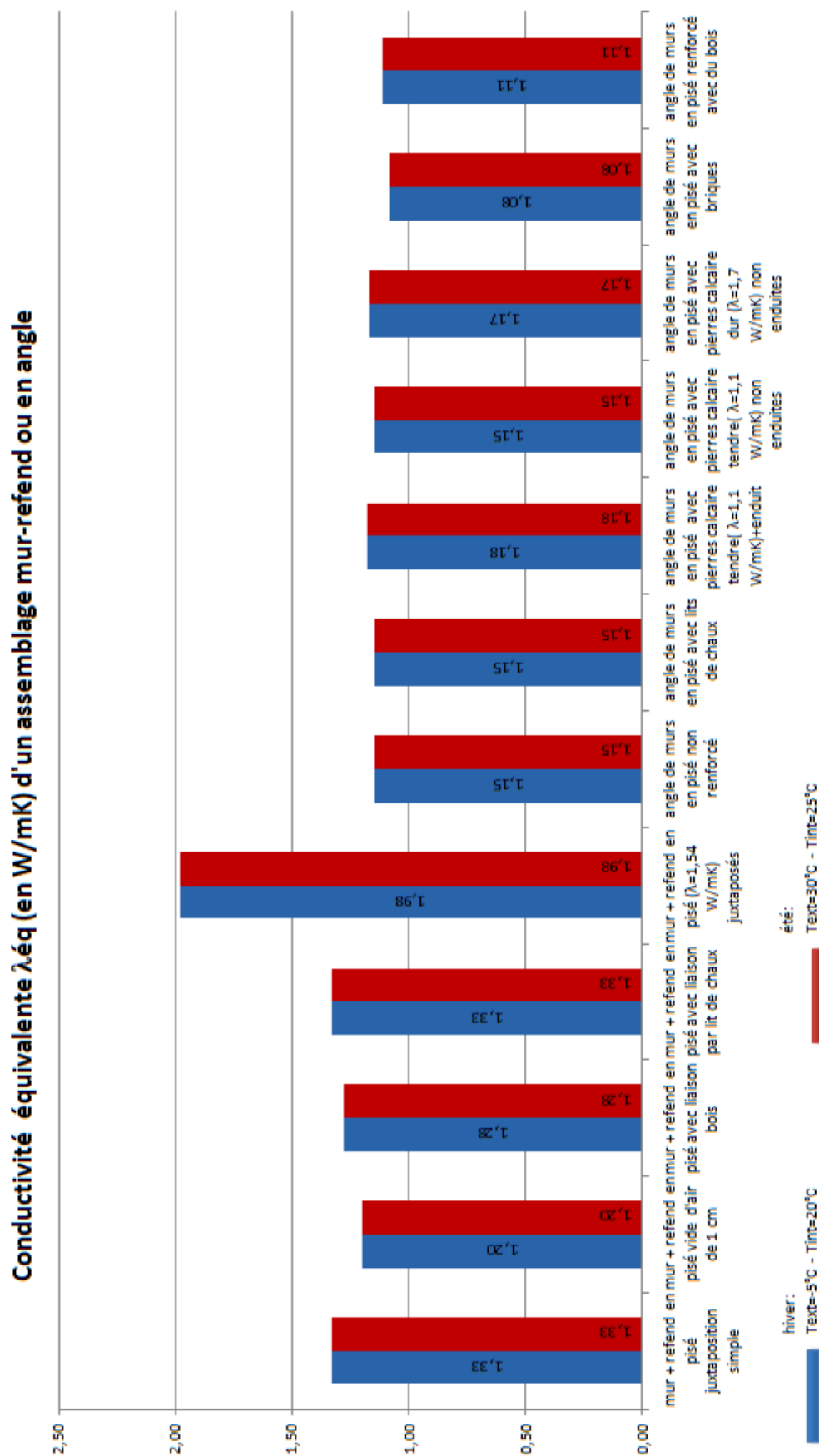
Le calage en été a été faite dans la période la plus chaude  
Pour le cas du logement 6, dans cette période, la pièce la plus chaude, la plus sollicitée, est la pièce 10. La calibration est donc faite avec la pièce 10 dans la période du 10 au 28 Aout.

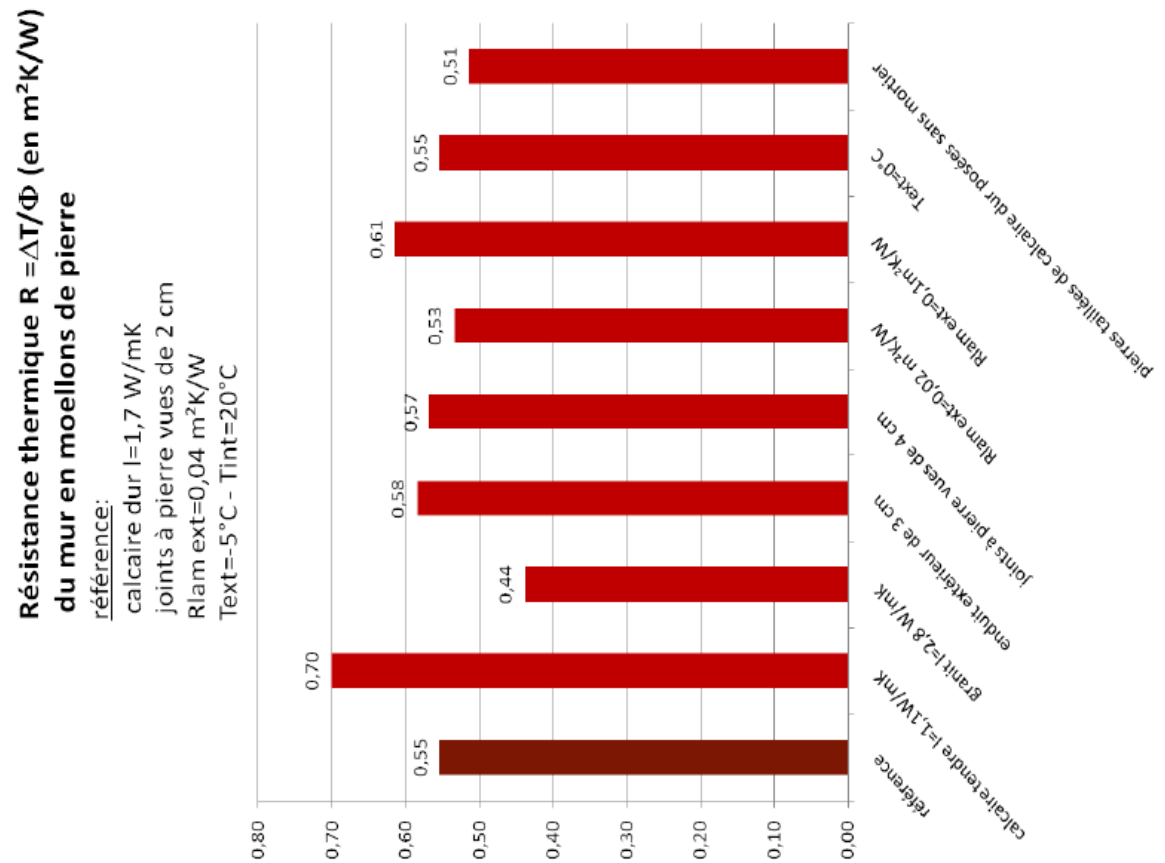
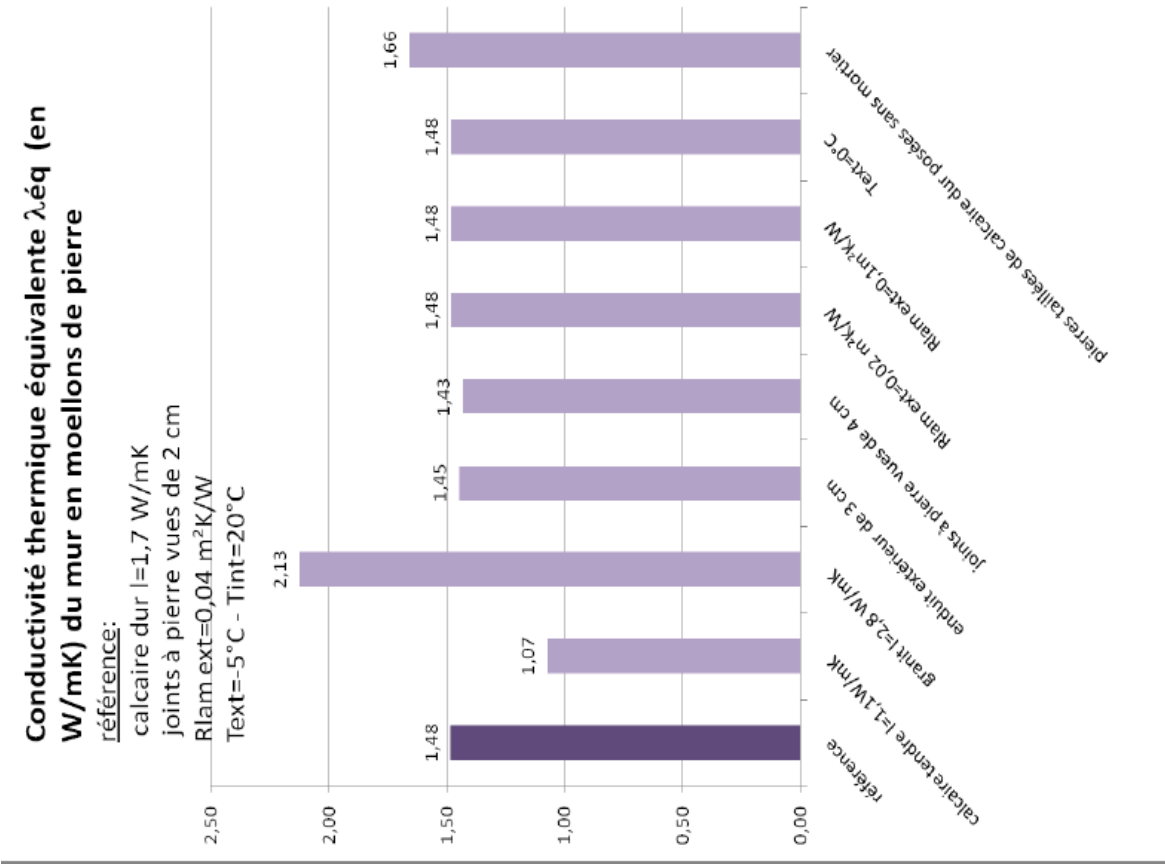


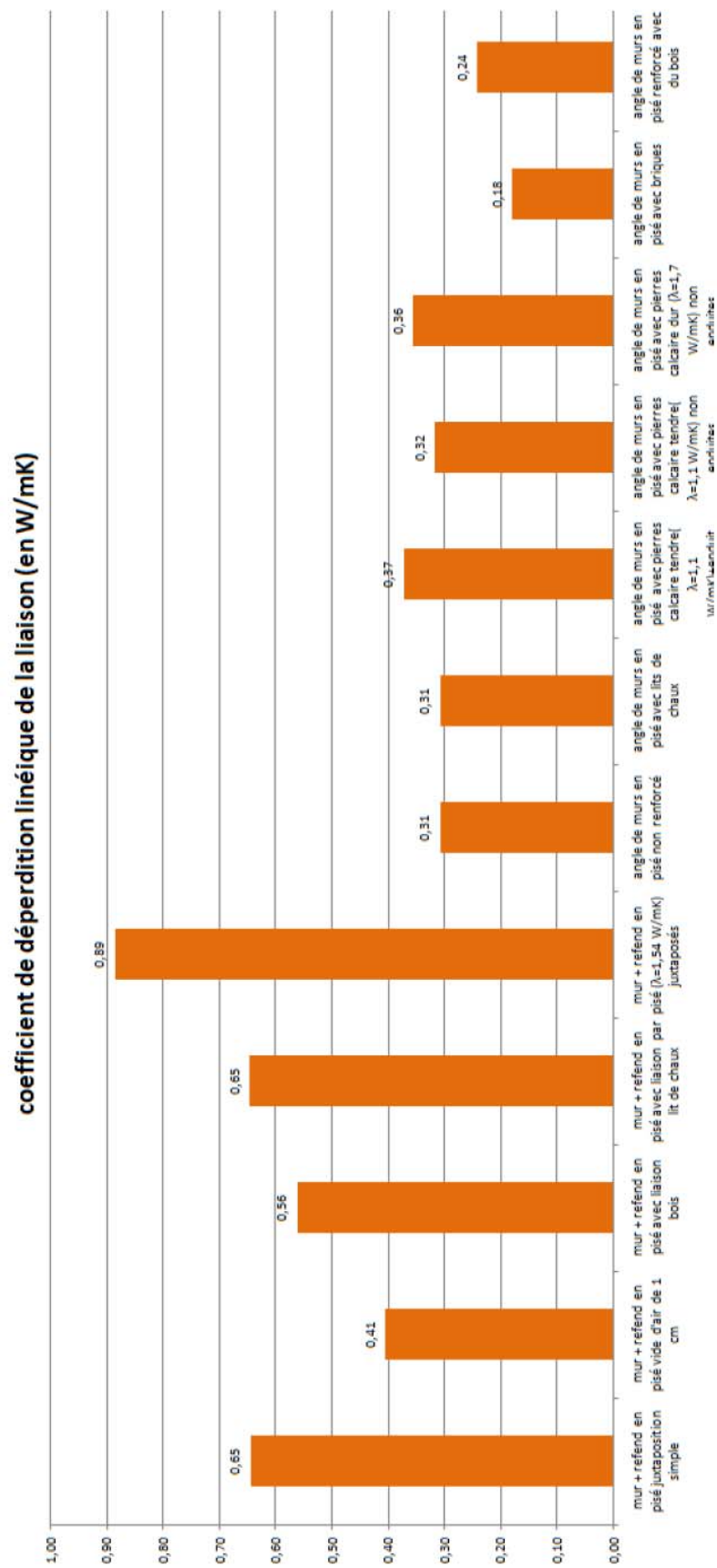
## 11.4 Exemples de résultats obtenus avec HEAT 3



