



HAL
open science

Confort d'été dans l'habitat après rénovation. Etude technique et sociologique exploratoire.

Khedidja Mamou, Loïc Frayssinet, Robert Celaire, Thierry Rieser

► **To cite this version:**

Khedidja Mamou, Loïc Frayssinet, Robert Celaire, Thierry Rieser. Confort d'été dans l'habitat après rénovation. Etude technique et sociologique exploratoire.. Envirobat BDM. 2021. halshs-04704706

HAL Id: halshs-04704706

<https://shs.hal.science/halshs-04704706v1>

Submitted on 6 Jan 2025

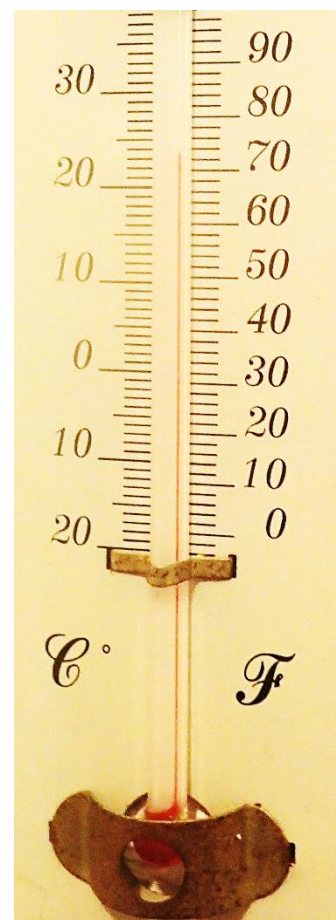
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONFORT D'ETE DANS L'HABITAT APRES RENOVATION

ETUDE TECHNIQUE
ET SOCIOLOGIQUE
EXPLORATOIRE

Eté 2020



Etude réalisée par :

Loïc FRAYSSINET,
Khedidja MAMOU,
Robert CELAIRE,
et ENERTECH

Table des matières

Avant-propos	2
Résumé synthétique	3
1. Contexte	3
2. Objectifs	3
3. Moyens mis en œuvre	3
4. Recommandations.....	4
4.1. Recommandations pour l'ANAH.....	8
4.2. Recommandations pour EnvirobatBDM	9
5. Pour aller plus loin	10
Détail des travaux réalisés.....	12
1. Campagne de mesure	12
1.1. Mesures	12
1.2. Cas d'étude	14
2. Enquête sociologique	16
Analyse croisée des résultats.....	17
1. Analyse préliminaire des données météorologiques	17
1.1. Caractéristiques du climat étudié.....	18
1.2. Positionnement par rapport aux historiques	21
2. Analyse globale.....	22
2.1. Confort dans les logements.....	22
2.2. Gestion du confort d'été	28
2.3. Travaux.....	34
2.4. Impact des travaux de rénovation thermique sur le confort d'été	37
Annexe 1 – Glossaire	58
Annexe 2 – Hypothèses et sources de données pour la caractérisation thermo-physique des logements	58
1. Composition des parois.....	58
2. Propriétés thermo-physiques des matériaux.....	58
3. Débit de ventilation	59
4. Débit d'infiltrations	59
5. Taux de renouvellement d'air en ventilation naturelle	59
6. Apport internes	59
7. Facteur solaire	60

Avant-propos

Ce document est divisé en 2 parties principales : un résumé synthétique, suivi d'une présentation détaillée des travaux réalisées et de leur analyse.

Le résumé synthétique, se voulant accessible à tous, a pour vocation d'offrir un aperçu consistant des travaux réalisés et des conclusions principales de l'étude.

La deuxième partie, plus technique, est, dans sa globalité, principalement à destination d'un public « expert » qui souhaiterait approfondir le sujet. Il est toutefois possible d'y naviguer au cas par cas, selon les détails recherchés, grâce aux renvois présents dans le résumé synthétique.

Un tableur, fournissant le détail des cas d'études et des résultats de mesures, est associé à ce document.

Enfin, un glossaire, fourni en annexe, définit les termes identifiés par un astérisque lors de leur première occurrence.

Résumé synthétique

1. Contexte

L'**inconfort thermique d'été**, et ses impacts sur la santé publique, est **une problématique de plus en plus prégnante** à cause de l'intensification des vagues de chaleur, aggravée par les effets d'îlots de chaleur urbains (ICU) pour une population majoritairement citadine et vieillissante. **Cette problématique dépasse désormais largement le périmètre méditerranéen** d'où l'intérêt a initialement émergé. Notons aussi que les mesures prises dans le contexte sanitaire récent lié à l'épidémie de la COVID-19 (confinement, télétravail, etc.) contribuent également à renforcer ces enjeux dans les logements.

Par ailleurs, **au-delà des enjeux sanitaires, l'enjeu est aussi énergétique**. En effet, dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, il est essentiel de réduire nos consommations d'énergie et donc d'éviter notamment le recours systématique aux systèmes de rafraîchissement actifs énergivores, de type climatisation à compression, notamment là où ils peuvent facilement être évités (et les cas ne manquent pas) grâce à une meilleure conception architecturale et une meilleure appropriation des dispositifs de gestion de ce confort. Le climat méditerranéen a en effet des caractéristiques d'alternances de journées très chaudes et de nuit tempérées qui permettent d'assurer du confort en optimisant la valorisation de ces cycles journaliers.

Cette question se pose notamment dans le cadre du bâti existant qui devra faire l'objet d'un plan de massification des rénovations énergétiques dans les années qui viennent, étant donné qu'un bâtiment thermiquement isolé est naturellement plus réactif aux apports de chaleur internes et climatiques, d'autant plus s'il n'est pas simultanément bien protégé du soleil ni correctement ventilé pendant les périodes nocturnes plus fraîches. **L'intégration du confort d'été dans le cadre des rénovations énergétiques est donc primordiale**, d'autant plus que cette notion est généralement ignorée dans les choix de conception au profit quasi-exclusif du confort d'hiver.

Enfin **l'enjeu est également économique et social** car l'usage de la climatisation peut peser lourdement sur le budget des ménages à la fois en termes d'investissement et de fonctionnement, ce qui pourrait tendre à accroître les inégalités.

2. Objectifs

Cette étude, portée par EnvirobatBDM et l'ANAH dans le cadre de leurs actions en faveur de la rénovation, se propose de dresser un état des lieux du confort thermique estival, à la fois mesuré et perçu, dans des logements récemment rénovés, afin d'identifier les points faibles et les leviers d'amélioration envisageables.

3. Moyens mis en œuvre

Pour mener à bien cette étude il a été choisi de croiser **deux approches** :

- (1) l'une **technique**, visant à quantifier le confort thermique dans les logements à partir de mesures et de données physiques (architecturales et techniques) caractérisant ces logements ;
- (2) la seconde, **sociologique**, visant à identifier les pratiques, habitudes et perceptions des occupants ;

Les travaux réalisés et les résultats obtenus sont détaillés dans la suite pour les personnes qui souhaiteraient approfondir les méthodes utilisées : *Détail des travaux réalisés*.

4. Recommandations

Les conclusions de cette étude sont données ici sous forme de recommandations tirées de l'analyse des résultats obtenus. Des renvois vers le détail des travaux réalisés sont fournis via des notes de bas de page pour faciliter l'accès à des informations complémentaires.

Pour commencer, il convient de relever que **la majorité des occupants a indiqué souffrir de la chaleur dans son logement**¹. Le rôle de la rénovation dans l'inconfort ne semble a priori pas prédominant². Cet inconfort semble plutôt résulter de comportements « non-idéaux » des occupants (absence de ventilation nocturne principalement) mais souvent imposés par des contraintes extérieures³. Il est donc indispensable que les travaux d'amélioration intègrent cet état de fait⁴. Face à ce constat, les points de vigilance à intégrer lors de travaux de rénovation sont les suivants :

Prévoir et favoriser la ventilation naturelle des logements

La Ventilation naturelle * des logements, notamment la nuit, est essentielle pour les rafraichir. Il est donc indispensable que les **travaux réalisés ne réduisent pas le potentiel de ventilation naturelle** (maintien des ouvrants existants, du caractère traversant du logement) **voire l'améliorent** (rajout d'ouvrants extérieurs, amélioration du potentiel de ventilation entre pièces, mise en œuvre de cheminées thermiques ou d'autres dispositifs de ventilation verticale), y compris au niveau des occultations (volets ajourés, persiennes, volets coulissants, etc.). La notion de porosité de l'enveloppe notamment définie dans le référentiel réunionnais PERENE⁵ et les travaux sur le label Ecodom⁶ dans tous les territoires d'outre-mer peuvent représenter un cadre réglementaire et de conception.

Le potentiel de ventilation naturelle des logements est d'autant plus important que **de nombreuses contraintes viennent entraver la décision d'ouverture des fenêtres** au moment qui serait thermiquement le plus opportun, à savoir, la nuit (bruits, risque d'intrusion, moustiques, etc.⁷). Des solutions permettant de se prémunir de ces contraintes existent (ouverture en oscillant, grille, moustiquaire, etc.) et pourraient être favorisées.

A défaut d'ouverture possible la nuit, le potentiel de ventilation naturelle est d'autant plus critique qu'il faut pouvoir compenser des temps d'ouverture plus courts (tôt le matin et tard le soir) par des taux de renouvellement d'air plus important.

¹ Voir *Confort dans les logements*.

² Voir *Impact des travaux de rénovation thermique sur le confort d'été*.

³ Voir *Gestion du confort d'été*.

⁴ Voir *Scénarios d'usage*.

⁵ [Référentiel PERENE](#).

⁶ [Label ECODOM](#).

⁷ Voir point (5) de l'analyse.

Même en cas d'usage en ventilation naturelle en continue sur la journée, une meilleure ventilation permet de limiter les surchauffes et de faire au moins tendre la température moyenne intérieure vers la température moyenne extérieure.

Porter une attention particulière aux apports solaires

Sans protection, les apports solaires sont la principale source de surchauffe des logements. Il convient donc de veiller à ce que des **occultations solaires**, de préférence extérieures, **soient systématiquement intégrées** (une attention particulière doit donc être portée lors du percement de nouvelles fenêtres, notamment en toiture et lors d'intégration de loggias dans les volumes habitables⁸), en sachant que l'ajout de protections extérieures peut s'opposer à des attentes esthétiques⁹ ou patrimoniale. Pour mémoire, la mise en place de protections performantes des baies donnant sur l'extérieur contre les rayonnements solaires est financièrement aidée dans les départements, territoires et pays d'outre-mer.

Être vigilant à la mise en œuvre réelle

Des contre-performances peuvent être observées lors d'**isolation de combles** si ceux-ci ne sont pas **suffisamment ventilés**¹⁰. Une attention particulière doit être portée sur cet aspect.

De façon plus générale, cela pose la question d'un **contrôle qualité post-mise en œuvre** des travaux réalisés¹¹. Celui-ci est d'autant plus nécessaire que l'on attend des ménages des pratiques vertueuses.

Ne pas dégrader le comportement thermique estival – définir des indicateurs

De façon globale, il est certain qu'il est préférable de **ne pas dégrader l'inertie, ni d'augmenter les apports de chaleurs**. Toutefois, des effets compensatoires peuvent permettre d'avoir plus de marges de manœuvre¹². Des points de vigilance ont notamment pu être mis en évidence en cas :

- d'ajout de double vitrage sans isolation thermique des murs, à cause de l'augmentation du niveau d'isolation non associée à une réduction notable des apports solaires, notamment via les parois opaques exposées au soleil¹³ ;

⁸ Voir point (10) de l'analyse

⁹ Voir point (9) de l'analyse.

¹⁰ Voir point (13) de l'analyse.

¹¹ Voir point (13) de l'analyse.

¹² Voir *Impact des travaux de rénovation thermique sur le confort d'été*.

¹³ Voir *Bilan de l'impact des différents travaux - Retours aux cas d'études*

- et d'isolation thermique par l'intérieur sur une majorité de parois intérieures (murs, refend, dalle, plafond) à cause de l'importante perte d'inertie engendrée.

Il est aussi certain qu'à résistance égale, les **isolants plus inertiels** (denses) **sont préférables** à la fois pour l'Atténuation* et le Déphasage* des flux de chaleur qu'ils procurent¹⁴, mais aussi, dans une moindre mesure, pour l'inertie interne supplémentaire qu'ils peuvent apporter.

Toutefois, la plupart des travaux de rénovation énergétique, et leurs effets couplés, ont des effets ambivalents. Il est donc **nécessaire de définir des indicateurs fiables et pratiques**, intégrant le comportement dynamique des matériaux, pour les discriminer¹⁵.

Par ailleurs, il est important que ces **indicateurs intègrent la diversité de pratiques** des ménages (usages et gestion) et pas uniquement un comportement théorique idéal, afin de s'assurer que les travaux effectués ne dégradent pas le confort estival quel que soit le comportement des usagers¹⁶.

Ces besoins concernant l'intégration des enjeux de confort d'été et d'Adaptation* dans le cadre de la rénovation ont d'ailleurs été mis en avant dans le rapport du Haut Conseil pour le Climat faisant suite à une saisine du gouvernement¹⁷. Ces enjeux étant d'autant plus stratégiques que cette préoccupation n'est intégrée explicitement dans aucun des pays européens analysés dans cette étude.

Favoriser une approche globale

Il est souhaitable d'adopter une **approche globale sur le confort**, qui intègre à la fois le confort thermique hivernal et estival, mais aussi acoustique, visuel, olfactif, ergonomique, etc.

De même, **intégrer** pour chaque opération **l'ensemble des étapes pour parvenir à un niveau BBC** (même si toutes les étapes ne sont pas faites en une seule fois) est indispensable pour éviter les contre-performances (ex : nouvelle chaudière surdimensionnée après isolation) et les incompatibilités (ex : interface problématique entre fenêtre et isolation ultérieure), mais aussi pour optimiser les coûts et éviter les impasses¹⁸.

Il est aussi essentiel d'**associer le plus en amont possible les occupants** et leurs habitudes afin que les travaux ne soient pas perçus comme imposés, qu'ils soient compris et réellement adaptés aux pratiques habitantes¹⁹.

¹⁴ Voir *Amplitude des températures intérieures*.

¹⁵ Voir *Proposition d'une méthode*.

¹⁶ Voir *Scénarios d'usage et Evaluation de l'inconfort*.

¹⁷ « [Rénover mieux : leçon d'Europe](#) », Haut Conseil pour le Climat, 2020.

¹⁸ Voir : « [Rénovation thermique performante par étapes](#) », AQC, 2015 ; « [La rénovation performante par étapes](#) », Dorémi, Enertech, ADEME, 2021 ; « [Projet B2C2 – méthodologie pour atteindre le niveau BBC en rénovation par étapes](#) », Pouget Consultants, Effinergie (publication à venir).

¹⁹ Voir point (12) de l'analyse.

Sensibiliser aux alternatives à la climatisation

La technique de gestion du confort estival permettant d'abaisser le plus possible la température intérieure (ventilation nocturne et fermeture des fenêtres et des occultations en journée pendant les périodes les plus chaudes) semble largement méconnue, du moins très peu pratiquée²⁰. La **sensibilisation et potentiellement l'accompagnement au changement de pratiques** de la part des occupants pourraient être judicieux, en mettant en avant les gains en termes de confort.

De façon complémentaire, il serait intéressant de **sensibiliser les occupants aux problèmes engendrés par la généralisation de la climatisation** (enjeux énergétiques, enjeux économiques -bien souvent « lissés » par la mensualisation moyennée des factures-, îlot de chaleur urbain, etc.) et pourquoi pas, de façon plus large, d'accompagner les installateurs de climatisation vers le conseil en conception passive des bâtiments l'été²¹ ou l'usage de techniques de rafraîchissement moins énergivores.

Lorsque cela s'avère indispensable, **les technologies énergétiquement les plus efficaces devraient en effet être favorisées**, comme c'est le cas notamment pour les brasseurs d'air dans les territoires d'outre-mer. De façon plus large les techniques de rafraîchissement adiabatique pourraient être, dans certains cas, considérées.

²⁰ Voir point (5) de l'analyse.

²¹ Voir point (15) de l'analyse.

4.1. Recommandations pour l'ANAH

A partir des éléments précédents²², il apparaît que **les prestations subventionnées par l'ANAH n'ont généralement pas tendance à aggraver le confort d'été** par rapport à la situation initiale.

Toutefois, **deux configurations ont pu être identifiées comme défavorables** :

- en cas d'amélioration de la performance thermique des menuiseries en l'absence d'isolation des murs sur des façades exposées au soleil ;
- en cas de diminution trop importante de l'inertie interne par l'isolation par l'intérieur de la majorité des surfaces intérieures.

Quoiqu'il en soit, il apparaît encore **nécessaire de consolider les tendances observées** dans cette étude afin de pouvoir disposer de résultats généralisables, intégrant notamment la diversité d'usages rencontrés.

De plus, au-delà de la non-dégradation du confort, étant donné les effets du réchauffement climatique, **il semble également nécessaire de favoriser les travaux qui améliorent le confort d'été**. Les pistes suivantes ont pu être identifiées :

- favoriser la ventilation naturelle des logements ;
- intégrer systématiquement des protections solaires lorsque nécessaire ;
- encourager le non-recours à la climatisation, et les moyens d'y parvenir, et financer en priorité les alternatives les moins énergivore (ventilateurs, rafraîchissement adiabatique, etc.) ;

Plus généralement, **l'utilisation d'approches globales** (multi-critère) **est fortement conseillée** et **le contrôle des travaux réalisé doit être renforcé** afin de garantir la performance visée.

Enfin, **la sensibilisation des ménages et des professionnels à ces aspects et l'intégration de leurs besoins** semble un levier indispensable à la réussite des actions en faveur d'une amélioration du confort d'été qui ne contribuerait pas à une augmentation des consommations énergétiques.

²² S'y reporter pour obtenir plus de détail.

4.2. Recommandations pour EnvirobatBDM

Un certain nombre d'éléments précédents rejoignent la démarche BDM en réhabilitation, à savoir :

- l'intégration de « protections solaires adaptées aux saisons et aux expositions » dans le prérequis « Bioclimatisme » ;
- l'aménagement des « espaces extérieurs » pouvant contribuer à la mitigation de l'ambiance extérieure (réduction de l'effet d'îlot de chaleur) ;
- l'utilisation de simulation thermique dynamique (STD) pour caractériser le confort d'été avec, suivant le niveau visé, la prise en compte de scénarios météorologiques et d'usages défavorables, notamment liés à la surventilation naturelle nocturne ;
- la « protection contre les nuisances acoustiques existantes » qui favorise notamment la ventilation nocturne (point 1.1.5.2 du référentiel) ;
- la « garantie du confort thermique » (points 1.2.1.4 à 6) « notamment en été » par des mesures si « le bâtiment est à faible inertie » (point 5.1.1.7) ;
- les « dispositions [...] prises pour lutter contre l'effet d'îlot de chaleur » (point 1.3.2.4) ;
- l'« efficacité » des systèmes (point 3.2) contribue de façon indirecte à réduire les apports internes de chaleur ;
- la présence « d'un système de ventilation naturelle de nuit en été » (point 5.1.1.10) ;
- la non-nécessité « de climatisation pour rester confortable en été » (point 5.1.1.12) ;
- l'intégration de « brasseurs d'air [...] pour améliorer le confort » (point 5.1.1.23) ;
- la présence de « dispositifs d'occultation permanents du rayonnement solaire direct d'été » pour les vitrages (point 5.1.2.2) ;
- la garantie qu'« aucune pièce principale de vie ne dispose de fenêtre non efficacement protégée du rayonnement solaire de saison chaude, tout en préservant le confort (ventilation et lumière naturelle) » (point 5.1.2.4) ;
- l'information des « futurs usagers » pour une « bonne utilisation du bâtiment et de ses équipements » (point 6.2.1.4) ;
- la rédaction d'une note sur la « surventilation naturelle nocturne » qui intègre notamment la prise en compte de contraintes d'ouvertures des fenêtres (effraction, moustiques, acoustique, etc.).

A la lumière des résultats obtenus, les points suivants mériteraient d'être inclus en réhabilitation :

- le point 1.2.1.12 (« des protections sont prévues sur les menuiseries afin de limiter les apports solaires en été ») ;
- le point 1.2.1.13 (« les logements sont traversants ou des mesures compensatoires sobres sont prises pour garantir le confort d'été. »), notamment pour la recherche de mesures compensatoires ;
- le point 5.1.2.5 (« les facteurs solaires des baies vitrées (châssis, verre et occultation) sont adaptés selon les orientations pour capter en hiver et réduire les apports solaires de saison chaude ») ;

Enfin, les points suivants pourraient permettre d'enrichir la démarche :

- l'intégration de la notion de porosité pour la garantie et/ou le dimensionnement d'un niveau suffisant de ventilation naturelle ;
- la transmission d'informations spécifiques aux futurs occupants sur la gestion du confort d'été pour la bonne utilisation du bâtiment et des équipements ;

- la justification de la sélection des zones représentative en STD, pour s'assurer qu'il s'agit bien de la plus critique, notamment pour le confort d'été ;
- l'étude de scénario d'occupation continu dans les logements parmi les alternatives à tester ;
- la comparaison du confort d'été avant et après travaux, selon les différents scénarios d'usage et météorologique, pour en garantir une amélioration.

5. Pour aller plus loin

Ce travail a permis de dresser un premier état des lieux du confort d'été dans des logements rénovés. Toutefois, afin d'obtenir des résultats plus quantitatifs et d'étayer certaines hypothèses, il mériterait une plus grande ampleur. Nous abordons ici les pistes qui pourraient être explorées et approfondies pour compléter et poursuivre ce travail préliminaire.

Tout d'abord au niveau de **l'échantillon**, il conviendrait de **l'élargir** afin de couvrir une plus grande diversité de principes constructifs et de types de ménages de sorte à le rendre plus représentatif. Un élargissement des mesures et de l'analyse à l'ensemble des **pièces principales** du logement (séjour et chambres) serait bénéfique pour mieux cerner les disparités intra-logement et les migrations potentiellement engendrées.

