

LIVRABLE PUBLIC N°2

# MÉTHODOLOGIE SCIENTIFIQUE DE LA MESURE DE LA PERFORMANCE DE L'ISOLATION DE L'ENVELOPPE DES MAISONS NEUVES ET RÉNOVÉES

DÉCEMBRE 2021



Avec le programme PROFEEL, la filière Bâtiment s'est rassemblée pour répondre collectivement aux défis de la rénovation énergétique. 16 organisations professionnelles ont été à l'initiative de cette démarche et continuent aujourd'hui à la porter activement.

PROFEEL se compose concrètement de 9 projets, positionnés sur trois grands enjeux : favoriser le déclenchement des travaux de rénovation, garantir la qualité des travaux réalisés et consolider la relation de confiance entre les professionnels. Ces projets s'appuient sur l'innovation, qu'elle soit technique ou numérique, afin de mieux outiller les professionnels du bâtiment, d'améliorer les pratiques sur le marché de la rénovation énergétique et de garantir la qualité des travaux réalisés. Ces outils permettront d'accompagner les acteurs durant toutes les étapes d'un projet de rénovation : en amont, pendant et après les travaux.

SEREINE, un des 9 projets PROFEEL, a pour objectif d'apporter une meilleure évaluation de la performance énergétique des logements au service d'une massification de la rénovation énergétique.

Un programme de recherche scientifique et opérationnelle, ayant réuni 40 chercheurs et ingénieurs issus de 8 organismes publics et privés, a permis la création d'un nouvel outil de mesure qui permet aujourd'hui de caractériser les performances énergétiques des maisons individuelles en 24 à 48 heures. Ensemble, ils ont abouti à une solution inédite globale pour mesurer la performance de l'enveloppe et des systèmes énergétiques d'une maison individuelle.

Le présent document est le fruit d'un travail collectif de ces 8 organismes publics et privés, sous l'observation des acteurs de la filière bâtiment en France.

Pour plus d'information : <https://programmeprofeel.fr/>

## MEMBRES DU CONSORTIUM :



## RÉDACTION :

Arnaud CHALLANSONNEX – CSTB  
 Gaëlle FAURE – INES  
 Mickaël RABOUILLE – INES  
 Sarah JURICIC – USMB

## COORDINATION :

Arnaud CHALLANSONNEX – CSTB

## PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics		Porteurs		Financiers				
Filière Bâtiment								

PROFEEL, un programme financé par le dispositif des certificats d'économie d'énergie (CEE)



## TABLE DES MATIÈRES

1/ Objectifs et principes de la méthode .....	5
1.1/ Objectifs et indicateurs mesurés .....	5
1.2/ Grands principes de la méthode .....	6
1.2.1/ Description du déroulé de l'essai .....	7
1.2.2/ Méthode d'identification .....	8
2/ Etudes de cas détaillées.....	10
2.1/ Maison neuve isolée par l'intérieur .....	10
2.1.1/ Mise en œuvre du protocole.....	11
2.1.2/ Analyse des données .....	15
2.1.3/ Validation des résultats obtenus .....	23
2.2/ Maison rénovée isolée par l'extérieur .....	23
2.2.1/ Mise en œuvre du protocole.....	24
2.2.2/ Analyse des données .....	28
2.2.3/ Validation des résultats obtenus .....	35
3/ Compléments scientifiques.....	36
3.1/ Sollicitation thermique utilisée.....	36
3.2/ Calcul des conditions aux limites .....	36
3.2.1/ Puissance de chauffage .....	36
3.2.2/ Température intérieure moyenne .....	36
3.2.3/ Pertes thermiques par infiltration.....	37
3.2.4/ Températures extérieures équivalentes .....	38
3.2.5/ Prise en compte de la mitoyenneté .....	40
3.3/ Méthode d'identification du coefficient de déperdition .....	41
3.3.1/ Algorithme d'optimisation .....	42
3.3.2/ Initialisation des paramètres des modèles .....	43
3.3.3/ Calcul des coefficients de déperdition.....	45
3.4/ Banque de modèles et méthode de sélection .....	45
3.4.1/ Banque de modèles.....	46
3.4.2/ Sélection du modèle .....	49
3.5/ Estimation des incertitudes .....	51
3.5.1/ Propagation des incertitudes systématiques.....	51
3.5.2/ Estimation de l'incertitude de biais .....	52
4/ Optimisation de la méthode enveloppe .....	54
4.1/ Détermination de la sollicitation thermique .....	54
4.1.1/ Cartographie de signaux adaptés à une maison individuelle rénovée en ITI .....	54
4.1.2/ Étude numérique de la robustesse d'un signal de 24h vis-à-vis des conditions météorologiques .....	56
4.1.3/ Conclusions .....	57
4.2/ Présentation du banc d'essai virtuel .....	58

4.2.1/ Modèles de maison individuelle .....	58
4.2.2/ Climats.....	59
4.2.3/ Plan d'expérience .....	60
4.2.4/ Coefficients de déperdition de référence.....	60
4.3/ Évaluation du volume de l'instrumentation extérieure .....	61
4.3.1/ Analyse expérimentale .....	61
4.3.2/ Analyse numérique.....	65
4.3.3/ Bilan et préconisations .....	66
4.4/ Sensibilité des résultats aux valeurs initiales.....	67
4.4.1/ Méthodologie de l'étude .....	67
4.4.2/ Résultats : impact de l'initialisation sur la stabilité des résultats .....	68
4.5/ Choix de la méthode de sélection de modèle .....	71
4.5.1/ Méthodes de sélections envisagées.....	71
4.5.2/ Comparaison et conclusion .....	73
4.6/ Validation de la méthode et détermination du biais .....	74

# INTRODUCTION

Ce document a pour objectif de décrire la méthodologie suivie pour obtenir les résultats de la méthode SEREINE enveloppe. Il est divisé en 4 parties :

- Dans la première partie, nous expliciterons les indicateurs produits par la méthode. Nous décrirons ensuite les grands principes permettant d'obtenir ces indicateurs.
- Dans une deuxième partie, nous détaillerons deux cas expérimentaux qui permettront d'appréhender le fonctionnement de la méthode sur des cas concrets. Le lecteur pourra alors, s'il le souhaite, trouver des informations complémentaires nécessaires à une compréhension plus fine dans la partie suivante.
- Dans la troisième partie, plus technique, nous entrerons en détail sur certaines des méthodes scientifiques utilisées lors de l'analyse.
- Enfin, en dernière partie, nous détaillerons les principales études ayant permis l'optimisation de la méthode.

## 1/ OBJECTIFS ET PRINCIPES DE LA METHODE

### 1.1/ OBJECTIFS ET INDICATEURS MESURES

Les déperditions thermiques au travers de l'enveloppe d'un bâtiment (hors équipements techniques) sont représentées de manière simplifiée sur le schéma ci-après. On distingue :

- En rouge : les déperditions thermiques par les parois du bâtiment : échanges par la toiture, les fenêtres, les murs, les planchers bas et les ponts thermiques,
- En bleu : les déperditions thermiques par le passage d'air via des fuites ou, plus généralement, tous les défauts d'étanchéité de l'enveloppe.

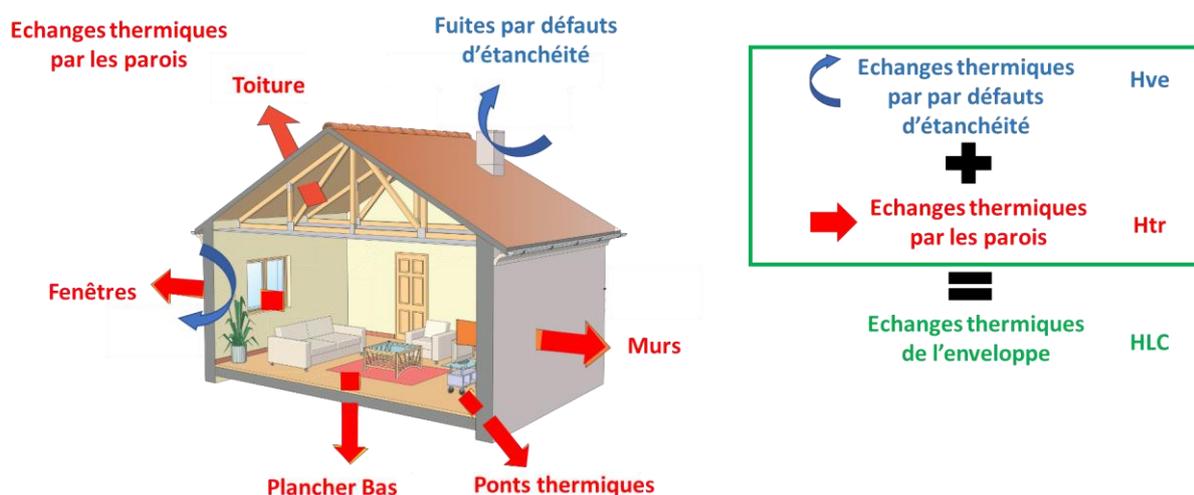


FIGURE 1 : SCHEMA EXPLICATIF DES DEPERDITIONS ET INDICATEURS ASSOCIES

La chaleur échangée au travers de l'enveloppe se caractérise à l'aide d'indicateurs de déperditions thermiques :

- **Le coefficient de transfert thermique par transmission Htr (ou HLC <sup>2</sup>) (W/K)** défini dans la norme NF EN ISO 13789 : 2017. Ce coefficient est une propriété physique de l'enveloppe du bâtiment qui dépend des matériaux de construction mobilisés, de leurs propriétés isolantes et de leur mise en œuvre.
- **Le coefficient de transfert thermique par renouvellement d'air**, dû aux infiltrations d'air, **Hve (W/K)**. Ce coefficient dépend d'une part de l'étanchéité à l'air de l'enveloppe (surface équivalente de fuites par les défauts d'étanchéité) et d'autre part, des conditions climatiques extérieures et notamment du vent. Ce coefficient de transfert thermique varie donc en fonction des conditions climatiques extérieures.
- **Le coefficient de déperdition thermique globale** à travers l'enveloppe du bâtiment liée aux infiltrations d'air et aux transmissions thermiques, **HLC <sup>1</sup>(W/K)**. Cet indicateur est très couramment employé pour évaluer la charge thermique des systèmes de chauffage et est donc présent dans toutes les normes en lien avec ce calcul.

Le coefficient HLC est ainsi la somme des deux indicateurs précédents :

$$\text{HLC} = \text{Htr} + \text{Hve}$$

Il est à noter qu'aucun de ces indicateurs ne prend en compte les déperditions par le système de ventilation. Ainsi, lors des processus permettant de les mesurer explicités plus loin dans ce document, le système de ventilation est à l'arrêt et les entrées d'air bouchées.

**La méthode SEREINE permet de mesurer ces trois coefficients.** Le coefficient **Htr** revêt cependant un intérêt particulier car, contrairement aux deux autres, il traduit uniquement les propriétés de l'enveloppe du bâtiment et n'est pas influencé par les conditions extérieures. Ce coefficient Htr pourra par la suite être **normalisé par la surface déperditive** pour obtenir un indicateur performantiel proche de l'indicateur Ubât défini dans la réglementation thermique 2005.

## 1.2/ GRANDS PRINCIPES DE LA METHODE

Comme nous l'avons vu précédemment, **la méthode SEREINE a pour objectif de mesurer des coefficients de déperdition thermique globale de l'enveloppe.** Elle vise à la fois la maison individuelle neuve et rénovée. Pour cela, la méthode se base sur :

- Un protocole de mesure sur le bâtiment, à l'aide notamment d'un kit d'instrumentation transportable. Ce protocole est brièvement rappelé par la suite mais une description plus complète peut être trouvée dans le document *Protocole enveloppe*.
- Une méthode d'identification, brièvement décrite ci-après, et qui fera l'objet d'une description plus complète dans les chapitres suivants.

---

<sup>1</sup> HLC : Heat Loss Coefficient

## 1.2.1/DESCRIPTION DU DEROULE DE L'ESSAI

Le procédé est simple et consiste à chauffer le bâtiment à l'aide de convecteurs rapportés et à effectuer différentes mesures à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment pendant la durée de l'essai. Ce test doit être réalisé sur un bâtiment inoccupé.

Le déroulé de l'essai se décompose en plusieurs étapes décrites ci-après.

### Étape 1 : Préparation du bâtiment

Le bâtiment est immobilisé pendant toute la durée du test. Il doit être préparé de la manière suivante :

- Toutes les portes à l'intérieur du bâtiment sont laissées ouvertes,
- L'ensemble des menuiseries (portes et fenêtres) donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé sont fermées,
- Toutes les protections mobiles (stores, volets roulants ou battants, etc.) sont fermées,
- Tous les vitrages ne disposant pas de protections mobiles opaques doivent être recouverts d'une protection opaque rapportée coté extérieur afin de limiter au maximum les apports solaires au travers de ces vitrages,
- Le système de ventilation est stoppé, les ouvertures sont fermées ou obturées selon les recommandations pour la réalisation d'un test d'étanchéité à l'air. (idem NF EN ISO 9972)
- Installation dans chacune des pièces d'un chauffage électrique rapporté régulé, sauf les pièces non chauffées habituellement (garage, comble, etc.) et les petites pièces.

### Étape 2 : Mise en place du dispositif de mesure

Le dispositif de mesures intérieures et extérieures est mis en place. Il consiste principalement en :

- des mesures de températures intérieures,
- le comptage de l'énergie injectée dans chaque pièce,
- des mesures de la température extérieure, ainsi que trois mesures de température « extérieure équivalente ». Ces mesures spécifiques permettent de rendre compte des différentes sollicitations thermiques vues par les parois, en particulier le rayonnement solaire.

Une description complète du dispositif expérimental comportant les diverses spécifications techniques est disponible dans le document *Kit expérimental et interface*.

### Étape 3 : Réalisation de l'essai

Pendant la durée du test, la maison va être chauffée en suivant un signal constitué d'une suite de créneaux de puissance et de périodes sans sollicitation de durées variables. Lors d'un créneau de chauffage, l'ensemble des convecteurs délivre leur puissance de chauffe maximale. Lors des périodes sans sollicitation, l'ensemble des convecteurs est éteint. De plus, un système de protection limite la température maximale intérieure atteignable à 35°C. Ce signal est visible en Figure 2.

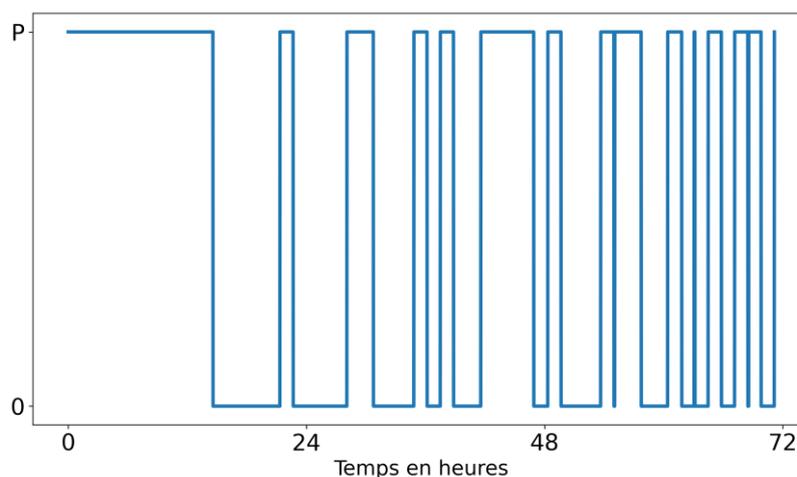


FIGURE 2 : SOLLICITATION THERMIQUE PSEUDO-ALEATOIRE (OU PSA)

La durée de réalisation de l'essai varie selon :

- La typologie de bâtiment (notamment s'il s'agit d'une isolation par l'intérieur ou l'extérieur)
- La période de l'année (en fonction de la température extérieure).

En effet, selon ces paramètres, le niveau d'incertitude finale ne sera pas le même. Il est donc nécessaire de les évaluer en amont de la mesure afin de définir la durée idéale de mesure. Par exemple, pour un test réalisé sur une maison isolée par l'intérieur en période hivernale, la durée de test recommandée est de 24h. Le signal utilisé correspondra donc aux 24 premières heures du signal complet.

## 1.2.2/METHODE D'IDENTIFICATION

Le procédé pour l'identification des coefficients de déperdition thermique et de l'incertitude sur ces coefficients est le suivant :

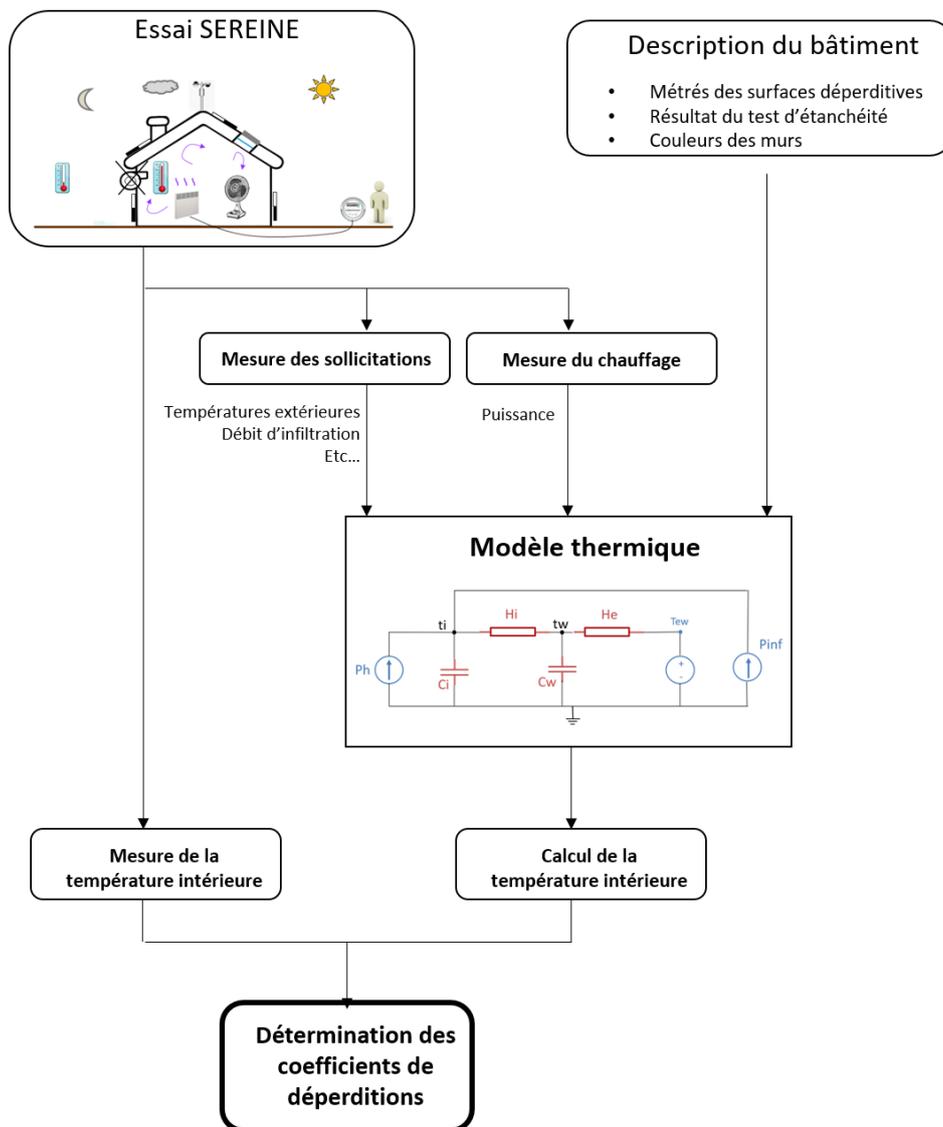


FIGURE 3: SCHEMA DU PRINCIPE GENERAL DE LA METHODE SEREINE

Une interface numérique permet de renseigner les données caractéristiques du bâtiment. On y retrouve par exemple la description des parois déperditives, l'altitude ainsi que le résultat du test d'étanchéité à l'air. Dans le cas d'un bâtiment neuf, ces données pourront être en partie préremplies en fournissant les données de conception du fichier XML RT de description du bâtiment.

Ces données, combinées avec celles mesurées lors de l'essai SEREINE, sont alors utilisées pour simuler la réponse thermique du bâtiment (température d'air moyenne intérieure) à l'aide d'un modèle thermique de bâtiment simplifié. Ces modèles sont composés d'un ensemble de résistances thermiques et de capacités. On notera que le modèle thermique utilisé n'est pas unique, mais sélectionné automatiquement par l'algorithme dans une banque de modèles dédiés afin d'utiliser le modèle le plus représentatif de la typologie du bâtiment testé.

Un processus d'optimisation va alors faire varier les paramètres du modèle (résistances et capacités) afin de trouver la combinaison permettant de rapprocher au plus près la valeur de température intérieure calculée et celle mesurée. On parle de méthode inverse.

L'incertitude des coefficients de déperdition, représentant le niveau d'isolation thermique globale de l'enveloppe, est ensuite calculée en considérant l'ensemble des sources d'erreur (aléatoires, systématiques et liées au biais de méthode) des données utilisées.

L'ensemble du processus d'identification est répété pour évaluer les indicateurs  $H_{tr}$  et  $H_{LC}$ . La différence entre ceux-ci réside dans l'évaluation de la puissance de déperdition liée aux infiltrations qui est préalablement déduite des apports internes, via le calcul préalable d'une puissance de déperdition par infiltration ( $P_{inf}$ ), pour la détermination du  $H_{tr}$ .

## 2/ ETUDES DE CAS DETAILLEES

Afin de donner une vision concrète de l'application de la méthode SEREINE, nous présenterons dans cette partie deux cas expérimentaux contrastés :

- Une maison neuve isolée par l'intérieur
- Une maison rénovée isolée par l'extérieur

Pour chacune de ces expérimentations, nous détaillerons le protocole suivi et les résultats intermédiaires obtenus jusqu'au calcul des indicateurs souhaités.

Pour chacun des cas, nous réexpliquerons l'ensemble des procédures et traitement utilisé afin qu'ils puissent être lus indépendamment. Certains paragraphes constitueront donc des redites de ce qui a été décrit précédemment.

### 2.1/ MAISON NEUVE ISOLEE PAR L'INTERIEUR

La maison testée est une maison individuelle neuve située en Haute-Savoie (74) dans la commune de Passy, à 1 063m d'altitude. Cette maison a été réalisée en auto-construction et respecte les exigences de la RT2012. Il s'agit d'un chalet en bois d'une surface habitable de 70 m<sup>2</sup>, répartie sur 3 niveaux (voir photo et plans en Figure 4). Le pan de toiture principale est orienté au sud. L'isolation a été réalisée par l'intérieur. La maison est construite en partie sur terre-plein et sur un sous-sol.

Sur cette maison de technique constructive mixte bois-béton, bâtie en 2021, les éléments isolants sont :

- 30 cm de laine de bois au niveau des rampants,
- Fenêtres double vitrage bois,
- 24 cm de laine de bois au niveau de l'isolation de murs par l'intérieur,
- 8 cm de mousse de polyuréthane au niveau du plancher bas sur terre-plein,
- 10 cm de laine de bois au niveau du plancher bas sur sous-sol.

Le test SEREINE a débuté le 14 février 2021 pour 24H (sans compter l'installation et la désinstallation du matériel).



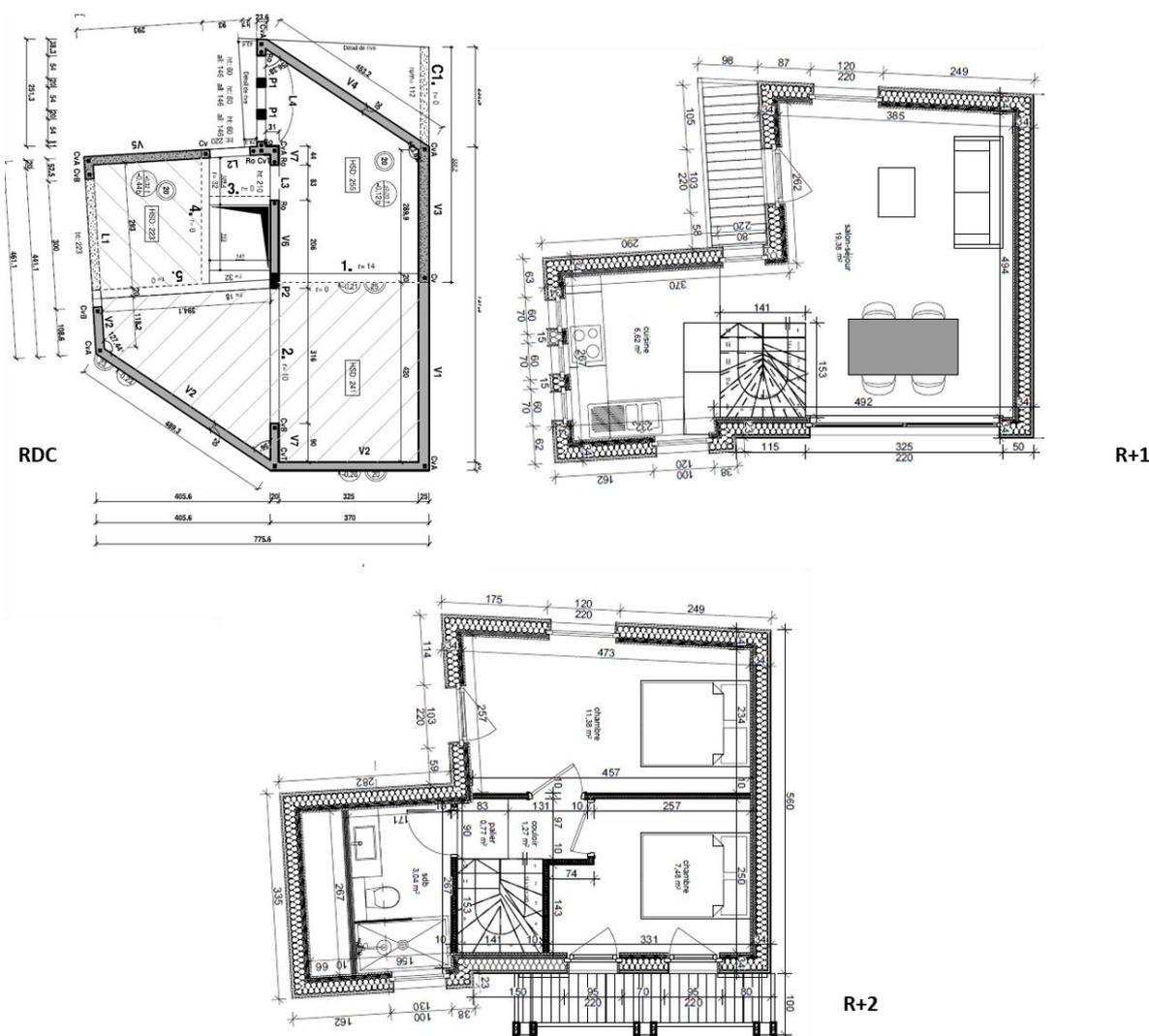


FIGURE 4: PHOTO ET PLANS DE LA MAISON TESTÉE A PASSY

## 2.1.1/ MISE EN ŒUVRE DU PROTOCOLE

### Préparation de l'essai en amont

Cet essai a lieu au cœur de l'hiver et en altitude. Les prévisions météo annoncent sur la période de déroulement du test une température moyenne inférieure à 8°C. Ces prévisions sont confirmées par l'historique des températures enregistrées dans cette zone. Par ailleurs, le logement est isolé par l'intérieur. En suivant les recommandations présentes dans le *Protocole Enveloppe*, l'opérateur de mesure évalue donc le temps de mesure nécessaire à 24h.

En effet, le niveau d'incertitude du résultat final obtenu dépend de :

- La typologie du bâtiment (isolation par l'intérieur, l'extérieur, pas d'isolation),
- La température moyenne au cours de l'essai,
- La durée de l'essai.

*Ces observations et les recommandations qui en découlent sont issues d'une large étude numérique, confirmée par des expérimentations réelles (voir §4.6/).*

Attention, cette durée de 24h ne comprend pas les temps de pose et de dépose du matériel. Se basant sur son expérience et la taille modeste du bâtiment, l'opérateur évalue à 2 ou 3 h le temps d'installation du matériel et à 1 ou 2 heures le temps de dépose. L'intervention est prévue à 13h, le bâtiment sera donc immobilisé jusqu'au lendemain à 18h.

En amont du test, le propriétaire aura également fourni à l'opérateur les documents techniques concernant le bâtiment. En particulier, les plans qui permettront de préparer l'instrumentation en avance de phase.

Pour un bon déroulement du test, le bâtiment doit être préchauffé avant la réalisation du test. Si l'occupant du logement est présent avant le test cela ne pose aucune contrainte, il maintient simplement sa température de confort habituel les deux jours précédant l'essai.

### Installation de l'essai

A son arrivée sur site, l'opérateur réalise avant le démarrage du test un essai de perméabilité à l'air suivant la norme NF EN 13829. Il prépare pour cela le bâtiment en étanchéifiant les entrées d'air et en coupant la ventilation mécanique. À noter que ce test peut être réalisé à un autre moment. Les résultats sont cependant nécessaires pour lancer l'analyse des résultats. Les résultats obtenus pour notre exemple sont donnés dans le tableau ci-dessous.

$Q_{4Pa, surf}$ ( $m^3/(h.m^2)$ )	$0.68 \pm 0.02$
$C_L$ ( $m^3/(h.Pa^n)$ )	$52.37 \pm 4.27$
n	$0.63 \pm 0.02$

L'opérateur procède ensuite à l'installation des capteurs extérieurs qui permettent d'évaluer les sollicitations auxquelles est soumis le bâtiment. Sur cette opération, l'instrumentation extérieure se compose de 5 capteurs de *façade* (noté capteur **F**), d'un capteur *extérieur* (noté capteur **E**) et d'un capteur *adjacent* (noté capteur **A**). Ces capteurs sont visibles en Figure 5.



FIGURE 5 : CAPTEUR F UTILISE SUR LE SITE DE PASSY (GAUCHE) ET UN CAPTEUR E

Les capteurs de *façade* permettent de rendre compte des sollicitations thermiques « vues » par les parois, notamment les apports solaires. Ils sont donc placés au centre de la paroi sur des trépieds et inclinés de la même manière qu'elle. Dans le cadre de cette expérimentation 5 capteurs **F** ont été utilisés :

- Un pour représenter le pan de toiture principal orienté au sud, sur trépied, incliné de 30° (voir Figure 6 gauche)
- Un pour représenter la façade sud, sur trépied, non incliné (voir Figure 6-gauche)
- Un pour représenter la façade ouest, sur trépied, non incliné (voir Figure 6-droite)
- Un pour représenter la façade nord, sur trépied, non incliné
- Un pour représenter la façade est, sur trépied, non incliné



FIGURE 6 : CAPTEURS EN FAÇADE SUD (GAUCHE) ET FAÇADE OUEST (DROITE)

**En réalité, comme nous le verrons plus tard, il était possible de n'utiliser que deux capteurs F sans dégrader le résultat obtenu.**

Concernant les capteurs **E** et **A** (de facture similaire) :

- Le capteur **A** est placé dans le seul local non chauffé adjacent au bâtiment, un garage situé au sous-sol.
- Le capteur **E** est placé en extérieur à l'abri du soleil.

L'opérateur procède également à l'installation des dispositifs de chauffe. Ceux-ci vont permettre la montée en température du bâtiment tout en mesurant la puissance injectée ainsi que les températures intérieures. Les 7 modules *intérieurs* sont répartis comme suit dans la maison afin d'assurer la chauffe la plus homogène possible :

Au RDC :

- 1 module dans l'entrée

Au R + 1 :

- 2 modules dans le salon
- 1 module dans la cuisine

Au R + 2 :

- 1 module dans chaque chambre (voir exemple en Figure 7)
- 1 module dans la salle de bain

La puissance développée par l'ensemble de ces systèmes de chauffe est ici de 5 kW environ.



FIGURE 7 : MODULE INTERIEUR AVEC SON CONVECTEUR SUR LE SITE DE PASSY

Avant le lancement du test, l'opérateur veille à couper le chauffage en place et l'ensemble des équipements produisant de la chaleur (équipements électriques, générateur d'ECS, etc.). Il ferme également l'ensemble des protections solaires. Si une baie ne dispose pas de protection solaire, il utilise une protection rapportée.

Si l'opérateur ne dispose pas du RSET du bâtiment, il relèvera les mètres des différentes parois déperditives du bâtiment. Il évaluera également les coefficients déperditifs de ces parois en se renseignant sur la nature et l'épaisseur de l'isolant.

### Déroulement de l'essai

Une fois l'essai lancé, l'opérateur quitte les lieux. Les systèmes de chauffe vont alors enchaîner des créneaux de chauffe à pleine puissance suivis de périodes de relaxation. On parle de sollicitation pseudo-aléatoire. La forme de cette sollicitation thermique n'est cependant pas le fait du hasard. En effet, la durée des périodes de chauffe et de relaxation a été déterminée au travers d'une large étude numérique ayant permis de déterminer la forme du signal optimal (voir partie 4.1/).

La durée complète de ce signal est de 3 jours (72h). Cependant, comme nous l'avons vu précédemment du fait des conditions expérimentales et de la nature du bâtiment, seules les 24 premières heures seront ici nécessaires.

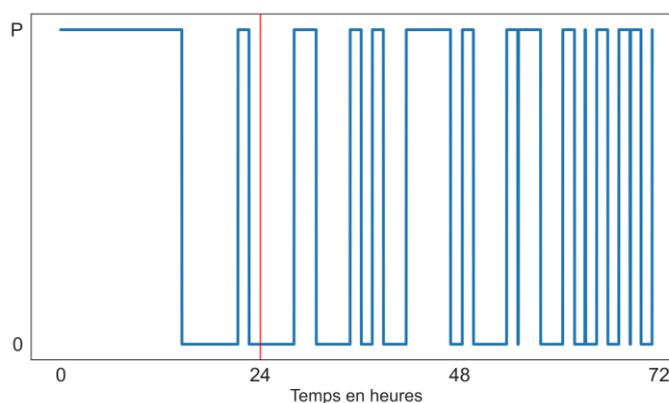


FIGURE 8 : SIGNAL PSA UTILISE POUR UN TEST DE 24H

Pendant ce temps, aucune action de la part de l'opérateur n'est requise. Si son matériel le lui permet, il pourra cependant suivre l'évolution du test à distance pour vérifier que tout se déroule comme prévu et intervenir si besoin.

## Dépose du matériel

Une fois les 24 heures d'essai terminées, l'opérateur arrête l'essai. Il entame alors la dépose des équipements intérieurs et extérieurs. Si cela est nécessaire, il remettra en route les différents dispositifs qu'il avait coupés pour les besoins du test (chauffage, VMC...), conformément à la situation initiale. Il dispose à présent des données nécessaires pour l'analyse qui permettra d'obtenir les coefficients de déperdition globaux du bâtiment.

### 2.1.2/ ANALYSE DES DONNEES

L'analyse des données est réalisée via une chaîne de traitement automatisée. Nous détaillerons cependant ici les sous-résultats principaux obtenus afin de faciliter la compréhension de la méthode. Les détails méthodologiques les plus techniques seront disponibles en annexe.

## Calcul des conditions aux limites

L'opérateur de mesure doit renseigner les surfaces des différentes parois déperditives du bâtiment ainsi qu'une estimation de leur coefficient de transmission thermique. L'estimation de ces paramètres aura été réalisée :

- au moment du test,
- à partir des plans du bâtiment,
- à partir du RSET du logement.

Il renseignera aussi la couleur des parois donnant sur l'extérieur afin d'évaluer leur absorbance.

Il sera également nécessaire de renseigner les résultats du test à la porte soufflante ainsi que l'altitude du bâtiment.