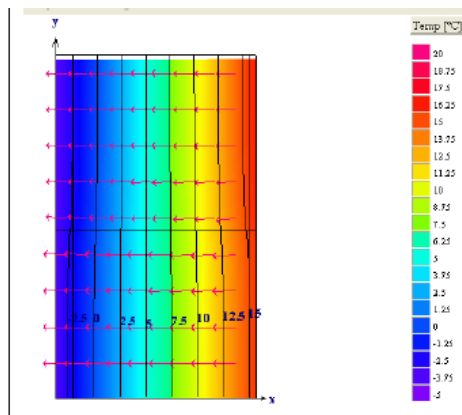




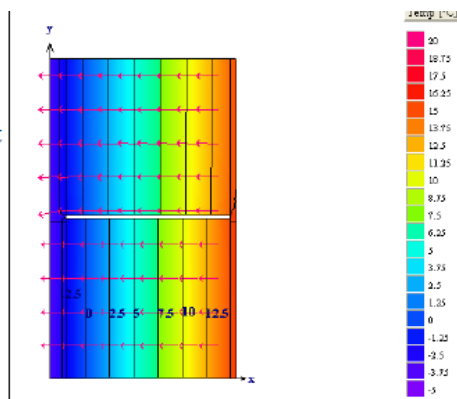




2 murs pisé  $\lambda =$   
0,995 et 1,2  
W/mK

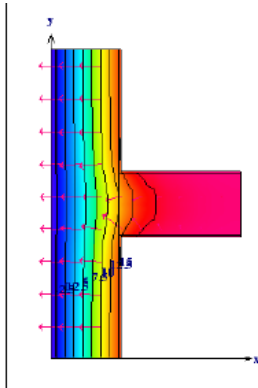


2 murs pisé  $\lambda =$   
0,995 et 1,2  
W/mK vide air 1  
cm, enduits int et  
ext jointifs

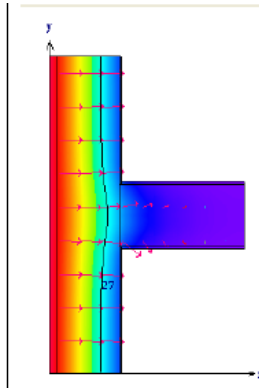


## Hiver/Été

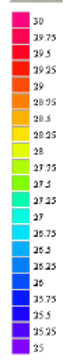
mur pisé et  
soubassement  
pierre ( $\lambda$  calcaire  
 $\text{dur}=1,7$ ) joints  
mortier de chaux



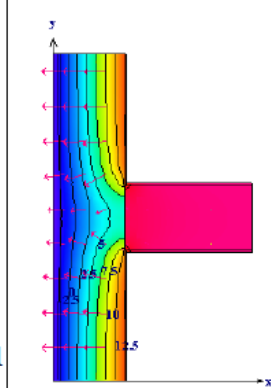
Temp [°C]



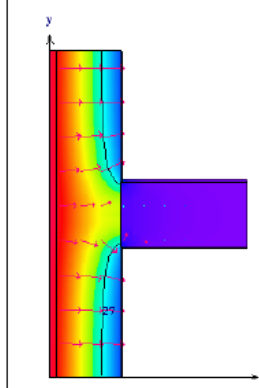
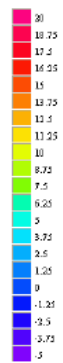
Temp [°C]



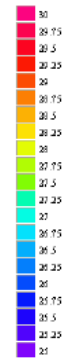
mur + refend en  
pisé vide d'air de 1  
cm



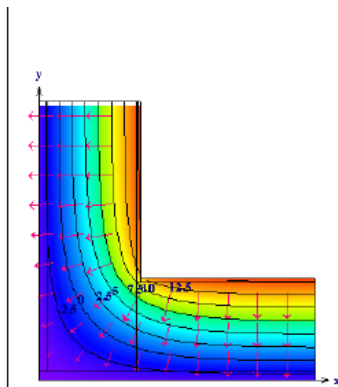
Temp [°C]



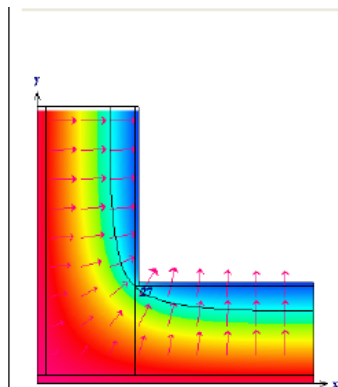
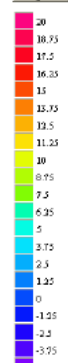
Temp [°C]



angle de murs en  
pisé non renforcé



Temp [°C]

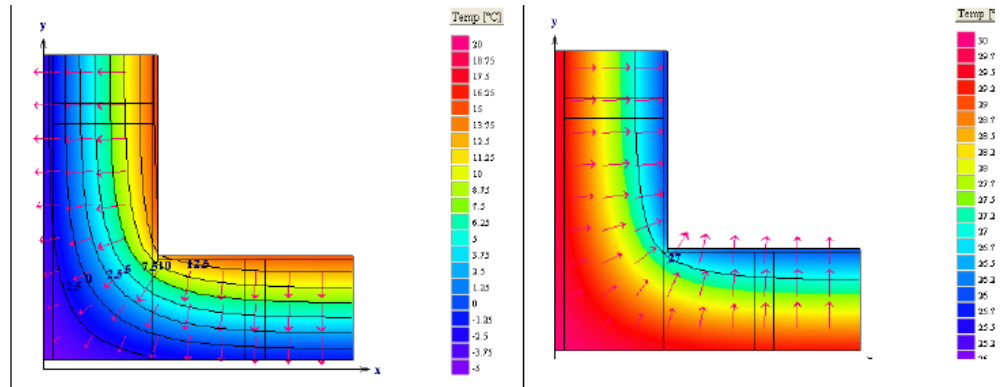


Temp [°C]

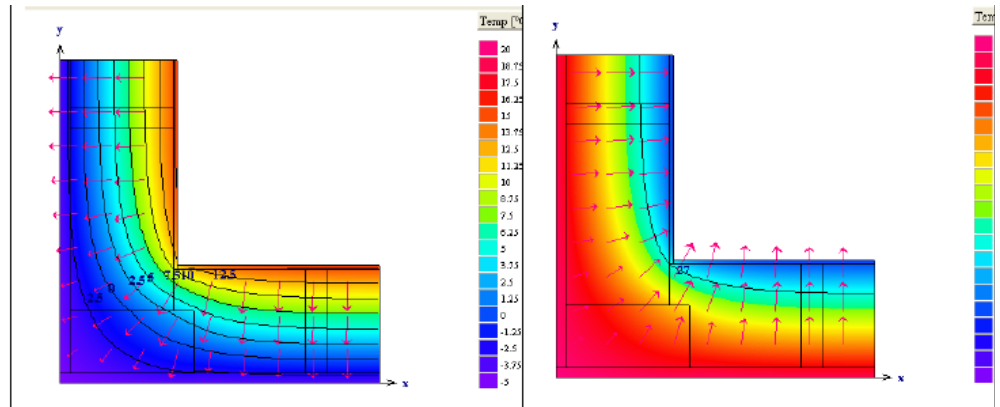


## Hiver/Été

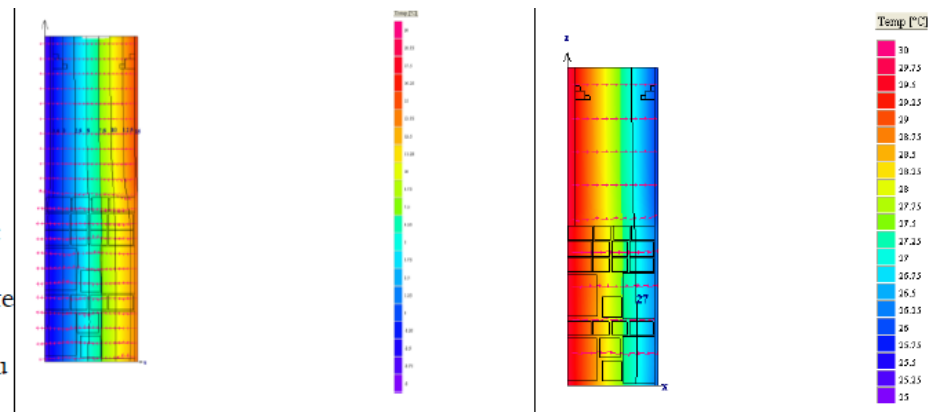
angle de murs en  
pisé avec lits de  
chaux



angle de murs en  
pisé avec pierres  
calcaire tendre  
( $\lambda=1,1 \text{ W/mK}$ )  
+enduit

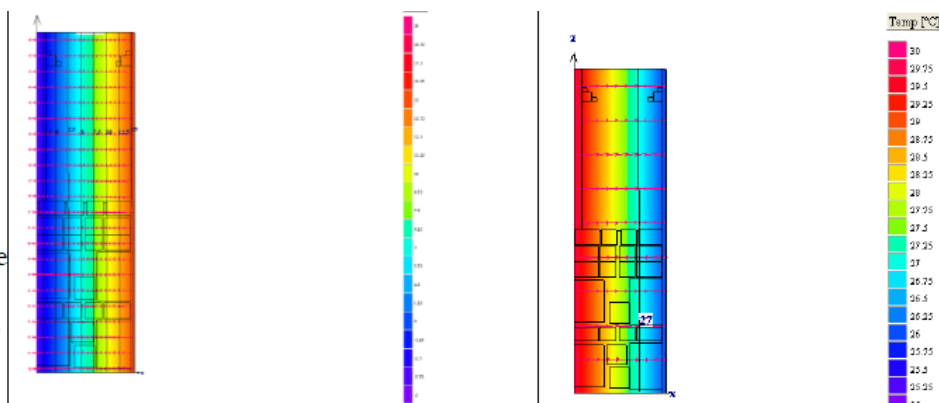


mur en pisé avec  
soubassement en  
moellons de pierre  
( $\lambda_{\text{calcaire}}=1,7$ ) joints au  
mortier de chaux

