

LIVRABLE PUBLIC N°1.1.c

MÉTHODE ET PROTOCOLE SEREINE ENVELOPPE V2 POUR LE LOGEMENT COLLECTIF

JUIN 2025



Avec le programme PROFEEL2, la filière Bâtiment, et notamment 16 organisations professionnelles, s'est engagée à contribuer à la nécessaire accélération et fiabilisation des rénovations énergétiques.

PROFEEL2 se compose concrètement de 8 projets. Ils 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 permettent d'accompagner les acteurs durant toutes les étapes d'un projet de rénovation : en amont, pendant et après les travaux. Et ces ressources techniques sont déjà plébiscitées par les professionnels : plus de 800 ressources techniques sont disponibles sur www.proreno.fr et sont consultées/téléchargées 400 000 fois par an.

SEREINE2, un des 8 projets PROFEEL2, 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 9 organismes publics et privés, a permis le déploiement de la méthode de mesure rapide et fiable de la performance énergétique réelle des maisons individuelles. Celle-ci a été appliquée sur près de 150 maisons. Le projet visait également la création d'un nouvel outil de mesure qui permettra de caractériser les performances énergétiques des bâtiments de logements collectifs. Ce protocole a été expérimenté sur une vingtaine de bâtiments, soit près de 40 appartements.

Le présent document est le fruit d'un travail collectif de ces 9 organismes publics et privés, sous l'observation des acteurs de la filière bâtiment en France.

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

MEMBRES DU CONSORTIUM :



RÉDACTION :

Arnaud CHALLANSONNEX – CSTB
 Arnaud JAY – CEA
 Baptiste POIRIER – Cerema
 Hervé ILLY – CSTB
 Long PEI – ARMINES

Mickaël RABOUILLE – INES
 Myriam HUMBERT – Cerema
 Patrick SCHALBART – ARMINES
 Sarah JURICIC – CSTB
 Simon THEBAULT – CSTB

RELECTURE

Arnaud CHALLANSONNEX – CSTB
 Emilie DORION – AQC

COORDINATION

Simon THEBAULT – CSTB

PARTENAIRES PROFEEL :

Pouvoirs Publics



Porteurs



Financeurs



Filière Bâtiments



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



SUIVI DES VERSIONS

Indice	Date	Validation	Commentaire
1.0	31/12/2024	Simon THEBAULT - CSTB	Première version
1.1	24/02/2025	Simon THEBAULT - CSTB	Version consolidée
2.0	25/06/2025	Emilie DORION – AQC Arnaud CHALLANSONNEX - CSTB	Version relue et validée

SOMMAIRE

1/ Introduction	6
2/ Planification des mesures à réaliser	8
2.1/ Nombre de mesures à réaliser	8
2.2/ Position des logements à mesurer	10
2.3/ Conditions météorologiques nécessaires	11
Conditions de température	11
Conditions de vent et d'étanchéité à l'air	11
3/ Description des mesures effectuées	13
3.1/ Mesures à l'échelle des logements	13
Protocole expérimental	13
Méthode d'analyse	15
3.2/ Mesures locales des parois extérieures	16
3.3/ Période de validité des mesures	21
4/ Restitution de l'évaluation sous forme d'un indicateur global	23
4.1/ Faisabilité de l'évaluation globale	23
Hypothèse d'homogénéité de l'enveloppe	23
Disponibilité d'une note de calcul thermique	23
Plans et mètres	23
4.2/ Méthode d'évaluation de l'indicateur global	24
4.3/ Limites à l'indicateur : abaques de mise en perspective	25
5/ Application du protocole actuel sur des opérations réelles	27
5.1/ Application « A » sur un moyen collectif après rénovation	27
Visite technique et détection des défauts	27
Mesures dans les appartements	27
Mesures locales	32
Indicateur global enveloppe	35
5.2/ Application « B » sur un collectif neuf de taille moyenne	37
Visite technique et détection des défauts	37
Mesures dans les appartements	39
Mesures locales	41
Indicateur global	42
6/ Conclusions et perspectives	44
6.1/ Perspectives	44
7/ Références	45
8/ Annexes	46
Annexe A. Plan d'expériences numériques pour la détermination des seuils de détection de contre-performance	
46	
Simuler un bâtiment selon sa note de calcul thermique et le dégrader	46

tester les plans d'instrumentation	48
Analyse des résultats	49
Annexe B. Évaluation de l'incertitude des mesures en appartement	52
Annexe C. Nuancier SEREINE pour l'évaluation de l'absorptivité solaire des parois du bâtiment	59
Annexe D. Plan d'expériences virtuelles pour évaluer la fiabilité d'une mesure Sereine logement	61
Méthodologie	61
Méthode d'analyse	61
Cas d'étude : immeuble « Montreau » et immeuble « Feyzin »	62
Méthode indirecte	63
Méthode directe : pertinence d'intégrer des fluxmètres dans la chaîne	67
Annexe E. Retour d'expérience sur l'évaluation expérimentale de l'incertitude de mesure des flux mitoyens	71
Etude préliminaire à échelle réduite	71
Etudes par surinstrumentation de parois réelles	75
Annexe F. Calcul et mise à jour de l'indicateur global	80
Annexe G. Abaques des limites de l'indicateur global	82
Annexe H. Protocole de production d'un abaque personnalisé	86

1/ INTRODUCTION

Ce document présente la méthodologie appliquée pour une évaluation SEREINE Enveloppe pour un bâtiment de logements collectifs.

Forts de notre expérience sur le secteur de la maison individuelle, nous nous sommes vite aperçus qu'il était impossible de répliquer la même méthodologie de mesure. En effet cela impliquerait d'immobiliser l'ensemble du bâtiment sur plusieurs jours et d'utiliser un volume d'instrumentation potentiellement réhibitore d'un point de vue logistique et opérationnel : mobilisation d'un module de chauffage dans chaque pièce du bâtiment, mesure d'étanchéité sur tous les logements à la fois, ..., etc.

Le logement collectif représente 45,2 % des habitations en France métropolitaine¹. Il apparaît donc essentiel d'offrir une solution technique d'évaluation qui permette de vérifier la performance d'isolation de ces bâtiments.

L'approche proposée est donc une méthode par échantillonnage. La performance de l'isolation de plusieurs logements du bâtiment est évaluée séparément, avec également quelques mesures ponctuelles au niveau des murs extérieurs. Les indicateurs obtenus pour chacun des logements/murs sont ensuite agrégés afin d'obtenir un indicateur global qualifiant l'ensemble du bâtiment. Cette approche par échantillonnage présente plusieurs avantages :

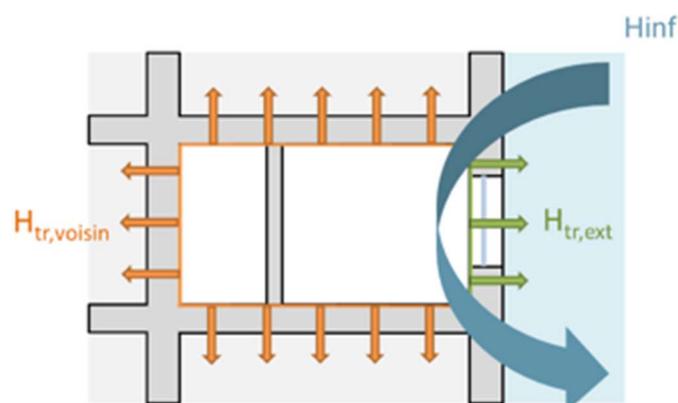
- elle est similaire à ce qui est réalisé pour la mesure de perméabilité à l'air,
- elle ne nécessite pas que l'ensemble du bâtiment soit vide, certains logements seulement étant testés.



FIGURE 1 : PRINCIPE DE MESURE PAR ECHANTILLONNAGE DE LA PERFORMANCE D'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS DE LOGEMENTS COLLECTIFS

Dans la pratique, elle implique des changements majeurs au niveau méthodologique.

En effet, rien qu'au niveau des mesures SEREINE par appartements, une source d'incertitude importante vient s'ajouter à celles déjà existantes : celle des échanges de flux de chaleur avec les logements voisins.



¹ Source : Insee ; ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Service des données et études statistiques (SDÉS) ; estimations annuelles du parc de logements au 1^{er} janvier 2023.

FIGURE 2 : ILLUSTRATION DU BILAN THERMIQUE (SIMPLIFIE) LORS D'UNE MESURE SEREINE D'UN APPARTEMENT

L'objectif de la mesure SEREINE par appartement est effectivement de mesurer le coefficient de déperditions thermiques par transmission $H_{tr,ext}$ illustré en Figure 2. Pour cela, la connaissance de la puissance de chauffe et des conditions intérieures et extérieures ne suffit pas. Il convient d'abord d'estimer les pertes thermiques par infiltration H_{inf} mais aussi d'évaluer et soustraire le coefficient d'échange avec les espaces chauffés voisins $H_{tr,voisins}$ qui ne reflète pas la performance d'isolation thermique du bâtiment, car les parois mitoyennes sont en général peu ou pas isolées.

La meilleure stratégie consiste donc à limiter ces flux de chaleur, et à les estimer de manière suffisamment précise pour modérer leur impact sur l'incertitude globale de la mesure. Son résultat ($H_{tr,ext}$) doit être pertinent et informatif.

Or, comme présenté ci-après, la mise en place de cette stratégie implique de revoir complètement le protocole de mesure ainsi que la méthode d'analyse.

Pour pouvoir remonter à un indicateur global à l'échelle du bâtiment, d'autres types de mesure sont nécessaires. De même, une méthode probabiliste (nouvelle) permettra d'évaluer le risque de contre-performance (qui reste l'objectif in fine de la méthode SEREINE).

Dans ce document, la méthodologie sera détaillée en 4 étapes :

1. Comment sélectionner les logements et murs à mesurer (nombre et position), ainsi que la période où réaliser les mesures ;
2. Comment mesurer le niveau d'isolation extérieur global des logements sélectionnés ;
3. Comment mesurer ponctuellement le niveau d'isolation des murs extérieurs ;
4. Comment agréger ces résultats sous forme d'un indicateur global de la performance d'isolation du bâtiment entier.

Pour finir, une présentation des limitations de la méthodologie et des perspectives à envisager sera donnée en guise de conclusion.

Au-delà du changement de méthode, d'autres modifications surviennent de fait au niveau du dispositif de mesure par rapport à celui utilisé pour la maison individuelle. Ce sujet fait l'objet du livrable 1.2.b intitulé *Dispositif de mesure SEREINE Enveloppe V2 pour le Logement Collectif*.

De même, l'articulation opérationnelle des différentes évaluations (Enveloppe et Systèmes) est cruciale pour mener à bien la méthode SEREINE en logements collectifs. Ce volet sera abordé dans le livrable 1.3.a intitulé *Protocole global SEREINE pour le logement collectif : Articulation des différentes mesures et vérifications sur l'enveloppe et les systèmes*.

2/ PLANIFICATION DES MESURES A REALISER

L'objet final de la solution Enveloppe pour le logement collectif est d'évaluer l'isolation thermique globale de l'enveloppe déperditive. Cette évaluation se fait par un indicateur global qui repose sur un échantillon de mesures représentatives de l'enveloppe avec d'une part des mesures SEREINE d'appartements et d'autre part des mesures locales des parois déperditives. Pour être représentatives, le nombre et la localisation de ces deux types de mesures dépendent de la typologie du bâtiment évalué. Les règles à suivre pour dérouler le protocole sont expliquées ci-après.

2.1/NOMBRE DE MESURES A REALISER

Le type et le nombre de mesures à réaliser dépendent de l'exactitude voulue pour l'indicateur global. En effet, plus les mesures seront nombreuses et représentatives, relativement à la typologie et à la taille du bâtiment, plus l'évaluation globale de la performance sera fiable.

Au contraire, si les mesures ne sont pas assez représentatives ou pas assez nombreuses, elles pourraient ne pas détecter une contre-performance significative si bien que l'indicateur global se résumerait à un faux positif. Il indiquerait une performance alors que l'enveloppe serait contre-performante.

Par ailleurs, l'exactitude voulue est conditionnée au besoin du client. En fonction de ses enjeux, un compromis doit être fait entre le nombre de logements à immobiliser pour une mesure et l'exactitude atteignable. Les seuils donnés dans le Figure 3 ont ainsi pour objet de guider le choix d'un compromis, en fonction du bâtiment évalué. Les chiffres indiquent le pourcentage de dégradation de la performance effectivement obtenue au regard de la performance théoriquement attendue.

Ces seuils ont été établis à l'aide de centaines de simulations numériques de contre-performances sur 3 bâtiments de typologie différente. Chaque seuil représente alors la limite à partir de laquelle l'indicateur global est fiable et ne donne plus de faux positifs. Le seuil implique donc que, si l'indicateur confirme la performance du bâtiment, il est très improbable que celui-ci soit en réalité contre-performant. Le plan d'expérience numérique qui a servi à la détermination de ces seuils est détaillé en Annexe A.

Le Figure 3 se lit donc de deux manières différentes :

- Soit la contrainte est sur le nombre de logements mobilisables : il en découle une contre-performance minimale détectable avec certitude ;
- Soit la contrainte porte sur la détection d'une contre-performance à un seuil imposé : le nombre de logements à mobiliser pour des mesures est alors ainsi défini.

Par exemple, supposons que seuls deux logements peuvent être mobilisés pour une évaluation SEREINE. Le bâtiment possède 15 logements. Il ne sera pas possible de détecter des contre-performances inférieures à 20,7%. Si le maître d'ouvrage souhaite finalement une exactitude plus élevée, il faudra alors qu'il fasse en sorte de libérer au moins 1 logement de plus pour la mesure.

La Figure 3 montre également que pour des bâtiments de plus grande taille (tours et barres de plus de 25 logements), les seuils de détection sont faibles. Cela signifie en réalité que le nombre et la nature des mesures envisagées ne sont pas suffisamment représentatifs pour évaluer la performance du bâtiment. L'indicateur maintient alors l'hypothèse en zone d'indécision, à défaut d'avoir suffisamment d'information par la mesure. Quoi qu'il en soit, l'analyse de la courbe d'indicateur global, tel que montré dans les deux exemples en partie 5/ aiguillera l'opérateur ainsi que le client sur la conduite à tenir pour la suite : poursuite des mesures ou résultat malgré tout satisfaisant au regard des attentes.

NB : Notons qu'il n'est pas nécessaire de faire les mesures au même moment. Même si la mesure simultanée permet une mutualisation des coûts d'intervention, un échelonnement des essais est envisageable et souhaitable s'il peut permettre de déployer le protocole conformément aux préconisations de ce livrable compte tenu des contraintes opérationnelles (typiquement, si le nombre de mesures à réaliser est important, que la main d'œuvre est limitée et que la distance de déplacement est faible).

FIGURE 3 : EFFET DU NOMBRE DE MESURES SUR LE SEUIL* DE DETECTION DES CONTRE-PERFORMANCES

Nombre d'appartements mesures**	2			3			4		
	Paroi courante Plancher haut ou plancher bas	Plancher haut et plancher bas	Paroi courante Plancher haut Plancher bas	Paroi courante Plancher haut ou plancher bas	Plancher haut et plancher bas	Paroi courante Plancher haut Plancher bas	Paroi courante Plancher haut ou plancher bas	Plancher haut et plancher bas	Paroi courante Plancher haut Plancher bas
Barre de petite taille < 15 logements	23,5	23,5	20,7	20,7	22,7	19,2	19,2	22,7	15,5
Tour de taille moyenne ~30 logements	19,8	14,8	14,8	19,8	14,8	14,8	4,0	13,3	-
Barre de taille moyenne ~25 logements	23,0	17,3	16,8	23,0	17,3	17,3	<i>Non testé</i>	<i>Non testé</i>	<i>Non testé</i>

* Rappel : le seuil de détection des contre-performances signifie qu'en deçà du seuil, des faux positifs peuvent être rencontrés. On notera que les seuils de détection sont très proches ou inférieurs aux seuils d'acceptabilité de 20 % de contre-performance. Cela signifie alors que dès qu'un résultat est accepté, on peut être certain que la performance atteinte est sensiblement proche de celle qui était prévue.

** Concernant les mesures d'appartements, il est nécessaire d'effectuer une mesure à chacun des étages extrêmes.

*** Les mesures locales sont effectuées, au moins 3 fois pour chaque type de paroi de manière à être représentatif.

2.2/ POSITION DES LOGEMENTS A MESURER

Si les mesures locales peuvent être réalisées assez librement en termes de pièce et de logement, la position des appartements mesurés ne peut être choisie arbitrairement.

En effet, pour que les flux de chaleurs mitoyens n'apportent pas trop d'incertitude à la mesure des déperditions extérieures, il est nécessaire que la **surface de parois extérieures** (murs verticaux, planchers haut/bas ou donnant sur l'extérieur ou des espaces non chauffés) soit **au moins égale à la surface de murs des logements mitoyens** (ou donnant sur des espaces chauffés).

Cette contrainte implique nécessairement une forte limitation des logements susceptibles d'être mesurés, ceux-ci devant être nécessairement **au premier (ou dernier niveau) ET en angle** (voir illustration ci-dessous).

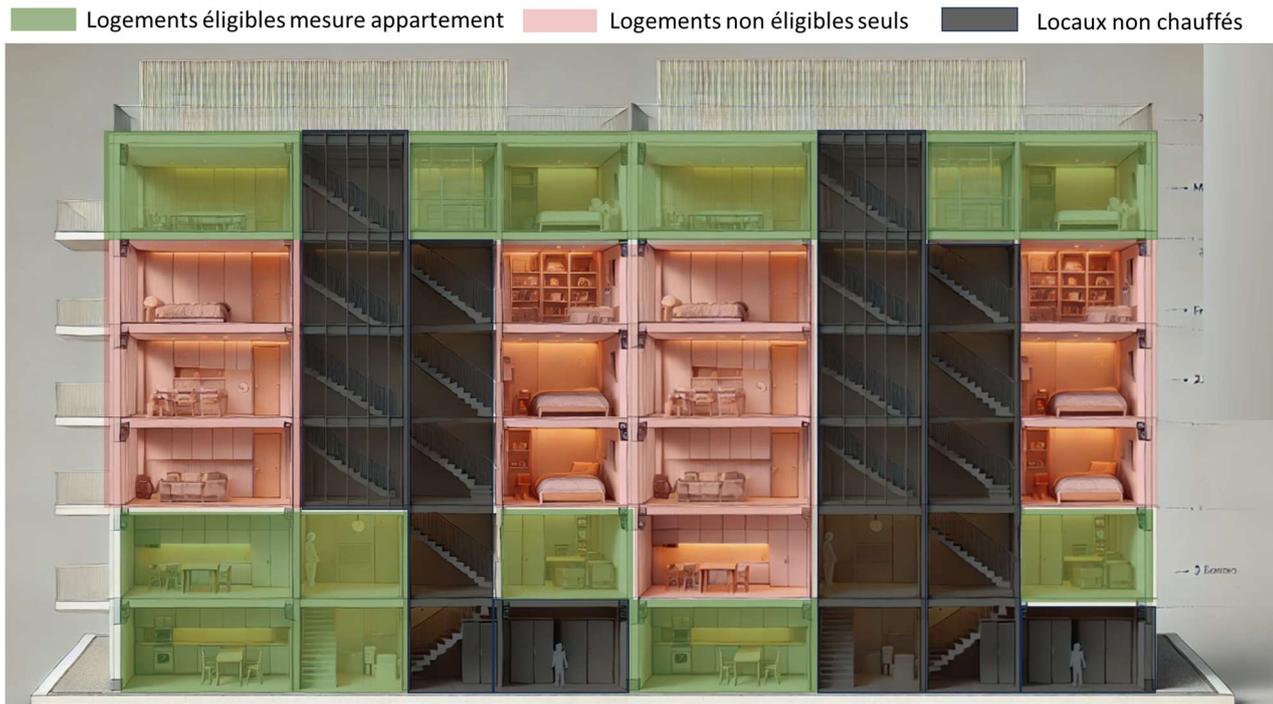


FIGURE 4 : EXEMPLE ILLUSTRANT LES LOGEMENTS ELIGIBLES A UNE EVALUATION SEREINE APPARTEMENT AU SEIN D'UN BATIMENT DE LOGEMENTS COLLECTIFS

Pour avoir le plus de **représentativité** et favoriser la précision de l'indicateur global de la performance d'isolation à l'issue de l'évaluation, il est important **d'équilibrer le nombre de mesures de logements au dernier et au premier niveau**. De cette manière, une plus grande variété de typologies de murs sera intégrée dans la mesure.

NB : Dans certaines configurations, il peut être intéressant de « grouper » plusieurs appartements en un échantillon plus grand afin d'obtenir ce quota de surface extérieure suffisant voire plus avantageux (ex : en regroupant un appartement en angle au dernier étage avec le logement en dessous).

2.3/ CONDITIONS METEOROLOGIQUES NECESSAIRES

CONDITIONS DE TEMPERATURE

Idéalement, les mesures doivent être réalisées en **hiver** (température extérieure moyenne sur la durée de la mesure **inférieure à 10°C** pour des logements de **performance moyenne, 5°C** pour les logements à **haute performance**). Dans le cas contraire, il reste possible d'effectuer des mesures jusqu'à une température extérieure moyenne de **20°C**, mais un protocole plus lourd et long devra être mis en place (avec l'instrumentation et le chauffage des appartements voisins) afin d'assurer une précision correcte des mesures.

		Logements de performance moyenne (U _{bat} > 0,5 W/m ² /K)	Logements de haute performance (U _{bat} < 0,5 W/m ² /K)
Température extérieure moyenne sur la durée de la mesure	< 5°C	Protocole voisins présents (standard) *	
	< 10°C		
	< 20°C	Protocole voisins absents (plus lourd) *	

FIGURE 5 : CONDITIONS EN TEMPERATURE NECESSAIRES POUR LES MESURES APPARTEMENT (ET IMPLICATION SUR LE PROTOCOLE DE CHAUFFE)

* Une description plus détaillée des protocoles « voisins absents » et « voisins présents » sera donnée en section 3.1/ Mesures à l'échelle des logements.

CONDITIONS DE VENT ET D'ETANCHEITE A L'AIR

A l'instar de la méthode SEREINE en maison individuelle, une mauvaise perméabilité à l'air et/ou un vent trop important pendant l'essai peuvent fortement biaiser l'estimation des déperditions par infiltration.

Ici, un ratio similaire à celui de la méthode MI est préconisé avec un seuil maximal de $Q_{4Pa-surf} \times V_{max}^2 = 50 \text{ m}^4/(\text{h} \cdot \text{s}^2)$ pour les logements en dernier étage, et jusqu'à $Q_{4Pa-surf} \times V_{max}^2 = 100 \text{ m}^4/(\text{h} \cdot \text{s}^2)$ pour les autres logements (les planchers hauts n'étant pas pris en compte dans le périmètre de fuite).

Le tableau suivant présente les vitesses de vent maximales acceptables en fonction de la perméabilité pour satisfaire au critère du seuil maximal de $Q_{4Pa-surf} \times V_{max}^2$:

Vitesse de vent maximale recommandée (m/s)	Q _{4Pa-surf} seuil logements au dernier étage (m ³ /h/m ²)	Q _{4Pa-surf} seuil autres logements (m ³ /h/m ²)
5	2	4
7	1	2
8	0,8	1,6
10	0,5	1
14	0,3	0,6
18	0,2	0,4
20	0,1	0,2

FIGURE 6 : SEUILS DE VENT MAXIMAL RECOMMANDES AU COURS DU TEST EN FONCTION DE LA PERMEABILITE A L'AIR DU BATIMENT

Toutefois ces recommandations sont données à titre indicatif afin de limiter le risque d'incertitude et de biais liés à une trop forte infiltration d'air. De futurs travaux seraient nécessaires pour affiner ces seuils en fonction d'autres paramètres (nature traversante des logements, orientation, etc.)

NB1 : En cas de perméabilité trop importante constatée sur site pour la réalisation d'une mesure appartement, il est possible de **colmater temporairement** les plus grandes fuites identifiées afin de retomber en dessous du seuil. Attention

cependant : il ne s'agit alors plus de la mesure d'étanchéité officielle, mais de celle permettant l'exploitation de la mesure SEREINE appartement dans de bonnes conditions.

NB2 : Il est également important de préciser que les **fuites dans les parois séparant le logement mesuré et les autres appartements** (cloisons mitoyennes, plancher intermédiaires mitoyens) **doivent être négligeables** pour éviter toute circulation d'air entre logements, qui n'est pour l'instant pas prise en compte dans la méthodologie.

3/ DESCRIPTION DES MESURES EFFECTUEES

3.1/MESURES A L'ECHELLE DES LOGEMENTS

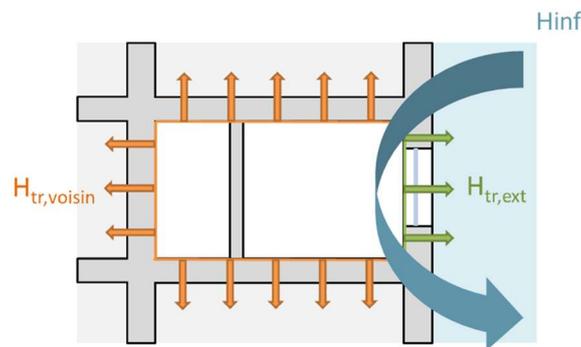
Pour rappel, l'indicateur que l'on cherche à mesurer pour chacun des logements testés est similaire à celui obtenu pour le test en maison individuelle. Il s'agit du coefficient H_{tr} (W/K) qui est défini comme étant la somme des déperditions du logement par transmission (via les parois, les ponts thermiques et les menuiseries). Cependant, on ne cherche à caractériser que les déperditions vers l'extérieur et les espaces non chauffés (combles, vide sanitaire ou cave, espaces communs si ces derniers ne sont pas chauffés). En effet, puisque l'objectif est de caractériser le bâtiment dans son ensemble, les transferts de chaleur entre différents logements ne doivent pas être inclus.

Sur la figure suivante (rappel de la Figure 2 présentée en introduction), l'ensemble des déperditions du logement sont représentées. Il s'agit des déperditions :

- Par infiltration (H_{inf})
- Par transmission vers les espaces chauffés ($H_{tr,voisin}$)
- Par transmission vers l'extérieur et les locaux non chauffés ($H_{tr,ext}$)

Et en considérant l'ensemble des déperditions du logement H_{tot} , on a donc :

$$H_{tot} = H_{inf} + H_{tr,voisin} + H_{tr,ext}$$



C'est ce paramètre $H_{tr,ext}$ que l'on cherche à estimer. Cependant, la méthode SEREINE développée pour la maison individuelle ne permet de mesurer que l'ensemble des déperditions H_{tot} , sans distinction de la typologie de déperdition. Le coefficient H_{tr} est alors déduit en retirant les déperditions H_{inf} qui, elles, sont estimées via la vitesse de vent, la géométrie du bâtiment et les résultats du test d'étanchéité à l'air. Il en va de même pour un appartement, cependant il est également nécessaire d'estimer les déperditions vers les logements voisins afin de les retrancher. Par ailleurs, l'incertitude sur les échanges thermiques avec les espaces mitoyens aura un fort impact sur l'incertitude du coefficient $H_{tr,ext}$ déterminé. Il est à noter que la problématique est la même pour une maison mitoyenne.

PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Comme pour une mesure SEREINE en maison individuelle, les appartements testés sont équipés de modules *Intérieur* chauffant les différentes pièces.

A l'image de la mesure en maison individuelle, le logement mesuré doit être **préalablement préchauffé** à une température homogène.

Ce préchauffage doit être particulièrement anticipé dans la configuration « voisins absents » (voir ci-après) car la température de consigne, plus élevée qu'en conditions classiques d'occupation, doit être réglée plusieurs jours avant l'audit (dans l'appartement testé et les appartements voisins) de manière à assurer la stabilisation suffisante de la puissance de chauffage.

La consigne de chauffage à appliquer pour les mesures à l'échelle des logements est **une régulation en température fixe** afin de minimiser l'inertie et la dispersion des flux de chaleur mitoyens. Son niveau, égal à la température de préchauffage, dépend des conditions d'occupation des logements voisins et de la saison :

- En **conditions « voisins présents »** (Figure 7.a), la température choisie est celle de la température la plus chaude relevée dans le logement préalablement préchauffé, idéalement de **20 à 22°C**. La mesure est alors possible **uniquement en hiver** (température extérieure moyenne inférieure à 10°C pour des logements de performance moyenne, 5°C pour les logements à haute performance)
- En **conditions « voisins absents »** (Figure 7.b), dans la mesure où les logements voisins peuvent être eux aussi pilotés en température, on cherche alors à élever la température du logement mesuré et des logements voisins à **15 °C au-dessus de la température extérieure moyenne (dans la limite de 35°C à l'intérieur)**. Dans ce cas, la mesure est **possible en hiver et en mi-saison**, mais impose de chauffer les appartements voisins et peut nécessiter un temps de préchauffage accru (de 1 à quelques jours supplémentaires selon l'inertie du bâtiment, même si la présence d'occupants est possible pendant cette phase de préchauffage).

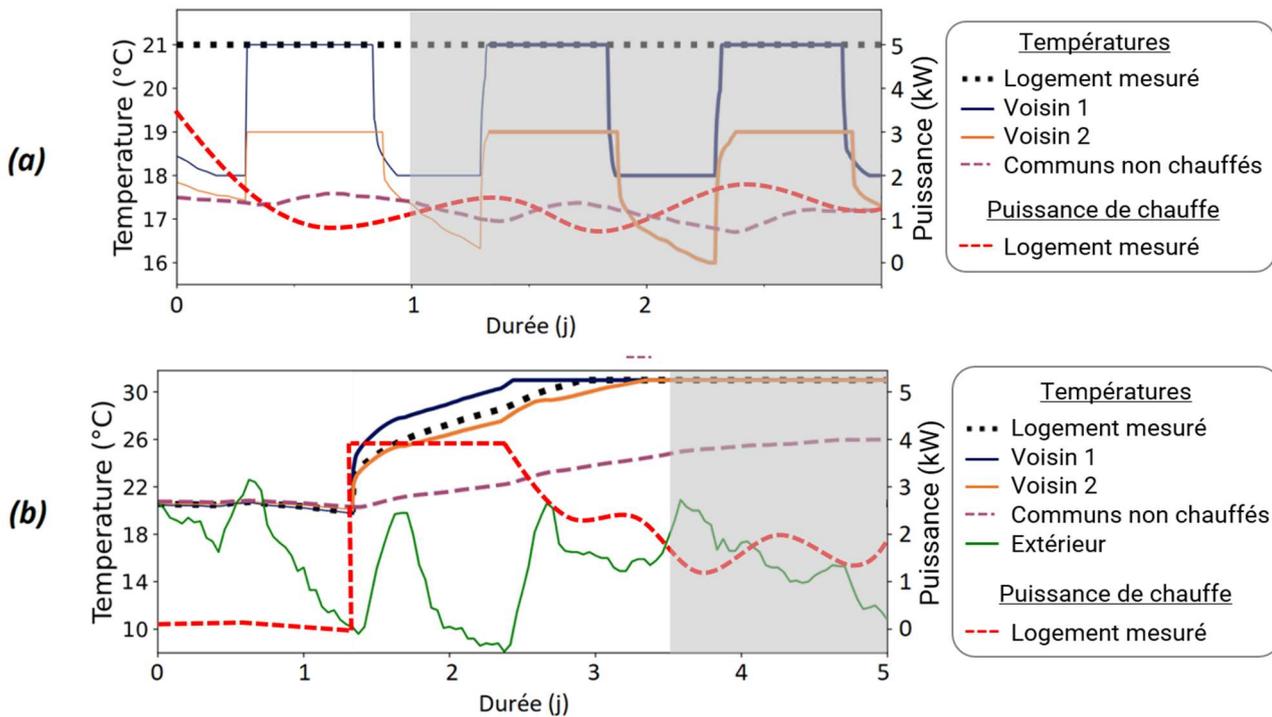


FIGURE 7 : ÉVOLUTIONS DES TEMPERATURES D'UNE EVALUATION SEREINE SUR UN LOGEMENT EN CONDITIONS "VOISINS PRESENTS" (A) ET "VOISINS ABSENTS" (B)

Les zones grisées sur les graphiques illustrent la partie des mesures analysée (nécessitant une inoccupation) pour lequel le préchauffage est atteint. Il est à noter que la puissance de chauffage (en rouge pointillé) doit également être stabilisée pour considérer la période préchauffée atteinte. C'est la raison pour laquelle la période de mesures exploitables sur le graphique (a) voisins présents ne démarre qu'à 1,25 jours, et à 3,5 jours sur le graphique (b) voisins absents.

A l'extérieur, les espaces non chauffés sont également équipés de modules de température (« modules Adjacent »), et un module de température d'air extérieur (« module Extérieur ») est positionné en extérieur (balcon, cour, jardin) le plus possible à l'abri du soleil.

Concernant l'évaluation des flux de chaleur mitoyens, une méthode de mesure directe au moyen de plaques fluxmétriques est nécessaire (que les voisins soient présents ou absents avec la présence d'instrumentation).

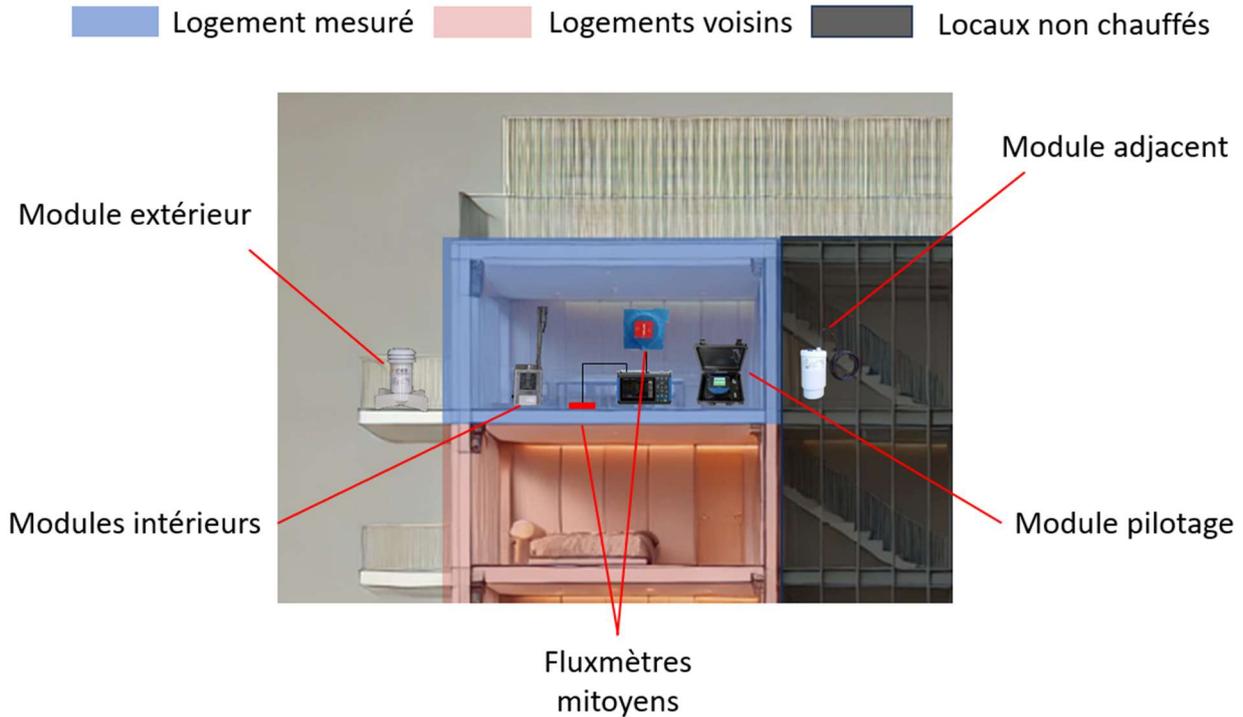


FIGURE 8 : EXEMPLE DE POSITIONNEMENT DU DISPOSITIF DE MESURE POUR LA REALISATION D'UNE MESURE SEREINE EN APPARTEMENT

L'intégration des fluxmètres et de leur acquisition dans le dispositif de mesure est évoquée dans le livrable séparé « Dispositif de mesure SEREINE Enveloppe V2 pour le Logement Collectif », qui est à consulter pour obtenir plus de détails à ce sujet. Dans le cadre des expérimentations SEREINE 2, un autre système d'acquisition avait été utilisé en parallèle afin de tester la faisabilité de l'approche, qui s'est avérée concluante.