Ces différentes données ainsi que les mesures réalisées au cours du test vont permettre de calculer les conditions aux limites nécessaires à l'analyse. On notera que la vitesse de vent n'est pas obtenue via une instrumentation sur site mais via la station météorologique la plus proche du site expérimental.

Ces conditions aux limites sont principalement :

- **La température intérieure équivalente**, moyenne des températures mesurées au niveau de chaque dispositif de chauffe.
- **La puissance injectée**, somme des puissances de tous les modules de chauffe.
- **La température extérieure équivalente globale**, calculée comme une moyenne pondérée des grandeurs mesurées par les différents capteurs extérieurs. Cette grandeur permet de rendre compte de l'ensemble des sollicitations thermiques vues par le bâtiment, notamment les apports solaires.
- **Le coefficient de déperdition par infiltration**, calculé à partir de la vitesse de vent, des résultats du test d'étanchéité, ainsi que des températures intérieures et extérieures et de l'altitude du bâtiment.

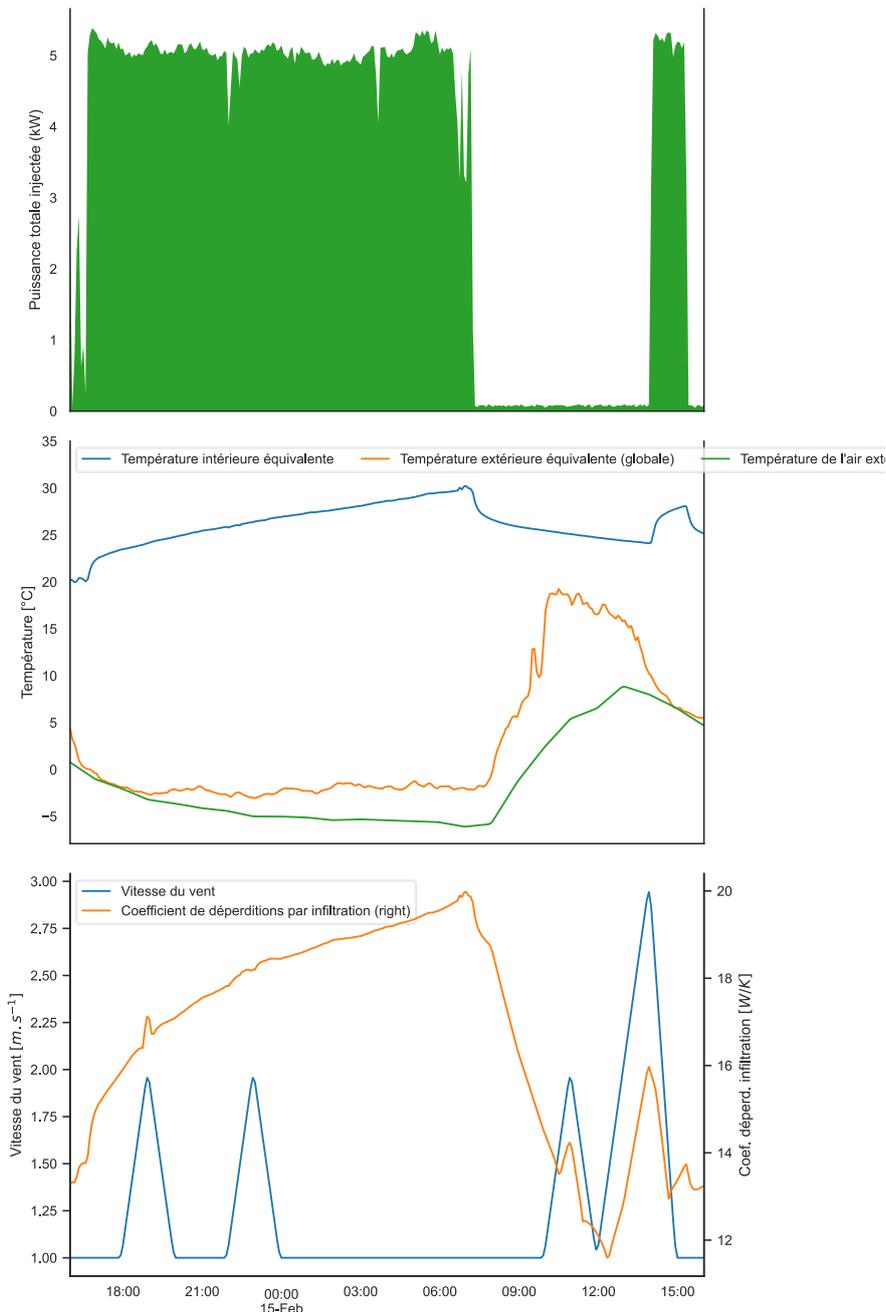


FIGURE 9: ÉVOLUTION DES CONDITIONS AUX LIMITES LORS DE L'ESSAI RÉALISÉ À PASSY

La Figure 9 fait apparaître l'évolution au cours de l'essai de ces différentes conditions aux limites. Plus de détails concernant les méthodes de calcul utilisées peuvent être trouvés en partie 3.2/.

Le jeu de conditions aux limites précédemment déterminé permet d'identifier les coefficients de déperdition thermique par méthode inverse. L'identification des coefficients  $HLC$  et  $Htr$  se fait en suivant exactement le même processus. La différence réside dans la prise en compte des infiltrations. En effet, pour le coefficient  $HLC$  on utilisera directement la puissance de chauffe calculée précédemment. Au contraire, pour le calcul du coefficient  $Htr$ , on retranchera à cette valeur les déperditions liées à l'infiltration ( $P_{inf}$ ) calculées comme étant le produit du coefficient d'infiltration par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Dans la suite du document, nous décrivons l'identification du coefficient  $Htr$ . Nous présenterons en fin de document les résultats pour le coefficient  $HLC$ .

## Processus d'identification

Le processus d'identification repose sur l'utilisation d'un modèle de comportement thermique du bâtiment. Ces modèles sont composés de transmittances (inverse des résistances thermiques) et de capacités qui représentent les différents éléments du bâtiment. Un exemple est donné en Figure 10 avec un modèle simple, le modèle dit 'tw'.

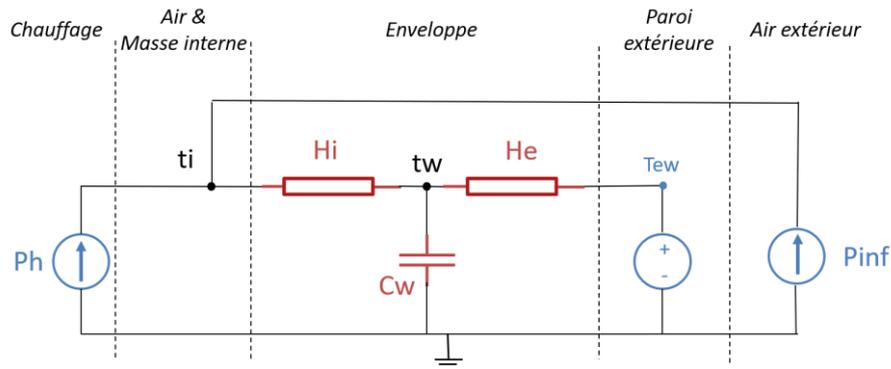


FIGURE 10: SCHEMA DU MODELE TW

Un tel modèle est capable, à partir de la puissance de chauffe  $Ph$ , des déperditions par infiltrations  $P_{inf}$  et de la température extérieure équivalente globale  $T_{ew}$ , de prédire l'évolution de la température intérieure.

Le principe du processus d'identification est alors d'optimiser les différents paramètres du modèle afin que la température intérieure prédite approche au mieux celle qui a été mesurée lors de l'essai. Une fois le meilleur jeu de paramètres obtenu, on peut en déduire la valeur du coefficient  $H_{tr}$  qui est une combinaison de ces paramètres. Par ailleurs, le processus d'identification associé à ce coefficient  $H_{tr}$ , une incertitude que nous qualifierons d'*aléatoire*. Cette incertitude, traduit l'adéquation entre la prédiction réalisée par le modèle et les données expérimentales.

*Plus de détails sur le processus d'identification peuvent être trouvés en partie 3.3/.*

Dans notre cas, la valeur de  **$H_{tr}$  identifiée en utilisant le modèle  $tw$  est de  $120 \pm 10 \text{ W/K}$** . Cette valeur est cependant très éloignée de la valeur qui sera fournie en fin de processus. En effet, le modèle  $tw$  n'est pas adapté pour ce bâtiment. Il n'est pas capable de simuler correctement son comportement thermique.

## Sélection de modèle

Il est très difficile de savoir a priori quel modèle thermique est adapté à tel ou tel bâtiment. C'est pourquoi l'analyse comporte une étape de sélection automatique du meilleur modèle qui sera choisi parmi 19 possibilités.

En pratique, pour chacun de ces modèles, on réalise le processus d'identification décrit dans le paragraphe précédent. À la suite de cette identification, un indicateur statistique est calculé, l'indicateur BIC (Bayesian Information Criterion) qui évalue la qualité du modèle en accord avec sa complexité.

Cet indicateur est fonction inverse de :

- La qualité de la régression,
- La simplicité du modèle.

Finalement, c'est le modèle avec l'indicateur BIC le plus petit qui sera sélectionné. La condition sur la complexité du modèle permet d'éviter de sélectionner un modèle trop complexe si celui-ci n'apporte pas suffisamment d'informations supplémentaires.

*Plus d'informations sur la méthode de sélection de modèle sont disponibles en partie 3.4.2/.*

La Figure 11 représente les indicateurs BIC et les  $H_{tr}$  identifiés (avec leurs incertitudes aléatoires associées) pour l'ensemble des modèles. On constate que c'est le modèle  $tw_{ti}$  (voir schéma en Figure 12) qui a été sélectionné car son indicateur BIC est le plus bas (attention les valeurs sont négatives).

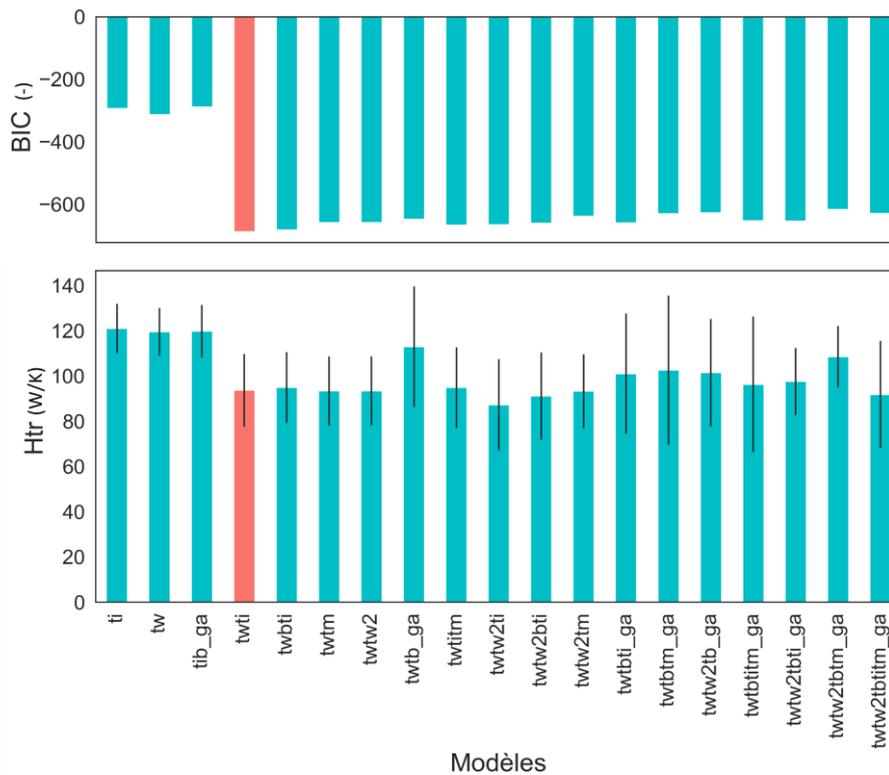


FIGURE 11: VALEUR DU CRITERE BIC ET DU HTR IDENTIFIE POUR CHACUN DES MODELES DISPONIBLES

Ce modèle est légèrement plus complexe que le modèle tw que nous avons vu précédemment avec l'ajout d'une capacité liée au nœud d'air intérieur.

Plus d'information sur la description des modèles sélectionnables dans la chaîne SEREINE est disponible en partie 3.4.1/.

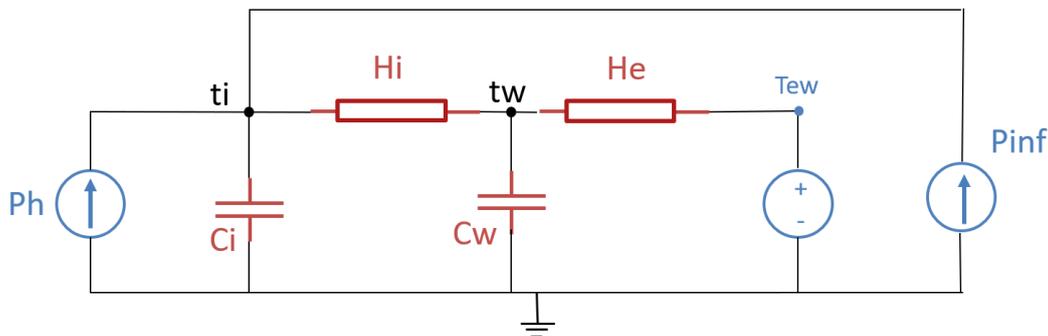


FIGURE 12: SCHEMA DESCRIPTIF DU MODELE TWTI

La valeur de  $Htr$  identifié en utilisant le modèle twti est alors de  $94 \pm 16$  W/K. on constate que l'on est très loin de la valeur qui était estimée par le modèle tw ( $120 \pm 10$  W/K).

### Propagation des incertitudes systématiques

Comme cela a été expliqué plus haut, l'incertitude associée au coefficient  $Htr$  identifié ne traduit que l'adéquation entre la prédiction réalisée par le modèle et les données expérimentales. Elle ne prend pas en compte les nombreuses sources d'incertitude liées aux données de mesure (capteurs de température intérieurs et extérieurs, de puissance, vitesse de vents...) ou aux données décrivant le bâtiment (absorbance des parois, coefficients de perméabilité...). Afin de prendre en compte ces sources d'incertitude, le processus d'identification va être renouvelé plusieurs fois en faisant varier ces paramètres dans leurs intervalles d'incertitude respectifs.

Ces sources d'incertitudes ainsi que les intervalles associés sont répertoriées en partie 3.5.1/.

Un grand nombre de tirages aléatoires (jusqu'à 300) est effectué dans ces intervalles d'incertitude pour chacune des sources. Nous observerons ici 4 de ces tirages afin de mieux comprendre le processus.

Sur le tableau suivant, sont représentées pour ces 4 tirages, les variations relatives de 4 sources d'incertitude majeures : la température intérieure, la vitesse de vent, le coefficient de déperdition CI et l'absorbance des parois. On y constate la nature aléatoire des tirages. En effet, les sources d'incertitude ne varient pas dans le même sens, ni dans les mêmes proportions.

Numéro du tirage	Variation absolue de la température intérieure (°C)	Variation absolue de l'absorbance des parois	Variation relative (en %) de la vitesse de vent	Variation relative (en %) du coefficient CI
1	-0.197227356	0.130433006	0.037468264	-1.365258754
2	-0.019377201	0.039157764	10.37109957	-0.34637445
3	-0.101939967	-0.201033225	-4.837819435	-0.791579684
4	-0.334750699	-0.061176336	-17.53529608	-2.673559497

Pour chacun de ces tirages, un nouveau jeu de conditions aux limites tel que celui que nous avons présenté précédemment, va être calculé. La Figure 13 présente pour ces 4 tirages, les températures extérieures équivalentes globales et les coefficients d'infiltration qui ont été calculés. On y remarque que la plage de variation de ces conditions limites est assez importante (plus de 5°C pour les températures).

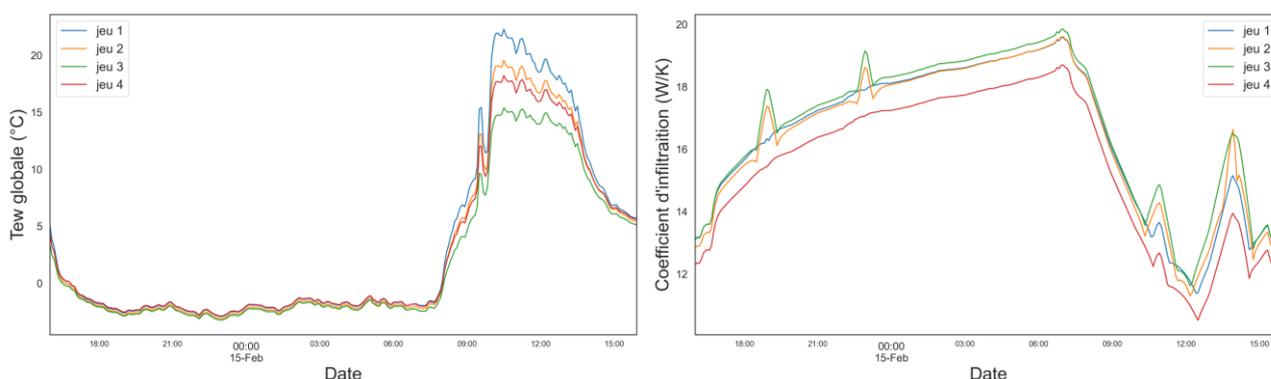


FIGURE 13: ÉVOLUTION DES TEMPERATURES EXTERIEURES GLOBALES ET DU COEFFICIENT D'INFILTRATION POUR LES 4 TIRAGES

Pour chacun des jeux de conditions aux limites obtenus, une identification va être réalisée en utilisant le modèle précédemment sélectionné. La Figure 14 montre les valeurs de Htr identifiées et leur incertitude associée. On constate que malgré les écarts observés sur les conditions aux limites les valeurs identifiées sont proches.

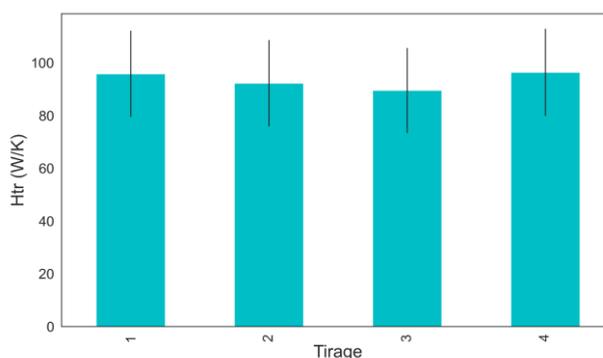


FIGURE 14: COEFFICIENT HTR IDENTIFIE POUR CHACUN DES 4 TIRAGES

**Ce processus n'a pas été répété à 4 mais à 96 reprises.** En effet, un critère numérique permet de juger lorsqu'un nombre suffisant de tirages a été réalisé (le maximum autorisé étant de 300).

L'ensemble de ces 96 coefficients Htr identifiés et leurs intervalles d'incertitude sont additionnés afin d'obtenir une densité de probabilité visible en Figure 15.

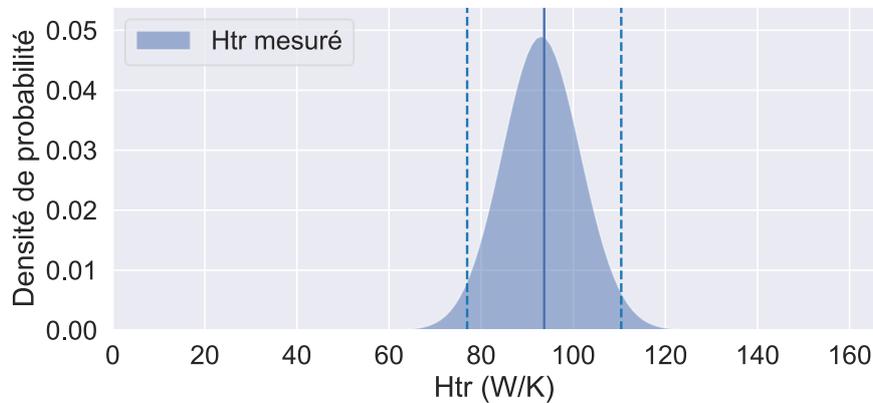


FIGURE 15: DENSITE DE PROBABILITE OBTENUE A LA SUITE DE LA COMBINAISON DE L'ENSEMBLE DES HTR IDENTIFIES

Le résultat issu du processus de propagation des incertitudes systématiques est alors la médiane de cette densité de probabilité. L'incertitude associée est son intervalle de confiance à 95 %. Dans notre cas, le coefficient **Htr vaut alors  $94 \pm 17$  W/K.**

### Incertitude de biais

Le biais correspond à l'écart constaté entre la valeur vraie d'une grandeur mesurée et l'estimation la plus probable fournie par la méthode de mesure, en l'occurrence la valeur de Htr précédemment mesurée.

Or, malgré les multiples précautions décrites précédemment, le processus d'identification en lui-même génère des biais. Il a été observé sur des études numériques que les conditions météorologiques et la durée de l'essai étaient les sources principales de ce biais. En effet, plus l'essai est long et plus la température est fraîche moins le biais observé est important.

Afin de garantir que l'intervalle d'incertitude contient la valeur recherchée (dans notre cas le Htr réel du bâtiment), une nouvelle source d'incertitude est ajoutée, l'incertitude de biais. Cette incertitude a été définie via une large étude numérique basée sur l'étude de 4 typologies sur 21 climats-types annuels (*le détail de cette étude est présenté en 3.5.2/ puis en 4.6/*).

Le résultat final de cette étude est une formulation de cette incertitude de biais, en fonction de :

- La typologie du bâtiment (ITI, ITE, sans isolation),
- La durée de l'essai (24, 48 ou 72h),
- La température extérieure moyenne pendant l'essai.

La Figure 16 montre l'évolution de cette incertitude de biais pour un test en 12h à 48h (par intervalles de 12h) sur une typologie ITI en fonction de la température extérieure moyenne.

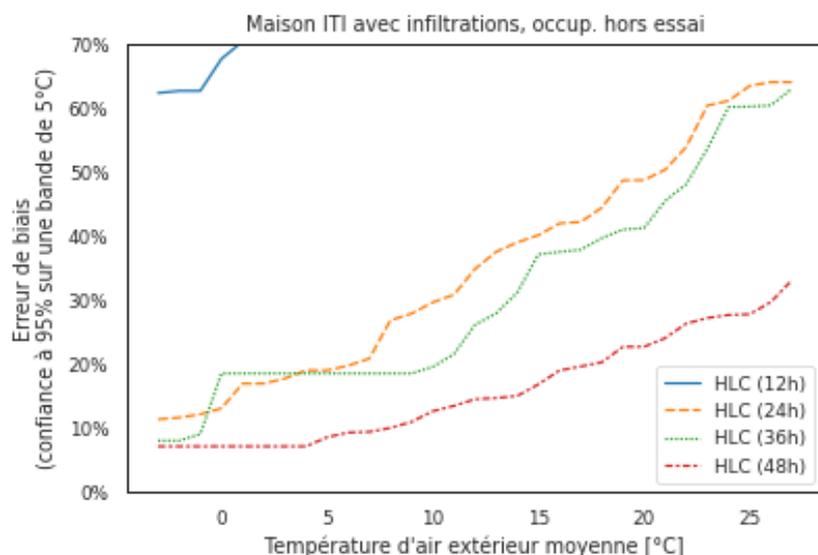


FIGURE 16: ÉVOLUTION DU BIAIS SUR UNE MAISON ITI EN FONCTION DE LA DUREE DE L'ESSAI ET DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE MOYENNE

Le cas traité est une maison isolée par l'intérieur, le test a duré 24h et la température moyenne était de  $-1.3^{\circ}\text{C}$ . L'incertitude de biais est alors de 14,6 %. Cette incertitude va être combinée (voir partie 3.5.2) avec celle obtenue au paragraphe précédent. **La valeur de Htr est alors de  $94 \pm 22 \text{ W/K}$ . Il s'agit de la valeur finale produite par la chaîne de traitement.**

### Résultats relatifs au coefficient HLC

Comme expliqué précédemment, l'identification du coefficient HLC se fait exactement de la même manière que pour le coefficient Htr. La seule différence réside dans le fait qu'on ne sépare pas les déperditions par infiltration. Ainsi, on considère que le coefficient de déperdition par infiltrations est nul tout au long de l'essai. Le coefficient HLC déterminé par la chaîne de traitement est alors de  **$112 \pm 24 \text{ W/K}$** .

### Résultats avec une instrumentation limitée

Nous avons vu dans le paragraphe relatif à l'instrumentation que 4 capteurs de façade **F** ont été utilisés lors de ce test. Pour rappel, ces capteurs sont placés en extérieur, sur des trépieds au niveau des parois donnant sur l'extérieur. Dans notre cas, un capteur avait donc été placé verticalement devant chaque mur et un autre orienté au sud a été placé sur un plan incliné à  $30^{\circ}$  pour représenter la toiture.

L'utilisation d'un nombre important de capteurs **F** peut poser des problèmes logistiques. En effet, ceux-ci sont placés sur des trépieds qui occupent un volume important lors du transport.

Afin de limiter cette contrainte, des études ont été menées avec pour objectif de réduire le nombre de capteurs **F** utilisés lors du test. Les sollicitations thermiques « vues » par les parois non équipées de capteurs SENS sont alors estimées via des données météorologiques.

*Le détail de cette étude peut être lu en partie 0.*

Les conclusions ont montré qu'il était possible d'utiliser uniquement 3 capteurs **F**, deux capteurs placés à la verticale et un horizontalement. Les capteurs verticaux sont alors placés devant les façades sud et ouest.

Aucun capteur horizontal n'a été disposé lors de ce test. Les coefficients Htr et HLC ont donc été recalculés en utilisant uniquement les données des capteurs **F** placés au sud et à l'ouest.

- Le coefficient HLC est alors de  **$110 \pm 24 \text{ W/K}$**  (contre  **$112 \pm 24 \text{ W/K}$**  précédemment).
- Le coefficient Htr est alors de  **$92 \pm 22 \text{ W/K}$**  (contre  **$94 \pm 22 \text{ W/K}$**  précédemment).

On constate que la différence entre les coefficients est extrêmement minime et négligeable comparée à l'intervalle d'incertitude associé. Nous retiendrons désormais ces valeurs, le protocole SEREINE final requérant uniquement cette instrumentation réduite.

### Indicateurs calculés

Sur un bâtiment neuf, deux indicateurs sont calculés à l'issue d'une mesure SEREINE.

Le premier est l'indicateur  $U_{bat}$  qui est calculé comme étant le ratio du coefficient Htr par la surface déperditive du bâtiment. Une incertitude est également associée à cet indicateur. Elle correspond à la plage d'incertitude du coefficient Htr là encore divisée par la surface déperditive du bâtiment. **L'indicateur  $U_{bat}$  obtenu ici est de  $0.565 \pm 0.133 \text{ W/m}^2/\text{K}$ .** Cette plage d'incertitude est placée sur une échelle, identique à celle du diagnostic de performance énergétique allant de 'très bon' à 'insuffisant'. La valeur calculée en conception pour le bâtiment est également renseignée. Dans notre exemple, il n'a pas été possible d'avoir accès à une valeur calculée. Afin d'illustrer l'indicateur, des hypothèses ont été prises quant à la quantification des ponts thermiques. La valeur théorique indicative ainsi obtenue est de  **$0.473 \text{ W/m}^2/\text{K}$** . Cet indicateur n'est pas spécifique aux constructions neuves mais est également calculé pour les bâtiments rénovés. En revanche, la plupart du temps la valeur calculée ne sera pas disponible. Dans ce cas, elle ne sera simplement pas renseignée dans le graphique suivant :

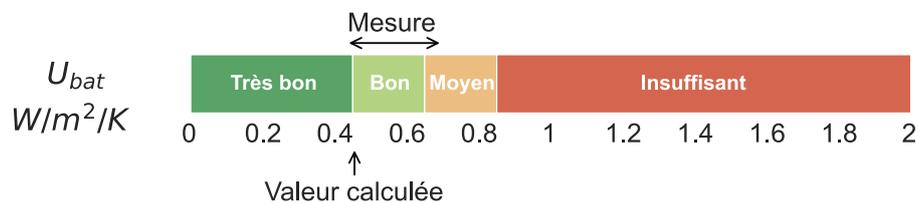


FIGURE 17:  $U_{bat}$  MESURE SUR LE CAS DE PASSY ET SON INCERTITUDE ASSOCIEE PLACEE SUR L'ECHELLE DU DPE

Le second indicateur nécessite en revanche une valeur calculée pour être défini. En effet, ce second indicateur indique la probabilité d'être à la cible, autrement dit que la valeur mesurée par la chaîne SEREINE soit identique à la valeur calculée. Il est donc plutôt dédié aux opérations neuves. Il se traduit par une note représentée par 3 couleurs (voir Figure 18).

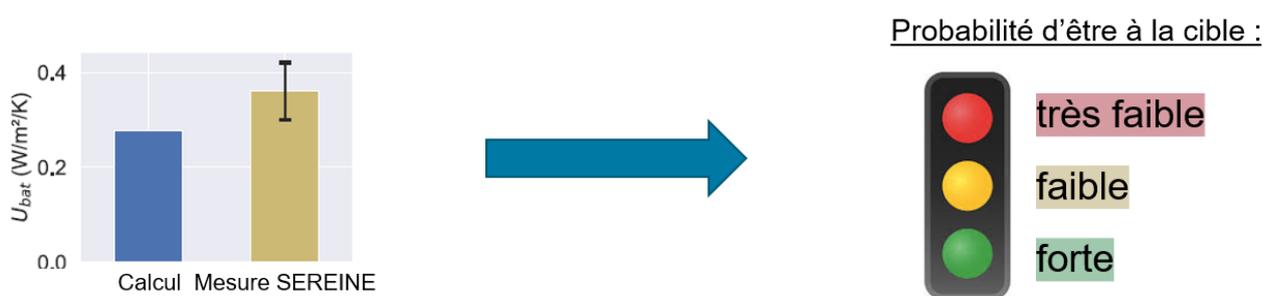


FIGURE 18: SCHEMA EXPLICATIF DE L'INDICATEUR DE "PROBABILITE D'ETRE A LA CIBLE"

La note est attribuée si la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude est supérieure au seuil correspondant. Actuellement, ces seuils ont été définis de la manière suivante :

- Probabilité forte d'être à la cible : borne supérieure de l'intervalle  $< + 35 \%$  de la valeur cible
- Probabilité faible d'être à la cible : borne supérieure de l'intervalle  $< + 75 \%$  de la valeur cible
- Probabilité très faible d'être à la cible : borne supérieure de l'intervalle  $> + 75 \%$  de la valeur cible

Ce principe est illustré sur la figure suivante :

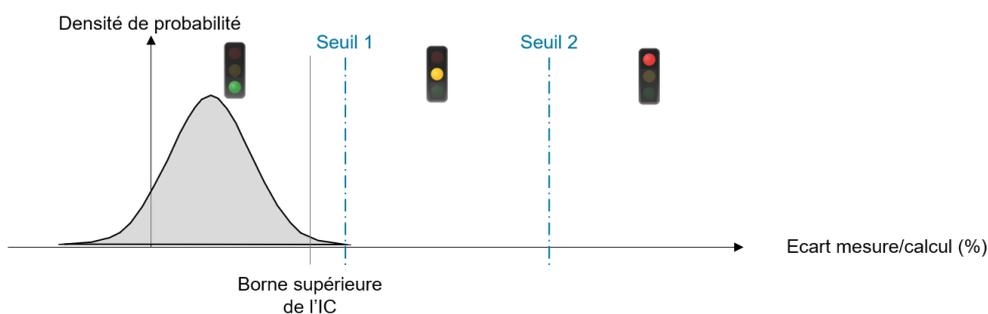


FIGURE 19: PRINCIPE DE L'INDICATEUR DE "PROBABILITE D'ETRE A LA CIBLE"

Dans notre cas, la borne supérieure de l'intervalle d'incertitude est de 114 W/K. La valeur cible (*donnée ici uniquement à titre d'exemple pour illustrer l'indicateur*) est de 77 W/K. La borne est donc bien au-dessus de +35 % de la valeur cible (104 W/K) mais en-dessous de +75 % (135 W/K). La note attribuée est donc la note jaune, soit une probabilité faible d'être à la cible (voir Figure 20).

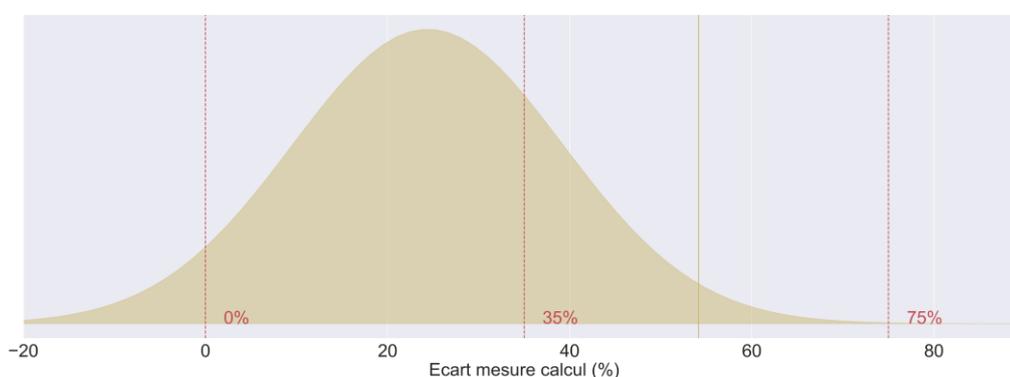


FIGURE 20: DENSITE DE PROBABILITE DE L'ECART MESURE/CALCUL POUR LE CAS DE PASSY

### 2.1.3/ VALIDATION DES RESULTATS OBTENUS

Nous avons vu précédemment que l'incertitude de biais est, entre autres, fonction de la durée du test. En effet, il a été observé que plus un test durait longtemps plus le biais était faible. L'incertitude de biais est donc également plus faible.

Le test présenté précédemment a en réalité duré 48h afin de s'assurer du résultat obtenu. La valeur de Htr obtenue en fin de test est alors de  $94 \pm 11$  W/K. On constate que la valeur est quasi-identique (92 contre 94 soit moins de 2 % de différence) mais que l'intervalle d'incertitude est bien plus faible. L'intervalle d'incertitude obtenu à 24h comprend bien celui obtenu à 48h, ce qui confirme la bonne qualité du résultat obtenu à 24h.

Par ailleurs, deux autres tests ont été réalisés sur le même bâtiment. Les valeurs de Htr obtenues lors des deux autres tests, au bout de 48h sont de 93 et 99 W/K. Cette très bonne répétabilité confirme la qualité du résultat obtenu lors de l'essai décrit.

## 2.2/ MAISON RENOVEE ISOLEE PAR L'EXTERIEUR

La maison testée est une maison individuelle rénovée située en Loire-Atlantique (44) dans la commune de Nantes. Il s'agit d'une maison d'un étage, d'une surface habitable de 130 m<sup>2</sup> (voir photo et plans en Figure 21) et construite sur terre-plein.

Il s'agit d'une rénovation lourde. Les travaux sur l'enveloppe ont concerné :

- L'isolation des combles avec 30 cm de laine de bois,

- L'isolation des murs par l'extérieur avec 20 cm de plastique alvéolaire,
- L'isolation du plancher bas donnant sur terre-plein avec 10 cm de plastique alvéolaire.

L'action de rénovation dispose du label BBC Effinergie. La valeur de Htr calculée par le bureau d'étude est de 130 W/K.

Le test SEREINE a débuté le 19 mars 2021 pour 48H (sans compter le temps d'installation et de désinstallation).