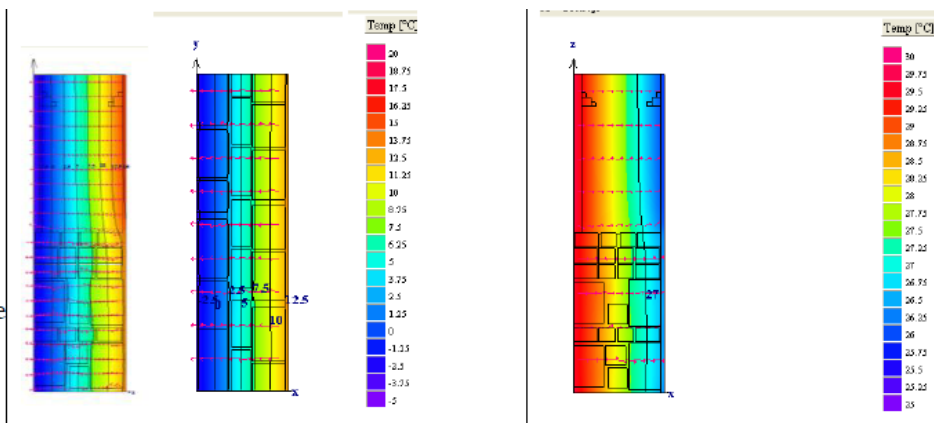


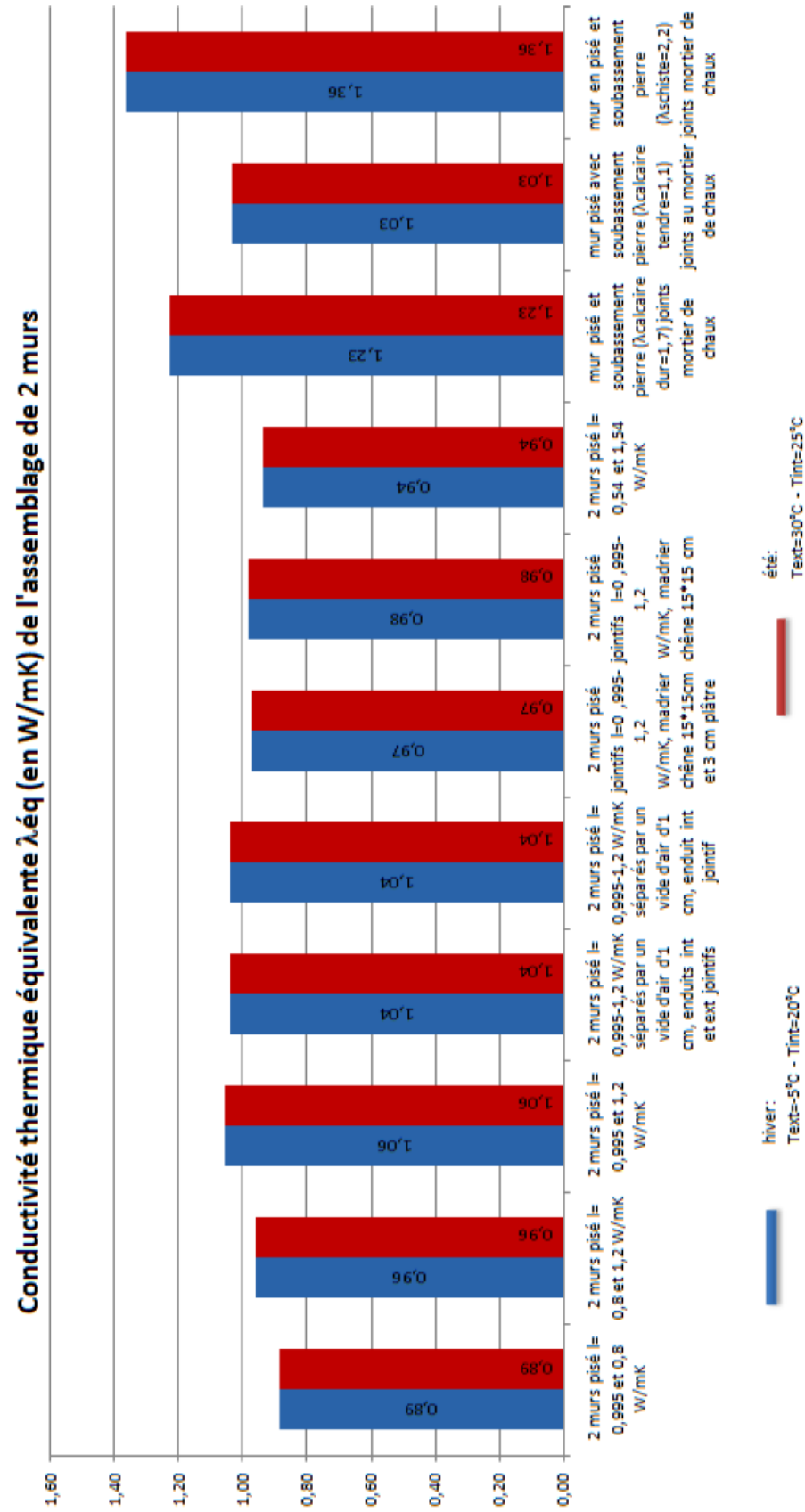
## Hiver/Eté

mur en pisé avec  
soubassement en  
moellons de pierre  
( $\lambda_{\text{calcaire}}=1,1$ ) joints  
au mortier de  
chaux



mur en pisé avec  
soubassement en  
moellons de pierre  
( $\lambda_{\text{schiste}}=2,2$ ) joints  
au mortier de  
chaux

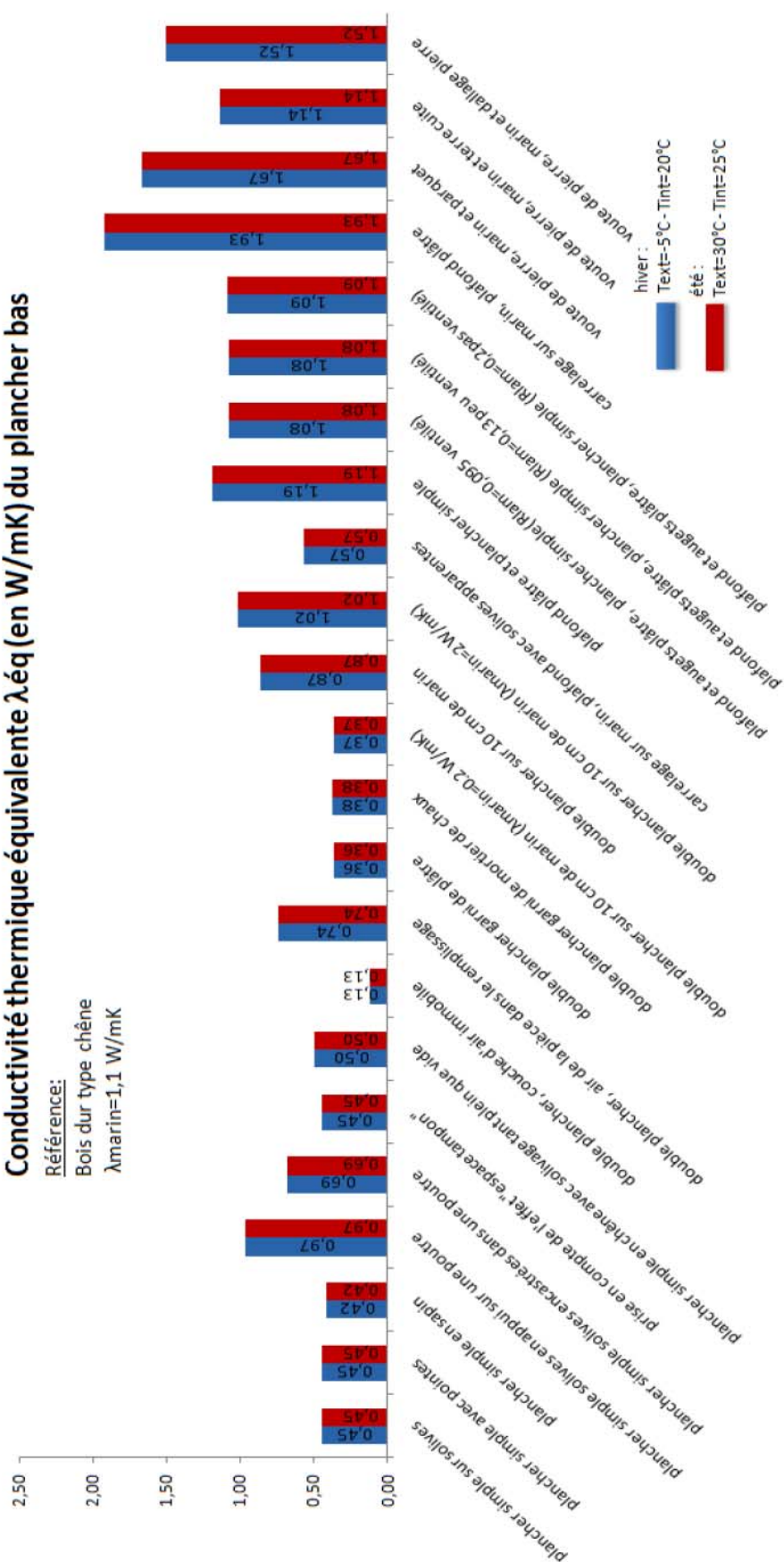




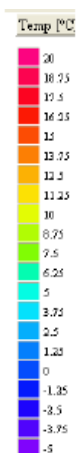


## Conductivité thermique équivalente $\lambda_{eq}$ (en W/mK) du plancher bas

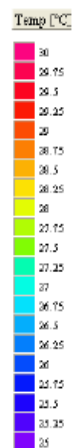
Référence:  
Bois dur type chêne  
 $\lambda_{marin}=1,1$  W/mK



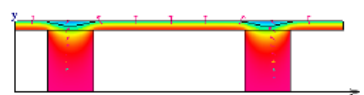
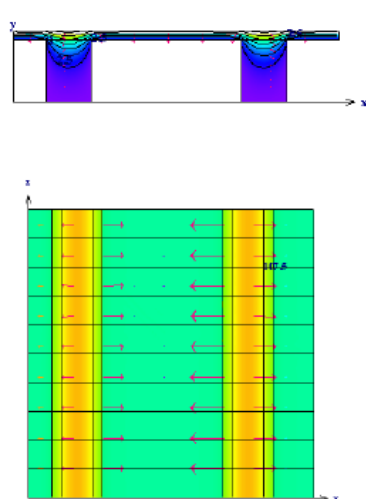
Hiver



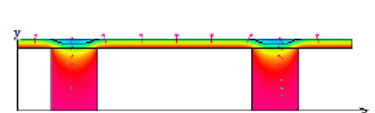
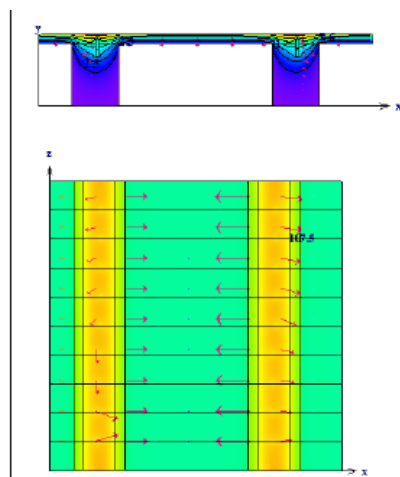
Eté



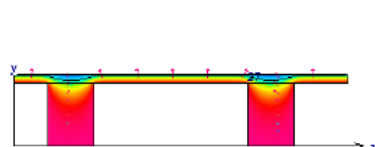
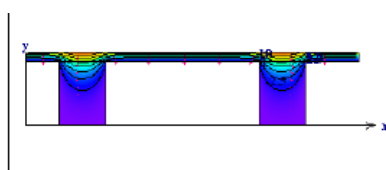
plancher simple sur solives



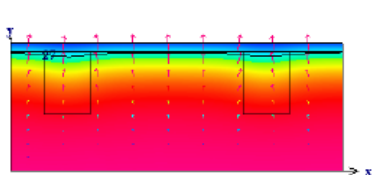
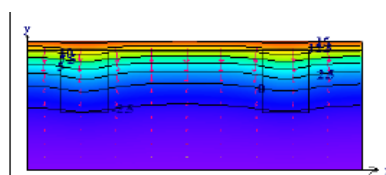
plancher simple  
avec pointes



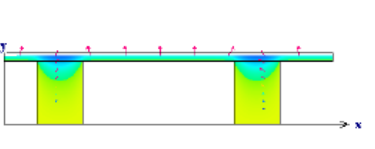
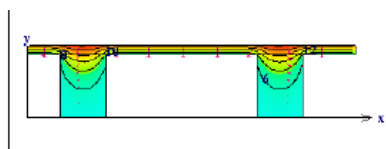
plancher simple en  
sapin



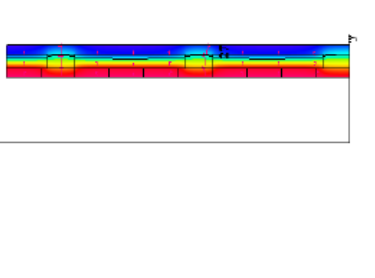
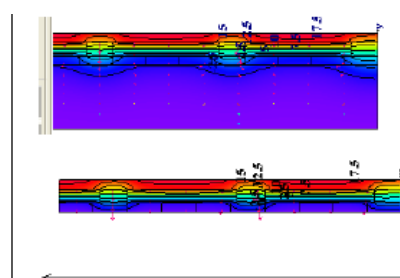
plancher simple  
solives encastrées  
dans une poutre



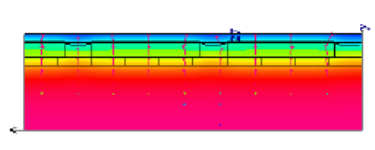
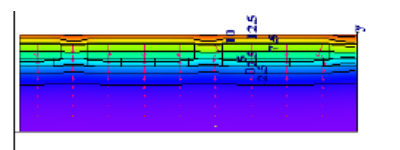
prise en compte de  
l'effet "espace  
tampon"



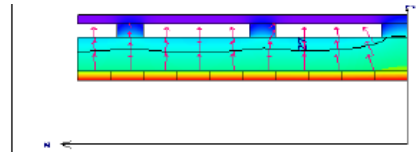
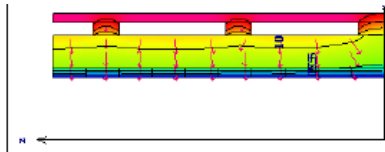
double plancher,  
couche d'air  
immobile



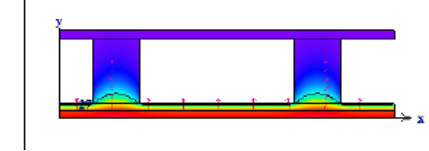
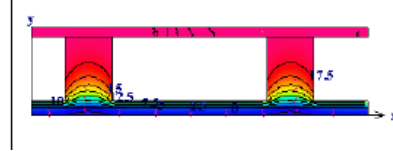
double plancher  
garni de plâtre



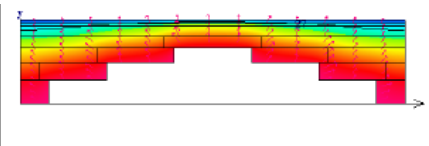
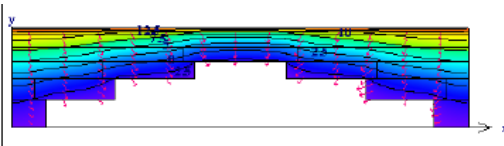
double plancher sur  
10 cm de marin  
( $\lambda_{\text{marin}}=2 \text{ W/mK}$ )