De même, **élargir l'étendue géographique** serait nécessaire pour prendre en compte les spécificités des différents climats méditerranéens (amplitude de température plus importante dans les terres notamment par rapport à la présente étude).

Au niveau temporalité, il serait évidemment préférable, a minima, de mener l'analyse sur un **été complet**. Toutefois, une campagne sur une **année complète** permettrait d'une part de vérifier si les performances en hiver atteintes sont cohérentes avec celles visées²³, et d'étudier la modification du comportement des ménages en fonction des saisons. Pour aller encore plus loin, un suivi sur plusieurs années, **avant et après travaux**, permettrait de mieux appréhender l'évolution du comportement des occupants suite à ces travaux (« appropriation » réelle et perception des dispositifs architecturaux et techniques mis en œuvre) et de faire ressortir de potentiels effets rebonds (moins de frais de chauffage donc augmentation de la température de chauffage ou moins de frais de chauffage donc investissement dans un système de climatisation, etc.).

Le **couplage avec une enquête sociologique** nous paraît indispensable pour élargir l'analyse et la compréhension du confort perçu par les occupants, et ce non seulement sur l'aspect thermique, mais aussi de façon globale. L'apport incontestable d'une telle démarche a pu être mis en avant dans ce premier travail.

Concernant la **relation avec les occupants**, il est préférable de réaliser la **prise de contact le plus en amont possible des travaux**. Cela faciliterait la mise en confiance et l'implication des occupants, qui pourrait être maintenues par un suivi régulier avec eux tout au long du projet. Concernant le suivi, un occupant a émis l'idée de mettre en place une application dédiée qui leur permettrait de relever plus facilement les périodes d'inconfort. Dans une perspective pro-active cela pourrait favoriser une prise de conscience autour des intérêts de tels travaux du point de vue économique et écologique/environnemental.

Enfin, il est ressorti le besoin de définir une **méthodologie permettant de déterminer l'impact des différents travaux de rénovations sur le confort d'été**, et ce indépendamment de la variabilité

²³ Notamment à l'aide de méthodes telles que développées dans le projet [SEREINE](#).

météorologique et de l'impact des occupants, c'est-à-dire par le calcul, mais sur des bases validées par l'instrumentation. Plusieurs pistes ont été proposées dans le présent rapport, qu'il mériterait vraiment d'explorer de manière plus approfondie.

Détail des travaux réalisés

Cette partie détaille les moyens employés et la méthodologie utilisée dans cette étude, avec la compagnie de mesure d'une part et l'enquête sociologique d'autre part.

1. Campagne de mesure

1.1. Mesures

Métrologie

La quantification du confort a été réalisée à l'aide de **thermo-hygromètres** relevant les mesures au pas de temps de 10 min. Ces données ont été moyennées au pas de temps horaire pour faciliter l'analyse.

Pour des raisons de moyens, l'**instrumentation** s'est focalisée sur **une pièce par logement**, jugée critique en termes de confort d'été par les occupants. Dans la plupart des logements instrumentés, une autre sonde a été installée dans une 2^{ème} pièce afin de « mettre en perspective » les données de la pièce critique.

Ces données ont été **complétées avec l'utilisation de feuilures-mètres** (mesure de l'ouverture des fenêtres) **et d'une enquête-suivi** consistant en une frise chronologique permettant aux occupants de relever ponctuellement leurs usages et leur ressenti en termes d'inconfort (Figure 1).

Date : _____ Pièce : _____

Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Occupation																								
Inconfort																								
Ouverture des fenêtres																								
Fermeture des volets																								
Utilisation de ventilateur																								
Utilisation d'appareils																								
Commentaires libres																								

Figure 1. Aperçu de l'enquête-suivi.

Indicateurs

Cinq indicateurs ont été retenus de sorte à **quantifier le niveau d'inconfort** selon un large panel de modélisations :

- (1) le premier quantifiant le temps pendant lequel la température est supérieure à 28°C ;
- (2) le second quantifiant le temps pendant lequel les conditions hygrothermiques sont jugées inconfortable au sens du « Standard 55 » de l'ASHRAE ;
- (3) le troisième quantifiant le temps pendant lequel les conditions hygrothermiques sont jugées inconfortable au sens du COSTIC ;

- (4) le quatrième quantifiant le temps pendant lequel les conditions hygrothermiques sont jugées inconfortable au sens de Givoni, intégrant l'impact de la vitesse d'air ;
- (5) le cinquième quantifiant le temps pendant lequel la température dépasse un seuil dépendant de la température moyenne extérieure glissante, au sens de la NF EN 15251, de sorte à intégrer la capacité d'adaptation des occupants.

Les seuils de ces différents indicateurs sont représentés graphiquement ci-dessous :

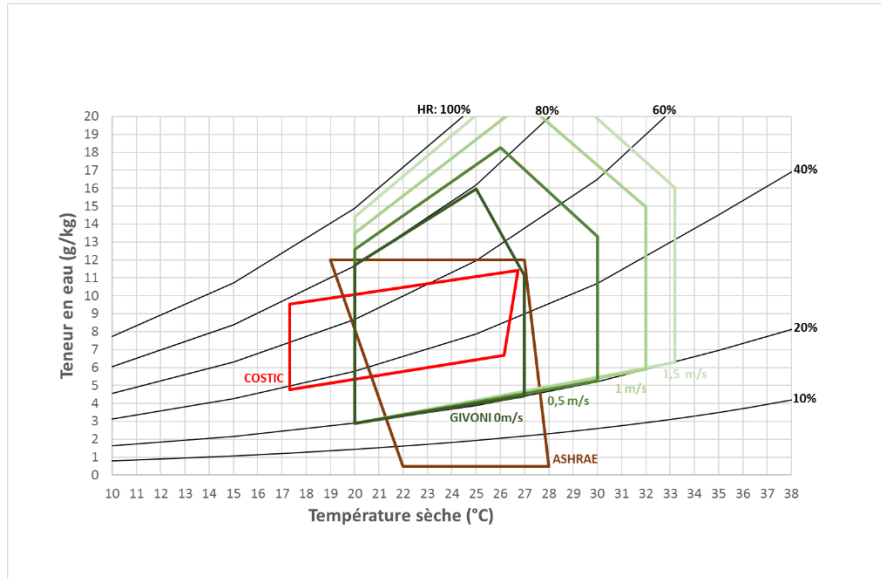


Figure 2. Représentation des différents polygones de confort sur le Diagramme psychrométrique *.

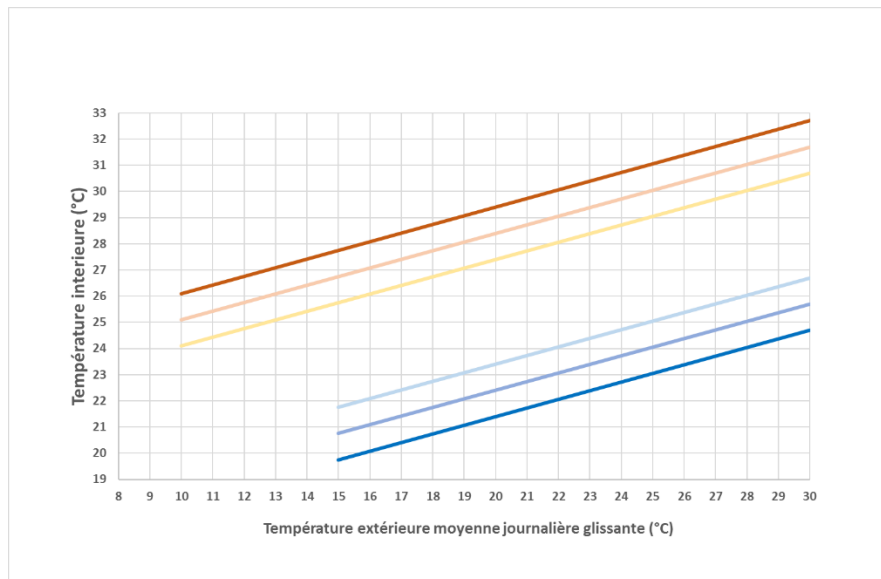


Figure 3. Seuil de confort au sens de la norme NF EN 15251 (de la catégorie 1 à 3, de l'intérieur vers l'extérieur).

Les paramètres pris en compte pour chacun des indicateurs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Indicateur	Température opérative	Hygrométrie	Vitesse d'air	Confort adaptatif
> 28°C	X			
ASHRAE	X	X		
COSTIC	X	X		
Givoni	X	X	X	
NF EN 15251	X			X

Notons que la température mesurée est en réalité la température d'air et non la Température opérative * qui intègre la température des surfaces environnantes. Toutefois, d'après la méthode ASHRAE, il est possible d'approximer l'une par l'autre sous les conditions suivantes :

(1) absence de panneaux rayonnants chauffants et/ou rafraichissants ;

(2) U_{mur} et $U_{fenêtre} < \frac{50}{T_{base-int} - T_{base-ext}}$;

(3) facteur solaire inférieur à 0,48 ;

(4) pas de système de chauffage majeur dans les espaces.

Ces conditions étant en général peu ou prou vérifiées²⁴ dans les cas d'étude retenus, nous approximerons la température opérative par la température d'air. Nous verrons toutefois quelques limites à cette hypothèse sur des cas spécifiques²⁵.

Autre exploitation potentielle

Il était envisagé d'utiliser les données de mesures pour valider les modèles numériques et estimer certaines grandeurs²⁶ : en imposant dans le modèle les températures mesurées, le besoin résiduel de chauffage et climatisation calculé par l'outil correspond aux défauts de modélisation et/ou à une grandeur non modélisée. Cette méthode, appliquée sur un logement inoccupé de préférence, car peu perturbé par des variables inconnues (apports internes, ouverture des fenêtres, etc.), aurait par exemple permis d'estimer le débit de la ventilation mécanique. Elle n'a toutefois pas pu être testée dans le cadre de ce travail.

1.2. Cas d'étude

Compte-tenu des contraintes de temps et de moyens, l'instrumentation n'a pu être mise en œuvre que sur **16 cas d'études, à Marseille** uniquement, en fin d'été :

- 1^{ère} série (bleue), du 21/08 au 14/10 (logement 1 à 4 – ANAH) ;
- 2^{ème} série (vert), du 26/08 au 14/10 (logement 5 à 8 – ANAH) ;
- 3^{ème} série (rouge), du 04/09 au 14/10 (logement 9 à 16 – BDM).

Leurs caractéristiques détaillées (date de construction, type d'immeuble, typologie, pièce instrumentée, etc.) sont données dans un tableur joint. Un code couleur, dont la légende est donnée en dessous, est proposé pour faire ressortir les éléments qui pourraient prédisposer le logement à de l'inconfort en été (rouge), à savoir :

²⁴ Pour la condition 2, étant en évolution libre, les températures intérieures et extérieures sont très proches, cette condition est donc facilement respectée (dans un cas extrême où on aurait écart de 10°C, on a $U < 5$, ce qui est systématiquement le cas car limite pour un simple vitrage).

²⁵ Voir *Impact potentiel de la température des parois, notamment sous-toiture*.

²⁶ Comme cela a pu être fait dans le retour d'expérience du LowCal par EnerTech – publication des rapports à venir.

- Les bâtiments construits dans les années 50-70 (généralement faible performance thermique) ;
- Les logements situés sous les toits, prédisposés aux surchauffes (surface recevant le plus de flux solaire) ;
- Les logements exposés aux surchauffes, par ordre d'importance : l'Ouest (cumul de température élevée et flux solaire incident important en fin de journée), l'Est (flux solaire incident important en début de journée), le Sud (exposé une bonne partie de la journée, mais flux peu incident) ;
- Les logements non traversants, ne pouvant bénéficier d'un rafraîchissement nocturne suffisant en raison de leur plus faible potentiel de ventilation naturelle.

Inversement, les caractéristiques suivantes sont a priori plutôt favorables :

- Les bâtiments anciens (construits avant les années 1945) grâce à leur forte inertie thermique et leurs faibles surfaces vitrées ;
- Les logements situés en rez-de-chaussée pouvant bénéficier de la fraîcheur du sol ;
- Les logements traversants, pouvant bénéficier d'un rafraîchissement nocturne conséquent.

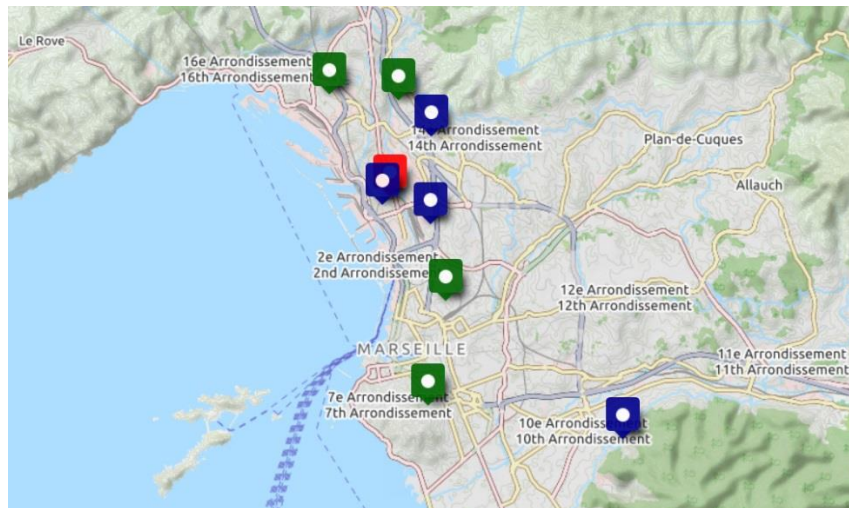


Figure 4. Localisation des logements instrumentés.

Les étiquettes énergie des logements²⁷ avant et après travaux sont fournies à titre indicatif afin de situer approximativement le niveau de performance thermique du bâtiment, caractérisant surtout le niveau d'isolation et donc le comportement hivernal. Un aperçu des travaux réalisés est également indiqué, les modifications sont mises en évidence en gras.

On peut ainsi observer que malgré sa faible taille, **l'échantillon étudié balaye plusieurs types de logements.**

²⁷ Sauf pour les logements 9 à 16 dont l'étiquette correspond à celle du bâtiment global.

2. Enquête sociologique

L'enquête sociologique a été réalisée auprès d'un échantillon de ménages retenu parmi les logements instrumentés. Aussi, **7 ménages ont été interviewés** (4 locataires et 3 propriétaires)²⁸. En raison du contexte sanitaire, de l'apport certain de l'enquête-suivi en termes de données « habitantes », mais aussi à la vue du budget alloué, les entretiens ont été réalisés à distance, par téléphone. D'une moyenne de 1h15, ils constituent un matériau certain pour alimenter l'étude.

Ce volet sociologique a ainsi permis de recueillir des informations complémentaires aux relevés par l'instrumentation et ainsi de mieux définir les **caractéristiques et composantes sociologiques impactant le confort d'été**. L'enquête s'est appuyée sur des entretiens semi directifs principalement autour de 3 axes : **les travaux de rénovation** (ce qui a mené les propriétaires/bailleurs à faire des travaux et ce qu'en savent et disent les occupants) ; **les pratiques quotidiennes** (en dehors des travaux préalablement effectués, que font-ils au quotidien pour pallier le ou les inconfort(s) et pour quelles raisons ?) ; **les perceptions et ressentis** (comment ils qualifient l'inconfort et ce que ça peut révéler des représentations et de leurs impacts en termes de pratiques).

²⁸ Notons que sur les 16 logements instrumentés 2 ménages ont refusé de façon catégorique d'être interviewés, 2 ne parlant quasiment pas français ont été écartés, et 4 logements ne comportaient quasiment pas de « signes » d'inconfort, 1 n'a jamais répondu.

Analyse croisée des résultats

Cette partie présente et commente les résultats obtenus suite à la campagne de mesure et l'enquête sociologique. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont croisés et analysés de façon complémentaire.

1. Analyse préliminaire des données météorologiques

Pour caractériser l'inconfort en période estivale, il est essentiel de connaître les conditions météorologiques ayant eu lieu sur la période étudiée.

Pour cela nous avons étudié 3 sources de données. Par ordre de fiabilité :

- Station Météo-France, située à Marignane (rouge) ;
- Station non-officielle, située dans le quartier Saint-Loup à Marseille (vert) ;
- Capteur installé sur un toit-terrasse lors de l'instrumentation (bleu).

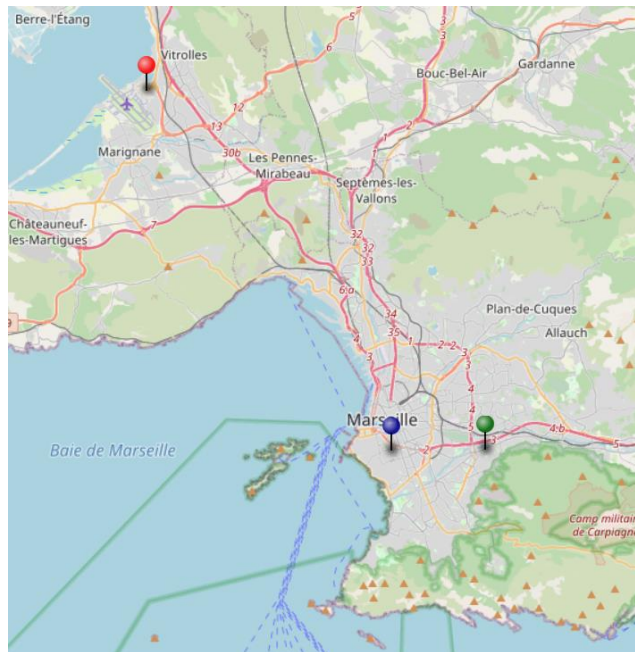


Figure 5. Localisation des stations météorologiques utilisées.

La Figure 6 présente l'évolution de la température extérieure sur la période estivale (avec un zoom) et les différentes périodes instrumentées.

On observe que l'évolution des températures mesurées par les différentes stations sont globalement cohérentes entre elles, toutefois :

- les amplitudes sont plus marquées à Marignane, probablement en raison du fait que cette station se situe dans un site dégagé et peu urbanisé (aéroport et proximité directe d'un étang) ;
- les températures nocturnes sont plus chaudes pour la sonde issue de l'instrumentation, mais cela est probablement dû à l'influence directe des parois environnantes du bâtiment qui ont accumulé de la chaleur en journée (disposition ne permettant pas de s'en prémunir) ;

- les maxima de températures mesurés à Saint-Loup sont plus faibles, potentiellement à cause de l'effet inertiel engendré par les surfaces urbaines minérales et/ou l'influence plus marquée de la mer.

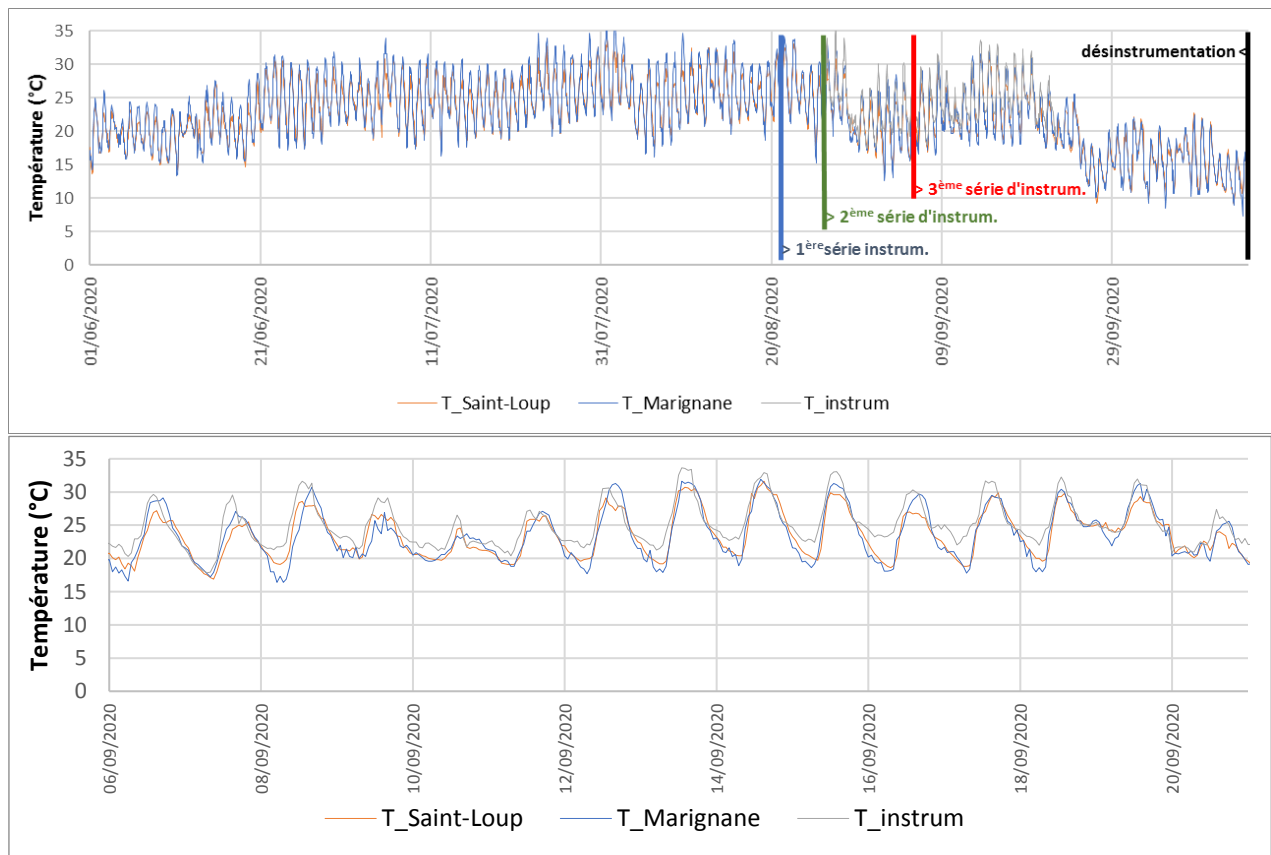


Figure 6. Evolution de la température extérieure sur la période estivale selon les différentes sources.