FIGURE 21: PHOTO ET PLANS DE LA MAISON TESTEE A NANTES

## 2.2.1/MISE EN ŒUVRE DU PROTOCOLE

### Préparation de l'essai en amont

Cet essai a lieu en hiver. Les prévisions météo annoncent sur la période de déroulement du test une température moyenne inférieure à 8°C. Ces prévisions sont confirmées par l'historique des températures enregistrées dans cette zone. Par ailleurs, le logement est isolé par l'extérieur. En suivant les recommandations présentes dans le *Protocole Enveloppe*, l'opérateur de mesure évalue donc le temps de mesure nécessaire à 48h.

En effet, le niveau d'incertitude du résultat final obtenu dépend de :

- La typologie du bâtiment (isolation par l'intérieur, l'extérieur, pas d'isolation)
- La température moyenne au cours de l'essai
- La durée de l'essai

Ces observations et les recommandations qui en découlent sont issues d'une large étude numérique, confirmée par des expérimentations (voir partie 4.6/)

Attention, cette durée de 48h ne comprend pas les temps de pose et de dépose du matériel. En se basant sur son expérience et la taille importante du bâtiment, l'opérateur évalue à 3 ou 4 h le temps d'installation du matériel et à 1 ou 2 heures le temps de dépose. L'intervention est prévue à 14h, le bâtiment sera donc immobilisé jusqu'au surlendemain à 20h.

En amont du test, le propriétaire aura également fourni à l'opérateur les documents techniques concernant le bâtiment. En particulier, les plans qui permettront de préparer l'instrumentation en avance de phase.

Pour un bon déroulement du test, le bâtiment doit être préchauffé avant la réalisation du test. Si l'occupant du logement est présent avant le test cela ne génère aucune contrainte, il maintient simplement sa température de confort habituel les deux jours précédant l'essai.

### Installation de l'essai

A son arrivée sur site, l'opérateur réalise avant le démarrage du test un essai de perméabilité à l'air suivant la norme NF EN 13829. Il prépare pour cela le bâtiment en étanchéifiant les entrées d'air et en coupant la ventilation mécanique. À noter que ce test peut être réalisé à un autre moment. Les résultats sont cependant nécessaires pour lancer l'analyse des données SEREINE. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous. On y constate que le bâtiment présente une bonne étanchéité à l'air, le coefficient  $Q_{4Pa, surf}$  n'étant que légèrement supérieur au seuil réglementaire pour le neuf.

$Q_{4Pa, surf}$ ( $m^3/(h.m^2)$ )	$0.70 \pm 0.04$
$C_L$ ( $m^3/(h.Pa^n)$ )	$81.39 \pm 7.99$
n	$0.66 \pm 0.03$

L'opérateur procède ensuite à l'installation des capteurs extérieurs qui permettent d'évaluer les sollicitations auxquelles est soumis le bâtiment. Sur cette opération, l'instrumentation extérieure se compose de 5 capteurs de façade (noté capteur **F**), d'un capteur *extérieur* (noté capteur **E**), et d'un capteur *adjacent* (noté capteur **A**). Ces capteurs sont visibles en Figure 22.



FIGURE 22: PHOTOS D'UN CAPTEUR F SUR LE SITE DE NANTES (GAUCHE) ET D'UN CAPTEUR E (DROITE)

Les capteurs **F** permettent de rendre compte des sollicitations thermiques « vues » par les parois. Ils sont donc placés au centre de la paroi sur des trépieds et inclinés de la même manière qu'elle. Dans le cadre de cette expérimentation, 7 capteurs **F** ont été utilisés :

- Un pour représenter le pan de toiture orienté au nord-ouest, sur trépied, incliné de 60°,
- Un pour représenter le pan de toiture orienté au sud-est, sur trépied, incliné de 60°,
- Un pour représenter la toiture terrasse, posé sur cette toiture horizontalement,

- Un pour représenter la façade sud-est, sur trépied, non incliné (voir Figure 23-haut),
- Un pour représenter la façade nord-ouest, sur trépied, non incliné (voir Figure 23-bas),
- Un pour représenter la façade nord-est, sur trépied, non incliné,
- Un pour représenter la façade sud-ouest, sur trépied, non incliné.



FIGURE 23: PHOTOS DE CAPTEURS F UTILISES SUR LE SITE DE NANTES

En réalité, comme nous le verrons plus tard il était possible de n'utiliser que trois capteurs **F** sans dégrader le résultat obtenu.

Concernant les capteurs **E** et **A** (de facture similaire) :

- Le capteur **A** est placé dans le seul local non chauffé adjacent au bâtiment, un garage adjacent à la maison.
- Le capteur **E** est placé en extérieur à l'abri du soleil.

L'opérateur procède également à l'installation des dispositifs de chauffe (modules **I** pour *intérieur*). Ceux-ci vont permettre la montée en température du bâtiment tout en mesurant la puissance injectée ainsi que les températures intérieures. Les 7 modules **I** sont répartis comme suit dans la maison afin d'assurer la chauffe la plus homogène possible :

Au RDC :

- 1 module dans le séjour/cuisine
- 1 module dans le bureau (voir Figure 24 gauche)
- 1 module dans l'entrée, au niveau de la salle d'eau (voir Figure 24-droite)
- 1 module dans la circulation autour de l'escalier

Au R + 1 :

- 1 module dans chacune des 4 chambres



FIGURE 24: PHOTOS DE MODULES I SUR LE SITE DE NANTES

La puissance développée par l'ensemble de ces systèmes de chauffe est ici de 5 kW environ.

Avant le lancement du test, l'opérateur veille à couper le chauffage en place et l'ensemble des équipements produisant de la chaleur (équipements électriques, générateur d'ECS, ...). Il ferme également l'ensemble des protections solaires. Si une baie ne dispose pas de protection solaire, il utilise une protection rapportée. C'était le cas dans cet exemple sur certaines portes vitrées (voir Figure 25). S'agissant d'un bâtiment rénové, il est courant que le logement comporte des équipements qui ne peuvent pas être éteints pendant le test. On pensera en particulier aux congélateurs ou réfrigérateurs. Dans ce cas, il est nécessaire de compter la puissance consommée par ces dispositifs afin de les inclure dans les apports thermiques. Dans notre exemple, cette situation ne s'est cependant pas présentée.



FIGURE 25: EXEMPLE D'UNE PROTECTION SOLAIRE RAPPORTEE UTILISEE SUR LE SITE DE NANTES

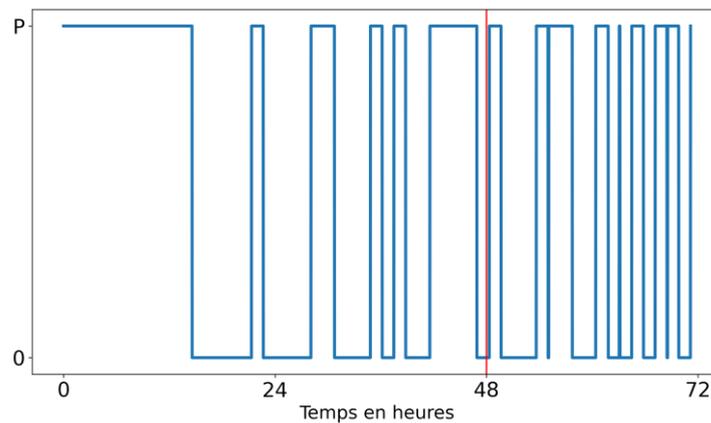
L'opérateur relèvera également les métrés des différentes parois déperditives du bâtiment.

### Déroulement de l'essai

Une fois l'essai lancé, l'opérateur quitte les lieux. Comme pour le cas neuf en ITI, les systèmes de chauffe vont alors enchaîner des créneaux de chauffe à pleine puissance suivis de périodes de relaxation.

*Plus de détails sur la manière dont ce signal pseudo-aléatoire a été déterminé peuvent être trouvés en partie 4.1/.*

Comme nous l'avons vu pour le cas neuf, la durée complète de ce signal est de 3 jours (72h). Sur notre exemple, du fait des conditions expérimentales et de la nature du bâtiment, seules les 48 premières heures sont nécessaires.



Comme pour le cas neuf, aucune action de la part de l'opérateur n'est requise pendant ce laps de temps. Si son matériel le lui permet, il pourra cependant suivre l'évolution du test à distance pour vérifier que tout se déroule comme prévu et intervenir si besoin.

### Dépose du matériel

Une fois les 48 heures d'essai terminées, l'opérateur arrête l'essai. Il entame alors la dépose des équipements intérieurs et extérieurs. Si cela est nécessaire, il réactivera les différents dispositifs qu'il avait coupés pour les besoins du test (chauffage, VMC...). Il dispose à présent des données nécessaires pour l'obtention des coefficients de déperdition globaux du bâtiment.

## 2.2.2/ ANALYSE DES DONNEES

En pratique, l'analyse des données est réalisée via une chaîne de traitement automatisée. Nous détaillerons cependant ici les sous-résultats obtenus afin de faciliter la compréhension de la méthode. Les détails les plus techniques seront disponibles en annexe.

### Calcul des conditions aux limites

L'opérateur de mesure doit renseigner les surfaces des différentes parois déperditives du bâtiment ainsi qu'une estimation de leur coefficient de transmission thermique. L'estimation de ces paramètres aura été réalisée :

- au moment du test (prise des metrés, observation des parois),
- à partir des plans du bâtiment, en se renseignant auprès du propriétaire.

Il renseignera aussi la couleur des parois donnant sur l'extérieur afin d'évaluer leur absorbance.

Il sera également nécessaire de renseigner les résultats du test à la porte soufflante ainsi que l'altitude du bâtiment.

Ces différentes données ainsi que les mesures réalisées au cours du test vont permettre de calculer les conditions aux limites nécessaires à l'analyse. On notera que la vitesse de vent n'est pas obtenue via une instrumentation sur site mais sur la station météorologique la plus proche du site expérimental.

Ces conditions aux limites sont principalement :

- La **température intérieure équivalente**, moyenne des températures mesurées au niveau de chaque dispositif de chauffe
- La **puissance injectée**, somme des puissances de tous les modules de chauffe.
- La **température extérieure équivalente globale**, calculée comme une moyenne pondérée des différents capteurs extérieurs. Cette grandeur permet de rendre compte de l'ensemble des sollicitations thermiques vues par le bâtiment, notamment les apports solaires.

- Le **coefficient de déperdition par infiltration**, calculé à partir de la vitesse de vent, des résultats du test d'étanchéité, ainsi que des températures intérieures et extérieures et de l'altitude du bâtiment.

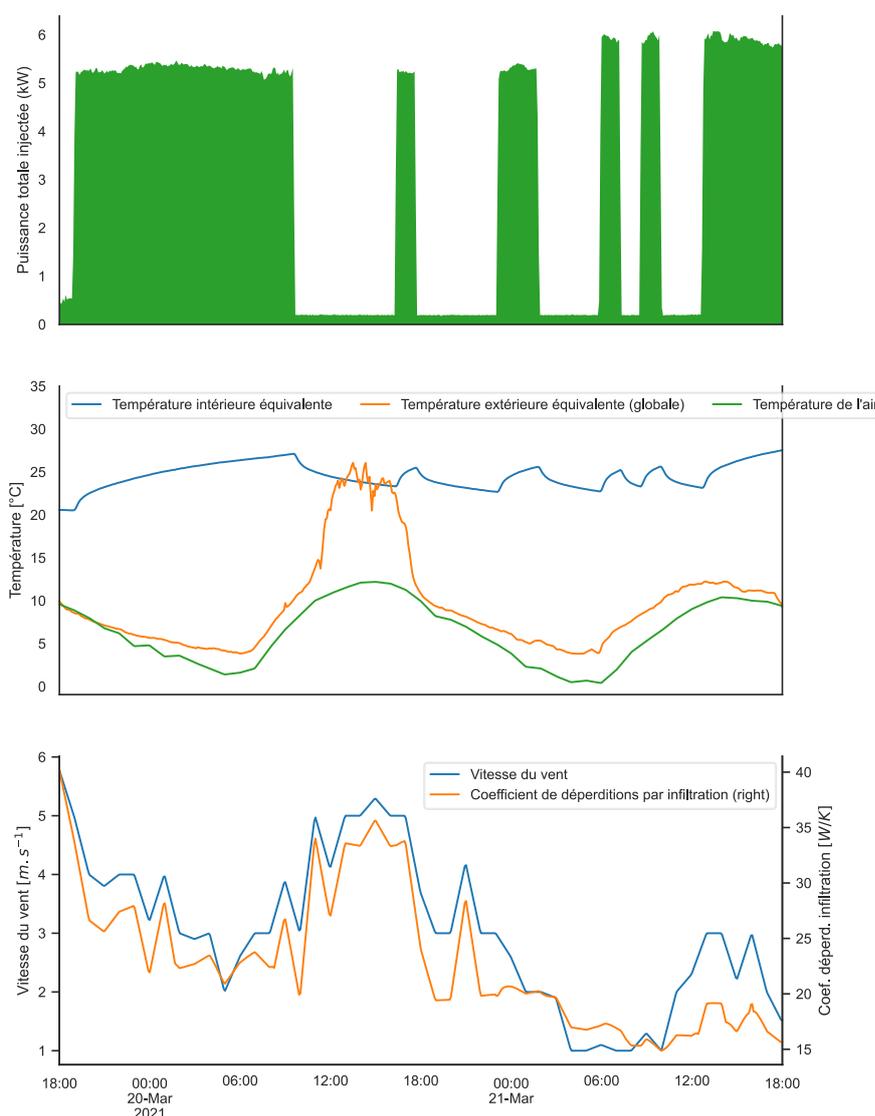


FIGURE 26: ÉVOLUTION DES CONDITIONS AUX LIMITES CALCULEES POUR LE TEST REALISE A NANTES

La Figure 26 fait apparaître l'évolution au cours de l'essai de ces différentes conditions aux limites. Plus de détails concernant les méthodes de calcul utilisées peuvent être trouvés en partie 3.2/.

Le jeu de conditions aux limites précédemment déterminé permet d'identifier les coefficients de déperdition thermique par méthode inverse. L'identification des coefficients HLC et Htr se fait en suivant exactement le même processus. La différence réside dans la prise en compte des infiltrations. En effet, pour le coefficient HLC, on utilisera directement la puissance de chauffe calculée précédemment. Au contraire, pour le calcul du coefficient Htr, on retranchera à cette valeur les déperditions liées à l'infiltration ( $P_{inf}$ ) calculées comme étant le produit du coefficient d'infiltration par la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Dans la suite du document, nous décrivons l'identification du coefficient Htr. Nous présenterons en fin de document les résultats pour le coefficient HLC.

### Processus d'identification

Le processus d'identification repose sur l'utilisation d'un modèle de comportement thermique du bâtiment. Ces modèles sont composés de transmittances (inverse des résistances thermiques) et de capacités qui représentent les différents éléments du bâtiment. Un exemple est donné en Figure 27, avec un modèle simple 'ti'.

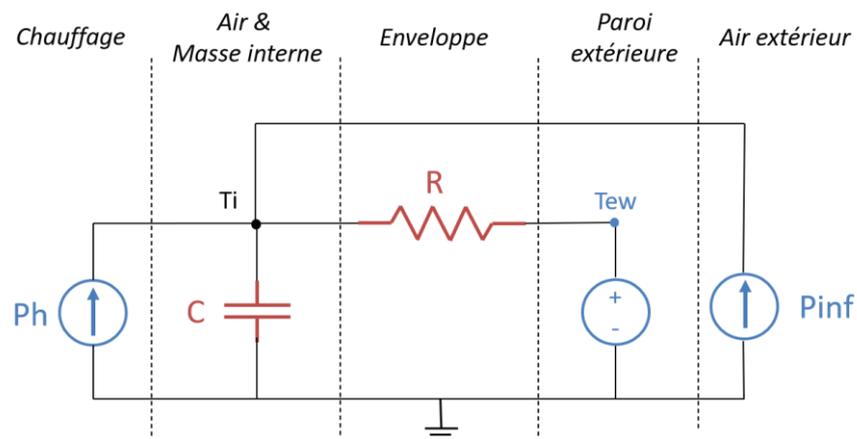


FIGURE 27: SCHEMA DESCRIPTIF DU MODELE TI

Un tel modèle est capable, à partir de la puissance de chauffe  $Ph$ , des déperditions par infiltrations  $Pinf$  et de la température extérieure équivalente globale  $Tew$ , de prédire l'évolution de la température intérieure.

Le principe du processus d'identification est alors d'optimiser les différents paramètres du modèle afin que la température intérieure prédite approche au mieux celle qui a été mesurée lors de l'essai. Une fois le meilleur jeu de paramètres obtenu, on peut en déduire la valeur du coefficient  $Htr$  qui est une combinaison de ces paramètres. Par ailleurs, le processus d'identification associe à ce coefficient  $Htr$ , une incertitude que nous qualifierons d'*aléatoire*. Cette incertitude, traduit l'adéquation entre la prédiction réalisée par le modèle et les données expérimentales.

*Plus de détails sur le processus d'identification peuvent être trouvés en figure 3.3/.*

Dans notre cas, la valeur de  **$Htr$  identifiée en utilisant le modèle ti est de  $156 \pm 12$  W/K**. Cette valeur est cependant très éloignée de la valeur qui sera fournie en fin de processus. En effet, le modèle ti n'est pas adapté pour ce bâtiment. Il n'est pas capable de simuler correctement son comportement thermique.

### Sélection de modèle

Il est très difficile de savoir a priori quel modèle thermique est adapté à tel ou tel bâtiment. C'est pourquoi l'analyse comporte une étape de sélection automatique du meilleur modèle qui sera sélectionné parmi 19 choix.

En pratique, pour chacun de ces modèles, on réalise le processus d'identification décrit dans le paragraphe précédent. Pour chacun des modèles, un indicateur statistique est calculé, l'indicateur BIC. Plus la régression est bonne et moins le modèle est complexe, plus cet indicateur sera faible. Finalement, c'est le modèle avec l'indicateur BIC le plus petit qui sera sélectionné. La condition sur la complexité du modèle permet d'éviter de sélectionner un modèle trop complexe si celui-ci n'apporte pas suffisamment d'informations supplémentaires.

*Plus d'informations sur la méthode de sélection de modèle sont disponibles en partie 3.4.2/*

La Figure 28 représente les indicateurs BIC et les  $Htr$  (avec leurs incertitudes aléatoires associées) pour l'ensemble des modèles. On constate que c'est le modèle `twtbtitm_ga` qui a été sélectionné car son indicateur BIC est le plus bas (attention les valeurs sont négatives).

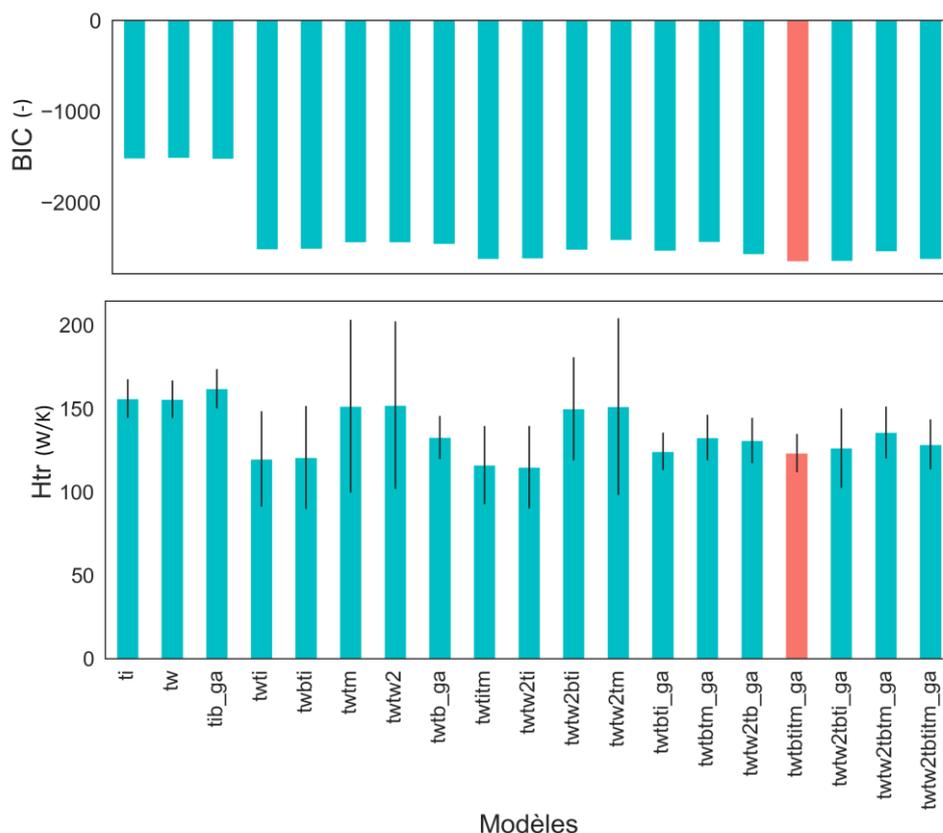


FIGURE 28: INDICATEUR BIC ET HTR OBTENUS POUR CHACUN DES MODELES TESTES

Il s'agit en réalité du modèle twbtitm (voir Figure 29) pour lequel la seconde condition aux limites correspond au garage. En effet, lorsque le bâtiment présente des espaces adjacents non-chauffés, certains modèles utilisent la température dans ce local comme une autre condition limite en température. Ce modèle est bien plus complexe que le modèle ti que nous avons vu précédemment. À la capacité liée au nœud d'air intérieur ont été ajoutées :

- La capacité  $C_m$  représentant la masse interne associée à la transmittance  $H_m$ ,
- La capacité  $C_w$  représentant l'inertie des parois, associées aux deux transmittances  $H_i$  et  $H_e$  (représentant les parties intérieures et extérieures de la paroi),
- La capacité  $C_b$  représentant l'inertie de la paroi vers le garage. La température  $T_{eb}$  correspond alors à la température dans le garage.

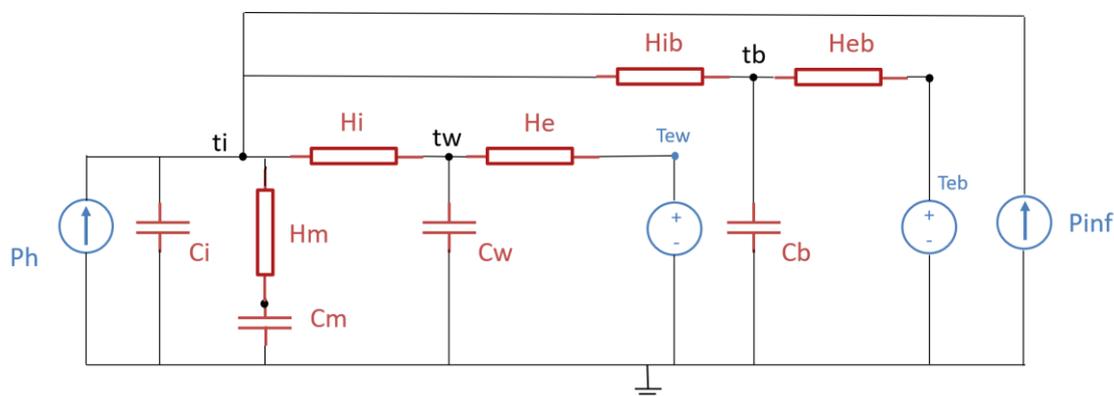


FIGURE 29: SCHEMA DESCRIPTIF DU MODELE TWBTITM

Plus d'informations sur la description des modèles sélectionnables dans la chaîne SEREINE sont disponibles en partie 3.4.1/.

La valeur de Htr identifié à travers l'utilisation du modèle twtbitm est alors de  $123 \pm 11$  W/K. On constate que l'on est très loin de la valeur estimée par le modèle ti (156 W/K).

### Propagation des incertitudes systématiques

L'incertitude associée au coefficient Htr déterminé ne traduit que l'adéquation entre la prédiction réalisée par le modèle et les données expérimentales. Elle ne prend pas en compte les nombreuses sources d'incertitude liées aux données de mesures (capteurs de température intérieurs et extérieurs, de puissance, vitesse de vent, ...) ou aux données décrivant le bâtiment (absorbance des parois, coefficients de perméabilité, ...). Afin de prendre en compte ces sources d'incertitude, le processus d'identification va être renouvelé plusieurs fois en faisant varier ces paramètres dans leurs intervalles d'incertitude respectifs.

*Ces sources d'incertitudes (18 au total), ainsi que les intervalles associés sont répertoriés en partie 3.5.1/.*

Un grand nombre de tirages aléatoires (jusqu'à 300) est effectué dans ces intervalles d'incertitudes pour chacune des sources. Nous observerons ici 4 de ces tirages afin de mieux comprendre le processus.

Sur le tableau suivant, sont représentées pour ces 4 tirages, les variations relatives de 4 sources d'incertitude majeures : la température intérieure, la vitesse de vent, le coefficient de déperdition CI et l'absorbance des parois. On y constate la nature aléatoire des tirages, les sources d'incertitude ne varient pas dans le même sens, ni dans les mêmes proportions.

Numéro du tirage	Variation absolue de la température intérieure (°C)	Variation absolue de la température de sous-sol (°C)	Variation relative (en %) de la vitesse de vent	Variation relative (en %) du coefficient CI
1	-0.19722736	1.484796172	0.13043301	0.03746826
2	0.47878177	-0.193772006	-0.10601723	-10.2770228
3	-0.0193772	4.787817692	0.03915776	10.3710996
4	0.2586974	-1.01939967	0.00624861	17.6805242

Pour chacun de ces tirages, un nouveau jeu de conditions aux limites tel que celui que nous avons présenté précédemment, va être calculé. La Figure 30 présente pour ces 4 tirages, les températures extérieures équivalentes globales et les coefficients d'infiltration qui ont été calculés. On y remarque que la plage de variation de ces conditions limites est assez importante.

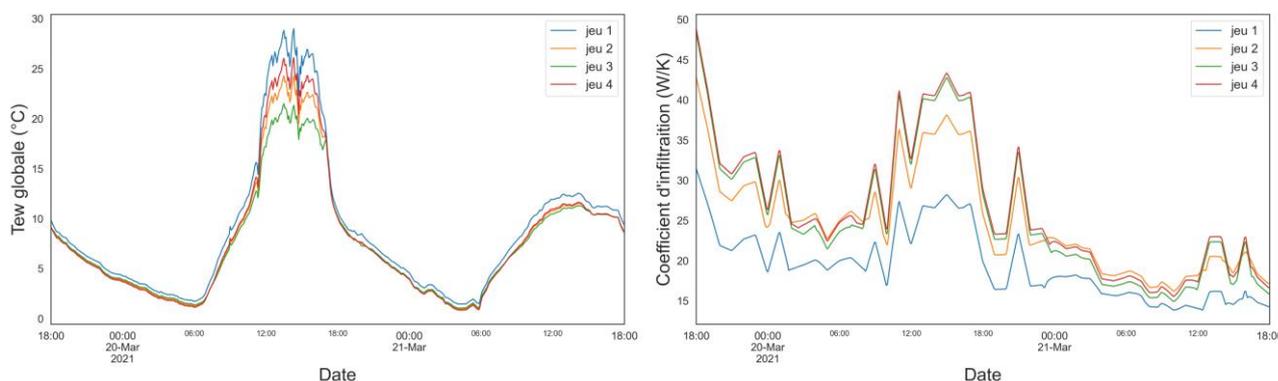


FIGURE 30: TEMPERATURES EXTERIEURES EQUIVALENTES ET COEFFICIENT D'INFILTRATION CALCULE POUR CHACUN DES 4 TIRAGES

Pour chacun des jeux de conditions aux limites obtenus, une identification va être réalisée en utilisant le modèle précédemment sélectionné. La Figure 31 montre les valeurs de Htr identifiées et leur incertitude associée. On constate que malgré les écarts observés sur les conditions aux limites les valeurs sont proches.

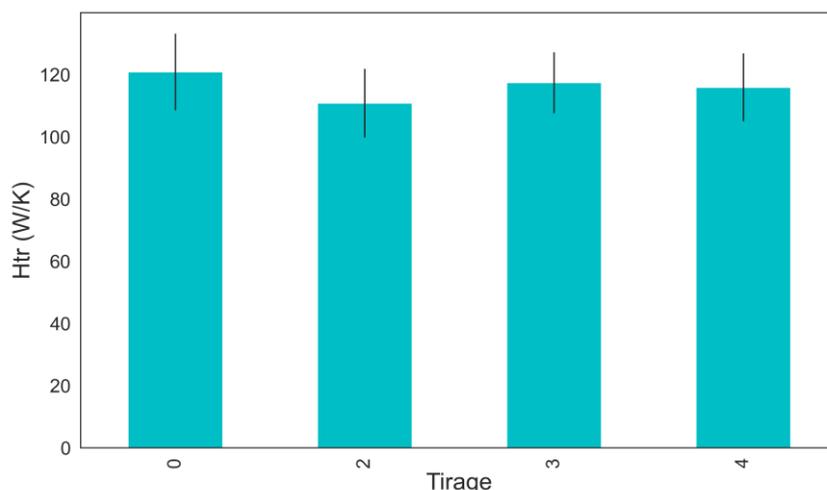


FIGURE 31: COEFFICIENTS HTR IDENTIFIES POUR CHACUN DES 4 TIRAGES

**Ce processus n'a pas été répété à 4 mais à 84 reprises.** En effet, un critère numérique permet de juger lorsqu'un nombre suffisant de tirages a été réalisé (le maximum étant de 300).

L'ensemble de ces 84 coefficients Htr identifiés et leurs intervalles d'incertitude sont additionnés afin d'obtenir une densité de probabilité visible en Figure 32.

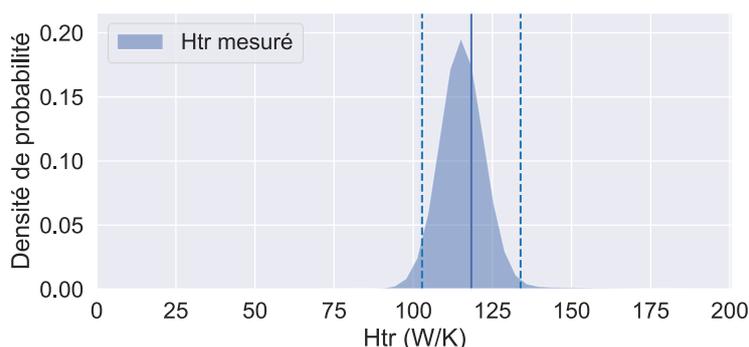


FIGURE 32: DENSITE DE PROBABILITE OBTENUE A LA SUITE DE LA COMBINAISON DES HTR OBTENUS LORS DE L'ENSEMBLE DES TIRAGES

Le résultat issu du processus de propagation des incertitudes systématiques est alors la médiane de cette densité de probabilité. L'incertitude associée est son intervalle de confiance à 95 %. Dans notre cas, le coefficient **Htr vaut alors  $118 \pm 16$  W/K.**

### Incertitude de biais

Le biais correspond à l'écart constaté entre la valeur vraie d'une grandeur mesurée et l'estimation la plus probable fournie par la méthode de mesure, en l'occurrence la valeur de Htr précédemment mesurée.

Or, malgré les multiples précautions décrites précédemment, le processus d'identification en lui-même génère des biais. Il a été observé sur des études numériques que les conditions météorologiques et la durée de l'essai étaient les sources principales de ce biais. En effet, plus l'essai est long et plus température est fraîche moins le biais observé était important.

Afin de garantir que l'intervalle d'incertitude contient la valeur recherchée (dans notre cas le Htr réel du bâtiment), une nouvelle source d'incertitude est ajoutée, l'incertitude de biais. Cette incertitude a été définie via une large étude numérique basée sur l'étude de 4 typologies sur 12 climats-types annuels (représentant plus de 2 000 simulations). *Le détail de cette étude est présenté en partie 3.5.2/ puis en 4.6/.*

Le résultat final de cette étude est une formulation de cette incertitude de biais, en fonction de :

- La typologie du bâtiment (ITI, ITE, sans isolation),

- La durée de l'essai (24, 48 ou 72h),
- La température extérieure moyenne pendant l'essai.

La Figure 33 montre l'évolution de cette incertitude de biais pour une durée de test comprise entre 12h et 72h sur une typologie ITE en fonction de la température extérieure moyenne.

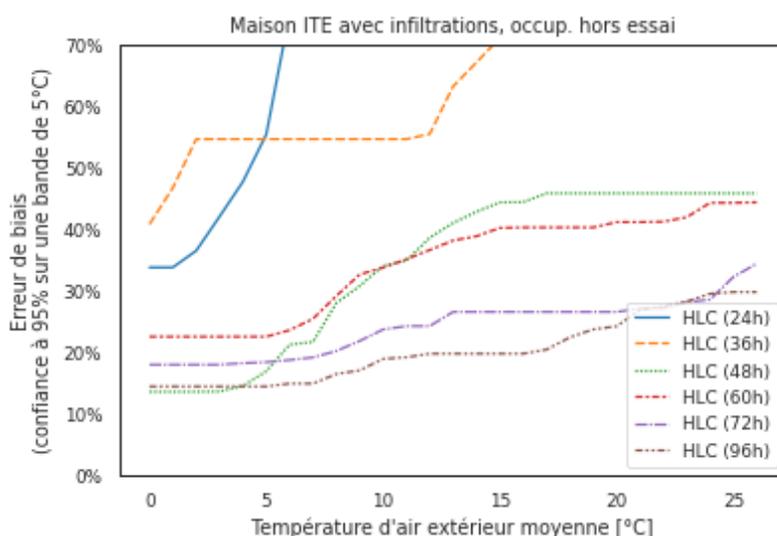


FIGURE 33: ÉVOLUTION DU BIAIS POUR UNE MAISON ITE EN FONCTION DE LA DUREE DU TEST ET DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE MOYENNE PENDANT L'ESSAI

Le cas traité est une maison isolée par l'extérieur, le test a duré 48h et la température moyenne était de 6.7 C. L'incertitude de biais est alors de 22,7 %. Cette incertitude va être combinée avec celle obtenue au paragraphe précédent. **La valeur de Htr est alors de  $118 \pm 31$  W/K. Il s'agit de la valeur finale produite par la chaîne de traitement.**

### Résultats relatifs au coefficient HLC

Comme expliqué précédemment, l'identification du coefficient HLC se fait exactement de la même manière que pour le coefficient Htr. La seule différence réside dans le fait qu'on ne sépare pas les déperditions par infiltration. Ainsi, on considère que le coefficient de déperdition par infiltrations est nul tout au long de l'essai.

Le coefficient HLC déterminé par la chaîne de traitement est alors de  **$138 \pm 36$  W/K**.

### Résultats avec une instrumentation limitée

Nous avons vu dans le paragraphe relatif à l'instrumentation que 7 capteurs **F** ont été utilisés lors de ce test. Pour rappel, ces capteurs sont placés en extérieur, sur des trépieds au niveau des parois donnant sur l'extérieur. Dans notre cas, un capteur avait donc été placé verticalement devant chaque mur, deux autres ont été placés sur un plan incliné à 58° pour représenter les pans de toiture et un dernier a été posé horizontalement sur la toiture terrasse.

L'utilisation d'un nombre important de capteurs **F** peut poser des problèmes logistiques. En effet, ceux-ci sont placés sur des trépieds qui occupent un volume important lors du transport.

Afin de limiter cette contrainte, des études ont été menées avec pour objectif de réduire le nombre de capteurs **F** utilisés lors du test. Les sollicitations thermiques « vues » par les parois non équipées de capteurs SENS sont alors estimées via des données météorologiques.

*Le détail de cette étude peut être lu en partie 0.*

Les conclusions ont montré qu'il était possible d'utiliser uniquement 3 capteurs **F**, deux capteurs placés à la verticale et un horizontalement. Les capteurs verticaux sont alors placés devant les façades sud et ouest.