Avant l'immobilisation totale du logement, comme en maison individuelle, un test de perméabilité à l'air est réalisé suivant la norme ISO 9972 avec obturation des entrées d'air et des bouches d'extraction. Les protections solaires, le cas échéant, sont fermées, et des occultations sont placées sur les menuiseries non équipées de protections solaires.

En termes de temps de mesure, **une fois le logement correctement préchauffé**, une durée de **12h** est estimée suffisante, cependant si l'essai est réalisé en conditions « **voisins absents** » en raison des conditions de températures extérieures, **ce préchauffage peut prendre de 1 à plusieurs jours** selon le niveau d'inertie (avant que la température et la puissance de chauffage ne se stabilisent).

En condition « **voisins présents** », il convient également de s'assurer que la température au sein du logement testé était stable et homogène au cours des 4 jours précédant la mesure. Pour cela, l'installation du dispositif de mesure en amont du test (sans chauffage) peut permettre de garantir ce préchauffage.

METHODE D'ANALYSE

Etant donnée la limitation des phénomènes dynamiques au cours du protocole (pour limiter la valeur et la dispersion des flux thermiques mitoyens), la méthode d'analyse choisie diffère fortement de celle utilisée pour la maison individuelle, et se distingue par une bien plus grande simplicité en négligeant les phénomènes dynamiques (uniquement sur la partie préchauffée du test).

La méthode d'analyse consiste à récolter la puissance de chauffage, la température d'air intérieure et extérieure, la température des espaces voisins non chauffés, et les flux mitoyens mesurés au travers des plaques fluxmétriques.

L'évaluation du H_{tr} se fait de la manière analytique suivante :

$$H_{tr} = \int_{t_{début}}^{t_{fin}} (P_h(t) + P_{inf}(t) + P_{mit}(t)) \cdot dt / \int_{t_{début}}^{t_{fin}} (T_i(t) - T_{e,eq}(t)) \cdot dt$$

Avec $P_h(t)$ la puissance perdue ou gagnée du fait des flux mitoyens, $T_i(t)$, $T_{e,eq}(t)$, $P_{inf}(t)$, $P_{mit}(t)$

Les temps $t_{début}$ et t_{fin} correspondent à la période analysée après préchauffage et stabilisation de la puissance de chauffe. $H_{tr,eq}$ s'exprime alors en W/K.

La température d'air extérieure équivalente est calculée comme suit :

$$T_{e,eq} = \frac{\sum_{k=1}^N U_k \cdot S_k \cdot T_{e,k}}{\sum_{k=1}^N U_k \cdot S_k}$$

k étant la paroi extérieure (considérée parmi N), voyant la température d'air $T_{e,k}$ (°C, température d'air extérieure ou température d'air de l'espace tampon adjacent dans le cas d'une cave, de combles perdus, etc.), pour surface S_k (m²) et pour valeur U de déperdition a priori U_k (W/m²/K)

La puissance $P_{inf}(t)$ en W est calculée similairement à la méthode SEREINE pour la maison individuelle, considérant l'écart de température d'air entre l'intérieur et l'extérieur, et le débit d'infiltration calculé dynamiquement au travers du modèle issu de la norme EN 16798 (pour rappel, ce modèle simplifié utilise la vitesse de vent issue de la station météorologique la plus proche, les températures d'air intérieures et extérieure mesurées, la mesure de perméabilité à l'air du logement et les caractéristiques géométriques du logement).

La puissance $P_{mit}(t)$ en W est calculée par l'utilisation des mesures des plaques fluxmétriques comme suit :

$$P_{mit} = \sum_{m=1}^M -\overline{\varphi}_m \cdot S_m$$

$\overline{\varphi}_m(t)$ en W/m² étant le flux surfacique moyen mesuré par les différents fluxmètres positionnés sur la paroi mitoyenne m considérée (parmi M), avec pour surface S_m en m².

NB1 : Un flux positif indique une perte thermique pour le logement considéré, d'où le signe négatif dans la formule de P_{mit} pour que P_{mit} soit négative dans la formule du H_{tr} ci-avant.

NB2 : La période d'analyse doit être réalisée impérativement en conditions préchauffées et stabilisées (puissance de chauffe, vent et flux mitoyens stables). Le choix de cette période est pour le moment réalisé par l'opérateur, qui doit justifier son choix par l'illustration d'un graphique présent dans le rapport, indiquant les mesures sur l'ensemble de la période ainsi que la période sélectionnée (au minimum de 12h). Des indicateurs sont à l'étude pour automatiser l'identification de cette période de « suffisante stabilité » indépendamment de l'opérateur afin d'assurer un résultat robuste au regard de l'incertitude affichée.

Le détail du calcul d'incertitude est donné en Annexe B.

3.2/ MESURES LOCALES DES PAROIS EXTERIEURES

Comme indiqué dans la section 2/, il est primordial d'effectuer (en plus des mesures appartement) des mesures locales de conductance thermique des parois afin d'alimenter l'indicateur global sur le risque de contre-performance.

En effet, les mesures par appartement sont informatives dans le sens où celles-ci mesurent les déperditions globales extérieures d'un ou plusieurs appartement(s) (parois opaques, menuiseries, ponts thermiques). Ces dernières ne sont pas nécessairement représentatives du bâtiment global.

Cependant, les mesures locales apportent un complément d'information au niveau des parois extérieures (murs, plafond, plancher, rampants, etc.), et ont l'avantage de pouvoir être effectuées dans n'importe quel appartement, occupé ou non.

Conductance thermique U d'une paroi

Dans le cadre de l'évaluation SEREINE en logements collectifs, la mesure de la conductance thermique U d'une paroi s'appuie sur la mesure par fluxmètre selon la norme ISO 9869-1 (2014) *Isolation thermique - Éléments de construction - Mesurage in situ de la résistance thermique et du coefficient de transmission thermique - Partie 1 : méthode du fluxmètre*. Celle-ci a été complétée en 2018 dans une partie 2 : *Méthode infrarouge pour les habitations à ossature* (ISO 9868-2), puis récemment en 2023 dans une partie 3 : *Méthode par insertion d'une sonde* (ISO 9868-3).

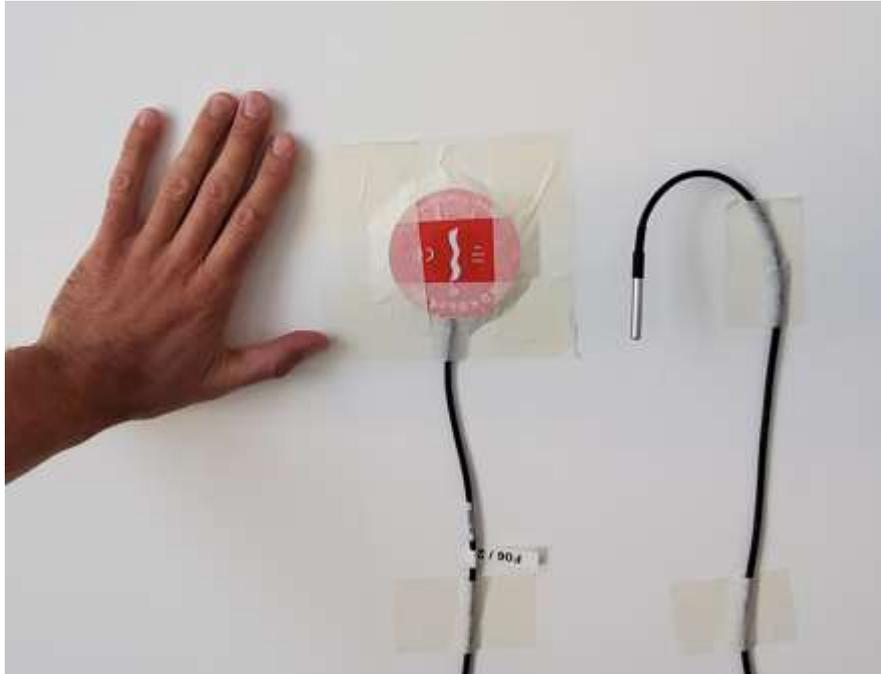


FIGURE 9 : MESURE DE FLUX DE CHALEUR SUR UNE PAROI AVEC UN FLUXMETRE ET SONDE DE TEMPERATURE D'AIR
[CREDITS PHOTO : ARNAUD JAY, CEA]

La méthode moyenne décrite dans la première partie de la norme ISO 9869-1 pour la mesure du U est régulièrement utilisée et citée dans la littérature scientifique (Choi et Ko 2019; Flood, Scott, et Gleeson 2016; Kim et al. 2022; Rodler, Guernouti, et Musy 2019; Sougkakis et al. 2022). Cette méthode moyenne permet une estimation de la conductance thermique U de la paroi à partir d'une mesure de flux et de températures.

Dans le cadre de la méthode SEREINE, la formule utilisée est la suivante :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^N \varphi_k}{\sum_{k=1}^N (T_{i,k} - T_{e,eq,j})}$$

Avec φ_k le flux de chaleur [W/m^2], $T_{i,k}$ la température de l'air intérieur [$^{\circ}C$], et $T_{e,eq,j}$ la température extérieure équivalente [$^{\circ}C$] de l'autre côté de la paroi.

Température extérieure équivalente

L'utilisation de la température extérieure équivalente locale en lieu et place de la température d'air extérieure constitue l'unique différence par rapport à la formule de la norme ISO 9869-1.

Cette différence permet en effet de réaliser des mesures y compris sur les murs extérieurs exposés au soleil. Dans ce cas, la température extérieure équivalente est estimée :

➤ Soit via les modules *Façade* du kit SEREINE (Bouchié et al. 2014) :

$$T_{e,eq,j} = \frac{T_{pl\ noir,e,j} \cdot (\alpha_{ext,j} - \alpha_{pl\ blanc}) + T_{pl\ blanc,j} \cdot (\alpha_{pl\ noir} - \alpha_{ext,j})}{\alpha_{pl\ noir} - \alpha_{pl\ blanc}}$$

- Avec :
- $T_{pl\ noire,j}$ la température de la plaque noire du module Façade, en °C
 - $T_{pl\ blanche,j}$ la température de la plaque blanche du module Façade, en °C
 - $\alpha_{pl\ noire}$ l'absorptivité solaire de la plaque noire du module Façade (ici 0,95)
 - $\alpha_{pl\ blanche}$ l'absorptivité solaire de la plaque blanche du capteur Façade (ici 0,24)
 - $\alpha_{ext,j}$ l'absorptivité solaire du revêtement extérieur du mur considéré (sa valeur peut être estimée à partir du nuancier SEREINE – donné en Annexe C)

➤ Soit à partir des données météorologiques et de l'orientation du mur avec la formule simplifiée suivante :

$$T_{e,eq,j} = T_e + \frac{\alpha_{ext,j} \cdot I_{sol,i}}{h_{ce} + 4 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (273,15 + T_e)^3}$$

- Avec :
- T_e la température de l'air extérieur en °C, si possible évaluée par un module Extérieur local
 - $I_{sol,i}$ le rayonnement solaire global incident suivant l'inclinaison du mur, en W/m²
 - h_{ce} le coefficient d'échange thermique extérieur par convection (pouvant être estimé par convention à $4 + 4 V$ [m/s], en W/(m².K)
 - σ la constante de Stefan Boltzman = $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/(m².K⁴)
 - ε l'émissivité thermique extérieure du mur (généralement proche de 0,9)

Dans le cas des locaux non chauffés, si ces derniers ne sont pas solarisés, une simple mesure en température est possible. Le calcul utilisé devient alors équivalent à celui de la norme ISO 9869-1.

Température intérieure

La température intérieure peut être évaluée quant à elle soit par un module *Intérieur* proche (en cas de mesure simultanée avec une mesure apparemment), soit par une sonde filaire placée à proximité du fluxmètre. Cette seconde méthode, plus précise, est à privilégier en particulier sur les mesures aux planchers haut ou bas, où l'effet de stratification peut induire un biais plus important en utilisant la mesure du module *Intérieur* à mi-hauteur.

Résistance thermique

La valeur de la résistance thermique R peut également être estimée d'après la mesure du U :

$$R_{tot} = R_{se} + R + R_{si}$$

$$R_{tot} = \frac{1}{U}$$

$$\Rightarrow R = \frac{1}{U} - R_{si} - R_{se}$$

Avec R_{si} et R_{se} respectivement la résistance superficielle de parois intérieures et extérieures, supposées égales respectivement à 0,13 et 0,04 d'après les valeurs standards si les températures de surfaces ne sont pas mesurées. Pour être valide, la mesure doit être réalisée sur une paroi dont les propriétés thermiques de ses matériaux sont supposées constantes dans le temps et sur la plage de variation en température lors de la mesure. Le fluxmètre peut ainsi être positionné sur la paroi à l'aide d'une thermographie pour s'assurer de l'homogénéité de la paroi sur la zone de mesure (le positionnement sur un pont thermique doit être évité).

La capacité de stockage de chaleur des matériaux de la paroi doit être négligeable par rapport au flux de chaleur qui la traverse. C'est pourquoi la validité de la mesure n'est pas assurée pour des matériaux à forte inertie (parois pierre / béton de grande épaisseur).

Enfin, si la paroi est composée de plusieurs matériaux, les couches qui la constituent doivent être homogènes.

De plus, de manière identique à la norme, un test de validité de la mesure par la méthode moyenne est défini par trois critères, également illustrés en Figure 10 :

- La durée de données mesurées et valides doit être supérieure à 72h ;
- La résistance thermique R calculée à partir des mesures de U ne dévie pas de +/-5% sur la période totale d'analyse après soustraction des dernières 24 heures (R_{24}) ;
- La résistance thermique R calculée à partir des mesures de U sur les deux premiers tiers de la période d'analyse ne dévie pas de +/-5% par rapport aux 2 derniers tiers de la période d'analyse.

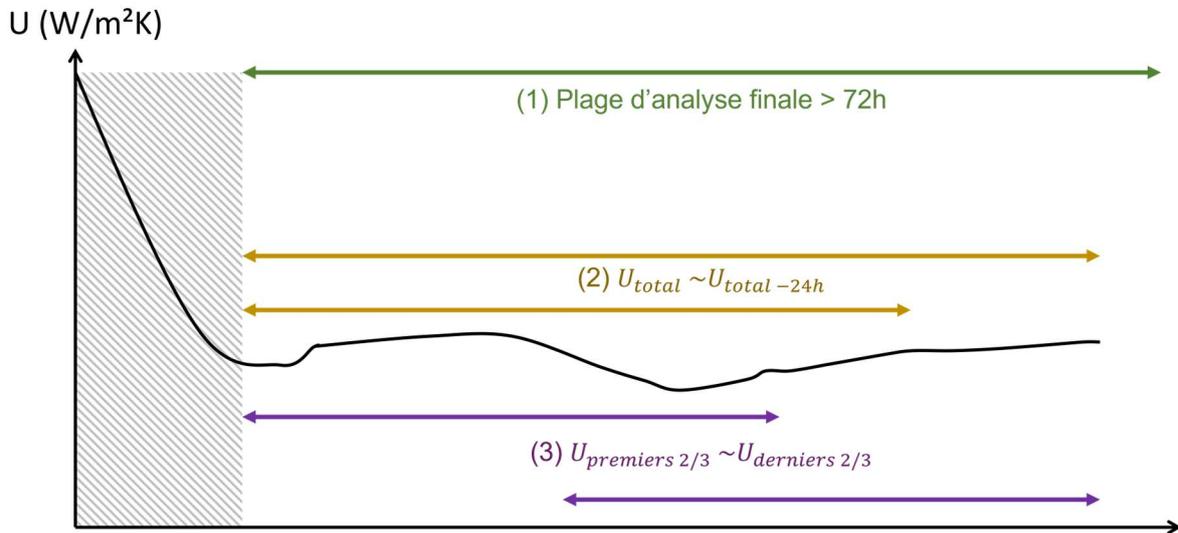


FIGURE 10 : CRITERES DE VALIDITE D'UNE MESURE DE U SELON LA NORME ISO 9869-1

Pour favoriser l'atteinte de ces 3 critères, il est recommandé d'installer la partie du dispositif dédiée à ces mesures locales plus longtemps que celui dédié aux mesures appartement.

En effet, la durée de mesure minimale de 72h doit, en pratique, être étendue à 1 semaine voire plus pour atteindre les 2 autres critères de validité et améliorer la précision de la mesure (Choi et Ko 2019; Flood, Scott, et Gleeson 2016).

Les mesures peuvent être réalisées en période d'occupation.

Pour favoriser l'atteinte du critère n°3 (le plus difficile à atteindre), les préconisations suivantes sont à appliquer (dans la mesure du possible) :

- Sélectionner des parois pour lesquelles la température équivalente est plus stable. Les parois fortement exposées au soleil, au vent ou aux précipitations sont donc à éviter. (Choi et Ko 2019; Flood, Scott, et Gleeson 2016; Sougkakis et al. 2022)
- Privilégier une mesure en conditions hivernales (comme pour les mesures en appartement) pour garantir un bon écart de température entre l'intérieur et l'extérieur (optimum : moins de 10°C à l'extérieur pour 20°C à l'intérieur), en effet un écart minimum de 10°C doit être assuré y compris en période d'occupation.
- Eviter de sélectionner les parois composées de matériaux lourds et épais. En pratique, des méthodes de correction et d'analyse dynamique existent mais sont plus complexes à mettre en œuvre : elles nécessitent le détail de la composition de la paroi (qui n'est pas toujours connue dans le cadre de mesure in situ en rénovation) ou la mesure de températures de surface pour l'application de la méthode d'analyse dynamique (Choi et Ko 2019; Sougkakis et al. 2022).



U calculé, U = 2.27
 Moyenne du U cumulé u_{cum} = 2.53
 Médiane du U cumulé u_{cum}' = 2.46

La durée du test dépasse les 72 h :
 R-value 24 = 6.0 % Non validé hors +-5%
 R-value 2/3 première période = 60.55 %

Validated

Non validé

Hypothèse durée de mesure trop courte pour être stabilisé

FIGURE 11 : ILLUSTRATION D'UNE MESURE LOCALE DU NIVEAU D'ISOLATION AVEC TEST DE VALIDITE DES CRITERES DE LA NORME ISO 9869

De manière pratique et opérationnelle, le protocole complet de mesure locale du U pourra être réalisé dans le logement en cours de test SEREINE (voir Figure 12).

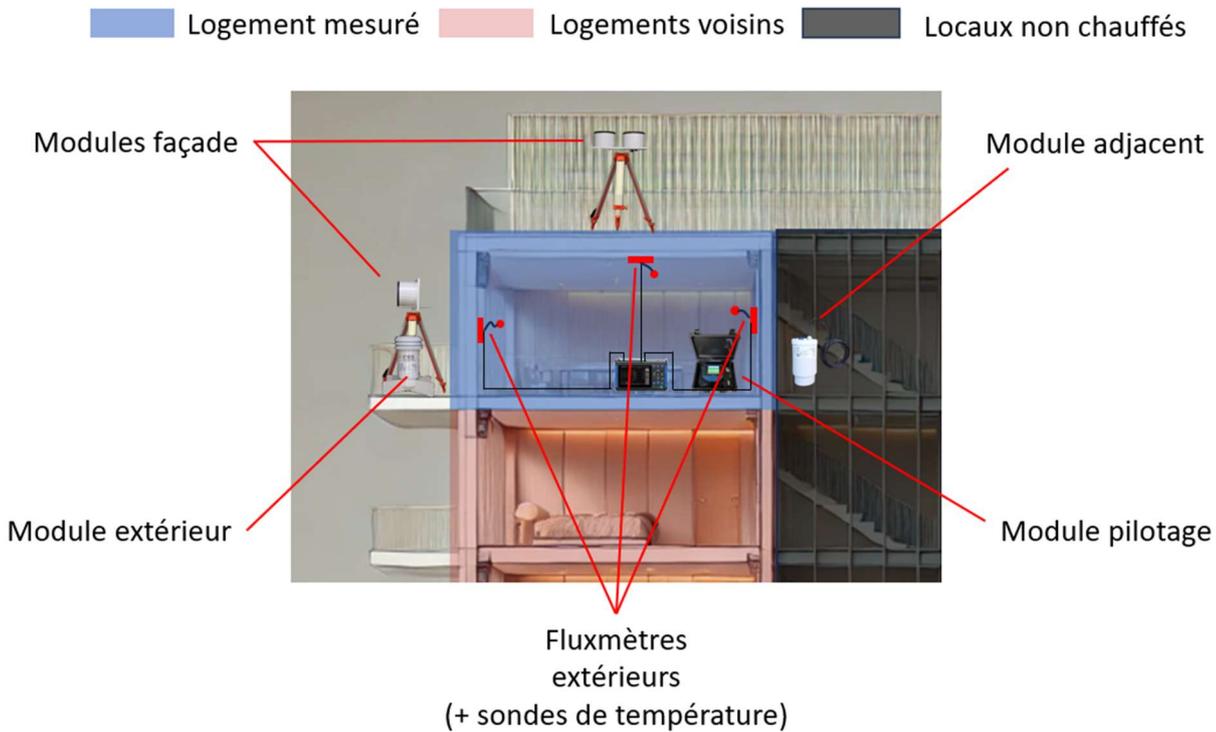


FIGURE 12 : EXEMPLE DE POSITIONNEMENT DU DISPOSITIF DE MESURE SEREINE POUR LA REALISATION DE MESURES LOCALES

Calcul d'incertitudes

Concernant le calcul d'incertitude, seules les erreurs issues des données d'entrée sont pour le moment considérées (sous réserve de la validité des trois critères précédemment décrits), en suivant la formule analytique suivante :

$$u_U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial \varphi}\right)^2 \cdot u_\varphi^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial T_i}\right)^2 \cdot u_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial T_{e,eq}}\right)^2 \cdot u_{T_{e,eq}}^2}$$

Avec :

$$\frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{1}{T_i - T_{e,eq,j}}$$

$$\frac{\partial U}{\partial T_i} = \frac{-\varphi}{(T_i - T_{e,eq,j})^2}$$

$$\frac{\partial U}{\partial T_{e,eq}} = \frac{\bar{\varphi}}{(T_i - T_{e,eq,j})^2}$$

Les hypothèses sur les erreurs systématiques de φ_m , T_i , $T_{e,eq}$ sont données dans le tableau suivant :

Grandeur	Condition d'estimation	Intervalle de confiance	Loi de distribution	Erreur type u
Flux de chaleur mesuré φ [W/m ²]	Avec fluxmètre	± 0,1 W/m ²	normale	0,05 W/m ²
Température intérieure T_i [°C]	Avec sonde intégrée	± 1 K	normale	0,5 K
	Avec module Intérieur (pièce)	± 2 K	normale	1 K
	Avec module Façade	± 1 K	normale	0,5 K
Température extérieure équivalente $T_{e,eq}$ [°C]	Avec estimation météo (extérieur)	± 2 K	normale	1 K
	Avec capteur de température (espace non chauffé)	± 2 K	normale	1 K
	Sans capteur (espace non chauffé ou terreplein)	± 5 K	normale	2,5 K

FIGURE 13 : HYPOTHESES D'INCERTITUDES DES DONNEES D'ENTREE POUR LE CALCUL DU U LOCAL

3.3/ PERIODE DE VALIDITE DES MESURES

Les essais numériques ont été réalisés au cours du projet SEREINE sur différentes configurations isolées et sous différents climats avec les deux protocoles présentés.

Après analyse de plus de 35 000 essais (pour plus de détails, se référer à l'Annexe D), une période de validité a pu être définie dans la Figure 14, et suggère les préconisations suivantes sous réserve que la dispersion des flux mesurée ne soit pas trop importante (moins de ± 2,5 W/m²)² :

- Sur les bâtiments de performance moyenne (niveau RT2005 et réglementations thermiques précédentes) les protocoles « voisins absents » ou « voisins présents » peuvent être utilisés en hiver et en mi-saison (avec une température moyenne extérieure de **20°C maximum**), bien que le protocole « voisins absents » offre une évaluation plus exacte.
- Sur les bâtiments de très haute performance (niveau RE2020 ou RT2012)
 - le protocole « voisins présents » ne peut être envisagé qu'en hiver (avec une température moyenne extérieure de **7°C maximum**) ;
 - le protocole « voisins absents » peut être envisagé en mi-saison, avec toutefois une incertitude plus importante que pour des bâtiments de performance moyenne.

² Ce niveau de dispersion, issu de retours d'expérience terrain, représente une hypothèse sécuritaire, sous réserve de suivre les préconisations d'installation détaillées dans le livrable « Protocole global SEREINE enveloppe V2 pour le Logement collectif : guide pour l'articulation des différents audits enveloppe et systèmes »

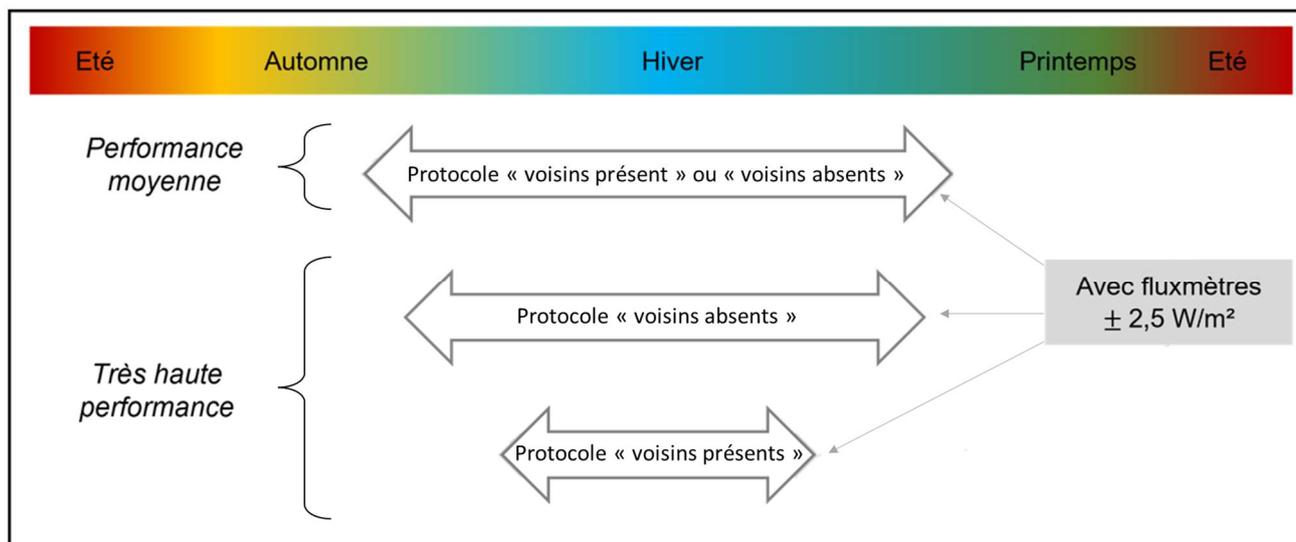


FIGURE 14 : RECAPITULATIF DU DOMAINE DE VALIDITE LES APPROCHES DE MESURE

Un résumé de l'étude réalisée avec des graphiques plus détaillés sur l'identifiabilité des mesures selon la température extérieure et la durée du test est fourni en Annexe D.

4/ RESTITUTION DE L'ÉVALUATION SOUS FORME D'UN INDICATEUR GLOBAL

L'évaluation de la performance de l'enveloppe d'un bâtiment de logements collectifs repose ainsi sur des mesures d'appartements faites par échantillonnage ainsi que sur des mesures locales de la performance de l'enveloppe. Extrapoler les résultats de mesure à l'ensemble de l'enveloppe sera alors possible sur une opération neuve ou si l'enveloppe a été rénovée de manière homogène et à la condition qu'une note de calcul thermique soit disponible. L'indicateur global issu de l'extrapolation quantifie alors le risque d'une contre-performance de la qualité de l'enveloppe.

4.1/ FAISABILITE DE L'ÉVALUATION GLOBALE

HYPOTHESE D'HOMOGENEITE DE L'ENVELOPPE

L'évaluation globale de l'enveloppe se fait à partir de mesures dans certains logements et de mesures locales. Puisque les mesures sont faites par échantillonnage, elles sont supposées représentatives de l'enveloppe. Si l'enveloppe présente de fortes hétérogénéités, il est possible que les mesures soient bien meilleures, ou bien pires que la performance qui auraient été observée ailleurs sur l'enveloppe.

Ainsi, l'évaluation par l'indicateur global ne se fait que si l'enveloppe est **réputée homogène** :

- C'est très majoritairement le cas sur une **opération neuve** : les menuiseries sont homogènes, la composition de la paroi courante est identique sur l'ensemble de l'enveloppe, etc. On exclura cependant les enveloppes composées de plus de 4 types de parois différentes ayant une contribution significative sur le $U_{bât}$ global (contribution supérieure à 5 %).
- Les bâtiments rénovés seront réputés homogènes quand leur **rénovation est globale** et concerne tous les lots. Ainsi, l'indicateur global se révèlera intéressant principalement pour les bailleurs (même si les applications en rénovations globales de copropriétés restent tout à fait possibles) .

Dans tous les autres cas, on considère que l'enveloppe est **réputée hétérogène** et le calcul de l'indicateur global ne sera pas effectué. Il n'en reste pas moins que l'analyse de chacune des mesures reste pertinente au regard de valeurs cibles qui peuvent avoir été fixées par la maîtrise d'œuvre ou d'ouvrage.

DISPONIBILITE D'UNE NOTE DE CALCUL THERMIQUE

L'évaluation du risque de contre-performance de l'enveloppe repose sur une comparaison de chacune des mesures à une valeur cible. Cela signifie que des valeurs cibles ont été définies préalablement. Ces valeurs sont données a priori dans une **note de calcul thermique** au stade de la conception, et mises à jour au moment de la construction/rénovation avec les choix architecturaux et les détails techniques finalement arrêtés. Tout autre document de référence qui donnerait les valeurs cibles calculées pour les parois opaques et les ponts thermiques est également admissible.

En revanche, ne peuvent être admissibles les valeurs par défaut données dans les règles Th-bât ou les valeurs par défaut du Diagnostic de Performance Energétique, qui donnent des échelles ou valeurs générales de référence mais ne sont pas représentatives de l'enveloppe étudiée.

Notons que la simple comparaison de mesures locales ou de mesures d'appartement à une valeur de référence constitue une information en soi, même si elle ne permet pas de se prononcer sur la performance de la totalité de l'enveloppe.

PLANS ET METRES

Le calcul de l'indicateur global repose sur une mise à jour probabiliste du calcul du $U_{bât}$ global. Il faut ainsi disposer de l'ensemble des mètres de l'opération étudiée. Des plans détaillés seront préférés mais des mesures in situ sont également envisageables.

Les mètres devront être renseignés par type de surface, type de pont thermique et par logement. On ne comptabilisera que les types de parois et type de ponts thermiques décrits dans la note de calcul thermique.

FIGURE 15 : DESCRIPTION DES METRES NECESSAIRE AU CALCUL DE L'INDICATEUR GLOBAL

	Paroi courante	Paroi donnant sur LNC	Plancher haut sur toiture terrasse	Pont thermique de liaison plancher intermédiaire paroi courante	...
Logement 1					
Logement 2					
...					

4.2/METHODE D'EVALUATION DE L'INDICATEUR GLOBAL

L'indicateur global sera évalué pour les opérations réunissant les deux conditions explicitées ci-dessus : l'enveloppe est réputée homogène et une note de calcul thermique a été faite. L'indicateur global vise alors à donner une réponse quantitative à la question suivante : **sachant les mesures qui ont été faites, a-t-on des raisons de penser qu'il y a une contre-performance de l'enveloppe significative par rapport à ce qui était prévu dans la note de calcul thermique ?**

Intuitivement, l'indicateur fonctionne comme suit. Chacune des mesures effectuées dans le bâtiment est intégrée à l'évaluation et actualise le calcul du risque de contre-performance :

- plus il y a de mesures (logements ou parois) très au-dessus des prévisions de la note de calcul thermique, plus le risque de contre-performance est élevé ;
- si au contraire les mesures sont raisonnablement proches des valeurs ciblées par la note de calcul thermique, l'évaluation fera apparaître qu'il n'y a pas de raison de penser qu'il y a une contre-performance.

Pour quantifier l'évaluation du risque de contre-performance, on se place dans une approche bayésienne du problème. Illustrée ci-dessous en Figure 16, cette approche consiste à (I) initialiser les valeurs de performance locales (II) mettre à jour ces hypothèses avec les mesures effectuées (III) inférer un indicateur global de performance et le comparer à la valeur initiale cible.

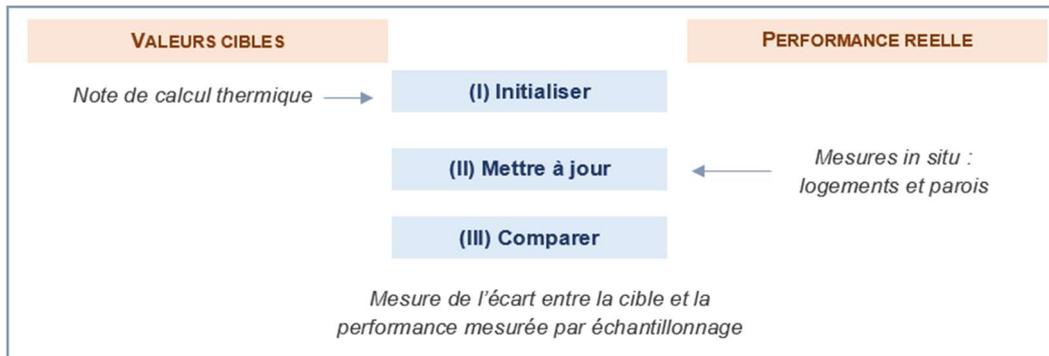


FIGURE 16 : PRINCIPE DE L'APPROCHE BAYESIENNE POUR LE CALCUL DE L'INDICATEUR GLOBAL

L'approche bayésienne permet de traduire de manière effective, sous forme de probabilité, le degré de croyance en une hypothèse, tout en évitant d'émettre des suppositions sur les distributions sous-jacentes dans lesquelles sont tirées chacune des mesures (Box and Tiao 1992). Concrètement, la philosophie est en effet de poser une hypothèse H0 que la performance réelle intrinsèque est significativement proche de la performance prévue dans la note de calcul thermique. L'approche bayésienne permet donc de mettre à jour cette hypothèse avec les mesures et de tester ses limites. La mise en œuvre du calcul est décrite en Annexe F.