Il a été préféré de **retenir les données météorologiques de Saint-Loup** à celles de Marignane car cette dernière est trop éloignée de la zone d'étude et est influencée par un environnement plus dégagé, moins urbain (vent plus important, pas d'effet d'îlot de chaleur urbain) et moins humide (d'après les relevés d'hygrométrie non présentés ici).

Les données issues de l'instrumentation ont permis de valider la cohérence et la représentativité des données de Saint-Loup.

1.1. Caractéristiques du climat étudié

Niveaux de température

En été, le climat de Marseille est caractérisé par des températures moyennes relativement élevées et assez stables tout au long de l'été (25 à 27°C) mais bénéficiant d'amplitudes quotidiennes assez faibles grâce à l'inertie apportée par la proximité de la mer. Ainsi les températures maximales n'atteignent jamais des niveaux très élevés (<35°C), mais réciproquement, les températures nocturnes restent en contrepartie relativement élevées (>20°C).

Ces conditions climatiques conduisent en conséquence à **une chaleur présente en continue sur la période estivale à un niveau relativement constant**²⁹ : les amplitudes de températures étant faibles, les surchauffes diurnes dû à la température extérieure sont peu impactantes (intensité non extrême), mais réciproquement, les baisses nocturnes de la température intérieure sont limitées³⁰. Toutefois, le **climat marseillais** étant en outre **très ensoleillé** et la **ville très minéralisée**, cela **accroît les risques de surchauffes**.

Périodes d'études

En lissant les données météo, il est possible de **distinguer 2 conditions représentatives de cette période estivale** :

- les premières, dites « **de base** » caractérisées par une température moyenne d'environ 25°C ;
- les secondes, dites « **critiques** » caractérisées par une température moyenne d'environ 27°C (+2,3°C).

La période de base va du 21/06 au 28/06 avec une seconde période du 13/09 au 19/09, entrecoupée par des périodes critiques du 29/07 au 03/08 et du 11/08 au 15/08 et du 20/08 au 23/08.

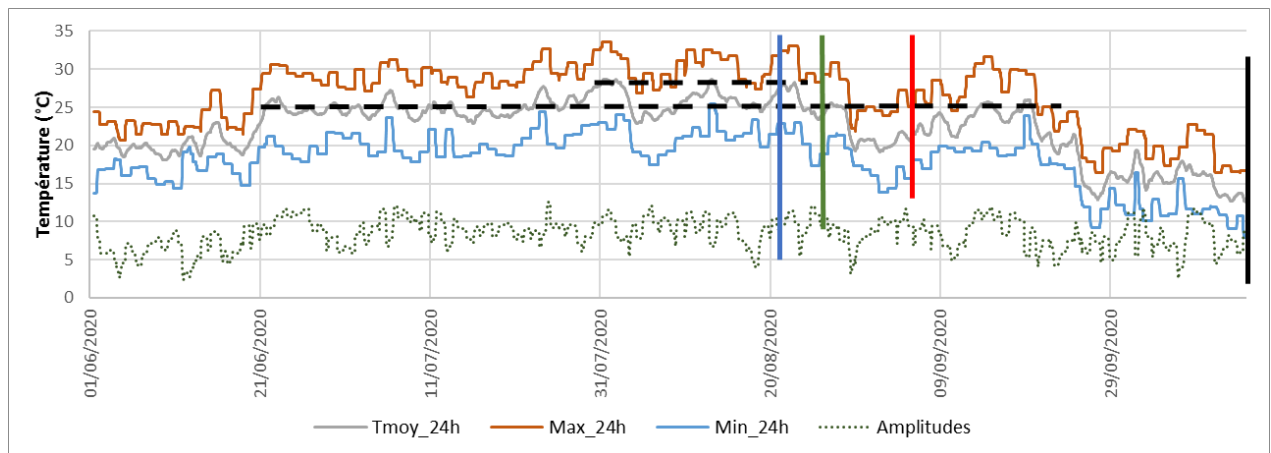


Figure 7. Evolution lissée de la température extérieure sur la période estivale.

Les deux premières séries d'instrumentation ont permis de capter la fin de la première période de base et toute la seconde période courant septembre. Par contre, seule la première série d'instrumentation a permis de capter une période critique (sur les 3 ayant eu lieu lors de cet été).

Les caractéristiques plus détaillées de ces périodes sont données dans ce tableau :

Conditions	Température moyenne (°C)	Moyenne des minimales (°C)	Moyenne des maximales (°C)	Amplitude (°C)
de base	24,8	20,0	29,2	9,2
critiques	27,1	22,3	31,7	9,4

²⁹ Dit trivialement en simplifiant, on y a chaud tout l'été, rarement trop, mais aussi les nuits.

³⁰ Par opposition à des climats estivaux relativement frais en moyenne, mais pouvant affronter ponctuellement des pics de chaleurs de bien plus forte intensité et bénéficiant de températures nocturnes plus fraîches.

Confort hygrothermique

Avant de s'intéresser au confort dans les logements, il est utile de situer les conditions extérieures par rapport aux indicateurs de confort définis précédemment (Figure 8 et Tableau 1).

Tableau 1. Pourcentage du temps où les conditions extérieures sont jugées inconfortables selon différents indicateurs.

	Période de base	Période critique
Hors COSTIC	82,2%	89,2%
Hors ASHRAE	68,4%	78,9%
Hors Givoni*	0 m/s 46,7%	61,7%
	0,5 m/s 7,4%	32,8%
	1 m/s 0,4%	8,3%
	1,5 m/s 0,0%	0,6%
Hors NF 15 251	cat. 58,4%	66,9%
1	cat. 2 44,7%	46,9%
	cat. 3 32,8%	25,8%

*Suppression de la borne inférieure à 20°C

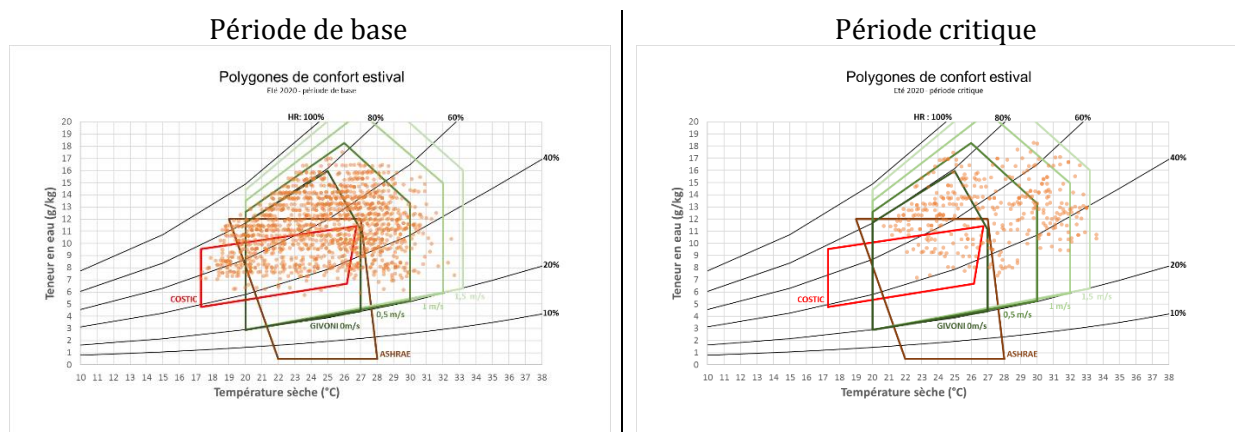


Figure 8. Représentation des conditions estivales de base et critique sur les diagrammes psychométriques.

On observe ainsi, qu'au sens du COSTIC et du standard 55 de l'ASHRAE, des techniques de rafraîchissement et de déshumidification sont indispensables, d'autant plus en période critique. Ces techniques peuvent être actives (climatisation) ou passives (exploitation du potentiel nocturne grâce à l'inertie). Ces indicateurs sont en réalité plus adaptés aux bâtiments climatisés³¹, car d'expérience³² les niveaux d'humidité maximums ne peuvent être atteints qu'avec un système de déshumidification, sans toutefois que ceux-ci n'engendrent pour autant un inconfort si la température reste acceptable. Toutefois, en comparant l'inconfort des conditions extérieures avec celles intérieures, il peut être intéressant de voir si les pièces étudiées « ramènent », ou pas, des points dans ces polygones de confort ; autrement dit, si les logements apportent du confort au sens de l'ASHRAE ou du COSTIC par rapport aux conditions extérieures.

En revanche, au sens de Givoni, largement utilisé pour caractériser le confort en milieu tropical et méditerranéen tant il constitue une référence pour la communauté internationale des architectes et ingénieurs, on remarque que **l'essentiel du confort peut être assuré grâce à un léger courant d'air** (0,5 m/s) en période de base, et un balayage légèrement plus important en période critique (1 à 1,5

³¹ Du fait du lien de ces structures aux industries de la climatisation.

³² Retour d'expérience du LowCal, Enertech (publication des rapports à venir).

m/s³³). Cette situation, **spécifique à Marseille grâce à l'influence de la mer**, ne peut pas être généralisée hors bande littorale en zone méditerranéenne, car les maximales en période critique dépassent régulièrement les 33°C (il conviendrait en quel cas d'utiliser d'autres zones caractérisées par Givoni correspondant à d'autres stratégies que la ventilation naturelle continue). De plus, si l'on suit la projection du scénario A1B du GIEC³⁴ pour le climat de Marseille en 2070, en moyenne, la température dépassera 33°C pendant 117h cumulées (réparties sur 24 jours), contre 2h en 2020, ce qui limiterait grandement la pertinence de la stratégie « ventilation naturelle continue ».

Enfin, notons que l'air est rarement humide lors des pics de températures en période critique. C'est donc plus le niveau de température que l'humidité qui génère de l'inconfort dans ces périodes.

1.2. Positionnement par rapport aux historiques

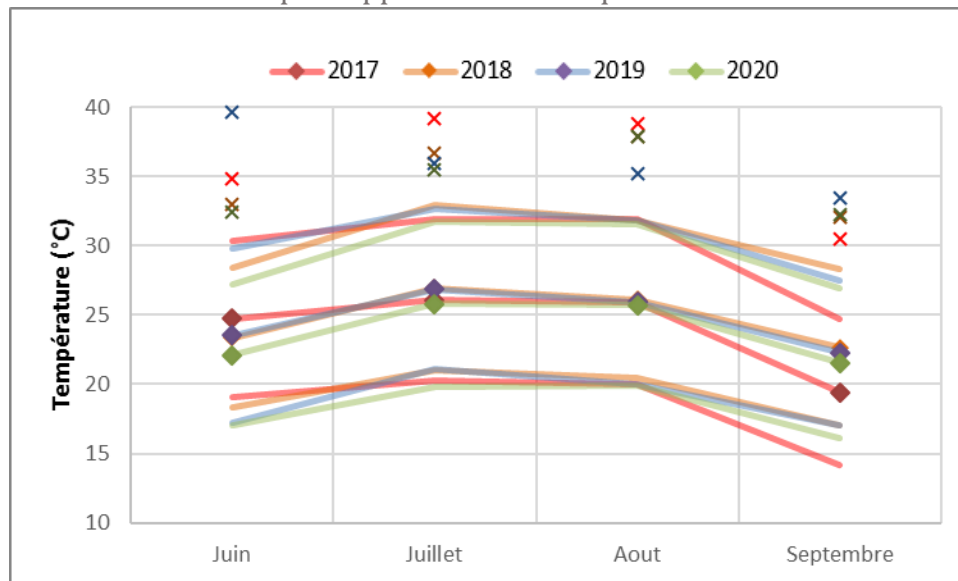


Figure 9. Statistiques mensuelles des températures estivales sur les 5 dernières années.

Il est intéressant de situer la période estivale par rapport aux dernières années afin d'estimer sa « criticité » (fait pour la station de Marignane). La figure suivante représente l'historique de ces quatre dernières années, avec en losange les températures mensuelles moyennes, encadrées par les maximales et minimales moyennes. Sont également indiqués les maximaux absolus (croix).

On remarque que les moyennes de l'année 2020 sont plutôt inférieures par rapport aux années précédentes, mais relativement proches (1°C d'écart). Cette tendance s'observe aussi pour les maximales et les minimales. **L'été 2020 a donc été relativement plus frais que les 3 précédents (donc moins critique en termes d'inconfort d'été), mais les niveaux restent tout à fait comparables.**

³³ Pour mémoire, on considère qu'un brasseur d'air génère une vitesse d'air de 0,5 à 1 m/s.

³⁴ Croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète, population mondiale atteignant un maximum de 9 milliards d'individus au milieu du siècle pour décliner ensuite, nouvelles technologies énergétiquement efficaces introduites rapidement (utilisation des différentes sources énergétiques sans en privilégier une en particulier). Ce scénario conduit approximativement à une augmentation de 2,5°C de la température moyenne.

2. Analyse globale

Les différents éléments extraits de l'analyse croisée campagne de mesure-enquête sociologique sont regroupés dans 4 thèmes : confort dans les logements ; gestion du confort d'été, travaux, impact des travaux de rénovation thermique sur le confort d'été.

2.1. Confort dans les logements

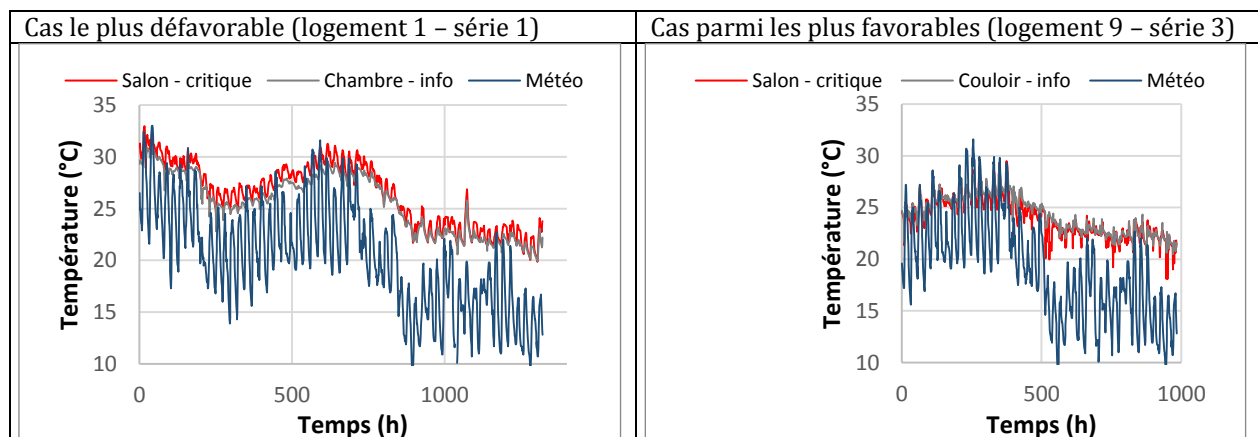
(1) Des logements trop chauds

Les indicateurs d'inconfort montrent quasi-systématiquement que **l'ambiance intérieure est plus inconfortable que l'ambiance extérieure** (se reporter au tableur joint), notamment lorsqu'ils n'intègrent pas le potentiel d'adaptation. Dans tous les logements, la température moyenne intérieure est très significativement supérieure à la température extérieure.

Seule la prise en compte de l'adaptation (NF 15 251) permet d'atteindre nettement des conditions plus confortables, au sens normatif, en intérieur qu'en extérieur, notamment pour les seuils les plus élevés (catégorie 2 et 3). Cela traduit une forte atténuation des pics de température en intérieur (effet tampon du bâtiment dû à l'inertie). C'est donc bien le niveau moyen de la température intérieure qui explique l'inconfort mesuré plus que les potentiels pics de celle-ci.

Dans plusieurs cas, on observe que la température intérieure moyenne est quasiment égale, voire supérieure, à la température maximale extérieure (maximale moyenne en période de base de 29,2°C et température moyenne des pièces étudiées comprises entre 26°C et 29,6°C).

Enfin, la période critique entraîne un accroissement net de l'inconfort mesuré. Ces épisodes sont donc bien justement critiques.



(2) Un confort perçu a priori adaptatif et faisant appel à un brassage d'air

L'enquête-suivi (Figure 1), complétée par 6 occupants (voir exemple sur la Figure 10), a notamment permis de corréliser l'inconfort perçu par les occupants avec les indicateurs usuels d'inconfort (voir section *Indicateurs*).

Les figures suivantes représentent l'évolution des conditions intérieures sur l'ensemble de la campagne de mesure (et non uniquement sur les périodes de base et critique, d'où la présence de température relativement basses en fin d'instrumentation) selon les différentes représentations liées aux indicateurs d'inconfort. Y sont mis en évidence les conditions indiquées comme inconfortables

par les occupants par des cercles rouges (leur taille indiquant, lorsque spécifiée, l'intensité de l'inconfort).

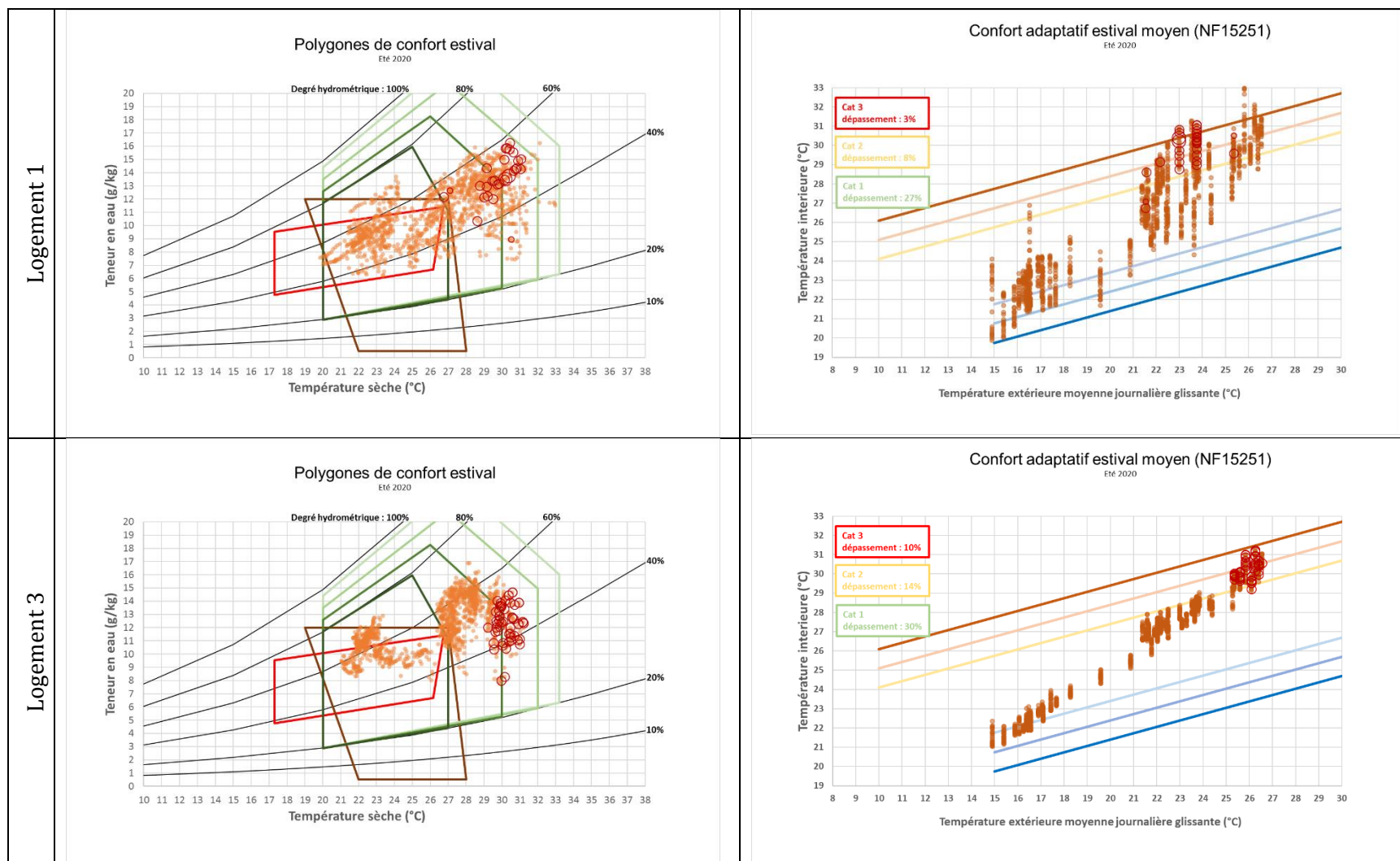
Notons que les occupants ont seulement relevé certaines périodes inconfortables et non pas toutes les périodes inconfortables lors de la campagne de mesure. On ne peut donc pas tirer de conclusions des points inconfortables au sens des indicateurs mais non indiqués comme inconfortables.