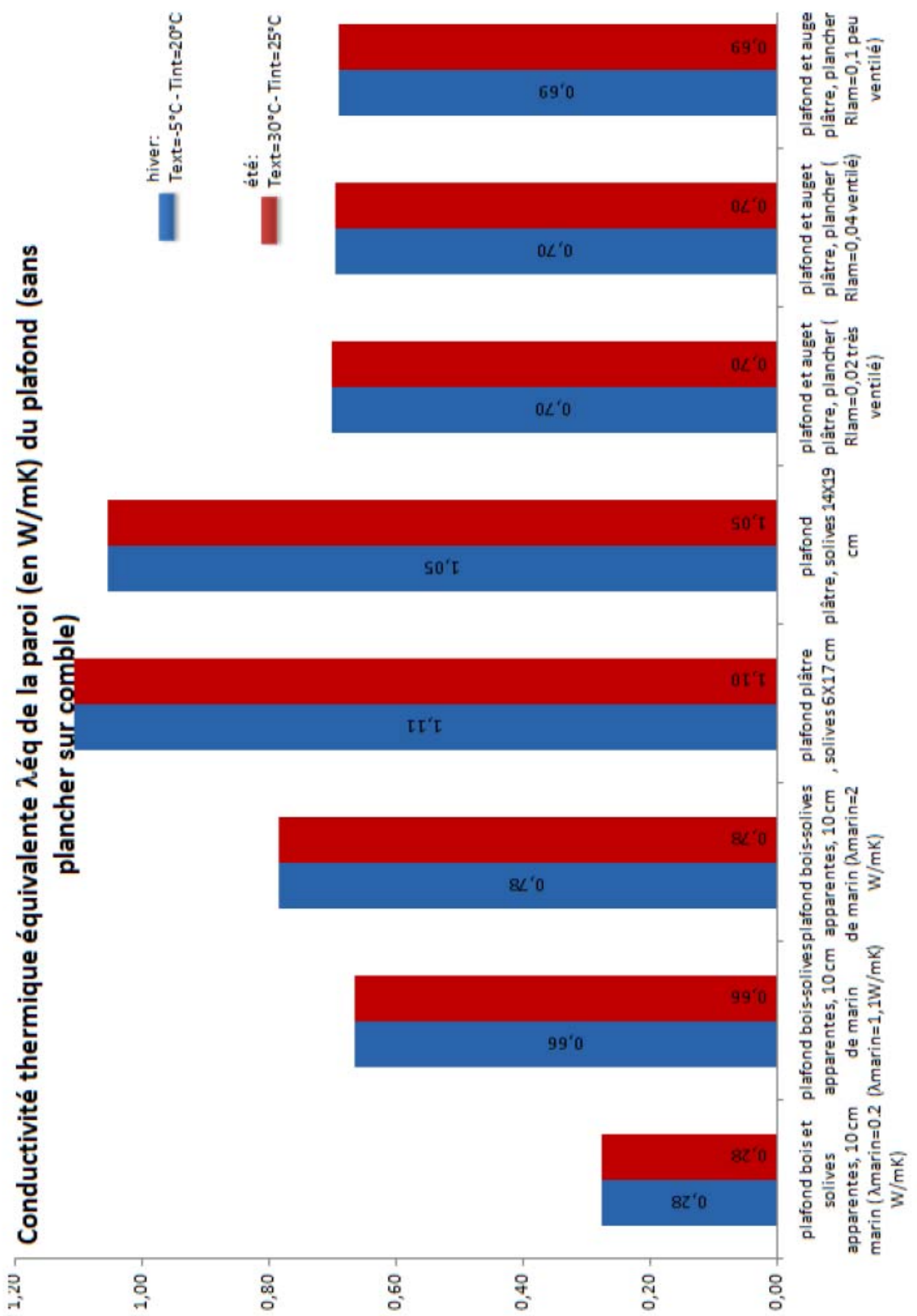


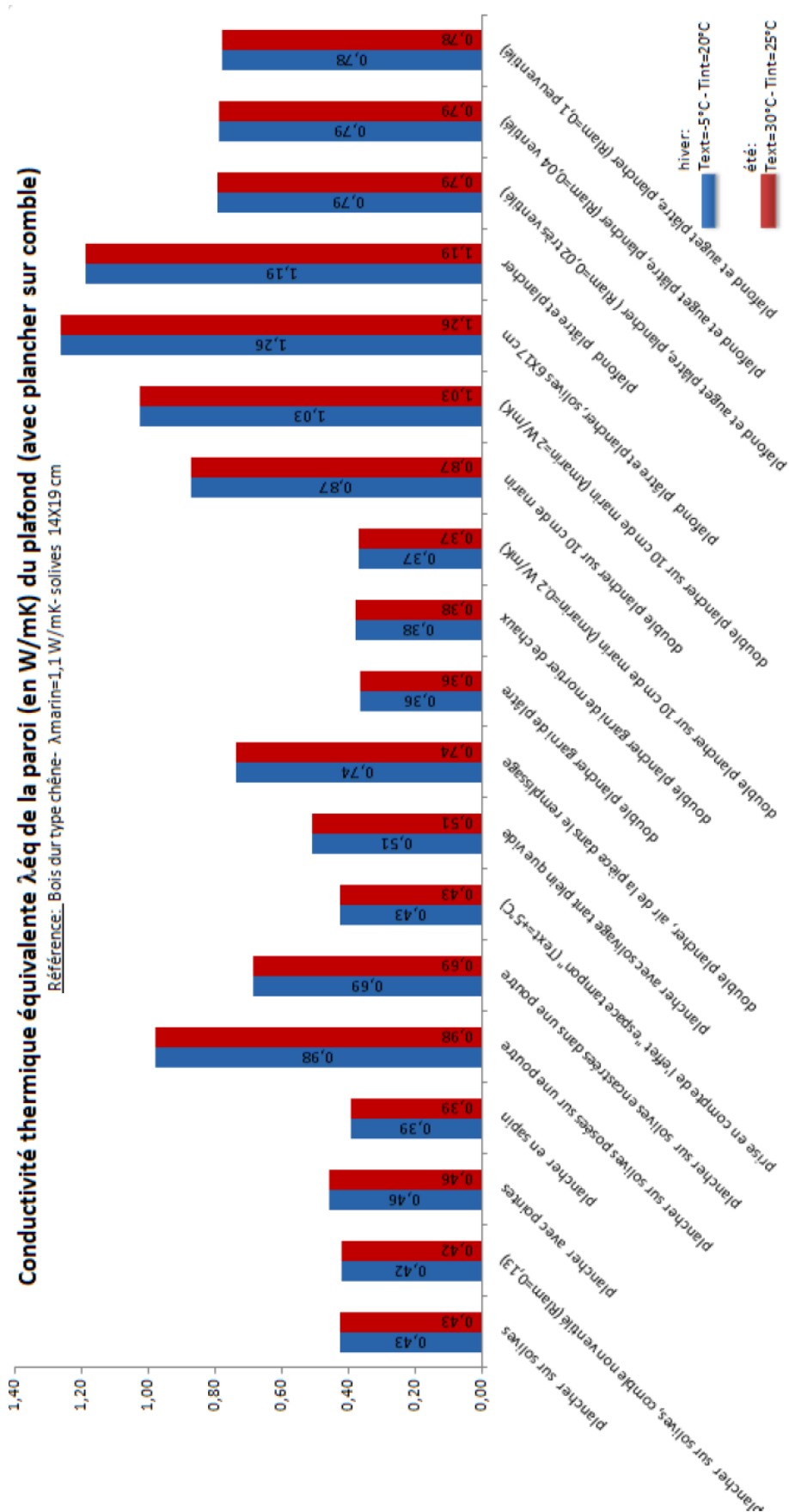
carrelage sur marin,  
plafond avec solives  
apparentes