Quand l'indicateur a été mis à jour avec les mesures faites, il est comparé à la valeur attendue dans la note de calcul thermique, moyennant un seuil d'acceptabilité de 20 % autour de la cible. L'indicateur peut alors donner 3 résultats différents :

- (i) Performance acceptée : les mesures sont conformes à la référence, il n'y a donc pas de raison de penser que l'enveloppe soit contre-performante.

- (ii) Performance rejetée : les mesures ne sont pas conformes et le calcul de l'indicateur montre que la contre-performance est significativement supérieure à la cible et son seuil.
- (iii) Indécision : l'indicateur mis à jour n'est ni tout à fait conforme à la cible, ni tout à fait en dehors de la zone acceptable. Il est alors nécessaire de faire des mesures complémentaires pour affiner l'analyse ou de procéder à une étude technique plus poussée pour comprendre l'origine des mesures moyennement performantes.

Visuellement, ces trois résultats sont rendus comme dans la Figure 17. Notons que la conclusion portée sur l'hypothèse de performance est presque moins importante que le visuel de la courbe de l'indicateur, notamment dans le cas où l'hypothèse n'est ni acceptée ni rejetée. La courbe traduit en effet le degré de confiance de conformité à la cible, et s'écarte de la zone d'acceptabilité d'autant que des mesures montrent des contre-performances. La conclusion d'un rejet est immédiate : on voit que la courbe est entièrement hors de la zone acceptable. Dans le cas de l'indécision, la courbe peut être presque entièrement dans la zone d'acceptabilité ou au contraire presque entièrement en dehors. Cela ne traduit pas le même degré de confiance en la performance. En fonction de la position relative de la courbe par rapport à la zone d'acceptabilité, il pourra être décidé ou non de poursuivre l'étude de l'opération par des mesures ou actions complémentaires, en consensus avec le client.

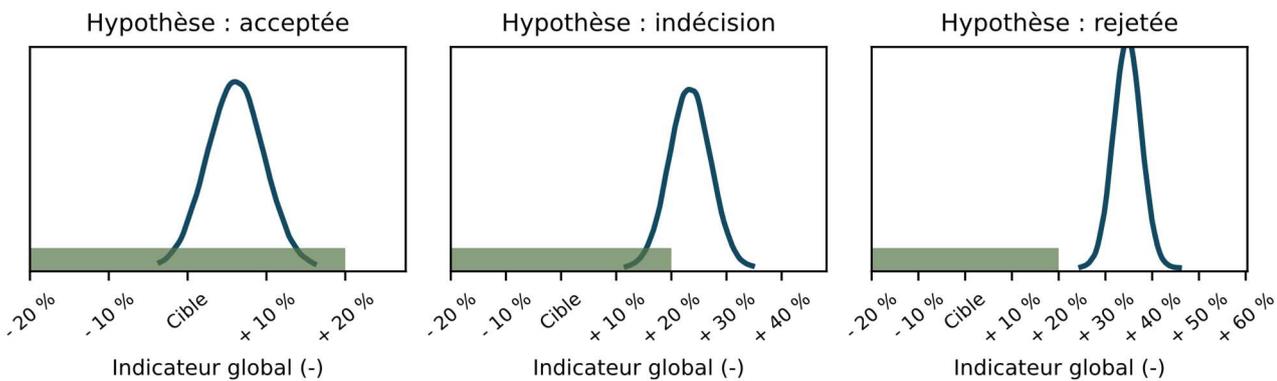


FIGURE 17 : TROIS CONCLUSIONS TIREES DE L'INDICATEUR GLOBAL : ACCEPTER, REJETER L'HYPOTHESE DE PERFORMANCE OU RESTER EN INDECISION

4.3/LIMITES A L'INDICATEUR : ABAQUES DE MISE EN PERSPECTIVE

L'indicateur global peut être calculé quels que soient les nombres et la nature des mesures faites sur l'opération étudiée. Mais rappelons qu'un nombre de mesures trop faible conduira à un risque de faux positif élevé. L'analyse de l'indicateur global se fait donc aussi à la lumière des abaques représentée dans la Figure 18. Les abaques représentent les limites d'un plan d'instrumentation donné pour une typologie de bâtiment. Ces limites ont été obtenues en appliquant le plan d'expérience décrit en Annexe H. L'abaque est constitué de deux graphiques complémentaires. A gauche, les contre-performances minimales et maximales pour chaque conclusion (accepté, indéci, rejeté) sont données pour illustrer la possibilité d'un faux positif ou d'un faux négatif.

A droite, le nuage de point rassemble l'ensemble des simulations où en abscisse est représentée la contre-performance simulée « réelle » tandis que l'ordonnée représente la valeur estimée la plus probable donnée par l'indicateur global. Ce graphique permet donc d'évaluer le risque d'un faux négatif. Par exemple si, comme sur la Figure 18 en bleu, la valeur de « ubat estimé » par l'indicateur global est à 0.6, le nuage de point indique que des indicateurs globaux similaires ont été obtenus dans des bâtiments simulés dont les contre-performances allaient en réalité de 0,6 à 0,71 W/m²/K. Cela signifie que ce plan d'instrumentation, en particulier, peut parfois surestimer la contre-performance, sans pour autant attribuer de faux positifs (pas de points verts rencontrés quand l'ordonnée est à 0,6).

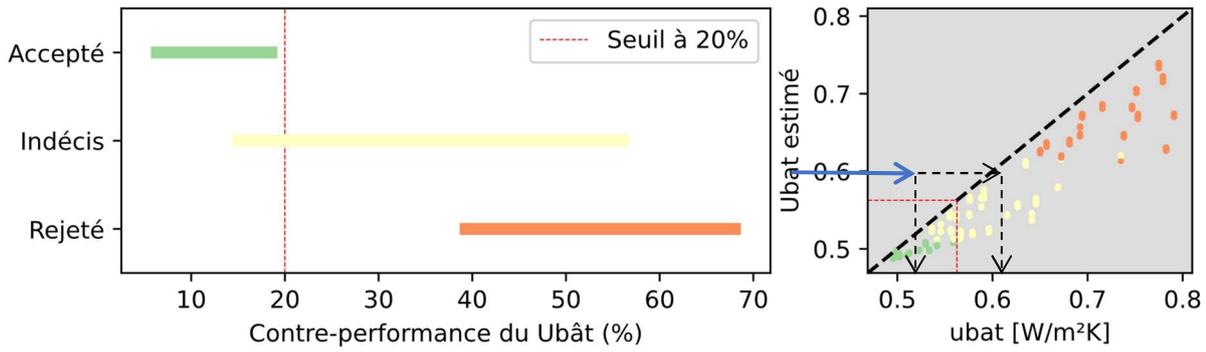


FIGURE 18 : LIMITES DU PLAN D'INSTRUMENTATION 3 LOGEMENTS – 3 PAROIS (BARRE < 15 LOGEMENTS)

Les abaques ont été produits pour 3 typologies sur quelques plans d'instrumentation classiques et sont donnés en Annexe G. Il est pour autant conseillé de produire une figure dédiée au plan d'instrumentation choisi spécifiquement pour l'opération étudiée. Cela sera fait en suivant un protocole décrit en Annexe H. Il s'agira de simuler des contre-performances d'importance croissante ainsi que les mesures qui auraient été faites dans le plan d'instrumentation sur le bâtiment virtuellement contre-performant. L'indicateur global est alors calculé pour chacun de ces cas virtuels. Reste à mettre les conclusions de l'indicateur en regard des contre-performances simulées et établir les limites représentées dans la Figure 18.

5/ APPLICATION DU PROTOCOLE ACTUEL SUR DES OPERATIONS REELLES

5.1/ APPLICATION « A » SUR UN MOYEN COLLECTIF APRES RENOVATION

L'opération en question (voir Figure 19) a fait l'objet d'une mesure SEREINE du 28 octobre au 5 décembre 2023. Il s'agit d'un immeuble des années 1970 située dans le département du Jura. Composé de 3 niveaux et de 12 logements, ce bâtiment a fait l'objet de 3 mesures appartements (soit 1 logement sur 4 : le 1^{er} au 1^{er} niveau, et 2 autres au 2^e niveau) ainsi que 18 mesures locales au sein de ces mêmes logements.



FIGURE 19 : LOGEMENTS SELECTIONNES POUR LA MESURE SEREINE SUR L'OPERATION A

VISITE TECHNIQUE ET DETECTION DES DEFAUTS

Après inspection thermographique en extérieur, une déperdition globalement homogène a été observée sur l'ensemble du bâtiment, malgré quelques points singuliers (sous les fenêtres là où se trouvent les radiateurs, et au niveau des balcons).

Côté intérieur, des défauts d'isolation et d'étanchéité ont été détectés à proximité de certaines menuiseries ainsi que certaines prises électriques.



FIGURE 20 : CLICHES THERMOGRAPHIQUES INTERIEURS ET EXTERIEURS (OPERATION A)

MESURES DANS LES APPARTEMENTS

Pour chacun des 3 logements, des mesures d'étanchéité à l'air ont été réalisées. Les résultats sont donnés dans le tableau et les figures ci-après :

	Taux de Renouvellement d'air à 50 Pa. n_{50} [/h]	Fuites spécifiques à 4 Pa. $Q_{4 Pa_surf}$ [$m^3/h/m^2$]	Surface de fuite effective à 4 Pa. ELA_4 [cm^2]
Logement 02-12 (résultat initial)	2.76	1.452	89.82
Logement 02-12 (résultat après intervention)	1.839	0.912	56.41
Logement 02-31	1.84	0.3872	73.98
Logement 01-32	1.81	0.3532	56.37

FIGURE 21 : RESULTATS DES TESTS D'ETANCHEITE A L'AIR DES 3 LOGEMENTS MESURES (OPERATION A)

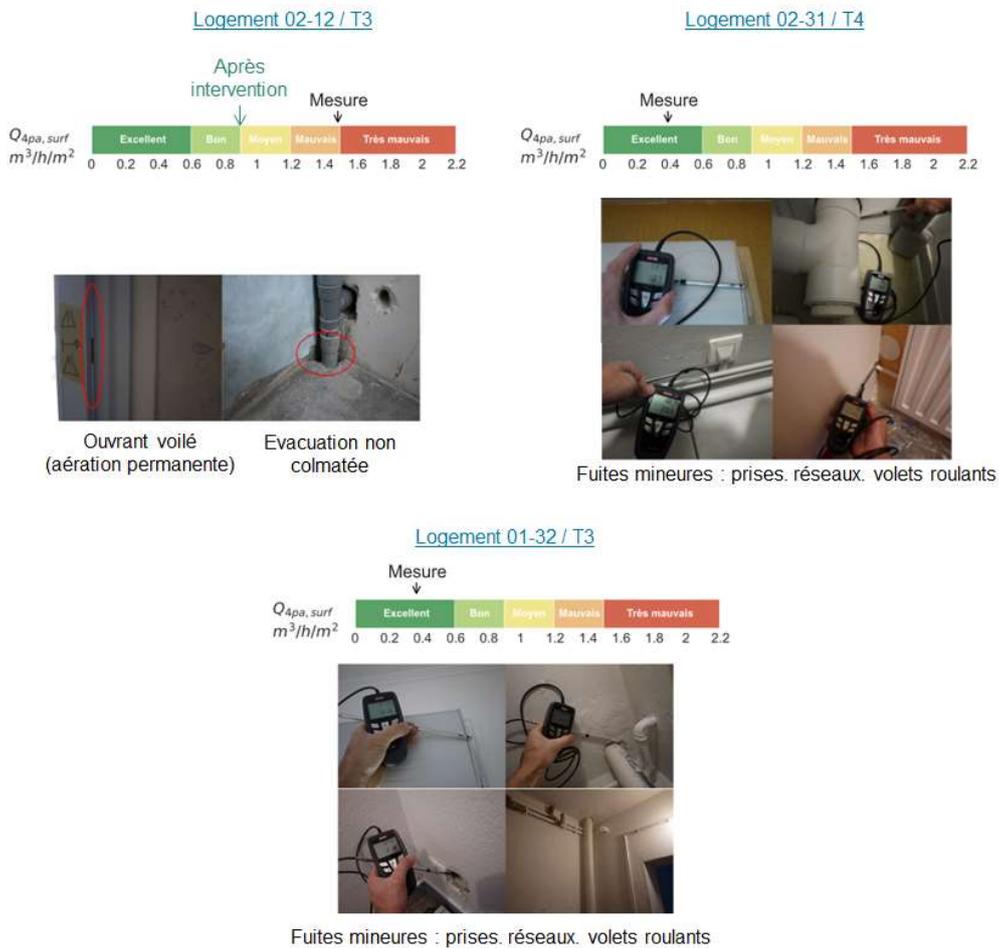


FIGURE 22 : RESULTATS DES TESTS D'ETANCHEITE A L'AIR DES 3 LOGEMENTS MESURES (OPERATION A)

Les logements en dernier niveau, quoiqu'influencés par un At_{Bat} nettement supérieur, témoignent d'une excellente étanchéité. Les défauts identifiés sont de type assez classique (fuites au niveau des prises, volets roulants, réseaux, etc.)

Le logement au premier niveau, quant à lui présentait des défauts bien plus importants, notamment :

- un ouvrant voilé dans une chambre en raison des contraintes mécaniques liées à une mauvaise pose de la fenêtre ;

- une surface de fuite importante au niveau du plancher bas avec le passage d'un tuyau évacuation d'eau.

Pour faciliter la mesure des déperditions par transmission, ces 2 défauts majeurs ont été étanchéifiés au moyen d'adhésif (induisant de nouveaux résultats d'étanchéité « après intervention » utilisés dans les conditions de la mesure SEREINE ayant suivi).

A l'occasion de cette mesure, 7 parois mitoyennes ont été instrumentées avec, pour chacune d'entre elles, entre 4 et 6 fluxmètres (positionnés avec l'aide d'une thermographie).

Pour ce qui est des planchers intermédiaires en béton, les dispersions observées sont toutes dans la gamme « assez optimiste » (ou $\pm 2.5 \text{ W/m}^2$) avec une dispersion légèrement plus prononcée vers le plancher haut de l'appartement au 1^{er} niveau (les 2 autres cas correspondent à des planchers bas intermédiaires).

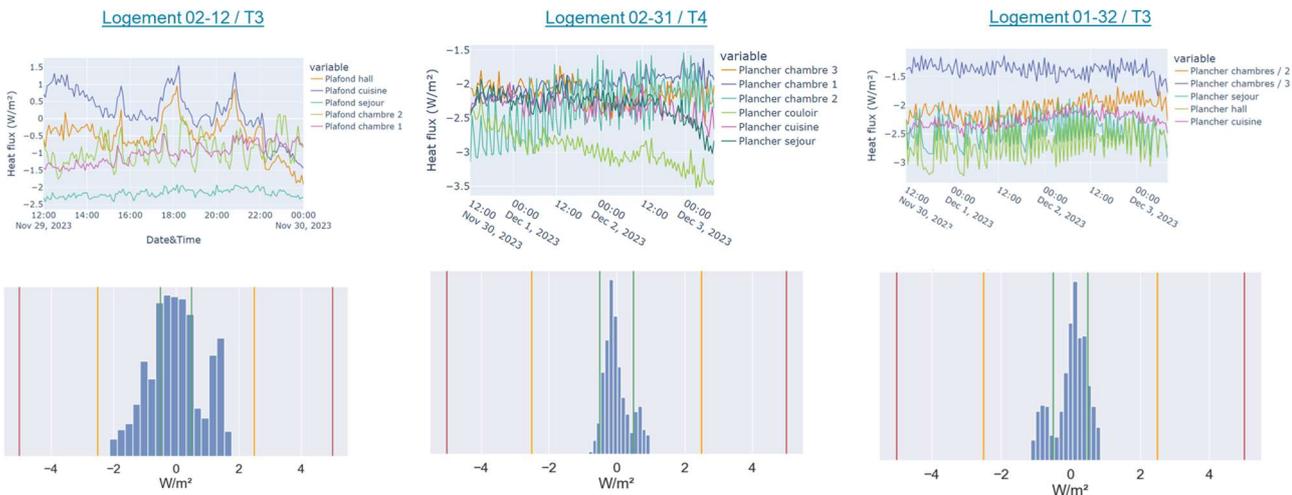
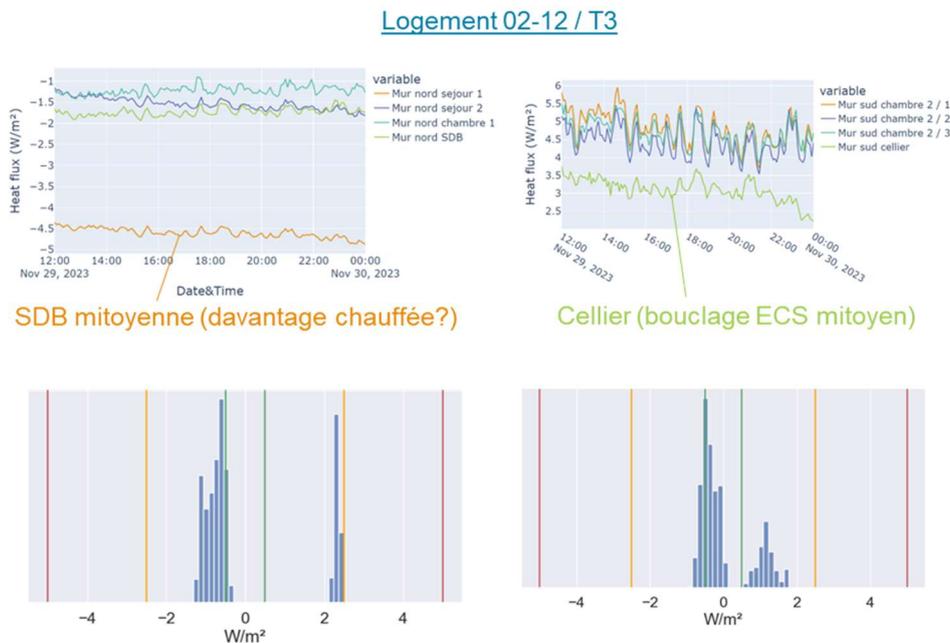


FIGURE 23 : DISPERSION DES FLUX MITOYENS MESUREE SUR LES PLANCHERS INTERMEDIAIRE (OPERATION A)

Cependant, en ce qui concerne les murs verticaux, des points singuliers ont été observés sur l'ensemble des murs (voir Figure 24).



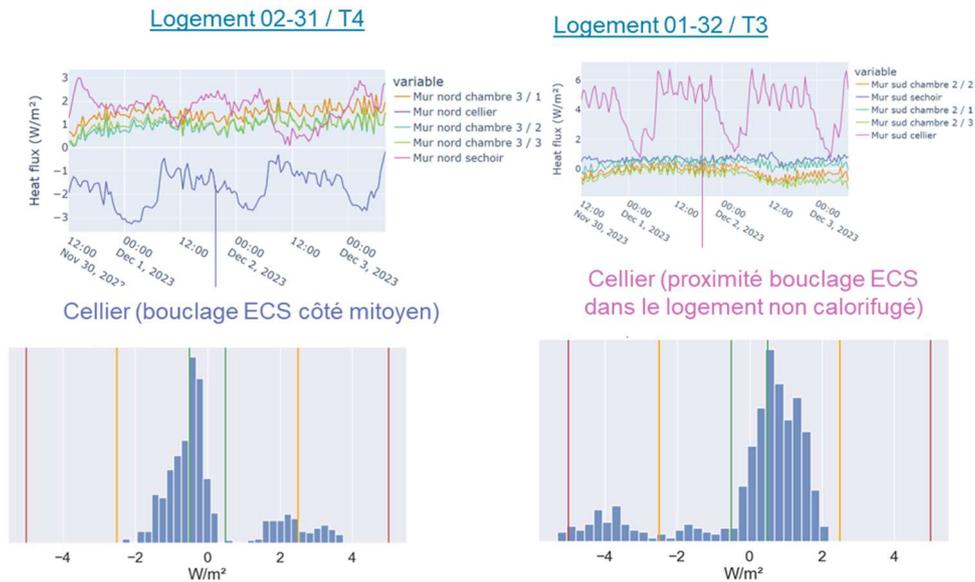


FIGURE 24 : DISPERSIONS DES FLUX MITOYENS MESURES SUR LES MURS VERTICAUX (OPERATION A)

Pour 3 murs sur 4, les points singuliers étaient liés à une proximité de canalisation du bouclage d'ECS (non calorifugée) générant un flux de chaleur plus important vers/depuis le logement mitoyen. L'impact sur les 2 derniers murs étant que le niveau de dispersion se situait dans la catégorie « pessimiste » ($\pm 5 \text{ W/m}^2$).



FIGURE 25 : FLUXMETRE INSTALLE A PROXIMITE D'UNE CANALISATION (A PRIORI FROIDE) S'ETANT AVERE ETRE UN BOUCLAGE D'ECS NON CALORIFUGE

Le dernier point singulier est lié, quant à lui, à une portion du mur donnant sur la salle de bains voisine, visiblement chauffée bien plus que les autres pièces (sèche serviette probablement allumé en permanence). Ce constat montre l'intérêt, dans le cadre du protocole « voisins présents », de segmenter les murs mitoyens en fonction de la zone d'usage du logement mitoyen (et de placer au moins un fluxmètre sur chacun de ces segments).

Pour le premier appartement (02-12), de très faibles apports de chaleur (environ 300W) suffisaient à maintenir tout l'appartement à 21°C. Ce constat surprenant peut s'expliquer par la problématique soulevée précédemment sur la présence (importante dans le cas de cet appartement) de réseaux d'ECS non calorifugés, engendrant un apport de chaleur non comptabilisé. Ceci ayant pour conséquence une sous-estimation du coefficient U_{bat} , qui semble ici importante au vu de la comparaison avec le U_{bat} issu de l'étude thermique (voir Figure 26).

Par ailleurs, un problème d'ordre matériel (centrale d'acquisition des fluxmètres) n'a permis de conserver que 12h de mesure exploitable une fois le préchauffage -ou plutôt le pré-refroidissement- établi.

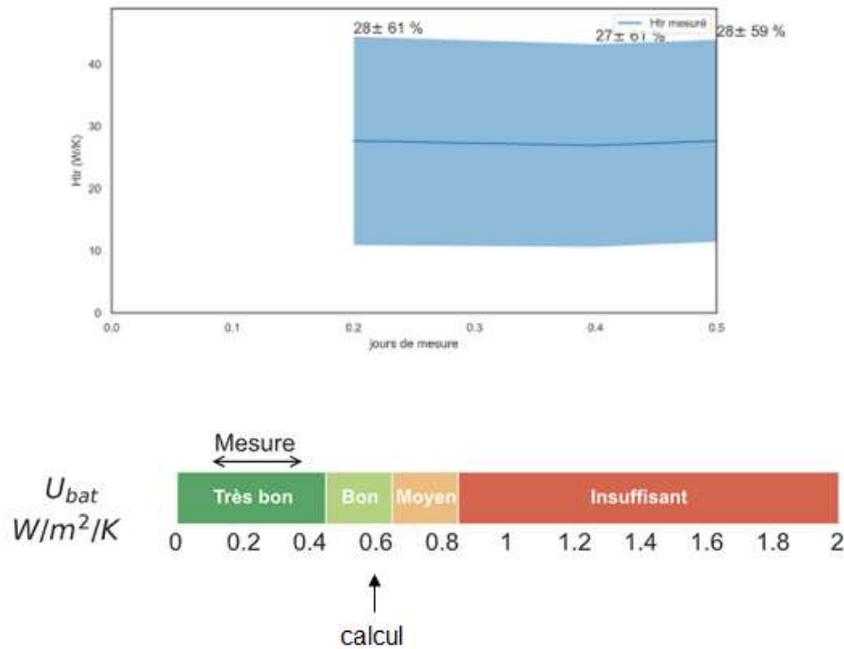


FIGURE 26 : APERÇU DU RESULTAT DE MESURE SEREINE POUR L'APPARTEMENT 02-12 (OPERATION A)

,Du fait de la présence du bouclage d'ECS, côté mitoyen (comme le témoigne la mesure fluxmétrique dans le cellier), le 2^e appartement (02-31) n'est donc pas concerné par la problématique du précédent appartement. Les mesures ont été ici de meilleure qualité et les résultats sont détaillés en Figure 27.

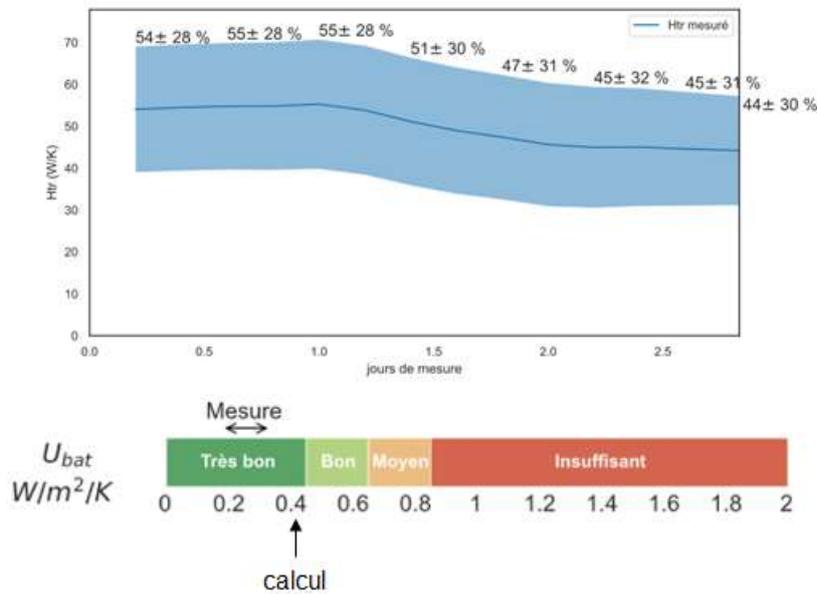


FIGURE 27 : APERÇU DU RESULTAT DE MESURE SEREINE POUR L'APPARTEMENT 02-31 (OPERATION A)

Pour le dernier appartement, la problématique du bouclage ECS est présente mais dans une proportion moindre que l'appartement 02-12. En effet, la longueur de tuyau non calorifugé était bien plus faible (uniquement dans le cellier comme en Figure 25) et une partie de cet apport de chaleur a été cédé à l'appartement mitoyen (comme mesuré). Les résultats sont donnés en Figure 28.

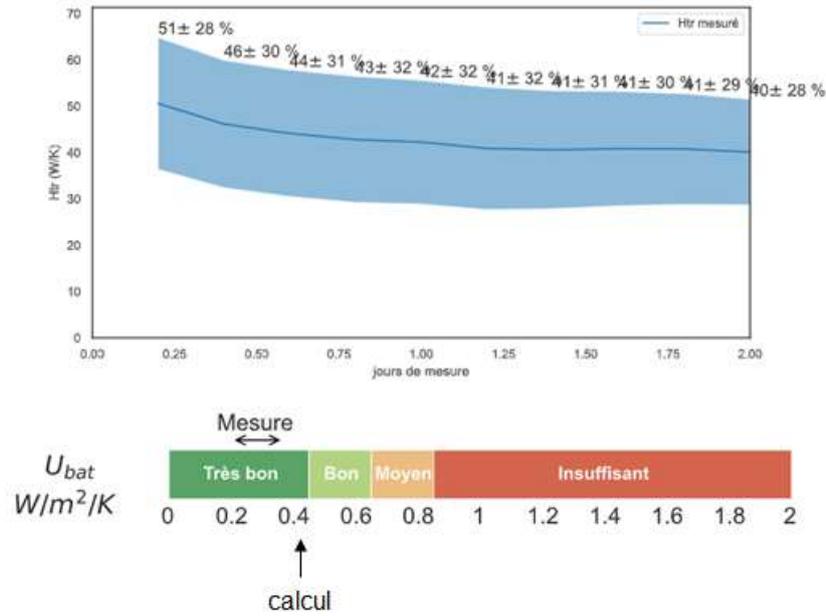


FIGURE 28 : APERÇU DU RESULTAT DE MESURE SEREINE POUR L'APPARTEMENT 01-31 (OPERATION A)

L'ensemble des résultats des mesures d'isolation à l'échelle des appartements est donné dans le tableau ci-après :

	H _{tr} mesuré [W/K]	U _{bat} mesuré [W/m²/K]	U _{bat} calculé ou cible [W/m²/K]
Logement 02-12	28 ± 16	0.24 ± 0.14	0.59
Logement 02-31	46 ± 14	0.27 ± 0.08	0.41
Logement 01-32	40 ± 11	0.28 ± 0.08	0.43

FIGURE 29 : RESULTATS DE MESURE SEREINE A L'ECHELLE DES APPARTEMENTS (OPERATION A)

Hormis l'appartement au 1^{er} niveau (dont les résultats peuvent être fortement remis en question), les résultats tendent à montrer une déperdition environ 30% plus faible (donc meilleure) que l'étude thermique. Cela dit, cet écart pourrait être là aussi surestimé.

MESURES LOCALES

En parallèle des essais en appartement, 18 mesures locales ont été mises en place sur les 3 logements. Sur les 18, 16 étaient exploitables (2 décollements ont été observés) et seulement 7 ont offert des résultats opposables (validation des 3 critères de la norme ISO 9869 & écart de température suffisant).

Appartement	Point de mesure	Type de mur	Critères norme ISO 9869	U mesuré [W/(m².K)]	U théorique [W/(m².K)]	Écart mesure-calcul [%]
02-12	Mur ext est séjour	Mur extérieur courant	0/3	0.148 ± 0.011	0.22	-33 ± 5
	Mur ext nord chambre 1 (balcon)	Mur extérieur courant	1/3	0.430 ± 0.046	0.22	+95 ± 21
	Plancher cave cuisine	Plancher bas	0/3	0.384 ± 0.067	0.527	-27 ± 13
	Mur cage cuisine	Mur cage d'escalier	0/3	0.447 ± 0.074	0.35	+27 ± 21
02-31	Mr ext S séjour	Mur extérieur pignon	3/3	0.165 ± 0.013	0.243	-32 ± 5
	Mur ext S SdB	Mur extérieur pignon	3/3	0.164 ± 0.020	0.243	-33 ± 8
	Mur ext S chambre 1	Mur extérieur pignon	3/3	0.166 ± 0.014	0.243	-32 ± 6
	Mur ext O chambre 3	Mur extérieur courant	2/3	0.180 ± 0.021	0.22	-18 ± 10
	Mur ext O chambre 2	Mur extérieur courant	2/3	0.181 ± 0.022	0.22	-18 ± 10
	Mur ext E séjour (balcon)	Mur extérieur courant	2/3	0.217 ± 0.025	0.22	-1 ± 11
	Mur ext N cage cuisine	Mur cage d'escalier	2/3	0.654 ± 0.639	0.527	+24 ± 121
01-32	Mur ext séjour N - 2	Mur extérieur pignon	3/3	0.182 ± 0.021	0.243	-25 ± 9
	Mur ext séjour N - 1	Mur extérieur pignon	3/3	0.183 ± 0.022	0.243	-25 ± 9
	Mur ext N SdB	Mur extérieur pignon	3/3	0.167 ± 0.020	0.243	-31 ± 8
	Mur ext N chambre 1 - 2	Mur extérieur pignon	3/3	0.175 ± 0.021	0.243	-28 ± 9
	Mur ext N chambre 1 - 1	Mur extérieur pignon	--	--	0.243	--
	Mur ext séjour E (balcon)	Mur extérieur courant	--	--	0.22	--
	Mur ext cage cuisine	Mur cage d'escalier	3/3	0.635 ± 0.418	0.35	+80 ± 119

TABLEAU 1 : RESULTAT DES MESURES LOCALES DE TRANSMISSION THERMIQUE REALISEES (OPERATION A)

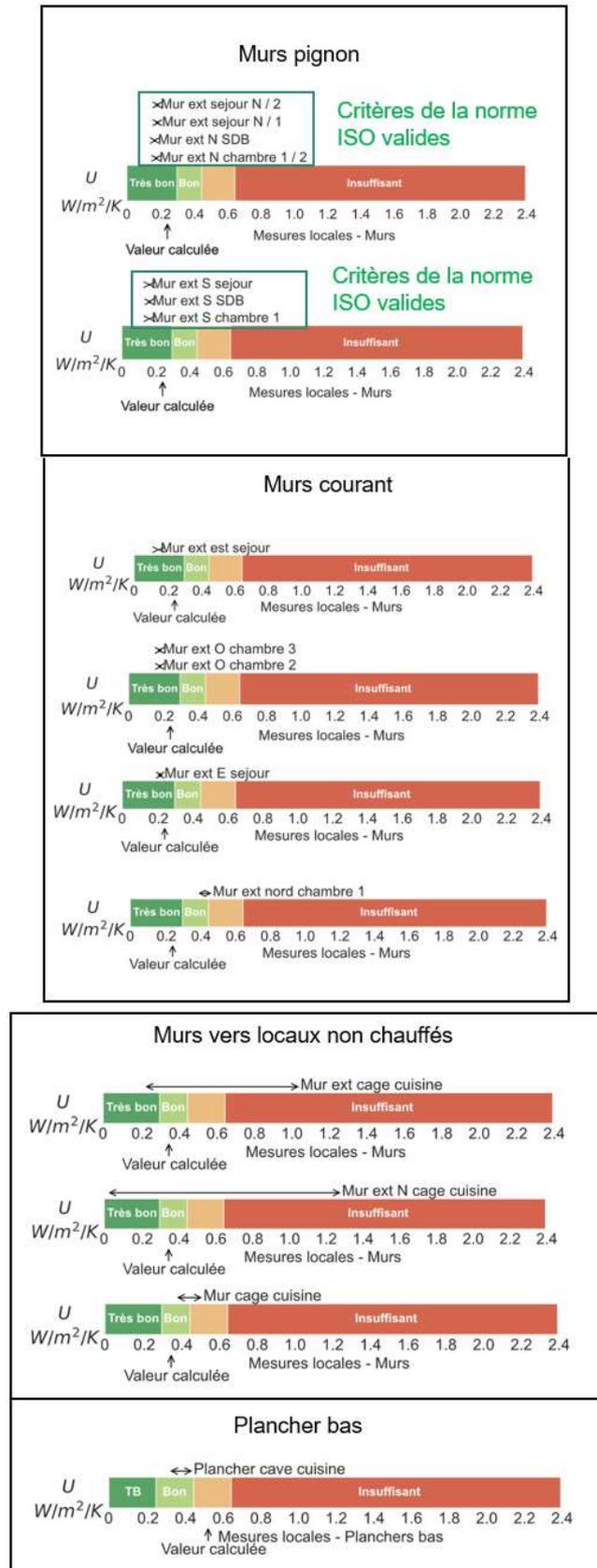


FIGURE 30 : RESULTAT DE MESURES LOCALES DE TRANSMISSION THERMIQUE (OPERATION A)



FIGURE 31 : ECARTS MESURE-CALCUL DES MESURES LOCALES DE TRANSMISSION THERMIQUE (OPERATION A)

Les 7 mesures "opposables" concernent uniquement le mur pignon du bâtiment. Les écarts mesure/calcul sur cet échantillon présentent la même tendance que les mesures *appartement*, à savoir une déperdition environ 30% moindre que dans l'étude thermique.