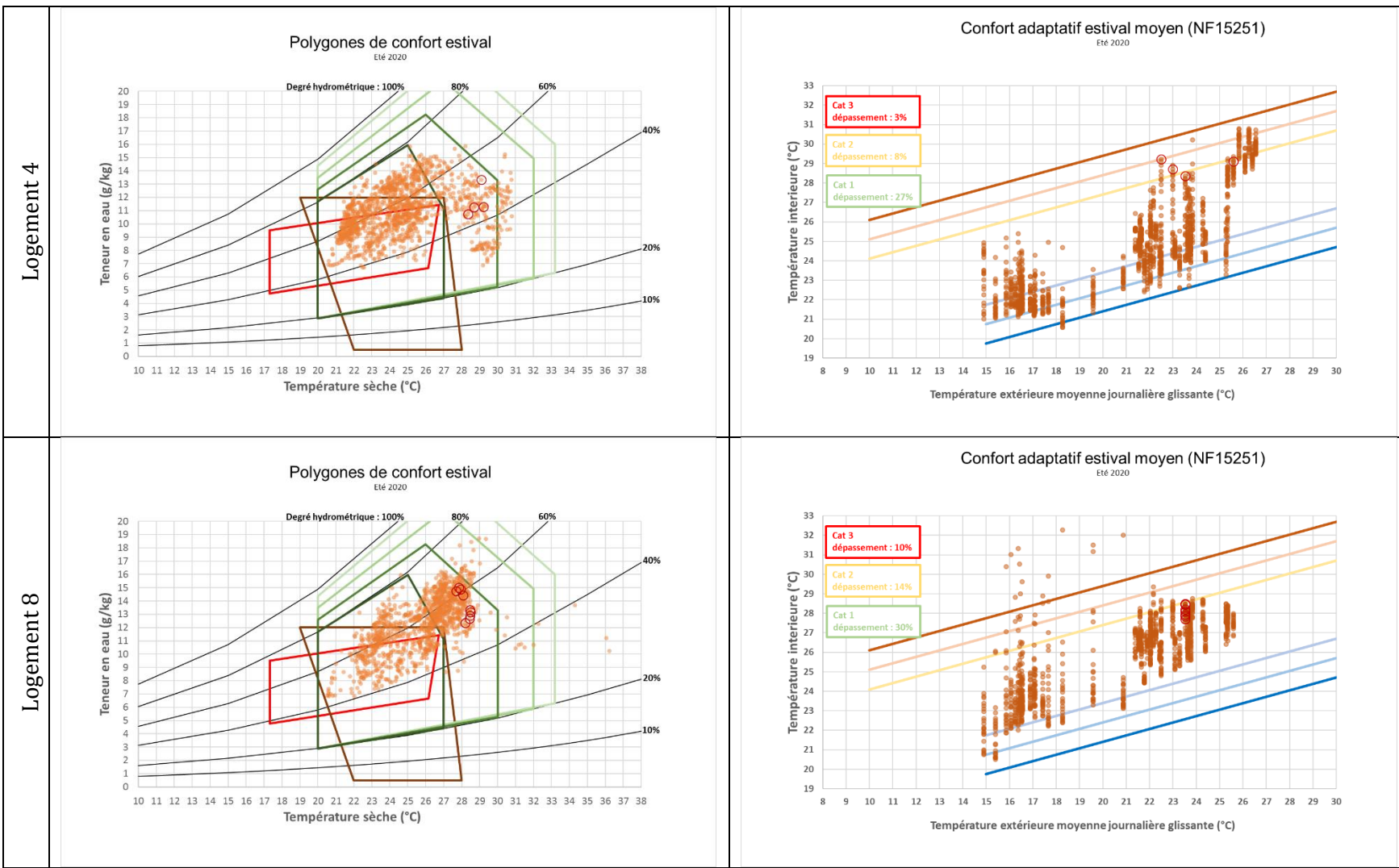
En revanche, on observe que **globalement les niveaux d'inconfort indiqués sont cohérents avec la catégorie 1 du confort adaptatif NF 15251 et avec la limite définie par Givoni pour une vitesse d'air de 0,5 m/s**. Les seuils exacts de sensibilité semblent certes varier d'un individu à l'autre, mais ils se situent systématiquement proches des limites mentionnées. Les polygones du COSTIC et de l'ASHRAE semblent définitivement non adaptés à des logements non climatisés et à des occupants habitués à vivre en climat méditerranéen.

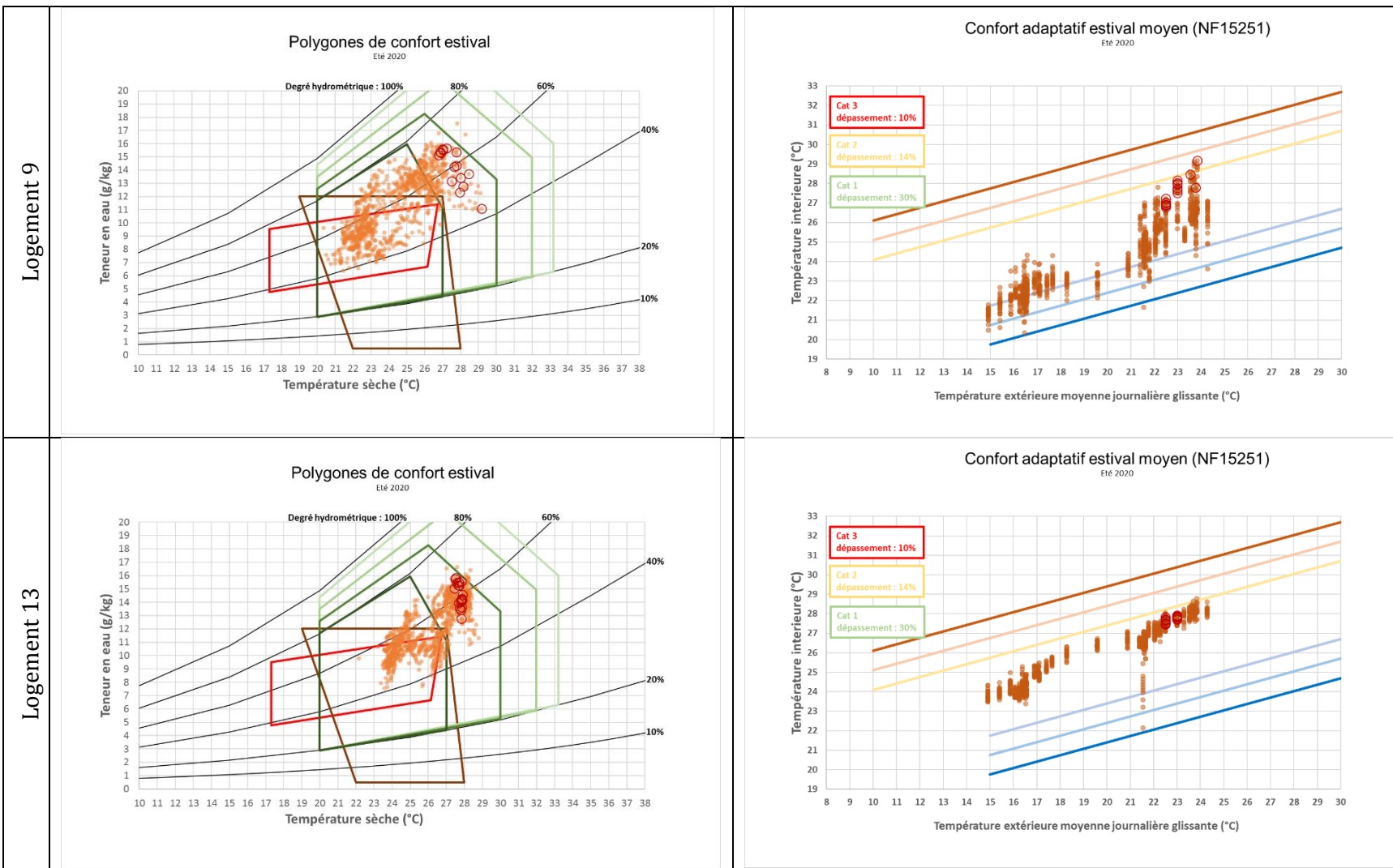
Cette observation est corrélée avec le niveau d'inconfort global indiqué par les occupants. En effet, les logements indiqués comme inconfortables par leurs occupants sont quasiment systématiquement ceux dont un inconfort persiste nettement au-delà des premiers seuils de Givoni et de la NF 15251.

On peut également remarquer que l'inconfort engendré par l'humidité semble cohérent avec les seuils de Givoni :

- pas d'influence pour une hygrométrie inférieure à 50%, seule la température de l'air explique l'inconfort (logement 3 notamment) ;
- Au-delà, la température limite d'inconfort décroît avec l'hygrométrie (logement 8 et 9).







Ces niveaux d'inconfort, notamment en période critique, **engendrent une réelle souffrance pour la majorité des occupants**. L'inconfort est perçu de façon d'autant plus critique en cas de présence de personnes âgées ou inversement d'enfants en bas-âge. On constate alors une volonté de surprotection. Aussi, pour cette interviewée : « en été, on a une clim qui se déplace. J'ai un papa qui cumule plusieurs difficultés de santé, on peut pas se permettre de prendre le risque, même si lui il dit parfois qu'il a pas chaud. Je crois qu'il se rend pas compte. Il est vieux, et malade aussi ».

L'enquête sociologique a permis de mettre en évidence une **disparité de perception** de l'inconfort au sein d'un même ménage (souvent entre homme et femme d'un couple).

Inconfort qui d'ailleurs peut générer une « migration thermique » (3 cas de chambres se transformant en salons ; 5 cas de salons se transformant en chambres ; 1 cas de changement d'étage) et des modifications des comportements (cuisiner chaud plutôt le soir, rentrer plus tard du travail). « La pièce l'après-midi elle est en plein soleil, alors on passe de l'autre côté où il y a moins de soleil. A partir de 14h00 c'est impossible de rester, c'est une vraie fournaise (...) Le soir, souvent en été, on a une petite télé dans notre chambre, ça fait salon »

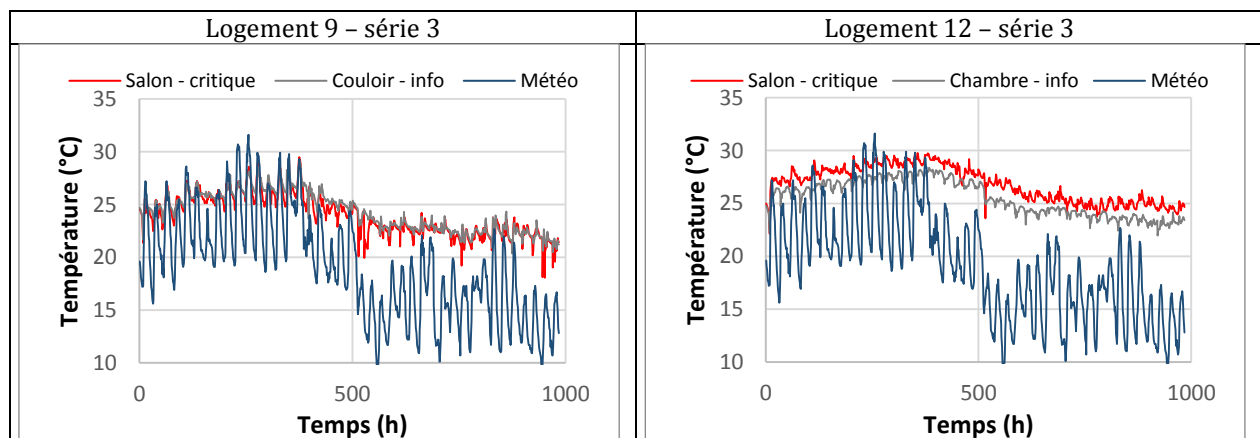
Parmi les 7 ménages enquêtés on relève une plus forte « résistance » à la chaleur de la part des propriétaires. Cela s'explique probablement par le fait qu'ils ont engagé eux-mêmes les travaux et qu'il leur est peut-être plus difficile de critiquer leurs propres démarches. A l'inverse, les locataires semblent moins résistants à la chaleur.

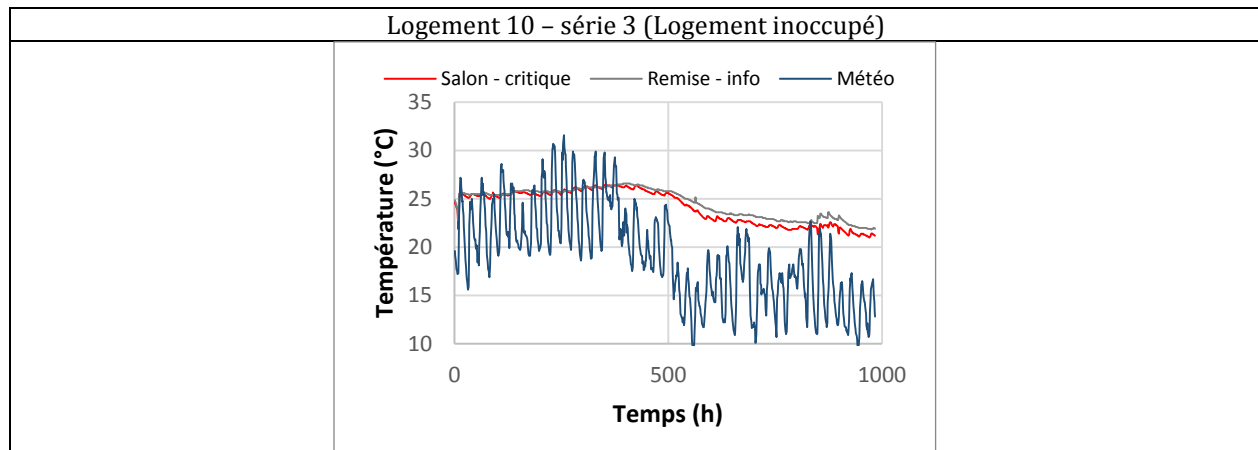
Il ne semble pas y avoir de lien direct entre le confort ressenti et la trajectoire résidentielle des occupants (les personnes ayant vécu dans des logements chaud l'été ou sous des climats plus chauds ne semblent pas pour autant mieux supporter la chaleur).

(3) Un inconfort bien plus lié à l'usage qu'aux caractéristiques du bâti

En croisant les caractéristiques du bâti avec les niveaux d'inconfort, il apparait nettement qu'il n'y a **pas de lien direct** entre eux : les logements les plus défavorisés a priori vis-à-vis du confort d'été ne sont pas les plus inconfortables et inversement.

Par exemple, dans la même série d'instrumentation et dans le même corps de bâtiment, le logement 9 qui cumule une exposition et un étage plus défavorables que le logement 12, est mesuré comme étant nettement plus confortable (inconfortable 46% du temps contre 100% au sens de Givoni sans vitesse d'air).





Ces écarts s'expliquent par la gestion du logement par les occupants, notamment en termes d'ouverture des fenêtres (comme nous le verrons en détail dans le point (7)). **En effet le comportement des occupants peut avoir beaucoup plus d'impact sur la thermique du logement que les propriétés physiques de celui-ci**, jusqu'à même en être la principale source de variabilité, comme l'atteste les relevés de température ci-dessus, issus de logements d'un même corps de bâtiment.

(4) Impact potentiel de la température des parois, notamment sous-toiture

Deux logements (5 et 6) dont les occupants indiquaient souffrir fortement de la chaleur ne ressortent pas particulièrement au sens des indicateurs. Ces deux logements ont comme point commun d'être sous les toits. Il est donc très probable que la **chaleur accumulée par le toit en journée** soit transmise en fin de journée à l'intérieur du logement **entraînant une élévation notable de la température du plafond** par rapport à l'air ambiant, augmentant de fait la température opérative (ressentie) et invalidant l'hypothèse retenue dans la partie *Indicateurs* (température de l'air \approx température opérative).

Pour donner un ordre de grandeur, on a mesuré que la température dans les combles du logement 6 montait jusqu'à 45°C au plus fort de la journée à 16h. On peut estimer le déphasage du plafond (laine de roche/canisses/plâtre) à environ 12h et l'atténuation de l'onde chaleur à 70%. La température de surface du plafond est donc environ 6°C plus chaude que l'air ambiant à 4h du matin, augmentant mécaniquement la température opérative. Dans le cas le plus favorable, si l'on fait une moyenne globale des températures des parois, la température ressentie serait supérieure d'environ 0,5°C. Toutefois, la contribution de la température du plafond est majoritaire pour une personne allongée dans un lit (facteur de vue ou exposition plus importante), en quel cas la température ressentie serait alors au maximum supérieure de 3°C par rapport à la température de l'air, dégradant nettement le confort.

Cette surchauffe est certainement plus importante pour le logement 5 dû à l'absence de combles ventilés et à une isolation probablement moindre (toit terrasse).

2.2. Gestion du confort d'été

(5) Un potentiel de rafraîchissement nocturne peu exploité...

Plusieurs indices sur les relevés de température mènent à penser que **le rafraîchissement nocturne est peu utilisé**.

Tout d'abord, les températures moyennes dans les logements sont systématiquement supérieures à la température extérieure moyenne (d'au moins 1,3 °C). Cela peut être dû à des surchauffes trop importantes en journée pour être évacuées et/ou un rafraîchissement nocturne par ventilation naturelle sous-exploité (la ventilation nocturne peut, dans le cas limite théorique, faire tendre la température intérieure moyenne vers la température nocturne moyenne).

Ensuite, les abaissements de températures la nuit, par rapport à la température moyenne du logement sont la plupart du temps très faibles :

- inférieure à 1°C pour 6 logements sur 16 ;
- comprise entre 1 et 2°C pour 9 logements sur 16 ;
- supérieure à 2°C pour 1 logement seulement.

Dans les 2 premiers cas, cela traduit soit une très forte inertie des logements, soit un rafraîchissement nocturne par ventilation naturelle sous-exploité, car la température nocturne descend bien en deçà de la température moyenne des logements (autour de 20°C).

Enfin, **la faible utilisation de la ventilation nocturne a été confirmée par les entretiens avec les occupants et les enquête-suivis** (voir *Figure 10*).

(6) ... pour plusieurs raisons

D'un point de vue thermique, il est indispensable de ventiler la nuit pour rafraîchir le plus possible le logement. Pas forcément tous conscients de ce potentiel³⁵, **les occupants nous ont toutefois souvent détaillé les raisons pour lesquelles ils ne ventilaient pas la nuit :**

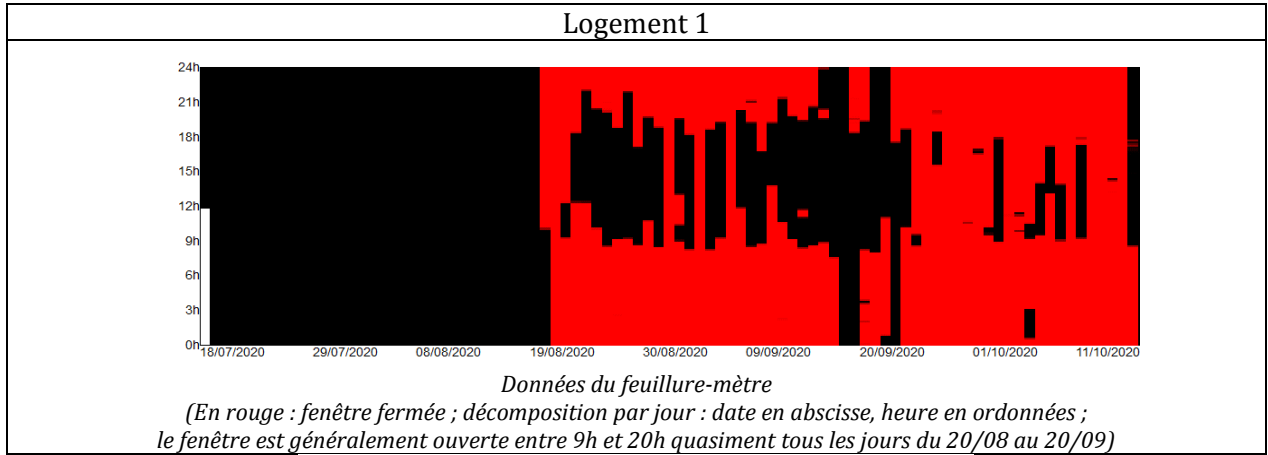
- risque d'intrusion ;
- nuisance sonore ;
- présence de moustiques ;
- craintes pour les enfants.

Ces « blocages » ne peuvent concerner qu'une partie des ouvertures, mais cela contribue souvent à empêcher un balayage traversant, réduisant le potentiel de rafraîchissement (débit de renouvellement d'air plus faible dans des proportions de 4 ou 5 voire d'avantage en l'absence de balayage traversant).

(7) Une gestion majoritaire en ventilation naturelle diurne

Contrairement à ce qu'on attendrait d'un comportement « idéal », « thermiquement parlant », il apparaît que **les fenêtres sont très souvent ouvertes en journée**. Ce comportement est confirmé à la fois par les entretiens avec les occupants, l'enquête-suivi et les feuillures-mètres (capteur de fermeture des fenêtres) – voir exemples ci-dessous.

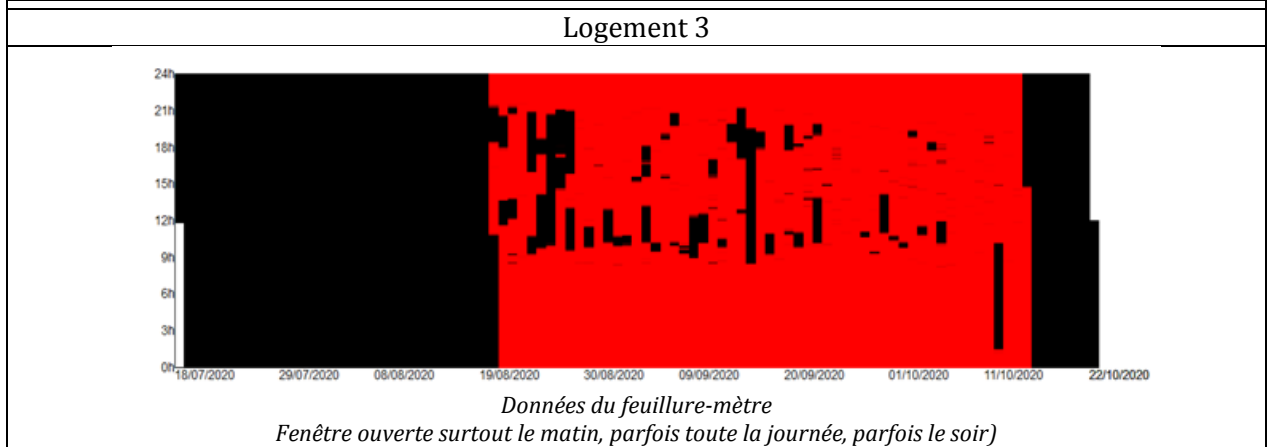
³⁵ Pourtant mentionné dans les « conseils pour un bon usage » rubrique « Confort d'été » des DPE : « Ouvrez les fenêtres en créant un courant d'air, la nuit pour rafraîchir ».