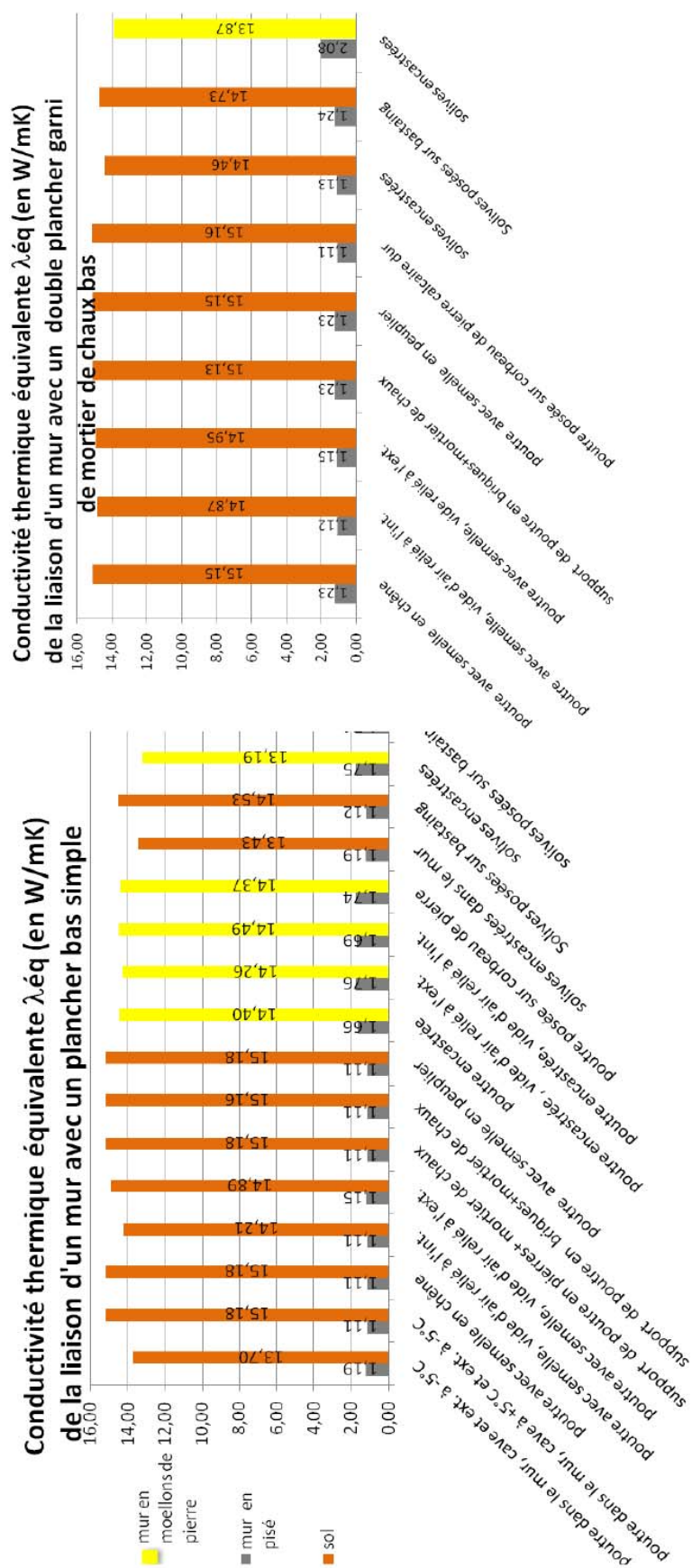


voute de pierre,  
marin et terre cuite

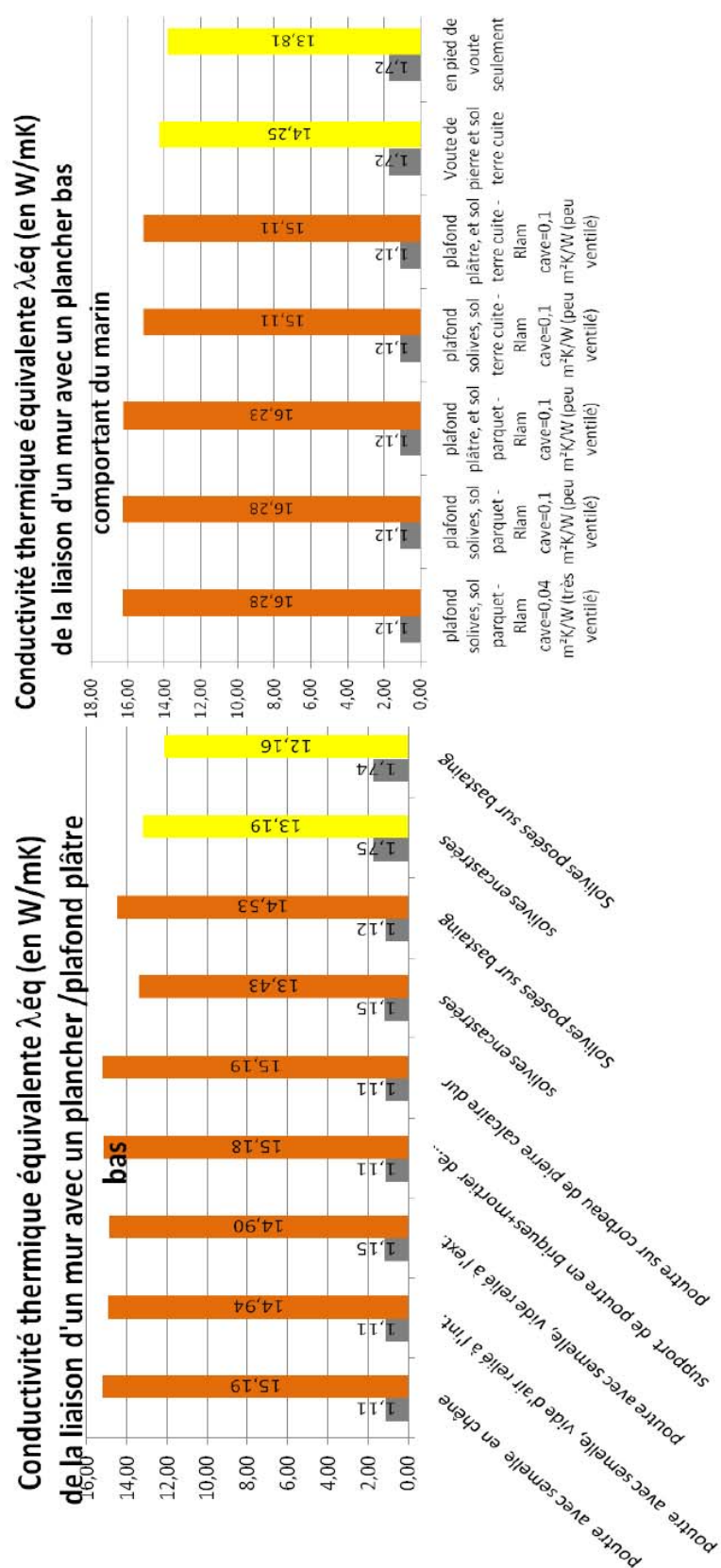










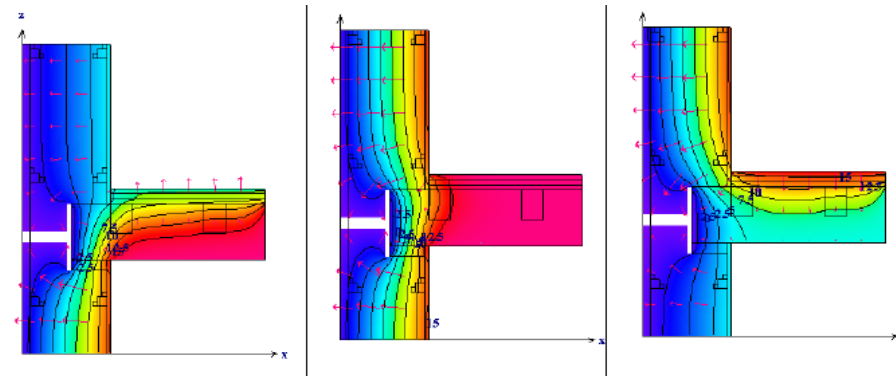




### Plancher haut / Plancher intermédiaire / Plancher bas

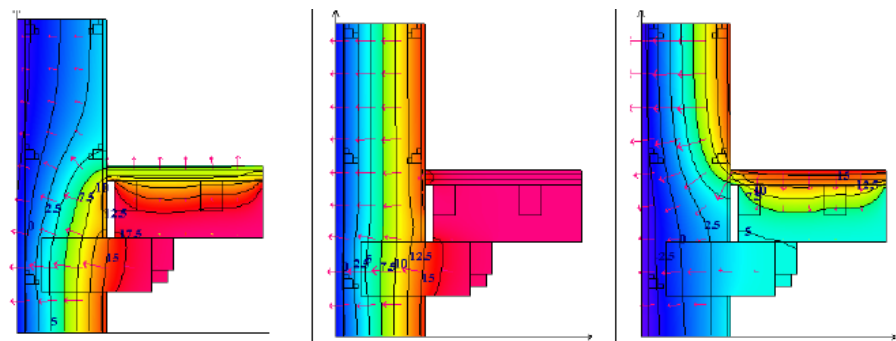
poutre dans le mur  
avec semelle de  
répartition, vide d'air  
communiquant avec  
l'extérieur

double plancher



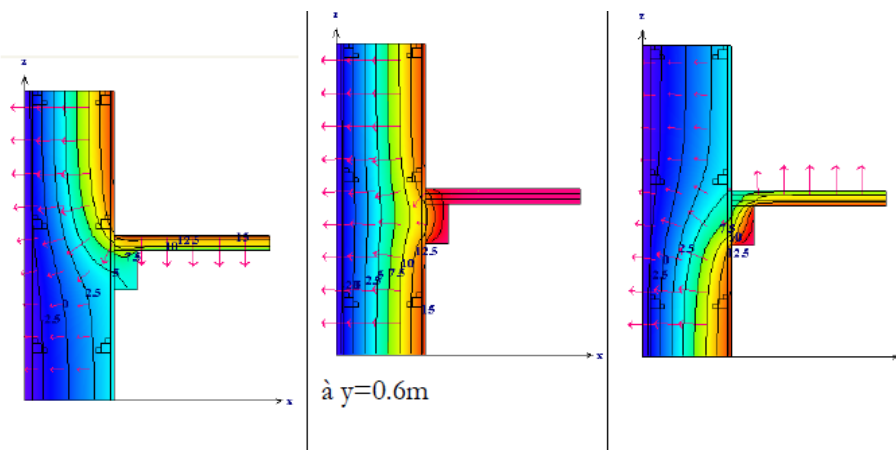
poutre posée sur un  
corbeau de pierre  
calcaire dur inséré dans  
le mur

double plancher

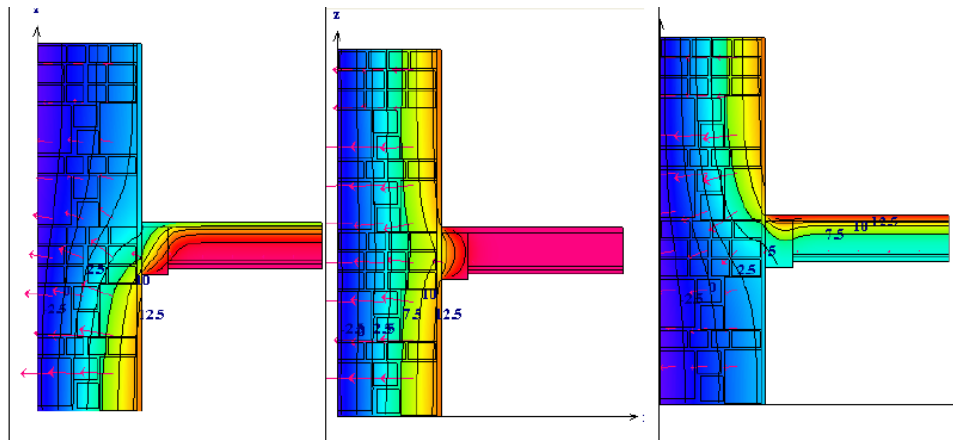


Solives posées sur  
bastaing fixé au mur

double plancher



Plancher simple,  
plafond lattis de plâtre  
Solives posées sur  
bastaing



## 11.5 Guide d'utilisation des modèles BATAN

### 11.5.1 Identification de la typologie

La première étape consiste à identifier l'appartenance du bâtiment à une typologie définie par le projet BATAN. Cette identification se fait à partir des paramètres suivants :

- Implantation
- Mode constructif
- Matériaux

Cette étape fournit une première caractérisation thermique du bâtiment. Le calcul des paramètres précisant l'appartenance effective à une typologie est réalisé avec l'étape suivante.

### 11.5.2 Evaluation des caractéristiques du bâtiment

L'étape suivante consiste à évaluer différentes caractéristiques du bâtiment :

Pour les logements collectifs, 11 paramètres ont été définis pour les périodes hivernale et estivale. Pour les maisons individuelles, 12 paramètres ont été définis pour l'hiver et 11 pour l'été.

Paramètres considérés	Nombre de niveaux	Période hivernale		Période estivale	
		Collectif	Individuel	Collectif	Individuel
Conductivité thermique	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Capacité thermique	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Infiltration	3	✓	✓	✓	✓
Occupation	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Ratio $S_D/V_c$ *	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Coefficient de dispersion*	2 ou 3	✓	✓	✓	✓
Surface vitrée nord	2	✓	✓	✓	✓
Surface vitrée autre que nord	2	✓	✓	✓	✓
Température extérieure*	3	✓	✓	✓	✓
Radiation sur le plan horizontal	3	✓	✓	✓	✓
Etage	3	✓			
Température intérieure	3		✓		
Ventilation nocturne	4			✓	✓
Facteur d'utilisation	3		✓		

\* Deux définitions utilisées pour 3 paramètres

Les plages de variation pour chaque facteur ont été choisies pour représenter au mieux le type de bâtiment considéré, les variations possibles en termes de caractéristiques géométriques et thermo-physiques, ou de conditions aux limites (occupation, climat, situation du logement dans le bâtiment).

- **Conductivité thermique:** conductivité moyenne des parois opaques verticales extérieures (le toit n'est pas compris) [W/(m.°C)].

Pour calculer la conductivité moyenne d'une paroi contenant plusieurs matériaux, la conductivité équivalente à une paroi homogène est déterminée. Par exemple, si la surface déperditive A ( $S_A$ ) est constituée de deux couches, la conductivité équivalente  $\lambda_{eq,A}$  de la surface A est:

$$\lambda_{eq,A} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (e_1 + e_2)}{\lambda_1 \cdot e_2 + \lambda_2 \cdot e_1}$$

Avec  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  les conductivités thermiques des matériaux des couches 1 et 2  
Et  $e_1$  et  $e_2$  les épaisseurs des couches 1 et 2

Et, si la surface déperditive B ( $S_B$ ) a une conductivité équivalente  $\lambda_{eq,B}$ , l'épaisseur et la conductivité équivalentes moyennes des parois A et B sont :

$$e_{moyenne} = \frac{e_A \cdot S_A + e_B \cdot S_B}{S_A + S_B}$$

$$\lambda_{moyenne} = \frac{(S_A + S_B) \cdot e_{moyenne}}{\frac{e_A}{\lambda_{eq,A}} \cdot S_A + \frac{e_B}{\lambda_{eq,B}} \cdot S_B}$$

La conductivité varie selon les plages mises en évidence par la variabilité de la conductivité étudiée dans la tâche 2. Les variations peuvent être attribuées au rôle de l'humidité, à des effets tridimensionnels et à l'hétérogénéité des caractéristiques thermo-physiques des matériaux.

- **Capacité thermique:** c'est la capacité thermique [J/°C] de toutes les parois extérieures et intérieures (cloisons, plafond et plancher bas); il s'agit de donner des valeurs approximatives pour prendre en compte l'inertie du logement (forte, moyenne ou faible).

La capacité thermique C d'une paroi ayant une surface S et contenant n couches est définie comme suit:

$$C = S \cdot \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot c_i \cdot e_i$$

Avec  $\rho_i$  la masse volumique du matériau de la couche i [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_i$  la chaleur thermique massique du matériau de la couche i [J/(kg. °C)]  
et  $e_i$  l'épaisseur de la couche i [m].

Pour les planchers hauts, la capacité de la moitié de l'épaisseur est utilisée ou, s'il y a une couche d'isolant, l'épaisseur sous l'isolant. Pour les planchers bas, c'est le contraire.

- **Infiltration:** Il s'agit de caractériser un débit volumique de l'air par heure et par surface habitable [ $\text{m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ]. La valeur est déterminée selon la plage de variation indiquée. La valeur basse de la plage correspond au minimum d'infiltration et la valeur haute au maximum d'infiltration. La plage de variation concernant les infiltrations a été choisie selon les valeurs de référence des tests de perméabilité.

- **Occupation (gains internes):** il s'agit de caractériser la moyenne des gains internes par surface habitable [ $\text{Wh}/\text{m}^2$ ]. Les gains internes sont fonction du nombre d'occupants et de l'utilisation du logement.

- **Ratio  $S_D/V_{\text{chauffé}}$  \* (2 définitions):** ratio entre la surface déperditive extérieure ( $S_D$ ) et le volume d'air chauffé dans le logement ( $V_{\text{chauffé}}$ ). [ $\text{m}^{-1}$ ]

Le volume chauffé fait référence au volume d'air contenu dans les pièces du logement, sans tenir compte des balcons, caves et garages.

Dans le cas des logements collectifs, la surface déperditive est celle des parois verticales.

Dans le cas des maisons individuelles, cette surface compte également la toiture.

- **Coefficient de dispersion absolu  $\Sigma(S_D \cdot U)$  \* (2 définitions):** somme, pour chaque surface donnant sur l'extérieur, du produit de la surface (opaque ou transparente) et du coefficient de transmission surfacique  $U$ . [ $\text{W}/^\circ\text{C}$ ]

Dans le cas des logements collectifs, la surface est celle des parois verticales. Dans le cas des maisons individuelles, cette surface compte également la toiture.

- **Surface vitrée nord:** surfaces vitrées donnant au Nord (NE, N, NO) [ $\text{m}^2$ ].

- **Surface vitrée autre que nord:** surface vitrée totale moins les surfaces vitrées orientées au Nord [ $\text{m}^2$ ].

- **Température extérieure \* (2 définitions) :** il s'agit du nombre de degrés jours unifiés (DJU) pour la période hivernale, ou du nombre de degrés heures de refroidissement pour la période estivale, la base étant de  $27^\circ\text{C}$  pour la période du 1 juin au 30 septembre.

- **Radiation sur le plan horizontal:** il s'agit de la radiation globale sur le plan horizontal pour la période considérée [ $\text{J}/\text{m}^2$ ].

- **Etage:** ce paramètre représente les conditions aux limites. Trois niveaux sont considérés donnant une valeur de 1 à 3 à ce paramètre:

- 1 : Dernier étage
- 2 : Rez-de-chaussée
- 3 : Etage intermédiaire

- **Température interne moyenne:** température moyenne dans les pièces de la maison pendant la période considérée [ $^\circ\text{C}$ ].

- **Ventilation nocturne** : selon le scénario de ventilation nocturne, la valeur de ce paramètre varie de 0 à 3 :
  - 0 : il n'y a pas de ventilation nocturne
  - 1 : il y a une ventilation nocturne uniquement les premières heures de la nuit (jusqu'à minuit)
  - 2 : les pièces les plus chaudes dans la journée ont des fenêtres ouvertes pendant toute la nuit
  - 3 : il y a une ventilation nocturne intensive.
- **Facteur d'utilisation volumique**: rapport entre volume de l'air contenu dans les pièces effectivement chauffées et le volume d'air contenu dans toutes les pièces de la maison [-].

Les plages de variation des paramètres thermo-géométriques comme le coefficient de transmission absolue, les grandeurs géométriques comme le ratio  $S/V$  et les surfaces vitrées sont calculés à partir de la géométrie du logement.

---

#### 11.5.3 Validation des données recueillies

La troisième étape consiste à vérifier la validité d'utilisation des modèles BATAN. Les plages de variation des paramètres fournissent le domaine d'application des modèles. En effet, des valeurs en dehors de ces plages montrent que le bâtiment n'appartient pas à la typologie modélisée par le projet BATAN.