Même si les critères de la norme ISO ne sont pas respectés, une tendance similaire est observée sur les murs courants, à l'exception des balcons, où des déperditions plus importantes avaient été observées au cours de l'étude thermographique. Même constat pour la mesure au niveau du plancher bas.

Au niveau de la cage d'escalier, des performances moins élevées que prévu ont été mesurées, mais souvent avec une incertitude très élevée du fait du faible écart de température avec les parties communes, et toujours sans l'atteinte des critères de la norme ISO.

Enfin, il est à noter qu'aucune mesure au niveau du plancher haut n'a été réalisée par manque de temps, bien que ces mesures auraient été informatives.

INDICATEUR GLOBAL ENVELOPPE

En appliquant la méthodologie de l'indicateur global, une mise à jour est réalisée sur la densité de probabilité des caractéristiques thermiques de l'enveloppe (estimées a priori à partir de l'étude thermique) en intégrant l'ensemble des mesures valides (2 mesures appartement et 7 mesures locales) via l'algorithme bayésien.

Les résultats sont donnés en Figure 32 avec, en Figure 33, l'impact sur l'estimation de l'indicateur global.

Sans surprise, la probabilité de contre-performance *a posteriori* est alors très faible, ce qui est parfaitement logique puisque l'ensemble de ces mesures valides indique une performance plus élevée par rapport à celle de l'étude thermique.

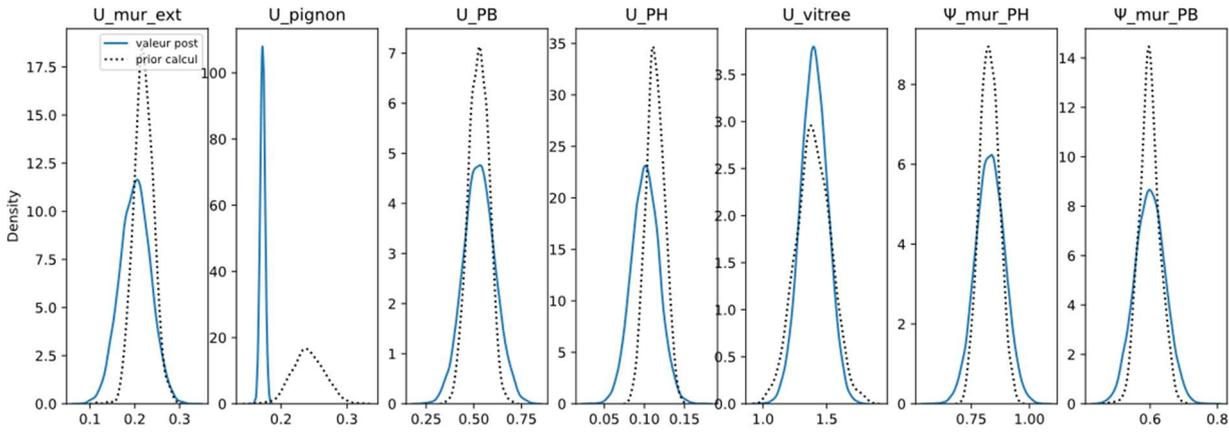


FIGURE 32 : MISES A JOUR DES DENSITES DE PROBABILITE DES CARACTERISTIQUES THERMIQUES DE L'ENVELOPPE COMPTE TENU DES MESURES VALIDES (OPERATION A)

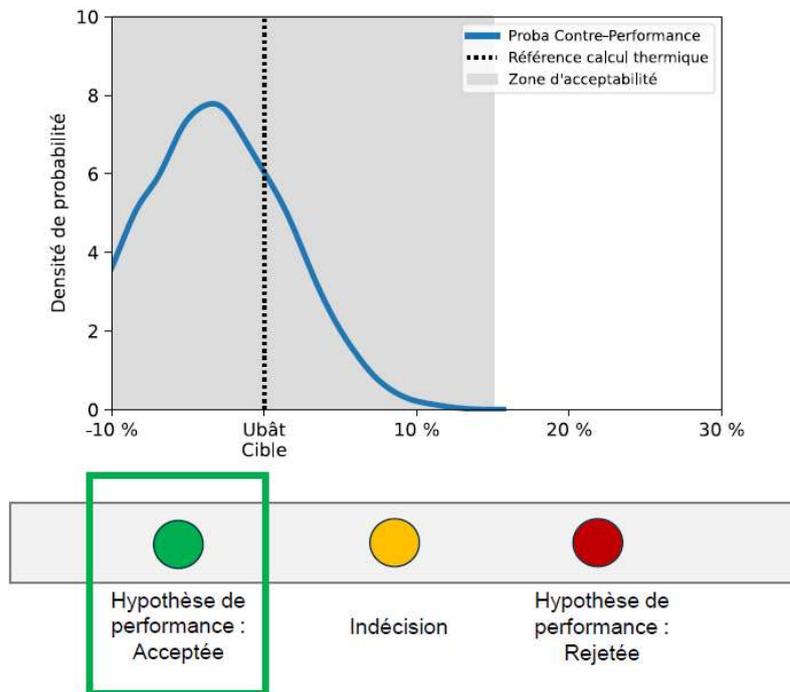


FIGURE 33 : INDICATEUR GLOBAL A POSTERIORI (OPÉRATION A)

5.2/ APPLICATION « B » SUR UN COLLECTIF NEUF DE TAILLE MOYENNE

Cette opération, montrée en Figure 34, a concerné un bâtiment de 29 logements, répartis sur cinq niveaux. La mesure a eu lieu la semaine précédant la livraison, soit du 3 octobre au 10 octobre 2024. On peut donc considérer qu'elle a eu lieu à réception.



FIGURE 34 : VUE EXTERIEURE DE L'OPERATION B

Dans cette opération, trois appartements ont été mis à disposition par le maître d'ouvrage : un au premier étage (plancher bas déperditif) et les deux autres au quatrième et dernier étage. L'opération a alors été l'occasion de tester la totalité du protocole de mesure Sereine Enveloppe : visite de détection des défauts, mesures locales et mesures appartements selon les préconisations des essais numériques de l'indicateur global.

VISITE TECHNIQUE ET DETECTION DES DEFAUTS

Le 3 octobre, dès l'arrivée sur site, une visite du bâtiment a été faite pour vérifier l'achèvement des travaux de l'enveloppe, et effectuer une recherche de défauts par la caméra thermique.

Les clichés extérieurs n'ont rien révélé de notable. A partir de là, l'enveloppe est considérée homogène³. Quant aux clichés intérieurs, ils n'ont pas révélé de défauts sur les parois déperditives mais ont révélé le passage dans la dalle intermédiaire, entre le logement 101 et le logement 201, de conduits d'eau chaude, très probablement liés au réseau de distribution de chauffage du logement 201. La distribution de chaud a alors été coupée dans le logement 201 et un kit supplémentaire a été installé pour chauffer de manière continue l'appartement 201 électriquement. Pour autant, à la dépose, les réseaux étaient encore visibles à la thermographie, laissant supposer que le bouclage ECS ou chauffage était encore en fonctionnement et a amené pendant l'essai SEREINE des apports de chaleur non quantifiables au logement 101. L'essai est donc **non valide**.

³ Homogène au sens où toutes les raisons de penser que les mesures locales ou mesure d'appartement seront représentatives de l'enveloppe dans sa globalité.

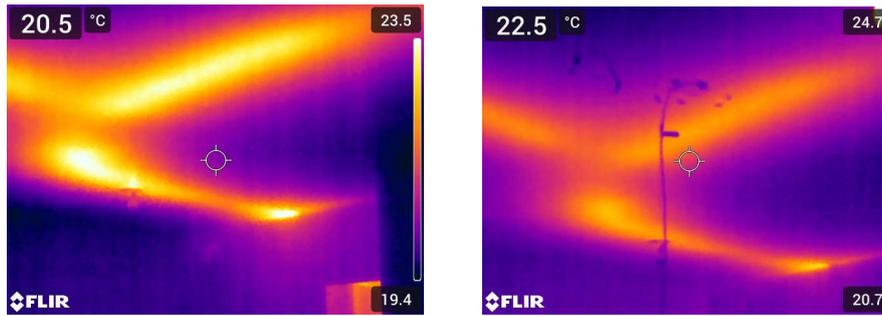


FIGURE 35 : OPERATION B - CLICHE THERMOGRAPHIQUE DU PLANCHER INTERMEDIAIRE VU DE L'APPARTEMENT 101, PASSAGE DE CONDUITS DE DISTRIBUTION D'EAU CHAUDE : A GAUCHE, DEBUT DE L'EXPERIMENTATION ; A DROITE, FIN DE L'EXPERIMENTATION.

Les autres défauts détectés à la caméra thermique en début de l'expérimentation sont :

- Un défaut d'isolation sans doute lié à une absence d'isolant en partie basse de la paroi : rectangle de couleur fuschia sur la Figure 36
- Un défaut d'isolation au niveau des huisseries de fenêtres : linéaire bleu tout autour de la menuiserie sur la Figure 37
- Présence probable d'humidité dans les parois : la présence de zones froides (fuschia) de hauteur variable en partie basse du mur sur la Figure 38 est typique de ce type de défaut. L'humidité pourrait provenir d'un transfert d'eau de la terrasse dans le bas de mur par capillarité et en raison d'un défaut d'étanchéité.
- Pont thermique d'angle : le linéaire vertical de couleur bleu-fuschia est particulièrement marqué sur le cliché de la Figure 39. Il peut éventuellement traduire une épaisseur insuffisante de l'isolant au niveau de cette zone.

En raison du caractère qualitatif des observations réalisées à la caméra thermique, des investigations complémentaires sont nécessaires pour vérifier ces « impressions ». Elles ne peuvent pas être considérées comme des preuves.



FIGURE 36 : OPERATION B - CLICHE THERMOGRAPHIQUE D'UNE PAROI DEPERDITIVE DONNANT SUR L'EXTERIEUR ; APPARTEMENT 101, CHAMBRE DU FOND

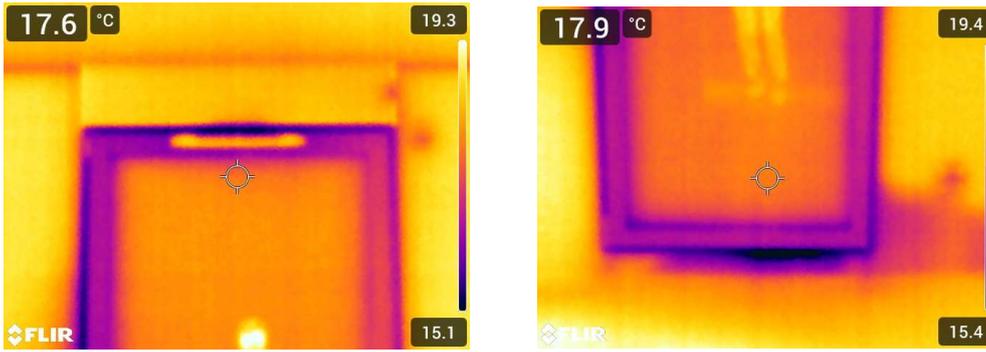


FIGURE 37 : OPERATION B - CLICHE THERMOGRAPHIQUE DE LA MENUISERIE D'UNE BAIE VITREE DONNANT SUR L'EXTERIEUR ; APPARTEMENT 401

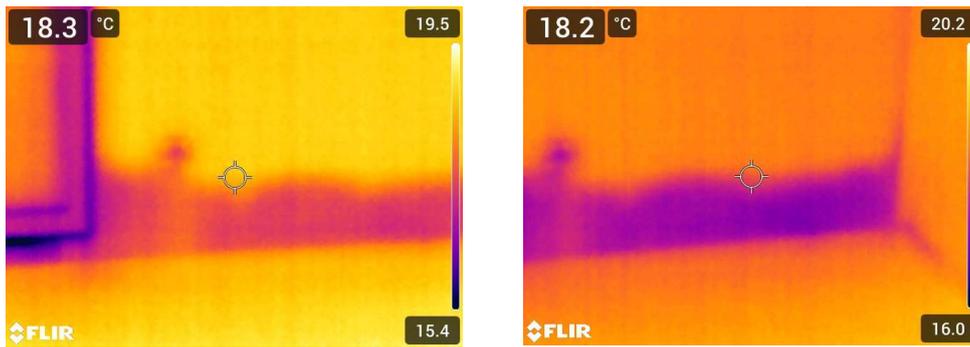


FIGURE 38 : OPERATION B - CLICHE THERMOGRAPHIQUE D'UNE PAROI DEPERDITIVE DONNANT SUR UNE TERRASSE EXTERIEURE ; APPARTEMENT 401



FIGURE 39 : OPERATION B - CLICHE THERMOGRAPHIQUE D'UN PONT THERMIQUE D'ANGLE ; APPARTEMENT 101

MESURES DANS LES APPARTEMENTS

Les mesures d'étanchéité à l'air des appartements ont été réalisées le matin du 3 octobre 2024, en parallèle de la pose des capteurs. Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre de très bons résultats pour chacun des appartements, très en deçà des valeurs réglementaires.

	101	401	403
Q _{4Pa_surf} mesuré	0,26 m ³ /h/m ²	0,14 m ³ /h/m ²	0,10 m ³ /h/m ²

FIGURE 40 : OPERATION B - RESULTATS DE MESURES DE L'ETANCHEITE A L'AIR

Les appartements n'ont pas pu être correctement préchauffés, ils étaient à une température de 18°C (possible que les thermostats n'aient pas pu être correctement réglés). La température de consigne de 24°C a été fixée dans les appartements mesurés avec les kits et dans tous les logements mitoyens avec le système en place (sauf dans l'appartement 201 où un kit a été déployé). On a observé une convergence des flux mitoyens après 48 heures de mesure, comme dans la Figure 41 pour les flux mitoyens depuis l'appartement 401.

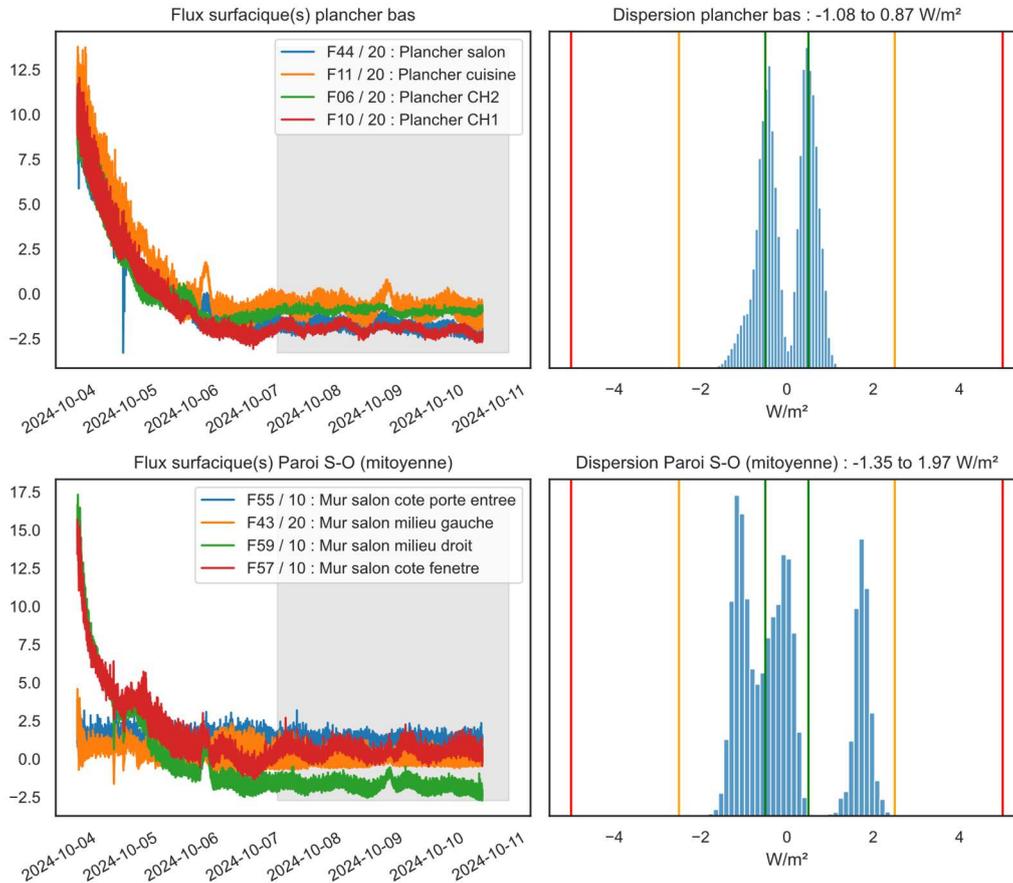


FIGURE 41 : OPERATION B - CONVERGENCE DES FLUX MITOYENS DE L'APPARTEMENT 401

Du fait des apports calorifiques issus d'un réseau de distribution de l'appartement 201, la mesure de l'appartement 101 a été jugée non valide. Restent les mesures des appartements 401 et 403.

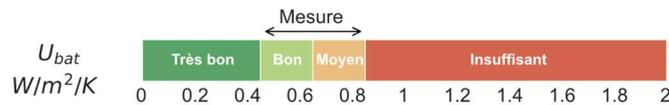


FIGURE 42 : OPERATION B - UBAT MESURE DE L'APPARTEMENT 401

L'appartement 401, en Figure 42, montre un U_{bat} mesuré à $0,65 \pm 0,19 \text{ W/m}^2/\text{K}$. La cible était à $0,42 \text{ W/m}^2/\text{K}$. L'appartement 403, en Figure 43, montre un U_{bat} mesuré à $0,51 \pm 0,19 \text{ W/m}^2/\text{K}$. La cible était à $0,35 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Dans les deux cas, les mesures semblent montrer une contre-performance.



FIGURE 43 : OPERATION B – UBAT MESURE DE L'APPARTEMENT 403

MESURES LOCALES

De nombreuses mesures locales des parois déperditives ont été prévues. Peu ont pourtant été validées au sens de l'ISO 9869-1, très certainement en raison des températures extérieures très douces :

- Trois mesures du plancher bas sur local non chauffé (aucune valide)
- Neuf mesures de la paroi courante (huit valides)
- Neuf mesures du plancher haut sur toiture terrasse haute (aucune valide)
- Trois mesures du plancher haut sur toiture terrasse intermédiaire (valides)

Les mesures validées du plancher haut sur toiture intermédiaire, dans la Figure 44, montrent une contre-performance très importante par rapport à la valeur prise dans la note de calcul thermique.

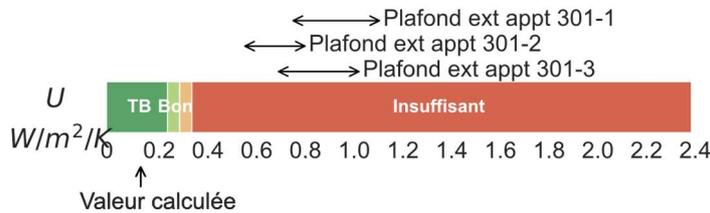
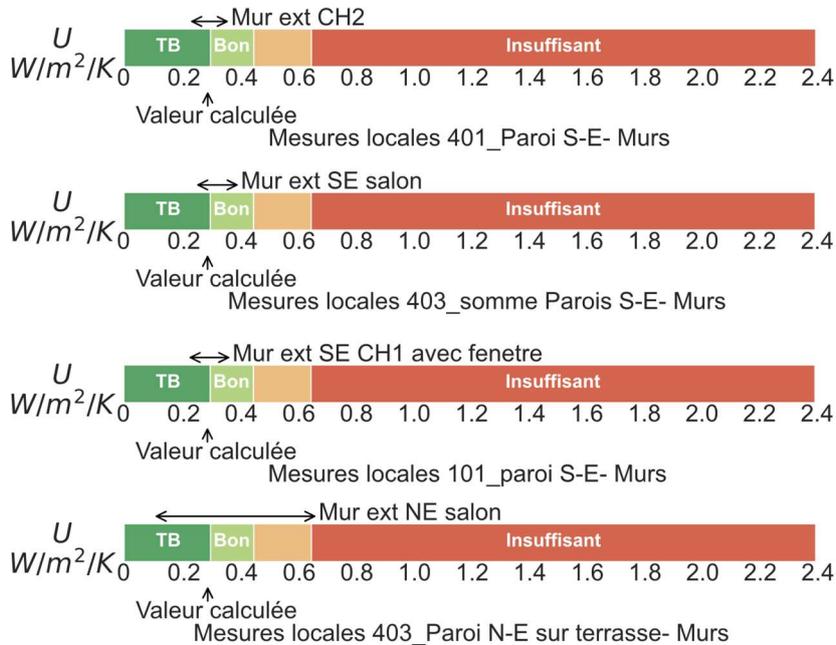


FIGURE 44: OPERATION B - RESULTAT DES MESURES DE U DU PLANCHER HAUT SUR TOITURE INTERMEDIAIRE

Quant aux mesures de la paroi courante, elles montrent en Figure 45 être globalement conformes à la valeur prise pour le calcul des déperditions thermiques.



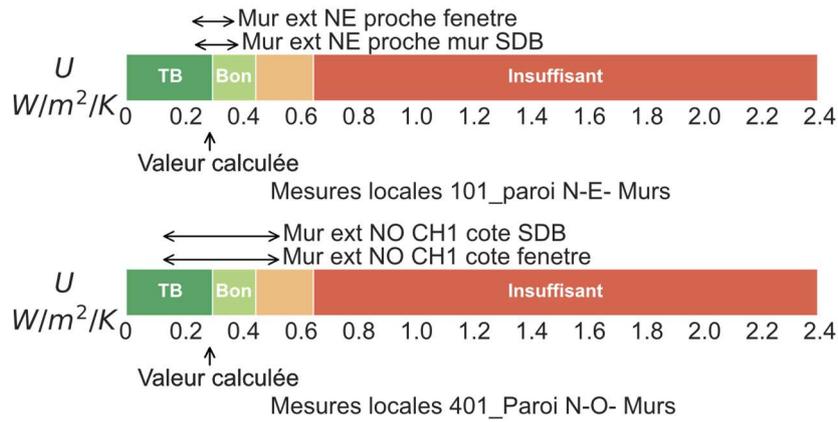


FIGURE 45 : OPERATION B – RESULTATS DES MESURES DU U DE LA PAROI COURANTE

INDICATEUR GLOBAL

Sur cette opération, l'indicateur global a pu être calculé, à l'aide des mesures valides récoltées. L'indicateur, donné en Figure 46, montre une forte probabilité de contre-performance. L'indicateur conclut à l'indécision, mais la courbe de risque est à la limite du rejet de performance.

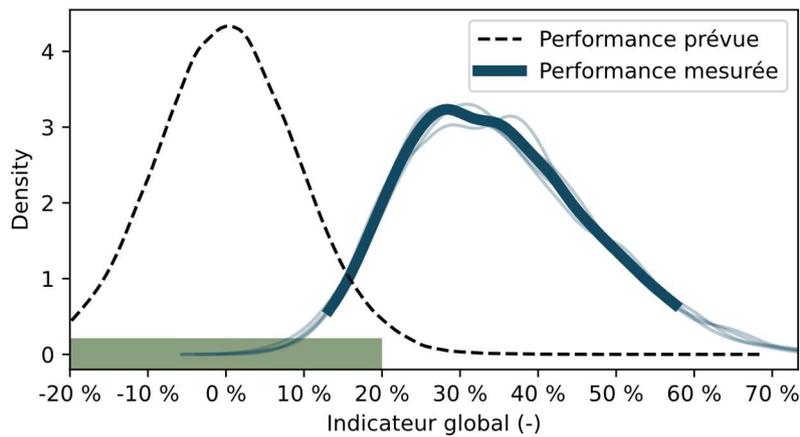


FIGURE 46 : OPERATION B - INDICATEUR GLOBAL

Pour mieux analyser cette courbe de risque, il est possible de créer l'abaque correspondant à ce plan d'instrumentation (selon la méthodologie de l'annexe G). L'abaque, en Figure 47, montre certes à gauche que les cas d'indécision peuvent se produire pour des contre-performances allant de quelques pourcents à 40 %. Mais du côté droit, on comprend qu'un indicateur donnant un maximum de probabilité à environ 30% correspond systématiquement à des contre-performances du même ordre de grandeur. En d'autres termes, il n'y a pas pour ce plan d'instrumentation de cas simulés où un indicateur à la limite du rejet soit en réalité performant.

Vu le risque évalué par la mesure de contre-performance sur cette opération, une discussion est engagée avec le maître d'ouvrage et son équipe de VEFA pour comprendre l'origine de la contre-performance et le cas échéant, engager une étude complémentaire sur le bâti.

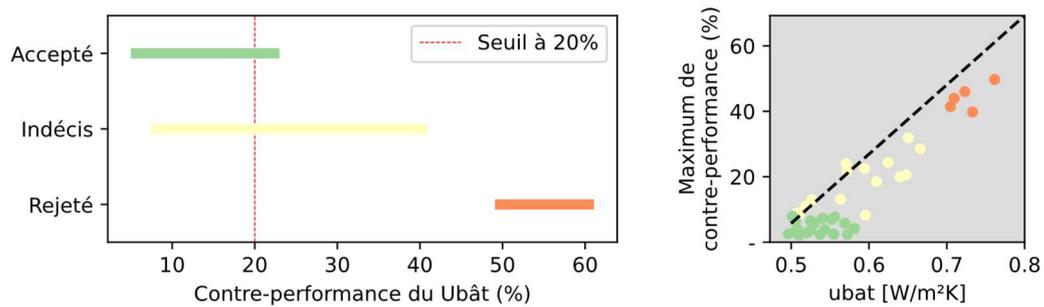


FIGURE 47 : ABAQUE DE DETECTION DES CONTRE-PERFORMANCES POUR LE PLAN D'INSTRUMENTATION REALISE SUR L'OPERATION B

6/ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce livrable a permis d'expliciter la méthodologie développée pour la méthode SEREINE Enveloppe dédiée au logement collectif, notamment les différents protocoles à appliquer selon la configuration et la méthode d'analyse des données. Ceux-ci diffèrent fortement de la méthode appliquée pour la maison individuelle. Cette différence s'explique par le changement d'approche (par échantillonnage) et les nouveaux verrous scientifiques et techniques associés : gestion des flux de chaleur mitoyens, évaluation d'une performance globale à partir d'un échantillon de mesures.

Sur ce dernier point, il a été démontré qu'il est nécessaire non seulement de mesurer plusieurs appartements, mais également de procéder systématiquement à des mesures locales, à un protocole thermographique et de détection des défauts. Le nombre minimal de mesures dépend à la fois de la taille du bâtiment et du niveau de seuil de contre-performance visé.

Pour plus de détails sur l'évolution du dispositif associée à cette méthode, un second livrable intitulé « *Livrable n° 1.2.b Dispositif de mesure SEREINE Enveloppe* » explique notamment l'inclusion des fluxmètres dans le dispositif actuel afin d'en permettre la conception et préparer, à terme, l'analyse des données automatisée des mesures locales et *appartement*.

Etant donné la multiplicité des étapes en logement collectif, autant sur la partie enveloppe que sur la partie systèmes, il a également été nécessaire d'établir un troisième livrable intitulé « *Livrable n° 1.3.a Protocole global SEREINE pour le logement collectif : Articulation des différentes mesures et vérifications sur l'enveloppe et les systèmes* ». Ce document a pour objectif de faciliter l'organisation concrète des mesures du point de vue de l'opérateur de mesure.

6.1/ PERSPECTIVES

A l'issue de ces travaux, un déploiement à terme de la méthodologie semble envisageable par les opérateurs de mesure, mais il restera important de traiter à termes les points suivants sur la méthodologie :

- **L'identification manuelle de la période d'analyse** pour les mesures appartement (après préchauffage et stabilisation de la température et de la puissance de chauffe intérieure) reste encore **un critère assez subjectif**, entre les mains de l'opérateur, même si la période sélectionnée s'affiche sur le rapport. Ce dernier mériterait d'être formalisé et automatisé (d'une manière potentiellement similaire aux critères de la norme ISO 9869 sur les mesures locales)
- **Le biais de la mesure** n'a été pour le moment caractérisé que sur **une typologie de logement** (bâtiment en barre, logement supérieur en angle, ITI). Il conviendra d'évaluer également ce biais a minima :
 - Pour d'autres procédés constructifs (ITE a minima)
 - D'autres positions sur le bâtiment (logement au 1^{er} niveau a minima)
 - D'autres géométries de bâtiment (ex : maison en bande)
- Il a été observé à plusieurs reprises des problématiques de **colonnes chauffantes traversant les logement en premier niveau** (bouclage ECS ou chauffage collectif). Si la neutralisation de ces sources de chaleur n'est pas possible, il conviendra peut être d'écarter certaines typologies de logements du périmètre de validité (déjà assez restreint) des mesures SEREINE *appartement*.
- Le **calcul de l'indicateur global** nécessite pour l'instant un **prétraitement assez conséquent** pour être calculé (concaténation des données de mesure, extraction des informations de l'étude thermique). Il sera nécessaire de mettre en place un outil automatisant ce processus, en minimisant la saisie de nouvelles données par l'opérateur.

De manière plus prospective, il pourrait également être intéressant d'étudier les approches de mesure en occupation, qui permettrait d'évaluer directement la performance globale de l'enveloppe, avec toutefois d'autres sources d'incertitudes liées à l'occupation et à la méthode d'analyse de données.

7/ REFERENCES

- Bouchié, Rémi, Stéphanie Derouineau, Charlotte Abele, and Jean-robert Millet. 2014. "Conception et validation d'un capteur de mesure de la température extérieure équivalente d'une paroi opaque d'un Bâtiment." In *Conférence IBPSA Fr.*, 1–8. Arras.
- Choi, Doo, et Myeong Ko. 2019. « Analysis of Convergence Characteristics of Average Method Regulated by ISO 9869-1 for Evaluating In Situ Thermal Resistance and Thermal Transmittance of Opaque Exterior Walls ». *Energies* 12 (mai): 1989. <https://doi.org/10.3390/en12101989>.
- EN 16798-7:2017. Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 7 : calculation methods for the determination of air flow rates in buildings including infiltration (Modules M5-5), NF EN standard, 2017.
- Flood, Cormac, Lloyd Scott, et William Gleeson. 2016. In-Situ Thermal Transmittance of Case Studies in Dublin.
- ISO 9869-1:2014. Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method, EN standard, 2014.
- Juricic, Sarah, Simon Thébault, Arnaud Challansonnex, et Patrick Schalbart. 2024. « Influence des flux mitoyens sur la précision d'une mesure Sereine du coefficient de transmission thermique d'un appartement seul. ». IBPSA France. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30996.10882>.
- Kim, Seohoon, Jihyun Seo, Hakgeun Jeong, et Jonghun Kim. 2022. « In Situ Measurement of the Heat Loss Coefficient of Thermal Bridges in a Building Envelope ». *Energy and Buildings* 256 (février): 111627. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111627>
- Rodler, Auline, Sihem Guernouti, et Marjorie Musy. 2019. « Bayesian Inference Method for in Situ Thermal Conductivity and Heat Capacity Identification: Comparison to ISO Standard ». *Construction and Building Materials* 196 (janvier): 574-93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.110> **Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide..**
- Sougkakis, Vasileios, Johann Meulemans, Christopher Wood, Mark Gillott, et Tom Cox. 2022. « Evaluation of the precision and accuracy of the QUB/e method for assessing the as-built thermal performance of a low-energy detached house in UK ». *Energy and Buildings* 255 (janvier): 111643. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111643>.

8/ ANNEXES

ANNEXE A. PLAN D'EXPERIENCES NUMERIQUES POUR LA DETERMINATION DES SEUILS DE DETECTION DE CONTRE-PERFORMANCE

Pour produire les chiffres donnés dans le tableau d'aide à la décision du plan d'instrumentation (section 2.1/ dans le Figure 3), un plan d'expériences numérique a été réalisé pour mesurer l'effet d'un pan d'instrumentation donné en fonction de multiples cas de contre-performances. Pour reproduire les résultats sur ces bâtiments, ou produire les résultats correspondant à un autre bâtiment, il faut suivre les étapes décrites ci-dessous.

SIMULER UN BATIMENT SELON SA NOTE DE CALCUL THERMIQUE ET LE DEGRADER

En premier lieu, la totalité des surfaces déperditives et des ponts thermiques du bâtiment étudié est décrite logement par logement dans un tableau. Seuls sont pris en comptes les typologies de surface et les ponts thermiques prévus dans la note de calcul thermique.

Pour les bâtiments donnés dans le Figure 3 de la section 2.1/, les métrés du Figure 48, du Figure 49 et du Figure 50 ont été utilisés.