Date: 16/09/2020 Pièce: Salon

Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Occupation								1	1	2	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
Inconfort								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Ouverture des fenêtres								Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Fermeture des volets																								
Utilisation de ventilateur																								
Utilisation d'appareils																								
Commentaires libres								T2 alléant							Pous ballons									

Extrait de l'enquête-suivi



Date: 20/08/20 Pièce: Salon - Salle à manger

Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Occupation								X																X
Inconfort													X							X				
Ouverture des fenêtres										X									X					
Fermeture des volets (☒)												X												X
Utilisation de ventilateur																								
Utilisation d'appareils																								
Commentaires libres																								

Extrait de l'enquête-suivi

Logement 8

Date: 13/09/20 Pièce: salon

Heure	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Occupation																								
Inconfort																								
Ouverture des fenêtres	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Fermeture des volets										X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Utilisation de ventilateur											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Utilisation d'appareils																								
Commentaires libres	Ouverture des fenêtres de salon et de cuisine → Courant d'air																							

Extrait de l'enquête-suivi

Logement 16

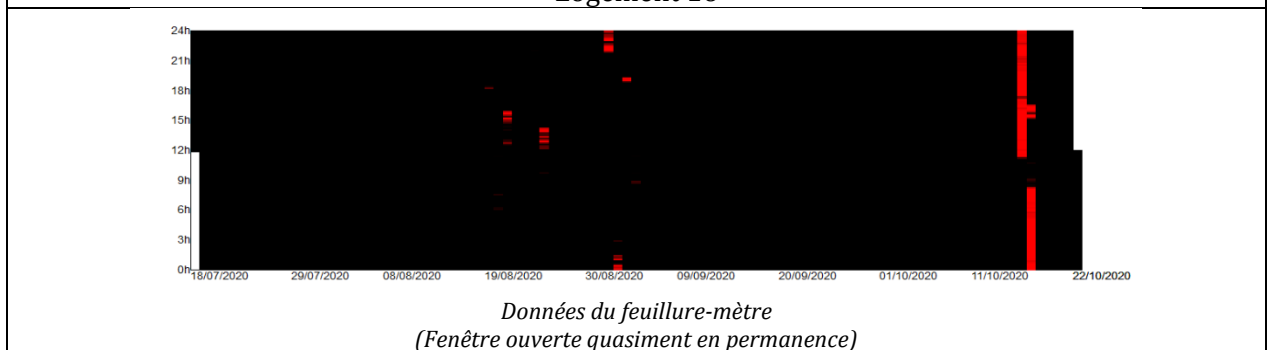


Figure 10. Sources concernant l'usage des occupants

Ces habitudes sont reportées dans le tableur de synthèse. **L'ouverture des fenêtres en journée et donc très courante dans les logements étudiés.**

Ce fonctionnement, dit en ventilation naturelle diurne, couramment utilisé en milieu tropical, peut être justifié par les caractéristiques particulières du climat marseillais en été : températures maximales relativement peu élevées³⁶ et amplitudes relativement faibles³⁷.

Les températures extérieures étant relativement supportables, notamment avec un léger courant d'air (voir Figure 8), les occupants ont tendance à ouvrir les fenêtres pour générer ce courant d'air et évacuer, ou du moins limiter, les surchauffes dues aux apports solaires et aux apports internes (occupants, équipements électroménagers, etc.).

Il est difficile de déterminer si ce comportement est souhaité a priori ou imposé a posteriori par le fait qu'il fasse plus chaud à l'intérieur qu'à l'extérieur. Dans le second cas, la chaleur trop élevée du logement peut être un effet corolaire direct du manque de ventilation nocturne ou de source de surchauffe trop importante (apports internes ou apports solaires).

On considère en général qu'un vent d'un mètre par seconde sur la peau réduit la température ressentie de 3°C ou 4°C autour de 28°C. Autrement dit, s'il fait 29°C dehors, l'option d'ouvrir les fenêtres dès que la température intérieure dépasse 26°C (ce qui est toujours le cas en moyenne dans les logements instrumentés) pour profiter du courant d'air sera préférée, plutôt que de se contenter d'un air plus frais mais statique. Ainsi, pour qu'une alternative de gestion à la stratégie ventilation naturelle diurne soit préférée, il faudrait qu'elle permette de maintenir la température intérieure en deçà de 26°C au plus fort de la journée.

Il est aussi probable qu'une perception d'enfermement soit susceptible de rajouter une dimension d'inconfort psychologique à l'inconfort thermique d'été, conduisant les occupants à ventiler à des moments de la journée où les apports de chaleur vont conduire à détériorer ce confort.

(8) Un usage courant des ventilateurs

L'usage du ventilateur est par ailleurs largement répandu (dans plus de la moitié des logements), souvent en complément de l'ouverture des fenêtres, pour augmenter la sensation de confort avec un vent relatif plus important.

Il convient de noter que dans le projet s'intégrant dans la démarche BDM, il a d'ailleurs été prévu, dans la programmation des travaux, d'installer des brasseurs d'air plafonniers dans les logements les plus défavorisés vis-à-vis du confort d'été (logement 15).

(9) Des occultations largement utilisées...

A partir de l'enquête sociologique et de l'enquête-suivi, il apparaît que **les occultations sont largement utilisées** en journée pour limiter les apports solaires. Ces éléments sont confirmés par la mesure car on n'observe quasiment jamais d'élévation trop importante des températures (supérieures à 2°C). Les seuls cas concernés pas des surchauffes plus importantes sont les logements mono-orientés avec une exposition défavorable (logement 14, 15 et 16), qui malgré l'usage d'occultations, surchauffent à cause de l'intensité du flux solaire (incidence quasi-directe) ; de façon

³⁶ Rappelons que cet aspect n'est pas généralisable hors bord de mer et que ces aspects risquent fortement de se dégrader avec le réchauffement climatique.

³⁷ Voir partie *Caractéristiques du climat étudié*.

plus critique encore pour les 2 derniers exposés Ouest, car le soleil est incident en fin de journée lorsque les températures sont également les plus élevées.

(10) ... et indispensables !

La surchauffe sur les expositions défavorables peut être amplifiée par la présence de loggias, notamment lorsqu'elles sont intégralement vitrées et dépourvues d'occultation, comme c'est le cas pour le logement 2. Les mesures montrent que la température y monte à presque 36°C. Le salon adjacent n'est pas trop impacté car ces différentes zones sont largement ouvertes et un volet roulant le protège des apports solaires.

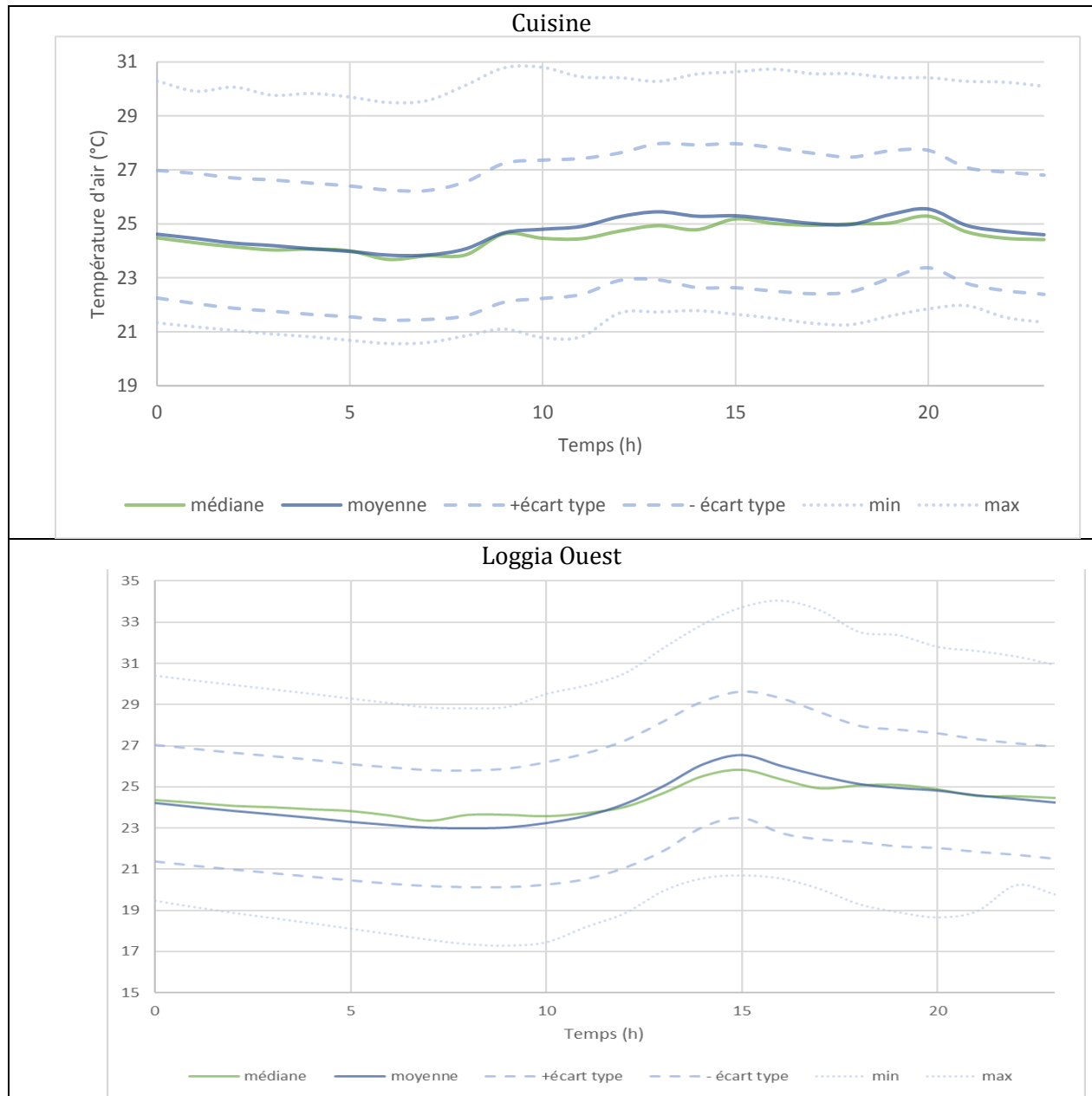


Figure 11. Statistique journalières des températures pour le logement 4.

Il est notable de remarquer que dans le logement 4, à l'occasion des travaux, la loggia Est a été intégrée dans le volume de la cuisine. Elle ne joue donc plus un rôle d'espace tampon. Les risques de

surchauffes existent, notamment en l'absence d'occultations (il est prévu par l'occupant d'installer des stores intérieurs, mais précisons qu'au mieux leur facteur solaire sera de 0,4 contre 0,1 pour des stores extérieurs³⁸). On observe d'ailleurs dans les relevés de température un pic quotidien de température vers 9h dans cette cuisine³⁹ (Figure 11a). Pic à l'origine du maximum absolu de température pour cette pièce. Pour la même raison, un pic est aussi observé en fin de journée dans la loggia Ouest (Figure 11b).

2.3. Travaux

(11) *Des motivations indépendantes du confort d'été*

A aucun moment le confort d'été n'a été évoqué par les occupants comme motivation pour réaliser les travaux. L'impact bénéfique ou néfaste que pourraient causer les travaux ne semble globalement pas perçu.

On peut toutefois citer un cas (logement 12) où le remplacement des volets existants par des volets roulants a été perçu comme une amélioration de la gestion du confort d'été grâce à meilleure maniabilité.

Également, l'occupant du logement 2 indiquait penser que la VMC permettait d'apporter de la fraîcheur dans le logement, ce qui n'est pourtant pas vraiment le cas (la température extérieure en journée étant généralement plus chaude, la vitesse d'air engendrée insuffisante pour augmenter la sensation de confort et les débits insuffisants pour modifier sensiblement la température intérieure).

Il semble donc y avoir une **certaine méconnaissance des gains en termes de confort d'été** que pourraient apporter des travaux d'amélioration thermique.

Il s'est avéré que les motivations étaient plutôt d'ordre économique et esthétique, mais aussi liées à une recherche d'amélioration du confort d'hiver.

Les impacts les plus notables relevés concernent la réduction des infiltrations d'air : « Les fenêtres en globalité ça a été une révolution, on sentait du vent dans la maison (...) Ça nous isole à la fois du chaud du froid et du bruit ».

(12) *Une incompréhension de l'intérêt des travaux, notamment pour les locataires*

Les locataires se sont montrés globalement très critiques vis-à-vis des travaux qui ont été réalisés. Plusieurs malfaçons réelles ou supposées nous ont été relevées.

Au sujet des malfaçons supposées mais non avérées, notons notamment la suspicion d'absence d'entrée d'air pour la ventilation suite aux travaux des logements 9 à 16 et une impression de « suffocation » relevée par certains, alors que les entrées d'air sont bien présentes (dans les caissons des volets roulants) et l'extraction apparemment suffisante.

Notons qu'**une meilleure appropriation des travaux par les occupants paraît nécessaire.**

(13) *Présence de défauts et de malfaçons*

Plusieurs défauts de mise en œuvre ont pu être observés lors des visites sur site⁴⁰.

³⁸ Car le vitrage fait effet de serre (bloque le rayonnement infrarouge des surfaces chauffées par le flux solaire).

³⁹ Le second pic à 20h est probablement dû à la préparation de repas.

⁴⁰ Relevé non exhaustif.

Notamment au niveau des 2 combles visités (logements 6 et 7)⁴¹ :

- Défaut de continuité (photo 1), notamment dû à la présence d'objets non dégagés (photo 2) ;
- Absence de traitement de l'étanchéité à l'air du support (au niveau des traversées de dalle) ;
- Etanchéité et isolation des trappes d'accès non traitées (photo 3) ;
- Défaut de ventilation du comble par absence d'entrées d'air suffisante (photo 4).



Au-delà des risques de condensation que ces défauts peuvent entraîner en hiver, ces défauts engendrent également des contre-performances en été dues à une performance thermique dégradée. En particulier, le défaut de ventilation des combles entraîne des surchauffes très importantes (atteinte de 40°C dans le logement 7 et 45°C dans le logement 6). Bien que l'isolation réduise la conduction de la chaleur dans le logement via le plafond, il se peut que son effet soit en l'état contre-productif :

- les combles sont en effet plus chauds en présence d'isolant (la chaleur s'évacuant moins à travers le plafond), notamment à défaut d'une ventilation suffisante, ce qui s'oppose en partie au gain apporté par l'isolation ;

⁴¹Voir notamment « [Isolation des combles perdus par soufflage – 12 enseignements à connaître](#) », AQC, 2020.

- et le déphasage engendré par l'isolant, fait que la chaleur traversant le plafond, bien que plus faible qu'auparavant, est transmise à un moment moins approprié, car au milieu de la nuit, lorsque la chambre est occupée, et non plus en journée, probablement hors occupation (voir Figure 12). Le confort ressenti est donc dégradé, d'autant plus que la ventilation nocturne n'est pas utilisée.

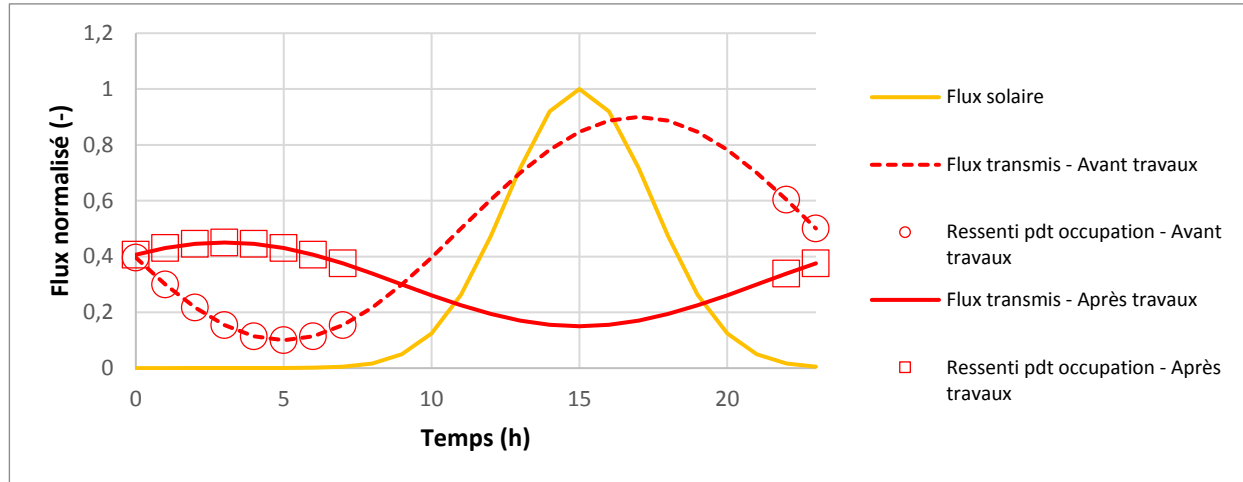


Figure 12. Représentation schématique des modifications engendrées après isolation des combles.

On peut également relever, dans le logement 14 l'incompatibilité des nouvelles menuiseries avec l'aménagement des occupants. Avant travaux les fenêtres ne devaient s'ouvrir que sur leur partie haute permettant de disposer une table et un canapé contre. Désormais, les fenêtres s'ouvrant sur toute la hauteur, ces mobiliers entravent leur ouverture et limitent les possibilités de ventilation.

Enfin, l'occupant du logement 15 craint d'ouvrir les fenêtres du salon en présence de ses enfants à cause de la présence d'une margelle entre l'ouverture et le garde-corps, suite aux travaux d'isolation par l'extérieur, a priori non prévue pour supporter le poids d'une personne. De plus, la nouvelle porte sécurisée installée présentait d'importants joints sur l'extérieur (les entreprises devaient encore passer pour rectifier ces défauts).

(14) Des travaux « incomplets »

Il est ressorti à plusieurs reprises **que les occupants n'avaient pas pu réaliser l'ensemble des travaux qu'ils auraient souhaité**, souvent pour des causes financières. Citons notamment le cas de l'occupant du logement 6 qui regrette l'absence d'isolation de sa façade (qui rend d'ailleurs les travaux réalisés préjudiciables au confort d'été, voir *Bilan de l'impact des différents travaux - Retours aux cas d'études*), le changement de ces volets et le non remplacement du puit de lumière de l'escalier source d'importantes déperditions en hiver et source d'apports solaires significatifs en été.

L'occupant du logement 5 regrette pour sa part de ne pouvoir intervenir sur son plafond (toit terrasse), source majeure de déperditions l'hiver et d'apports de chaleurs l'été, car appartenant à la copropriété.

Notons aussi que des travaux coordonnés par des bailleurs n'étaient pas achevés. Certains locataires étaient dans l'attente, parfois très peu au courant des délais.

(15) *La climatisation comme horizon*

Pour la grande majorité des occupants des logements étudiés, **la solution ultime pour le confort d'été est la climatisation**, d'autant plus que cette solution est plutôt socialement valorisée (seules 2 personnes ont tenu un discours « anti-climatisation »). **Son absence dans la plupart des cas s'explique uniquement pour des raisons économiques** (on notera déjà la présence de climatisations mobiles dans au moins 4 logements sur 16).

Il est probable que les économies supposées de chauffage liées aux travaux d'isolation soient réinvesties dans l'achat et l'utilisation d'une climatisation. Aussi 3 interviewés utilisant une climatisation nous ont dit avoir « fait des économies cet hiver grâce à l'isolation », espèrent ainsi « être en équilibre ».

2.4. Impact des travaux de rénovation thermique sur le confort d'été

Afin de déterminer l'impact des travaux de rénovation thermique sur le confort d'été, il aurait fallu être en mesure d'instrumenter les logements avant et après travaux. Toutefois, les conditions intérieures (occupants) et extérieures (météo) auraient de fortes probabilités d'être sensiblement différentes. Il aurait alors été compliqué de distinguer l'impact des travaux de celui dû à la différence des conditions météorologiques ou intérieures.

Seule une analyse théorique peut permettre de ne modifier qu'une seule variable (en l'occurrence les modifications associées aux travaux) en gardant les autres égales par ailleurs (occupant et météo).

Complexité du comportement thermique en été

Toutefois, une telle analyse est relativement compliquée lorsqu'on s'intéresse au confort d'été.

En effet **il est plus difficile de caractériser simplement le comportement d'un bâtiment en été qu'en hiver** car en hiver, les bâtiments sont généralement chauffés et maintenus à une température relativement fixe (évolution dite forcée), les écarts de température entre intérieur et extérieur sont relativement importants sur une longue période, les renouvellements d'air sont connus avec une assez bonne approximation et on s'intéresse à une grandeur cumulée : la consommation d'énergie. Sous ces conditions, il est donc possible de caractériser le comportement du bâtiment avec un nombre réduit de paramètres statiques (indépendante de l'inertie du bâtiment, caractéristiques d'un régime permanent).