---

#### 11.5.4 Saisie des données

Le cadre de saisie est différent pour l'estimation des besoins de chauffage (hiver) et l'estimation de l'inconfort estivale (été). Deux parties séparent la saisie des paramètres, donnant le besoin de chauffage et le nombre d'heures d'inconfort estival.

## 11.6 Cahier des charges du modèle BATAN

### Sommaire

1	Rappel des objectifs de la tâche 3.....	92
2	Elaboration du cahier des charges du modèle BATAN.....	93
2.1	Objectifs du modèle BATAN.....	93
2.2	L'architecture du modèle BATAN.....	93
2.2.1	Les données d'entrée pour BATAN.....	94
2.2.2	Les données de sortie de BATAN.....	95
3	Présentation de la méthodologie.....	96
3.1	Modélisation thermique des parois hétérogènes.....	96
3.1.1	Présentation de la modélisation numérique dans Heat 3.....	97
3.1.2	Entrées/Sorties du logiciel Heat3.....	97
3.2	Modélisation thermo-aéraulique du bâti ancien.....	98
3.2.1	Modélisation thermique dans TRNSYS.....	99
3.2.2	Modélisation des échanges aérauliques dans TRNSYS-COMIS.....	100
3.2.3	Les données d'entrée de TRNSYS-COMIS.....	101
3.2.4	Les données de sortie de TRNSYS-COMIS.....	102
3.3	Modélisation par les plans d'expériences numériques.....	104
4	Planning des travaux de la tâche 3.....	105

## 1 RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA TACHE 3

La tâche 3 du projet a pour objectif de développer un nouveau modèle de calcul adapté au bâti ancien. Ce modèle de calcul « BATAN » doit permettre une évaluation globale du comportement thermique du bâti ancien tout en prenant en compte les modes constructifs anciens et intégrant l'ensemble des spécificités du bâti ancien. Il s'agit de produire un code de calcul adapté au comportement thermique spécifique du bâti ancien. Le code de calcul doit intégrer les entrées de l'étude typologique de la tâche 1, et converger vers le comportement réel des logements étudiés lors de la tâche 2. L'utilisation du code de calcul permettra d'identifier et d'analyser les écarts entre le modèle créé et la méthode de calcul réglementaire.

Cette tâche comporte 4 étapes qui suivent un procédé itératif par confrontation, à chaque étape, avec l'étude du comportement réel. Les étapes sont les suivantes :

5. Elaboration du cahier des charges du modèle
6. Formalisation du modèle
7. Simulation sur le panel de bâtiments restreint
8. Confrontation des résultats et analyse de la convergence du modèle

La figure 1 illustre le déroulement des différentes étapes ainsi que les interactions avec les autres tâches.

Ce rapport concerne l'élaboration du cahier des charges du modèle.

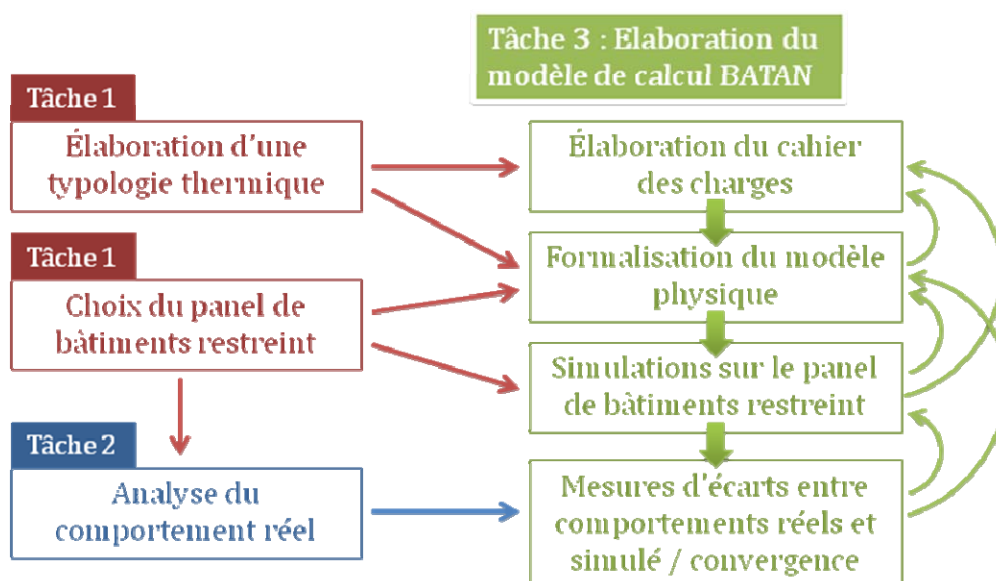


Figure 1 – Le déroulement de la tâche 3.



## 2 ELABORATION DU CAHIER DES CHARGES DU MODELE BATAN

Ce projet s'inscrivant dans la continuité de l'étude menée par le CETE Est et le LASH-DGCB portant sur la connaissance du comportement thermique du bâtiment ancien.

Cette étude a permis d'identifier les éléments qui contribuent à la spécificité du comportement thermique du bâti ancien. Elle a proposé un certain nombre de recommandations sur la modélisation de ce comportement. Parmi ces recommandations s'imposent essentiellement la nécessité de caractériser d'une façon optimisée l'enveloppe du bâti ancien composé souvent d'un assemblage tridimensionnel de plusieurs matériaux hétérogènes dont les propriétés dépendent des conditions hygrothermiques. La mise en œuvre de ces matériaux nécessitent d'accorder une attention particulière au phénomène d'inertie thermique et aux ponts thermiques. L'organisation des espaces intérieurs permet aussi d'identifier un zonage thermique avec des espaces tampons comme les serres thermiques. Un dernier point particulièrement important et délicat est le renouvellement d'air dans le bâti ancien assuré par une ventilation naturelle par ouverture des fenêtres et à travers les défauts d'étanchéité de la façade.

### 2.1 Objectifs du modèle BATAN

Les différents points abordés ci-avant permettent de préciser les objectifs vers lesquels doit s'orienter le travail de modélisation. Les objectifs du modèle BATAN peuvent être formalisés de la façon suivante :

- Une prise en compte des modes constructifs anciens à travers la typologie thermique proposée par la tâche 1. Cette typologie permet de définir les entrées du modèle.
- Une intégration de l'ensemble des spécificités du bâti ancien notamment l'hétérogénéité tridimensionnelle des parois, l'inertie thermique, le zonage thermique et la ventilation naturelle.
- Une évaluation globale du comportement thermique définissant les sorties du modèle (besoin de chauffage en hiver et confort thermique en été).

### 2.2 L'architecture du modèle BATAN

Pour décrire l'architecture du modèle BATAN, il faut d'abord préciser l'approche méthodologique retenue pour la construction du modèle qui doit se rapprocher au mieux de la réalité du comportement hygrothermique du bâti ancien. Le modèle doit être capable de prendre en compte les particularités de l'enveloppe du bâti ancien, le zonage thermique, l'inertie thermique, et la ventilation naturelle.

Le choix d'une modélisation thermo-aéraulique dynamique et multizonale s'impose pour l'élaboration de ce modèle afin de prendre en compte les différents phénomènes décrit ci-avant.

La littérature propose un grand nombre d'outils qui permettent une modélisation dynamique du comportement thermo-aéraulique du bâtiment. Il s'agit de choisir parmi ces outils lesquels correspondent au contexte du bâti ancien et de les combiner afin de parvenir à satisfaire les objectifs du modèle BATAN. Le choix des outils permet d'explicitier l'architecture du modèle et de préciser les différentes entrées du modèle (voir figure 3.2).

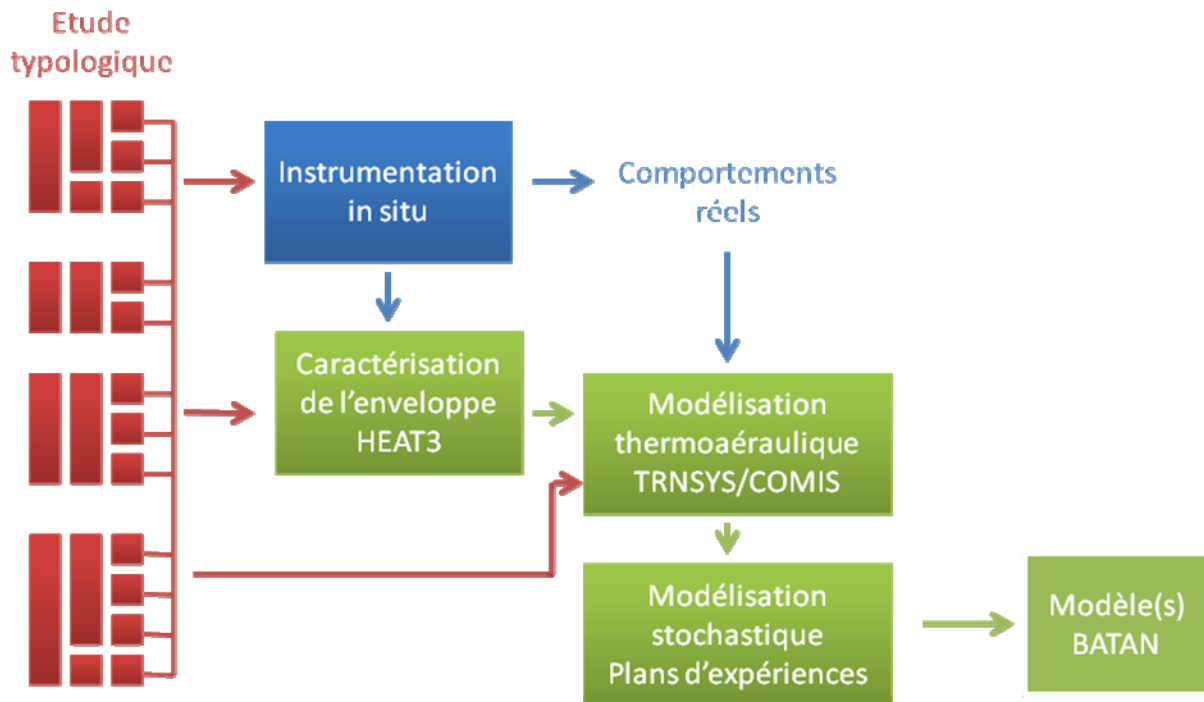


Figure 2 – Présentation de la méthodologie adoptée pour développer le modèle BATAN.

D'une part, la détermination des caractéristiques thermiques des parois multicouches et hétérogènes nécessite l'utilisation d'un outil de calcul pour les coefficients de transmission à travers les parois et les liaisons entre les parois. L'outil Heat3 a été retenu pour cette tâche. Il permet de modéliser les flux conductifs 3D en régime variable et permanent.

D'autre part, la modélisation dynamique du comportement thermo-aéraulique du bâti ancien sera assurée en couplant l'outil de simulation thermique TRNSYS avec l'outil de simulation aéraulique COMIS. L'utilisation de TRNSYS avec COMIS présente un environnement de modélisation dynamique et flexible prenant en compte les différents phénomènes thermo-aérauliques dans un bâtiment multizonal avec la possibilité de modéliser un très grand nombre de dispositifs thermiques et climatiques grâce à la bibliothèque enrichie dont dispose TRNSYS.

Pour chaque type de bâtiment retenu dans l'étude typologique, un modèle thermo-aéraulique sera créé dans TRNSYS en utilisant le panel de bâtiments restreint. Chaque modèle sera calibré par confrontation avec le comportement réel observé sur le panel instrumenté. Les modèles construits peuvent ensuite être analysés par la méthode des plans d'expériences. Cette méthode mathématique permet de mener une analyse paramétrique pour déterminer l'importance relative de chaque élément du bâtiment ainsi que les interactions qui peuvent exister entre ces éléments sur les réponses observées (besoin énergétique ou confort thermique). Ils permettent aussi de développer des modèles mathématiques mettant en relation la réponse observée avec un certain nombre de facteurs considérés dans l'étude paramétrique. Cette étape permet notamment de décider s'il est nécessaire de développer un seul modèle mathématique ou plusieurs par type de bâtiments.

### 2.2.1 Les données d'entrée pour BATAN

Les entrées du modèle BATAN sont notamment les variables qui ont été utilisées pour construire l'étude typologique de la tâche 1. Cinq sous-systèmes ont été identifiés, parmi lesquels trois ont été

retenus pour l'étude typologique (cf. tâche 1). Pour chaque sous-système, nous pouvons identifier ensuite la liste des variables d'entrée nécessaires pour construire les modèles thermo-aérauliques dans les outils de simulations indiqués ci-avant. Les sous-systèmes retenus sont les suivants :

- Environnement/implantation
- Enveloppe
- Modes constructifs

Les variables d'entrée ne sont pas les mêmes selon l'étape du travail. Pour la modélisation dans TRNSYS, ce sont les variables nécessaires pour la construction du modèle dans TRNSYS et COMIS. Ces variables sont précisées ci-après.

Pour les plans d'expériences, les variables d'entrée sont les facteurs influençant le comportement thermique du bâtiment (implantation du bâtiment, éléments du bâtiment : fenêtre, murs opaques, toiture, ventilation, inertie). Ces variables sont les variables d'entrée du modèle BATAN qui permettent de calculer le comportement de chaque bâtiment de la typologie thermique moyennant les fonctions mathématiques.

Ces données sont présentées plus loin dans le document.

---

### 2.2.2 Les données de sortie de BATAN

Les sorties du modèle BATAN sont les performances thermiques et énergétiques du bâtiment. En hiver, le comportement thermique du bâtiment est caractérisé par les besoins et les consommations du chauffage. En été, le comportement thermique est caractérisé par le niveau du confort thermique. Les variables de sortie caractérisant le comportement thermique des bâtiments sont les mêmes pour la modélisation dans TRNSYS et pour les plans d'expériences :

- **Le besoin de chauffage** pour caractériser la performance thermique en hiver,
- Le confort thermique en été. L'indicateur retenu pour mesurer le confort thermique est **le nombre d'heures pendant lesquelles la température est en dehors de la zone de confort** définie la norme NF ISO EN 15251.