Les coefficients Htr et HLC ont donc été recalculés en utilisant uniquement les données des capteurs **F** placés au sud-est et au sud-ouest ainsi que le capteur posé horizontalement.

- Le coefficient Htr est alors de **112 ± 29 W/K** (contre **118 ± 31 W/K** précédemment)
- Le coefficient HLC est alors de **132 ± 24 W/K** (contre **138 ± 36 W/K** précédemment)

On constate que la différence entre les coefficients est extrêmement minime et négligeable comparée à l'intervalle d'incertitude associé. Nous retiendrons désormais ces valeurs, le protocole SEREINE requérant uniquement cette instrumentation réduite.

### Indicateurs calculés

Sur un bâtiment rénové, seul l'indicateur  $U_{bat}$  est calculé. Il s'agit du ratio du coefficient Htr par la surface déperditive du bâtiment. Une incertitude est également associée à cet indicateur. Elle correspond à la plage d'incertitude du coefficient Htr là encore divisée par la surface déperditive du bâtiment. **L'indicateur  $U_{bat}$  obtenu ici est de  $0.315 \pm 0.083 \text{ W/m}^2/\text{K}$ .** Cette plage d'incertitude est placée sur une échelle, identique à celle du diagnostic de performance énergétique allant de 'très bon' à 'insuffisant'.

Si une valeur calculée a été renseignée, elle figure également sur l'échelle. Ici, le bâtiment a été rénové en visant un label *BBC Effinergie*. Un calcul théorique avait donc été réalisé. Le  $U_{bat}$  obtenu à l'issue de ce calcul est de  $0.350 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Cette valeur est comprise dans l'intervalle d'incertitude, soulignant la bonne réalisation de la rénovation.

Notons que, dans la plupart des opérations de rénovation, cette valeur calculée n'est pas disponible.



FIGURE 34: INDICATEUR  $U_{bat}$  ET SA PLAGE D'INCERTITUDE PLACES SUR L'ECHELLE  $U_{bat}$  DU DPE

### 2.2.3/ VALIDATION DES RESULTATS OBTENUS

Un test similaire a été conduit sur le bâtiment dans la même période. Le résultat obtenu est proche avec un coefficient Htr de  $110 \pm 34 \text{ W/K}$ . La bonne répétabilité des tests (les intervalles d'incertitude se chevauchent et contiennent la valeur calculée) donne une forte confiance dans le résultat obtenu.

## 3/ COMPLEMENTS SCIENTIFIQUES

### 3.1/ SOLLICITATION THERMIQUE UTILISEE

Comme cela a été présenté précédemment, la sollicitation thermique utilisée lors d'un test SEREINE est basée sur une séquence binaire pseudo-aléatoire (PSA) optimisée selon l'étude présentée en partie 4.1/. La Figure 35 ci-dessous présente ce signal.

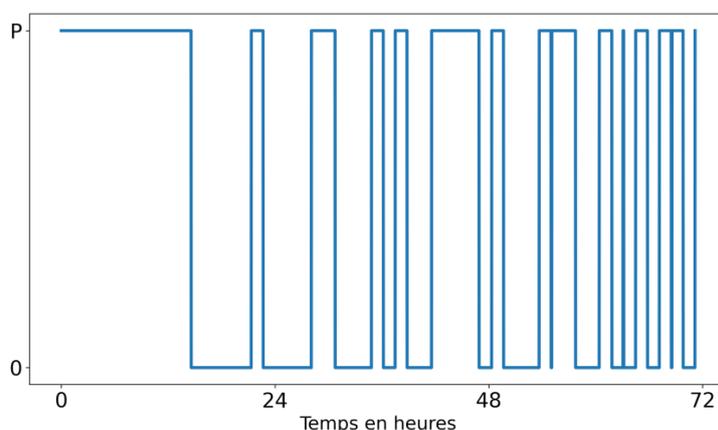


FIGURE 35 : SIGNAL PSA UTILISE DANS LA METHODE SEREINE

### 3.2/ CALCUL DES CONDITIONS AUX LIMITES

Le dispositif expérimental mis en place lors d'un test SEREINE va permettre de déterminer les conditions aux limites des modèles thermiques utilisés. Ces conditions aux limites sont :

- $P_h$ , la puissance de chauffage en W,
- $T_i$ , la température intérieure moyenne en °C,
- $P_{inf}$ , les pertes thermiques dues à l'infiltration en W,
- $T_{ews}$ , les températures extérieures équivalentes des parois déperditives en °C.

#### 3.2.1/ PUISSANCE DE CHAUFFAGE

$P_h$  est déterminé comme étant la somme des puissances électriques consommées par les différents modules du kit expérimental, ainsi que du concentrateur.

#### 3.2.2/ TEMPERATURE INTERIEURE MOYENNE

$T_i$  est déterminé comme étant la moyenne arithmétique de l'ensemble des températures intérieures mesurées par les différents modules du kit expérimental.

On notera que des méthodes de calcul alternatives de cette moyenne (volumique, surfacique, ...) ont été testées sur des cas expérimentaux. Les résultats de ces études ont montré que ces méthodes alternatives complexifieraient le protocole du test sans améliorer significativement le résultat obtenu.

### 3.2.3/PERTES THERMIQUES PAR INFILTRATION

$P_{inf}$  est estimé par la formule suivante :

$$P_{inf} = \frac{T_a - T_i}{\dot{m}_{inf}(C_a + C_v \omega_{ext})}$$

$T_a$  et  $T_i$  correspondent respectivement à la température d'air extérieur mesurée par le kit et à la température intérieure moyenne (toutes les deux en °C).

$C_a$ ,  $C_v$  et  $\omega_{ext}$  correspondent respectivement à la capacité calorifique massique de l'air sec et de l'eau (1 006 et 1 830 J/kg/K), et à l'humidité relative de l'air extérieur (kg/kg<sub>air sec</sub>).

$\dot{m}_{inf}$  correspond au débit d'infiltration d'air dans le bâtiment en kg/s. Ce dernier est calculé par la méthode itérative de la norme NF EN 15242, qui tient compte de la mesure d'étanchéité à la porte soufflante, des données de vitesse de vent de la station météo la plus proche et des données géométriques du bâtiment (NF EN 15242, 2007).

Ce modèle est notamment repris dans la réglementation thermique française et est détaillé dans le paragraphe 7.8 de l'annexe à l'arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012. Ce dernier est basé sur un calcul simplifié des pressions extérieures et intérieures aux différentes zones du bâtiment afin de satisfaire le bilan aéraulique massique.

Une illustration de ce modèle sur un cas très simple (bâtiment mono-zone sans ventilation) est donnée en Figure 36.

La pression extérieure vue par chaque composant est estimée en fonction de l'altitude, du vent, de la température extérieure, des caractéristiques géométriques du composant, et de l'écrantage du terrain.

$$p_{ext,comp} = -g \cdot z_{comp} \cdot \rho(T_a) + 0.5 \cdot CP \cdot \rho(T_a) \cdot V^2$$

$g$  étant l'accélération de la gravité (9.81m/s<sup>2</sup>),

$z_{comp}$  l'altitude du composant considéré en m,

$V$  la vitesse de vent à 10m d'altitude en m/s,

$\rho$  la densité de l'air à la température d'air  $T_a$ ,

et  $CP$  le « coefficient de pression » du composant qui dépend de sa hauteur, de son inclinaison et du type de terrain environnant (terrain ouvert, normal, urbain), et dont les valeurs tabulées sont données dans la norme EN NF 15242.

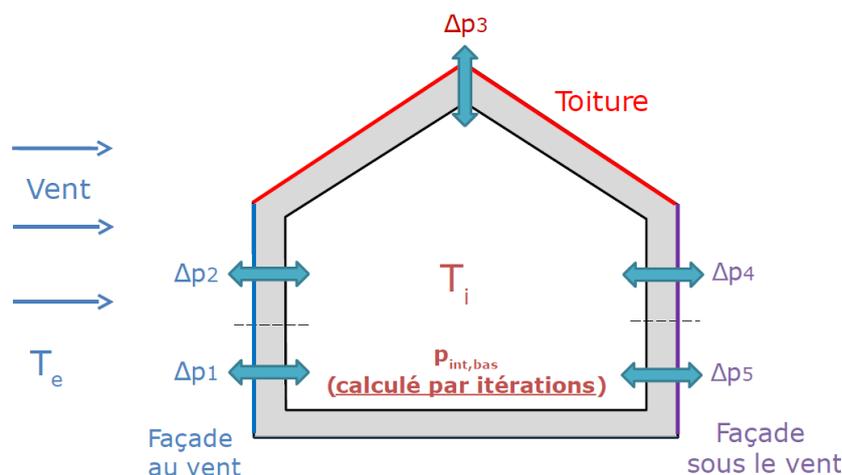


FIGURE 36: ILLUSTRATION DU MODELE AERAULIQUE POUR LE CALCUL DES DEBITS D'INFILTRATION

La pression intérieure au niveau inférieur de la zone  $p_{int,bas}$  est déterminée par itérations afin que les autres pressions calculées en fonction de celle-ci équilibrent le bilan massique des flux d'air dans le bâtiment (la somme des débits d'infiltration doit être égale à la somme des débits d'exfiltration). Pour cela, une technique d'optimisation de type simplexe (algorithme de Nelder-Mead) est utilisée.

La pression intérieure vue par chaque composant varie selon la température intérieure et l'altitude :

$$p_{intcomp} = -g \cdot z_{comp} \cdot \rho(T_i) + p_{intbas}$$

La relation permettant de faire le lien entre différence de pression et débit d'air surfacique infiltré est la suivante :

$$|Q_{surf}| = \frac{C_L}{A_{façade} + A_{toit}} |\Delta p|^n$$

Avec  $C_L$  et  $n$  les coefficients de relation débit/pression de l'enveloppe déterminés lors de la mesure de perméabilité à la porte soufflante. L'hypothèse ainsi faite est que la perméabilité de l'enveloppe est répartie de manière égale sur tous les composants, faute de connaissance de la localisation des défauts d'étanchéité.

### 3.2.4/ TEMPERATURES EXTERIEURES EQUIVALENTES

#### Définition

La température extérieure équivalente globale  $T_{ew}$  permet de rendre compte des sollicitations thermiques vues par les parois du bâtiment. Cette grandeur est calculée à partir des températures extérieures équivalentes  $T_{ew,p}$  de chacune des parois déperditives.

Ces dernières sont définies comme suit :

$$T_{ew,p} = T_e + \frac{(\alpha_e \cdot I_s - \varphi_v - \sum_j F_j \cdot h_{rj} \cdot (T_e - T_{envj}))}{h_{ce} + \sum_j F_j \cdot h_{rj}}$$

Avec :

- $\alpha_e$  : Coefficient d'absorption énergétique de la face extérieure
- $I_s$  : Flux solaire incident sur la paroi, en  $W \cdot m^{-2}$
- $\varphi_v$  : Densité de flux thermique équivalente due aux effets des précipitations sur la paroi en  $W/m^2$
- $F_j$  : Facteur de forme entre la paroi et la surface  $j$  vue par la paroi
- $h_{rj}$  : Coefficient d'échange superficiel extérieur radiatif linéarisé, en  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- $T_e$  : Température d'air extérieur, en K
- $T_{envj}$  : Température équivalente de la surface  $j$  vue par la paroi, en K
- $h_{ce}$  : Coefficient d'échange convectif en  $W \cdot m^{-2}$

On calcule alors la température extérieure équivalente globale  $T_{ew}$  comme étant une moyenne de ces températures de paroi, pondérée par leurs surfaces ( $A_p$  en  $m^2$ ) et coefficients de déperditions estimés ( $U_p$  en  $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$ ).

$$T_{ew} = \frac{\sum_p U_p A_p T_{ew,p}}{\sum_p U_p A_p}$$

#### Détermination des températures extérieures équivalentes de paroi

Lorsque la paroi extérieure donne sur un espace perdu (vide sanitaire, combles, etc.), il est possible d'estimer la température extérieure équivalente par le biais d'un capteur de température unique. Si cet espace est inaccessible, on estimera la température extérieure équivalente de paroi comme étant égale à la température d'air extérieur. Cette température sera alors assortie d'une forte incertitude. De la même manière, en cas de construction sur terre-plein, on estime la température extérieure équivalente du plancher bas comme étant égale à la moyenne de la température d'air extérieur durant l'année précédant le test. Là encore, cette grandeur sera assortie d'une forte incertitude.

Pour les autres parois donnant vers l'extérieure, les températures extérieures équivalentes de paroi peuvent être obtenues de façon rigoureuse en utilisant les données issues des capteurs **F**.

$$T_{ew,p} = \frac{\alpha_{e,s1} \cdot T_{ew,s2} - \alpha_{e,s2} \cdot T_{ew,s1} + \alpha_{e,p} (T_{ew,s1} - T_{ew,s2})}{\alpha_{e,s1} - \alpha_{e,s2}}$$

Avec :

- $T_{ew,s1}$  : Température extérieure équivalente du revêtement sombre mesurée, en K
- $T_{ew,s2}$  : Température extérieure équivalente du revêtement clair mesurée, en K
- $\alpha_{e,s1}$  : Coefficient d'absorption énergétique du revêtement sombre
- $\alpha_{e,s2}$  : Coefficient d'absorption énergétique du revêtement clair
- $\alpha_{e,p}$  : Coefficient d'absorption énergétique du revêtement de la paroi considérée

Il est également possible d'en calculer une approximation à partir d'autres mesures en posant certaines hypothèses :

- Négliger le flux thermique dû aux précipitations
- Imposer le coefficient d'échange convectif
- Supposer que tout l'environnement proche est à la même température que l'air extérieur sauf la voûte céleste.

Ces hypothèses permettent d'exprimer la température extérieure équivalente comme suit :

$$T_{ew,p} = T_e + \frac{(\alpha_e \cdot I_s - 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_e \cdot T_e^3 \cdot \cos(\beta)) \cdot (T_e - T_{ciel})}{h_{ce} + 4 \cdot \sigma \cdot \epsilon_e \cdot T_e^3}$$

Avec :

1.  $\beta$  : Inclinaison de la paroi par rapport à l'horizontal en rad
2.  $T_{ciel}$  : Température équivalente du ciel
3.  $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann en  $W/(m^2 \cdot K^4)$
4.  $\epsilon_e$  : Emissivité de la face extérieure de la paroi
5.  $T_e$  : Température extérieure en K

Le coefficient d'échange convectif peut classiquement être approché par  $h_{ce} = 4 + 4 \cdot V$ , où  $V$  est la température du vent en  $m \cdot s^{-1}$ . La température moyenne extérieure peut être approximée par la température extérieure. Une valeur de 0.9 peut être retenue pour l'émissivité des parois et la température de ciel est calculée à partir du modèle proposé par Marc Aubinet (2). Enfin, le flux solaire incident sur une paroi peut être déterminé à partir de son azimut, de son inclinaison ainsi que de l'albédo du sol et d'une mesure du flux rayonné horizontal.

L'étude présentée en 0 investiguera plus en profondeur l'impact de cette approximation sur le résultat obtenu. Elle permettra notamment de statuer sur le nombre de capteurs **F** qu'il est nécessaire d'utiliser afin d'obtenir un résultat robuste.

### Températures extérieures équivalentes multiples

La température extérieure équivalente globale  $T_{ew}$ , telle que nous l'avons définie représente l'ensemble des parois déperditives y compris les locaux adjacents non chauffés tels que les combles, le garage ou le vide sanitaire. Cependant, les températures dans ces locaux peuvent présenter des dynamiques très différentes

<sup>2</sup> Marc Aubinet, Longwave sky radiation parametrizations, Solar Energy, Volume 53, Issue 2, 1994, Pages 147-154, ISSN 0038-092X, [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90475-8](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90475-8).

des parois déperditives vers l'extérieur. La banque de modèle SEREINE comporte donc des modèles thermiques permettant de prendre en compte des conditions aux limites supplémentaires (températures extérieures équivalentes) représentatives de ces espaces. Jusqu'à deux conditions aux limites supplémentaires peuvent être prises en compte, soit un total de 3 conditions limites. Dans le cas où ces conditions limites sont partiellement prises en compte, les modèles sont dupliqués pour prendre en compte toutes les combinaisons possibles.

La Figure 37 illustre 3 exemples de configuration pour une maison construite sur terre-plein avec combles perdus et garage :

- a) il existe une seule condition aux limites considérant l'ensemble des surfaces déperditives incluant les combles et le garage.
- b), il existe deux conditions aux limites. La première regroupe l'ensemble des parois déperditives vers l'extérieur, le sol ainsi que celle donnant sur le garage. L'autre condition limite inclut le plancher haut uniquement.
- c), il existe trois conditions aux limites. La première regroupe les parois déperditives vers l'extérieur et le terre-plein, la seconde inclut le plancher haut et la troisième le garage.

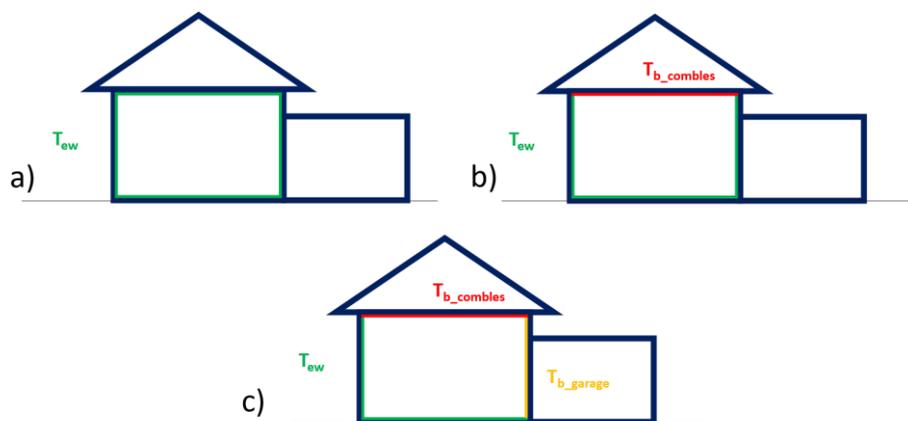


FIGURE 37: ILLUSTRATION D'UN CALCUL DE CONDITIONS AUX LIMITES MULTIPLES

### 3.2.5/ PRISE EN COMPTE DE LA MITOYENNETE

La méthode SEREINE permet d'identifier les coefficients de déperditions globaux de maisons mitoyennes. Cependant, la mitoyenneté doit être limitée. Elle ne peut pas être supérieure à 1/6 de la surface déperditve (parois mitoyennes comprises). Cela correspond à une mitoyenneté simple, sur une seule face. Par ailleurs, dans cette configuration, un capteur de température (capteur **A**) devra impérativement être posé dans le logement mitoyen.

Le flux de chaleur mitoyen moyen est alors représenté par l'ajout d'un flux de chaleur  $\Phi_{mit}$  dans les modèles thermiques utilisés pour l'identification (voir Figure 38).

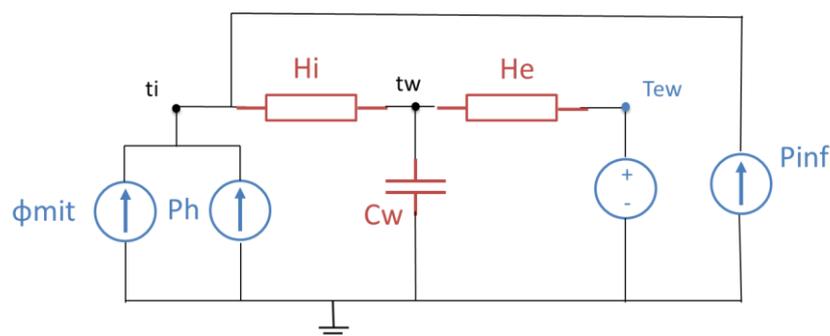


FIGURE 38: EXEMPLE DE MODELE SEREINE AVEC AJOUT D'UNE PUISSANCE  $\Phi_{MIT}$  LIEE AUX FLUX MITOYENS

L'estimation de ce flux mitoyen est faite de manière **indirecte**, c'est-à-dire que ce dernier n'est pas mesuré directement, mais estimé à partir de la température intérieure ( $T_i$ ), des températures moyennes des logements mitoyens ( $T_{mit,k}$ ) ainsi que des surfaces mitoyennes ( $S_{mit,k}$ ) et des coefficients de déperdition ( $U_{mit,k}$ ) des parois mitoyennes :

$$\Phi_{mit} = \sum_{k=1}^N (T_{mit,k} - T_i) U_{mit,k} S_{mit,k}$$

Tous les coefficients de déperdition sont évalués à dire d'expert, à partir de la connaissance des matériaux composant les parois mitoyennes. Selon le niveau de connaissance, celui-ci sera plus ou moins précis.

En cas de paroi mitoyenne non isolée, on recommande ainsi de n'effectuer la mesure que si le niveau de déperdition de celle-ci (coefficient  $U$ ) peut être connu avec une incertitude de  $\pm 50\%$ .

### 3.3/METHODE D'IDENTIFICATION DU COEFFICIENT DE DEPERDITION

La mesure du coefficient de déperdition thermique par transmission au travers de l'enveloppe du bâtiment repose sur une **méthode inverse**.

À l'opposé d'une méthode de résolution directe, le but est d'identifier des entrées  $x$  d'un modèle (état initial, sollicitations et/ou paramètres de structure) à partir de la connaissance de ses sorties  $y$  (voir Figure 39)

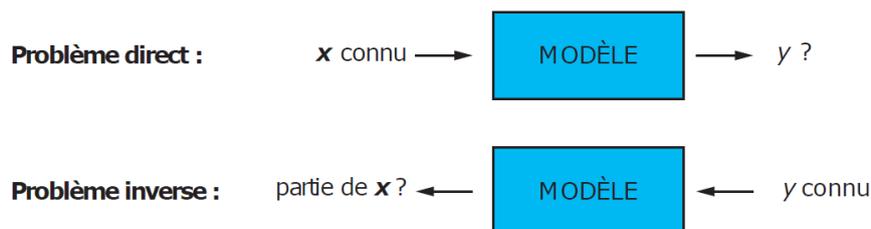


FIGURE 39: SCHEMA EXPLICATIF DES METHODES INVERSES

Dans notre cas :

- Les sorties  $y$  sont l'ensemble des conditions aux limites déterminées en partie 3.2/.
- Le modèle est l'un des modèles de comportement thermique du bâtiment sous forme de réseau RC.
- L'entrée  $x$  à identifier est le coefficient de déperdition avec une incertitude associée.

Prenons le cas d'un modèle thermique très simple, le modèle  $tw$ , représenté en Figure 40.

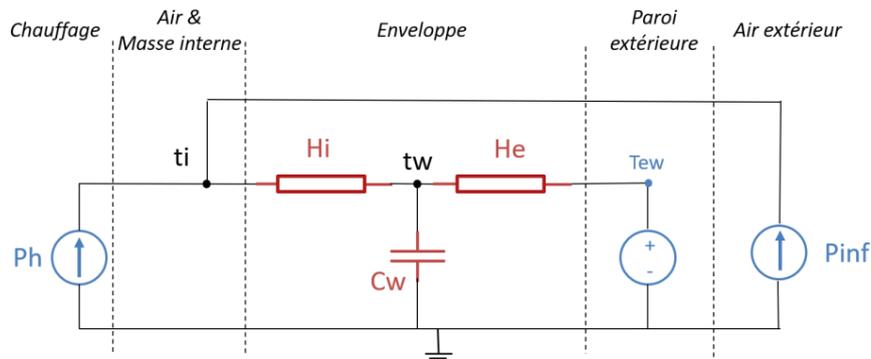


FIGURE 40: SCHEMA DESCRIPTIF DU MODELE TW

Ce modèle ne comporte qu'une capacité représentant l'inertie des différentes parois déperditives, placée entre deux transmittances (inverse des résistances thermiques) qui représentent les parties internes et externes de ces parois.

Les paramètres d'entrée de ce modèle thermique sont :

- $Ph$ , la puissance de chauffage injectée,
- $Pinf$ , les pertes thermiques dues à l'infiltration,
- $Tew$ , la température extérieure équivalente des parois déperditives,
- $Hi$  et  $He$  les transmittances,
- $Cw$ , la capacité.

À partir de ces trois premiers paramètres qui sont des séries temporelles et des deux derniers qui sont constants, le modèle peut prédire l'évolution temporelle de la température d'air intérieur,  $ti$ .

$Ph$ ,  $Pinf$  et  $Tew$  sont des conditions limites qui ont été déterminées expérimentalement (voir partie 3.2/). De la même manière, la température d'air intérieur  $ti$  a également été mesurée lors de l'essai. La résolution du problème inverse (pour un modèle donné) consiste à optimiser les paramètres inconnus (valeurs des transmittances et capacités) de manière à minimiser l'écart entre la température d'air intérieur mesurée et simulée.

### 3.3.1/ ALGORITHME D'OPTIMISATION

#### Fonction-objectif

La fonction-objectif utilisée pour l'optimisation est la **vraisemblance statistique**, dont la valeur sert également à la sélection de modèle et au calcul d'incertitude.

La structure des modèles utilisés étant des modèles d'état, la vraisemblance s'exprime de la manière suivante :

$$L(\theta; T) \propto \prod_{k=t_1}^{t_n} \frac{e^{-0.5 \varepsilon_k^T R_k^{-1} \varepsilon_k}}{\sqrt{\det R_k} (\sqrt{2\pi})^l}$$

$\varepsilon_k$  correspond à l'erreur de prédiction :

$$\varepsilon_k = T_{i,mes,k} - \hat{T}_{i,k}$$

$R_k$  est la matrice de covariance de l'erreur du vecteur d'observation :

$$R_k = CP_k C^T + S$$

Les matrices  $C$  et  $S$  correspondent à la matrice d'observation du modèle d'état et à la matrice de covariance du bruit de mesure.

La matrice de covariance de l'erreur des états  $P_k$  est calculée de la manière suivante :

$$P_{k+1} = AP_k A^T + \Sigma$$

Les matrices  $A$  et  $\Sigma$  correspondent à la matrice d'état du modèle et à la matrice de covariance des erreurs de modèles.

#### Algorithme utilisé

L'algorithme permettant d'ajuster les paramètres inconnus pour maximiser la vraisemblance est basé sur la méthode BGFS couplée à une méthode de recherche linéaire.

Il s'agit d'une méthode de type quasi-Newton dont le principe détaillé est donné dans plusieurs ouvrages spécifiques<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Niels Rode Kristensen, Henrik Madsen, Sten Bay Jørgensen, Parameter estimation in stochastic grey-box models, Automatica, Volume 40, Issue 2, 2004, Pages 225-237, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2003.10.001>.

### 3.3.2/INITIALISATION DES PARAMETRES DES MODELES

L'algorithme d'optimisation utilisé pour identifier le coefficient de déperdition (voir 3.3.1/) nécessite une estimation préalable des paramètres des modèles, qui correspondent dans notre cas aux valeurs des différentes capacités, transmittances et températures de chaque modèle. Cette estimation constitue un point de départ pour l'algorithme, qui va ensuite essayer de trouver les valeurs des paramètres qui optimisent la fonction-objectif. Elle n'a donc pas besoin d'être parfaite (si on connaissait les valeurs des paramètres, on n'aurait pas besoin de les identifier !) mais une estimation initiale trop éloignée des valeurs optimales peut entraîner une instabilité de l'algorithme d'optimisation.

L'initialisation des paramètres se fait en deux temps :

1. Une transmittance et une capacité globales du bâtiment sont estimées.
2. Les valeurs initiales des paramètres de chaque modèle sont dérivées de ces paramètres globaux.

#### Paramètres globaux

La transmittance globale du bâtiment est estimée par la formule suivante :

$$H_{guess} = \sum_i A^i U^i$$

où  $A^i$  et  $U^i$  sont respectivement la surface et le coefficient de transmission thermique associés au mur ou à la fenêtre  $i$ .  $A^i$  et  $U^i$  sont fournis par l'opérateur.

En ce qui concerne la capacité globale d'un bâtiment, deux cas de figure sont possibles :

- Soit il s'agit d'un bâtiment neuf ou suffisamment récent pour lequel on dispose du fichier résultant de l'étude thermique (fichier RSET). Ce fichier donne soit une valeur estimée de la capacité, qui est alors directement utilisée comme valeur initiale, soit une classe d'inertie. Dans le dernier cas, on utilise la valeur de la capacité moyenne de cette classe comme initialisation.
- Soit on ne dispose pas de l'étude thermique. Dans ce cas, la capacité thermique est arbitrairement initialisée à  $1^e8$  J/K.

Cependant, des études préliminaires ont montré que ces initialisations, et en particulier le deuxième cas, étaient parfois trop éloignées de la valeur optimale et pouvaient entraîner une instabilité de l'algorithme d'identification du coefficient de déperdition. Ces études ont permis également d'observer que cette instabilité n'affectait pas tous les modèles. En particulier, le modèle  $ti$  (voir 3.4.1/) n'est pas affecté par une initialisation de la capacité thermique éloignée de sa valeur optimale. Ce modèle a, en outre, l'avantage d'être très simple et de n'être composé que d'une seule capacité thermique.

Suite à ces constats, une nouvelle méthode d'estimation de la capacité thermique globale du bâtiment est proposée :

1. Pré-initialisation de la capacité thermique,
2. Identification du modèle  $ti$  à l'aide de cette valeur,
3. Utilisation de la capacité thermique identifiée pour  $ti$  comme estimation de la capacité thermique globale du bâtiment.

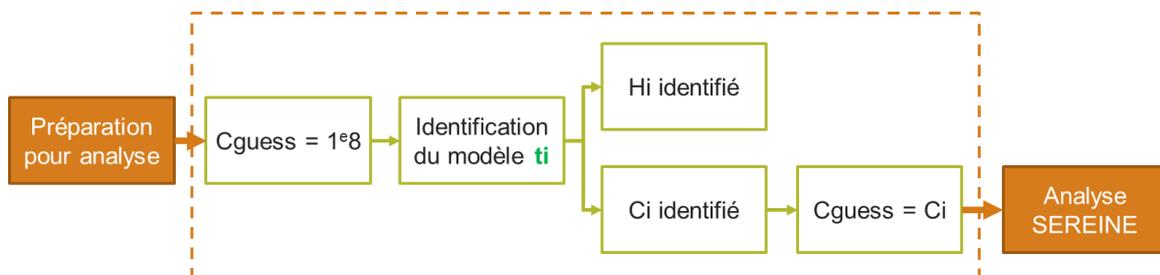


FIGURE 41 : ALGORITHME POUR L'ESTIMATION DE LA CAPACITE GLOBALE (Cguess) DU BATIMENT (CAS SANS FICHIER RSET).

Une comparaison des deux méthodes d'estimation sur un jeu d'essais a montré que la nouvelle méthode permettait d'améliorer grandement la stabilité des résultats d'identification du coefficient de déperdition (voir Figure 42).

		Initialisation avec 'ti' améliore stabilité ?							
ordre	modèle	IOB PSA5-1	IOB PSA6-1	IMA PSA6-1	IMA PSA6-2	Mozé	Brest	IBB5 PSA5-3	
1 CL	1	ti	0	0	0	0	0	0	
		tw	0	0	0	0	2	0	
	2	twti	2	2	2	2	2	2	0
		twbti	2	2	2	2	2	2	0
		twtm	1	2	2	3	2	2	0
		twtw2	0	-1	2	0	3	2	0
		twtitm	2	2	2	3	2	0	2
	3	twtw2ti	2	2	2	2	3	2	1
		twtw2bti	2	2	2	2	2	1	1
		twtw2tm	2	1	2	3	2	1	2
twtw2bitm		2	2	2	2	2	2	2	
2 CL	2	twtb	0	2	0	0	2	2	
		twbti	2	1	2	2	2	-1	
	3	twbtm	2	2	2	3	2	1	
		twtw2tb	2	2	2	2	3	-1	
	4	twtbbitm	2	2	2	2	2	2	
		twtw2tbti	2	2	2	2	2	3	
		twtw2tbtm	2	2	2	2	2	2	
		twtw2tbitm	2	2	1	2	1	2	
	3 CL	3	twtb1tb2	3	2	2	1	0	
			twtb1tb2ti	3	2	1	2	3	
4		twtb1tb2tm	2	2	3	2	3	0	
		twtw2tb1tb2	2	2	1	2	1	-1	
5		twtb1tb2titm	1	1	3	2	2	0	
		twtw2tb1tb2ti	2	2	3	1	3	2	
6	twtw2tb1tb2tm	2	2	2	3	2	3		
	twtw2tb1tb2titm	3	1	1	2	2	2		

-1	méthode simple meilleure
0	résultats identiques
1	
2	nouvelle méthode meilleure
3	

FIGURE 42 : RESULTATS DE L'ETUDE COMPARANT L'IMPACT DES DEUX METHODES D'ESTIMATION DE LA CAPACITE THERMIQUE GLOBALE DU BATIMENT SUR LA STABILITE DES RESULTATS D'IDENTIFICATION

Note : La possibilité de choisir la valeur de pré-initialisation a également été implémentée, car il a été montré, lors de l'application de la méthodologie au collectif, qu'en fait ti peut être amené à diverger pour des bâtiments très petits (appartements) ou très grands quand il est initialisé avec la valeur arbitraire 1°8 J/K.

### Initialisation des paramètres de chaque modèle

Pour chaque modèle, les paramètres à initialiser sont :

- Les différentes transmittances du modèle,
- Les différentes capacités du modèle,
- Les températures initiales de chaque nœud.

Les transmittances et les capacités sont estimées à partir de la transmittance et de la capacité globale du bâtiment à l'aide de coefficients dont la valeur est le fruit de l'expérience des chercheurs qui ont travaillé sur cette étude. De la même manière, les températures initiales de chaque nœud sont estimées à partir des températures aux limites initiales.

Par exemple, les paramètres du modèle *twtw2ti* ci-dessous (Figure 43) sont calculés de la façon suivante :

$$\begin{aligned}
 H_i^{ini} &= H_{guess}/0.1 ; H_w^{ini} = H_{guess}/0.3 ; H_e^{ini} = H_{guess}/0.6 \\
 C_i^{ini} &= 0.1 \times C_{guess} ; C_w^{ini} = 0.9 \times C_{guess}/2 ; C_{w2}^{ini} = 0.9 \times C_{guess}/2 \\
 T_w^{ini} &= (2T_i^{init} + T_{ew}^{init})/3 ; T_{w2}^{ini} = (T_i^{init} + 2T_{ew}^{init})/3
 \end{aligned}$$

où  $T_i^{init}$  est la valeur à  $t = 0$  de la température d'air intérieur (mesurée) et  $T_{ew}^{init}$  est la valeur à  $t = 0$  de la température extérieure équivalente (voir 3.2.4/).

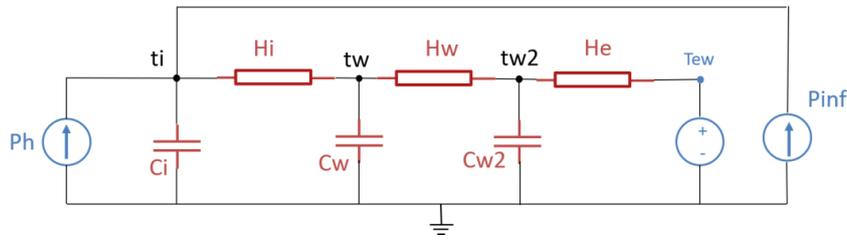


FIGURE 43: REPRESENTATION EN RESEAU RC DU MODELE TWTW2TI

### 3.3.3/ CALCUL DES COEFFICIENTS DE DEPERDITION

Pour l'ensemble des modèles proposés, et une fois la convergence de l'algorithme d'optimisation obtenue, l'estimation du coefficient  $H_{tr}$  correspond à la transmittance équivalente entre les nœuds de température intérieur et extérieur.

$$\hat{H}_{tr} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{\hat{H}_k}}$$

$H_k$  correspond aux transmittances identifiées entre les nœuds de températures intérieures et extérieures.