	Estimation	Grandeur d'intérêt	Type de grandeur	Paramètre principaux
Hiver	Statique	Consommation de chauffage	Scalaire	Conductance des parois, taux de renouvellement d'air
Été	Dynamique	Evolution temporelle de la température opérative intérieure	Vectorielle	Conductance dynamique des parois, inertie internes, apports solaires, apports internes, ventilation nocturne

En revanche, l'été l'évolution de la température intérieure est dite libre, car il n'y a souvent pas de système actif de refroidissement, et on s'intéresse à l'évolution temporelle de la température. L'inertie joue alors un rôle essentiel dans la réponse du bâtiment. Or cette réponse est influencée par

les conditions initiales, potentiellement très variables d'un cas à l'autre, et par l'impact des occupants. La caractérisation de ce comportement nécessite des calculs dynamiques, c'est-à-dire capables de calculer sur des pas de temps très courts l'évolution continue des températures dans le bâtiment soumises à l'effet variable dans le temps des paramètres climatiques et d'usage.

Méthode générale

Pour **caractériser les performances thermiques d'un bâtiment l'été**, plusieurs **méthodes dynamiques** ont été développées. Celles-ci reposent donc sur un calcul dynamique permettant d'estimer l'évolution de la température intérieure heure par heure, sous des conditions données, et sur la définition d'un indicateur permettant de caractériser le niveau d'inconfort généré.

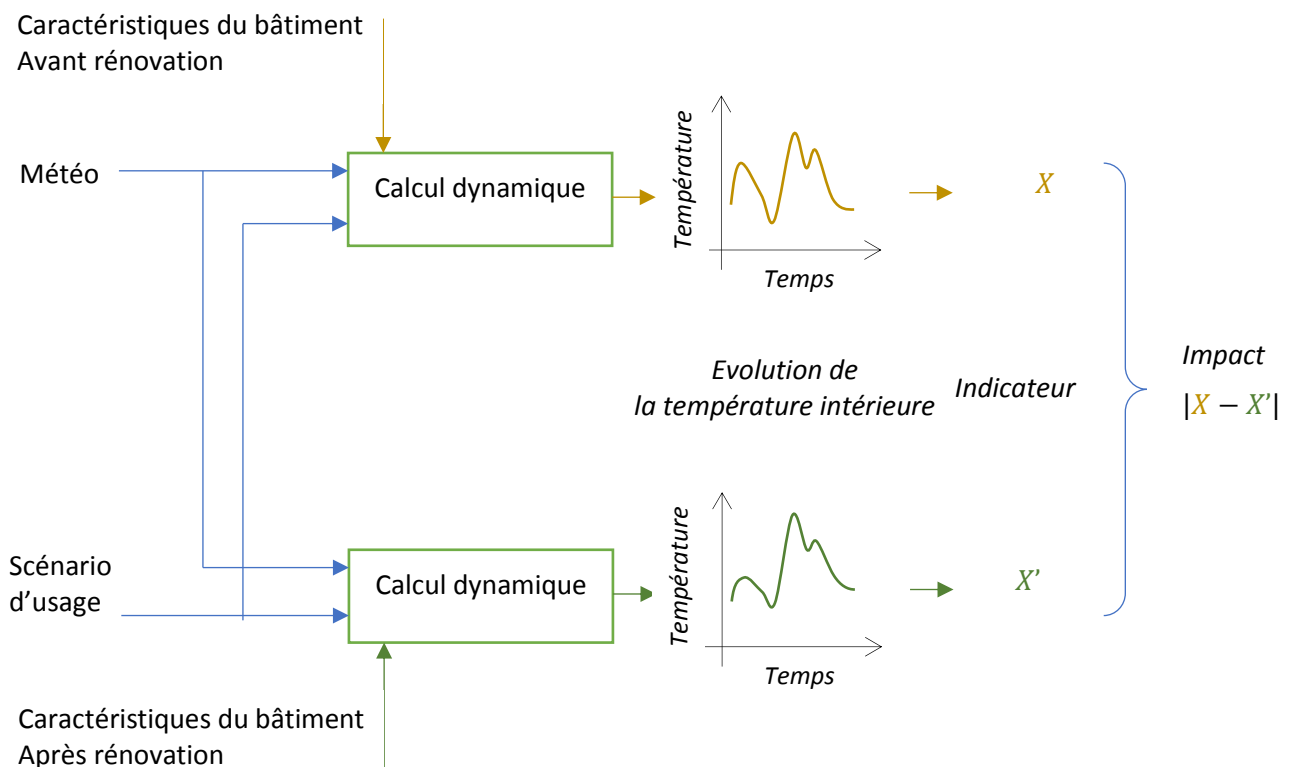


Figure 13. Schéma de principe de la caractérisation du confort d'été

C'est notamment ce qui est fait avec la DIES (et la TIC depuis la RT 2005) pour la prochaine réglementation environnementale du bâtiment (RE 2020), qui s'exprime en heures et intègre la température opérative, les notions de confort adaptatif, le pourcentage d'insatisfaits et probablement l'influence de l'humidité à termes⁴².

C'est cet indicateur qui a été utilisé pour caractériser l'impact des rénovations, en le calculant avant et après travaux.

⁴² Voir « [Rapport final du groupe d'expertise GE08 : Confort d'été](#) » de l'expérimentation « Bâtiment à énergie positive et réduction Carbone ».

Analyse des résultats

Ces calculs, à cause des limites mises en avant dans la suite et du temps imparti pour le projet, n'ont été faits que sur quelques cas d'études, jugés plus critiques en termes de prédisposition à l'inconfort (voir tableur).

On observe que **globalement les travaux de rénovation entraînent quasiment systématiquement une amélioration du confort d'été** au sens de la DIES.

Cependant, la méthodologie permettant de calculer **cet indicateur ne permet malheureusement pas de détailler ces résultats pour tenter d'en tirer une explication physique**. Nous en détaillerons les raisons dans la suite (*Limites des méthodes existantes*) et proposerons ensuite une méthodologie permettant de palier à ces limites (*Proposition d'une méthode*). Cette dernière nous permettra alors de proposer des explications concernant la modification du confort, au sens de la DIES, suite aux travaux de rénovation (*Bilan de l'impact des différents travaux - Retours aux cas d'études*).

Limites des méthodes existantes

Impact global et non individuel

La première est que ce calcul **permet d'estimer l'impact global d'une rénovation, mais ne permet pas de distinguer l'influence individuelle de chacune des interventions**. Par exemple, si on trouve que l'inconfort s'est dégradé suite à une rénovation, il n'est pas possible de savoir si cela est dû au changement des fenêtres, celui de la ventilation ou à l'isolation des murs ; si leurs effets sont combinés ou opposés ; si l'un est plus impactant que les autres ; etc.

Une solution pour pallier ce problème serait d'évaluer l'impact des modifications une par une, c'est-à-dire en réalisant le calcul pour chaque modification individuellement. Cela a été fait pour illustration sur un cas (logement 1). On observe que, dans ce cas, tous les effets individuels sont bénéfiques et que l'effet global est la somme des effets individuels. L'impact de l'isolation des murs est bien plus important que celui du remplacement des simples vitrages par du double vitrage.

Absence de compréhension physique

De plus, **l'indicateur global ne permet pas de comprendre physiquement pourquoi le confort s'est dégradé ou amélioré**. Est-ce grâce à la diminution des apports solaires ? A l'augmentation de l'inertie ? Est-ce généralisable pour d'autres climats ? etc.

Cette compréhension peut être nécessaire pour déterminer quelles actions améliorent ou dégradent le confort d'été et pour savoir sous quelles conditions.

Nous proposerons pour cela quelques indicateurs physiques (voir *Proposition d'une méthode*).

Scénario imposé

Enfin, **l'utilisateur n'a pas complètement la main sur les hypothèses retenues dans le calcul de la méthode, notamment sur les scénarios d'usage** (occupation, ouverture des fenêtres, etc.) alors que comme nous l'avons mis en évidence, **ces scénarios sont très impactants et que les occupants ne se comportent généralement pas comme on l'imaginerait**.

Il serait donc intéressant de tester l'influence des travaux pour différents scénarios d'usage, afin de vérifier la non-dégradation du confort sous ces différentes conditions.

Limite	Solution proposée
Impact global	Calculer l'indicateur pour chaque modification individuelle
Absence de compréhension physique	Définir des indicateurs physiques
Scénario imposé	Tester différents scénarios

Proposition d'une méthode

Pour pallier ces limites, nous proposons de définir **une méthode basée sur 3 indicateurs physiquement parlants permettant de caractériser le comportement thermique en période estivale** (Figure 14). Nous pouvons en effet distinguer 3 phénomènes qui peuvent expliquer une augmentation de l'inconfort :

- 1) En premier, les travaux peuvent augmenter la sensibilité d'un bâtiment à la chaleur, c'est-à-dire sa *température moyenne d'équilibre*. En pratique, cette température moyenne d'équilibre n'est atteinte qu'en cas d'exposition prolongée à des sollicitations quotidiennes périodiques (flux solaire, température, apports internes et ventilation) identiques sur une période suffisamment longue. Cela est quasiment le cas pour les conditions de base pour le climat étudié.
- 2) L'inconfort peut également augmenter si la vitesse à laquelle le bâtiment s'équilibre lors de variations des conditions extérieures augmente (par exemple le passage de conditions de base à des conditions critiques). Cette vitesse peut être caractérisée par la *constante de temps* du bâtiment.
- 3) Enfin, l'inconfort peut augmenter si les surchauffes quotidiennes augmentent. Elles se caractérisent par l'*amplitude des températures intérieures*.

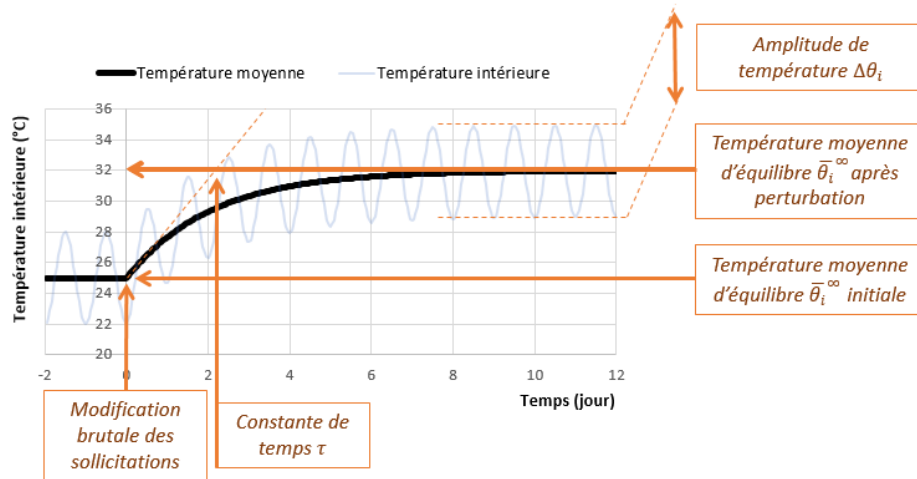


Figure 14. Représentation des indicateurs.

Ces 3 indicateurs sont nécessaires pour comparer le comportement estival de deux bâtiments entre eux (avant et après rénovation notamment), car même si l'un a une température d'équilibre plus élevée que l'autre, il se peut que sa constante de temps soit plus importante de sorte qu'il se réchauffe moins vite lors de périodes critiques, s'avérant ainsi plus frais pendant un certain temps (Figure 15).

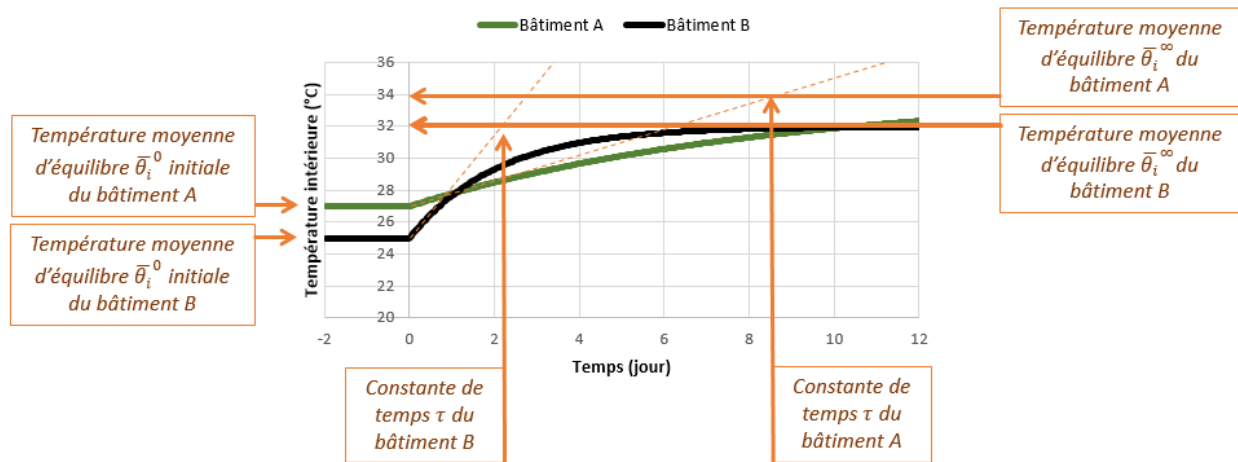


Figure 15. Comparaison de deux comportements avec les indicateurs.

Les 2 premiers indicateurs ne permettent que de caractériser l'évolution de la température moyenne, mais pas les variations quotidiennes de la température intérieure. Il est tout à fait envisageable qu'un bâtiment B ayant une température moyenne d'équilibre inférieure à celle d'un bâtiment A, ait des pics de température quotidien plus élevés (Figure 16). D'où la nécessité du 3^{ème} indicateur.

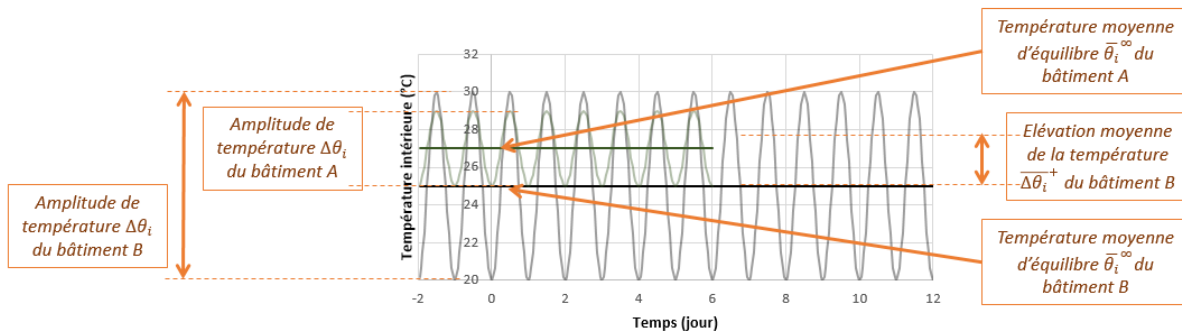


Figure 16. Impact des amplitudes de variation quotidiennes.

Pour une meilleure compréhension de ces indicateurs, nous proposons dans un premier temps un développement physique permettant de lier ces grandeurs aux caractéristiques du bâti, puis une méthode de calcul dynamique permettant de les estimer de façon plus précise.

Pour illustrer le propos, ces notions seront appliquées au fur et à mesure du développement à un cas d'étude, celui du logement 1.

Formulations physiques

Hypothèses

Le logement n'est pas étudié dans sa globalité. Seule la pièce instrumentée, jugée critique, est caractérisée.

A défaut d'informations fiables (écart de température avec les autres pièces, ouverture des portes, etc.), nous supposons que cette pièce n'échange pas d'énergie avec les pièces adjacentes (ventilation inter-pièces et via transferts les cloisons). Cette hypothèse se justifie dans la mesure où les flux provenant de l'extérieur sont largement dominants en intensité et qu'elle conduit généralement à une surestimation de l'élévation de température (la température tendrait à s'homogénéiser avec les autres pièces, a priori plus fraîches). Cette hypothèse est donc sécuritaire dans la mesure où elle permet d'estimer une borne supérieure.

Les hypothèses retenues et les sources de données ayant permis de définir les caractéristiques et propriétés thermo-physiques des logements sont données dans l'Annexe 1 – Glossaire.

Afin d'établir la plupart de ces équations, il est nécessaire de se placer en régime périodique établi, c'est-à-dire au bout d'un temps suffisamment long pendant lequel les sollicitations périodiques (flux solaire, température) restent identiques (ce qui est quasiment le cas pour les conditions de base). Cela permet de s'affranchir de calculs dynamiques (mais restreint les domaines d'application).

Apports par conducto-convection

Sous ces conditions, il est possible d'estimer l'énergie thermique échangée par conducto-convection à travers les parois E_p [J] ainsi :

$$E_p = US(\overline{\theta_e} - \overline{\theta_i})T$$

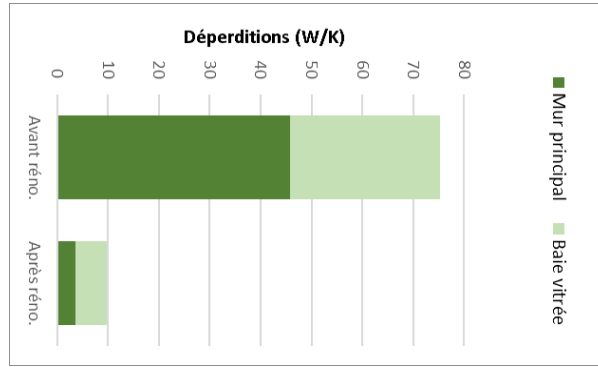
avec U [W/m²/K] le coefficient de déperdition de la paroi, S [m²] la surface de la paroi, $\overline{\theta_e}$ et $\overline{\theta_i}$ [K] les températures moyennes respectivement extérieure et intérieure sur la période des sollicitations T [s].

Le tableau ci-dessous détaille les modifications engendrées par la rénovation sur les murs et les menuiseries et l'impact sur leur coefficient de déperdition pour la pièce critique du logement 1.

Condition limite		Mur principal			Baie vitrée		
		Avant rénovation	Après rénovation	Variation	Avant rénovation	Après rénovation	Variation
Composition	Extérieur	Enduit ciment 1,3cm	Enduit ciment 1,3cm		Simple vitrage bois	Double vitrage PVC	
		Béton 20cm	Béton 20cm				
	Intérieur	Enduit plâtre 1,3cm	LdV 10cm				
			Plaque de plâtre 1,3cm				
Résistance thermique	(m ² .K/W)	0.29	3.64	1153%	0.17	0.67	292%
Coefficient de déperdition	(W/m ² /K)	3.44	0.27	-92%	5.88	1.20	-80%
Surface	(m ²)	13.34	13.34		5	5	

A l'échelle de la pièce critique, les déperditions par conducto-convections sont modifiées ainsi :

U_env	(W/m ² /K)	4.10	0.53	-87%
-------	-----------------------	------	------	------



L'isolation des murs et le changement des menuiseries permet de réduire notablement les déperditions par conducto-convection.

Apports solaires

Les apports solaires transmis par une paroi E_s [J] peuvent s'exprimer ainsi :

$$E_s = gSE_{s \rightarrow}$$

avec g [-] le facteur solaire de la paroi et $E_{s \rightarrow}$ [J] l'énergie solaire reçue par cette paroi.

Cette dernière grandeur peut-être assez facilement estimée mais nécessite d'effectuer des calculs géométriques (inclinaison, orientation, masques, etc.) pour chaque configuration. Cette étape peut être simplifiée à l'aide de pré-calculs tabulés.

Dans le cas d'une paroi opaque, en régime établi, le facteur solaire s'estime ainsi :

$$g = \frac{\alpha U}{h_e}$$

avec α [-] le coefficient d'absorption solaire de la face externe et h_e [W/m²/K] le coefficient d'échange surfacique extérieur.

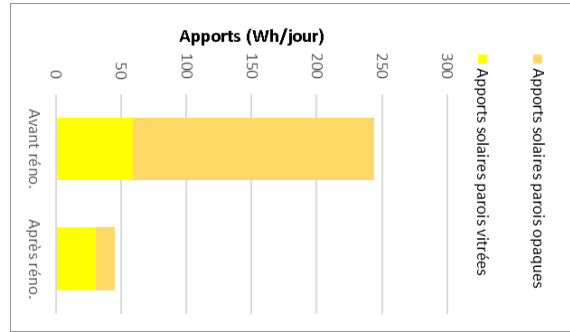
Le tableau ci-dessous détaille les modifications engendrées par la rénovation sur les murs et les menuiseries et l'impact sur leur facteur solaire pour la pièce critique du logement 1.

Condition limite		Mur principal			Baie vitrée		
		Extérieure			Extérieure		
		Avant rénovation	Après rénovation	Variation	Avant rénovation	Après rénovation	Variation
Composition	Extérieur	Enduit ciment 1,3cm	Enduit ciment 1,3cm		Simple vitrage bois	Double vitrage PVC	
	v	Béton 20cm	Béton 20cm				
	Intérieur	Enduit plâtre 1,3cm	LdV 10cm Plaque de plâtre 1,3cm				
Facteur solaire baie	(-)				0.70	0.36	-49%
Facteur solaire protections	(-)				0.10	0.10	0%
Facteur d'absorption solaire	(-)	0.60	0.60	0%			
Facteur solaire	(-)	0.08	0.01	-92%	0.07	0.04	-49%
Surface	(m ²)	13.34	13.34		5	5	

A l'échelle de la pièce critique, les apports solaires sont modifiés ainsi :

Apports solaires parois vitrées	(Wh/m ² /jour)	58.94	30.31	-49%
Apports solaires parois opaques	(Wh/m ² /jour)	185.32	14.79	-92%
Apports solaires totaux	(Wh/m ² /jour)	244.27	45.11	-82%

* par m² de surface de plancher.



L'isolation des murs et le changement des menuiseries permet de réduire notablement les apports solaires, notamment pour les parois opaques, qui s'avéraient être la principale source d'apports solaire avant rénovation.

Notons que nous supposons ici que les occultations des menuiseries sont utilisées, autrement les apports des parois vitrées seraient 10 fois plus importants.