### 3 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE

Le travail de modélisation s'effectue en deux étapes.

Dans une première étape, le panel de bâtiments restreint est modélisé dans l'outil de simulations dynamiques TRNSYS couplé avec COMIS. Cette modélisation permet de développer un modèle dynamique thermo-aéraulique pour chaque bâtiment de la typologie thermique. Ces modèles seront validés par les résultats de la campagne de mesures. Cette étape est accompagnée d'une modélisation dans l'outil de simulation Heat 3 pour calculer les caractéristiques des éléments hétérogènes de l'enveloppe des bâtis anciens. Ces données sont nécessaires pour la modélisation dans TRNSYS.

La deuxième étape consiste à exploiter les modèles TRNSYS de chaque catégorie moyennant la méthode des plans d'expériences. La méthode des plans d'expériences permet d'abord d'identifier les facteurs influants sur le comportement thermique du bâtiment, puis de proposer un modèle mathématique qui exprime le comportement thermique du bâtiment en fonction des facteurs influents. Différents modèles mathématiques seront ainsi proposés pour les différentes catégories de la typologie thermique.

Nous décrivons ci-après les différents outils utilisés pour l'élaboration du modèle BATAN.

#### 3.1 Modélisation thermique des parois hétérogènes

La modélisation dynamique du comportement thermique et énergétique des bâtiments nécessite la connaissance des caractéristiques thermiques des différents éléments constituant l'enveloppe du bâtiment. La plupart des outils de calcul thermique du bâtiment considère uniquement la conduction unidirectionnelle à travers les parois.

Les règles de calcul Th-U de la réglementation thermique permettent de déterminer les caractéristiques thermiques unidirectionnelles des parois en régime stationnaire (coefficients de transmission surfacique et linéique). Les valeurs fournies dans les catalogues s'appliquent uniquement aux parois courantes rencontrées dans les bâtiments récents.

Dans le cas du bâti ancien, les parois sont souvent hétérogènes dans 2 ou 3 directions de l'espace. Elles sont composées d'un assemblage de différents matériaux et comportent des jonctions entre plusieurs éléments de différente nature. Il est ainsi difficile de distinguer, dans certains cas, entre partie(s) courante(s) et ponts thermiques intégrés.

Pour déterminer les caractéristiques thermiques de ces parois, il faut utiliser une méthode numérique permettant de modéliser les transferts thermiques tridimensionnels à travers la paroi entière ou bien un ou plusieurs éléments répétitifs de la paroi.

Le caractère tridimensionnel des parois hétérogènes nous conduit ainsi à une modélisation des transferts thermiques tridimensionnels avec le logiciel de calcul Heat 3 (version 3.5). Ce calcul doit être effectué conformément à la norme européenne NF EN ISO 10211.

Le calcul dans Heat 3 prend en compte les échanges de chaleur en régime permanent et dynamique. Le calcul en régime dynamique permet de caractériser l'inertie thermique des parois qui joue un rôle important dans le comportement thermique du bâti ancien.

Les transferts de masse à travers la paroi (l'humidité) ne sont pas pris en compte dans Heat3, ni le couplage entre les transferts de masse et de chaleur à l'intérieur de la paroi. Le comportement hygroscopique des parois sera pris en compte dans la modélisation thermique du bâtiment dans le logiciel TRNSYS à travers la capacité d'absorption et de désorption des parois.

---

### 3.1.1 Présentation de la modélisation numérique dans Heat 3

Le logiciel Heat 3 est conçu pour résoudre les problèmes de conduction thermique en trois dimensions, aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent. Il se base sur la méthode de calcul aux éléments finis pour résoudre l'équation de la chaleur.

L'outil de calcul Heat 3 est utilisé pour déterminer les caractéristiques thermiques des parois hétérogènes en régime dynamique, notamment la résistance thermique et l'inertie thermique. Il sera aussi utilisé pour l'analyse de ponts thermiques, de flux thermiques à travers les angles d'une menuiserie, et les pertes de chaleur d'un plancher vers le sol. Ces données sont indispensables pour la modélisation des parois hétérogènes rencontrées dans le panel de bâtiments restreint. Elles sont nécessaires pour les données d'entrée du modèle.

La modélisation dans Heat 3 s'effectue en 3 étapes. D'abord, la géométrie du problème (paroi hétérogène ou jonction entre 2 ou plusieurs parois) est définie, les matériaux composant chaque élément de cette géométrie, puis les conditions aux limites spécifiques à la situation étudiée constituent les étapes suivantes. Pour définir les conditions climatiques, il est possible d'importer différents formats de données climatiques (TRNSYS, METEONORM, HELIOS, SUNCODE, MATCH) pour réaliser des simulations dynamiques.

---

### 3.1.2 Entrées/Sorties du logiciel Heat3

---

#### 3.1.2.1 DESCRIPTION GEOMETRIQUE ET MAILLAGE DU MODELE

Pour décrire la géométrie du problème, il est nécessaire de connaître avec précision les assemblages et les dimensions des différents éléments composant la paroi. Les données décrivant la géométrie des parois hétérogènes et des assemblages sont prélevées lors des visites ou à partir des plans et des coupes quand elles sont disponibles. Elles seront complétées par les informations disponibles dans la littérature sur les types constructifs concernés.

---

#### 3.1.2.2 DESCRIPTION DES MATERIAUX

Les matériaux sont caractérisés par les propriétés thermophysiques suivantes : la conductivité thermique  $\lambda$  (W/mK), la masse volumique  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), et la capacité thermique massique en  $c_p$  (J/kg.K).

Ces trois grandeurs peuvent être déterminées en première approche à partir du catalogue des matériaux de la réglementation thermique. La valeur de la conductivité thermique  $\lambda$  sera validée par comparaison avec la valeur calculée expérimentalement à partir des mesures réalisées in situ (le calcul expérimental de la valeur de  $\lambda$  est pris en compte dans le cadre des travaux de la tâche 2).

### 3.1.2.3 CONDITIONS AUX LIMITES

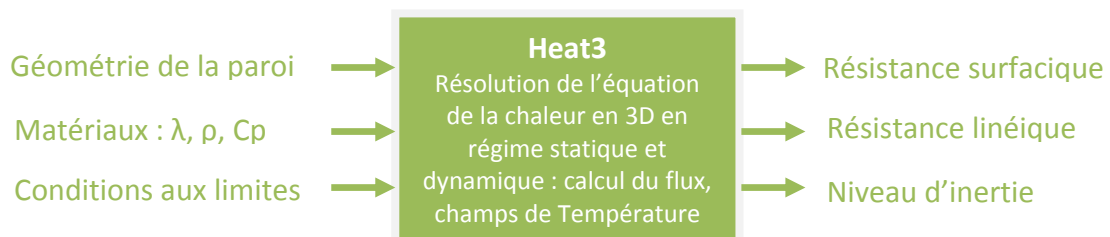
HEAT3 propose différentes options pour caractériser les conditions aux limites : On peut spécifier soit un flux de chaleur, soit une température avec une résistance de surface. En régime transitoire, les températures et les flux de chaleur peuvent varier selon différentes fonctions : sinusoïdale, en escalier avec un pas constant ou de façon linéaire (les données peuvent être importées depuis un fichier type Excel ou depuis un fichier de données climatiques issu d'un logiciel comme TRNSYS).

### 3.1.2.4 SORTIES DE HEAT 3

Les résultats des simulations dans Heat3 sont les flux thermiques sur des surfaces sélectionnées, le flux thermique ou bien la température en un ou plusieurs points dont on a renseigné les coordonnées. Ces informations permettent de calculer les coefficients de transmission surfaciques et linéiques.

La connaissance du flux de chaleur à travers la paroi hétérogène permet de calculer sa résistance thermique et la transmission linéique des ponts thermiques. L'inertie thermique est caractérisée à travers l'amortissement et le déphasage du flux transmis à partir de la surface extérieure de la paroi soumise à une onde thermique sinusoïdale vers la surface intérieure.

La figure suivante présente les entrées et les sorties de calcul d'une paroi hétérogène dans Heat3.



*Fig.3 : Modélisation thermique des parois hétérogènes dans Heat3.*

## 3.2 Modélisation thermo-aéraulique du bâti ancien

La première tâche du projet a permis d'identifier une typologie thermique des bâtiments anciens selon laquelle les bâtiments sont classés en 14 catégories. Un panel de bâtiments restreint a été construit à partir de cette typologie. Ce panel est composé de 14 bâtiments qui représentent les différentes catégories identifiées.

L'objectif de cette partie du travail est de fournir un modèle thermo-aéraulique et dynamique de chaque catégorie de la typologie thermique représentée par le panel restreint. Pour cela, chaque bâtiment du panel sera modélisé dans l'outil de simulation thermique TRNSYS en le couplant avec l'outil de calcul aéraulique COMIS. Les modèles développés dans TRNSYS-COMIS seront calés et validés par rapport aux résultats des mesures de la campagne d'instrumentations de la tâche 2 du projet.

### 3.2.1 Modélisation thermique dans TRNSYS

Le comportement thermique du bâtiment ancien est complexe du fait des transferts thermiques, hygroscopiques et aérauliques se produisant simultanément et de la variation des conditions le sollicitant (conditions climatiques).

Le choix de l'outil TRNSYS comme environnement de modélisation est justifié par sa capacité à répondre aux différentes contraintes liées à la modélisation du comportement thermique et énergétique du bâti ancien.

En effet, TRNSYS est un outil de simulation dynamique utilisant une approche modulaire et doté d'une bibliothèque qui intègre une cinquantaine de familles de composants représentant le bâtiment (mono ou multi zones via le type 56), les équipements (chauffage, climatisation, ...), les données météorologiques, les régulateurs, etc.

La modélisation dans TRNSYS consiste à faire un assemblage entre les différents composants permettant de décrire l'environnement complet du bâtiment ou le système étudié. En couplant les modules respectifs aux données météorologiques, masques solaires, bâtiment multizonal, systèmes de chauffage et de ventilation... TRNSYS permet :

- Prise en compte des sollicitations de l'environnement externe selon un **fichier météorologique annuel avec un pas de temps horaire** incluant les données locales sur le rayonnement solaire, la température, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent,
- Modélisation des **masques solaires lointains et proches** relatifs à l'implantation du bâtiment dans son environnement,
- **Modélisation multizonale** du bâtiment correspondant au **zonage thermique** via le type 56 de TRNSYS,
- **Modélisation en régime transitoire des phénomènes de transfert thermique** au sein de l'enveloppe et entre les zones, permettant de prendre en compte d'une façon précise **l'inertie thermique** de chaque zone du bâtiment,
- **Modélisation en régime transitoire des échanges hygroscopiques** dans chaque zone incluant **la capacité d'absorption et de désorption** des parois de la zone,
- **Modélisation en régime transitoire des échanges aérauliques** avec l'extérieur (infiltration et ventilation naturelle) ainsi qu'entre les différentes zones moyennant le code de calcul COMIS (présenté dans le paragraphe suivant),
- Prise en compte du **comportement quotidien, hebdomadaire et saisonnier** avec des **scénarios d'occupation et d'usage** prédéfinis,
- **Simulation dynamique du comportement thermique et énergétique du bâtiment** et des systèmes de chauffage et de climatisation permettant une suivie, heure par heure, des **températures intérieures** et des **consommations énergétiques annuelles** des équipements du bâtiment.

La modélisation dans TRNSYS nécessite de connaître d'une façon précise l'environnement externe (données météo), l'implantation (masques solaires et orientations), et les caractéristiques géométriques et physiques du bâtiment (enveloppe, équipements, occupation). La liste des données d'entrée nécessaires pour la modélisation dans TRNSYS est indiquée dans le paragraphe 3.2.3.

TRNSYS peut fournir en sortie un grand nombre de variables, en particulier les températures et les humidités relatives dans les différentes zones ainsi que les besoins de chauffage.

### 3.2.2 Modélisation des échanges aérauliques dans TRNSYS-COMIS

Les échanges aérauliques influencent le comportement thermique du bâtiment. Dans le cas du bâti ancien, ces échanges s'effectuent essentiellement à travers les infiltrations par l'enveloppe et la ventilation naturelle par les ouvrants ou les conduits, en absence des systèmes mécaniques de ventilation.

Les débits d'air entrant dans le bâti ancien dépendent ainsi des conditions météorologiques sur le site (température et action du vent), des caractéristiques de l'enveloppe (perméabilité, ouvrants) et du système de ventilation naturelle (entrées d'air, sorties, conduits). Ces débits d'air sont déterminants pour le niveau de consommation et de confort dans le bâtiment. Ils doivent être déterminés, à chaque pas de temps, pour avoir une meilleure approximation du comportement thermique et énergétique du bâti ancien.

La modélisation des changements aérauliques dans TRNSYS est effectuée avec un composant qui utilise le code de calcul de l'outil COMIS basée sur l'approche nodale. Ce composant permet de calculer les débits d'air transitant entre les zones et en provenance de l'extérieur (par infiltration ou par ventilation naturelle).

L'approche nodale ou zonale de COMIS permet de simplifier les modèles à des fins de rapidité de calcul. Le bâtiment est ainsi représenté par un ensemble de nœuds représentant des pièces ou un groupement de pièces qui communiquent par des liens avec l'extérieur et avec l'intérieur (échanges entre pièces).