Une estimation **partielle** de l'incertitude peut être obtenue par propagation directe des variances/covariances des résistances identifiées :

$$\hat{\sigma}_{H_{tr}} = \sqrt{J \text{cov}(\hat{H}_k) J}$$

$\text{cov}(\hat{H}_k)$  correspond à la matrice de variance/covariance des résistances identifiées. Elle est obtenue par la décomposition du profil de vraisemblance optimale. Pour cela, la dérivée seconde ou hessienne de la vraisemblance  $H_{\theta=\hat{\theta}}$  est évaluée par un ensemble de différences finies.

La matrice est ensuite décomposée sous la forme :

$$H_{\hat{\theta}}^{-1} = \sigma_{\hat{\theta}}^T G \sigma_{\hat{\theta}}$$

Avec  $\sigma_{\hat{\theta}}$ , la matrice diagonale des écarts-types respectifs des paramètres identifiés de G la matrice correspondante de corrélation.  $\text{cov}(\hat{H}_k)$  représente uniquement la partie de la matrice de  $H_{\hat{\theta}}^{-1}$  correspondant aux résistances thermiques d'intérêt.

J correspond à la matrice jacobienne du coefficient  $H_{tr}$  :

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial \hat{H}_{tr}}{\partial \hat{H}_{1,PL}} & \dots & \frac{\partial \hat{H}_{tr}}{\partial \hat{H}_{n,PL}} & \frac{\partial \hat{H}_{tr}}{\partial \hat{H}_{1,Pl}} & \dots & \frac{\partial \hat{H}_{tr}}{\partial \hat{H}_{m,Pl}} \\ \frac{-1}{(\sum_{k=1}^n \hat{H}_{k,PL})^2} & \dots & \frac{-1}{(\sum_{k=1}^n \hat{H}_{k,PL})^2} & \frac{-1}{(\sum_{k=1}^m \hat{H}_{k,Pl})^2} & \dots & \frac{-1}{(\sum_{k=1}^m \hat{H}_{k,Pl})^2} \end{pmatrix}$$

Le calcul du coefficient HLC se fait exactement de la même manière. Dans ce cas, les  $H_k$  intègrent les déperditions par infiltration.

## 3.4/ BANQUE DE MODELES ET METHODE DE SELECTION

La méthode SEREINE ne repose pas sur l'utilisation d'un unique modèle thermique de bâtiment mais permet, en se basant sur des critères statistiques, de sélectionner le plus adéquat parmi une banque de modèles prédéfinis.

Dans un premier temps, nous décrirons cette banque de modèles avant d'aborder la méthode de sélection utilisée.

## Configurations type

Nous avons vu précédemment que les modèles thermiques sont toujours composés de transmittances et de capacités modélisant les différents éléments du bâtiment. Cependant, le nombre de transmittances et de capacités, ainsi que la manière dont celles-ci sont réparties diffèrent selon les modèles.

Les deux modèles les plus simples sont le modèle *tw* et le modèle *ti*. Le modèle *tw* ne comporte qu'une capacité représentant l'inertie des différentes parois déperditives, placée entre deux transmittances (inverse des résistances thermiques) qui représentent les parties internes et externes de ces parois. Le modèle *ti*, lui, ne comporte qu'une capacité représentant l'ensemble de l'inertie du bâtiment liée au nœud d'air, ainsi qu'une unique transmittance représentant l'ensemble des parois déperditives. Ces deux modèles sont représentés en Figure 44.

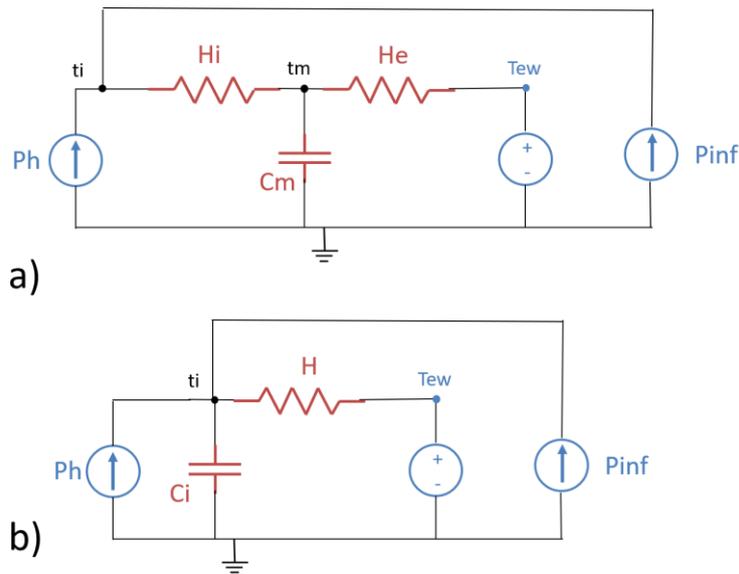


FIGURE 44: SCHEMA DESCRIPTIF DES MODELES TW (A) ET TI (B)

À partir de ce modèle de base, on retrouvera les configurations-type suivantes :

- Combinaison des configurations *ti* et *tw* avec l'ajout au modèle *tw* d'une capacité liée au nœud d'air intérieur.

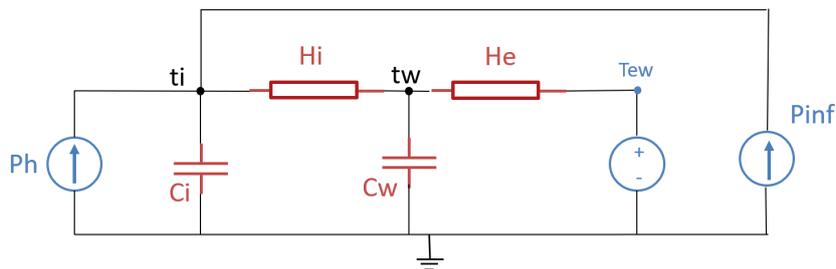


FIGURE 45: REPRESENTATION EN RESEAU RC DU MODELE TWTI

- Ajout d'une capacité supplémentaire associée aux parois. On obtient ainsi une description plus fine de l'enveloppe extérieure.

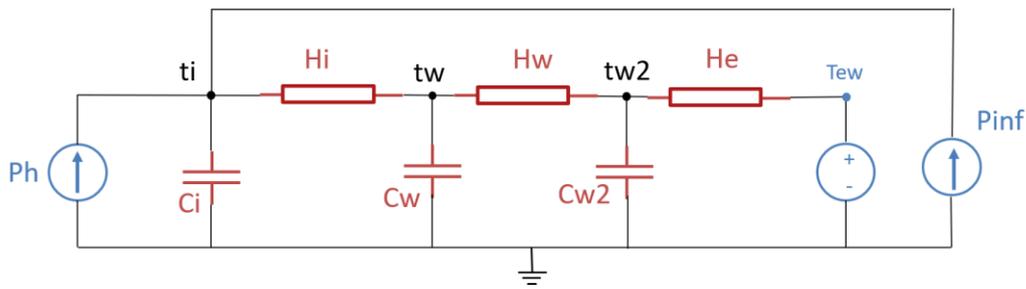


FIGURE 46: MODELISATION EN RESEAU DU MODELE TWTW2TI

- Ajout d'une capacité supplémentaire sur la masse interne reliée au nœud d'air par une résistance. Ainsi, l'inertie thermique est assimilée en partie sur l'enveloppe extérieure et sur la masse interne (cloisons internes, mobilier, dalles) qui se retrouve alors séparée du nœud d'air intérieur et permet une représentation plus fine de l'inertie intérieure (en considérant les échanges thermiques entre l'air et la masse interne).

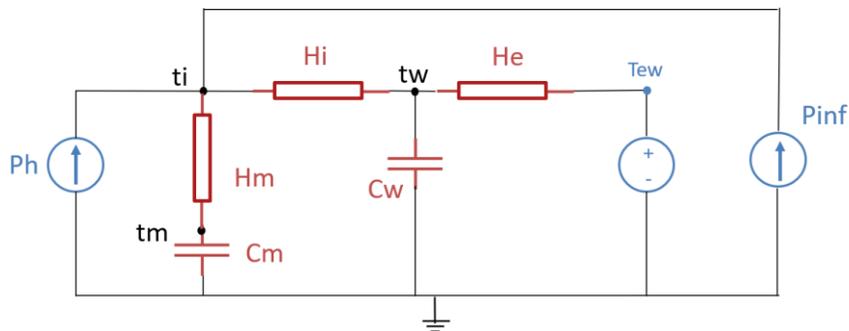


FIGURE 47: REPRESENTATION EN RESEAU RC DU MODELE TWTM

- Ajout d'une transmittance sans inertie associée afin de modéliser les ponts thermiques et parois légères (fenêtres).

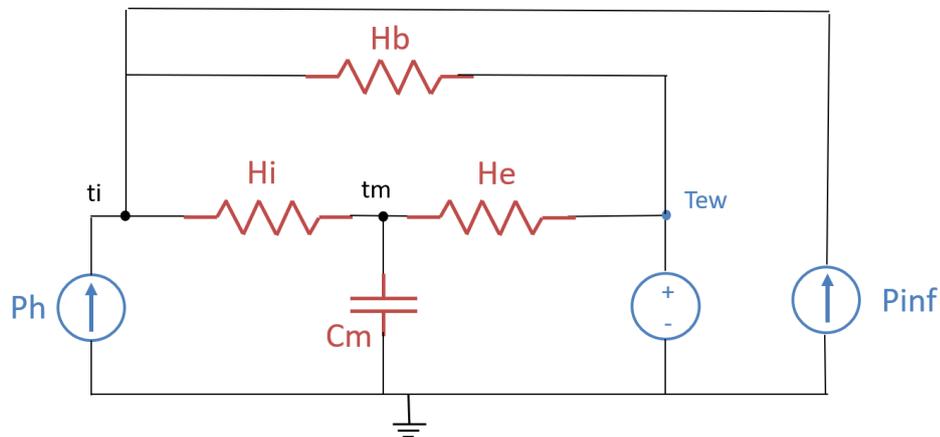


FIGURE 48 : REPRESENTATION EN RESEAU RC DU MODELE TWB

Par ailleurs, nous avons vu en partie 3.2.4/ que lorsque des espaces adjacents non chauffés existent, il est possible de calculer des conditions limites supplémentaires liées à ces espaces. Ainsi, l'ensemble des modèles pourra être décliné en des versions avec une, deux ou trois conditions limites. Reprenons l'exemple du modèle *tw* et d'une maison avec combles perdus et garage. La Figure 49 fait apparaître les différentes versions du modèle selon le nombre de conditions aux limites utilisées. Il est à noter que, dans le cas de conditions limites additionnelles multiples, la banque de modèles est complétée avec des variantes pour évaluer toutes les combinaisons possibles. Dans cet exemple, illustré à la Figure 49, le modèle de l'image b) est répliqué avec la condition limite  $T_{b\_garage}$  à la place de  $T_{b\_combles}$  pour former une quatrième variation.

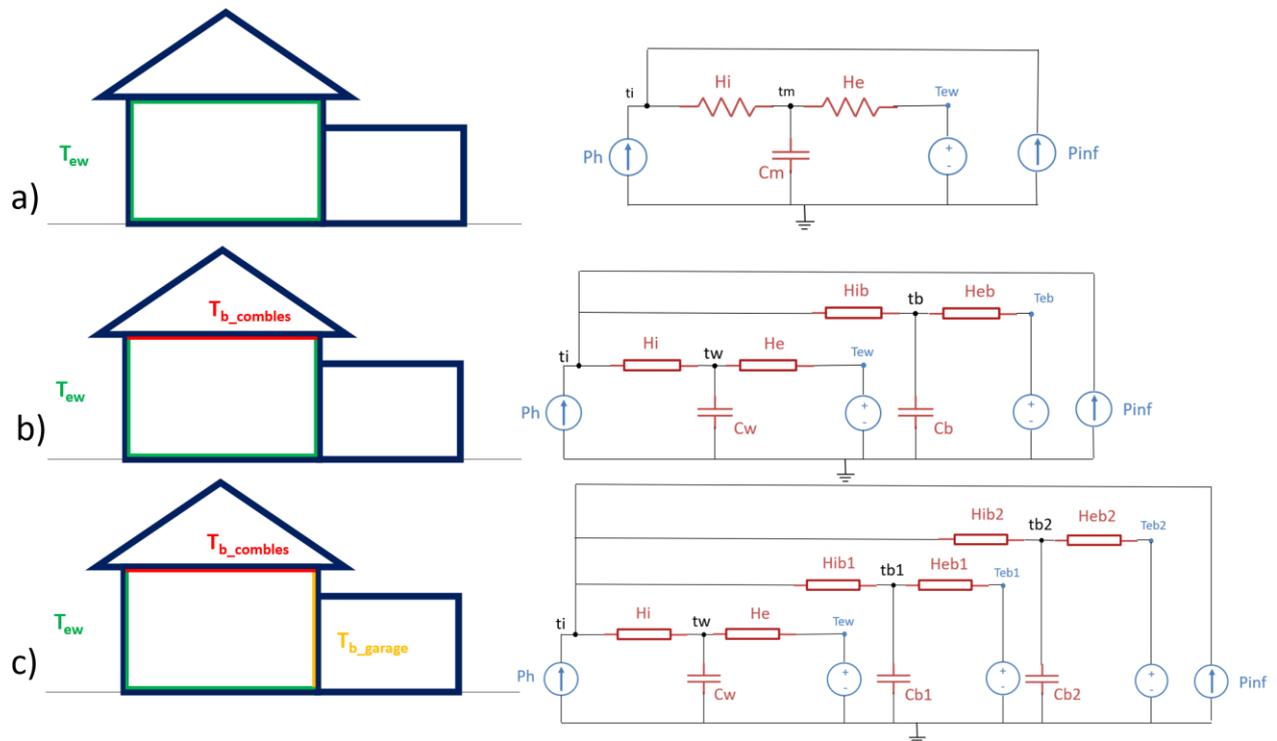


FIGURE 49: VARIATION DU MODELE TW (A) EN AJOUTANT UNE (B) OU DEUX (C) CONDITIONS AUX LIMITES POUR FORMER RESPECTIVEMENT LES MODELES TWTB ET TWTB1TB2

### Nomenclature et liste des modèles

Afin de désigner de la façon la plus claire possible les modèles proposés, chacun d'entre eux est nommé en fonction de ses nœuds associés à une capacité. Le nom de ces nœuds est fonction de leur position et de l'élément qu'ils représentent. Ainsi :

- un nœud associé à une capacité représentant les murs extérieurs sera dénommé  $tw$ . Si les parois sont modélisées avec deux capacités, le nœud associé à la seconde sera dénommé  $tw2$ ,
- le nœud associé à l'air intérieur sera dénommé  $ti$  et figurera dans le nom du modèle s'il est associé à une capacité,
- un nœud associé à une capacité représentant la masse interne sera dénommé  $tm$ ,
- en présence d'une transmittance non associée à une capacité, on ajoutera  $b$  au nom du modèle,
- en présence de conditions aux limites supplémentaires dues à des espaces adjacents, le nœud associé à cet ensemble de paroi sera dénommé  $tb$ . Si deux espaces adjacents sont considérés, les nœuds associés seront dénommés  $tb1$  et  $tb2$ .

Il est ainsi possible de déterminer la forme de l'ensemble des modèles de la banque. Ceux-ci sont répertoriés dans le tableau suivant. Pour chaque modèle, on indiquera :

- Son nom suivant la nomenclature qui vient d'être explicitée,
- Son ordre, soit le nombre de capacités qu'il contient,
- Son nombre de conditions limites,
- Son degré de liberté, soit le nombre de paramètres qui sont optimisés lors du processus d'identification.

Nom	Ordre	Conditions limites	Degrés de liberté
ti	1	1	6
tw	1	1	7
tib	1	2	7
tib2	1	3	8
twti	2	1	11
twbti	2	1	12
twtm	2	1	12
twtw2	2	1	12
twtb	2	2	13
twtitm	3	1	16
twtw2ti	3	1	16
twtw2bti	3	1	17
twtw2tm	3	1	17
twtbti	3	2	17
twbtm	3	2	18
twtw2tb	3	2	18
twtb1tb2	3	3	19
twtbtitm	4	2	22
twtw2bti	4	2	22
twtw2btm	4	2	23
twtb1tb2ti	4	3	23
twtb1tb2tm	4	3	24
twtw2tb1tb2	4	3	24
twtw2btitm	5	2	27
twtb1tb2titm	5	3	28
twtw2tb1tb2ti	5	3	28
twtw2tb1tb2tm	5	3	29
twtw2tb1tb2titm	6	3	33

### 3.4.2/ SELECTION DU MODELE

Le choix de la méthode de sélection du modèle a fait l'objet d'une étude (détaillée en partie 4.5/). Il en a résulté une méthode de type imbriquée, utilisant comme critère statistique discriminant le *Critère d'Information Bayésien (BIC)*. Une méthode de type imbriquée signifie qu'on se base sur une arborescence des modèles qui est parcourue par l'algorithme de sélection.

Dans la suite, la logique permettant la construction de l'arborescence ainsi que l'algorithme permettant de la parcourir sont présentés.

#### Arborescence de modèles

Pour les besoins de l'algorithme de sélection de modèle, une arborescence des modèles de la banque a été créée. Cette arborescence représente les modèles du plus simple au plus complexe et leurs relations parent/enfant. Le passage d'un modèle parent à un modèle enfant se fait avec l'ajout d'une complexité, qui peut être un nœud thermique ou une résistance. Par exemple, le modèle *twtm*, vu précédemment, a pour parents les modèles *ti* et *tw*, car il est la combinaison de ces deux modèles. En le complexifiant, il donne les modèles enfants *tw(b) ti*, *twti(tm)*, *tw(tw2) ti* et *tw(tb) ti*. Ainsi, on peut parcourir l'arbre en partant d'un modèle très simple, puis en le complexifiant progressivement.

Cette procédure permet alors de s'assurer d'une montée en complexité progressive et d'éviter le surapprentissage. L'utilisation d'un modèle complexe n'est permise qu'à la condition qu'au moins un de ses parents donne des résultats pertinents. Ainsi, seul le modèle qui donne le meilleur résultat vis-à-vis du critère statistique sera complexifié. Les enfants de ce modèle sont alors évalués et comparés au résultat du modèle parent, jusqu'à minimisation du critère BIC.

La Figure 50 ci-dessous présente l'arborescence de la banque de modèles de SEREINE, afin de garder une certaine lisibilité. Les variantes associées aux conditions limites additionnelles ne sont pas présentées.

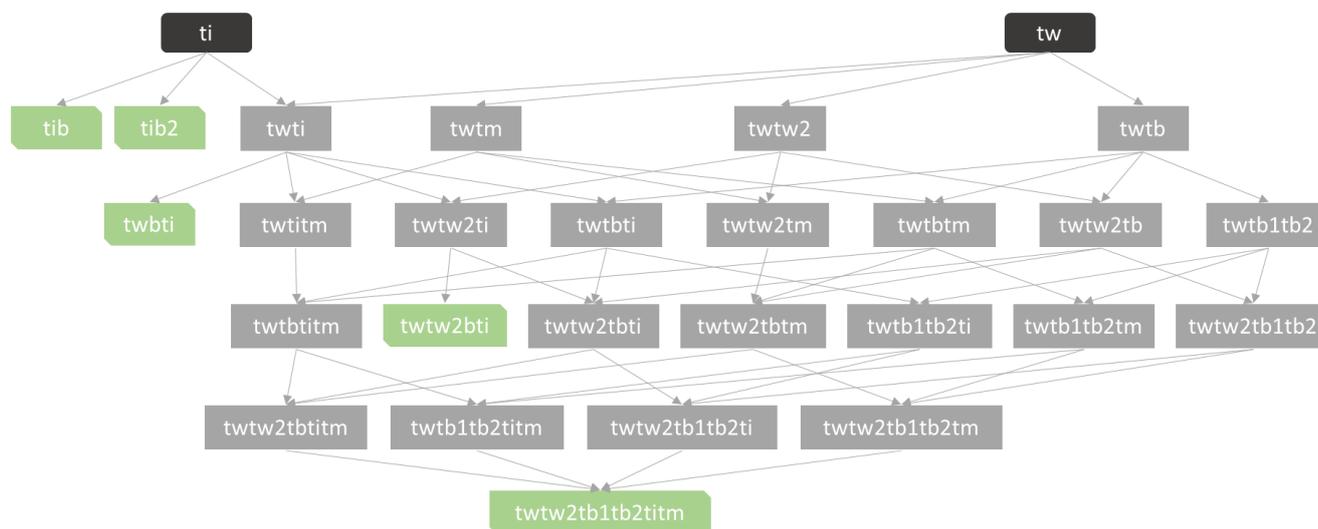


FIGURE 50 : ARBORESCENCE DES MODELES DE LA BANQUE ACTUELLE. TI ET TW SONT LES MODELES « RACINE » : ILS N'ONT PAS DE PARENT. LES MODELES EN VERT SONT DES MODELES « FEUILLE » : ILS N'ONT PAS D'ENFANT.

## Critère BIC

Le Critère d'Information Bayésien (BIC) est défini comme suit :

$$BIC = -2 \ln(L) + k \ln(n)$$

avec  $L$  la vraisemblance du modèle estimée (voir partie 3.3/),

$n$  le nombre d'observations dans l'échantillon

et  $k$  le nombre de degrés de liberté du modèle.

On cherche à minimiser ce critère. Ainsi, plus la valeur du  $BIC$  est faible, meilleur est le modèle. Le paramètre  $L$  favorise les modèles donnant la meilleure précision alors que le paramètre  $k$  permet de pénaliser les modèles plus complexes. Ce critère réalise donc un compromis entre précision et complexité, ce qui a pour grand avantage de permettre une comparaison entre des modèles de complexité différente.

## Méthode de sélection

L'algorithme de sélection de modèle pour un cas d'études est le suivant :

1. La liste des modèles est obtenue en fonction du nombre de conditions limites présents dans les données du cas d'étude et des autres paramètres utilisateurs, tels que l'ordre maximum de modèles souhaité, le nombre maximum d'inconnues, etc.
2. L'arborescence entre ces modèles est construite et les modèles parents sont identifiés, généralement  $ti$  et  $tw$ .
3. Identification des coefficients de déperdition de  $ti$  et  $tw$ . Le modèle qui a le meilleur BIC est considéré comme le meilleur candidat temporaire.
4. Les nouveaux modèles candidats sont recherchés dans l'arborescence, ce sont les enfants directs du meilleur candidat temporaire de l'étape précédente.

5. Identification des coefficients de déperdition de ces modèles. Les modèles n'ayant pas convergé ou ayant une incertitude menant à des valeurs aberrantes sont exclus. Parmi ceux qui restent, le modèle qui a le meilleur BIC est considéré comme le nouveau meilleur candidat.
6. Comparaison des BIC du meilleur candidat temporaire (étape 3) et du nouveau meilleur candidat (étape 5).
7. Si c'est le BIC du meilleur candidat temporaire (étape 3) qui est le meilleur, alors l'algorithme s'arrête là et c'est ce modèle qui est sélectionné.
8. Si c'est le BIC du nouveau meilleur candidat (étape 5) qui est le meilleur, alors ce modèle devient le meilleur candidat temporaire et l'algorithme reprend à l'étape 4. Dans le cas où le meilleur candidat temporaire n'a pas d'enfants (c'est déjà le modèle le plus complexe), l'algorithme s'arrête là et c'est ce modèle qui est sélectionné.

## 3.5/ ESTIMATION DES INCERTITUDES

### 3.5.1/ PROPAGATION DES INCERTITUDES SYSTEMATIQUES

Nous avons vu en partie 3.3.3/ qu'un coefficient de déperdition avait pu être identifié, associé à une incertitude **partielle**. Cette incertitude partielle ne prend en compte que les composantes d'incertitude de nature aléatoire, soit indépendante à chaque pas de temps. Ces sources d'incertitude aléatoires comportent le bruit des capteurs de mesure de température intérieure ainsi que les erreurs aléatoires liées au modèle.

Il existe par ailleurs un grand nombre de source d'incertitude dont la valeur est identique sur toute la durée du test. On parle d'incertitudes systématiques.

#### Quantification des erreurs systématiques

Les erreurs systématiques concernent autant les données d'entrée au modèle que celles ayant servi à leur calcul (ex : calcul des températures équivalentes, du débit d'infiltration...). Les variables suivantes ont été considérées :

Concernant les séries temporelles mesurées :

- $T_i$  Température d'air intérieur, en K
- $T_a$  Température d'air extérieur, en K
- $T_{em, s1}$  Température extérieure équivalente du revêtement sombre des capteurs de *façade* mesurée, en K
- $T_{em, s2}$  Température extérieure équivalente du revêtement clair des capteurs de *façade* mesurée, en K
- $V$  Vitesse de vent, en m/s
- $P_h$  Puissance électrique de chauffage, en W
- $T_{tampon}$  Température des espaces-tampon (garage, vide sanitaire, combles...) non fournis en capteur de température, en K
- $T_{terreplein}$  Température des surfaces sur terre-plein, en K

Concernant les données issues de la mesure :

- $C_L$  Coefficient de fuite globale du bâtiment, en  $m^3/h/Pa^n$
- $n$  Exposant de fuite du bâtiment
- $\alpha_{e, s1}$  Coefficient d'absorption énergétique du revêtement sombre des capteurs de *façade*
- $\alpha_{e, s2}$  Coefficient d'absorption énergétique du revêtement clair des capteurs de *façade*

Concernant les données conventionnelles :

- $CP_s$  Coefficient de pression des composants sous le vent
- $CP_t$  Coefficient de pression des composants de toiture
- $CP_v$  Coefficient de pression des composants au vent
- $\alpha_{e, p}$  Coefficient d'absorption énergétique du revêtement de la paroi considérée

- $h_c$  Coefficient de transfert convectif intérieur, en  $W/m^2/K$
- $h_{rad}$  Coefficient de transfert radiatif intérieur, en  $W/m^2/K$

L'ensemble des incertitudes a été chiffré de manière sécuritaire de manière à ne pas sous-estimer l'incertitude du résultat final.

### Méthode de propagation

La méthode de propagation consiste à réaliser des « tirages » de ces biais multiples parmi leurs valeurs possibles, puis d'appliquer à chaque fois la méthode décrite en partie 3.3/. Chaque tirage permet d'obtenir une loi de probabilité dite « normale » sur l'indicateur mesuré HLC (ou Htr).

En pratique, les tirages aléatoires sont réalisés par un échantillonneur de Sobol <sup>4</sup>. Un nombre maximum de 300 tirages est défini. Cependant, une identification ne sera pas forcément réalisée sur l'ensemble de ces tirages. En effet, toutes les 10 inversions, les indices de Sobol du premier ordre sont calculés via la méthode RBD-Fast <sup>5</sup>. Si un critère de convergence relatif à ces indices de Sobol est atteint, les tirages suivants ne feront pas l'objet d'une identification. Cette méthodologie permet de réduire considérablement le temps de calcul.

Les résultats de l'ensemble des tirages ayant permis une identification sont ensuite agrégés afin d'obtenir une nouvelle loi de probabilité (qui n'est pas « normale »), dont il suffit d'extraire l'intervalle de confiance à 95 % (il s'agit de l'intervalle restreint où se situent 95 % des valeurs possibles de la nouvelle loi). Ce principe est explicité sur le schéma suivant :

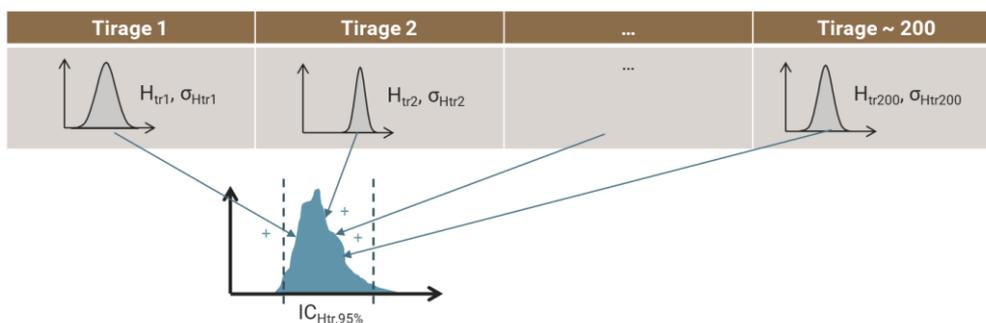


FIGURE 51: SCHEMA EXPLICATIF DE LA PROPAGATION D'INCERTITUDES SYSTEMATIQUES

### 3.5.2/ ESTIMATION DE L'INCERTITUDE DE BIAIS

Le biais correspond à l'écart constaté entre la valeur vraie d'une grandeur mesurée et l'estimation la plus probable fournie par la méthode de mesure, en l'occurrence la valeur de H précédemment mesurée.

Il a été constaté que, malgré les multiples précautions décrites précédemment, le processus d'identification en lui-même génère des biais. Ainsi, des études numériques ont montré que les conditions météorologiques et la durée de l'essai étaient les sources principales de ce biais. En effet, plus l'essai est long et plus la température est fraîche, moins le biais observé est important.

Afin de garantir que l'intervalle d'incertitude contient la valeur recherchée (le H réel du bâtiment), une nouvelle source d'incertitude est ajoutée, l'incertitude de biais. Cette incertitude a été définie via une large étude

<sup>4</sup> Joe, S., & Kuo, F. Y. (2008). Constructing Sobol sequences with better two-dimensional projections. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 30 (5), 2635-2654.

<sup>5</sup> Goffart, J., & Woloszyn, M. (2018, May). RBD-FAST : une méthode d'analyse de sensibilité rapide et rigoureuse pour la garantie de performance énergétique. In *Conférence Francophone de l'International Building Performance Simulation Association IBPSA*.

numérique basée sur le banc d'essai numérique décrit en partie 4.2/. Les résultats de cette étude sont visibles en partie 4.6/.

Elle a permis de quantifier ce biais pour :

- 3 typologies de maison différentes : isolée par l'intérieur (ITI), isolée par l'extérieur (ITE) et sans isolation,
- Des durées d'essai allant de 6 à 96 heures,
- Des températures moyennes pendant l'essai représentatives des climats de l'ensemble de la France métropolitaine.

Elle a permis d'obtenir les courbes visibles en Figure 52 qui présentent pour chacune de ces typologies, l'évolution de l'incertitude de biais en fonction de la température extérieure moyenne durant l'essai.

Cette incertitude va être combinée (par moyenne quadratique) à l'incertitude issue de la propagation des erreurs systématiques. Le résultat obtenu est le résultat final produit par l'analyse SEREINE.

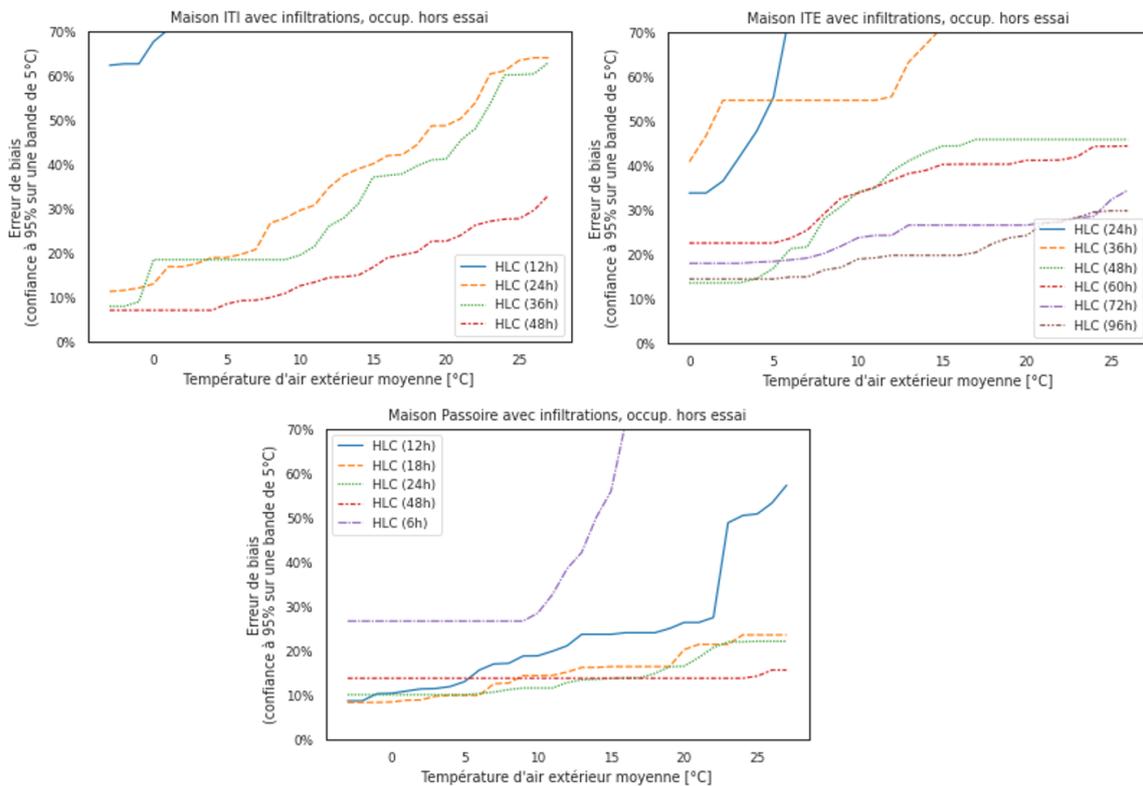


FIGURE 52: INCERTITUDE DE BIAIS POUR LES 3 TYPOLOGIES EN FONCTION DE LA DUREE DU TEST ET DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE MOYENNE

## 4/ OPTIMISATION DE LA METHODE ENVELOPPE

### 4.1/ DETERMINATION DE LA SOLLICITATION THERMIQUE

Les premières versions de la méthode SEREINE utilisaient comme sollicitation thermique un créneau de puissance constante (voir Figure 53). La durée recommandée pour un test était alors de 48h sur une maison isolée par l'intérieur. L'incertitude sur le résultat était cependant importante. Ce signal sera noté par la suite Sereine V0 ou SE0.

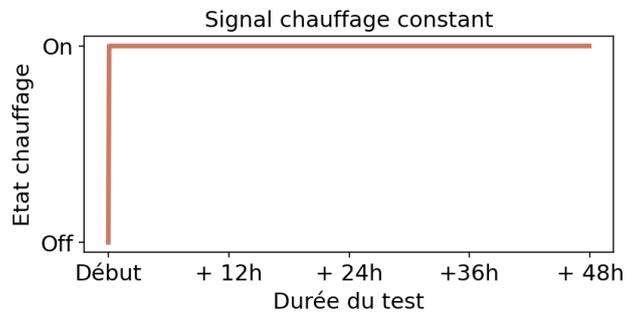


FIGURE 53: SOLLICITATION THERMIQUE UTILISEE DANS LES VERSIONS 0 ET 1 DE LA METHODE SEREINE (SIGNAL SE0)

La littérature en automatique et identification de systèmes proposait d'autres formes de signaux, plus riches en termes de fréquences sollicitées. L'un d'eux est la séquence binaire pseudo-aléatoire (PSA) dont un exemple est visible en Figure 54.

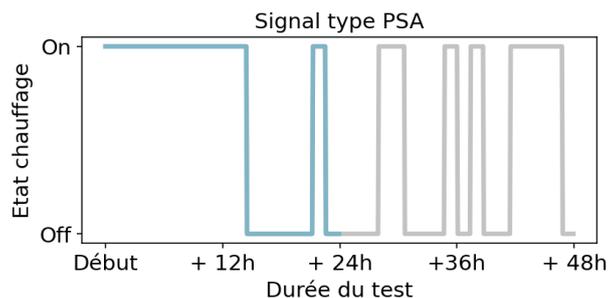


FIGURE 54: EXEMPLE D'UN SIGNAL PSA

Des études préliminaires ont alors montré que sur une durée de 24h ces signaux donnaient de meilleurs résultats que des signaux de type créneaux. Par ailleurs, il est apparu que le résultat différait selon la forme du signal PSA utilisé. Partant de ces constatations, il paraissait possible d'optimiser la forme de ce signal PSA afin de réduire la durée de l'essai tout en garantissant un niveau d'incertitude raisonnable.