FIGURE 48 : METRES D'UN BATIMENT DE 12 LOGEMENTS UTILISES POUR LE PLAN D'EXPERIENCE NUMERIQUE DE DETECTION DE CONTRE-PERFORMANCES

Logement	Paroi courante (m ²)	Pignon (m ²)	Mur cage (m ²)	Menuiseries (m ²)	Plancher haut (m ²)	Plancher bas (m ²)	Pont thermique paroi courante plancher bas (m)
11	22.7	0	19.9	8.0	0	48.6	11.9
12	24.8	25.8	12.3	10.5	0	61.8	23.6
13	27.7	0	12.4	9.6	0	61.9	14.8
14	30.6	24.8	20.0	12.2	0	75.6	27.0
21	27.7	0	19.9	8.0	0	0	0
22	24.8	25.8	12.3	10.5	0	0	0
23	27.7	0	12.4	9.6	0	0	0
24	30.6	24.8	20.0	12.2	0	0	0
31	27.7	0	19.9	8.0	48.6	0	0
32	24.8	25.8	12.3	10.5	61.8	0	0
33	27.7	0	12.4	9.6	61.9	0	0
34	30.6	24.8	20.0	12.2	75.6	0	0

FIGURE 49 : METRES D'UN BATIMENT DE TYPE TOUR D'ENVIRON 30 LOGEMENTS

ID	Paroi courante (m ²)	Menuiseries (m ²)	Plancher haut (m ²)	Plancher bas (m ²)	Paroi ascenseur (m ²)	Pont thermique plancher interm. Ascenseur (m)	Pont thermique paroi courante plancher bas (m)	Pont thermique paroi courante plancher haut (m)	Pont thermique menuiseries paroi courante (m)

1T2	23,8	10,6	0	41,85	0	0	13,75	0	26,28
1T3	31,0	15,4	0	57,94	6,7	2,68	18,54	0	34,18
1T4	56,6	16,3	0	86,03	0	0	29,18	0	42,02
2T2	23,8	10,6	0	0	0	0	0	0	26,28
2T3	31,0	15,4	0	0	6,7	2,68	0	0	34,18
2T4	56,6	16,3	0	0	0	0	0	0	42,02
3T2	23,8	10,6	0	0	0	0	0	0	26,28
3T3	31,0	15,4	0	0	6,7	2,68	0	0	34,18
3T4	56,6	16,3	0	0	0	0	0	0	42,02
4T2	23,8	10,6	0	0	0	0	0	0	26,28
4T3	31,0	15,4	0	0	6,7	2,68	0	0	34,18
4T4	56,6	16,3	0	0	0	0	0	0	42,02
5T2	23,8	10,6	0	0	0	0	0	0	26,28
5T3	31,0	15,4	0	0	6,7	2,68	0	0	34,18
5T4	56,6	16,3	0	0	0	0	0	0	42,02
6T2	23,8	10,6	0	0	0	0	0	0	26,28
6T3	31,0	15,4	0	0	6,7	2,68	0	0	34,18
6T4	56,6	16,3	0	0	0	0	0	0	42,02
7T2	23,8	10,6	0	0	0	0	0	0	26,28
7T3	31,0	15,4	0	0	6,7	2,68	0	0	34,18
7T4	56,6	16,3	0	0	0	0	0	0	42,02
8T2	23,8	10,6	0	0	0	0	0	0	26,28
8T3	31,0	15,4	0	0	6,7	2,68	0	0	34,18
8T4	56,6	16,3	0	0	0	0	0	0	42,02
9T2	23,8	10,6	41,85	0	0	0	0	13,75	26,28
9T3	31,0	15,4	57,94	0	6,7	2,68	0	18,54	34,18
9T4	56,6	16,3	86,03	0	0	0	0	29,18	42,02

FIGURE 50 : METRES D'UN BATIMENT DE TYPE BARRE DE 22 LOGEMENTS

	Menuiseries (m ²)	Porte d'entrée (m ²)	Paroi courante (m ²)	Paroi sur local non chauffé (m ²)	Plancher bas sur sous-sol (m ²)	Plancher bas sur LNC (m ²)	Plancher haut sur terrasse intermédiaire (m ²)	Plancher haut sur terrasse haute (m ²)	Pont thermique paroi courante plancher bas au R+1 (m)	Pont thermique paroi courante plancher intermédiaire sans balcon (m)	Pont thermique paroi courante plancher haut au R+3 (m)	Pont thermique paroi courante plancher haut du dernier niveau (m)
001	9,2	1,8	36,5	27,5	77,6					4,5		
002	5,9	1,8	9,9	20,4	45,2					0,0		
101	9,5	0,0	30,1	4,5	0,0	55,4			15,8	7,9		

102	8,0	0,0	28,0	0,0	0,0	46,4			14,4	5,5		
103	6,0	0,0	9,5	0,0	0,0	27,8			6,2	1,4		
104	6,0	0,0	11,0	0,0	0,0	20,0			12,3	2,3		
105	11,9	0,0	25,0	0,0	0,0					3,7		
106	7,9	0,0	40,6	8,5	0,0					7,6		
201	9,5	0,0	30,1	4,5	0,0					10,8		
202	8,0	0,0	28,0	0,0	0,0					11,0		
203	6,0	0,0	9,5	0,0	0,0					2,8		
204	6,0	0,0	11,0	0,0	0,0					4,5		
205	11,9	0,0	25,0	0,0	0,0		3,3			7,4		
206	7,9	0,0	32,7	8,5	0,0		3,0			13,1		
301	13,9	0,0	46,7	4,5	0,0		32,4			7,0	24,2	
302	9,9	0,0	18,0	0,0	0,0		13,7			1,9	11,2	
303	6,0	0,0	9,5	0,0	0,0		8,3			2,2	6,7	
304	11,9	0,0	25,0	0,0	0,0		7,0			3,7	10,1	
305	6,6	0,0	30,8	2,9	0,0		12,5			5,5	15,0	
401	17,9	0,0	39,4	7,2	0,0			64,8				25,9
402	9,9	0,0	16,3	1,2	0,0			43,8				10,5
403	13,3	0,0	39,1	0,0	0,0			82,7				20,9

Les mètres sont alors utilisés pour recalculer la valeur initiale du $U_{bât}$, en prenant la note de calcul thermique pour fixer les valeurs de référence des coefficients de transferts thermiques surfaciques U et linéiques Ψ .

Pour simuler les dégradations, il suffit alors de dégrader chacun des éléments de la note de calcul thermique (y compris éventuellement d'y ajouter des ponts thermiques considérés comme négligeables dans la note de calcul thermique). Pour cela, on crée 40 ou 45 dégradations du bâtiment en tirant aléatoirement, pour 3 éléments constitutifs de la paroi, des valeurs de U ou de Ψ dans les bornes suivantes, en suivant une loi aléatoire :

$$\begin{cases} \mathcal{U}(U_{i,init}; U_{i,init} + 0.8) \\ \mathcal{U}(\Psi_{i,init}; \Psi_{i,init} + 0.4) \end{cases}$$

Par exemple, la première dégradation simulée concerne la paroi courante, le pont thermique entre la paroi courante et le plancher haut ainsi que le pont thermique entre les menuiseries et la paroi courante. Tous les autres éléments de l'enveloppe sont laissés à leur valeurs $U_{i,init}$ et $\Psi_{i,init}$, mais le $U_{bât,dégradé}$ est calculé avec le trio ($U_{pc,init} + 0.13$; $\Psi_{pc,ph,init} + 0.05$; $\Psi_{pc,men,init} + 0.28$). Les valeurs 0.13 0.05 et 0.28 ont été tirées aléatoirement dans les bornes uniformes données ci-dessus.

Le tirage se fait néanmoins de manière à maximiser la diversité de valeurs de $U_{bât}$ dégradées sous les contraintes suivantes :

- couvrir des valeur de $U_{bât}$ allant d'environ 5 % de contre-performance à plus de 50 % ;
- éviter les zones vides (pas de saut de $U_{bât}$ dégradés de plus de 8 % par exemple) ;
- éviter les trop grand nombre de dégradations à une contre-performance très proche (moins de 3 contre-performances de moins d'1 % d'écart).

TESTER LES PLANS D'INSTRUMENTATION

Pour tester plusieurs variantes d'instrumentation, on simule les mesures qu'on aurait obtenues dans un bâtiment dégradé conformément aux tirages de la partie précédente.

Les mesures locales de U se font sur les parties courantes et sont tirées aléatoirement suivant une loi normale centrée en la valeur de la paroi et d'écart-type 1 % (qu'elle soit dégradée ou non). On attribue aux mesures de locales de U une incertitude de mesure de 5 %. On dispose ainsi d'une liste de mesures potentielles $[(\hat{U}_i, 5\%) \text{ pour chaque paroi } i \text{ mesurable}]$.

Quant aux mesures Sereine de logements, il faut d'abord recalculer les $U_{bât}$ de chacun des logements en tenant compte de la contre-performance tirée à l'étape précédente. Chacun des $U_{bât,logement}$ recalculés permettent de simuler la mesure de ce même logement centrée sur la cible (hypothèse d'absence de biais) mais à laquelle on attribue une incertitude de 20 %. On dispose alors aussi d'une liste de mesures Sereine de logements potentielles $[(\hat{U}_{bât}, 20\%) \text{ pour chaque logement } j \text{ mesurable}]$

Les plans d'instrumentation consistent à calculer l'indicateur global pour chaque combinaison possible de mesures parmi les mesures disponibles en vue de tester les plans suivants :

2 mesures Sereine logement (parmi toutes celles possibles)	3 mesures Sereine logement (parmi toutes celles possibles)	4 mesures Sereine logement (parmi toutes celles possible)
<ul style="list-style-type: none"> - mesure locale sur 1 type de paroi (répétées 2, 3 ou 4 fois sur cette paroi) - mesures locales sur 2 types de paroi (répétées 2, 3 ou 4 fois sur chaque paroi) - mesures locales sur 3 types de parois (répétées 2, 3 ou 4 fois sur chaque paroi) 	<ul style="list-style-type: none"> - mesure locale sur 1 type de paroi (répétées 2, 3 ou 4 fois sur cette paroi) - mesures locales sur 2 types de paroi (répétées 2, 3 ou 4 fois sur chaque paroi) - mesures locales sur 3 types de parois (répétées 2, 3 ou 4 fois sur chaque paroi) 	<ul style="list-style-type: none"> - mesure locale sur 1 type de paroi (répétées 2, 3 ou 4 fois sur cette paroi) - mesures locales sur 2 types de paroi (répétées 2, 3 ou 4 fois sur chaque paroi) - mesures locales sur 3 types de parois (répétées 2, 3 ou 4 fois sur chaque paroi)

Notons qu'en fonction du nombre de répétitions testées, du nombre de logements mesurables et du nombre de parois mesurables, la combinatoire peut vite être très élevée. Il est alors envisageable de n'inclure que les combinaisons où les deux étages extrêmes sont échantillonnés, de forcer un nombre fixe de répétitions de mesures locales (il est admis que 3 mesures répétées de manière représentatives sont dans l'idéal un minimum) voire d'abandonner la configuration où seul un type de paroi est mesuré localement.

ANALYSE DES RESULTATS

Cette partie ne présente pas de difficultés notables, mais sont donnés ici les codes python permettant de créer les figures d'abaques, comme montrées en Annexe G et dont un exemple est reproduit en Figure 51. On suppose au préalable que tous les résultats des essais numériques créés du plan décrit ci-dessus sont concaténés dans un dataframe/tableur `results` qui contient les colonnes suivantes : `num apartment meas`, `XXX is measured` (pour XXX tous les identifiants appartements), `num local meas` et `hypothesis status 20%`.

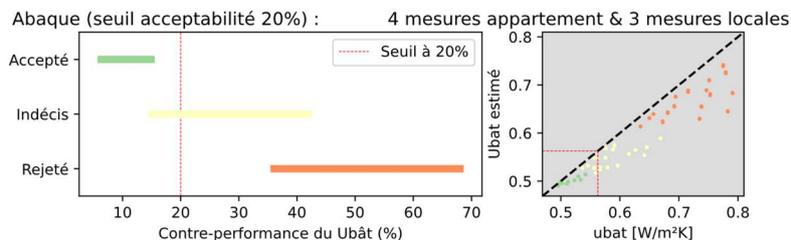


FIGURE 51: EXEMPLE D'ABAQUE D'UN PLAN D'INSTRUMENTATION POUR UN BATIMENT DONNE

```
from cmap import Colormap
import matplotlib.pyplot as plt
cm = Colormap('colorbrewer:Spectral_3_r').to_mpl()
```

```

# 1 graphe par plan d'instrumentation
for num_mesures_appt in [2, 3, 4]:
    q_appt = f"`num apartment meas` == {num_mesures_appt} &"
    q_floor = f"(`1T2 is measured` | `1T3 is measured` | `1T4 is measured`) \
        & (`9T2 is measured` | `9T3 is measured` | `9T4 is measured`) & "

    for num_mesures_loc in [2, 3]:
        q_iso = f"`num local meas` == {num_mesures_loc} &"

        fig, ax = plt.subplots(figsize=(8,3))
        ax.set_xlabel("Contre-performance du Ubât (%)")
        ax.set_yticks([1,2,3])
        ax.set_yticklabels(['Rejeté', 'Indécis', 'Accepté'])
        ymin, ymax = 0.5, 3.5
        ax.set_ylim(ymin, ymax)
        ax.vlines(x=ROPE, ymin=ymin, ymax=ymax, color='r', ls='--',
                 lw=0.5, label=f"Seuil à 20%")
        ax.legend()

        for i, status in enumerate(['accepted', 'undecided', 'rejected']):
            # calculer min, max
            q_hypothesis = f"`hypothesis status 20%` == '{status}'"
            min_status = results.query(q_appt +
                                     q_floor +
                                     q_iso +
                                     q_hypothesis)['erreur [%']].min()

            max_status = results.query(q_appt +
                                     q_floor +
                                     q_iso +
                                     q_hypothesis)['erreur [%']].max()

            # add to figure
            ax.hlines(y=3-i, xmin=min_status, xmax=max_status, color=cm(i), lw=5)
plt.show()

```

Et pour le scatterplot :

```

q_iso = q_iso[:-1]
fig, ax = plt.subplots(figsize=(4,3))

```

```
status_colorifier = {'accepted': 1, 'undecided': 2, 'rejected': 3}
array_of_colors = [status_colorifier[status] for status in _results.query(q_appt
                                                                           + q_PC
                                                                           + q_iso)
                   .loc[:,f'hypothesis status {ROPE}%']]
ubat_init = xxx # charger la valeur de référence de la note de calcul thermique

results.query(q_appt
              + q_PC
              + q_iso).plot.scatter(x="ubat [W/m²K]",
                                    y="Ubat estimé",
                                    c=array_of_colors,
                                    s=3,
                                    cmap=cm,
                                    ax=ax)

ax.plot([ubat_init, 1.2*ubat_init, 1.2*ubat_init],
        [1.2*ubat_init, 1.2*ubat_init, ubat_init],
        'r--', lw=0.5)
xy_max = results.loc[:, 'Ubat estimé'].max()
xy_max = 1.07
ax.plot([ubat_init, xy_max], [ubat_init, xy_max], 'k--')
ax.set_xlim(ubat_init, xy_max)
ax.set_ylim(ubat_init, xy_max)
ax.set_facecolor('gainsboro')
```

ANNEXE B. ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE DES MESURES EN APPARTEMENT

Même si la méthode d'analyse diffère fortement de celle utilisée pour la maison individuelle, l'approche sur l'évaluation de l'incertitude reste similaire, avec la combinaison de 2 niveaux d'incertitude :

- Incertitude liées aux erreurs systématiques sur les données d'entrée
- Incertitude liée au biais de la méthode en conditions maîtrisées

A la différence de la méthode SEREINE pour la maison individuelle, l'erreur de modèle n'est pas dissociée de l'incertitude liée au biais de mesure.

Pour autant, l'erreur de modélisation dans la méthode d'analyse (lié à la dynamique des échanges de chaleur) reste un sujet à investiguer pour de future version de la méthode, ou sa corrélation avec le biais de la méthode devra être objectivée. Le premier niveau s'appuie sur la potentielle erreur systématique sur les données d'entrée. Il s'agit généralement du niveau le plus important, car il tient compte de l'incertitude des flux mitoyens évalués par les fluxmètres, dont l'impact peut être très important malgré toutes les adaptations réalisées pour le limiter.

Etant donné le calcul du coefficient H_{tr} est analytique, le calcul de cette incertitude peut être réalisé par le biais des formules suivantes :

$$u_{H_{tr},syst} = \sqrt{\left(\frac{\partial H_{tr}}{\partial P_h}\right)^2 u_{P_h}^2 + \left(\frac{\partial H_{tr}}{\partial P_{inf}}\right)^2 u_{P_{inf}}^2 + \sum_{m=1}^M \left(\frac{\partial H_{tr}}{\partial \varphi_m}\right)^2 u_{\varphi_m}^2 + \left(\frac{\partial H_{tr}}{\partial T_i}\right)^2 u_{T_i}^2 + \left(\frac{\partial H_{tr}}{\partial T_{e,eq}}\right)^2 u_{T_{e,eq}}^2}$$

Avec :

$$\frac{\partial H_{tr}}{\partial P_h} = \frac{\partial H_{tr}}{\partial P_{inf}} = \frac{\Delta t}{\int_{t_{début}}^{t_{fin}} (T_i - T_{e,eq}) \cdot dt}$$

$$\frac{\partial H_{tr}}{\partial \varphi_m} = \frac{-S_m \Delta t}{\int_{t_{début}}^{t_{fin}} (T_i - T_{e,eq}) \cdot dt} \quad \forall m \in [1, M]$$

$$\Delta t = t_{fin} - t_{début}$$

$$\frac{\partial H_{tr}}{\partial T_i} = \frac{\int_{t_{début}}^{t_{fin}} (-P_h - P_{inf} - P_{mit}) \cdot dt}{\int_{t_{début}}^{t_{fin}} (T_i - T_{e,eq})^2 \cdot dt}$$

$$\frac{\partial H_{tr}}{\partial T_{e,eq}} = \frac{\int_{t_{début}}^{t_{fin}} (P_h + P_{inf} + P_{mit}) \cdot dt}{\int_{t_{début}}^{t_{fin}} (T_i - T_{e,eq})^2 \cdot dt}$$

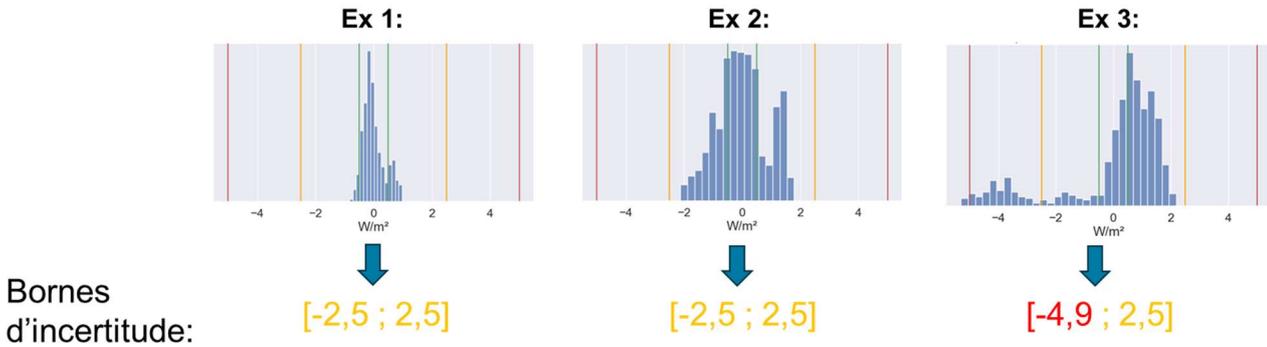
Les hypothèses sur les erreurs systématiques de P_h , φ_m , T_i , T_{eq} sont données dans le tableau suivant :

Grandeur	Méthode d'estimation	Intervalle de confiance	Loi de distribution	Erreur type u
Puissance de chauffage P_h [W]	Avec modules Intérieur	± 2 %	normale	0,01 $\overline{P_h}$ W
Flux de chaleur mitoyen par paroi φ_m [W/m ²]	Avec fluxmètre(s)	± 2,5 W/m ²	uniforme	$\frac{5}{4\sqrt{3}}$ W/m ²
Température intérieure, T_i [°C]	Avec modules Intérieur	± 0,5 K	normale	0,25 K
Température extérieure, $T_{e,eq}$ [°C]	Avec module extérieur & espaces non chauffés (modules adjacent(s) ou façade(s))	± 1 K	normale	0,5 K

FIGURE 52 : HYPOTHESES D'INCERTITUDES SYSTEMATIQUES DES DONNEES D'ENTREE POUR LE CALCUL DU HTR (PARTIE 1)

Concernant les erreurs types u_{T_i} et u_{φ_m} , celles-ci peuvent également être augmentées suivant les conditions expérimentales.

Par exemple, si une dispersion de température entre modules intérieurs dépasse l'intervalle de variation indiqué dans le Figure 52, alors l'incertitude u_{Ti} est élargie à la valeur de l'écart type observé entre modules. De même, si plusieurs fluxmètres sont positionnés sur une même paroi mitoyenne, et que la dispersion des mesures entre fluxmètres dépasse les $\pm 2,5 \text{ W/m}^2$ (ce qui devrait être normalement évité en suivant les recommandations de pose⁴) alors l'incertitude u_{φ_m} est élargie à la valeur de l'écart type observé entre capteurs sur la paroi mitoyenne considérée (voir exemple ci-dessous).



Concernant l'évaluation de $u_{P_{inf}}$, ce dernier dépend fortement des conditions de l'essai, et étant donné que le calcul de P_{inf} ne peut être obtenu que par calcul itératif (voir modèle aéraulique simplifiée de la norme EN 16798-7), l'évaluation de son incertitude ne peut être réalisée que par propagation Monte Carlo, par tirage aléatoires suivant les données d'entrée suivantes :

Grandeur	Méthode d'estimation	Intervalle de confiance	Loi de distribution
Température intérieure, T_i [°C]	Avec modules intérieurs	$\pm 0,5 \text{ K}$	normale
Température extérieure, T_a [°C]	Avec module extérieur	$\pm 1 \text{ K}$	normale
Vitesse de vent V à 10m [m/s]	Avec les mesures de la station météo la plus proche	$\pm 30 \%$	normale
Coefficient de perméabilité C_L	Méthode par porte soufflante, suivant l'ISO 9972	$I_{95}(C_L)$	normale
Exposant de fuite n	Méthode par porte soufflante, suivant l'ISO 9972	$I_{95}(n)$	normale
Coefficient de pression au vent	Valeurs tabulées de l'EN 16798-7	$[0,05 ; 0,5]$	uniforme
Coefficient de pression sous le vent	Valeurs tabulées de l'EN 16798-7	$[-0,7 ; 0,3]$	uniforme
Coefficient de pression en toiture	Valeurs tabulées de l'EN 16798-7	$[-0,6 ; 0,4]$	uniforme

FIGURE 53 : HYPOTHESES D'INCERTITUDES SYSTEMATIQUES RELATIVES A L'ESTIMATION DU DEBIT D'INFILTRATION POUR LE CALCUL DU HTR (PARTIE 2)

⁴ Pour plus de détails, se référer à l'annexe Annexe E relative au retour d'expérience sur la mesure des flux de chaleur mitoyens

Le second niveau d'incertitude permet de considérer le biais de la méthodologie, qui dépend fortement de la typologie de l'appartement testé et des conditions météorologiques. A l'heure actuelle, le plan d'expérience de plus de 2000 essais sur 20 climats-types utilisé pour la caractérisation du périmètre de validité a été utilisé pour fournir une estimation sécuritaire de ce biais (basé sur la typologie « très haute performance » d'un appartement en barre au dernier niveau, isolé par l'intérieur), en fonction de la température extérieure moyenne au cours du test et en suivant les recommandations quant au protocole à appliquer (« voisins absent » en deçà de 7°C, « voisins présents » entre 7 et 20°C).

La méthode d'évaluation est la même que pour la méthode SEREINE en maison individuelle, une analyse est réalisée sur une fenêtre glissante de 5°C dans laquelle le biais maximal est défini avec un taux de confiance de 95 %. Autrement dit, 95 % des résultats auront un biais inférieur à la valeur donnée. La Figure 54 illustre cette méthode de calcul pour le protocole « voisins présents » à 36h de test.

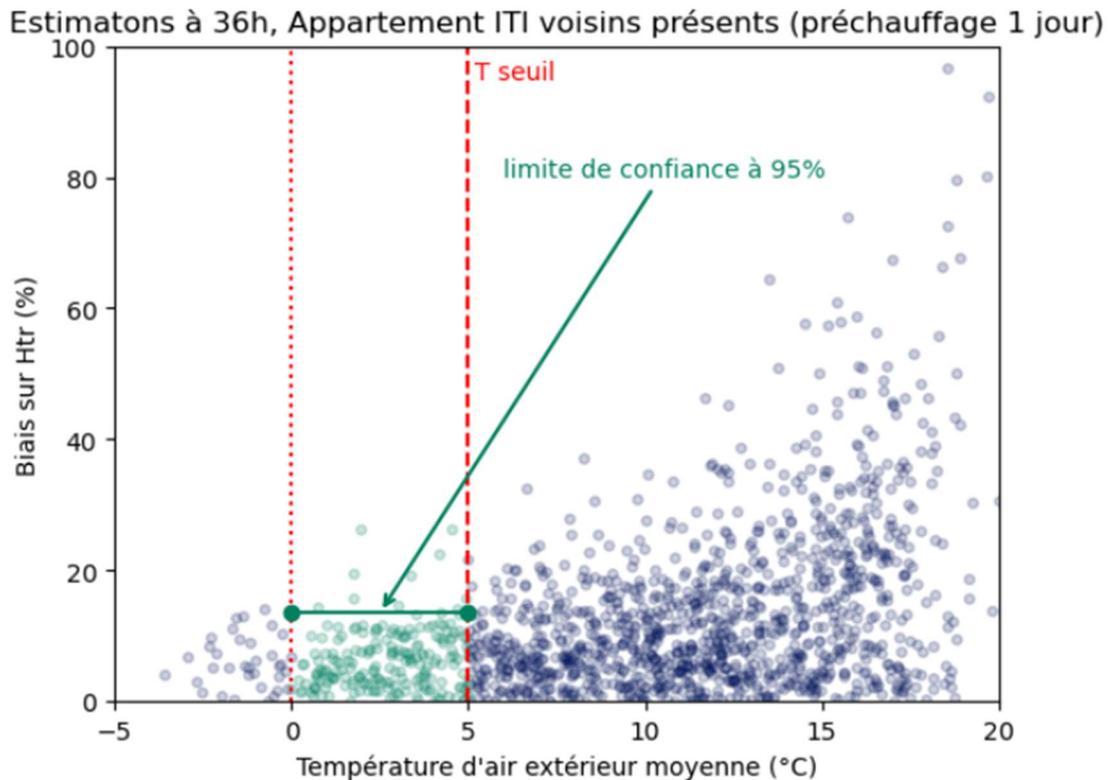


FIGURE 54 : ILLUSTRATION DE L'ESTIMATION DU BIAIS AVEC UNE LIMITE DE CONFIANCE A 95% EN FONCTION D'UNE TEMPERATURE SEUIL

Les valeurs de biais sont données le Figure 57 et le Figure 58 (également représentées dans la Figure 55 et la Figure 56)

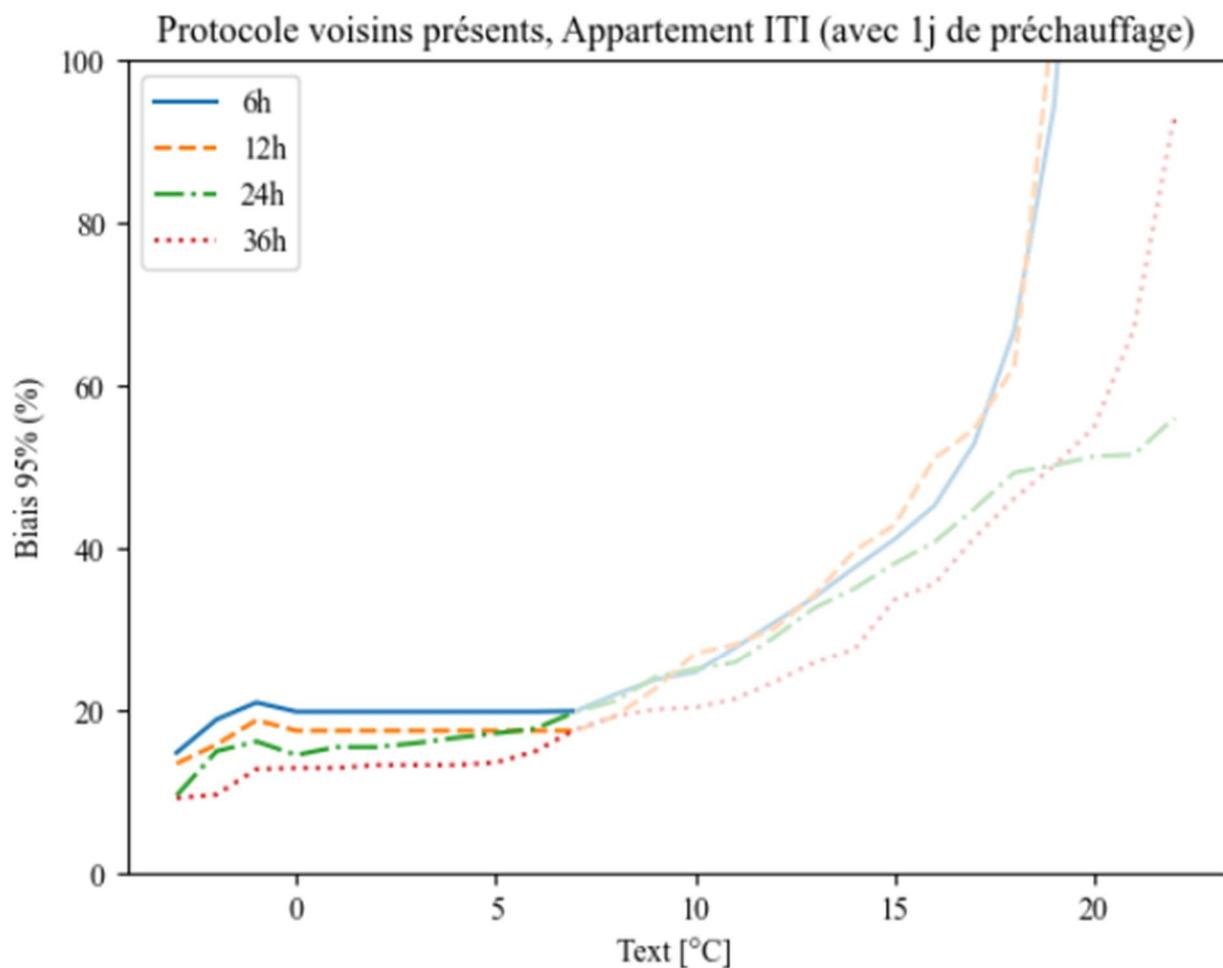


FIGURE 55 : VALEURS ESTIMEES DU BIAIS AVEC UNE LIMITE DE CONFIANCE A 95% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE SEUIL ET DE LA DUREE DE L'ESSAI, CAS APPARTEMENT ITI, PROTOCOLE VOISINS PRESENTS

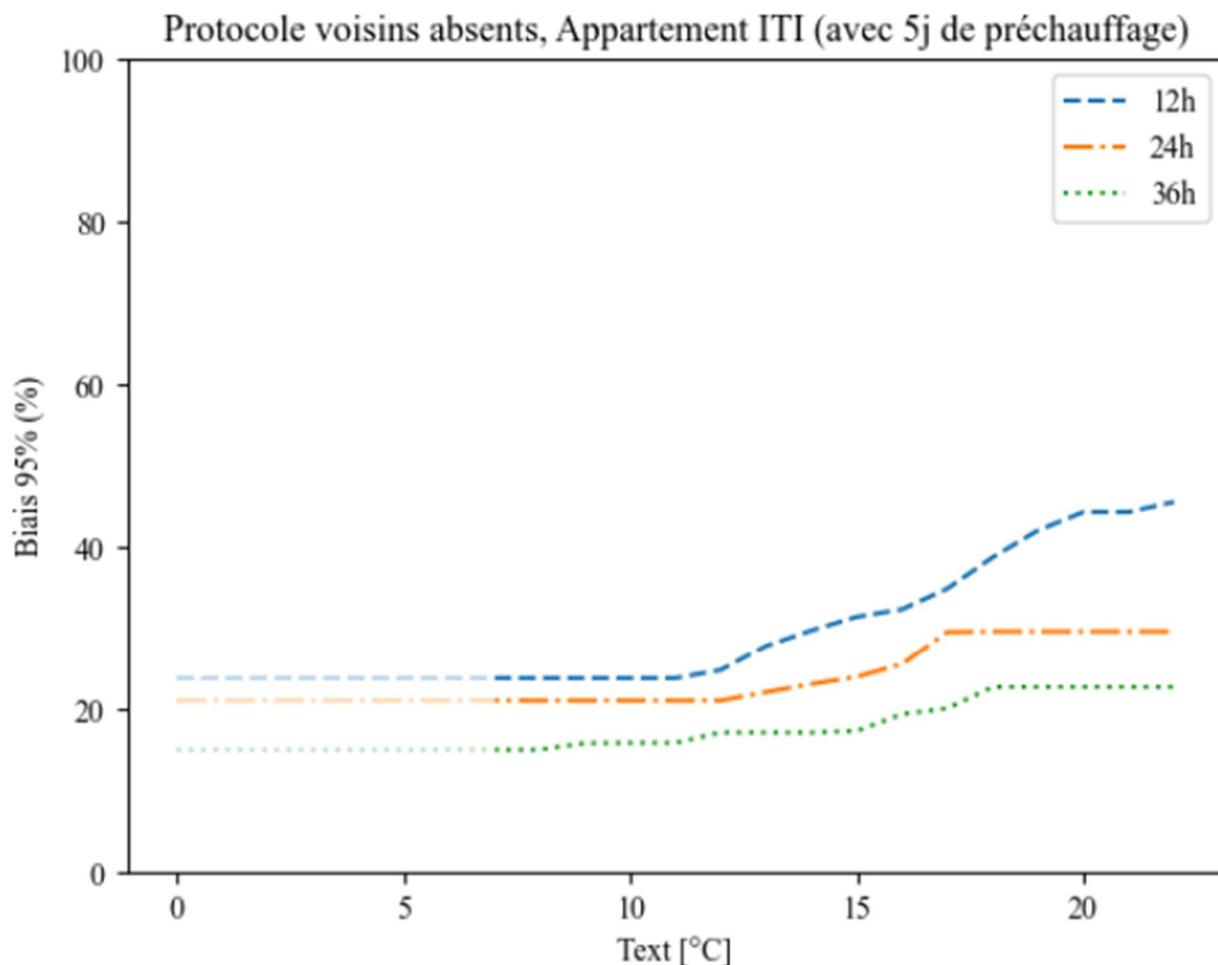


FIGURE 56 : VALEURS ESTIMÉES DU BIAIS AVEC UNE LIMITE DE CONFIANCE A 95% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE SEUIL ET DE LA DUREE DE L'ESSAI, CAS APPARTEMENT ITI, PROTOCOLE VOISINS ABSENTS

<i>Text moy (°C)</i>	6h	12h	24h	36h	<i>Nbr de points sur l'intervalle</i>
-3	14,7%	13,4%	9,5%	9,1%	6
-2	18,8%	15,7%	14,9%	9,6%	15
-1	20,9%	18,7%	16,1%	12,7%	26
0	19,8%	17,4%	14,4%	12,8%	50
1	19,8%	17,4%	15,4%	12,8%	73
2	19,8%	17,4%	15,4%	13,2%	111
3	19,8%	17,4%	15,9%	13,2%	158
4	19,8%	17,4%	16,5%	13,2%	192
5	19,8%	17,4%	17,1%	13,5%	221
6	19,8%	17,4%	17,7%	14,9%	268
7	19,8%	17,4%	19,7%	17,6%	304
8	21,9%	19,2%	21,1%	19,2%	324
9	23,7%	22,6%	24,0%	20,0%	353
10	24,6%	27,0%	25,0%	20,3%	409
11	27,7%	28,1%	25,8%	21,3%	438

12	30,9%	30,2%	29,1%	23,5%	459
13	34,0%	34,3%	32,7%	25,8%	499
14	37,6%	39,7%	35,0%	27,6%	521
15	41,1%	42,8%	38,1%	33,6%	506
16	45,2%	51,0%	40,7%	35,6%	506
17	52,9%	54,6%	44,8%	41,3%	483
18	66,8%	62,4%	49,3%	46,1%	436
19	94,4%	106,3%	50,2%	50,1%	403
20	157,5%	175,4%	51,3%	54,9%	372
21	251,5%	369,4%	51,5%	67,0%	301
22	775,7%	738,0%	56,0%	93,0%	215

FIGURE 57 : ERREURS DE BIAIS A 95% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D’AIR EXTERIEUR MOYENNE, CAS APPARTEMENT ITI, PROTOCOLE VOISINS PRESENTS