Le calcul des échanges aérauliques s'effectue de la façon suivante :

- Création d'un modèle aéraulique dans COMIS correspondant au zonage thermique du bâtiment en affectant un nœud à chaque zone du bâtiment. Des nœuds sont aussi créés pour représenter l'environnement extérieur.
- Définition des liens aérauliques reliant les différents nœuds : les ouvertures, les portes, les fissures ou les composants de ventilation (entrées d'air, sorties, conduits, et ventilateurs). Les transferts aérauliques à travers les liens sont régis par des lois de puissance donnant le débit d'air en fonction de la différence de pression.
- Le module aéraulique est ensuite couplé dans TRNSYS (via le type 157 qui utilise COMIS) avec le type 56 qui fait la modélisation multizonale thermique du bâtiment : le type 56 calcule les températures d'air dans chaque zone et les envoie à COMIS qui calcule à son tour les débits d'air correspondants et les renvoie au type 56, et vice versa.

Les données nécessaires pour la création du modèle aéraulique sont la volumétrie, les coefficients de pression et les coefficients  $c$  et  $n$  décrivant le comportement de chaque lien aéraulique. Pour l'enveloppe, ces deux coefficients sont déterminés à partir des résultats de mesures de perméabilité prévues dans la tâche 2.



### 3.2.3 Les données d'entrée de TRNSYS-COMIS

La création des modèles thermo-aérauliques dans TRNSYS et COMIS nécessitent un grand nombre de données d'entrée. Ces données peuvent être classées en deux catégories :

- les données descriptives nécessaires pour la construction des modèles pour chaque bâtiment du panel restreint,
- les données de mesures nécessaires pour le calibrage et la validation des modèles développés.

#### 3.2.3.1 LES DONNEES DESCRIPTIVES DU BATIMENT

Ces données permettent de saisir le bâtiment dans TRNSYS. Elles concernent :

- l'implantation du bâtiment (site, orientations et masques),
- le zonage thermique (organisation des espaces internes, type d'usages et volumétrie)
- description des parois verticales et horizontales des différentes zones (composition et épaisseur)
- description des fenêtres et des portes fenêtres (type et épaisseur du vitrage, menuiserie, protection solaire interne et externe)
- description du système de ventilation (type de ventilation, position et dimensions des entrées et des sorties d'air)
- description du système de chauffage (espaces chauffés, type des émetteurs, consignes et régulation)
- description des gains internes (nombre d'occupants, les puissances des équipements et de l'éclairage, et le profil de l'occupation).

Les données nécessaires pour COMIS sont :

- Le zonage et la volumétrie
- Le coefficient de pression au vent de chaque façade
- Les coefficients c et n de chaque ouverture (les coefficients décrivant les défauts d'étanchéité sont déterminées à partir de la mesure de la perméabilité)
- La longueur et le diamètre des différents conduits d'aération (cheminée)

#### 3.2.3.2 LES DONNEES DE MESURES

Ces données sont utilisées pour le calibrage et la validation du modèle construit dans TRNSYS. Les données de mesures sont les suivantes :

- les données climatiques (Température et humidité relative d'air, vitesse et direction du vent, rayonnement global horizontal et vertical sud)
- la perméabilité de la façade
- les températures et humidités relatives dans les différentes zones
- les besoins de chauffage

### 3.2.4 Les données de sortie de TRNSYS-COMIS

Les modèles construits dans TRNSYS pour chaque catégorie de la typologie thermique peuvent être utilisés pour simuler les comportements thermiques et énergétiques sur une année.

TRNSYS peut fournir en sortie les températures d'air et l'humidité relative dans chaque zone et le besoin de chauffage annuel à chaque pas de temps de la simulation (un pas de temps horaire). Le modèle détermine pour chaque bâtiment :

- Les besoins de chauffage sur un an avec un pas temps horaire
- Le confort d'été à travers le nombre d'heures pendant lesquelles la température d'air dépasse la zone de confort (définie conformément à la norme NF EN ISO 15251).

Il sera aussi possible d'avoir l'évolution des températures intérieures sur la journée chaude de référence afin de calculer la température Tic utilisée par la RT pour caractériser le confort d'été.

Les besoins de chauffage et la température Tic calculés avec le modèle seront comparés avec ceux déterminés par la méthode réglementaire afin d'identifier les limites de cette dernière et de quantifier l'impact des modifications à apporter utilisés dans les dispositifs réglementaires.

La figure suivante illustre la méthodologie du travail ainsi que les liens entre les tâches du projet. A partir du panel de bâtiments restreint représentatif des différentes catégories de la typologie thermique, un modèle thermo-aéraulique est créé pour chaque bâtiment du panel dans TRNSYS à partir des données d'instrumentation de la tâche 2. Les modèles sont validés ensuite par rapport aux résultats des mesures de la tâche 2.

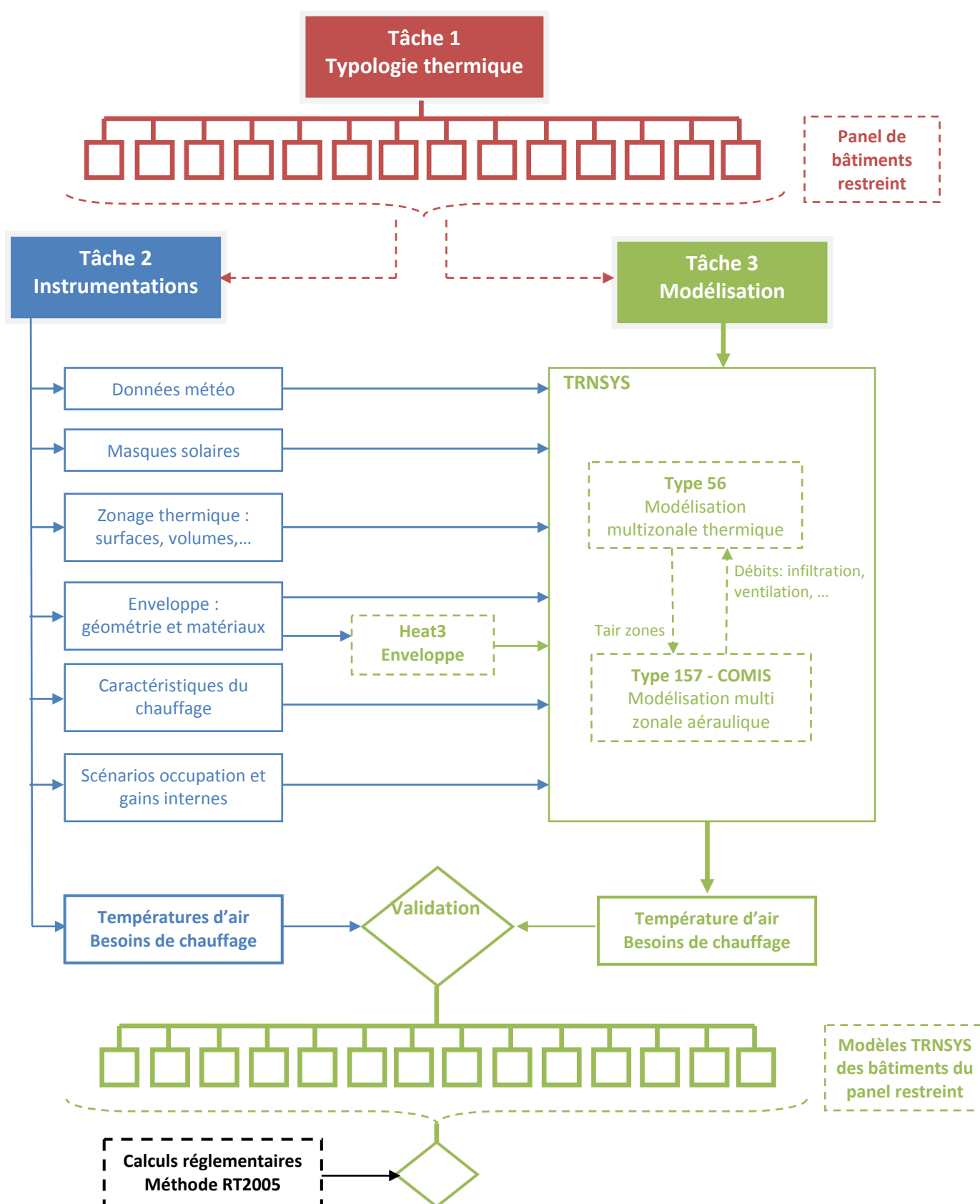


Figure 4 : Elaboration des modèles TRNSYS pour le panel de bâtiments restreints

### 3.3 Modélisation par les plans d'expériences numériques

Le projet BATAN vise à créer un modèle qui s'applique sur l'ensemble des bâtis anciens. Dans la deuxième partie de la tâche 3, le travail consiste à exploiter les modèles TRNSYS créés pour les différentes catégories du panel restreint afin d'arriver à un modèle global qui sera le modèle BATAN.

Le comportement thermique d'un bâtiment dépend d'un grand nombre de facteurs. La particularité du bâti ancien fait que certains facteurs comme l'implantation, les infiltrations, l'inertie,... aient un rôle important dans la détermination du comportement thermique du bâti. L'influence de ces facteurs est incertaine ou mal quantifiée, et n'est pas souvent bien prise en compte dans les méthodes de calcul réglementaires.

La modélisation dans TRNSYS fournit un ensemble de modèles déterministes représentant chacun le comportement thermique exact du bâtiment respectif du panel restreint, en prenant en compte d'une façon dynamique l'impact de l'ensemble des facteurs contribuant au comportement thermique du bâtiment. Chaque modèle est spécifique au bâtiment étudié dans le panel, et les simulations faites avec ce modèle prévoient le comportement du bâtiment en question.

Pour passer des modèles spécifiques à un modèle global du bâti ancien, nous appliquons la méthode des plans d'expériences numériques qui a l'avantage de prendre en compte, dans la modélisation, l'incertitude des facteurs et de leur influence sur le comportement du bâti ancien. Cette méthode permet d'élaborer un modèle qui quantifie l'influence des différents facteurs incertains, quantitatifs et qualitatifs.

La méthode de plans d'expériences numériques consiste à étudier un système (le bâti ancien) caractérisé par les grandeurs à observer qui sont les réponses du système. Les variables ayant une influence sur les réponses du système sont appelées les facteurs. Le système est étudié comme une boîte noire, la méthode détermine d'une façon expérimentale le modèle empirique exprimant la relation entre chacune des réponses et les différents facteurs étudiés.

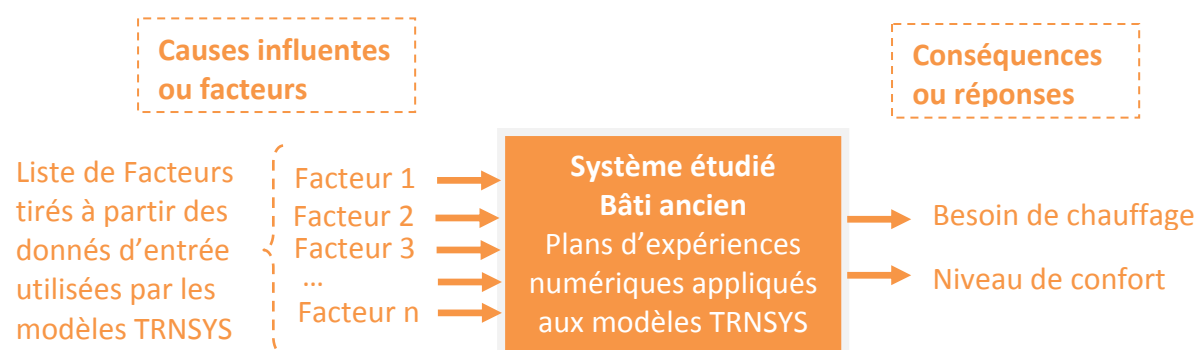


Fig.5 : Modélisation par les plans d'expériences numériques.

Nous appliquons la méthode de plans d'expériences numériques pour planifier et exploiter les résultats des simulations obtenues à partir des modèles TRNSYS, de type déterministe :

- Les réponses étudiées sont le besoin de chauffage et le niveau de confort d'été,
- Les facteurs sont déterminés à partir de l'ensemble des variables d'entrée utilisées par les modèles TRNSYS en les triant et les hiérarchisant (implantation du bâtiment, éléments du bâtiment : fenêtre, murs opaques, toiture, ventilation, inertie).

Les plans d'expériences permettent ensuite d'élaborer, à partir d'un nombre relativement faible de résultats, les modèles mathématiques de la performance thermique en fonction des facteurs dominants. Ces modèles empiriques servent à étudier le comportement du système dans l'ensemble du domaine d'étude, à mettre en évidence les variables les plus influentes et à identifier des optimum afin d'arriver à un modèle global pour le bâti ancien.

#### 4 PLANNING DES TRAVAUX DE LA TACHE 3

La modélisation du panel de bâtiments restreint débutera à partir de début janvier 2009. Ce travail sera effectué à partir des données récoltées sur les différents bâtiments lors des premières visites d'inspection et d'instrumentation de la tâche 2. Les modèles construits dans TRNSYS seront ensuite calés à partir des premiers résultats de mesures au mois de juillet qui couvrent une partie de la saison de chauffe (hiver) ainsi qu'une partie de fonctionnement en régime libre (printemps/été). Cela permet de valider les modèles TRNSYS pour les saisons froides et chaudes.

La modélisation avec la méthode des plans d'expérience pourra commencer à partir du mois de septembre 2009, et sera confrontée avec le reste des données de mesures au fur et à mesure de l'avancement de la tâche 2. Cela permettra de disposer à la fin de la tâche 2 une première version opérationnelle du modèle BATAN qui pourra être ajusté en fonction de l'ensemble des mesures réalisées sur tous les bâtiments.