Pour proposer un signal de 24h (et valable à 48h) robuste et adapté à une maison individuelle isolée par l'intérieur, les travaux se sont appuyés sur un ensemble d'études numériques : d'abord une étude appelée ici cartographie de signaux, pour concevoir la forme du signal, puis une étude pour réaliser une première quantification de la reproductibilité d'une estimation par un signal donné en fonction des conditions météorologiques. Cette section résume les méthodologies appliquées et les signaux jugés pertinents.

#### 4.1.1/ CARTOGRAPHIE DE SIGNAUX ADAPTES A UNE MAISON INDIVIDUELLE RENOVEE EN ITI

La première étape a été d'évaluer numériquement la qualité de différentes sollicitations par une cartographie de signaux. Le principe est d'utiliser un modèle numérique de très haute définition d'une maison isolée par l'intérieur. Ce modèle, combiné à un fichier décrivant les conditions météorologiques, permet de faire des simulations thermiques dynamiques et produit donc des mesures synthétiques de température intérieure, imitant des mesures de terrain. Les mesures virtuelles permettent alors d'évaluer le coefficient de déperditions

thermiques de l'enveloppe, comme le permettent des mesures terrains. L'avantage considérable d'utiliser des simulations numériques est de tester des dizaines de types de signaux en un temps très raisonnable tout en contrôlant les conditions du test.

Des résultats préliminaires ont montré que certains signaux pseudo-aléatoires semblaient donner, sur 24h d'essai, des résultats satisfaisants. Les signaux de chauffage pseudo-aléatoires alternent entre une puissance maximale et aucune puissance sur la durée du test, formant des créneaux de durées aléatoires. Les signaux de chauffage pseudo-aléatoires provoquent donc une sollicitation thermique dynamique du bâtiment qui favorise l'identification des caractéristiques thermiques de l'enveloppe par les modèles thermiques adéquats. Pour les besoins de la cartographie, 75 signaux différents ont été testés. Pour comparer les signaux entre eux, les durées de créneaux de chauffe et non-chauffe sont calculées pour chacun. Il est alors possible de comparer les signaux selon leur plus long créneau de chauffe, ou selon leur plus long créneau de non-chauffe, appelé dorénavant relaxation. Ce principe est illustré sur la Figure 55.

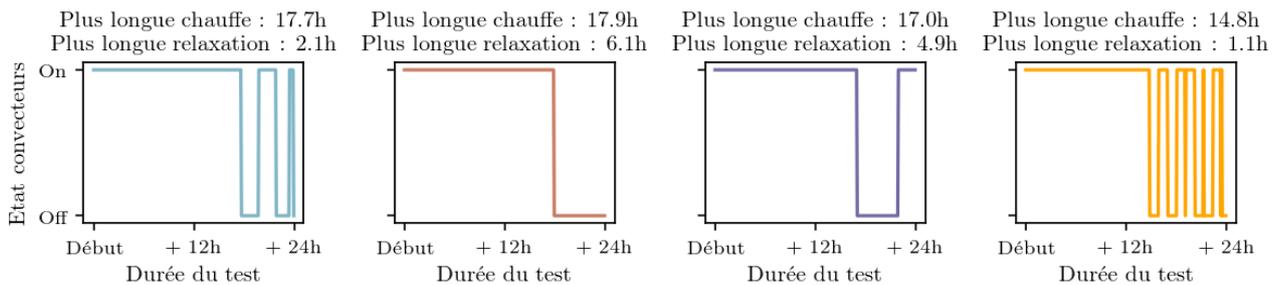


FIGURE 55: DIFFERENTS SIGNAUX PSA CARACTERISES PAR LEUR CHAUFFE ET RELAXATION

Pour évaluer la qualité de l'estimation du coefficient de déperdition thermique obtenue par un signal en particulier, deux éléments sont observés : l'erreur relative de l'estimation à la valeur cible théorique (obtenue numériquement) et l'incertitude de l'estimation. Pour faciliter l'analyse, ces deux éléments sont combinés en un unique indice d'interprétabilité. Cet indice prend une valeur entre 0 et 1 et est calculé à partir d'une erreur relative maximale fixée comme objectif. Par exemple, dans la Figure 56 et dans la suite de l'étude numérique, les résultats sont donnés avec une erreur relative maximale de 10 % (zone grisée sur la figure) : si l'estimation et son incertitude sont entièrement comprises dans l'intervalle d'erreur de 10 %, on considère que l'estimation est très satisfaisante, son indice sera très proche de 1. Au contraire, une estimation en dehors de cette zone ne peut pas être considérée comme satisfaisante et aura un indice quasi-nul. Le choix de l'erreur relative maximale de 10 % plutôt que de 15 % permet d'être plus discriminant sur la qualité des signaux.

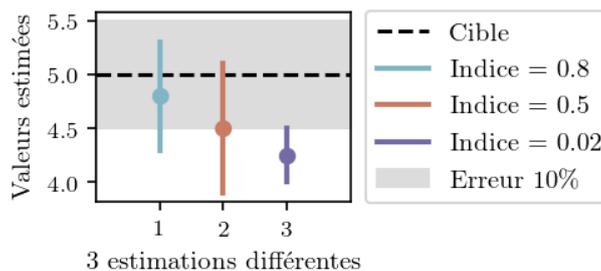


FIGURE 56: ILLUSTRATION DE L'INDICE D'INTERPRETABILITE A 10 %

La Figure 57 montre, en couleur, les indices d'interprétabilité à 10 % en fonction des différents signaux testés représentés par la plus longue durée de chauffe (axe des abscisses) et de la plus longue durée de relaxation (axe des ordonnées). La distribution des points en diagonale montre une contrainte à droite : la somme ne pouvant excéder 24h, un signal de chauffe de 18h ne peut pas avoir une relaxation au-delà de 6h, etc. L'intérêt de la figure est d'identifier des caractéristiques communes de signaux performants (i.e. à indices élevés). Ainsi, on observe une zone de plusieurs signaux à indices élevés proches les uns des autres, du côté gauche de la figure. Des signaux de plus longue chauffe inférieure à 17h et de plus longue relaxation supérieure à 2h30 donnent d'excellents résultats d'interprétabilité. La contiguïté des points sur la figure permet d'attribuer une confiance élevée dans ces caractéristiques. La contiguïté permet aussi de supposer que des signaux semblables, même si légèrement différents, donnent un résultat très similaire, donc permet de supposer que ce type de signal est plutôt robuste notamment à des variations raisonnables de la composition des parois

(épaisseur de l'isolant, etc.). Au contraire, le seul point vert foncé en bas à gauche est voisin d'un point de très faible interprétabilité. Ce signal risque donc d'être peu robuste et n'est donc pas étudié. Enfin, la figure met en évidence par une croix noire, un signal en particulier qui est testé dans la partie ci-dessous, concernant l'étude de robustesse, et qui a été mis en œuvre dans les essais expérimentaux de validation.

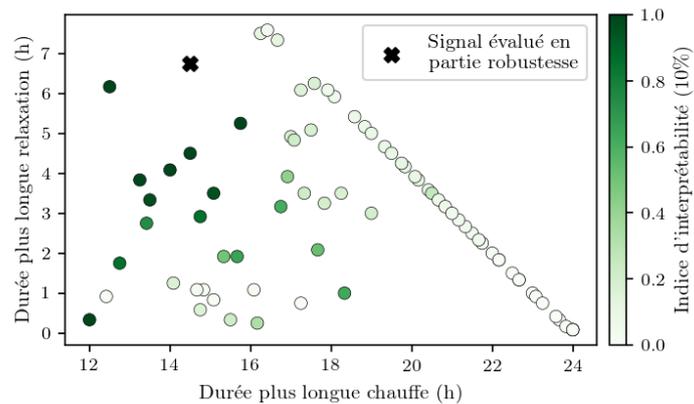


FIGURE 57: INDICES D'INTERPRETABILITE A 10 % POUR DIFFERENTS SIGNAUX

En conclusion de cette première étude numérique, l'estimation précise du coefficient de déperdition thermique en 24h semble être facilitée par des signaux de chauffage qui partagent certaines caractéristiques : une durée de chauffe inférieure à 17h et une durée de relaxation d'au moins 2h30. Les résultats permettent donc de dégager plusieurs signaux prometteurs, a priori plutôt robustes, dont l'un a pu, d'une part, être expérimenté sur site et qui fait, d'autre part, l'objet de la deuxième étude numérique dans laquelle sa robustesse vis-à-vis des conditions météorologiques est évaluée.

#### 4.1.2/ ÉTUDE NUMERIQUE DE LA ROBUSTESSE D'UN SIGNAL DE 24H VIS-A-VIS DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

Pendant un essai, outre les conditions intérieures contrôlées, l'enveloppe du bâtiment est soumise aux variations des conditions extérieures, qui sont, elles, non maîtrisées. Même si les conditions intérieures sont optimisées par la régulation de la puissance de chauffage délivrée, un essai de 24h effectué en conditions hivernales rudes pourrait donner des résultats ou incertitudes différents d'un essai conduit au printemps.

Pour évaluer la robustesse de l'estimation du coefficient Htr (ou HLC) par un signal pseudo-aléatoire vis-à-vis de la variabilité des conditions météorologiques, une deuxième étude numérique a été conduite. À un signal de chauffage donné, des mesures synthétiques sont produites en variant les conditions extérieures et ce, pour deux types de climats. Deux sets de 1 000 mesures synthétiques ont ainsi été produits, avec pour chaque jeu de données synthétiques des conditions météorologiques variables. Celles-ci sont représentatives de conditions hivernales typiques d'un climat océanique tempéré pour l'un et d'un climat méditerranéen pour l'autre. La robustesse d'une estimation de HLC peut alors être évaluée pour une vaste plage de conditions extérieures.

Pour la première partie de l'analyse, un seul des deux climats est étudié : le climat océanique tempéré qui correspond à celui des tests en conditions réelles qui seront présentés dans la partie suivante. Deux aspects peuvent être abordés dans cette partie de l'étude : d'une part, la variabilité des estimations pour notamment comparer plusieurs signaux entre eux, puis, d'autre part, étudier les variables météorologiques à l'origine de la dispersion observée. Pour commencer, la Figure 58 montre la dispersion des deux sets de 1 000 estimations de HLC (une estimation par condition météorologique). Cette dispersion est obtenue pour 3 types d'essais virtuels : à partir d'essais virtuels du signal Sereine v0 en 48h, du signal PSA retenu précédemment en 48h ou du signal PSA en 24h. On visualise ainsi l'erreur relative à la valeur cible, sans tenir compte de l'incertitude de chaque estimation dans un premier temps.

Les estimations de HLC par le signal PSA à 48h sont pour la grande majorité des résultats dans la zone cible de 10 % d'erreur relative. À durée égale, ces estimations sont bien meilleures que celles obtenues à partir d'un signal Sereine v0 de 48h. Même à durée de 24h, le signal PSA permet une estimation du HLC plus

souvent plus précise. Ainsi, on peut conclure que le signal PSA retenu est bien plus performant, même à 24h, qu'un signal Sereine v0. On constate également que les estimations obtenues en climat méditerranéen, représentées en vert pointillé, sont plus dispersées avec un PSA 24h qu'en climat océanique tempéré en ligne pleine.

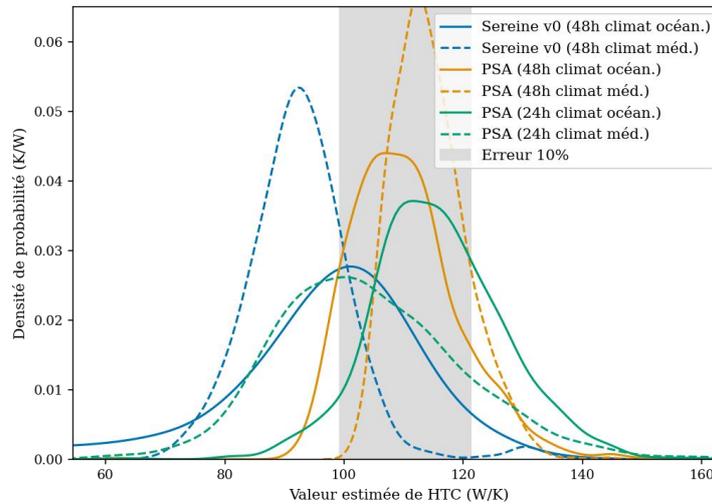


FIGURE 58: DENSITE DE PROBABILITE DU HLC IDENTIFIEE POUR DIFFERENTS SIGNAUX ET DEUX CLIMATS

Pour compléter cette première analyse, on peut inclure la notion d'incertitude de l'estimation au travers de l'indice d'interprétabilité. Pour rappel, cet indice, défini par exemple à 15 %, est calculé comme la proportion de l'incertitude dans la bande d'erreur à 15 %. La Figure 59 ci-dessous donne les distributions cumulées des indices d'interprétabilité à 15 % pour les signaux testés et pour chaque climat : PSA à 24h et 48h ainsi que Sereine v0 à 48h. Cette visualisation permet de lire les proportions des 1 000 essais virtuels pour chaque signal au-delà ou en deçà d'une valeur d'interprétabilité donnée. Il est possible de comparer simplement la performance des différents signaux en observant ces graphiques. En effet, les meilleurs signaux sont ceux dont la plus large proportion présente une interprétabilité élevée. Il s'agit donc des courbes situées le plus bas dans le graphique.

On constate alors que le PSA donne en 24H de bien meilleurs résultats que SEREINE v0 en 48h. Par ailleurs, on observe que, si à 24h le signal PSA donne de meilleurs résultats sur un climat océanique qu'un climat méditerranéen, ces différences se lissent lorsque la durée de l'essai est portée à 48h.

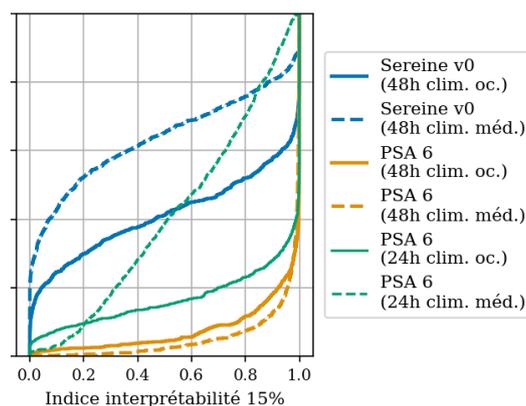


FIGURE 59: INDICES D'INTERPRETABILITE A 5, 10 ET 15 % POUR LES DIFFERENTS SIGNAUX ET CLIMATS

### 4.1.3/ CONCLUSIONS

Les essais virtuels menés dans cette étude ont permis de déterminer une sollicitation thermique permettant d'identifier les coefficients de déperdition du bâtiment en 24h. Il a été montré que cette sollicitation thermique permettait d'obtenir en 24h un meilleur résultat que ce qui était précédemment obtenu en 48h. Cette observation a pu être confirmée expérimentalement par la suite. Il a également été constaté que le signal

identifié donnait de meilleurs résultats lorsque la température était plus fraîche mais qu'un test plus long pourrait s'avérer nécessaire lors des périodes plus douces. La continuité de ce travail sera donc de déterminer précisément le domaine d'application de la méthode en 24h et 48h. Ces travaux seront abordés en partie 4.6/.

## 4.2/ PRESENTATION DU BANC D'ESSAI VIRTUEL

Afin de compléter les résultats présentés précédemment, un banc d'essai virtuel a été développé, permettant de contrôler tous les paramètres des essais et de faciliter le test de toutes les configurations souhaitées. Le banc d'essai est constitué d'un ensemble de modèles de maisons qui permettent de reproduire le comportement de bâtiments typiques, ainsi que d'une bibliothèque de climats représentatifs de la France métropolitaine. Il est donc possible de simuler la réponse d'un bâtiment à une sollicitation thermique choisie quelle que soit sa position en France.

Les paragraphes suivants décrivent les différents éléments du banc d'essai, ainsi que le plan de simulation qui a été mis en œuvre.

### 4.2.1/ MODELES DE MAISON INDIVIDUELLE

Les modèles de maisons individuelles ont été développés dans le logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus. Quatre typologies de bâtiments ont été modélisées. Elles sont présentées dans la suite.

#### Maison isolée thermiquement par l'intérieur (ITI)

Le cas d'étude utilisé est similaire à celui de la partie 4.1/. C'est une maison individuelle ITI type de 100 m<sup>2</sup> sur deux étages avec combles et vide sanitaire, située dans un environnement sans masque solaire. Une version sans infiltrations a été développée pour analyser l'impact de ces dernières sur les résultats des différentes études. Cette version permet également la détermination du coefficient Htr. Des variantes avec et sans occupation de la maison, notamment durant le test, ont également été développées. L'occupation est prise en compte par l'ajout de charges internes, d'une ventilation et de protections solaires pendant l'été. Le tableau ci-dessous résume les différentes versions disponibles :

		Occupation	
		oui	non
Infiltrations	oui	<b>ITI_v1_schedule_v2</b>	ITI_v1_schedule_v1
	non	ITI_v2_schedule_v2	<b>ITI_v2_schedule_v1</b>

TABLEAU 1 : NOM DES DIFFERENTES VARIANTES DU MODELE DE MAISON ITI.  
LES VARIANTES EN GRAS REPRESENTENT LES DEUX EXTREMES.

#### Maison non isolée (passoire thermique)

Dans cette configuration, les performances thermiques du bâtiment ont été largement réduites. Par rapport au modèle de base ITI, l'isolation des murs et du plancher est supprimée, l'isolation des combles passe de 30cm à 2cm, les déperditions des vitrages sont augmentées ainsi que les infiltrations. Afin de permettre une élévation des températures intérieures malgré ces déperditions, un nombre plus important d'émetteurs est mis en place lors de l'essai.

De même que pour le modèle ITI, quatre variantes du modèle existent en fonction de la présence ou non d'infiltrations et d'occupation : Pas\_v1\_schedule\_v1, Pas\_v1\_schedule\_v2, Pas\_v2\_schedule\_v1 et Pas\_v2\_schedule\_v2.

#### Maison isolée thermiquement par l'extérieur (ITE)

Pour représenter une isolation par l'extérieur, les couches d'isolant sont placées à l'extérieur des murs plutôt qu'à l'intérieur. Les caractéristiques de ces couches (épaisseur, résistance thermique) sont les mêmes que celles de la maison ITI. En outre, les ponts thermiques sont réduits de 40 % par rapport à la maison ITI.

Quatre variantes du modèle existent en fonction de la présence ou non d'infiltrations et d'occupation : ITE\_v1\_schedule\_v1, ITE\_v1\_schedule\_v2, ITE\_v2\_schedule\_v1 et ITE\_v2\_schedule\_v2.

## 4.2.2/ CLIMATS

Les modèles présentés précédemment ont été évalués sur un ensemble de 21 climats métropolitains français et frontaliers, afin de tester la robustesse des résultats sur l'ensemble du territoire de la métropole. La Figure 60 indique l'emplacement de ces climats.

Les fichiers utilisés sont issus de la base fournie avec le logiciel de calcul EnergyPlus, Ils sont accessibles à l'adresse <https://energyplus.net/weather>. Ce sont des fichiers IWECC (International Weather for Energy Calculation) produit par l'ASHRAE<sup>6</sup>. Ils représentent une année de données météo correspondant aux variabilités typiques du lieu. Cette variabilité typique est analysée pour chaque localisation à partir de plusieurs années (jusqu'à 18 ans) de données horaires.

Chacun de ces fichiers permet donc une analyse annuelle pour une localisation. Le scénario SEREINE est alors appliqué sur différentes périodes au cours de l'année, généralement une fois par semaine soit 51 essais. On réalise ainsi plus de 1 000 analyses pour chaque configuration de bâtiment et chaque scénario. Une étude statistique de ces résultats permet d'avoir une évaluation du comportement de la méthode vis-à-vis des conditions climatiques « typiques » et une estimation de la variabilité associée sur le résultat de sortie.



FIGURE 60 : EMPLACEMENT DES CLIMATS QUI ONT ETE UTILISES DANS LE PLAN D'EXPERIENCE.

<sup>6</sup> American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

#### 4.2.3/ PLAN D'EXPERIENCE

Chaque couple (modèle de maison x climat) a fait l'objet d'une simulation annuelle sur EnergyPlus. Lors de cette simulation numérique, un essai SEREINE de 48h est effectué chaque semaine. Durant cet essai, les volets sont occultés, la maison est non occupée, les infiltrations d'air sont nulles et le signal PSA est appliqué au bâtiment. Entre chaque essai, la consigne de chauffage est fixée à 20°C.

À noter que pour les variantes du modèle ITE, les essais SEREINE ont été rallongés à 96h et ont lieu tous les dix jours, ceci afin de prendre en compte une inertie du bâtiment plus importante.

À l'issue de ces simulations, nous obtenons des jeux de données numériques tels que l'on obtiendrait expérimentalement, à savoir des puissances de chauffages injectées, les températures intérieures des différentes pièces de notre maison virtuelle, les données sur les températures extérieures et toutes les informations météorologiques nécessaires.

Ces données peuvent ensuite être traitées en utilisant le protocole défini dans ce livrable, afin d'estimer le coefficient de déperdition du bâtiment dans différentes conditions. Il est à noter que les identifications peuvent se faire sur différentes longueurs du jeu d'essai, permettant d'évaluer la méthode sur différentes durées d'immobilisation. Cette évaluation nécessite également une valeur de référence des coefficients de déperditions pour les modèles de bâtiment étudiés. La méthode pour obtenir ces coefficients ainsi que les résultats obtenus sont donnés ci-après.

#### 4.2.4/ COEFFICIENTS DE DEPERDITION DE REFERENCE

La valeur de référence pour le coefficient de déperdition de l'enveloppe de chaque modèle de bâtiment est obtenue sur chacun des climats par une évaluation annuelle dans les conditions de l'essai SEREINE (protections solaires actives, sans occupation, sans ventilation), avec une puissance de chauffage auto-dimensionnée et une température de consigne constante de 35°C. La température de consigne fixe permet de supposer un comportement journalier stationnaire. Ainsi, chaque jour les déperditions de l'enveloppe sont compensées par les apports solaires et les apports du système de chauffage :

$$HLC \times \text{degré.jour} + gA_{sol} \times GHI + E_{chauffage} = 0$$

La valeur du coefficient de déperdition thermique  $HLC$  est estimée annuellement par une régression multilinéaire sur ces données journalières de degré.jour intérieur/extérieur, de rayonnement solaire global horizontal et de besoin énergétique de chauffage.

Les résultats pour chacun des climats sont compilés et présentés dans les tableaux « Résultats de co-heating » ci-dessous. Les valeurs statistiques des 21 climats sont présentées ainsi que l'erreur maximale observée lors des différentes régressions.

Les valeurs de  $Htr$  sont obtenues avec des variantes du modèle de bâtiment dans lesquelles les infiltrations sont supprimées. Le coefficient de déperdition est ensuite estimé de la même façon, mais ne dépend alors que de la transmission à travers les parois de l'enveloppe du bâtiment.

Maison ITI	HLC [W/K]	Htr [W/K]
Moyenne	112.89	106.14
Minimum	109.89	103.23
<b>Médiane</b>	<b>112.89</b>	<b>106.72</b>
Maximum	114.51	107.99
Erreur numérique maximale d'identification	0.337	0.341

TABLEAU 2 : RESULTATS DE CO-HEATING POUR LA MAISON ITI.

<i>Passoire thermique</i>	<i>HLC [W/K]</i>	<i>Htr [W/K]</i>
<i>Moyenne</i>	479.30	446.70
<i>Minimum</i>	445.14	412.85
<b><i>Médiane</i></b>	<b>480.99</b>	<b>449.34</b>
<i>Maximum</i>	502.02	468.57
<i>Erreur numérique maximale d'identification</i>	2.371	2.398

TABLEAU 3 : RESULTATS DE CO-HEATING POUR LA PASSOIRE THERMIQUE.

<i>Maison ITE</i>	<i>HLC [W/K]</i>	<i>Htr [W/K]</i>
<i>Moyenne</i>	88.83	81.87
<i>Minimum</i>	85.77	78.87
<b><i>Médiane</i></b>	<b>89.32</b>	<b>82.24</b>
<i>Maximum</i>	90.42	83.58
<i>Erreur numérique maximale d'identification</i>	0.412	0.414

TABLEAU 4 : RESULTATS DE CO-HEATING POUR LA MAISON ITE.

## 4.3/ ÉVALUATION DU VOLUME DE L'INSTRUMENTATION EXTERIEURE

Nous avons vu en partie 3.2.4/ que les températures extérieures équivalentes de parois donnant sur l'extérieur (mur, fenêtres ou rampants) pouvaient être déterminées via l'utilisation des capteurs **F** ou approximées via l'utilisation de données météo.

Cependant, l'utilisation de nombreux capteurs **F** lors d'un essai peut s'avérer fastidieuse. En effet, ces derniers sont placés en extérieur, sur des trépieds. Ces trépieds occupent un volume important lors du transport du matériel. Lors des premiers essais 6 capteurs **F** étaient mobilisés, ce qui compliquait le transport du kit.

Une étude a donc été menée afin de déterminer si la mobilisation d'un nombre de capteurs moindre permettait d'obtenir un résultat équivalent. En effet, la condition aux limites globale utilisée dans l'analyse numérique (Tew) est une somme des températures équivalentes de paroi, pondérée par leur surface et leur coefficient de transmission thermique estimé. Il est donc possible de remplacer dans cette somme certaines des températures équivalentes déterminées par les capteurs **F** par leur valeur approximée, afin d'observer l'impact sur le résultat obtenu.

Cette étude qui était tout d'abord expérimentale et empirique a par la suite été complétée par une étude numérique afin de lever les dernières interrogations.

### 4.3.1/ ANALYSE EXPERIMENTALE

#### Avec sollicitation constante

Dans un premier temps, 13 cas expérimentaux ont été étudiés. Pour chacun de ces cas, une analyse des résultats a été conduite :

- En intégrant les données des capteurs **F** placés en extérieur dans le calcul de la température extérieure équivalente,
- En remplaçant ces données par une valeur approximée à partir de données météo.

Ces cas expérimentaux provenaient soit des premières campagnes de mesure SEREINE, soit de précédentes opérations menées avec la méthode ISABELE. La sollicitation thermique utilisée n'était donc pas le signal PSA décrit en partie 3.1/ mais une sollicitation à température ou à puissance constante. Cependant, l'ensemble des cas traités étant isolés par l'intérieur et les essais ayant été menés en saison froide, le coefficient global de déperdition pouvait être identifié en 48h d'essai. Pour chacun des essais, il a donc été observé la valeur du coefficient Htr à 48h d'essai dans les deux configurations.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant. La dernière colonne fait apparaître la différence relative observée entre les coefficients Htr identifiés à 48h dans les deux configurations. On constate que cette différence est très faible : 2.95 % en moyenne. Par ailleurs, le tableau fait apparaître la part des surfaces déperditives pour lesquelles les températures extérieures équivalentes n'ont pas été estimées mais mesurées. Il s'agit des parois donnant sur les locaux non chauffés où des capteurs de température simples peuvent être utilisés. On ne constate cependant pas de corrélation forte entre ces ratios et les différences entre les coefficients Htr identifiés. D'autres paramètres tels que l'ensoleillement ou la pluviométrie durant le test ont également été évalués sans montrer de corrélation avec le résultat obtenu.

Commune où le test s'est déroulé	Surface au sol (m <sup>2</sup> )	Nombre de niveau	Début du test	Ratio de surface déperditive avec Tew non estimée (%)	Différence relative entre les coefficients Htr identifiés (%)
Langueux (22)	64	2	16/02/2018	47	1
Mozé-sur-Louet (49)	114	1	25/04/2019	61	2
La Bernerie-en-Retz (44)	43	2	31/01/2020	45	2
Orléans (45)	102	1	30/03/2016	62	2
Clisson (44)	81	2	12/04/2018	56	3
Chambery (73)	48	2	01/11/2019	43	4
Thouars (79)	66	1	21/01/2019	68	5
Brest (29)	86	2	22/12/2016	41	5
Saint-Cannat (13)	86	2	18/04/2016	47	6
Sallanches (74)	57	2	06/02/2020	49	1
Sassenage (38)	144	2	21/02/2020	40	4
Nantes (44)	50	2	14/01/2019	51	0.5

Ces premiers résultats montrent donc une très bonne adéquation des résultats obtenus lorsqu'on utilise l'ensemble des capteurs **F** ou que l'on remplace leur donnée par une approximation. Cependant, ces résultats ont été obtenus en utilisant des sollicitations de type créneau de puissance ou consigne de température et se focalisaient sur le résultat obtenu à 48h d'essai. La méthode SEREINE pour la maison individuelle recommande désormais l'utilisation d'un signal PSA pour un résultat pouvant être obtenu sous 24h en saison froide. La deuxième partie de ce travail expérimental vise donc à confirmer les résultats obtenus dans cette configuration.

### Avec un signal de type PSA

Dans un deuxième temps, des campagnes de mesures ont été effectuées sur les maisons expérimentales de la plateforme INCAS situées sur le site de l'INES au Bourget-du-Lac. Cette plate-forme est composée de plusieurs bâtiments dont quatre maisons individuelles. Ces essais présentent plusieurs avantages. Tout d'abord, ils sont effectués dans des bâtiments totalement instrumentés et dédiés à la recherche, ce qui permet un meilleur contrôle des conditions d'expériences. Ensuite, plusieurs essais ont pu être effectués dans chaque bâtiment, permettant de prendre en compte l'impact des conditions météorologiques sur les résultats.

Le cas de la maison INCAS IBB5 a tout d'abord été étudié. Il s'agit d'un bâtiment en béton banché rénové et isolé par l'extérieur. Plusieurs essais avec des signaux PSA ont été effectués sur ce bâtiment, il ne s'agit cependant pas du signal PSA finalement retenu (voir étude paragraphe 4.1/). Lors du traitement de ces essais, de nombreuses configurations ont été testées :

- **SENS\_All** : les données de tous les capteurs **F** (capteurs SENS) sont utilisées, ce qui constitue la configuration de référence.
- **SENS\_orientationparois\_out** : le capteur **F** associé à cette orientation de parois est supprimé (la température prise est la température d'air extérieur du fichier météo).
- **SENS\_orientationparois\_only** : seul le capteur **F** associé à cette orientation est gardé, tous les autres sont supprimés et remplacés par la température extérieure de l'air du fichier météo.
- **SENS\_orientationparois\_only\_elsecalcul** : le capteur **F** associé à cette paroi est gardé, et le calcul de la température équivalente est cette fois-ci approximé à partir des données météo en utilisant la dernière formule de la section 3.2.4/.
- La configuration **SENS\_allcalcul** : tous les capteurs **F** sont remplacés par l'approximation à partir des données météo.

Le tableau suivant donne un exemple de résultats obtenus :

Configuration SENS	HLC (W/K)	Écart relatif avec la référence HLC/HLC_ref
SENS_all (référence)	85,2	0
SENS_sud_out	79,52	0,93
SENS_est_out	82,52	0,97
SENS_ouest_out	82,60	0,97
SENS_nord_out	84,44	0,99
SENS_toitsud_out	85,00	0,99
SENS_sud_only	72,94	0,85
SENS_est_only	73,12	0,85
SENS_ouest_only	72,69	0,85
SENS_nord_only	72,52	0,85
SENS_all_calcul	89,15	1,04
SENS_sud_only_elsecalcul	87,34	1,02
SENS_est_only_elsecalcul	88,09	1,03
SENS_ouest_only_elsecalcul	87,74	1,03
SENS_nord_only_elsecalcul	88,08	1,03
SENS_toitsud_only_elsecalcul	89,60	1,05

TABLEAU 5 : RECAPITULATIF DES VALEURS DE HLC AVEC LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE SENS TESTEES POUR L'ESSAI IBB5 PSA5-2

Les éléments principaux qui sont ressortis de cette étude sont que, d'une part, il semble envisageable de remplacer certains des capteurs F par la formule utilisant les données météo sans dégrader de façon notable les résultats ; et d'autre part, le capteur F orienté en paroi SUD est celui à garder en priorité, ce qui s'explique par l'importance des apports solaires sur cette paroi.

Les essais sur la maison IBB5 ont également été l'occasion d'étudier l'importance d'une station météo à proximité du bâtiment étudié. En effet, les données météo sont des données indispensables à l'identification du coefficient de déperdition, et le deviennent d'autant plus quand on remplace certains capteurs F par une approximation de la température équivalente. Or, il n'est pas toujours possible de disposer de données locales. Les coefficients de déperdition obtenus avec la station météo située sur la plateforme INCAS ont donc été comparés à ceux obtenus en utilisant les données météo. Ces données météo sont fournies par l'outil CAMS<sup>7</sup>, développé par l'école des Mines, et sont obtenues par interpolation de données satellites à grande échelle. Sur quatre essais testés avec différentes configurations de SENS, les écarts les plus importants entre station météo INCAS et données météo sont observés pour la configuration où toutes les températures équivalentes sont estimées à l'aide de données météo (**SENS\_allcalcul**). Sur ces configurations, les coefficients de déperdition diffèrent de maximum 9,3 %, et en moyenne de 4,8 %. Ces écarts peuvent essentiellement être expliqués par un filtrage de certains pics d'ensoleillement, entraînant une sous-estimation des valeurs d'irradiance normale directe et diffuse lors de ces pics. L'impact sur les résultats reste malgré tout limité et valide l'utilisation de données météo quand on ne dispose pas de station météo à proximité du site étudié.

Les essais effectués sur les maisons IMA et IOB ont également été utilisés pour cette étude. Ces deux maisons sont isolées par l'intérieur et comprennent des combles non chauffés, ce qui n'était pas le cas d'IBB5. Conformément au protocole expérimental initial, un capteur F supplémentaire est donc ajouté dans les combles. Il faut également noter que le signal de chauffe appliqué lors de ces essais est le signal PSA à 48h retenu pour la version finale du protocole SEREINE. Pour donner suite aux résultats déjà obtenus sur IBB5, le nombre de configurations testées a été diminué.

<sup>7</sup> Marchand, M., Lefèvre, M., Saboret, L., Wey, E., & Wald, L. (2019). Verifying the spatial consistency of the CAMS Radiation Service and HelioClim-3 satellite-derived databases of solar radiation using a dense network of measuring stations : the case of The Netherlands. *Advances in Science and Research*, 16, 103-111.

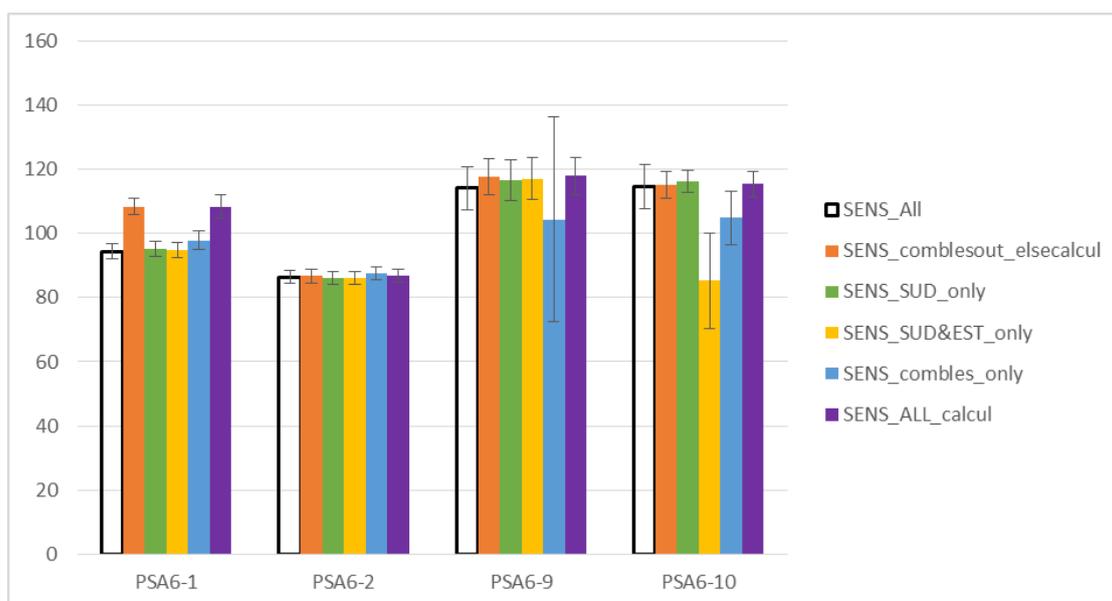


FIGURE 61 : RESULTATS OBTENUS POUR DIFFERENTS ESSAIS ET DIFFERENTES CONFIGURATIONS POUR LA MAISON IMA.