Apports par renouvellement d'air

L'énergie transmise par renouvellement d'air E_v [J] s'exprime ainsi :

$$E_v = \rho_{air} c_{p,air} Q_v (\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_i) T = \chi (\bar{\theta}_e - \bar{\theta}_i) T$$

avec ρ_{air} [kg/m³] la masse volumique de l'air, $c_{p,air}$ [J/kg/K] sa capacité calorifique massique et Q_v [m³/h] le débit de renouvellement d'air.

Le renouvellement d'air pouvant être généré par une ventilation mécanique, naturelle et par des infiltrations. On suppose le débit continue sur la période.

Le tableau et la figure ci-dessous détaillent les modifications engendrées par la rénovation sur les débits de renouvellement d'air pour la pièce critique du logement 1.

Débit de ventilation	(vol/h)	0.50	1.16	133%
Débit d'infiltration	(vol/h)	0.50	0.25	-50%
Débit total	(vol/h)	1.00	1.41	41%



La modification de l'étanchéité à l'air et l'installation d'une ventilation mécanique entrainerait au final plus de déperditions, mais cette conclusion n'est pas suffisamment robuste car, à défaut de mesures réelles, elle repose sur le choix de valeurs arbitraires, dont la plage de variation plausible est grande. Toutefois, si cela était tout de même vrai, la qualité de l'air en serait améliorée car le renouvellement d'air serait suffisant et régulier (non dépendant des conditions météorologiques).

Pour la ventilation nocturne, le renouvellement d'air n'a lieu que la nuit, lorsque la température extérieure est suffisamment faible. L'énergie transmise dans ce cas peut s'exprimer ainsi :

$$E_{vn} = \chi_n(\overline{\theta_{en}} - \overline{\theta_{in}})T_n$$

avec $\overline{\theta_{en}}$ et $\overline{\theta_{in}}$ [K] les températures moyennes respectivement extérieure et intérieure lors de la ventilation nocturne ayant lieu sur une durée T_n [s].

Les travaux n'ayant pas affecté le caractère traversant du logement et la nature des ouvrants, on suppose qu'il est toujours possible d'atteindre un taux de renouvellement d'air en ouvrant les fenêtres de 25 vol/h avant comme après rénovation.

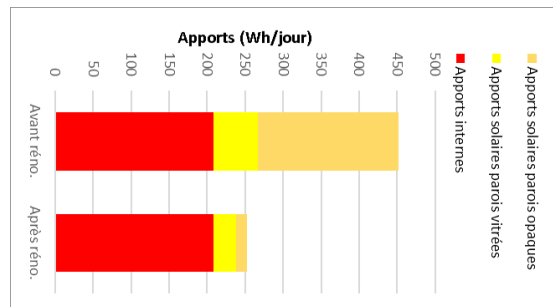
Apports internes

Les apports internes E_i proviennent des occupants (métabolisme) et de leurs usages (appareils électrique, cuisine, etc.).

Sous les hypothèses détaillées en Ventilation naturelle : renouvellement naturel (par opposition à l'usage de système mécanique) de l'air d'une pièce engendré par l'ouverture d'ouvrants entre des zones soumises à des conditions différentes (différences de pressions dues au vent, à l'altitude, à la température, etc.).

Annexe 2 – Hypothèses et sources de données pour la caractérisation thermo-physique des logements on estime les apports internes dans la pièce critique à 207 Wh/m²/jour (m² de surface de plancher).

Ces apports sont du même ordre de grandeur que les apports solaires avant rénovation, avec usage des occultations, et largement majoritaire après rénovation.



Température d'équilibre

A partir des grandeurs énergétiques définies précédemment, il est possible d'établir ce bilan :

$$E_p + E_s + E_v + E_{vn} + E_i = 0$$

soit⁴³ :

$$US(\overline{\theta_e} - \overline{\theta_i})T + gSE_{s \rightarrow} + \chi(\overline{\theta_e} - \overline{\theta_i})T + \chi_n(\overline{\theta_{en}} - \overline{\theta_{in}})T_n + E_i = 0$$

⁴³ Pour simplifier l'écriture non supposons ici une seule paroi déperditive, autrement il conviendrait de sommer les autres contributions.

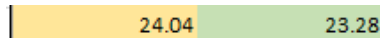
Nous avons ici deux inconnues : $\bar{\theta}_i$ et $\bar{\theta}_{in}$. Déterminer la seconde nécessiterait des calculs dynamiques, car sa valeur fait nécessairement intervenir l'inertie du bâtiment (capacité de refroidissement).

Toutefois, pour illustrer le propos et tirer les tendances principales, il est possible de supposer que $\bar{\theta}_i \approx \bar{\theta}_{in}$ (cette hypothèse surestime l'apport de la ventilation nocturne, car la température tend en réalité à décroître, une estimation plus précise de cette grandeur passerait par des calculs dynamiques). On peut alors obtenir :

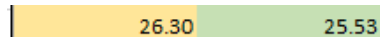
$$\bar{\theta}_i^\infty \approx \frac{gSE_{s \rightarrow} + E_i + \bar{\theta}_e(US + \chi)T + \bar{\theta}_{en}\chi_n T_n}{(US + \chi)T + \chi_n T_n}$$

Cette température représente la température moyenne vers laquelle tend la pièce d'étude lorsqu'elle est soumise aux mêmes sollicitations périodiques sur un temps suffisamment long (régime périodique établi). Il s'agit donc de la température moyenne vers laquelle une pièce va s'équilibrer en été en l'absence de système de rafraîchissement.

Pour la pièce critique en conditions de base cela donne (respectivement avant et après rénovation) :



Et en conditions critiques :



On observe que les modifications liées aux travaux de rénovation ont globalement permis de réduire cette température d'équilibre, d'un peu moins d'un degré.

Cette température est d'autant plus élevée que les apports solaires et internes sont importants.

Sans usage des occultations ces températures augmentent de 1,5°C avant rénovation et de 0,9°C après, grâce à un facteur solaire plus faible pour les doubles vitrages.

Les déperditions (via l'enveloppe ou le renouvellement d'air) tendent à équilibrer cette température vers la température extérieure moyenne, et donc à évacuer la surchauffe engendrée par les apports de chaleur (internes et solaires)⁴⁴.

L'isolation de l'enveloppe tend donc à rendre le bâtiment plus sensible aux apports de chaleur (diminution des déperditions notamment la nuit lorsque le logement est plus chaud que l'extérieur et donc augmentation de cette température d'équilibre), mais elle contribue inversement à réduire les apports solaires via les parois opaques et donc les sources de surchauffes. L'impact de l'isolation sur le confort d'été n'est donc pas a priori évident.

Enfin, il est théoriquement possible d'abaisser la température moyenne du logement en deçà de la température moyenne extérieure en exploitant le potentiel de rafraîchissement nocturne, c'est-à-dire en ventilant principalement la nuit, lorsque la température est la plus fraîche, et le moins possible le jour. Cette stratégie est d'autant plus importante lorsque le bâtiment est isolé, car plus sensible aux apports de chaleurs. Pour une même température d'équilibre, à sollicitations thermiques totales

⁴⁴ C'est ce qui est recherché en « ventilation naturelle », notamment en climat tropical, où l'on cherche à créer un courant d'air continu en ouvrant autant que possible les ouvrants sur l'extérieur. Cette stratégie améliore en plus le confort grâce à l'effet bénéfique de la vitesse d'air.

égales, il faudra une ventilation nocturne plus importante dans un bâtiment isolé que pour un bâtiment non isolé (sachant qu'à morphologie équivalentes les apports thermiques diurnes par l'enveloppe d'un bâtiment mieux isolé seront moindres).

En l'absence de ventilation nocturne, la température d'équilibre augmente de 3°C avant rénovation (29,7°C en période critique) et de 7°C après rénovation (32,6°C en période critique), malgré des apports solaires plus faibles, dépassant ainsi la température d'équilibre avant rénovation. La rénovation augmente donc la sensibilité aux apports de chaleur et rend d'autant plus critique le besoin de ventilation nocturne.

Si apports solaire ou internes \nearrow $gSE_{s\rightarrow} + E_i \nearrow$	\Rightarrow	Température d'équilibre \nearrow - Défavorable $\bar{\theta}_i^\infty \nearrow$
Si isolation \nearrow (et/ou déperditions \searrow) Si $(US + \chi) \searrow$ ou $\chi_n \searrow$	\Rightarrow	Température d'équilibre \nearrow - Défavorable $\bar{\theta}_i^\infty \nearrow$
Si déperditions $\rightarrow \infty$ Si $(US + \chi) \rightarrow \infty$	\Rightarrow	Température d'équilibre $\rightarrow \bar{\theta}_e$ $\bar{\theta}_i^\infty \rightarrow \bar{\theta}_e$
Si ventilation nocturne $\rightarrow \infty$ Si $\chi_n \rightarrow \infty$	\Rightarrow	Température d'équilibre $\rightarrow \bar{\theta}_{en} < \bar{\theta}_e$ - Favorable $\bar{\theta}_i^\infty \rightarrow \bar{\theta}_{en}$

Constante de temps

La dynamique de la température d'un système inertiel soumis à une modification brutale de la température extérieure (passage des conditions de base à celles critiques) suit généralement cette forme :

$$\bar{\theta}_i(t) = \bar{\theta}_i^0 + (\bar{\theta}_i^\infty - \bar{\theta}_i^0) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$$

avec $\bar{\theta}_i^0$ la température intérieure moyenne initiale, $\bar{\theta}_i^\infty$ la température intérieure moyenne d'équilibre et τ [s] la constante de temps.

La constante de temps s'estime avec le rapport :

$$\tau = \frac{I}{D}$$

avec I [J/K] l'inertie de la zone et D [W/K] ses déperditions.

Plus la constante de temps est faible, plus le bâtiment tend rapidement vers sa température d'équilibre. Ainsi ce n'est pas l'inertie seule qui caractérise la dynamique mais son ratio avec les déperditions : un bâtiment à forte inertie mais fortes déperditions pourra avoir la même dynamique qu'un bâtiment à faible inertie et à faible déperdition. En effet, les déperditions conditionnent la vitesse de décharge de l'inertie.

Inertie

L'inertie interne mobilisable dans une zone dépend de la période des sollicitations car l'épaisseur de pénétration des ondes de chaleur en dépend (plus le temps de sollicitation est long, plus l'inertie est sollicitée en profondeur). La norme NF EN ISO 13786 propose une méthode formelle pour l'estimer à

partir des caractéristiques physiques des parois (capacité calorifique et conductivité des différentes couches) pour différentes périodes de sollicitation (journalière, séquentielle, annuelle). Dans le cadre d'un passage de conditions de base au conditions critiques, c'est l'évolution sur le long terme qui nous intéresse. L'inertie séquentielle (12 jours) peut donc fournir une bonne estimation.

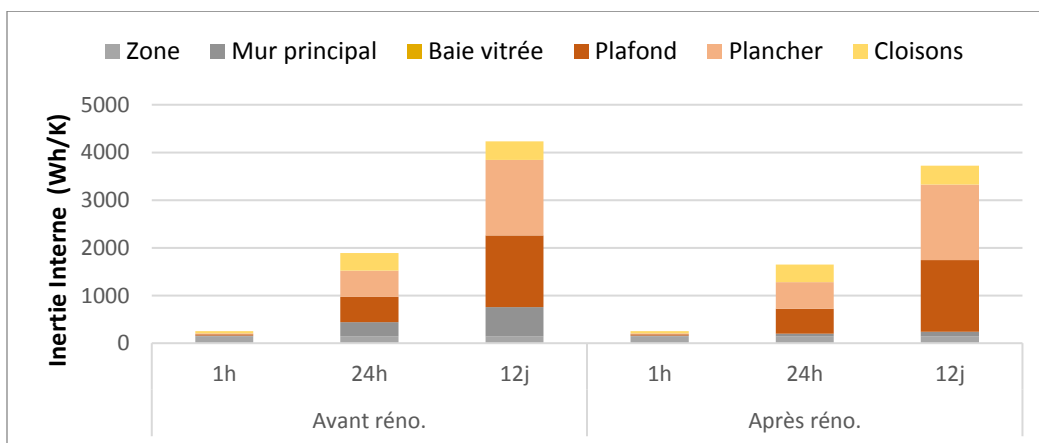
Le tableau ci-dessous détaille les modifications engendrées par la rénovation sur les différentes parois et l'impact de l'inertie interne sollicitée pour différentes périodes.

Condition limite		Mur principal			Baie vitrée		
		Avant rénovation	Après rénovation	Variation	Avant rénovation	Après rénovation	Variation
Composition	Extérieur	Enduit ciment 1,3cm	Enduit ciment 1,3cm		Simple vitrage bois	Double vitrage PVC	
	Λ	Béton 20cm	Béton 20cm				
	v	Enduit plâtre 1,3cm	LdV 10cm				
	Intérieur		Plaque de plâtre 1,3cm				
Inertie interne - horaire	(Wh/m²/K)	1.05	1.04	-1%			
Inertie interne - quotidienne	(Wh/m²/K)	22.27	4.16	-81%			
Inertie interne - séquentielle	(Wh/m²/K)	45.68	7.16	-84%			
Surface	(m²)	13.34	13.34		5	5	

Plafond				Plancher				Cloisons			
Mitoyen				Mitoyen				Interne			
Avant rénovation	Après rénovation	Variation		Avant rénovation	Après rénovation	Variation		Avant rénovation	Après rénovation	Variation	
Carrelage	Carrelage			Enduit plâtre 1,3cm	Enduit plâtre 1,3cm			Enduit plâtre 1,3cm	Enduit plâtre 1,3cm		
Béton 15cm	Béton 15cm			Béton 15cm	Béton 15cm			Briquelette	Briquelette		
Enduit plâtre 1,3cm	Enduit plâtre 1,3cm			Carrelage	Carrelage			Enduit plâtre 1,3cm	Enduit plâtre 1,3cm		
	0.83	0.83	0%		0.87	0.87	0%		1.08	1.08	0%
	18.00	18.00	0%		18.90	18.90	0%		9.08	9.08	0%
	51.60	51.60	0%		54.18	54.18	0%		9.70	9.70	0%
	29.16	29.16			29.16	29.16			40.56	40.56	

L'isolation par l'intérieur réduit donc notablement l'inertie interne séquentielle pour le mur principal.

A l'échelle de la pièce critique, l'inertie interne est modifiée ainsi :



L'impact global de l'isolation par l'intérieur sur l'inertie interne séquentielle et au final assez faible (-12%) grâce à la contribution majoritaire des autres surfaces (notamment plafond et plancher).

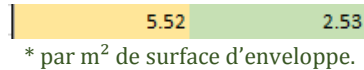
Déperditions

Côté déperdition, sans ventilation nocturne on a :

$$D = US + \chi$$

Là aussi, le coefficient de déperdition dépend de la période de sollicitation (effet inertiel : déphasage et atténuation). En se plaçant sur une période séquentielle et en se focalisant sur la température moyenne, il est possible d'utiliser les coefficients de déperdition statique.

Pour la pièce critique, le coefficient de déperdition global, en $W/m^2/K$ vaut :

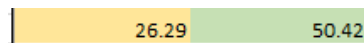


En intégrant les déperditions par renouvellement d'air l'écart entre avant et après rénovation n'est plus que de 54% (contre 87% en considérant que les déperditions par conducto-convection).

Voir les détails dans les sections *Apports par conducto-convection* et *Apports par renouvellement d'air*.

Ainsi à inertie constante, l'isolation permet d'augmenter la constante de temps du bâtiment. Dans le cas de l'isolation par l'intérieur, l'inertie diminue (perte de l'inertie des parois extérieures) ; on aura donc un effet indéterminé a priori sur la constante de temps, nécessitant une évaluation. Inversement, dans le cas d'une isolation thermique par l'extérieur, l'inertie augmente (gain de la quasi-intégralité de l'inertie des parois extérieures, ultérieurement partagée entre intérieur et extérieur) ; l'effet est donc doublement bénéfique.

Pour la pièce critique, la constante de temps, en heure, vaut :



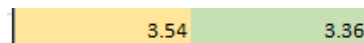
Ainsi les travaux de rénovation énergétique ont quasiment permis de la doubler, ce qui est favorable vis-à-vis du confort d'été. La forte diminution des déperditions compense donc largement la légère perte d'inertie interne.

Il est plus délicat d'intégrer l'impact de la ventilation nocturne car celle-ci n'intervient pas en continu. On peut envisager l'approximation suivante :

$$D = US + \chi + \chi_n \frac{T_n}{T}$$

On voit ainsi que la ventilation permet de diminuer fortement la constante de temps, ce qui est souhaitable lorsqu'on cherche à décharger l'énergie accumulée en journée ou après une période critique.

En intégrant de la sorte la contribution de la ventilation nocturne, la constante de temps vaut :



Cette ventilation permet donc de sensiblement réduire la constante de temps, ce qui est favorable pour décharger la chaleur accumulée, mais défavorable pour faire face à un échauffement type passage de conditions de base à des conditions critiques. Toutefois, l'approximation réalisée est très grossière et n'est pas apte à intégrer une ventilation sous condition que la température extérieure soit inférieure à la température intérieure.

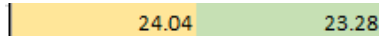
On remarque par ailleurs que l'effet de la ventilation est prédominant devant les caractéristiques thermiques de la pièce : il n'y a quasiment pas de différence entre avant et après rénovation.

On peut estimer la vitesse d'échauffement initiale $[K/s]$ par le ratio :

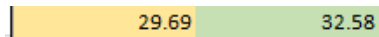
$$\frac{\bar{\theta}_i^\infty - \bar{\theta}_i^0}{\tau}$$

Ainsi à constante de temps égale, un bâtiment se réchauffera plus vite si sa température d'équilibre est plus importante. Autrement dit, un bâtiment ayant une constante de temps plus importante qu'un autre ne se réchauffera pas forcément moins vite si sa température d'équilibre est également bien plus élevée (revoir *Figure 15*).

Supposons que l'on parte des températures d'équilibre avec ventilation nocturne en conditions de base :



Et que l'on affronte ensuite des conditions de base, sans ventilation afin de bénéficier d'une constante de temps plus importante. Les températures d'équilibres sous ces conditions critiques valent :



L'élévation de température sera donc, à terme, de 2,7°C avant rénovation et de 9,3°C après rénovation, ce qui conduit à des vitesses d'échauffement respectives, en °C/h, de

0,10 et 0,18.

L'échauffement sera donc plus rapide après rénovation, malgré une constante de temps plus importante, à cause d'une plus grande sensibilité aux apports de chaleurs.

Toutefois, seuls des calculs dynamiques permettront d'estimer plus finement cette élévation en intégrant une ouverture sous conditions des fenêtres.

Si isolation ↗ (et/ou déperditions ↘) Si $(US + \chi) \searrow$ ou $\chi_n \searrow$	⇒	Constante de temps ↗ - Favorable $\tau \nearrow$
Si inertie (séquentielle) ↗ Si $I \nearrow$	⇒	Constante de temps ↗ - Favorable $\tau \nearrow$

Amplitude des températures intérieures

Nous n'avons pas pu établir de méthodes permettant d'estimer les amplitudes de températures intérieures $\Delta\theta_i$ directement à partir des données d'entrée.

La norme NF EN ISO 13786 propose des calculs permettant d'estimer soit :

- l'amplitude des températures intérieures d'une paroi soumise à une sollicitation extérieure harmonique extérieure en flux ou en température, mais sous hypothèse d'un flux constant imposé à l'intérieur, ce qui n'a pas de sens dans notre cas (seul un bilan dynamique global permet d'estimer la température).
- l'amplitude des flux conducto-convectifs intérieurs d'une paroi soumise à une sollicitation harmonique extérieure en flux ou en température, mais sous hypothèse d'une température

maintenue constante à l'intérieur, ce qui n'est pas notre cas en évolution libre (mais valable dans le cas d'un bâtiment climatisé, les flux, grandeurs extensives, pouvant être sommés).

De plus, d'autres difficultés méthodologiques compliquent leur utilisation, notamment la nécessité de décomposer les sollicitations en série harmonique (transformé de Fourier).

Seuls des calculs dynamiques semblent pouvoir permettre d'estimer l'amplitude des températures intérieures.

Toutefois, physiquement il est possible d'établir les tendances suivantes :

Si apports solaire ou internes \nearrow $gSE_{s\rightarrow} + E_i \nearrow$	\Rightarrow	Amplitude \nearrow - Défavorable $\Delta\theta_i \nearrow$
Si inertie (horaire, quotidienne) \nearrow Si $I \nearrow$	\Rightarrow	Amplitude \searrow - Favorable $\Delta\theta_i \searrow$
Si atténuation et déphasage \nearrow (apports solaires et conducto-convectifs \searrow)	\Rightarrow	Amplitude \searrow - Favorable $\Delta\theta_i \searrow$

Les notions d'atténuation et de déphasage (Figure 13), pour les apports solaires et conducto-convectifs des parois extérieures, apparaissent ici, car l'estimation des amplitudes des températures intérieures fait nécessairement appel aux dynamiques intra-journalières, alors que les notions quasi-statiques suffisaient à décrire constante de temps et température d'équilibre.

Les notions statiques permettent d'estimer les valeurs moyennes des différentes grandeurs en régime périodique établi, tandis que les grandeurs dynamiques permettent d'estimer leurs amplitudes (voir NF EN ISO 13786). Autrement dit, à résistance thermique égale, le niveau moyen d'équilibre sera le même pour deux parois exposées de la même façon, qu'elles soient légères ou lourdes. Ces notions n'influeront que les amplitudes des grandeurs : elles seront plus faibles pour la paroi lourde.