<i>Text moy (°C)</i>	12h	24h	36h	<i>Nbr de points sur l’intervalle</i>
0	23,7%	21,0%	14,9%	48
1	23,7%	21,0%	14,9%	72
2	23,7%	21,0%	14,9%	107
3	23,7%	21,0%	14,9%	152
4	23,7%	21,0%	14,9%	196
5	23,7%	21,0%	14,9%	235
6	23,7%	21,0%	14,9%	264
7	23,7%	21,0%	14,9%	315
8	23,7%	21,0%	14,9%	336
9	23,7%	21,0%	15,7%	372
10	23,7%	21,0%	15,8%	412
11	23,7%	21,0%	15,8%	475
12	24,7%	21,0%	17,1%	508
13	27,7%	22,0%	17,1%	557
14	29,7%	23,0%	17,1%	541
15	31,4%	23,9%	17,2%	526
16	32,3%	25,5%	19,3%	503
17	34,8%	29,5%	20,0%	484
18	38,7%	29,5%	22,7%	460
19	42,0%	29,5%	22,7%	467
20	44,3%	29,5%	22,7%	454
21	44,3%	29,5%	22,7%	447
22	45,5%	29,5%	22,7%	416

FIGURE 58 : ERREURS DE BIAIS A 95% EN FONCTION DE LA TEMPERATURE D’AIR EXTERIEUR MOYENNE, CAS APPARTEMENT ITI, PROTOCOLE VOISINS ABSENTS

NB : à terme, d’autres tableaux de biais seront à établir sur des configurations différents (par priorité : avec isolation par l’extérieur, sur un appartement au premier niveau, avec d’autres niveaux de mitoyenneté, avec d’autres typologies de parois mitoyennes)

L'incertitude finale affichée pour la mesure en appartement résulte de la somme quadratique des 3 niveaux d'incertitude précédemment décrits :

$$u_{Htr} = \sqrt{u_{Htr,syst}^2 + u_{Htr,biais}^2}$$

ANNEXE C. NUANCIER SEREINE POUR L'EVALUATION DE L'ABSORPTIVITE SOLAIRE DES PAROIS DU BATIMENT

Solution SEREINE Enveloppe					
Caractérisation des couleurs des parois extérieures					
NUANCIER	1 - Très clair	2 - Clair	3 - Moyen	4 - Foncé	5 - Très foncé
Gris :					
Rouges :					
Jaunes/Oranges :					
Verts :					
Bleus :					
Violet :					



Version 09/03/2023

1 / 2

Solution SEREINE Enveloppe Caractérisation des couleurs des parois extérieures

PROCÉDURE

Pour un élément de paroi extérieure (pan de mur, pan de toiture ou paroi vitrée occultée) unicolore :

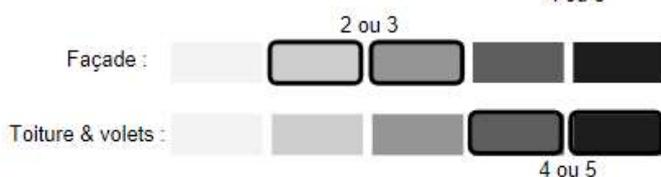
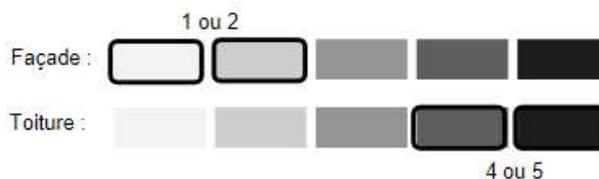
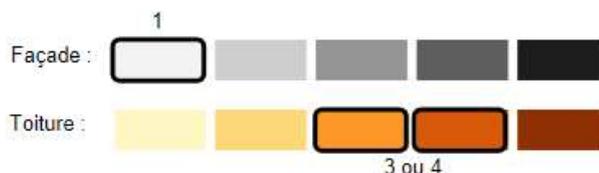
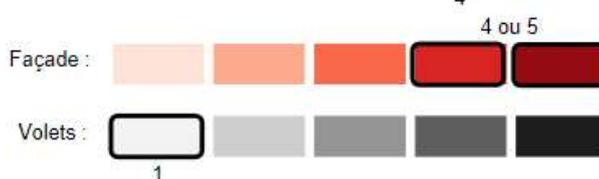
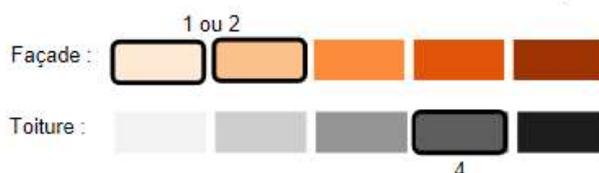
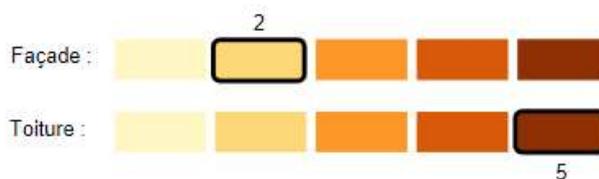
- Identifier dans le nuancier la couleur la plus proche
- Noter le niveau de la teinte correspondant de [1 - Très clair] à [5 - Très foncé]

Pour un élément de paroi extérieure (pan de mur, pan de toiture ou paroi vitrée occultée) bicolore :

- Identifier dans le nuancier la couleur la plus proche de la première couleur et noter le niveau de la teinte
- Identifier dans le nuancier la couleur la plus proche de la seconde couleur et noter le niveau de la teinte
- Faire la moyenne des niveaux de teinte notés, en les pondérant par la surface occupée par chaque teinte (la valeur de teinte finale obtenue est proche de la teinte dominante)
- Dans BATNRJ, indiquer pour la paroi concernée la valeur de teinte obtenue



EXEMPLES



ANNEXE D. PLAN D'EXPERIENCES VIRTUELLES POUR EVALUER LA FIABILITE D'UNE MESURE SEREINE LOGEMENT

Cette présente annexe décrit le plan d'expériences établi pour l'étude, la méthodologie d'analyse des essais numériques ainsi que les cas d'étude modélisés. L'étude cumule ainsi plus de 35 000 essais numériques.

METHODOLOGIE

L'expérimentation numérique permet d'évaluer la fiabilité et la répétabilité dans des conditions maîtrisées. La modélisation et simulation d'un essai Sereine peut alors se faire dans des configurations très variées. Ce travail s'est ainsi attaché à faire varier :

- Le modèle de bâtiment. Deux modèles ont été utilisés pour les simulations et sont décrits dans la partie « Cas d'étude » ci-après
- L'instrumentation : les options dites directe avec fluxmètres et indirecte avec mesure de température chez les voisins ont toutes les deux été étudiées.
- Les protocoles de mesure Sereine : « voisins absents » et « voisins présents » tels que décrits dans la partie 3.1/.

Chaque cas de figure peut être simulé sous des conditions météorologiques différentes et à plusieurs reprises dans l'année. Dans cette première phase de travail, trois climats ont été sélectionnés pour obtenir des conditions météorologiques variées et relativement représentatives de la variabilité météorologique française : Strasbourg, Nantes et Marseille. Les données utilisées sont des fichiers de données météorologiques annuels typiques dits TMY.

Pour chaque climat typique, la simulation inclut 2 tests Sereine par mois soit 72 essais répartis sur toute l'année. De plus, 4 durées différentes sont étudiées : 12h, 24, 36h et 48h pour évaluer l'opportunité de raccourcir la durée de la mesure.

METHODE D'ANALYSE

Un essai numérique consiste, comme pour une expérimentation réelle, à récolter la puissance de chauffage, la température d'air intérieure, les conditions météorologiques et, au choix en fonction de la méthode étudiée, les flux mesurés ou les températures d'air des zones adjacentes.

Le calcul du H_{tr} se fait ainsi :

$$H_{tr} \approx \int_{t_{début}}^{t_{fin}} (P_h(t) - P_{inf}(t) - P_{mit}(t)) \cdot dt / \int_{t_{début}}^{t_{fin}} (T_i(t) - T_e(t)) \cdot dt$$

Avec $P_h(t)$ la puissance de chauffage (W), T_i la température d'air intérieure (°C), T_e la température d'air extérieur (°C). La puissance perdue ou gagnée par les infiltrations d'air $P_{inf}(t)$ (W) est modélisée est simplement retirée du bilan. La puissance perdue ou gagnée du fait des flux mitoyens $P_{mit}(t)$ fait tout l'objet de l'étude. Elle est calculée soit grâce aux fluxmètres, soit estimée à partir des mesures des températures d'air des zones adjacentes. H_{tr} s'exprime alors en W/K.

Ce calcul de H_{tr} est accompagné d'un calcul de l'incertitude dû aux incertitudes de mesures aléatoires et permet d'établir un intervalle de confiance de la valeur de H_{tr} estimée.

Chacune des estimations de H_{tr} , avec son intervalle de confiance, peut être comparée à une valeur de référence (connue dans le cas numérique). A titre d'illustration, la Figure 59 compare 4 estimations de H_{tr} par rapport à une référence à environ 45 W/K. En se fixant une limite raisonnable d'erreur de 20% autour de la référence, on peut calculer l'indice d'interprétabilité I20%. Cet indice représente, grossièrement, la proportion de l'intervalle de confiance se trouvant dans la bande grise de 20% autour de la référence (plus exactement le niveau de probabilité dans la bande grise). L'indice prend des valeurs de 0 (estimation très erronée) à 1 (estimation très satisfaisante). Dans la suite des travaux, on considère acceptable une estimation dont l'indice I20% est supérieur à 0,7.

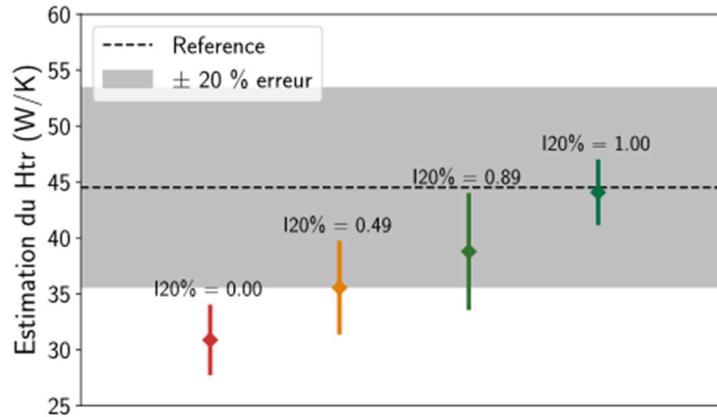


FIGURE 59 : ETABLIR QU'UNE ESTIMATION DE H_{TR} EST RÉUSSIE : LE CRITÈRE D'INTERPRÉTABILITÉ. UN CRITÈRE SUPÉRIEUR À 0.7 EST CONSIDÉRÉ ACCEPTABLE

Enfin, les résultats sont donnés en fonction des températures d'air extérieur moyenne sur la totalité de la durée de l'essai. Chaque graphe de résultats, par exemple en Figure 60, montre donc un total de 72 essais. Une case montre alors, parmi les essais à durée et température extérieure moyenne données, le pourcentage d'essais réussis au sens de l'indicateur I20%. Par exemple en rouge, 100% des essais fait à température moyenne sous 0°C et de durée de 48h sont considérés réussis. En revanche, en violet, seuls 84% des essais de 48h à température moyenne inférieure à 7°C sont considérés comme réussis.

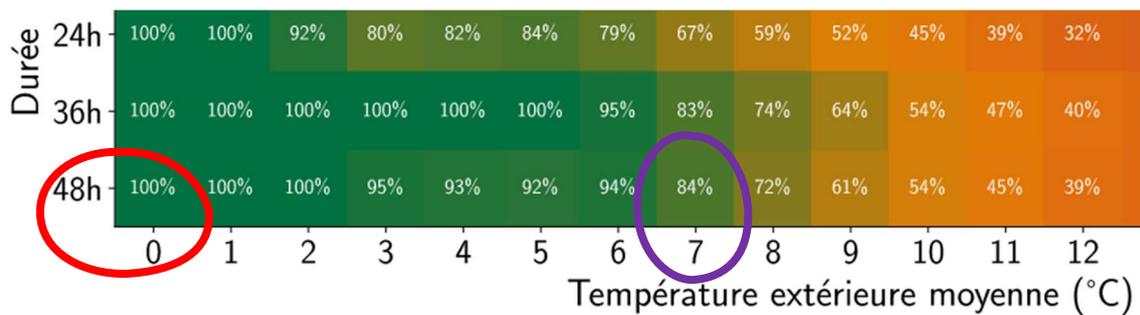


FIGURE 60: EXEMPLE DES RESULTATS MONTRES DANS LES PARTIES SUIVANTES

CAS D'ETUDE : IMMEUBLE « MONTREAL » ET IMMEUBLE « FEYZIN »

Deux immeubles de logements collectifs ont été modélisés pour les besoins des expérimentations numériques.

Le premier, le bâtiment dit « Feyzin », Figure 61, a été construit en 1978 et a subi une rénovation en 2012. Il est modélisé en version rénovée. Dans le modèle, l'un des 3 logements en étage supérieur sert aux expérimentations numériques. Il a 49% de mitoyenneté, dont 3 voisins et un palier commun. Sa surface habitable est de 62,7 m². Son H_{tr} de référence est de 72,5 W/K, soit un U_{bât} de 0,68 W/K/m².



FIGURE 61: IMMEUBLE DE LOGEMENTS COLLECTIFS DIT FEYZIN

Le deuxième, la barre de logements dite « Montreal », a été construite en 1964 et rénovée il y a moins de 5 ans. Elle est également modélisée en version rénovée. Le logement Ouest, traversant, au dernier étage sert à l'expérimentation

numérique. Il a un taux de mitoyenneté de 44% dont 2 voisins et une cage d'escalier. Pour une surface habitable de 63,4 m², il a un H_{tr} de référence de 80 W/K soit un U_{bât} de 0,64 W/K/m². Il présente une proportion moindre de ponts thermiques que le modèle Feyzin.



FIGURE 62: VUE DE LA BARRE DE LOGEMENTS COLLECTIFS DITE MONTREAU (SOURCE: GOOGLE MAPS)

METHODE INDIRECTE

Comme évoqué précédemment, la méthode indirecte a l'avantage de ne pas surcharger le kit Sereine de capteurs de flux mais nécessite de poser des capteurs dans les pièces et zones immédiatement adjacentes à l'appartement qui est testé.

En méthode indirecte, sans fluxmètres, il est primordial de minimiser au mieux les flux de chaleur au travers des parois mitoyennes et ainsi optimiser le rapport de flux entre parois mitoyennes et parois extérieures. Les 3 protocoles envisagés ont été étudiés par les expérimentations numériques, dont les résultats sont montrés ici.

Bâtiments raisonnablement performants

A titre indicatif, les niveaux de U_{bat} utilisés pour ces 2 cas d'études ont été comparés à l'échelle issu du Diagnostic de Performance énergétique (DPE), indiquant un niveau « bon » à « moyen ».

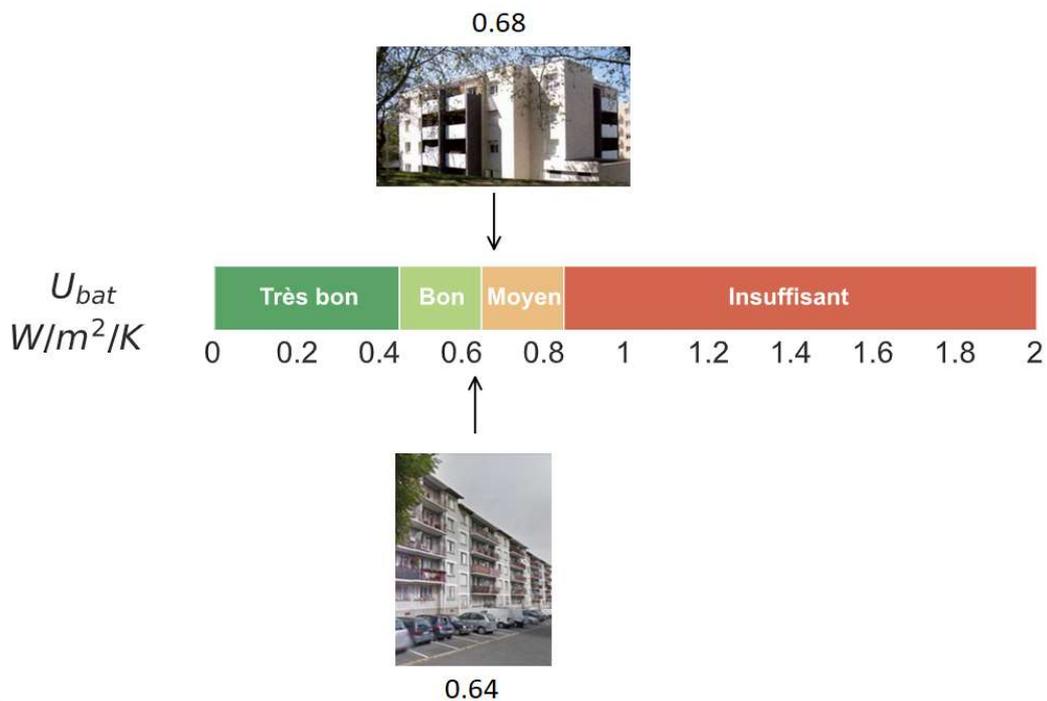


FIGURE 63: POSITIONNEMENT DU NIVEAU D'ISOLATION POUR LES CAS D'ETUDES NUMERIQUES « RAISONNABLEMENT PERFORMANTS »

Protocole « voisins présents »

Pour rappel, le protocole « voisins présents » (noté ici « 1 ») considère que les voisins occupent leur logement de manière habituelle. On observera sans doute des températures de consigne variables et *a priori* différente de la température mesurée dans le logement qui fait l'objet d'une mesure Sereine. Cela induit une différence de température qui provoque un flux mitoyen qui amène de l'incertitude sur la mesure de H_{tot} du logement testé.

Des 2 protocoles, celui-ci est celui qui montre les résultats les plus médiocres. Dans la configuration Feyzin, Figure 64, il semble possible de faire la mesure avec suffisamment de précision jusqu'à une température extérieure moyenne de 10°C (presqu'en mi-saison) et même sur une durée courte de 12h. Notons un net recul du taux de réussite pour une durée d'essai de 24h, en 2^e ligne.

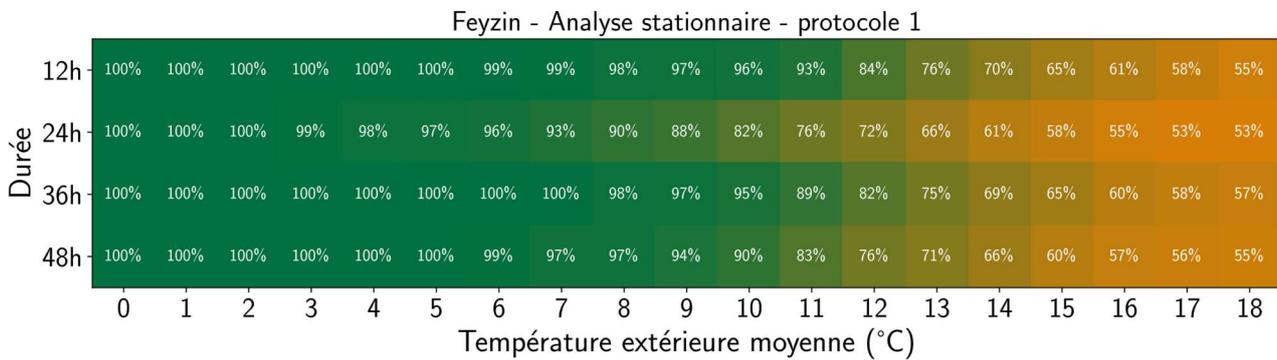


FIGURE 64 : ESSAIS DU PROTOCOLE 1 SUR FEYZIN (METHODE INDIRECTE)

Quant à la configuration Montreau, elle montre des résultats bien plus mitigés. La mesure semble devoir durer plus longtemps et n'être possible qu'en hiver jusqu'à environ 5°C de moyenne en extérieur.

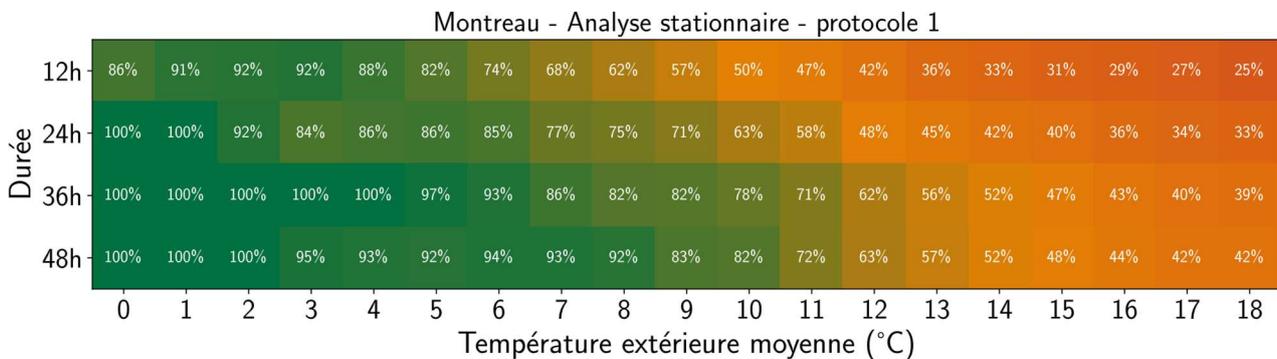


FIGURE 65 : ESSAIS DU PROTOCOLE 1 SUR MONTREAU (METHODE INDIRECTE)

Protocole « voisins absents »

Le protocole « voisins absents » (noté ici « 3 ») s'applique si l'ensemble des logements mitoyens sont inoccupés. Les températures de ces zones mitoyennes sont donc contrôlées pour être égales à la température en zone test et 15°C au-dessus de la température moyenne attendue en extérieur.

En configuration Feyzin, Figure 66, le protocole 3 ou « voisins absents » montre, comme prévu en théorie, des résultats bien plus précis et facilement exploitables jusqu'en mi-saison incluse.

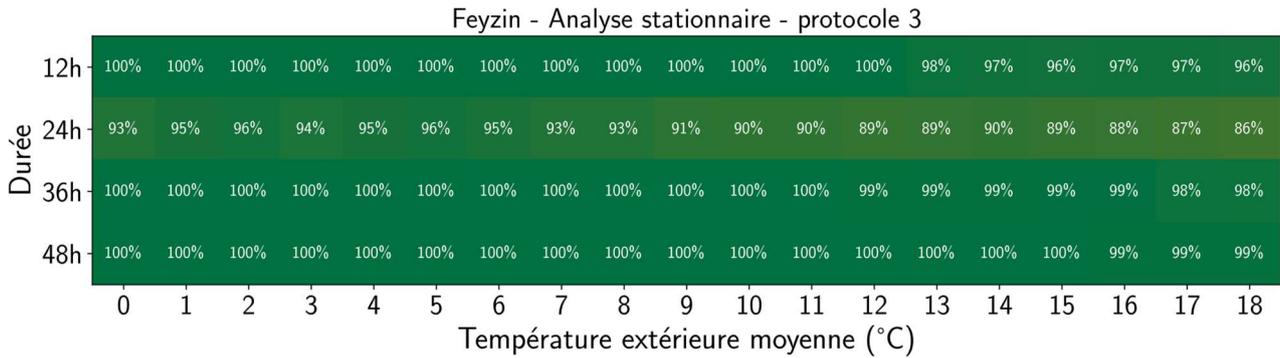


FIGURE 66 : ESSAIS DU PROTOCOLE 3 SUR FEYZIN (METHODE INDIRECTE)

Quant au cas Montreau, les résultats en Figure 67 semblent montrer des résultats bien plus mitigés, mais dont la disparité s'explique en fait par une différence dans le paramétrage de la consigne de température cible. De fait, les différences de température entre les zones chauffées et l'extérieur ont souvent été en deçà de la différence cible de 15°C, d'où une performance moindre. Cela souligne d'autant mieux l'importance de favoriser une différence de température importante entre l'intérieur et l'extérieur pour minimiser l'influence sur l'estimation et sur l'incertitude des flux mitoyens.

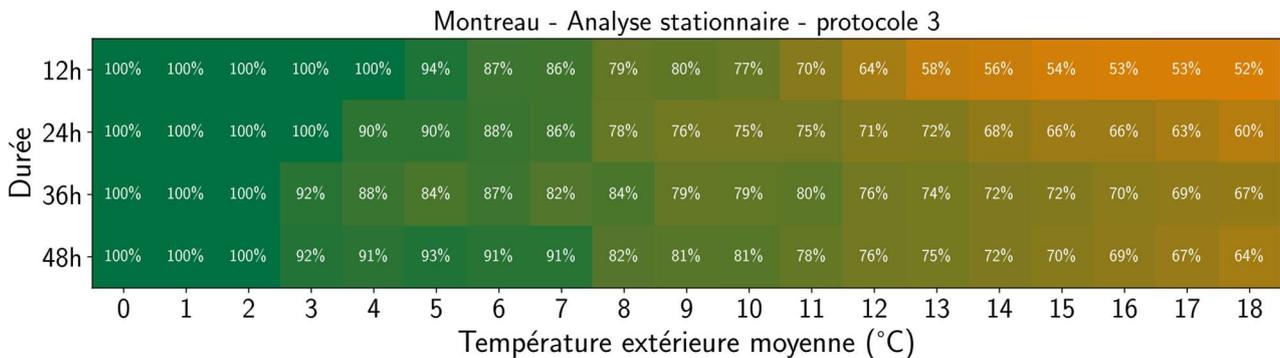


FIGURE 67 : ESSAIS DU PROTOCOLE 3 SUR MONTREAU (METHODE INDIRECTE)

Bâtiments très haute performance

L'expérience cumulée au travers du projet Sereine I a permis de mettre en lumière la difficulté accrue en maison individuelle d'obtenir une estimation fiable en peu de temps du Hr.

Dans l'idée d'évaluer l'influence de la très haute performance de l'enveloppe sur une mesure en logement collectif, cette section montre les résultats de l'approche indirecte en protocole 3 (le plus favorable) en configuration Montreau.

Le Ubat utilisé est de 0.36 W/(m².K) correspondant à un niveau d'isolation « très bon » sur l'échelle DPE (voir Figure 68)



FIGURE 68 : POSITIONNEMENT DU NIVEAU D'ISOLATION POUR LE CAS D'ETUDE NUMERIQUES « HAUTE PERFORMANCE »

A titre de comparaison, les niveaux de U_{bat} visés dans les projets de construction de maisons individuelles RT 2012 en France sont situés pour la majorité entre 0.24 et 0.4 $W/(m^2-K)$ (intervalle à 95% des valeurs de U_{bat} calculées sur un échantillon de 150 536 maisons individuelles RT 2012 construites entre 2016 et 2019).⁵

La Figure 69 montre des résultats en effet plutôt mitigés. Le protocole 3 ou « voisins absents » ne semble possible qu'en plein hiver, si les températures extérieures sont inférieures à 2 ou 3°C, ce qui laisse très peu de marge de manœuvre opérationnelle.

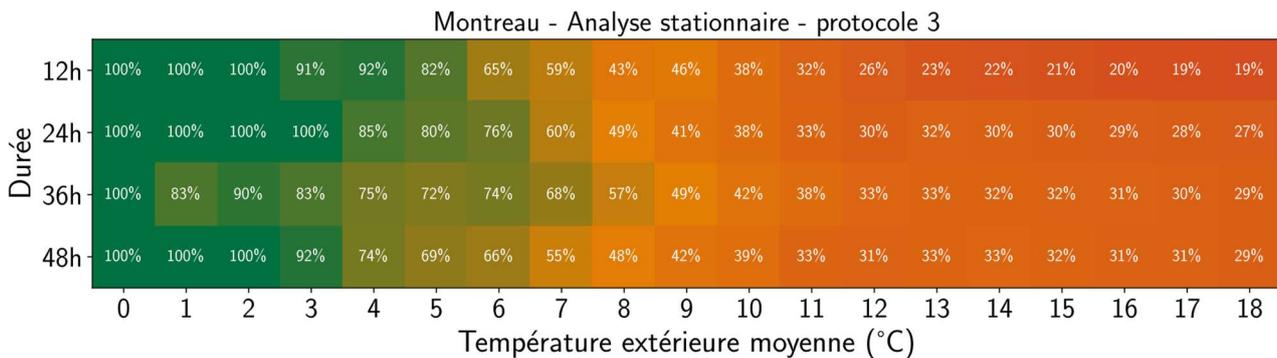


FIGURE 69 : ESSAIS DU PROTOCOLE 3 SUR MONTREAL VERSION HAUTE PERFORMANCE (METHODE INDIRECTE)

Les taux de réussite de la mesure de H_{tr} en protocole 1 ou « voisins présents » ne sont pas montrés ici mais sont clairement en-deçà encore du protocole « voisins absents ». Ces résultats étaient attendus, car si l'enveloppe est très performante, la

⁵ Source : ADEME, "Mesure de la performance énergétique des bâtiments. Programme DIANE : Déploiement national de mesure in situ des performances énergétiques des bâtiments – Rapport final," 2022.

part relative des flux mitoyens sur le bilan d'échange d'énergie global de l'appartement testé explose. Ainsi, l'estimation de H_{tr} devient très incertaine et très influencée par les conditions extérieures.

Conclusion partielle de la méthode indirecte

La section 3.0/ a montré et analysé les résultats des essais numériques de l'approche dite indirecte d'une mesure Sereine en logement collectif. L'approche indirecte a pour avantage de ne pas avoir besoin de matériel supplémentaire au kit Sereine existant. Néanmoins, cette approche nécessite de minimiser au plus les flux de chaleur transitant dans les parois mitoyennes, ce qui s'est vu dans l'évaluation des 3 protocoles étudiés.

En résumé, comme indiqué dans le Figure 70, les résultats montrent que la méthode indirecte proposée peut être appliquée quel que soit le protocole en hiver, sur des bâtiments moyennement isolés. Les protocoles 2 et 3, plus intrusifs, permettent néanmoins d'allonger la saison durant laquelle le test est faisable. En revanche, un bâtiment très performant ne peut être mesuré qu'en conditions hivernales rudes et en protocole 3, ce qui rend ce niveau de performance opérationnellement difficilement mesurable.

FIGURE 70: RECAPITULATIF DU DOMAINE DE VALIDITE DE L'APPROCHE INDIRECTE

Protocole 1 « voisins présents »	Protocole 2 « voisins contraints »	Protocole 3 « voisins absents »
Hiver ✓ Mi-saison ✗	Hiver ✓ Mi-saison ✗	Hiver ✓ Mi-saison ✓
Bâtiment initial ✓ Bâtiment très performant ✗	Bâtiment initial ✓ Bâtiment très performant ✗	Bâtiment initial ✓ Bâtiment très performant ✓✗

Les limites montrées par les essais numériques sont principalement liées aux incertitudes amenées par les flux mitoyens, qui exercent une influence forte du fait de devoir estimer une valeur de U_{paroi} de chacune des parois mitoyennes, en plus des incertitudes amenées par les mesures de température. Mesurer directement ces flux sur chaque paroi pourrait changer fondamentalement le domaine d'application de la mesure Sereine du H_{tr} . C'est l'objet de la section 3.0/ *Méthode directe : pertinence d'intégrer des fluxmètres dans la chaîne.*

METHODE DIRECTE : PERTINENCE D'INTEGRER DES FLUXMETRES DANS LA CHAINE

Hypothèses prises sur l'incertitude finale d'une mesure directe des flux mitoyens

La mesure directe des flux mitoyens assure en théorie une estimation directe des flux de chaleur entrants ou sortants par les parois mitoyennes et entre directement dans le bilan d'énergie permettant le calcul du H_{tr} . Il est évident que si la mesure de flux mitoyens ne présentait aucune incertitude, le calcul du H_{tr} est immédiat et ne subit les incertitudes résiduelles que des mesures des autres grandeurs.

Dans la réalité, cette mesure est soumise à plusieurs types d'incertitudes :

- Aléatoire, liée au capteur ;
- systématique, liée au capteur, à la chaîne d'acquisition, etc ;
- erreur liée à la variabilité spatiale du flux (notamment pour les parois hétérogènes)

Aujourd'hui, les mesures sur site ne sont pas suffisamment nombreuses pour pouvoir donner des ordres de grandeur définitifs du cumulé de ces incertitudes. Des travaux antérieurs permettent néanmoins de définir une fourchette de $\pm 0,5 - 5 \text{ W/m}^2$ à prendre comme hypothèse dans le travail d'analyse des essais numériques.

Ainsi, cette partie des expérimentations numériques évalue trois scénarios d'incertitudes cumulées : optimiste à $\pm 0,5 \text{ W/m}^2$, médiane à $\pm 2,5 \text{ W/m}^2$ et pessimiste à $\pm 5,0 \text{ W/m}^2$. Ces 3 scénarios permettront d'évaluer à grosses mailles la faisabilité et viabilité d'une mesure directe avec fluxmètres. Ils seront à comparer aux mesures fluxmétriques sur site prévues par la suite dans le projet.

Montreal ITI Haute performance : entre dans le domaine de validité

La partie précédente a montré que la mesure indirecte de bâtiments haute performance semblait ne fonctionner que dans des cas restreints. Les expérimentations numériques de la méthode directe avec fluxmètres sont donc d'abord appliquées au cas d'étude Montreal en version très performant. Les 3 scénarios d'incertitudes cumulées sont modélisés.

Sans surprise, le scénario optimiste, Figure 71, permet sans difficulté une mesure en hiver, voire un début de mi-saison, dans Montreal version très performant.

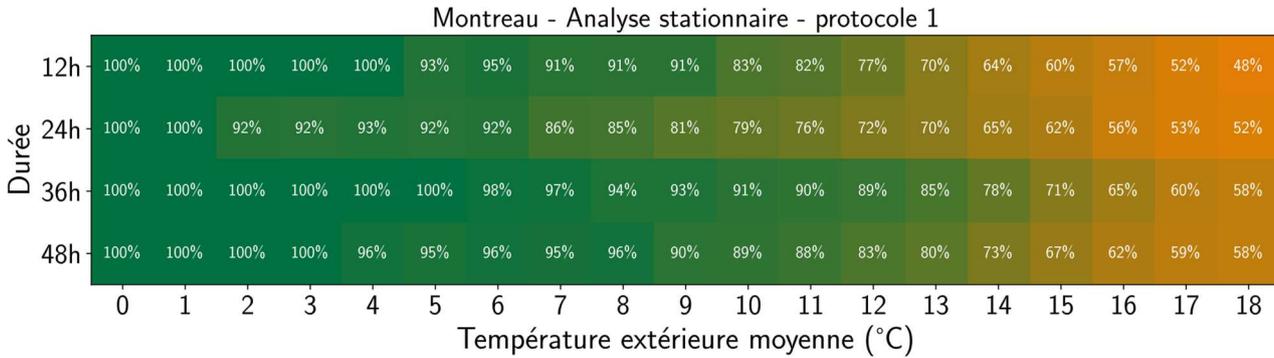


FIGURE 71 : METHODE FLUXMETRIQUE SUR MONTREAL TRES PERFORMANT – HYPOTHESE INCERTITUDES OPTIMISTE

L'application du scénario médian, Figure 72, révèle cependant qu'une mesure fluxmétrique peut donner des résultats acceptables en hiver. Des essais plus poussés devront être réalisés pour affiner la durée préférentielle de ce type d'essais.