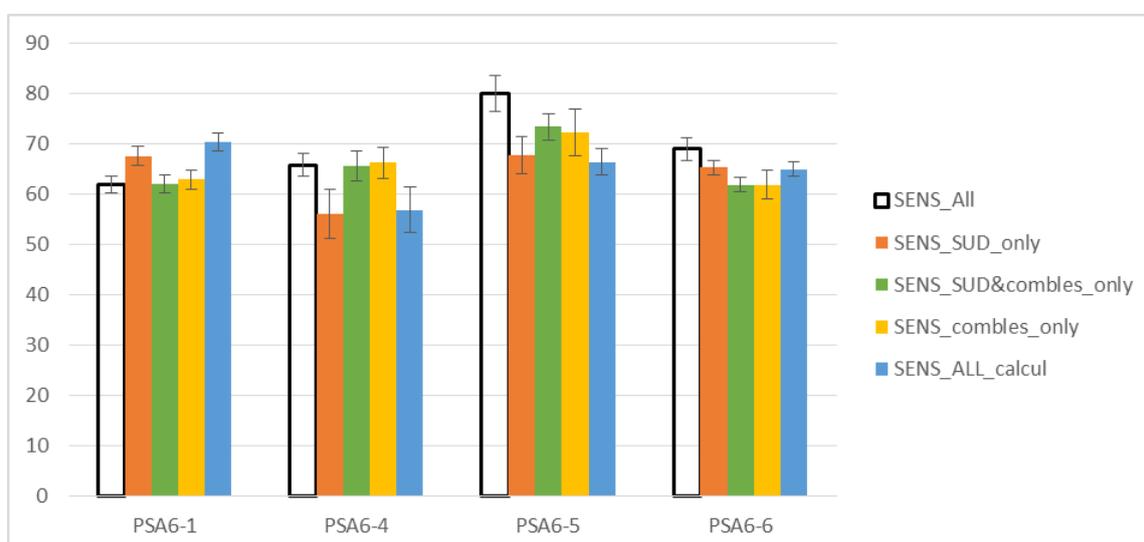


FIGURE 62 : RESULTATS OBTENUS POUR DIFFERENTS ESSAIS ET DIFFERENTES CONFIGURATIONS POUR LA MAISON IOB.

Les résultats confirment l'intérêt de conserver un capteur **F** au sud. Une mesure de la température des combles est également indispensable. Cependant, il ne nous semble pas nécessaire d'utiliser un capteur **F** pour effectuer cette mesure, les combles ne possédant généralement pas de fenêtre, ou alors de très petite surface : une sonde de température simple devrait suffire. Avec cette configuration, les résultats obtenus sont proches de ceux qui utilisent les données de l'ensemble des capteurs **F**. Des essais de propagation d'incertitude ont également été menés sur ces données et montrent que la configuration proposée a un faible impact sur l'évolution de cette progression.

Cette deuxième campagne expérimentale a donc permis de confirmer la possibilité de diminuer le nombre de capteurs SENS et d'indiquer ceux qui devaient être conservés en priorité. Elle présente cependant des limites :

- Les essais n'ont été effectués qu'en période hivernale et en mi-saison.
- Les maisons étudiées n'ont pas de masques solaires, qui restent pourtant fréquents en milieu urbain (avec par exemple la présence de végétation et de grands arbres).

Une étude numérique a donc été conduite sur la base de ces résultats pour les consolider sur un panel plus large.

## 4.3.2/ ANALYSE NUMERIQUE

Afin d'étendre le champ de cette étude et de consolider les résultats, un plan d'expérience virtuel a été établi. Ce plan vise à étendre l'étude à plusieurs météos, et à des configurations où la maison testée serait sujette à des masques. En effet, un des principaux atouts des capteurs **F** est la prise en compte automatique d'ombrages importants, puisqu'au vu de leur positionnement sur site, ils reçoivent le même apport solaire que la façade à laquelle ils sont assignés. Au contraire, la formule de calcul de la température équivalente utilise des données météo qui ne prennent pas en compte les différents ombrages des façades. On peut donc s'attendre à voir des écarts plus importants entre coefficients obtenus à l'aide de données de capteurs **F** ou de la formule d'approximation.

Le banc d'essai virtuel décrit au paragraphe 4.2/ a été mis à contribution pour répondre à cette problématique. Le modèle EnergyPlus de la maison individuelle isolée par l'intérieur a été repris et modifié pour les besoins de cette étude. Trois variantes ont été définies :

- Cas de référence : le modèle initial, sans masque,
- Maison avec un masque au sud,
- Maison sans apport solaire (complètement ombragée).

Les différentes variantes sont détaillées par la suite, avant une présentation des résultats obtenus.

### Cas de référence

Le modèle utilisé pour le cas de référence est la maison isolée thermiquement par l'intérieur, sans occupation, sans infiltration (modèle **ITI\_v2\_schedule\_v1**). Trois climats sont utilisés dans cette étude : Chambéry, Nice et Nancy, afin de couvrir la variabilité climatique de la France métropolitaine tout en limitant le nombre de simulation. Trois configurations pour l'estimation des températures équivalentes sont simulées :

- **allSENS** : tous les capteurs F sont utilisés.
- **allcalcul** : toutes les estimations se font en utilisant la formule approchée.
- **SENS sud & ouest** : seuls les capteurs F des parois sud et ouest sont utilisés, les températures équivalentes des autres parois étant estimées à l'aide de la formule.

À chaque fois, les identifications des coefficients de déperdition ont été faites sur les 51 essais annuels, à 48h, ce qui fait un total de 459 identifications pour le cas de référence.

### Variante avec un masque au sud

Cette variante diffère du cas de référence par l'ajout d'un masque au sud de la maison. Pour ce faire, un grand bloc opaque de la largeur de la maison et dont la hauteur est égale à quatre fois celle de la maison est ajouté à une dizaine de mètres de la façade sud du bâtiment sur le modèle EnergyPlus. En hiver, ce bloc ombrage quasiment toute la maison, comme le montre la figure suivante :

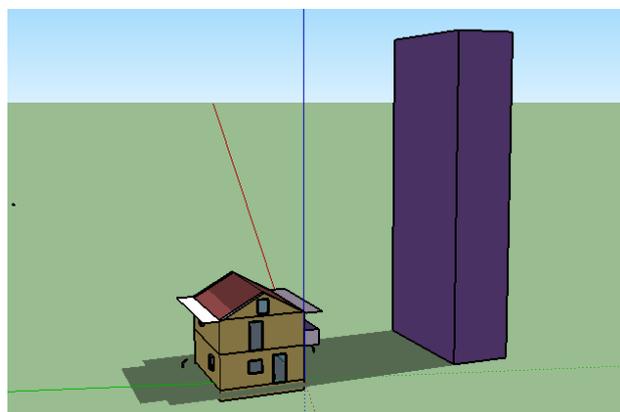


FIGURE 63 : MODELE DU BATIMENT AVEC UNE ZONE D'OMBRAGE AU SUD

Cette variante a été choisie car un masque au sud est celui qui aura le plus d'impact sur les apports solaires globaux du bâtiment. C'est d'ailleurs pour cela que le capteur **F** associé à la paroi sud avait été identifié comme celui à conserver en priorité par l'étude expérimentale.

### Variante sans ensoleillement

Il s'agit du cas extrême où la maison est entièrement ombragée, coupée de tout ensoleillement extérieur. Les simulations pour cette variante sont effectuées de la façon suivante :

1. Les simulations EnergyPlus correspondent au cas de référence, excepté les fichiers météo qui sont modifiés pour avoir toutes les irradiances solaires à zéro. Les données des capteurs **F** sont générées lors de cette étape et prennent donc en compte le fait qu'il n'y a aucun apport solaire.
2. Les identifications sont conduites avec les fichiers météos initiaux (irradiances solaires non nulles). Les températures équivalentes obtenues à partir des données météo prendront donc en compte un ensoleillement non modifié.

### Résultats

Le tableau suivant résume les résultats des 1 377 identifications réalisées. Il présente les écarts moyens annuels (moyenne sur les 51 essais annuels) pour les différentes variantes, villes et configurations. Les écarts sont donnés par rapport à la variante **allSens** (« écart /HLCSENS) et par rapport à la valeur théorique du coefficient de déperdition thermique du modèle de maison isolée thermiquement par l'intérieur et donné au paragraphe 4.2.4/ (« écart /Hth »).

		Cas de référence		Masque au sud		Sans ensoleillement	
		écart /HLCSENS	écart /Hth	écart /HLCSENS	écart /Hth	écart /HLCSENS	écart /Hth
Lyon	allSENS		8,76 %		7,57 %		4,57 %
	allcalcul	6,86 %	9,66 %	5,91 %	7,55 %	8,16 %	8,62 %
	SENS sud & ouest	5,24 %	8,91 %	5,39 %	8,08 %	4,1 %	6,08 %
Nice	allSENS		11,41 %		11,65 %		5,83 %
	allcalcul	8,75 %	8,12 %	8,09 %	11,64 %	6,66 %	7,89 %
	SENS sud & ouest	4,9 %	12,05 %	7,14 %	11,71 %	4,24 %	7,15 %
Nancy	allSENS		8,28 %		7,37 %		4,81 %
	allcalcul	6,42 %	7,65 %	4,16 %	6,51 %	6,89 %	8,02 %
	SENS sud & ouest	4,83 %	8,55 %	2,79 %	6,34 %	4,41 %	5,69 %

TABLEAU 6 : ECARTS MOYENS ANNUELS OBSERVES SUR LES HLC POUR LES TROIS DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES CAPTEURS F, POUR LYON, NICE ET NANCY.

Avec la configuration **SENS sud & ouest**, on obtient un écart maximal annuel de 7,14 % et une moyenne sur tous les essais de 4,78 %. Il s'agit d'une valeur tout à fait raisonnable et une amélioration notable par rapport à la configuration **allCalcul**, qui a un écart maximal de 8,75 % et une moyenne de 6,88 %. Il est tout de même important de noter que même la configuration **allCalcul** donne des résultats avec une marge acceptable.

On peut également constater une légère corrélation entre les valeurs obtenues et l'ensoleillement global. En effet, le climat de Nice donne régulièrement des écarts plus élevés (c'est d'ailleurs plus marqués avec le cas **allCalcul**) que les autres climats.

### 4.3.3/ BILAN ET PRECONISATIONS

Les études expérimentales et numériques ont montré que :

- Le nombre de capteurs **F** peut être réduit tout en conservant un niveau d'incertitude raisonnable sur les résultats.
- Il est indispensable de conserver une mesure de température dans les zones non chauffées.
- Le capteur **F** associé à la paroi sud est à conserver en priorité, car c'est celui qui permet le mieux de réduire l'écart avec une configuration qui utiliserait des capteurs **F** sur toutes les parois.

- Utiliser des données météo déportées quand il n'y a pas de station météo à proximité du site étudié n'a qu'un faible impact sur les résultats, en particulier en hiver et en mi-saison.
- Il a tout de même été noté qu'un fort ensoleillement global accentuait les écarts dus à la diminution du nombre de capteurs **F**.

Suite à ces résultats, il est proposé :

- de remplacer les capteurs **F** par de simples sondes de température dans les zones non chauffées.
- de ne conserver que trois capteurs **F** en extérieur : un associé à la face sud, un pour la façade ouest et un pour l'horizontale (ce dernier est conservé par sécurité).
- d'estimer les températures équivalentes des autres parois en utilisant la formule approximée proposée au paragraphe 3.2.4/. Les données météo seront soit celles de la station météo la plus proche si elle n'est pas trop éloignée du site, soit celles d'un outil de type CAMS.

L'application de ce nouveau protocole à de nombreux cas réels permettra de confirmer sa robustesse, notamment en période de fort ensoleillement et pour des bâtiments avec des masques importants.

## 4.4/ SENSIBILITE DES RESULTATS AUX VALEURS INITIALES

Même après l'amélioration de l'algorithme proposé dans le paragraphe 3.3.2/, il n'en reste pas moins que les valeurs initiales proposées pour les paramètres du modèle sont des estimations qui sont plus ou moins loin de la valeur optimale. Il nous a donc semblé important, dans une démarche de validation de la robustesse de la méthode proposée, d'analyser l'impact du choix des valeurs d'initialisation sur les résultats d'identification du coefficient de déperditions. C'est l'objet de l'étude dont les résultats sont présentés ci-après.

### 4.4.1/ METHODOLOGIE DE L'ETUDE

L'idée est donc de comparer les résultats obtenus avec différentes initialisations. Pour ce faire, on ajoute des coefficients aux valeurs globales obtenues pour le bâtiment :

$$\begin{aligned}\tilde{C}_{guess} &= f_C * C_{guess} \\ \tilde{H}_{guess} &= f_H * H_{guess}\end{aligned}$$

Les nouvelles valeurs  $\tilde{C}_{guess}$  et  $\tilde{H}_{guess}$  sont ensuite utilisées dans la suite de l'algorithme d'identification du coefficient de déperdition.

Les coefficients  $f_C$  et  $f_H$  varient entre 0.5 et 1.5, et 13 couples  $(f_C, f_H)$  sont choisis selon le diagramme proposé en Figure 64 afin de couvrir de façon homogène l'espace des valeurs disponibles.

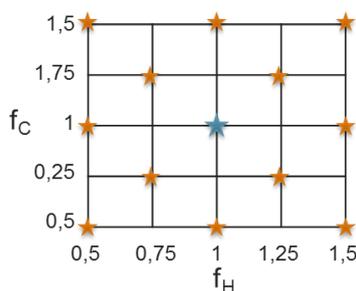


FIGURE 64 : COUPLES  $(f_C, f_H)$  UTILISES POUR L'ETUDE. LE COUPLE  $(f_C, f_H)$  (ETOILE BLEUE) REPRESENTE LA REFERENCE.

Pour chaque jeu de mesures analysé, on effectue donc l'identification 13 fois avec 13 couples de valeurs initiales différentes. 13 valeurs du coefficient de déperdition sont donc obtenues.

Dans l'idéal, les 13 valeurs obtenues sont identiques et égales à la valeur attendue. Pour analyser les résultats, on définit des indicateurs qui vont permettre de quantifier l'écart entre cet idéal et les valeurs effectivement obtenues :

- $H_{rel,range} = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{med}}$  [%], où  $H_{max}$ ,  $H_{min}$  et  $H_{med}$  sont respectivement les coefficients de déperdition le plus important, la plus faible et médian obtenu, parmi les 13 valeurs. Cet indice sera proche de 0 pour des résultats très stables, ie pour lesquels il n'y a pas une grande dispersion des valeurs. Plus les valeurs seront dispersées, plus  $H_{rel,range}$  sera élevé.
- $H_{inc,range} = \Delta H_{max} - \Delta H_{min}$  [W/K], où  $\Delta H_{max}$  et  $\Delta H_{min}$  sont respectivement les incertitudes minimale et maximale obtenues lors des 13 identifications. Cet indice représente la disparité des incertitudes sur le coefficient de déperdition obtenues. Il sera proche de 0 pour des résultats très stables.
- $H_{int,max}$  : indice d'interprétabilité à  $\pm 20$  % maximal sur les 13 résultats obtenus (voir définition de l'indice d'interprétabilité en partie 4/). Cet indice est compris entre 0 et 1, et plus la valeur est proche de 1, plus le résultat est « juste » (ie proche de la valeur attendue).

Les deux premiers indices caractérisent la stabilité des résultats, alors que le troisième est représentatif de leur justesse.

#### 4.4.2/ RESULTATS : IMPACT DE L'INITIALISATION SUR LA STABILITE DES RESULTATS

La méthodologie présentée au paragraphe précédent est appliquée à deux cas d'études :

- La maison ITI\_v2\_schedule\_v1 du banc d'essai virtuel qui a été présentée au paragraphe 4.2/,
- Les maisons INCAS.

Dans un premier temps, la méthodologie a été appliquée à la version la plus simple de la maison ITI : le cas sans infiltration et sans occupation. L'étude virtuelle consiste en l'application d'un signal PSA sur ce modèle avec des dates de démarrages de test couvrant une année civile. Plusieurs climats sont également simulés. Pour les besoins de cette étude, nous avons sélectionné le climat de Chambéry, qui a l'avantage de représenter un climat « moyen » avec de fortes variations de température entre hiver et été. Sept essais PSA ont également été sélectionnés, dont les dates de démarrage et de fin sont présentées dans le Tableau 7. Les cinq premiers essais permettent de couvrir les différentes plages de températures possibles. Les deux derniers essais ont été rajoutés pour pouvoir analyser la variabilité d'une semaine à l'autre. L'essai 49 est considéré comme l'essai idéal car il correspond à la température moyenne pendant l'essai la plus basse.

N° set	Date début PSA	Date fin PSA	Température moyenne extérieure pendant l'essai
30	31 juillet	02 août	19.2°C
35	04 septembre	06 septembre	21.1°C
40	09 octobre	11 octobre	12.2°C
45	13 novembre	15 novembre	8.1°C
48	04 décembre	06 décembre	8.7°C
<b>49</b>	<b>11 décembre</b>	<b>13 décembre</b>	<b>1.2°C</b>
50	18 décembre	20 décembre	6.6°C

TABLEAU 7 : NUMERO D'ESSAI (« SET »), DATES DE DEBUT ET DE FIN ET TEMPERATURE MOYENNE EXTERIEURE LORS DE CHAQUE ESSAI PSA UTILISES DANS CETTE ETUDE.

Cette étude a été effectuée alors que le choix de l'algorithme de sélection de modèle n'avait pas encore été fait. Il a donc été décidé, pour que cette inconnue ne vienne pas perturber les résultats, d'analyser les résultats d'identification obtenus pour l'ensemble des modèles de la banque (voir paragraphe 3.4.1/). La Figure 65 et la Figure 66 résument les résultats obtenus pour les indicateurs proposés. Plus une valeur est optimale (0 pour  $H_{rel,range}$  et  $H_{inc,range}$ , 1 pour  $H_{int,max}$ ), plus la couleur de fond est claire.

HLC_relgap_range								HLC_inc_range							
ti	1.4	1.5	0.3	0.22	0.27	0.19	0.21	ti	4.3	9.4	1.6	2.5	2.3	2.4	2.3
tw	1.2	1.4	0.27	0.19	0.23	0.16	0.18	tw	3.5	6.4	2.7	0.92	1.8	1.2	1.9
twti	1e+02	2.7	0.87	1e+02	1e+02	0.49	1e+02	twti	36	10	3.5	18	20	1.9	19
twbti	2.4	2.8	1.3	0.59	1.1	0.68	0.79	twbti	7.7	4.5	2.4	3.9	2	2	2.3
twtm	2.7	2.9	1.1	0.78	1	0.57	0.78	twtm	4.6	2.3	1.7	3.3	3.2	2.5	3.1
twtw2	1e+02	1e+02	1e+02	1e+02	1e+02	1e+02	1e+02	twtw2	35	35	24	19	23	17	20
twtitm	1e+02	3.3e+02	43	29	36	17	25	twtitm	23	22	11	11	11	10	12
twtw2ti	1.3e+02	1.4e+02	2.9	1e+02	1e+02	1.1e+02	1.2e+02	twtw2ti	30	32	2.4	11	16	11	14
twtw2bti	18	18	3.8	1.2	2.4	0.97	22	twtw2bti	17	17	1.7	1.2	0.95	0.82	9.8
twtw2tm	31	40	1.4e+02	25	31	15	17	twtw2tm	12	6.9	22	8.8	5	8.4	7.3
tib	2	2.3	0.2	0.16	0.25	0.19	0.14	tib	1.7	5.4	2.1	1.1	1.9	0.61	1.1
twtb	7.7	7.8	2.6	3.3	2.5	0.87	3.1	twtb	5.1	5.8	3.1	2.3	2.3	1.9	2.6
twbtbi	3.5	20	7.2	6	6.8	6	2.1	twbtbi	1.4	8.6	3.4	1.8	3.1	0.83	1.9
twbtbm	3.5	27	8.7	27	7.7	20	24	twbtbm	1.8	10	3.2	5.5	3.8	3.6	7.5
twtw2tb	4.9	1e+02	30	27	30	20	24	twtw2tb	1.3	22	2.8	6.1	3.4	2.8	4.7
twbtitm	55	54	14	7.3	17	11	6.6	twbtitm	18	65	7.6	5	9	9	4.9
twtw2tbt	74	49	25	1.6	11	3.9	4.3	twtw2tbt	23	26	8.2	6.9	8.6	4.7	5.7
twtw2tbtm	58	51	28	8	22	7.9	2.5	twtw2tbtm	24	26	9.5	5.1	10	3.7	6.4
twtw2tbtitm	68	72	26	8	17	9.8	14	twtw2tbtitm	22	39	20	12	23	16	10
tib2	2.3	2.4	2.6	4.4	1.7	4.3	3.2	tib2	2.3	1.7	2.1	3.8	1.4	2.7	1.6
twtb1tb2	1e+02	12	5.3	30	8.2	26	23	twtb1tb2	11	1.1	5.9	16	4.6	13	14
twtb1tb2ti	50	58	11	8.8	15	10	4.3	twtb1tb2ti	28	31	2.9	3.8	19	4.1	3.2
twtb1tb2tm	9.5	30	16	15	16	7.6	6.9	twtb1tb2tm	21	26	11	8.9	8.2	4.9	4.2
twtw2tb1tb2	17	43	16	6.5	4.1	10	3.4	twtw2tb1tb2	18	21	8.1	4.8	1.3	3.7	3.7
twtb1tb2titm	24	28	23	10	7.6	12	8.5	twtb1tb2titm	37	25	7.9	9.2	4.5	6	2.1
twtw2tb1tb2ti	38	35	16	11	5.3	10	10	twtw2tb1tb2ti	20	33	12	7.7	11	10	4.8
twtw2tb1tb2tm	25	41	19	14	5.7	15	9.6	twtw2tb1tb2tm	23	29	11	11	14	10	7.7
twtw2tb1tb2titm	29	52	12	13	11	20	11	twtw2tb1tb2titm	44	22	7.6	8.1	13	16	15
set30	set35	set40	set45	set48	set49	set50		set30	set35	set40	set45	set48	set49	set50	
19.2°C	21.1°C	12.2°C	8.1°C	8.7°C	1.2°C	6.6°C		19.2°C	21.1°C	12.2°C	8.1°C	8.7°C	1.2°C	6.6°C	

FIGURE 65 : RESULTATS OBTENUS SUR LA MAISON ITI SIMPLE POUR LES INDICATEURS DE STABILITE.

HLC_int_max							
ti	0.004	0.0042	3.9e-08	6e-06	4e-06	0.004	4e-06
tw	0.01	0.015	2.2e-07	6.4e-06	2.2e-06	0.0077	1.3e-05
twti	0.24	0.27	0.026	0.047	0.051	0.25	0.072
twbti	0.24	0.26	0.018	0.068	0.06	0.24	0.076
twtm	0.25	0.27	0.031	0.074	0.084	0.27	0.095
twtw2	0.23	0.27	0.03	0.063	0.078	0.26	0.09
twtitm	0.65	0.63	0.78	0.89	0.88	0.97	0.88
twtw2ti	0.68	0.66	0.6	0.65	0.68	0.92	0.56
twtw2bti	0.43	0.56	0.38	0.67	0.4	0.93	0.62
twtw2tm	0.71	0.62	0.55	0.62	0.65	0.89	0.53
tib	0.003	0.0045	3e-07	5.1e-06	1.7e-05	0.0043	7.2e-06
twtb	0.35	0.32	0.048	0.23	0.087	0.36	0.17
twbtbi	0.8	0.85	0.88	1	0.98	1	0.88
twbtbm	0.82	0.87	0.84	1	0.97	1	0.86
twtw2tb	0.82	0.86	0.5	1	0.93	1	0.83
twbtitm	0.78	0.89	1	1	1	1	1
twtw2tbt	0.75	0.87	1	1	1	1	1
twtw2tbtm	0.81	0.87	1	1	1	1	1
twtw2tbtitm	0.71	0.88	1	1	1	1	1
tib2	1.9e-16	2.4e-13	2.4e-16	5.6e-09	1.8e-08	2.6e-06	4.5e-07
twtb1tb2	0.35	0.75	0.32	0.84	0.79	0.88	0.52
twtb1tb2ti	0.65	0.99	0.98	0.98	1	0.96	0.99
twtb1tb2tm	0.3	1	0.96	0.91	1	0.92	0.99
twtw2tb1tb2	0.61	0.85	0.99	0.86	1	0.93	0.88
twtb1tb2titm	0.5	0.69	0.99	0.96	1	0.98	1
twtw2tb1tb2ti	0.76	0.92	0.93	0.97	1	1	1
twtw2tb1tb2tm	0.7	0.98	0.96	0.97	1	1	0.97
twtw2tb1tb2titm	0.83	0.74	0.91	0.95	1	1	1
set30	set35	set40	set45	set48	set49	set50	
19.2°C	21.1°C	12.2°C	8.1°C	8.7°C	1.2°C	6.6°C	

FIGURE 66 : RESULTATS OBTENUS SUR LA MAISON ITI SIMPLE POUR L'INDICE D'INTERPRETABILITE MAXIMUM.

Les principales conclusions à tirer de ces figures sont :

- Les modèles sont assez stables dans l'ensemble mais on observe quelques exceptions comme twtw2, twtitm et twtw2ti.
- Les modèles les plus simples ne permettent pas d'obtenir des coefficients de déperdition proches de la valeur attendue.
- La qualité des résultats est impactée par la température extérieure moyenne : plus elle est importante, plus on observe des instabilités et des valeurs éloignées de la valeur attendue. Cet effet est particulièrement marqué pour  $H_{rel,range}$  et  $H_{int,max}$ .

Plusieurs algorithmes de sélection de modèles sont ensuite appliqués pour analyser le comportement des modèles sélectionnés. Ces algorithmes fonctionnent comme des filtres puisqu'ils permettent de conserver uniquement les résultats du modèle sélectionné. La description détaillée de ces algorithmes sera effectuée dans le paragraphe 4.5/. Le résultat des 13 sélections pour chaque essai PSA est présenté en Figure 67, pour quelques algorithmes. Chaque histogramme présente le nombre de fois où chaque modèle a été sélectionné pour chaque essai. On observe que l'initialisation a un impact sur le modèle sélectionné au final, mais que cet impact est moins marqué pour l'algorithme « best\_BIC ». Avec cet algorithme, le modèle sélectionné est plus souvent le même. Les performances des modèles sélectionnés, que l'on peut retrouver sur les figures précédentes, sont bonnes : les résultats sont assez stables et proches de la valeur attendue. Par contre, des modèles plus simples qui auraient donné des résultats tout aussi bons auraient pu être sélectionnés, comme par exemple twtbttm qui serait valable dans des cas où des modèles plus complexes ont été sélectionnés. Sur ce point également, l'algorithme « best\_BIC » semble être le plus performant puisqu'il sélectionne souvent un modèle plus simple que les autres algorithmes.

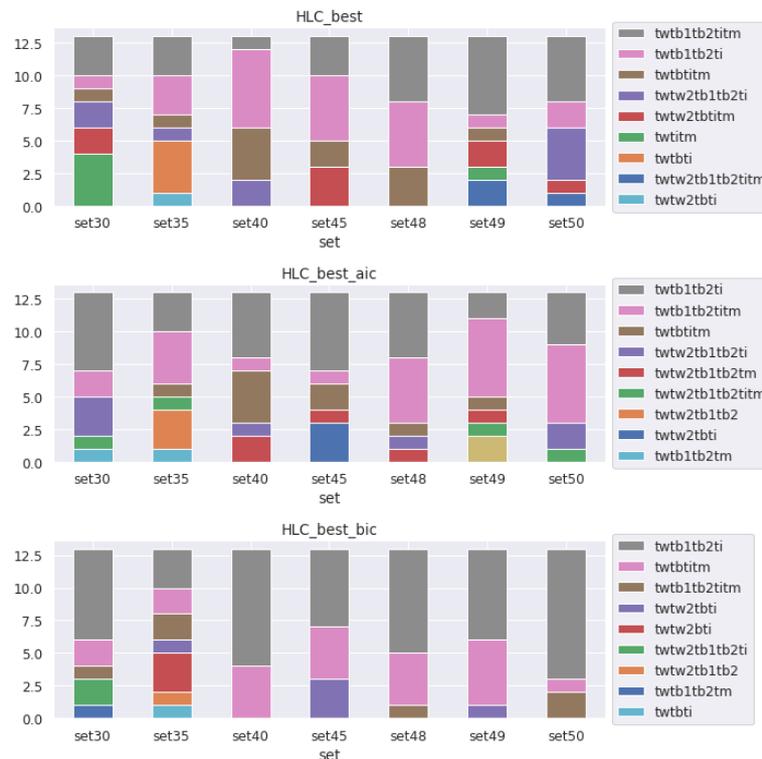


FIGURE 67 : RESULTATS DE SELECTION PAR LES DIFFERENTS ALGORITHMES.

Des résultats similaires sont observés lorsqu'on ajoute de l'infiltration et de l'occupation dans le bâtiment. Les résultats à 24h sont un peu moins bons mais restent tout à fait raisonnables.

La méthodologie a également été appliquée à des essais effectués sur les maisons INCAS, essentiellement sur les maisons IMA et IOB. Pour ces essais, on observe plus de variabilité, ce à quoi on s'attend, étant donné qu'il s'agit d'essais réels, au contraire de l'étude virtuelle. Cette variabilité reste cependant dans le domaine acceptable pour les essais qui ont donné de bons résultats lors de leur traitement classique : les modèles sélectionnés sont stables et donnent des valeurs proches de celles qui sont attendues.

En conclusion, l'impact de l'initialisation sur les résultats d'identification est limité, ce qui, d'une part, est rassurant sur la stabilité générale des modèles choisis dans notre banque de données, et d'autre part, nous permet d'estimer qu'il n'est pas nécessaire d'apporter davantage d'efforts sur l'estimation initiale des paramètres des modèles. Par ailleurs, cette étude a mis en avant certaines qualités de l'algorithme « best\_BIC » qui seront à prendre en compte pour le choix final de l'algorithme de sélection de modèles. Ces qualités sont sa capacité à choisir des modèles plus simples que les autres algorithmes ainsi que la stabilité de ses résultats à une modification des paramètres initiaux.

## 4.5/ CHOIX DE LA METHODE DE SELECTION DE MODELE

La procédure de sélection de modèle de la méthode SEREINE V1 permet de sélectionner, parmi la banque de modèles disponibles, le modèle le plus pertinent pour chaque cas d'étude. Il s'agit du modèle le plus simple permettant de représenter suffisamment fidèlement le comportement de la température interne du bâtiment. Un modèle trop simple ne sera pas capable de reproduire toutes les caractéristiques de la réponse en température du bâtiment. Un modèle trop complexe a plus de risque d'être instable.

Dans la version V1 de la méthode, la sélection s'effectuait en trois temps :

- Une première liste réduite de modèle est obtenue en fonction des données disponibles dans le cas d'étude et d'autres paramètres utilisateurs tels que l'ordre maximum de modèles souhaité, le nombre maximum d'inconnues, etc.
- L'identification du coefficient de déperdition est effectuée pour chaque modèle de la liste réduite. Les modèles n'ayant pas convergé ou ayant une incertitude menant à des valeurs aberrantes sont exclus de la sélection.
- Est alors sélectionné le modèle ayant la meilleure valeur de maximum de vraisemblance ou dans le cas de comparaison de modèles d'ordres différents, le meilleur ratio de vraisemblance.

Lors de la validation expérimentale, nous avons détecté des problèmes liés à la sélection de modèles. Notamment, des modèles étaient sélectionnés alors qu'ils avaient une incertitude très élevée. Il a également été remarqué par moment que des modèles plus simples, ayant été préalablement écartés, pouvaient donner des résultats plus pertinents. Il a donc été décidé de tester d'autres méthodes pour la dernière étape de l'algorithme de sélection de modèle.

### 4.5.1/ METHODES DE SELECTIONS ENVISAGEES

Deux axes ont été identifiés : modifier l'algorithme et/ou utiliser d'autres critères pour sélectionner le meilleur modèle. Une variante de l'algorithme et trois nouveaux critères ont été proposés. En combinant types d'algorithme et critères de sélection, ce sont finalement huit méthodes de sélection qui seront par la suite comparées. Le détail des algorithmes et la définition des différents critères sont donnés dans les paragraphes qui suivent.

#### Algorithmes de sélection

L'algorithme de sélection utilisé dans la méthode SEREINE v1 est simple : sur l'ensemble des modèles de la liste, celui qui donne la meilleure valeur du critère choisi est sélectionné (dans la méthode v1, ce critère est le maximum de vraisemblance ou le ratio de vraisemblance).

La méthode V1 sélectionne les modèles avec un classement des conditions limites, il a été implémenté l'évaluation de toutes les combinaisons de conditions limites complémentaires. Par exemple, un modèle ayant des mesures dans le garage et les combles aura 2 conditions limites complémentaires à la mesure de température extérieure équivalente. La bibliothèque comprendra donc des modèles jusqu'à trois conditions limites (CL). A une CL, seule la  $T_{ext}$  est évaluée, avec trois CL toutes les conditions sont prises. L'ajout permet de ne pas choisir la condition limite à évaluer dans les modèles intermédiaires. Dans cet exemple, choisir entre un modèle 2CL avec le garage et un modèle 2CL avec les combles permet d'évaluer distinctement les conditions limites complémentaires, c'est-à-dire, en considérant un modèle avec le garage et un modèle avec les combles.

Cependant, Bacher et Madsen<sup>8</sup> ont montré qu'un modèle ne peut être valide que si les modèles plus simples dont il dérive sont également valides. On parle de modèles imbriqués. L'algorithme consiste alors à commencer par tester les modèles les plus simples, puis à tester les modèles de plus en plus complexes qui dérivent des meilleurs modèles simples. Par exemple, dans la banque de modèles de SEREINE, les modèles les plus simples sont *ti* et *tw*. Si *ti* et *tw* ont bien convergé, on sélectionne celui qui donne la meilleure valeur du critère de sélection choisi.

Admettons que ce soit *tw*. Alors on va comparer sa performance à celle des modèles *twti*, *twtm*, *twtw2* et *twtb* qui en dérivent directement. Si, par exemple, *twti* est le modèle qui donne la meilleure valeur pour le critère et que cette valeur est supérieure à celle obtenue pour *tw*, alors on compare *twti* aux modèles *twtitm*, *twtw2ti* et *twtbt*. Et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on ne trouve plus de modèle qui améliore le critère ou qu'on atteigne le modèle le plus complexe de la banque.

L'application de ce principe nécessite une complexification de la banque de modèle afin de prendre en compte les relations d'imbrications entre ceux-ci.

Dans la suite, nous appellerons les algorithmes utilisant la version simple « **\_best** », et ceux appliquant le principe proposé par Bacher et Madsen « **\_nested** ».