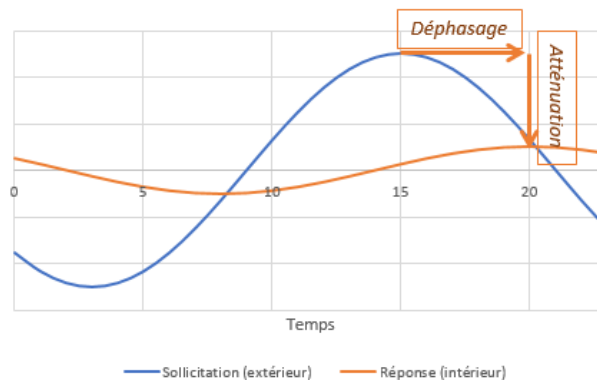


Figure 17. Représentation des notions d'atténuation et de déphasage.

Une approximation assez grossière, mais suffisamment représentative, des contributions des différentes sollicitation thermique, à partir des grandeurs définies dans la norme EN ISO 13786, en supposant la température intérieure maintenue constante à sa valeur d'équilibre, est donné ci-après.

On voit ainsi que d'une part la rénovation a permis de diminuer notablement les apports conducto-convectifs et solaires et de plus de les « déporter » la nuit lorsque la ventilation nocturne est utilisée.

Ainsi, on pourrait s'attendre à ce que, en évolution libre, les amplitudes quotidiennes de température intérieure soit plus faibles après rénovation. Toutefois, l'isolation par l'intérieur a notablement réduit l'inertie interne quotidienne (-13%), ce qui pourrait contrebalancer l'effet précédent.

En revanche, l'inertie horaire de la pièce critique est quasiment inchangée, malgré l'isolation par l'intérieur (voir section *Inertie*), car à cette fréquence l'épaisseur de pénétration ne dépasse pas celle des enduits, dont la nature est quasiment inchangée. On ne s'attend donc pas à des surchauffes instantanées plus importantes (sous l'action du flux solaire transmis par les vitrages par exemple).

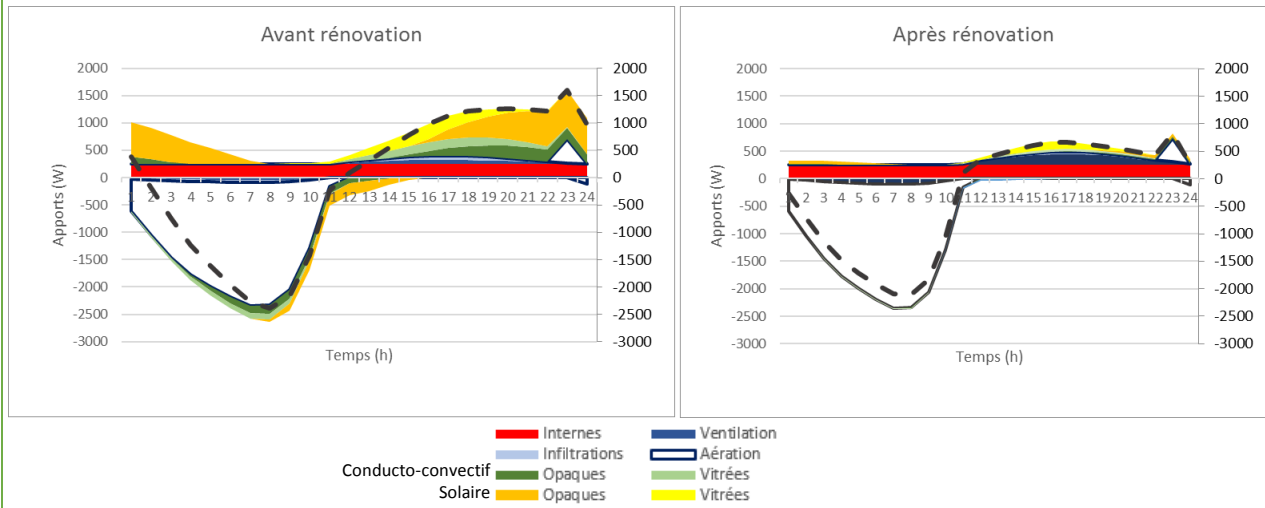


Figure 18. Approximation des contributions des différentes sollicitations thermiques avant et après travaux.

Bilan de l'impact des différents travaux

A partir des éléments établis précédemment, nous pouvons donner des indications a priori sur l'impact des différents types de travaux.

Simple vitrage → Double vitrage	↗ Isolation	↗ Température d'équilibre ↘ Constante de temps
	↘ facteur solaire*	↘ Température d'équilibre ↘ Amplitude
Isolation par l'intérieur	↗ Isolation	↗ Température d'équilibre ↘ Constante de temps
	↘ facteur solaire	↘ Température d'équilibre ↘ Amplitude
	↘ Inertie	↗ Constante de temps ↗ Amplitude
Isolation par l'extérieur	↗ Isolation	↗ Température d'équilibre ↘ Constante de temps
	↘ facteur solaire	↘ Température d'équilibre ↘ Amplitude
	↗ Inertie	↘ Constante de temps ↘ Amplitude
Diminution du renouvellement d'air*	↗ Isolation	↗ Température d'équilibre ↘ Constante de temps

*en général mais pas systématiquement

On observe que les effets ne sont jamais que favorables (en vert) ou non favorables (en rouge). Il n'est pas possible de dire a priori si une action dégradera ou pas le confort d'été. L'impact global est donc à estimer au cas par cas.

L'étude détaillée de la pièce critique du logement 1 confirme que :

- (1) la maîtrise des apports de chaleurs (internes et solaires) est essentielle ;
- (2) la rénovation thermique tend à accroître la sensibilité du logement à la chaleur (augmentation de la température d'équilibre en l'absence de ventilation nocturne) ;
- (3) la ventilation nocturne permet toutefois de contrebalancer largement cette sur-sensibilité, mais rend le besoin de ventilation plus critique pour un logement rénové ;
- (4) avec la ventilation nocturne, la température d'équilibre du bâtiment rénové peut être inférieure à celle du bâtiment avant rénovation grâce à la forte diminution du facteur solaire des parois opaques ;
- (5) la montée en température du bâtiment lors de conditions plus critiques semble pouvoir être généralement plus lente pour un bâtiment rénové, même malgré une perte d'inertie consécutive à une isolation intérieure, grâce la forte diminution des déperditions ;
- (6) l'impact de la rénovation thermique sur les amplitudes quotidiennes de la température intérieure ne peut être déterminé en l'état.

Généralisation ?

Cette analyse n'est toutefois pas généralisable en l'état, car les tendances des points 4 à 6 pourraient être inverses et doivent être confirmées ou infirmées au cas par cas, notamment à l'aide d'une méthode plus détaillée.

Par rapport au point (4), la diminution des apports solaires pourrait ne pas être suffisant pour annuler l'augmentation de la sensibilité aux apports de chaleurs, par exemple si ces apports sont peu importants dû à l'exposition ou aux masques.

Le point (5) peut être remis en cause en cas de forte diminution de l'inertie (parois extérieures majoritaires et/ou isolation intérieure des dalles et plafond) et d'augmentation trop importante de la température d'équilibre (isolation trop importante ou logement non traversant donc avec faible potentiel de ventilation nocturne). En revanche, toutes choses égales par ailleurs, une isolation par l'extérieur est forcément plus favorable qu'une isolation par l'intérieur car l'inertie n'est pas dégradée mais au contraire augmentée.

Le point (6) n'est de toute façon pas tranché a priori.

Retour aux cas d'études

Pour revenir spécifiquement sur les estimations des DIES de certains cas d'études, l'augmentation du confort de la majorité des logements s'expliquerait donc par une diminution de la température d'équilibre (réduction des apports solaires due au changement de vitrage) mais surtout par une augmentation de la constante de temps (réduction des déperditions via l'isolation et le double vitrage).

Le seul cas où l'on observe une dégradation au sens du DIES est celui du logement 6. Cette dégradation pourrait s'expliquer par une augmentation du niveau d'isolation grâce au double-vitrage et le

traitement des combles, non associé à une diminution suffisante des apports solaires⁴⁵, notamment via les murs, car non isolés. Ceci résultant sur une constante de temps plus importante (favorable) mais surtout une température d'équilibre plus haute (défavorable). Ce dernier effet semble contrecarrer le premier, résultant en une augmentation de l'inconfort.

Enfin, les niveaux d'inconfort les plus élevés sont observés dans le logement 4. Cela peut être relié directement à l'absence d'occultations extérieures dans la loggia orientée Est (plus important avant isolation à cause du simple vitrage : moins isolant et ayant un facteur solaire plus important).

Points de vigilance

En résumé, nous avons pu mettre en évidence que :

- la réduction du potentiel de ventilation nocturne (réduction des ouvertures)
- et l'augmentation du niveau d'isolation non associée à une réduction des apports solaires (double vitrage seul sur des façades exposées au soleil)

dégradent à coup sûr le confort d'été.

Et que :

- l'augmentation des apports solaires (absence d'occultations, ajout d'ouverture)
- et la diminution d'inertie (isolation par l'intérieur généralisée à toutes les surfaces, y compris plancher, plafond et refend)

doivent faire l'objet d'une vigilance et potentiellement de mesures compensatoires (respectivement : augmentation de l'inertie et diminution des apports solaires).

Estimation avec calcul dynamique

Nous avons vu que **l'approche simplifiée développée précédemment présente plusieurs limites :**

- par rapport à l'estimation de l'effet de la ventilation nocturne (ou plus généralement de comportements aléatoires ou discontinus) sur la température d'équilibre ;
- par rapport à la variation temporelle de la constante de temps ;
- par rapport au calcul des amplitudes de température.

De plus, les formulations proposées n'intègrent pas la température opérative.

Pour pallier ces lacunes, nous proposons d'identifier ces grandeurs à partir de résultats de calculs dynamiques.

Sollicitations

Nous cherchons à caractériser l'état du bâtiment lors des deux périodes estivales types, à savoir : de base et critique et le passage de l'une à l'autre.

Les sollicitations extérieures seront donc celles des conditions moyennes de base sur les 2 premiers mois de calcul puis celles critiques les 2 mois suivant. Ceci permettra d'estimer les températures

⁴⁵ Les combles sont supposés ventilés dans les calculs du DIES, les apports solaires sont donc probablement négligés, ce qui n'est pas valable en réalité (voir point (4) de l'analyse globale). Ainsi, en réalité, les apports solaires globaux dans la pièce sont certainement réduits.

d'équilibre et l'amplitude des températures intérieures sur ces deux périodes, mais aussi la constante de temps lors de la transition entre celles-ci.

La décharge à l'issue d'une période critique (passage à la période de base, baisse des température) est aussi importante pour connaître la capacité du bâtiment à rejoindre son état d'équilibre en conditions de base. Une seconde phase de base de 2 mois suivra donc la période critique.

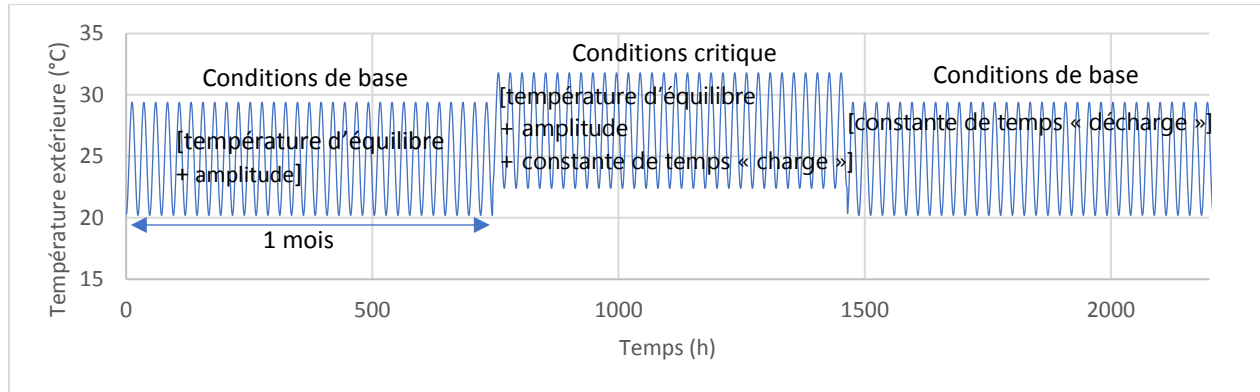


Figure 19. Représentations des conditions extérieures pour estimation des grandeurs caractéristiques du confort d'été.

Les conditions d'ensoleillement supposeront un ciel dégagé.

Scénarios d'usage

La partie instrumentation nous a permis de mettre en évidence que le comportement des occupants est loin d'être optimum d'un point de vue température. **Pour prendre en compte l'impact du comportement des occupants, nous testerons 3 types de scénarios :**

- *optimal* : ventilation naturelle nocturne (entre 18h et 8h), uniquement lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure ;
- *optimal-constraint* : ventilation naturelle en soirée (18h-22h) et en matinée (7h-8h), uniquement lorsque la température extérieure est inférieure à la température intérieure ;
- *ventilation naturelle permanente* : ventilation naturelle systématique en continu (sur 24h) ;
- *ventilation naturelle-constraint* : ventilation naturelle systématique en journée (7h-22h).

Il sera ainsi possible d'étudier si les grandeurs caractéristiques du confort d'été définies précédemment sont dégradées dans les différents cas de figure.

Evaluation de l'inconfort

Grâce aux calculs dynamiques, les différentes grandeurs caractéristiques du confort d'été pourront être **évaluées à l'aide de la température opérative** (et non seulement la température d'air dans les formulations précédentes). Les niveaux d'inconfort en régime périodique établi pourront être évalués dans les conditions de bases et critiques.

Pour prendre en compte les dynamiques spécifiques à chaque climat (conditions plus ou moins stables), il sera possible d'**évaluer le confort** entre les conditions de base et critique, sur une période représentative de la variabilité de ces épisodes, ou **avec une séquence météorologique représentative** (et non plus les séquences permettant de caractériser les grandeurs).

Comme nous avons vu que les travaux peuvent modifier la dynamique des inconforts et donc les rendre plus sensibles lors d'occupation non continue⁴⁶, il sera donc intéressant d'évaluer l'inconfort selon différents scénarios d'occupation :

- toute la journée ;
- matin, soir et nuit.

Certaines situations favorables globalement pourraient effectivement s'avérer défavorables spécifiquement dans le second cas pour certains scénarios d'usage.

Attentes de la méthode

L'application de cette méthode n'a malheureusement pas pu être réalisée dans le cadre de ce travail. Toutefois, à partir de raisonnements physiques, s'appuyant notamment sur les formulations établies précédemment, il est possible de donner les tendances suivantes :

- comme mis en évidence précédemment, une bonne performance estivale en scénario *optimal* repose essentiellement sur un potentiel de ventilation nocturne et une inertie suffisants, couplés à une limitation des apports de chaleurs ;
- le scénario *optimal-constraint* renforcera les besoins de ventilation (taille des ouvertures et caractère traversant) et d'inertie intérieure (stockage de la fraîcheur nocturne). Le potentiel de ventilation étant moindre que dans le cas *optimal*, il est possible que l'augmentation de la sensibilité aux sources de chaleurs consécutives à l'augmentation de l'isolation ne soit plus compensée, et que le bâtiment rénové soit en conséquence plus inconfortable.
- le scénario *ventilation naturelle permanente*, bien qu'engendrant des températures moyennes plus élevées, devrait être favorable aux bâtiments rénovés grâce à la réduction des apports solaires via les parois opaques. La constante de temps sera largement dominée par la ventilation, l'inertie intérieure ne jouera qu'un impact secondaire, mais sera toujours préférable.
- le scénario *ventilation naturelle-constraint*, sera le plus critique, notamment pour les bâtiments rénovés, car la source principale de rafraîchissement passif la nuit via l'enveloppe sera notablement réduite, ce qui pourrait prendre le dessus sur la réduction des apports solaires. Dans ce cas l'inertie contribuera à maintenir les températures élevées la nuit et donc à augmenter l'inconfort.

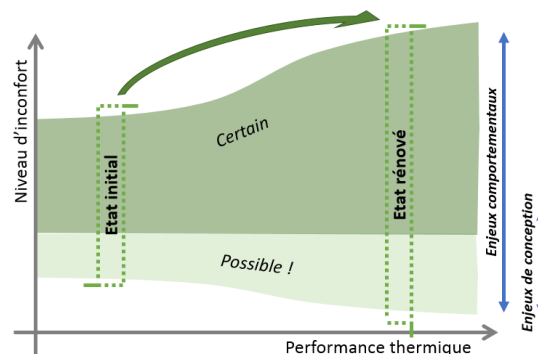


Figure 20. Plage de variation du niveau d'inconfort en fonction de la performance thermique du bâtiment.

⁴⁶ Voir point (13) de l'analyse globale.

On retiendra par ailleurs globalement que le comportement d'un bâtiment rénové sera bien plus sensible au comportement des occupants (Figure 20) :

- une non-utilisation des protections solaires et de la ventilation nocturne conduira à un inconfort bien plus important qu'avant rénovation thermique ;
- une utilisation des protections solaires et de la ventilation nocturne, sous réserve de non-contre-performances dans la conception (voir *Bilan de l'impact des différents travaux*), peut conduire à un meilleur confort qu'avant rénovation thermique.

Annexe 1 – Glossaire

Adaptation : capacité à modifier ses critères de confort par habitude et/ou modification comportementale.

Atténuation : phénomène lié à l'inertie de transmission faisant que l'amplitude des flux ou températures transmis à l'intérieur par un matériau est plus faible que celle de la sollicitation extérieure.

Déphasage : phénomène lié à l'inertie de transmission faisant que l'amplitude des flux ou températures transmis à l'intérieur par un matériaux est retardée par rapport à celle de la sollicitation extérieure.

Diagramme psychrométrique : diagramme regroupant les principales caractéristiques de l'air humide pour une pression atmosphérique donnée (en général celle au niveau de la mer, c'est-à-dire 1 013 hPa).

Température opérative : température équivalente intégrant les effets de convection (température de l'air) et de rayonnement (température des parois) permettant de caractériser simplement l'inconfort.

Ventilation naturelle : renouvellement naturel (par opposition à l'usage de système mécanique) de l'air d'une pièce engendré par l'ouverture d'ouvrants entre des zones soumises à des conditions différentes (différences de pressions dues au vent, à l'altitude, à la température, etc.).

Annexe 2 – Hypothèses et sources de données pour la caractérisation thermo-physique des logements

1. Composition des parois

La composition des parois est définie à partir des sources suivantes (par ordre de priorité) :

- des informations recueillies sur site
- des DPE
- des fiches typologiques issues du projet MARIE/123RENO⁴⁷
- et de celles issues du projet TABULA⁴⁸.

2. Propriétés thermo-physiques des matériaux

Les propriétés thermo-physiques des matériaux ont été tirées de la base de données du livre L'isolation thermique écologique de Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey.

⁴⁷ Disponible ici : <https://www.123reno-med.eu/votre-projet.html> (après affichage des bouquets de travaux).

⁴⁸ https://episcopes.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/FR_TABULA_TypologyBrochure_Pouget.pdf.

3. Débit de ventilation

Dans le cas d'un système de ventilation naturelle, nous retiendrons les hypothèses du projet TABULA, à savoir :

- 0,4 vol/h en maisons individuelles
- 0,5 vol/h en logements collectifs

En cas de ventilation mécanique⁴⁹ le débit de ventilation correspondra au nombre et au dimensionnement des entrées d'air (réglette sur menuiserie).

En l'absence d'information de ce type, nous retiendrons la valeur généralement recommandée 0,6 vol/h pour le débit hygiénique.

4. Débit d'infiltrations

Pour l'infiltration, nous supposons un n50 de 10 vol/h avant rénovation et de 5 vol/h après rénovation⁵⁰ (en supposant l'absence d'attention poussée à l'étanchéité à l'air). Le débit moyen de renouvellement d'air est estimé à l'aide de la formule empirique n50/20 (soit, dans les deux cas susmentionnés, respectivement 0,5 et 0,25 vol/h).

5. Taux de renouvellement d'air en ventilation naturelle

A partir du retour d'expérience mené sur le LowCal par Enertech⁵¹ et en cohérence avec les fiches ARENE⁵², à défaut de modélisation spécifique (calcul aérodynamique), selon les configurations proposées, nous retenons forfaitairement les taux de renouvellement d'air suivants :

	Logement mono-orienté	Logement traversant
Fenêtres complètement ouvertes	5 vol/h	25 vol/h
Fenêtres entrouvertes	2 vol/h	10 vol/h

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Il conviendrait de les décliner selon diverses configurations (taux d'ouverture, type d'ouverture, morphologie, étage, climat, etc.).

6. Apport internes

Nous considérerons⁵³ que les apports sensibles dégagés par une personne en période estivale sont de 55 W. De façon générique, le nombre de personne est estimé à partir du type de logement (2 personnes pour la première chambre puis 1 personne par chambre supplémentaire).

Pour tous les autres apports internes, nous retiendrons une valeur forfaitaire de 3 W/m² (d'après les retours des campagnes de mesures d'Enertech, en cohérence avec l'hypothèse retenue dans TABULA).

⁴⁹ Le cas d'une double-flux n'a jamais été rencontré et n'est donc pas abordé.

⁵⁰ En cohérence avec diverses références, dont notamment : https://www.cerema.fr/fr/system/files/documents/2018/02/Generalites_et_sensibilisation_v_2-4.pdf et https://www.enertech.fr/modules/catalogue/pdf/45/171221_Etude%20humidite%20b%C3%A2ti%20ancien_vfinal_e.pdf.

⁵¹ Publication des rapports à venir

⁵² <https://www.enviroboite.net/fiches-confort-d-ete-en-provence-alpes-cote-d-azur>

⁵³ D'après la valeur moyenne selon le sexe tirée de ROULET C-A, Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments, collection gérer l'environnement, presses polytechniques et université romandes, 2004, 358 p.

Pour nous placer dans le cas le plus défavorable nous considérerons les pièces critiques sont occupées toute la journée.

7. Facteur solaire

Le facteur solaire des différents types d'occultation est tiré des fiches ARENE⁹.