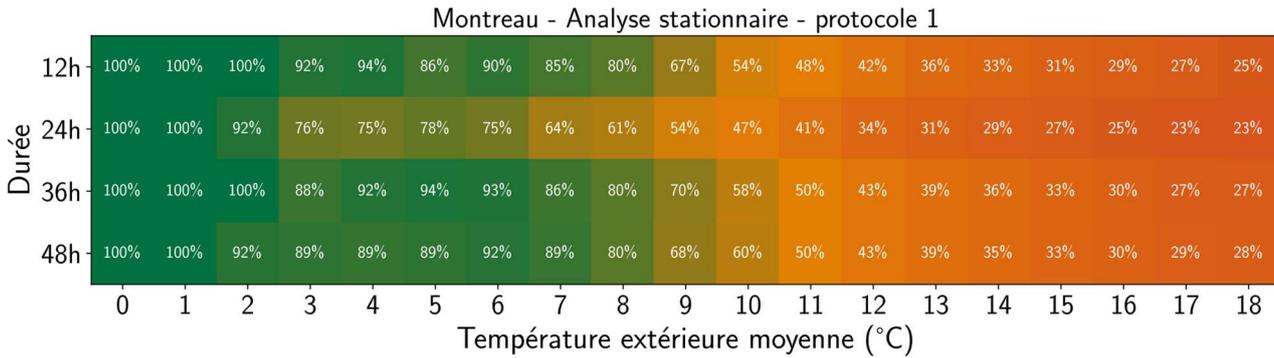


FIGURE 72 : METHODE FLUXMETRIQUE SUR MONTREAL TRES PERFORMANT - HYPOTHESE INCERTITUDES MEDIANE

Quant au scénario pessimiste, Figure 73, il montre que de trop fortes incertitudes cumulées rendant la méthode fluxmétrique inapplicable.

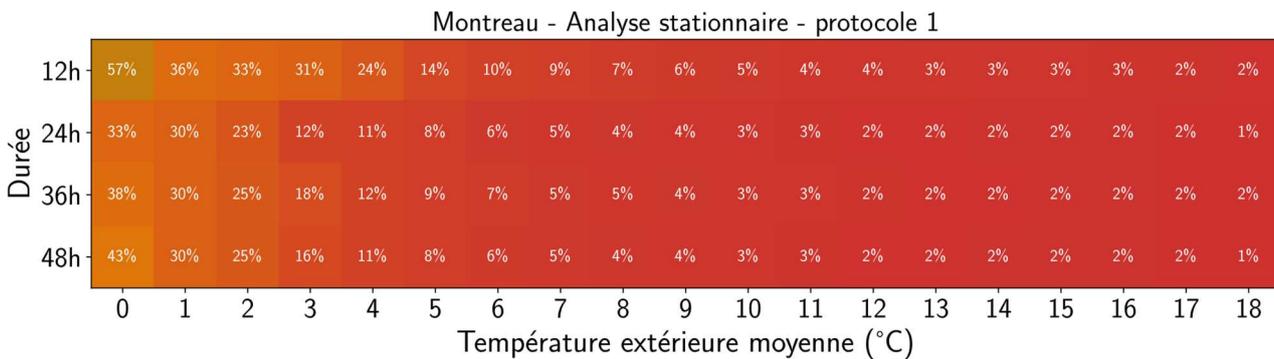


FIGURE 73 : METHODE FLUXMETRIQUE SUR MONTREAL TRES PERFORMANT - HYPOTHESE INCERTITUDES PESSIMISTE

Ainsi, dans le cas où des mesures terrains révéleraient que la variabilité spatiale cumulée aux incertitudes aléatoires et systématiques serait importante, à pondérer certainement à la typologie, une mesure fluxmétrique en logement très performant serait à exclure.

Si au contraire les essais terrain montrent qu'on s'oriente vers le scénario médian voire optimiste, alors la mesure directe sera envisageable.

En conclusion, on peut penser, moyennant un scénario médian ou optimiste, que la mesure directe fluxmétrique ouvre le domaine de validité de la méthode Sereine aux logements à haute performance.

Montreal ITI Performance moyenne : mi-saison plus fiable

Revenant au cas Montreal initial de performance moyenne, l'approche indirecte sans fluxmètre montrait des résultats probants en hiver. L'ajout de fluxmètres dans le protocole d'instrumentation permet cependant d'ajouter de l'information et pourrait allonger le domaine de validité de la méthode Sereine à la mi-saison. Deux scénarios sont évalués : le médian et le pessimiste.

Le scénario médian, Figure 74, montre un plus grand nombre d'essais réussis en mi-saison, comparé aux résultats en méthode indirecte.

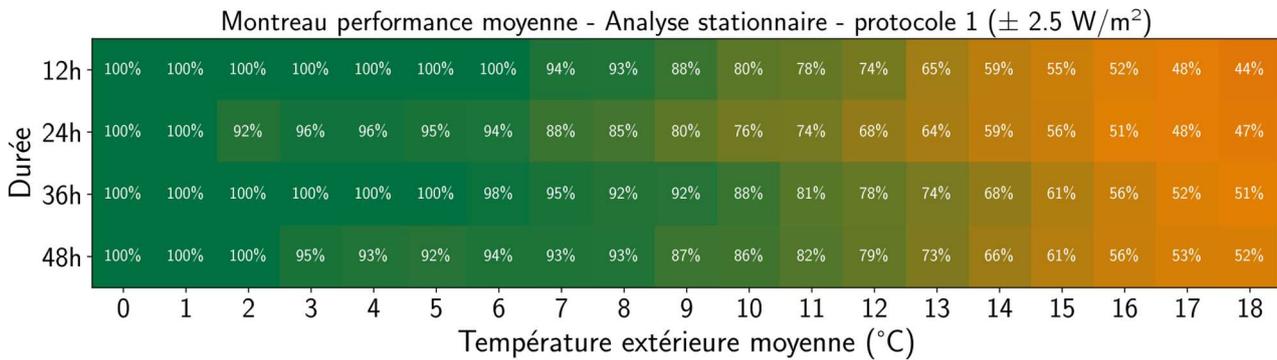


FIGURE 74: METHODE FLUXMETRIQUE SUR MONTREAL INITIAL - HYPOTHESE INCERTITUDES MEDIANE

Le scénario pessimiste, Figure 75, est quant à lui intéressant aussi, car le plein hiver reste faisable. Cela laisse présager que des logements dont les parois mitoyennes sont relativement hétérogènes dans la répartition de leur flux pourraient encore être mesurées par la méthode Sereine, si tant est que la mesure se fait en hiver.

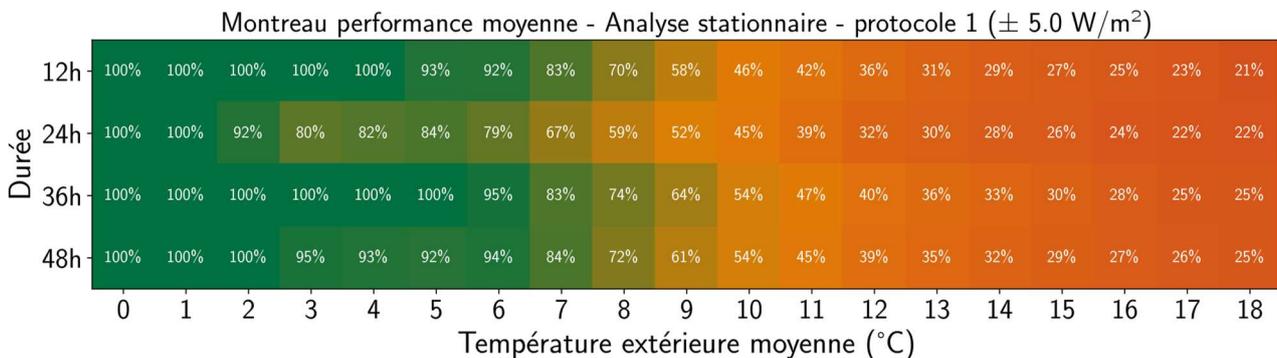


FIGURE 75 : METHODE FLUXMETRIQUE SUR MONTREAL INITIAL - HYPOTHESE INCERTITUDES PESSIMISTE

Conclusion partielle : apport d'une mesure fluxmétrique directe

La partie 3.0/ a étudié la pertinence d'intégrer des données de mesures par des fluxmètres des flux mitoyens dans l'analyse pour le calcul du H_{tr} . Cette étude a évalué 3 scénarios en fonction de l'incertitude globale que peuvent présenter des mesures de flux réelles.

Deux éléments sont à retenir :

- Si les incertitudes cumulées s'approchent de l'hypothèse pessimiste de 5 W/K/m^2 , alors la mesure directe des flux mitoyens par des fluxmètres n'aura pas d'intérêt. Ces incertitudes propagées sur celle du H_{tr} surpassent en effet les hypothèses prises en calcul indirect ;
- Si au contraire les incertitudes s'approchent du scénario médian ou optimiste, alors le domaine de validité semble allongé en durée et élargi aux bâtiments à très haute performance.

Ici, dans un premier temps, seul la configuration Montreau a servi à l'évaluation de la pertinence de l'ajout de fluxmètres. Il sera nécessaire de compléter ces évaluations par des essais numériques dans d'autres cas de figure pour affiner les limites du domaine d'application.

Ces résultats appellent néanmoins à des expérimentations sur site pour situer un logement à tester sur l'un ou l'autre des scénarios, choix qui peut varier en fonction de la typologie.

ANNEXE E. RETOUR D'EXPERIENCE SUR L'EVALUATION EXPERIMENTALE DE L'INCERTITUDE DE MESURE DES FLUX MITOYENS

Dans l'Annexe D, il a été montré l'importance de l'impact de l'incertitude des flux de chaleur mitoyens mesurés sur le résultat de mesure. Notamment :

- Si « assez optimiste » à $\pm 2,5 \text{ W/m}^2$, l'identifiabilité de la mesure appartement pouvait être garantie dans les conditions & protocoles préconisés dans ce livrable
- Si « optimiste » à $\pm 0,5 \text{ W/m}^2$, l'identifiabilité de la mesure appartement pouvait être garantie sur un plus grand nombre de configuration
- Si « pessimiste » à $\pm 5,0 \text{ W/m}^2$, l'identifiabilité de la mesure appartement dans les conditions & protocoles préconisés dans ce livrable ne peuvent être garanties

Pour savoir quelle gamme d'incertitude attribuer selon les conditions de mesure (et éviter la configuration « pessimiste »), un grand nombre d'essais in situ ont été réalisés sur de multiples typologies de murs mitoyens (Juricic et Al., 2024).

Dans un premier temps, des essais à échelle réduite ont été réalisés pour identifier les sources d'incertitude principales (capteur, acquisition, méthode de pose, dispersion spatiale du flux)

ETUDE PRELIMINAIRE A ECHELLE REDUITE

Les mesures ont été réalisées sur une enceinte chauffée constituée de panneaux en OSB sauf la face avant amovible qui est en MDF peint sur la face intérieure (voir Figure 76).

A l'arrière de l'enceinte une cheminée accueillait un élément chauffant à puissance contrôlée et un ventilateur dirige le flux d'air vers le bas afin d'homogénéiser au mieux la température.

Les températures d'air ont été contrôlées via 4 sondes placées en périphérie de la zone de mesure du flux à 10cm de la surface.

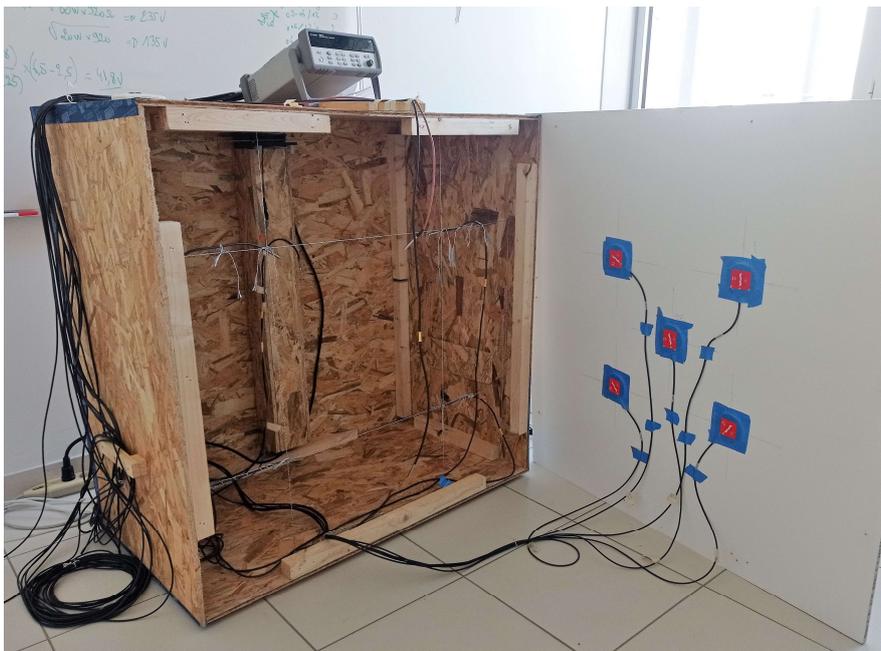


FIGURE 76 : CAPTEURS MIS EN ŒUVRE DANS LE CAISSON CHAUFFE, LA FACE AVANT EST OUVERTE POUR LA MISE EN PLACE

Le contrôle de l'enceinte, c'est-à-dire sa mise en température, est réalisée à puissance constante (max 60W) afin d'obtenir un flux surfacique constant à travers les parois.

Les mesures sont repérées pour réaliser toutes les combinaisons de capteur, d'emplacement, de méthode de pose et de niveau de flux (élevé $\sim 12 \text{ W/m}^2$ et faible $\sim 4 \text{ W/m}^2$). Une analyse a été faite sur :

- Le bruit (aléatoire) sur ces périodes de 1h
- Le biais (systématique) sur les moyennes de chaque période

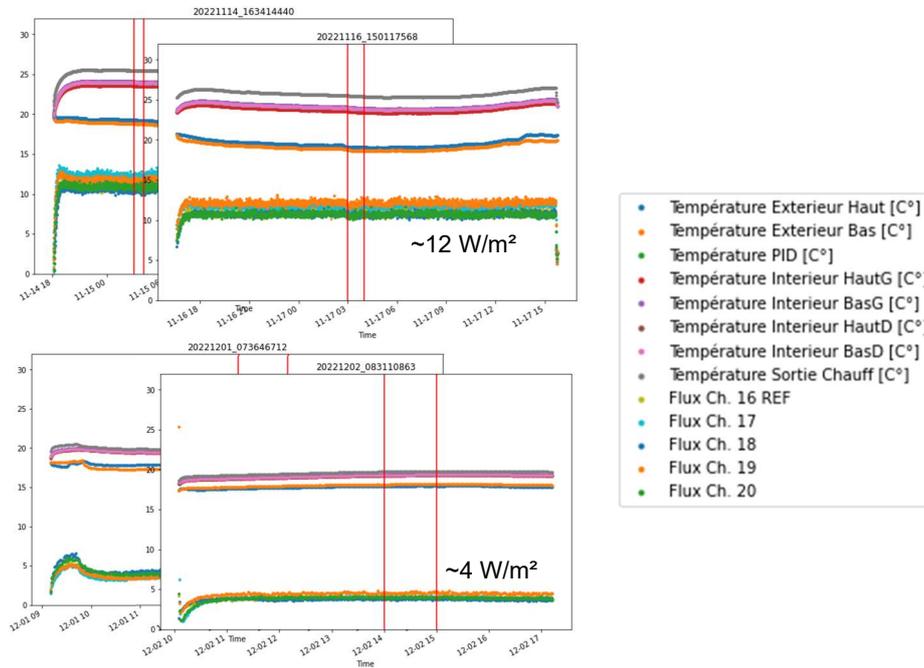


FIGURE 77 : EXEMPLES DE RELEVÉS DE TEMPERATURE ET DE FLUX

Sur chacune de ces périodes de 1h un signal constant mais bruité est présent. Ce bruit est aléatoire autour de la valeur moyenne du signal considéré. Il correspond à la variabilité aléatoire présente sur la chaîne d'acquisition. L'études de ces valeurs ne montre pas d'influence notable liée au capteur à la localisation ou la méthode de pose. En revanche, le niveau de flux à un effet clairement visible, présenté en Figure 78 gauche, qui augmente avec le niveau de flux thermique et produit ainsi une dispersion plus large des mesures. Cette dispersion calculée sur un intervalle de confiance de $\sim 95\%$ ($K=2$) est de l'ordre de $\pm 0.47 \text{ W/m}^2$ pour le flux élevé et des $\pm 0.19 \text{ W/m}^2$ pour le flux faible. On remarque que ces valeurs sont proportionnelles au niveau de flux mesuré. La Figure 78 droite montre les mêmes écarts mais calculées en pourcent relativement aux flux de chaque essai. Les dispersions résultantes sont alors très proches quel que soit le flux avec une moyenne mesurée de $\pm 4,5\%$ ($K=2$). La fiche technique des capteurs donne une valeur constructrice de $\pm 3,0\%$ ($K=2$) pour le capteur seul. La valeur obtenue comprend toute la chaîne d'acquisition et est donc correcte.

Le flux mesuré est donc influencé par un bruit proportionnel au flux de l'ordre de $\pm 4,5\%$ ($K=2$) et n'est pas influencé par les autres paramètres du plan d'expérience. Pour se convaincre de ce dernier point la Figure 79 montre les mêmes écarts enregistrés, mais catégorisé cette fois en fonction du type de fixation. Les deux courbes se superposent et donnent donc les mêmes valeurs.

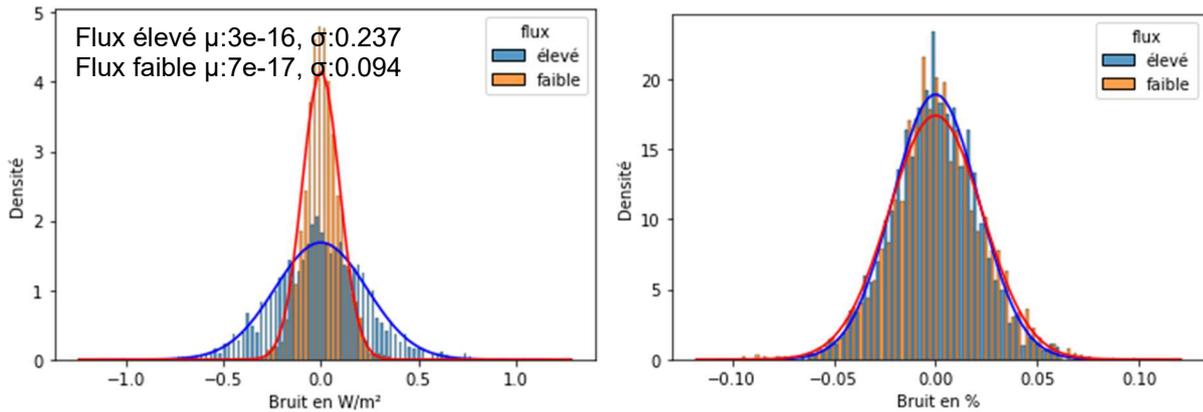


FIGURE 78 : DISPERSION AUTOUR DE LA MOYENNE EN FONCTION DU NIVEAU DE FLUX (GAUCHE EN W/m², DROITE EN % DU FLUX)

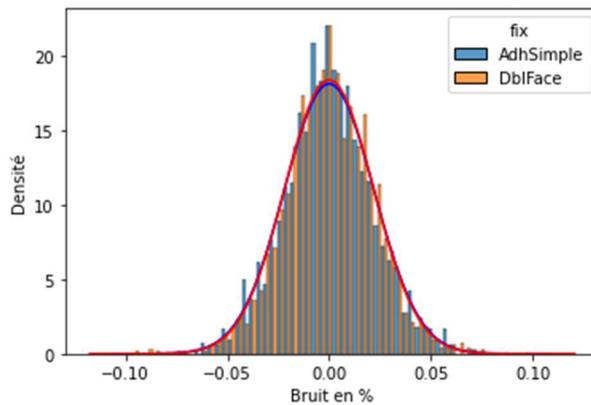


FIGURE 79 : DISPERSION AUTOUR DE LA MOYENNE EN FONCTION DU TYPE DE FIXATION, EN % DU FLUX

Dans une seconde analyse relative au biais de mesure, les valeurs de flux de chacune des périodes de 1h sont moyennées. Ces valeurs absolues de flux mesurées dépendent de la résistance thermique et de l'écart de température, la comparaison entre les deux permet de caractériser les capteurs ou la paroi. Cependant, les capteurs sont étalonnés en usine et la conductivité de la paroi ne nous importe pas. L'objectif de l'étude est d'évaluer les écarts constatés en fonction de la pose pour différentes localisations et capteurs. Ainsi, les données analysées pour chacun des essais sont les biais entre les valeurs des quatre capteurs et à la valeur du capteur de référence. Pour rappel, ce capteur de référence est resté fixé à la position centrale durant toute la période d'expérimentation et sert ainsi de base commune entre les différentes périodes d'essai.

La Figure 80 présente donc ces biais pour chaque capteur à chacune des positions. Le facteur influant le plus significatif est la position sur la paroi, de $-0,3$ à $+1$ W/m², avec un flux plus important sur les localisations basses. Cet écart n'est pas relié à d'autres paramètres tels que la température intérieur ou l'écart avec l'extérieur ou l'inhomogénéité de la température dans l'enceinte (les capteurs de températures qui encadrent les fluxmètres à 10cm de la face intérieure présentent des écarts faibles entre capteurs de $\pm 0,2^\circ\text{C}$). Ces écarts sont certainement dus au brassage de l'air en bas de la cheminée qui augmente les phénomènes convectifs et dans une moindre mesure aux aspérités locales de la position considérée.

Bien que l'ambiance soit contrôlée la localisation des capteurs est donc un paramètre important qui devra être étudié lors de la mise en œuvre sur une parois réelle. Pour poursuivre l'analyse, une correction est donc apportée en fonction de la localisation, cela permet de s'affranchir de ce paramètre et de pouvoir analyser la variabilité restante pour l'attribuer autres paramètres.

Remarque : La dérive du zéro de la chaîne (ISO 8301:1991 §2.5.3.1.1) a été testé *a posteriori* en inversant la polarité des capteurs via des pontages vers d'autres entrées d'acquisition. Une analyse est alors réalisée pour comparer la valeur normale et la valeur ayant une polarité inversée, la somme des deux doit être de zéro. En pratique, l'écart médian mesuré est de $0.7\mu\text{V}$ (soit $0,01$ W/m²) avec un intervalle de confiance à 95% de $\pm 0.08\mu\text{V}$ (soit $0,6$ mW/m²). Ces valeurs sont négligeables.

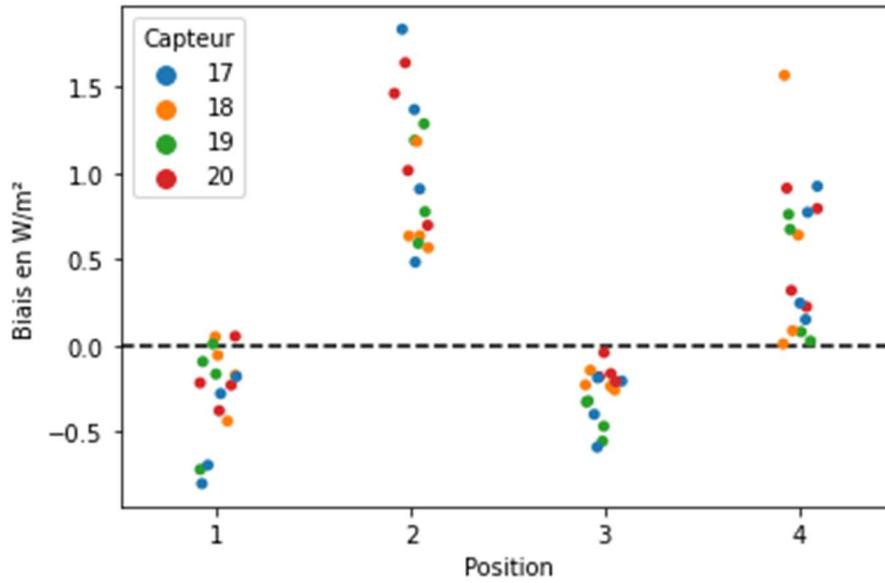


FIGURE 80 : BIAIS PAR RAPPORT AU CAPTEUR DE REFERENCE EN FONCTION DE LA LOCALISATION SUR LA PAROI

Après correction de la position, les écarts de biais entre capteurs sont, dans ~95% des cas ($K=2$), limités dans une bande $\pm 0.63 \text{ W/m}^2$. La Figure 81 ne montre aucun effet significatif du au niveau de flux ou à la méthode de fixation. L'élément le plus influant reste donc le facteur humain, c'est-à-dire la pose du capteur qui répétée dans 64 combinaisons produit des écarts.

Finalement, on peut noter par ordre d'influence les facteurs suivants :

1. **Position**
2. Facteur humain (pose)
3. Niveau de flux
4. Type de fixation

Les deux derniers peuvent être considéré comme peu significatif car du même ordre de grandeur que la variabilité due au bruit ($\pm 0,5 \text{ W/m}^2$).

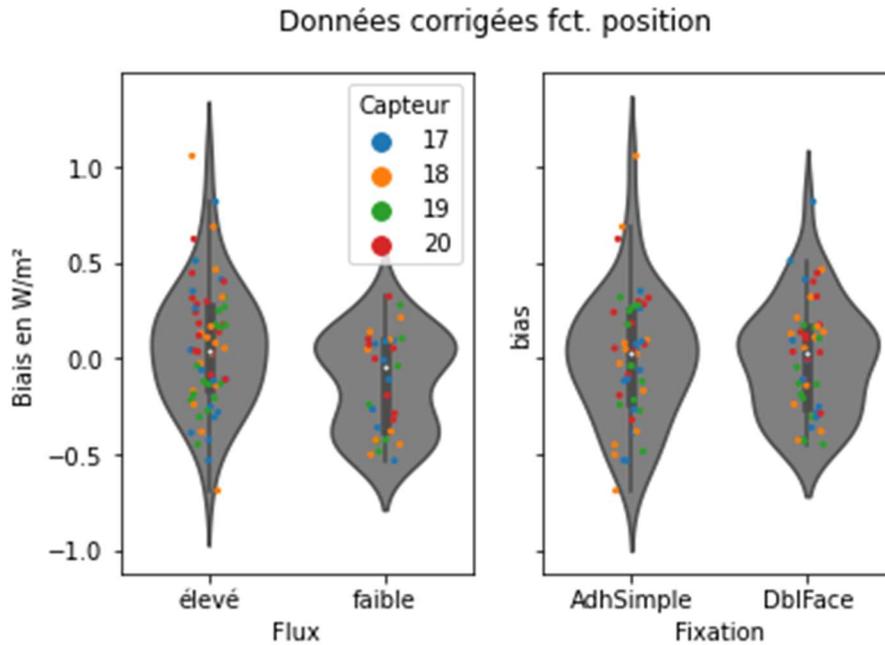


FIGURE 81 : BIAIS RESIDUELS APRES CORRECTION EN FONCTION DU NIVEAU DE FLUX OU DU TYPE DE FIXATION

En conclusion, les deux méthodes de pose, double face et adhésif de peintre, donnent des résultats très similaires. L'adhésif double face rajoute une interface mais permet une meilleure fixation, associé à la surface rigide du capteur, il demande plus d'efforts pour être décollé de la paroi. L'adhésif de peintre doit, pour sa part, être placé de façon plus méthodique, car il aura plus de risque de se décoller légèrement créant une fine lame d'air entre la surface et le capteur, il est cependant plus doux pour la surface.

Les résultats montrent que **la dispersion spatiale est la plus influente** même dans des conditions contrôlées.

ETUDES PAR SURINSTRUMENTATION DE PAROIS REELLES

Le tableau ci-dessous détaille les conditions expérimentales de 49 cas tests permettant d'évaluer la dispersion des flux de chaleurs mitoyens pour différents types de parois lors d'une mesure SEREINE à l'échelle d'un appartement. Ces cas d'études ont été réalisés à la fois sur le terrain lors des mesures en logement collectif, mais également dans des environnements contrôlés (bureaux, maison).

Une partie de cette étude a fait l'objet d'un article de conférence (Juricic et al., 2024) qui peut être consulté pour plus de détails.

Cas test	Nb fluxmètres	DeltaT	Deltafluxmax	Dispersion globale	Typologie	Observation
1	4	-2 à 1	0 à 1 W/m ²	Optimiste	Mur vertical/Béton	
2	2-3	1 à 2	0 à 1 W/m ²	Optimiste	Mur vertical/brique	
3	5	inconnu (voisin présent)	0 à 1 W/m ²	Optimiste	Mur vertical/brique	
4	5	<1	0 à 0.5 W/m ²	Optimiste	Mur verticale / Cloison brique	
5	11	~2	0 à 0,8 W/m ²	Optimiste	Plancher bois intermédiaire, mesures par le dessus	légère décroissance de l'écart de température entre le combles et les chambres, flux inférieurs à 2W/m ²
6	11	0.3 à 1.2°C	0 à 0.4 W/m ² globalement avec max 0.7	Optimiste	Plancher bois intermédiaire, mesures par le dessus	
7	11	+/- 1°C	0 à 0.8 W/m ²	Optimiste	Plancher bois intermédiaire, mesures par le dessus	Température globalement homogène dans la maison (faible deltaT et faible flux entre les parois internes)
8	11	2 à 3	0 à 1.5 W/m ²	Optimiste	Plancher bois intermédiaire, mesures par le dessus	Écart de température entre les combles et les chambres avec une température globalement homogène
9	2	2 à 3	0 à 2 W/m ²	Optimiste	Paroi béton sans isolation	
10	2	-0.2 à 0.5	0 à 1.5 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Cloison légère de bureau avec cadre	
11	3	-0.6 à 0.6	0 à 2 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Cadre + porte + verre	
12	2	-0.2 à 0.2	0 à 2 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Placo + ossature (placement au hazard)	
13	2	-0.4 à 1	0 à 3 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/porte + mur	conditions limites en température différentes selon les fluxmètres
14	2	-1 à 5	0 à 2 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Parpaing	Température voisine assez fluctuante

Cas test	Nb fluxmètres	DeltaT	Deltafluxmax	Dispersion globale	Typologie	Observation
15	3	inconnu (voisin présent)	0 à 3 W/m ²	Assez optimiste	Plancher Bas/bois	Présence d'un fluxmètre à proximité du convecteur -> défavorable
16	8	inconnu (voisin présent)	0 à 2.5 W/m ²	Assez optimiste	Plancher Bas/bois	Point singulier dans la salle de bain -> pièce du dessous moins chauffée
17	3	<1	0 à 2.5 W/m ²	Assez optimiste	Plancher Haut/Béton	Mitoyen chauffé avec kit
18	5	<1	0 à 2.5 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Béton	Mitoyen chauffé avec kit
19	3	~ 5-10	0 à 1.5 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Béton	Dispersion faible malgré un flux important (~15 W/m ² car pas chauffé)
20	3	<1	0 à 2.5 W/m ²	Assez optimiste	Plancher Bas/Béton	Mitoyen chauffé avec kit, suspicion d'un mauvais placement d'1 fluxmètre au sol (proche brassage air chaud chambre 2)
21	5	<1	0 à 2.5 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Béton	Mitoyen chauffé avec kit
22	4	inconnu (voisin présent)	0 à 3 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Béton	Flux très proches hormis entre celliers
23	4	inconnu (voisin présent)	0 à 3.5 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Béton	Flux très proches hormis vers salle de bains
24	5	inconnu (voisin présent)	0 à 3.5 W/m ²	Assez optimiste	Plancher haut/Béton	
25	6	inconnu (voisin présent)	0 à 2 W/m ²	Assez optimiste	Plancher bas/Béton	
26	5	inconnu (voisin présent)	0 à 3 W/m ²	Assez optimiste	Plancher bas/Béton	
27	10	<1	0 à 1.5 W/m ²	Assez optimiste	Mur vertical/Réfend Pierre	
28	7	Inconnu (capteur disfonctionnel)	0 à 2 W/m ²	Assez optimiste	Plancher/Béton	
29	5	<1	0 à 1.5 W/m ²	Assez optimiste	Mur verticale/ Réfend Pierre	
30	3	<1	0 à 2 W/m ²	Assez optimiste	Plancher bas/poutrelles-hourdis béton + plancher chauffant	Dalle assez homogène, 4e fluxmètre en défaut

Cas test	Nb fluxmètres	DeltaT	Deltafluxmax	Dispersion globale	Typologie	Observation
31	11	-1 à -4 °C	0 à 2.5 W/m ²	Assez optimiste	Plancher bois intermédiaire, mesures par le dessus	Température globalement homogène entre les chambres, pics de températures en journée
32	11	+1 à -4°C	0 à 3 W/m ²	Assez optimiste	Plancher bois intermédiaire, mesures par le dessus	Impact du rayonnement solaire dans les chambres 2 et 3, mais la température oscille autour de la température des combles et reste relativement stable
33	4	inconnu (voisin présent)	0 à 2.5 W/m ²	Assez optimiste	Plancher béton intermédiaire, mesures par le dessus	
34	4	inconnu (voisin présent)	0 à 5 W/m ²	Assez optimiste	Paroi béton sans isolation	
35	3	inconnu (voisin présent)	0 à 3 W/m ²	Assez optimiste	Paroi béton sans isolation	
36	6	inconnu (voisin présent)	0 à 6 W/m ²	Assez optimiste (limite)	Plancher béton intermédiaire, mesures par le dessus	Fluctuation importante (trop proche des chauffages). Chauffage des pièces voisines visiblement hétérogène
37	2	0.2 à 0.2	0 à 17W/m ²	Pessimiste	Plancher bas/dalle béton 20 cm + faux plafond	Suspicion d'une erreur de sensibilité d'un des capteurs, passage de réseau & positionnement des convecteurs
38	5	-2 à 3	0 à 5 W/m ²	Pessimiste	Plancher Bas/dalle béton 25cm	Présence de mobilier
39	7	-5 à 2	0 à 5 W/m ²	Pessimiste	Mur vertical/Double mur béton + joint dilatation	Présence d'un tuyau de chauffage + armoire
40	2	-4 à 3	0 à 6 W/m ²	Pessimiste	Mur vertical/Placo+rails	Différence exacerbée par le placement d'un fluxmètre sur le rail
41	2	1 à 10	0 à 20 W/m ²	Pessimiste	Mur vertical/Placo+rails	
42	5	2 à 11	0 à 11 W/m ²	Pessimiste	Plancher Bas/dalle béton 25cm	
43	7	1 à 11	0 à 15 W/m ²	Pessimiste	Mur vertical/Double mur béton + joint dilatation	

Cas test	Nb fluxmètres	DeltaT	Deltafluxmax	Dispersion globale	Typologie	Observation
44	7	inconnu (voisin présent)	0 à 12 W/m ²	Pessimiste	Plancher Haut/bois	Chauffage du voisin visiblement peu chauffé ou chauffage très hétérogène
45	5	inconnu (voisin présent)	0 à 5 W/m ²	Pessimiste	Mur vertical/Béton	Flux très proches hormis entre celliers
46	6	inconnu (voisin présent)	0 à 10 W/m ²	Pessimiste	Mur vertical/Béton	Flux très proches hormis entre celliers
47	4	<1	0 à 6 W/m ²	Pessimiste	Plancher haut/poutrelles-hourdis béton avec et sans doublage plaque plâtre	Régime transitoire (chauffage à 30°C -> stockage dans la dalle) + doublage inhomogène
48	4	inconnu (voisin présent)	0 à 18 W/m ²	Pessimiste	Plancher béton intermédiaire, mesures par le dessous	Réseau d'eau chaude circulant au-dessus du plafond : mesures non concluantes
49	5	inconnu (voisin présent)	0 à 6 W/m ²	Pessimiste	Paroi béton sans isolation	Chaleur importante venant des voisins vers la salle de bains : chauffage

TABLEAU 2 : DETAIL DES PAROIS MITOYENNES INSTRUMENTEES EN CONDITIONS REELLES AVEC ANALYSE DE LA DISPERSION SPATIALES DES FLUX

La conclusion de cette seconde étude conclut qu'un certain nombre de conditions sont nécessaires à l'obtention d'une incertitude « assez optimiste » nécessaire à l'identifiabilité des mesures SEREINE appartement dans les conditions indiquées dans ce livrable. Notamment :

- Limiter au maximum l'écart de température avec les voisins (5 K au maximum)
- Écarter les cloisons trop hétérogènes comme les cloisons légères en plaques de plâtres seules
- Limiter le dynamique thermique (d'où le protocole stationnaire au lieu du scénario PSA)
- Éviter la présence de mobilier important à l'intérieur du logement testé
- Éviter la présence de sources de chaleur chauffant directement le mur mitoyen (convecteurs SEREINE y compris)

En cas de chauffage hétérogène dans les logements mitoyens, il sera également nécessaire de segmenter les parois correspondantes et multiplier les points de mesure.