### Les critères de sélection

En plus du ratio de vraisemblance, trois nouveaux critères sont testés :

- le *Critère d'Information d'Akaike (AIC)* :

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

où *k* est le nombre de paramètres à estimer du modèle et *L* est le maximum de la fonction de vraisemblance du modèle. Plus la valeur d'*AIC* est faible, meilleur est le modèle.

Ce critère pénalise les modèles qui ont un grand nombre de paramètres. Il favorise donc un compromis entre précision et complexité.

- le *Critère d'Information d'Akaike corrigé (AICc)* :

$$AICc = AIC + \frac{2k(k+1)}{n-k-1}$$

où *n* désigne le nombre d'observations dans l'échantillon. Plus la valeur d'*AICc* est faible, meilleur est le modèle.

L'*AICc* corrige l'*AIC* en ajoutant une pénalité supplémentaire sur le nombre de paramètres à identifier. Cette correction est fonction du nombre d'observations dans l'échantillon. Cela permet de limiter la probabilité de sélectionner un modèle trop complexe, dans le cas où la taille de l'échantillon est du même ordre de grandeur que le nombre de paramètres à estimer.

- Le *Critère d'Information Bayésien (BIC)* :

$$BIC = -2\ln(L) + k\ln(n)$$

avec *L* la vraisemblance du modèle estimée, *n* le nombre d'observations dans l'échantillon et *k* le nombre de paramètres à estimer du modèle. À nouveau, plus la valeur du *BIC* est faible, meilleur est le modèle.

Par rapport à *AIC*, ce critère possède également le paramètre supplémentaire *n*, qui correspond au nombre de pas de temps d'observation. Comme *n* est en général assez élevé dans une mesure SEREINE (pas de temps de 5 minutes pendant 12 à 72h), *BIC* va pénaliser plus fortement les modèles avec de nombreux paramètres que *AIC* dans notre cas d'étude.

<sup>8</sup> Bacher, P., & Madsen, H. (2011). Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43 (7), 1511-1522. DOI : 10.1016/j.enbuild.2011.02.005.

## 4.5.2/COMPARAISON ET CONCLUSION

Les huit versions de la méthode sont appliquées aux jeux de données de la maison ITI avec infiltrations, avec et sans occupation (modèles ITI\_v1\_schedule\_v1 et ITI\_v1\_schedule\_v2), obtenus sur le banc d'essais virtuel décrit au paragraphe 4.2/. La Figure 68 et la Figure 69 ci-après présentent les résultats obtenus pour le coefficient HLC dans le cas de la maison ITI avec infiltrations et occupation. Les autres cas (Htr, pas d'occupation) donnent des résultats similaires.

La Figure 68 montre la répartition des indices d'interprétabilité à 20 % (voir définition en partie 4.1/) dans les résultats obtenus, pour les différentes versions de l'algorithme testées. Comme on pouvait s'y attendre, les résultats sont meilleurs à 48h (une plus grande proportion des indices d'interprétabilité est largement supérieure à 0). Dans les deux cas, les huit versions de la méthode donnent des résultats assez proches, mais on note que **best\_aic**, **best\_aicC** et **best\_likelihood** sont légèrement meilleurs à 24h, alors que **best\_bic** et **nested\_bic** semblent meilleurs à 48h.

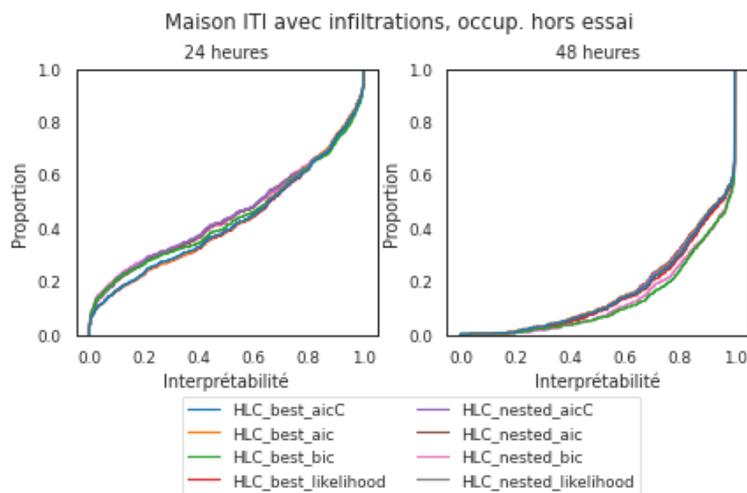


FIGURE 68 : REPARTITION DES INDICES D'INTERPRETABILITE A 20 % SUR L'ENSEMBLE DES HLC OBTENUS POUR LA MAISON ITI AVEC INFILTRATIONS ET OCCUPATION PENDANT LES ESSAIS.

La Figure 69 présente les modèles sélectionnés par les différentes méthodes, ainsi que leur fréquence de sélection dans le jeu de données. On peut ici constater que les deux méthodes utilisant le critère BIC ont un comportement qui diffère des autres. Notamment, elles sélectionnent bien moins souvent le modèle *twtw2tbtitm* et lui préfèrent le modèle *twtbtitm* qui est plus simple. Elles sélectionnent également plus souvent le modèle simple *twtitm*. Ces résultats confirment ceux obtenus lors de l'étude de sensibilité de la section précédente, à savoir une meilleure stabilité des méthodes utilisant le critère BIC et la sélection de modèles plus simples.

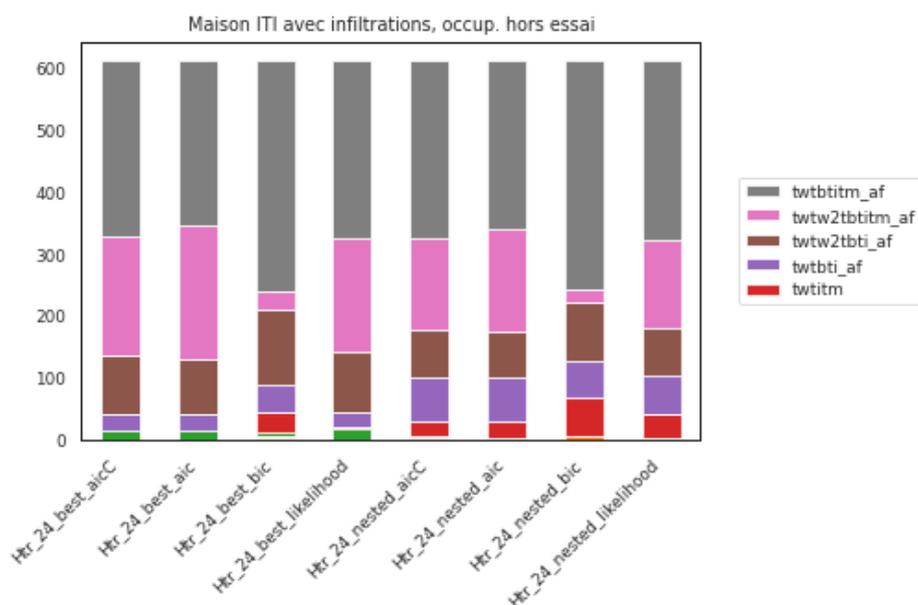


FIGURE 69 : MODELES SELECTIONNES PAR LES DIFFERENTES METHODES POUR CHAQUE IDENTIFICATION DE HTR POUR LA MAISON ITI AVEC INFILTRATIONS ET OCCUPATION PENDANT LES ESSAIS.

Les méthodes utilisant le critère BIC semblent donc représenter le meilleur compromis : elles donnent les meilleurs résultats d'interprétabilité à 48h, leur sélection est plus stable et ils tendent à sélectionner un modèle plus simple que les autres méthodes. La méthode imbriquée repose sur une démarche scientifique plus rigoureuse que la méthode simple. Il a donc été décidé d'implémenter dans cette nouvelle version de la chaîne la méthode imbriquée utilisant le critère BIC.

#### 4.6/ VALIDATION DE LA METHODE ET DETERMINATION DU BIAIS

Cette partie traite de l'évaluation numérique complète du code d'identification pour l'évaluation du coefficient de déperdition du bâtiment. Les conditions climatiques peuvent être sensiblement différentes en fonction de la période ou de la localisation du bâtiment, même en France métropolitaine. Afin de garantir une marge de confiance associée à cette variabilité du climat, nous avons réalisé une analyse statistique du biais. Elle permet une validation numérique de la méthodologie de mise en œuvre de l'essai et l'estimation d'une erreur de mesure vis-à-vis des résultats théoriques.

Les cas d'études sont présentés en 4.2/. Les climats choisis, présentés en 4.2.2/, ils correspondent à une situation typique, c'est-à-dire à des conditions météorologiques courantes par rapport à la localisation et à la saison. En cas de phénomènes extrêmes, de vent ou de canicule, l'application de la méthode n'est pas possible, l'évaluation du biais dans ces conditions n'est donc pas réalisée.

L'incertitude de biais attendue est calculée à partir de l'écart absolu entre le résultat de mesure et l'évaluation théorique correspondante, il sera détaillé dans la suite de cette partie. Il ne doit pas être confondu avec une EMT (Erreur Maximal Toléré) qui est l'écart maximal qui est statistiquement possible d'avoir, égal à l'écart entre le résultat de mesure majoré de son incertitude la plus contraignante et l'évaluation théorique correspondante. Cette dernière étant généralement utilisée afin de dimensionner des dispositifs de mesures.

À partir de toutes les estimations annuelles d'un modèle, il est possible de visualiser la variabilité des estimations réalisées pour un certain scénario. L'image suivante montre les résultats de *HLC* et *Htr* pour le modèle ITI avec infiltration et avec la présence d'occupants avant l'essai, le scénario PSA d'une durée de 48h est appliqué. Chaque point correspond à l'identification réalisée à un moment de l'année pour un climat donné. Ils sont associés à des barres d'incertitudes correspondant à la variabilité due à la partie aléatoire de la méconnaissance des données d'entrée. Enfin une ligne horizontale bleue (à 113,5 W/K pour le *HLC* et à

106,7 W/K pour le *Htr*), place la valeur théorique pour ce modèle, laquelle est étendue sur un intervalle à  $\pm 20\%$  représenté par la bande horizontale.

On remarque un comportement similaire pour les deux indicateurs, une légère surestimation pour le *HLC* et une dispersion plus grande pour le *Htr*. Dans les deux cas, la période estivale est sujette à quelques valeurs aberrantes. Ce point sera détaillé par la suite.

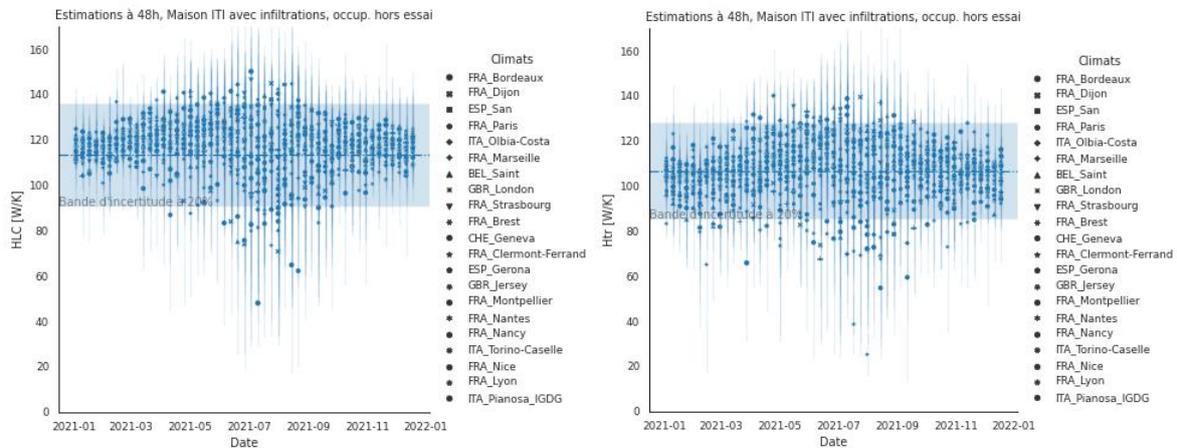
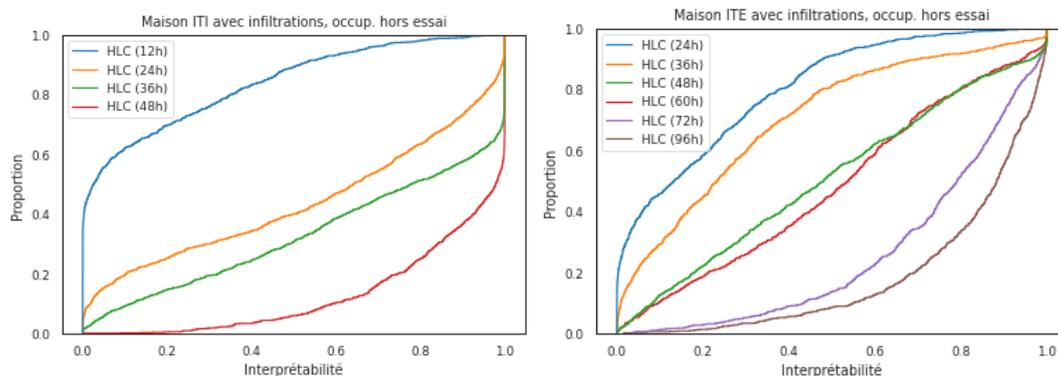


FIGURE 70 : ÉVALUATION DE LA DISPERSION ANNUELLE DES RESULTATS POUR LE MODELE ITI A 48H

Afin d'analyser, les différents cas d'étude avec différentes durées de sollicitation, l'indice d'interprétabilité à 20 % est utilisé. Il évalue pour chaque point dans quelle mesure, -valeur entre 0 et 1-, le résultat associé à son incertitude est compris dans la bande des 20 %, -à 0- il n'y a aucun recouvrement, -à 1- le résultat même incertain est compris dans la bande. La dispersion de cet indice au cours de tous les essais est ensuite évaluée et tracée sous la forme d'une distribution cumulée. La Figure 71 présente ces distributions pour tous les cas d'études avec des durées variables de sollicitation. La forme idéale de ces courbes serait une proportion à 0 pour tous les indices inférieurs à 1 et un pic pour la valeur de 1.

Ces résultats montrent une identification très rapide pour les bâtiments peu performants (passoires thermiques), qui peut être réduite à moins de 12h. Pour des bâtiments récents, le résultat dépend de la position de l'isolation, et donc de l'inertie. Pour une isolation thermique intérieure (ITI) la valeur de 48h donne de très bons résultats, et peut être réduite à 36 ou 24h sous conditions. Pour une isolation extérieure (ITE), l'inertie du bâtiment impose des durées plus longues, les résultats sont corrects à 96h, et comme précédemment cette durée pourra être réduite jusqu'à 48h sous conditions.



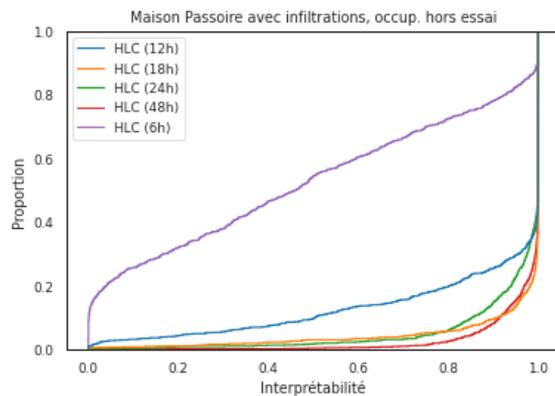


FIGURE 71 : DISPERSION DE L'INDICE D'INTERPRETABILITE POUR TOUS LES CAS D'ETUDE

L'analyse de ces résultats montre donc que, si les durées d'essai sont respectées, les résultats restent dans la bande de 20 % d'incertitude la majorité du temps. Néanmoins, nous avons remarqué, sur la Figure 70, une variabilité supérieure durant la période estivale, cette constatation étant généralisable à tous les cas d'étude. Après analyse des données météorologiques, il apparaît une dépendance nette à la température extérieure moyenne durant l'essai. La Figure 72 représente, comme précédemment, les résultats du modèle ITI organisés selon cette température extérieure, les données pour l'indicateur *HLC* à 48h et 36h sont représentées.

Le résultat est ainsi d'autant plus incertain que la température est élevée. La réduction du temps d'immobilisation mène à une dérive du résultat qui s'accompagne d'une tendance à la surestimation. Cette surestimation va dans le bon sens, car elle produit, en cas de dépassement, une fausse alarme qui mènera à une analyse plus détaillée de l'essai.

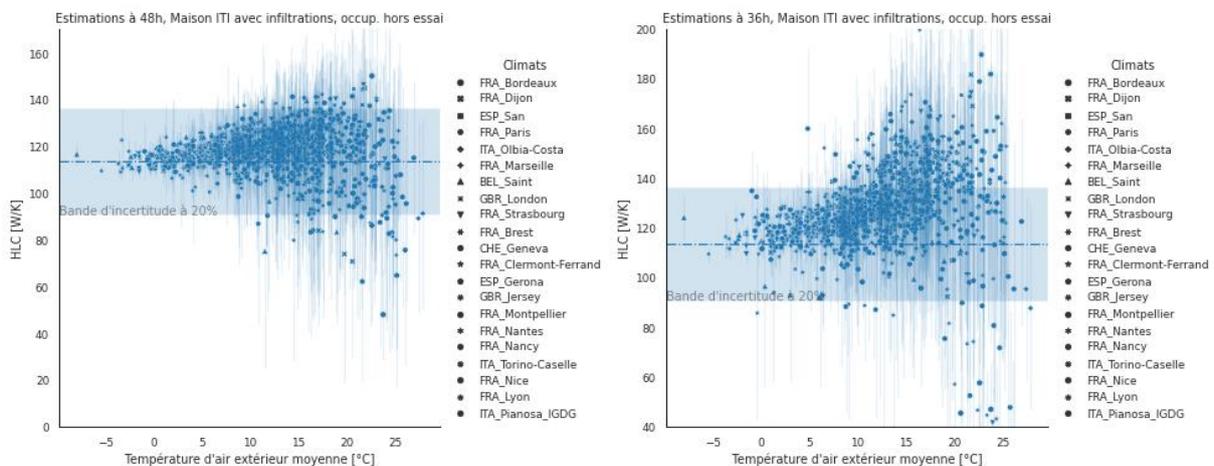


FIGURE 72 : DEPENDANCE A LA TEMPERATURE EXTERIEURE DES RESULTATS HLC POUR LE MODELE ITI A 48H ET 36H

La réduction du temps d'immobilisation ainsi que l'élévation de la température extérieure mènent donc à une augmentation de l'incertitude du résultat. Il est donc primordial d'évaluer cette incertitude sur le résultat de sortie afin de définir des seuils acceptables.

Une évaluation du biais maximal serait trop contraignante vis-à-vis de cet objectif, on réalise donc une analyse sur une fenêtre glissante de 5°C dans laquelle le biais maximal est défini avec un taux de confiance de 95 %. C'est-à-dire que sur cette fenêtre de température, 95 % des résultats auront un biais inférieur à la valeur donnée. La Figure 73 représente cette méthode de calcul. L'image de gauche représente le biais, écart absolu entre le résultat et la valeur de référence, en fonction de la température extérieure. Les lignes verticales rouges définissent la fenêtre glissante de 5°C pour une température  $T_{seuil}$ , seules les valeurs dans cette fenêtre sont ensuite considérées. L'image de droite représente ces valeurs sous forme de dispersion cumulée, et permet

de déterminer que, dans ce cas, un taux de confiance de 95 % correspond à un biais maximum de 16,7 %. Cette analyse est alors répétée pour une Tseuil variable et généralisée à tous les cas d'étude et durées de scénarios. On forme ainsi les ensembles de courbe présentés à la Figure 74, ces résultats sont également détaillés dans le Tableau 8, le Tableau 9 et le Tableau 10.

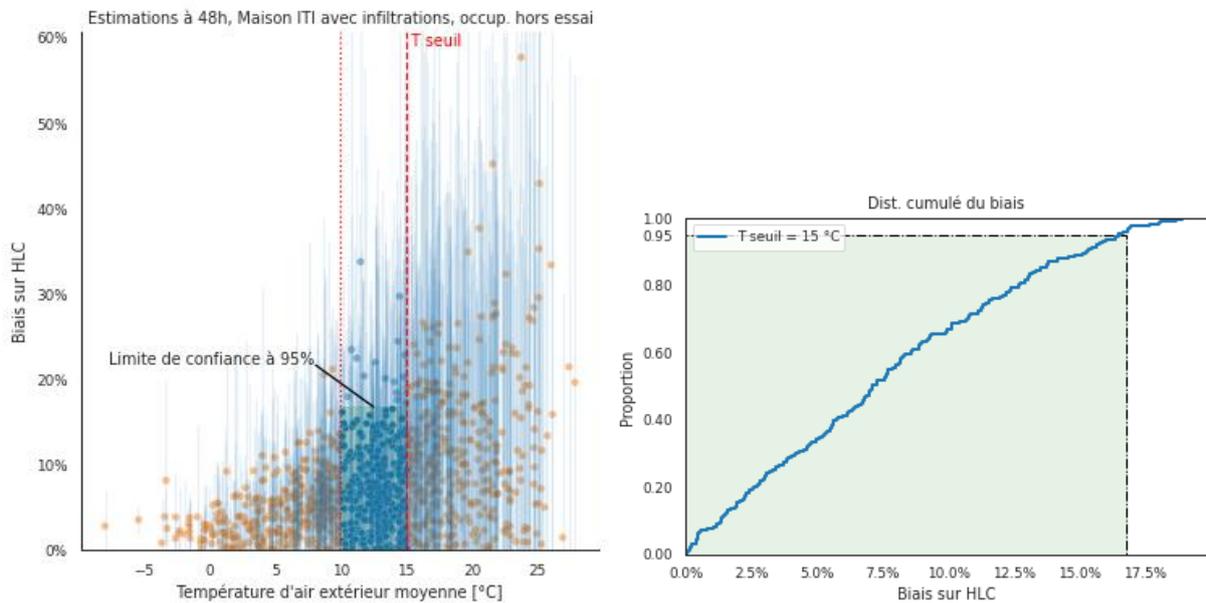


FIGURE 73 : ESTIMATION DU BIAIS AVEC UNE LIMITE DE CONFIANCE A 95 % EN FONCTION D'UNE TSEUIL

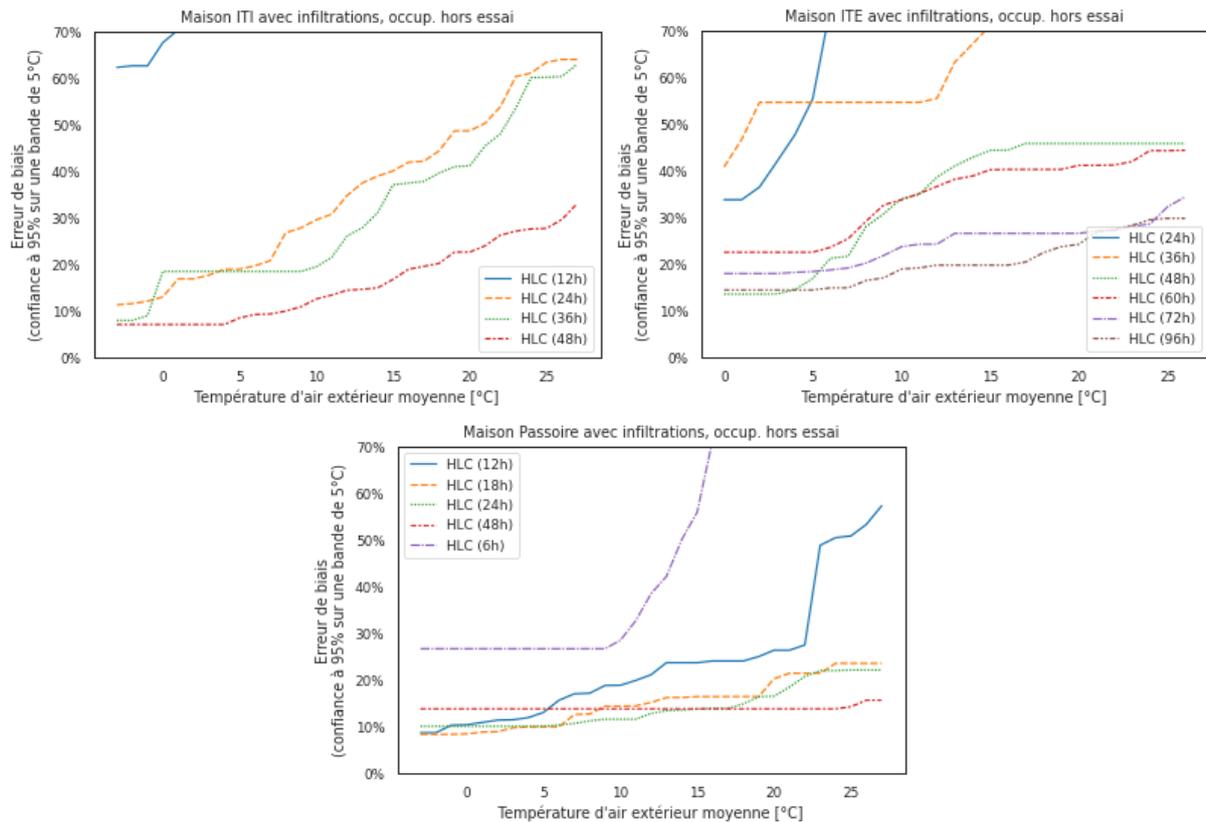


FIGURE 74 : ERREURS DE BIAIS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE MOYENNE

L'analyse de ces derniers résultats permet de définir la durée de la mesure sur le niveau de précision acceptable. Une durée d'immobilisation réduite est ainsi définie telle que l'incertitude sur ces variations

climatiques et géographiques reste raisonnable et permette d'exploiter le résultat. Les conditions d'application de cette durée réduite pourront être ajustées à des niveaux moins contraignants après études des prochains retours d'expériences et/ou la réalisation d'autres études virtuelles. Ainsi, il en résulte les limitations suivantes :

- Pour les typologies en ITI : application de la méthode en 24h si la température est inférieure à 8°C, dans les autres cas ou pour une maison neuve performante ( $U_{bat} < 0,3W/K/m^2$ ) la méthode en 48h est recommandée.
- Pour les typologies en ITE : application de la méthode en 48h si la température est inférieure à 8°C, sinon la méthode en 72h est recommandée.
- Pour les typologies anciennes non isolées : application de la méthode en 12h si la température est inférieure à 20°C, sinon la méthode en 24h est recommandée.

Le protocole envisagé définit donc une durée de test pour l'hiver, une autre pour la mi-saison/été et varie de 12h à 72h en fonction de la typologie (ITI, ITE et passoire thermique). Le Tableau 11 présente les probabilités annuelles par zones géographiques que la température moyenne soit inférieure à 8°C ou supérieure à 20°C.

**TABEAU 8 : ERREURS DE BIAIS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE MOYENNE, CAS MAISON ISOLATION INTERIEURE (ITI) :**

<i>T° ext.moy.</i>	<i>HLC (12h)</i>	<i>HLC (24h)</i>	<i>HLC (36h)</i>	<i>HLC (48h)</i>	<i>Nbr de points sur l'intervalle</i>
-3	62.2 %	11.3 %	7.9 %	7.1 %	6.0
-2	62.5 %	11.5 %	7.9 %	7.1 %	9.0
-1	62.5 %	12.1 %	9.0 %	7.1 %	15
0	67.5 %	13.0 %	18.4 %	7.1 %	25
1	70.2 %	16.8 %	18.4 %	7.1 %	40
2	70.3 %	16.9 %	18.4 %	7.1 %	57
3	71.4 %	17.6 %	18.4 %	7.1 %	72
4	78.9 %	18.9 %	18.4 %	7.1 %	94
5	79.8 %	18.9 %	18.4 %	8.5 %	112
6	89.3 %	19.6 %	18.4 %	9.2 %	129
7	90.9 %	20.8 %	18.4 %	9.3 %	158
8	91.5 %	26.7 %	18.4 %	9.9 %	174
9	91.5 %	27.8 %	18.4 %	10.9 %	216
10	91.6 %	29.5 %	19.5 %	12.5 %	255
11	92.7 %	30.7 %	21.4 %	13.4 %	275
12	97.3 %	34.7 %	26.0 %	14.4 %	275
13	97.3 %	37.4 %	27.8 %	14.6 %	312
14	99.2 %	38.9 %	31.1 %	14.9 %	308
15	101.4 %	40.0 %	37.0 %	16.7 %	298
16	101.6 %	41.9 %	37.4 %	18.9 %	305
17	108.7 %	42.1 %	37.7 %	19.5 %	312
18	113.6 %	44.3 %	39.6 %	20.2 %	290
19	113.9 %	48.6 %	40.9 %	22.6 %	268
20	114.3 %	48.6 %	41.1 %	22.6 %	242
21	121.2 %	50.2 %	45.3 %	23.9 %	214
22	128.9 %	53.8 %	48.0 %	26.2 %	193
23	132.8 %	60.2 %	53.5 %	27.1 %	165
24	132.8 %	61.0 %	60.0 %	27.6 %	136
25	138.1 %	63.3 %	60.1 %	27.7 %	122
26	162.1 %	63.9 %	60.3 %	29.6 %	101
27	183.8 %	63.9 %	62.9 %	33.0 %	68

**TABEAU 9 : ERREURS DE BIAIS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE MOYENNE, CAS MAISON ISOLATION EXTERIEURE (ITE) :**

<i>T ext. moy.</i>	<i>HLC (24h)</i>	<i>HLC (36h)</i>	<i>HLC (48h)</i>	<i>HLC (60h)</i>	<i>HLC (72h)</i>	<i>HLC (96h)</i>	<i>Nbr de points</i>
0	33.7 %	40.7 %	13.5 %	22.5 %	17.9 %	14.4 %	19
1	33.7 %	46.6 %	13.5 %	22.5 %	17.9 %	14.4 %	28
2	36.4 %	54.5 %	13.5 %	22.5 %	17.9 %	14.4 %	31
3	42.0 %	54.5 %	13.6 %	22.5 %	17.9 %	14.4 %	48
4	47.6 %	54.5 %	14.5 %	22.5 %	18.2 %	14.4 %	60
5	55.3 %	54.5 %	16.9 %	22.5 %	18.3 %	14.4 %	71
6	74.9 %	54.5 %	21.2 %	23.5 %	18.7 %	14.9 %	99
7	74.9 %	54.5 %	21.6 %	25.4 %	19.1 %	14.9 %	126
8	75.6 %	54.5 %	27.9 %	29.1 %	20.2 %	16.4 %	141
9	78.2 %	54.5 %	30.7 %	32.6 %	21.8 %	17.0 %	166
10	78.2 %	54.5 %	34.0 %	33.7 %	23.6 %	18.9 %	198
11	83.4 %	54.5 %	34.8 %	35.0 %	24.2 %	19.1 %	193
12	90.4 %	55.4 %	38.5 %	36.5 %	24.2 %	19.7 %	191
13	102.1 %	63.1 %	40.9 %	38.1 %	26.5 %	19.7 %	200
14	104.5 %	67.0 %	42.8 %	38.8 %	26.5 %	19.7 %	196
15	107.7 %	70.9 %	44.3 %	40.1 %	26.5 %	19.7 %	192
16	107.8 %	75.1 %	44.3 %	40.2 %	26.5 %	19.7 %	203
17	107.8 %	75.6 %	45.7 %	40.2 %	26.5 %	20.4 %	206
18	107.8 %	78.1 %	45.7 %	40.2 %	26.5 %	22.4 %	201
19	107.8 %	79.7 %	45.7 %	40.2 %	26.5 %	23.7 %	200
20	107.8 %	80.1 %	45.7 %	41.1 %	26.5 %	24.2 %	173
21	107.8 %	80.1 %	45.7 %	41.1 %	27.0 %	26.8 %	153
22	107.8 %	80.1 %	45.7 %	41.1 %	27.1 %	27.4 %	140
23	107.8 %	80.1 %	45.7 %	41.9 %	28.1 %	28.2 %	124
24	107.8 %	80.1 %	45.7 %	44.2 %	28.5 %	29.4 %	98
25	107.8 %	80.1 %	45.7 %	44.2 %	32.2 %	29.7 %	95
26	107.8 %	80.1 %	45.7 %	44.3 %	34.3 %	29.7 %	78

**TABLEAU 10 : ERREURS DE BIAIS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE EXTERIEURE MOYENNE, CAS MAISON NON ISOLE (PASSOIRE THERMIQUE) :**

<i>T° ext.moy.</i>	<i>HLC (6h)</i>	<i>HLC (12h)</i>	<i>HLC (18h)</i>	<i>HLC (24h)</i>	<i>HLC (48h)</i>	<i>Nbr de points</i>
-3	8.7 %	8.3 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	6
-2	8.7 %	8.3 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	9
-1	10.3 %	8.3 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	15
0	10.4 %	8.4 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	25
1	10.9 %	8.8 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	40
2	11.3 %	8.9 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	57
3	11.4 %	9.7 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	72
4	11.9 %	9.9 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	94
5	13.0 %	9.9 %	10.0 %	13.8 %	26.6 %	112
6	15.6 %	9.9 %	10.3 %	13.8 %	26.6 %	129
7	17.0 %	12.5 %	10.6 %	13.8 %	26.6 %	158
8	17.1 %	12.7 %	11.2 %	13.8 %	26.6 %	174
9	18.8 %	14.3 %	11.6 %	13.8 %	26.6 %	216
10	18.8 %	14.3 %	11.6 %	13.8 %	28.4 %	255
11	19.8 %	14.4 %	11.6 %	13.8 %	32.6 %	275
12	21.1 %	15.2 %	12.8 %	13.8 %	38.4 %	275
13	23.6 %	16.2 %	13.4 %	13.8 %	42.1 %	312
14	23.6 %	16.2 %	13.5 %	13.8 %	50.0 %	308
15	23.6 %	16.4 %	13.7 %	13.8 %	55.8 %	298
16	24.0 %	16.4 %	13.8 %	13.8 %	71.3 %	305
17	24.0 %	16.4 %	13.8 %	13.8 %	87.8 %	312
18	24.0 %	16.4 %	14.8 %	13.8 %	118.5 %	290
19	25.0 %	16.4 %	16.4 %	13.8 %	154.3 %	268
20	26.3 %	20.2 %	16.5 %	13.8 %	230.5 %	242
21	26.3 %	21.4 %	18.4 %	13.8 %	245.3 %	214
22	27.4 %	21.4 %	20.7 %	13.8 %	311.5 %	193
23	48.8 %	21.4 %	21.9 %	13.8 %	342.6 %	165
24	50.4 %	23.5 %	21.9 %	13.8 %	366.4 %	136
25	50.8 %	23.5 %	22.1 %	14.2 %	499.4 %	122
26	53.2 %	23.5 %	22.1 %	15.6 %	817.4 %	101
27	57.2 %	23.5 %	22.1 %	15.6 %	1046.3 %	68

**TABLEAU 11 : PROBABILISEES D'OCCURRENCE DE SEUILS SUR LA TEMPERATURE EXTERIEURE JOURNALIERE (MOYENNE SUR 24H) :**

<i>Zone</i>	<i>p (Text &lt; 8°C)</i>	<i>p (Text &gt; 20°C)</i>
<i>H1a</i>	25.5 %	9.0 %
<i>H1b</i>	30.1 %	11.5 %
<i>H1c</i>	26.6 %	19.5 %
<i>H2a</i>	22.7 %	9.6 %
<i>H2b</i>	19.7 %	13.4 %
<i>H2c</i>	19.7 %	18.4 %
<i>H2d</i>	21.1 %	26.6 %
<i>H3</i>	7.1 %	33.7 %

# PROFEEL

9 défis pour la rénovation énergétique