Tous ces enseignements ont été traduits de manière opérationnelle dans le « *Livrable n° 1.3.a - Protocole global SEREINE pour le logement collectif : Articulation des différentes mesures et vérifications sur l'enveloppe et les systèmes* » de manière à respecter ces conditions de mesure.

Si celles-ci sont respectées, il est alors valide de considérer une incertitude de ± 2.5 W/m² par mur mitoyen, et son impact sur l'incertitude de mesure du U_{bat} de l'appartement.

ANNEXE F. CALCUL ET MISE A JOUR DE L'INDICATEUR GLOBAL

L'indicateur global repose sur une approche bayésienne du calcul du Ubât global de l'enveloppe. L'approche bayésienne permet de traduire de manière effective sous forme de probabilité le degré de croyance en une hypothèse tout en évitant d'émettre des suppositions sur les distributions sous-jacentes dans lesquelles sont tirées chacune des mesures (Box and Tiao 1992). Concrètement, la philosophie est en effet de poser une hypothèse H0 que la performance réelle intrinsèque est significativement proche de la performance prévue dans la note de calcul thermique. L'approche bayésienne permet donc de mettre à jour avec les mesures et de tester les limites de cette hypothèse.

Initialisation : attribution de distributions a priori

L'initialisation du problème en approche bayésienne revient à attribuer des distributions de probabilité a priori à chacune des variables. Comme l'hypothèse H0 suppose que le bâtiment est aussi performant que prévu par calcul, les distributions choisies sont des normales centrées autour des valeurs prévues dans la note de calcul thermique. Elles sont associées à une incertitude élargie de 30 %, conformément à l'équation (3), pour rendre compte de la possibilité d'une contre-performance (Farkh et al 2024), sans risque d'attribuer un prior ni non informatif ni trop informatif.

$$U_i \sim \mathcal{N} \left(\mu = u_{i, \text{note thermique}}, \sigma = \sqrt{\frac{1}{1,96} \times \frac{30}{100} \times u_{i, \text{note thermique}}} \right) \quad (3)$$

$$\Psi_i \sim \mathcal{N} \left(\mu = \Psi_{i, \text{note thermique}}, \sigma = \sqrt{\frac{1}{1,96} \times \frac{30}{100} \times \Psi_{i, \text{note thermique}}} \right) \quad (3)$$

Sont aussi modélisées par des distributions normales les coefficients de déperditions par les ponts thermiques (si explicitement comptabilisés dans la note de calcul thermique), ainsi que le coefficient de déperditions des fenêtres U_w . Les distributions a priori données à chacune des variables traduisent donc jusque-là la connaissance a priori que l'on peut avoir sur le bâtiment tel quel, c'est-à-dire que celui-ci est conforme à ce qui est prévu dans la note de calcul thermique. L'indicateur de performance globale qu'on peut calculer de manière probabiliste a priori sera ainsi centré sur la valeur de Ubât cible calculée.

Mise à jour vers une distribution postérieure : intégration des mesures in situ

L'intégration des mesures in situ conduit à déclarer dans le modèle les variables qui font l'objet d'une mesure puis amène à l'étape d'estimation de la distribution des variables a posteriori. Cette étape fait appel au théorème de Bayes dont on peut dériver la distribution postérieure non normalisée d'une variable sachant des mesures en fonction de sa distribution a priori et de la vraisemblance des mesures $p(\theta|y) \propto p(\theta)p(y|\theta)$ (Gelman et al. 2020). L'évaluation de la distribution postérieure se fait de manière classique à l'aide d'un algorithme de Monte-Carlo à gradient (Hoffman and Gelman 2011).

L'étape finale consiste à normaliser un Ubât global à partir de l'équation (1) à partir des distributions postérieures de chacune des variables. La méthode veille à conserver les distributions telles quelles, c'est-à-dire avec leur covariance, pour propager d'éventuelles colinéarités.

Notons enfin que si le calcul de l'indicateur global est basé sur la définition du Ubât, les hypothèses faites à l'étape (I) de ne conserver que les inconnues prises en compte dans la note de calcul thermique introduit une erreur de modèle qui peut éloigner l'indicateur du Ubât. Ainsi, il ne sera pas possible d'interpréter l'indicateur final en tant qu'estimation du Ubât stricto sensu mais il reste par définition un indicateur de risque de contre-performance.

Analyse des distributions postérieures par la règle de décision HDI+ROPE

Pour statuer sur l'hypothèse H0 initiale de savoir si la performance du bâtiment instrumenté est au niveau de ce qui était prévu dans la note de calcul thermique, on compare la distribution postérieure de l'indicateur (par son intervalle HDI pour *highest density interval*) à une zone prédéfinie dite ROPE traduisant l'hypothèse H0, autour de la valeur cible du coefficient Ubât normalisé (ROPE pour *region of practical equivalence*). La méthode (Kruschke 2018; Schwaferts and Augustin 2020) prévoit 3 possibilités : (1) l'hypothèse H0 est acceptée si la totalité du HDI (soit 94 % du postérieur) est dans la ROPE (2) l'hypothèse H0 est rejetée si la totalité du HDI est en dehors de la ROPE ou (3) le HDI n'est ni entièrement dans la ROPE ni entièrement dehors, on ne peut alors pas se prononcer.

La zone ROPE est par nature subjective car elle traduit, à dire d'expert, la zone autour du Ubât cible que l'on peut considérer comme assimilable à une performance conforme à la cible. A la différence des applications dans (Kruschke 2018), il n'est pas nécessaire de discriminer un postérieur situé à la cible d'un postérieur inférieur à la cible (qui traduirait une meilleure performance que prévue). Dans ce travail, la cible est normalisée donc la ROPE est fixée à $[-\infty ; 1,20]$ (soit 20 % d'erreur). Ce seuil permet de n'être ni trop restrictif ni trop permissif. Un seuil plus bas conduit à n'accepter que les cas parfaitement conformes à la note de calcul thermique et exclut ainsi les faibles contre-performances, même à quelques pourcents. Au contraire, un seuil plus élevé conduit à accepter l'hypothèse H0 de performance dans des cas de contre-performances significatives, ce qui n'est pas le comportement attendu de l'indicateur.

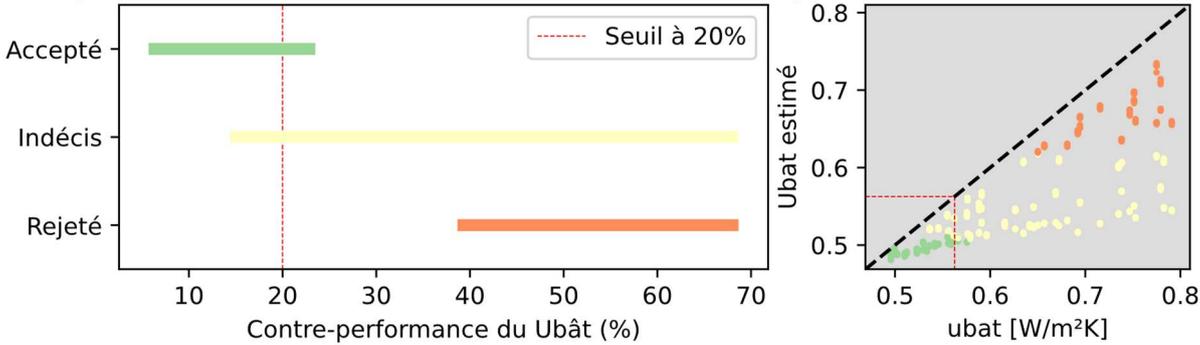
ANNEXE G. ABAQUES DES LIMITES DE L'INDICATEUR GLOBAL

Les typologies et les plans d'instrumentation. Que les tableaux, pas les jolies figures

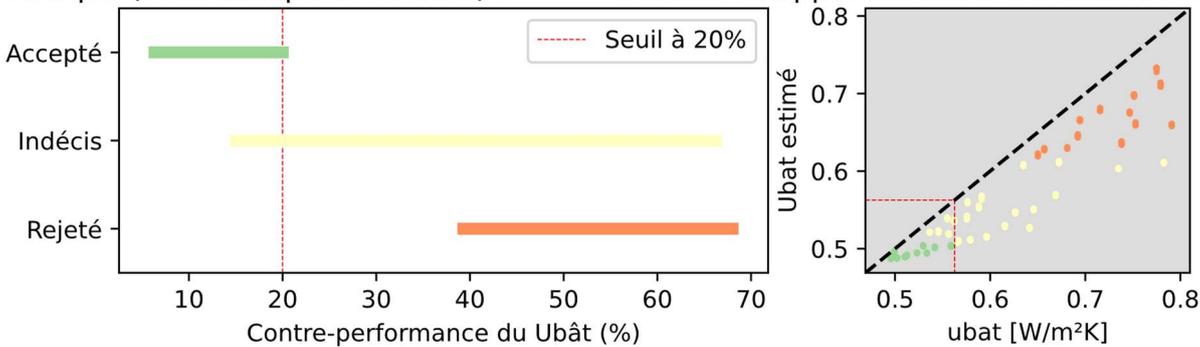
Bâtiment de type barre < 15 logements

Les abaques ci-dessous permettent de décider du plan d'instrumentation adapté aux besoins du client.

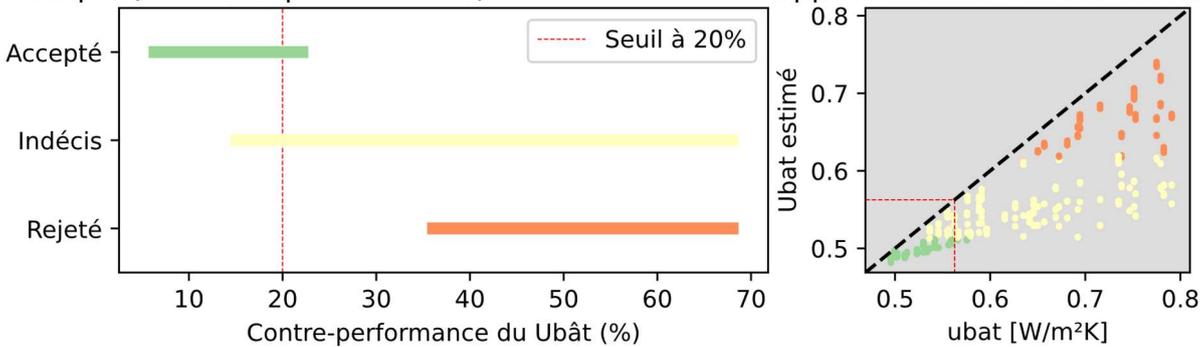
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 2 mesures appartement & 2 mesures locales



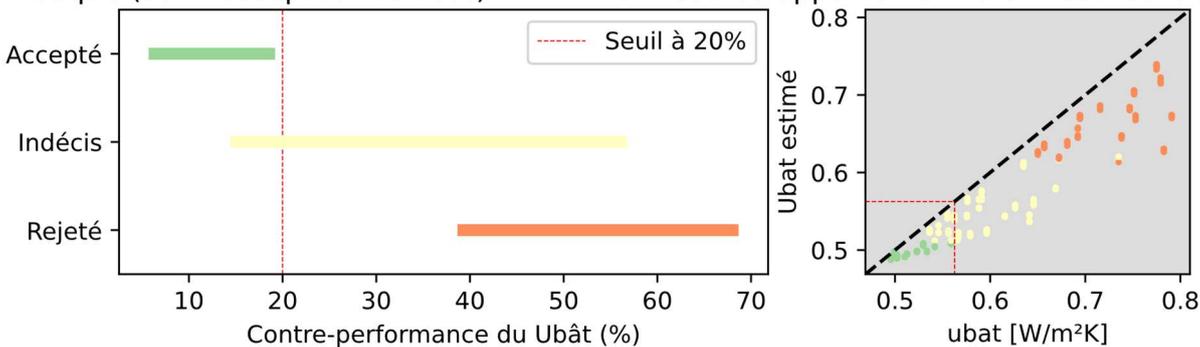
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 2 mesures appartement & 3 mesures locales



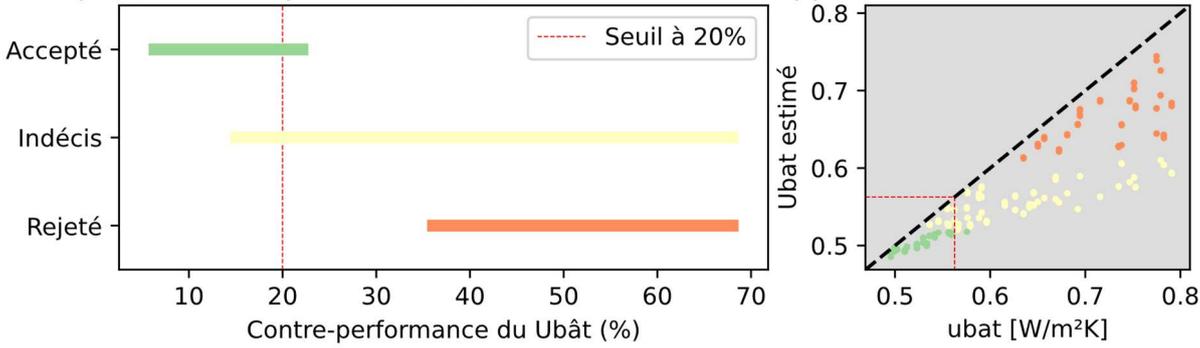
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 3 mesures appartement & 2 mesures locales



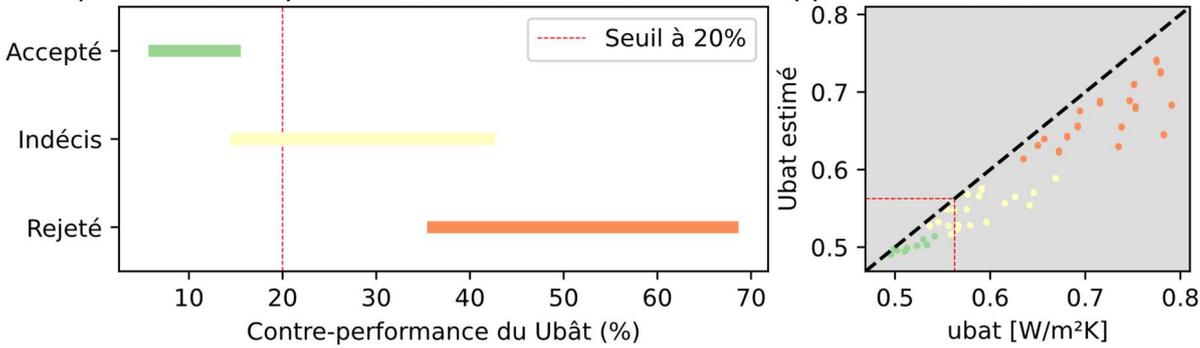
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 3 mesures appartement & 3 mesures locales



Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 4 mesures appartement & 2 mesures locales



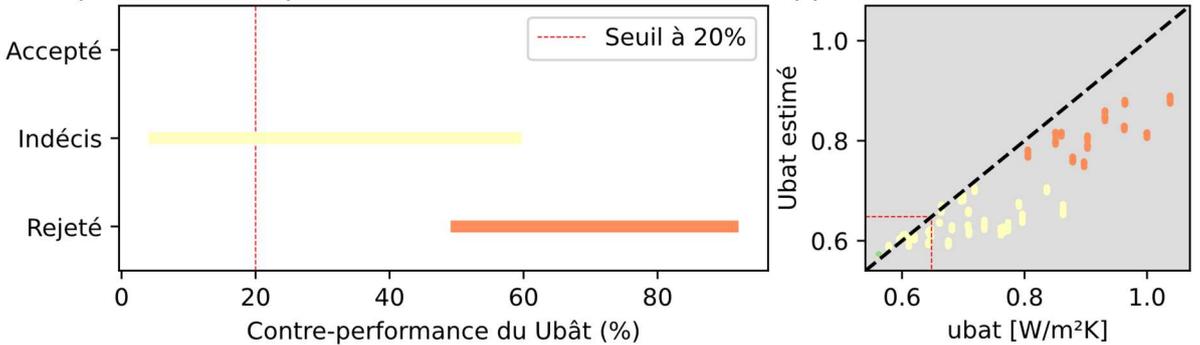
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 4 mesures appartement & 3 mesures locales



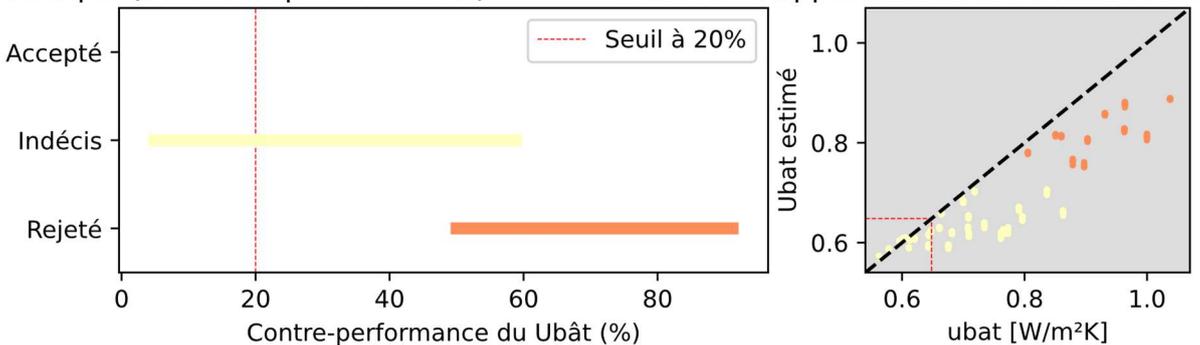
Bâtiment de type tour de taille moyenne ~ 30 logements

A noter que dans le cas d'une tour, l'influence relatif de la paroi courante sur la valeur finale de Ubat est très importante. Cette paroi doit donc être mesurée impérativement. Les abaques ne sont donc valides que si la mesure de la paroi courante est faite. De même, comme pour tous les bâtiments de cette annexe, les mesures d'appartements doivent échantillonner les deux étages extrêmes.

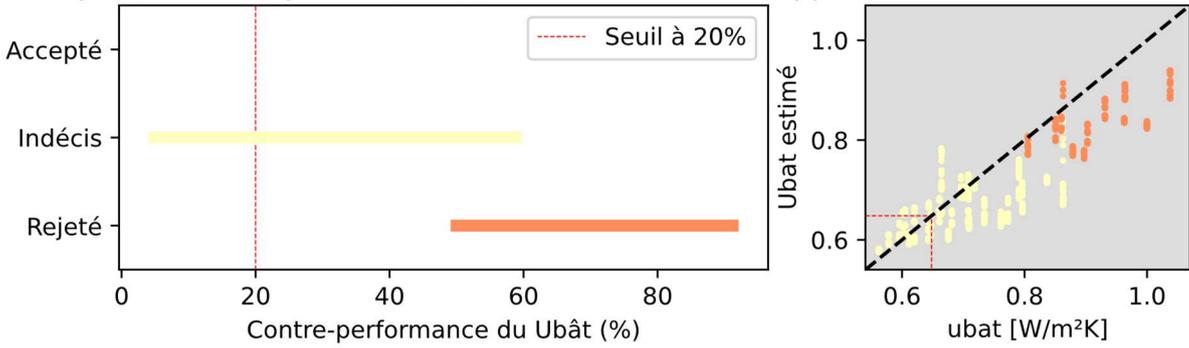
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 2 mesures appartement & 2 mesures locales



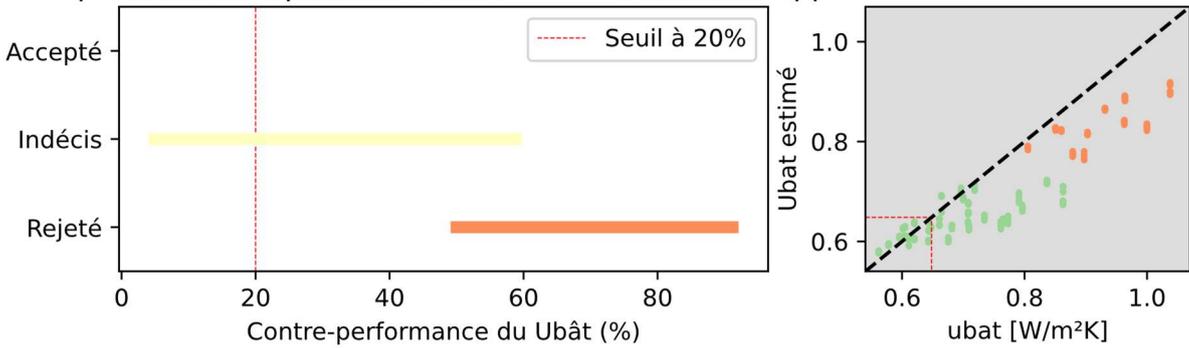
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 2 mesures appartement & 3 mesures locales



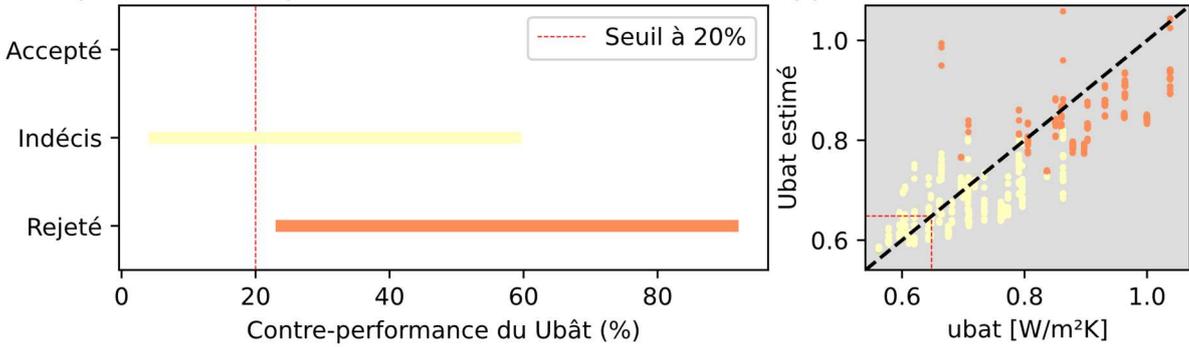
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 3 mesures appartement & 2 mesures locales



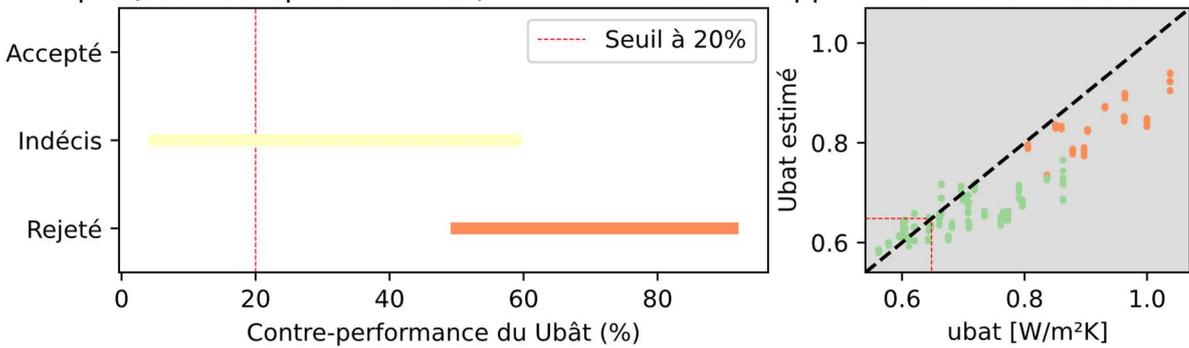
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 3 mesures appartement & 3 mesures locales



Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 4 mesures appartement & 2 mesures locales

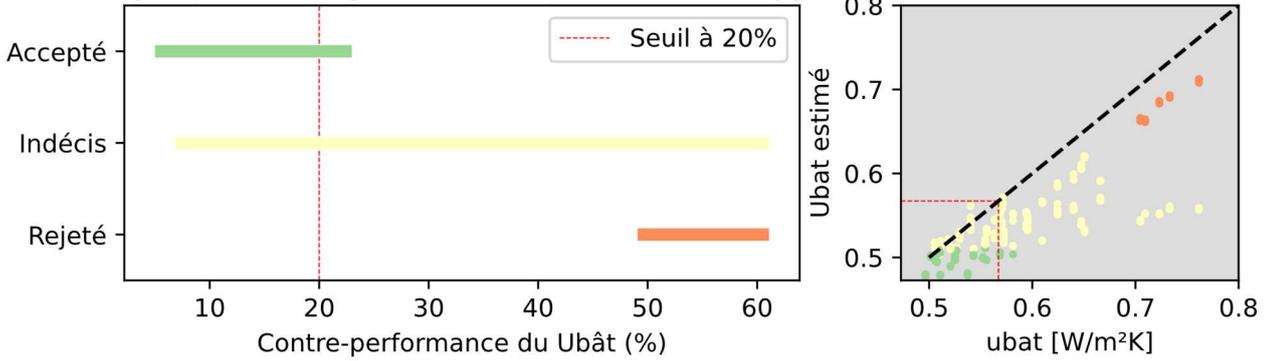


Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 4 mesures appartement & 3 mesures locales

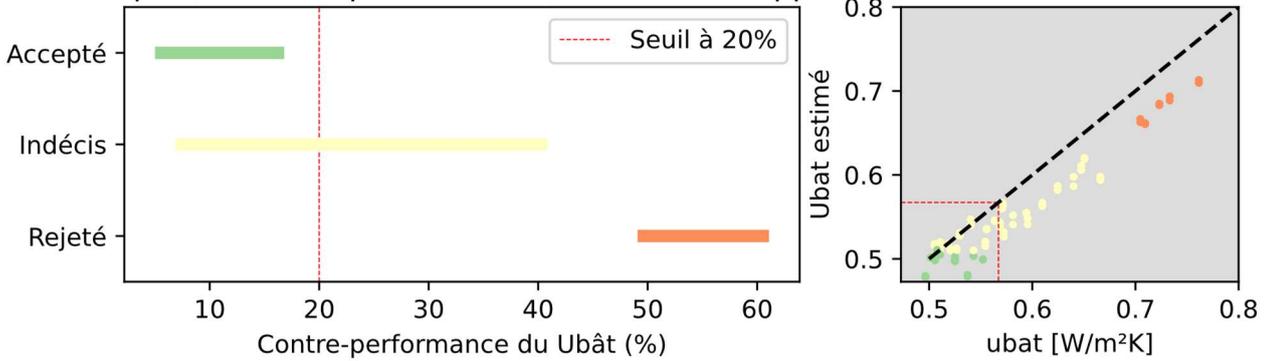


Bâtiment de type barre de taille moyenne ~30 logements

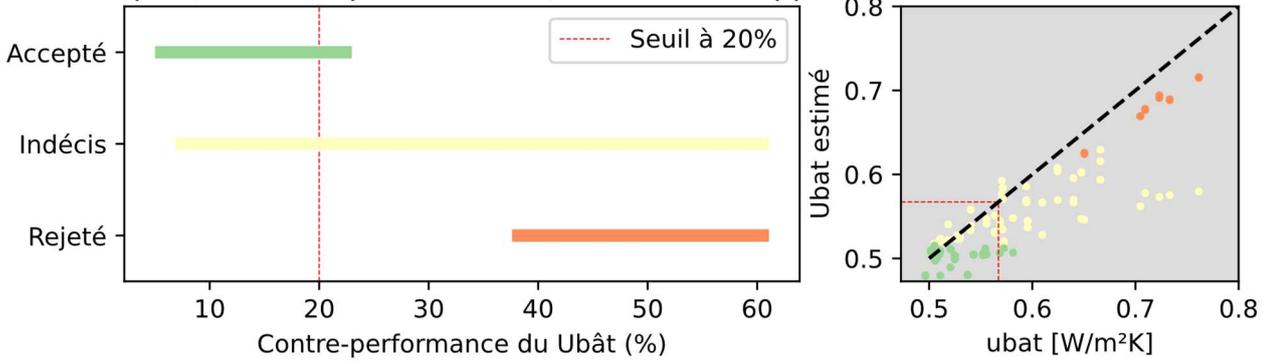
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 2 mesures appartement & 2 mesures locales



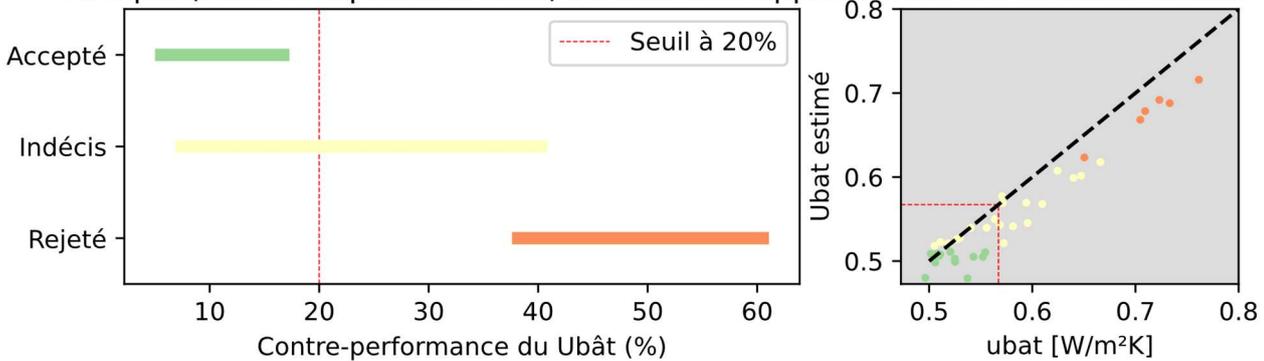
Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 2 mesures appartement & 3 mesures locales



Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 3 mesures appartement & 2 mesures locales



Abaque (seuil acceptabilité 20%) : 3 mesures appartement & 3 mesures locales



ANNEXE H. PROTOCOLE DE PRODUCTION D'UN ABAQUE PERSONNALISE

Pour établir l'abaque personnalisé donnant les limites de l'indicateur global pour une opération donnée et son plan d'instrumentation, il faut disposer des valeurs cibles de chaque composant de l'enveloppe ainsi que des métrés tels que détaillés dans le Figure 15 de la partie 4.1/.

L'abaque se produit en 3 étapes : (I) créer des contre-performances virtuelles de l'enveloppe étudiée (II) créer les mesures virtuelles pour chacune des contre-performances (III) calculer l'indicateur global pour chaque cas.

Pour cela, on suit pas à pas la démarche décrite dans l'Annexe A, sauf la 3^e partie où l'on ne teste pas toutes les combinaisons de tous les plans d'instrumentation possibles, mais uniquement le ou les plans envisagés dans l'opération.

Cas 1 - Test d'un unique plan : valider la pertinence de l'indicateur global

Par exemple, le client met à disposition deux grands appartements pour la mesure Sereine et laisse à disposition tous les appartements pour poser des fluxmètres, ce qui laisse supposer que l'on a à disposition tous les types de parois mesurables localement. On peut alors créer un abaque personnalisé pour ce plan d'instrumentation : $N_{\text{logements}} = [\text{logements 401 et 403}]$ et $N_{\text{parois}} = 3$ types (ou plus selon le bâtiment). Notons qu'il ne s'agit pas, comme à l'Annexe A, de produire toute la combinatoire de 2 logements parmi 4, mais bien de ne tester l'impact que de ces deux mesures sur ces logements-là.

L'abaque ainsi créé permet de comparer l'indicateur obtenu à des cas simulés de contre-performances pour ce même bâtiment et donne plus de solidité à la conclusion portée à partir de l'indicateur global. Par exemple, si aucun des cas simulés ne donne de faux positifs sous le seuil des 20 % de contre-performance, alors un indicateur donnant environ 10 % de contre-performance indique avec quasi-certitude que le bâtiment étudié est conforme.

Cas 2 – Tests de deux plans distincts : évaluer la pertinence d'ajouter une mesure

Pour évaluer la pertinence d'ajouter une mesure Sereine logement (pour convaincre le client par exemple) ou de retirer une mesure Sereine logement (pour mobiliser moins d'opérateurs sur le terrain et réduire les coûts), on peut vouloir comparer deux alternatives. On produit alors l'abaque pour deux plans d'instrumentation puis on les compare.

Par exemple, pour poursuivre sur le cas précédent, on souhaite savoir s'il est pertinent de mesurer l'appartement 001 de l'immeuble. On produit alors l'abaque du cas mais aussi l'abaque du cas $N_{\text{logements}} = [\text{logements 401, 403 et 001}]$ et $N_{\text{parois}} = 3$ types. On peut ensuite comparer les deux abaques, ou comparer les seuils de détection atteints pour trouver un consensus avec le client. Par exemple, on pourrait montrer qu'ajouter une mesure logement permet de détecter un seuil de 21 % de contre-performance au lieu de 27 %, mais si le client n'a pas d'intérêt à ce gain en précision, il sera admissible de ne mesurer que les deux logements initialement prévus.

Mise à disposition d'un outil en ligne pour produire un abaque

Il n'y a à la rédaction de ce livrable pas d'outil en ligne qui permette la création de ces abaques, mais il pourra être mis en développement lors d'un projet futur.