



EXPERTISES

Résilience

Jun
2023

ADAPTATION DES BÂTIMENTS AU
CHANGEMENT CLIMATIQUE

1. INTRODUCTION

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus sévères. L'enjeu est de parvenir à cet objectif à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais aussi en ce qui concerne le parc existant.

Le projet Résilience vise à apporter des éléments en réponse à un certain nombre de questions posées sur l'adaptation au changement climatique, par exemple :

- Quel niveau d'isolation permet de réduire les risques de surchauffe sans induire d'effet négatif en termes d'impacts environnementaux, quelle épaisseur d'isolation est appropriée, les triple-vitrages sont-ils préférables aux double-vitrages ?
- Quel niveau d'inertie thermique permet de réduire la surchauffe diurne tout en permettant un rafraîchissement nocturne et en limitant les impacts environnementaux liés à la production des matériaux ?
- Des brasseurs d'air, permettant d'étendre la zone de confort et d'éviter de devoir ouvrir les fenêtres pour augmenter la vitesse d'air, seront-ils suffisants pour éviter une climatisation active ?
- Peut-on organiser un zonage thermique ménageant un espace plus frais au sein d'un logement ou d'un bâtiment ?

Un état de l'art a montré que la simulation thermique dynamique est appropriée pour répondre à ce type de questions en considérant des projections climatiques pour un contexte donné : des études ont par exemple été menées en Grande-Bretagne où le nombre d'heures au-delà de 28 °C à l'intérieur des locaux passe, dans les cas étudiés, de 50 ou 100 dans le climat des années 1980 à plus de 500 en 2080. Des archétypes sont en général définis pour représenter un parc de bâtiments. Certains travaux se sont concentrés sur des types particuliers de bâtiments comme les écoles ou les hôpitaux.

2. METHODOLOGIE

Des données de projection climatique ont tout d'abord été élaborées dans le contexte français. Une liste de mesures d'adaptation et un échantillon de bâtiments types ont été constitués (maisons individuelles, logements collectifs, bâtiments tertiaires) en considérant différentes époques de construction. Des critères de performance ont été définis pour évaluer l'efficacité des différentes solutions d'adaptation proposées. Ces critères concernent les risques de surchauffe, en tenant compte de la notion de confort adaptatif, mais aussi les coûts et la performance environnementale évaluée par analyse de cycle de vie (ACV), en incluant les effets éventuels des mesures d'adaptation sur les besoins de chauffage et de climatisation. L'objectif est ainsi d'évaluer les mesures d'adaptation par différents indicateurs, par exemple : degrés-heures d'inconfort, bilan CO₂, indicateurs ACV concernant la santé, la biodiversité et les ressources, coûts.

2.1. ELABORATION DE DONNEES CLIMATIQUES PROSPECTIVES

Dans le cadre du projet Résilience, le choix a été fait d'utiliser une approche combinant différentes simulations climatiques à haute résolution pour créer des fichiers de forçages climatiques, à savoir utiliser un modèle numérique de climat régional pour produire une année type en climat futur à partir de longues séries temporelles.

La méthodologie présentée ici a pour but de recréer une année considérée comme typique du climat futur moyen pour un horizon temporel donné (milieu et fin de siècle). De plus, pour évaluer la réponse des bâtiments à des événements thermiques extrêmes, des vagues de chaleur d'intensités variables sont également ajoutées aux forçages moyens. La méthode repose sur deux axes distincts :

- les conditions climatiques « typiques » en climat futur sont fournies par analyse statistique d'un ensemble de projections climatiques produites par les modèles climatiques régionaux de l'ensemble EURO-CORDEX;
- **les données météorologiques horaires en climat futur sont produites à partir du modèle de climat régional à haute résolution AROME, version climatique du modèle de prévision numérique du temps développé par Météo-France et le CNRM.**

Deux zones climatiques distinctes ont été sélectionnées pour cette étude : la région parisienne pour représenter un climat plutôt « moyen » et la région de Nîmes pour représenter un climat plus extrême (en températures). Pour chacune de ces zones, les points de grille des modèles les plus proches des stations RADOME (réseau Météo-France

opérationnel) servant de référence rurale pour chacune des régions d'étude sont choisis : station de Chartres pour Paris (48,46°N ; 1,50°E) sur la base d'études antérieures, station de Pujaut pour Nîmes (43,99°N ; 4,76°E). En plus de ces points ruraux, les points les plus proches des villes étudiées sont également utilisés pour produire les forçages contenant l'influence de la ville.

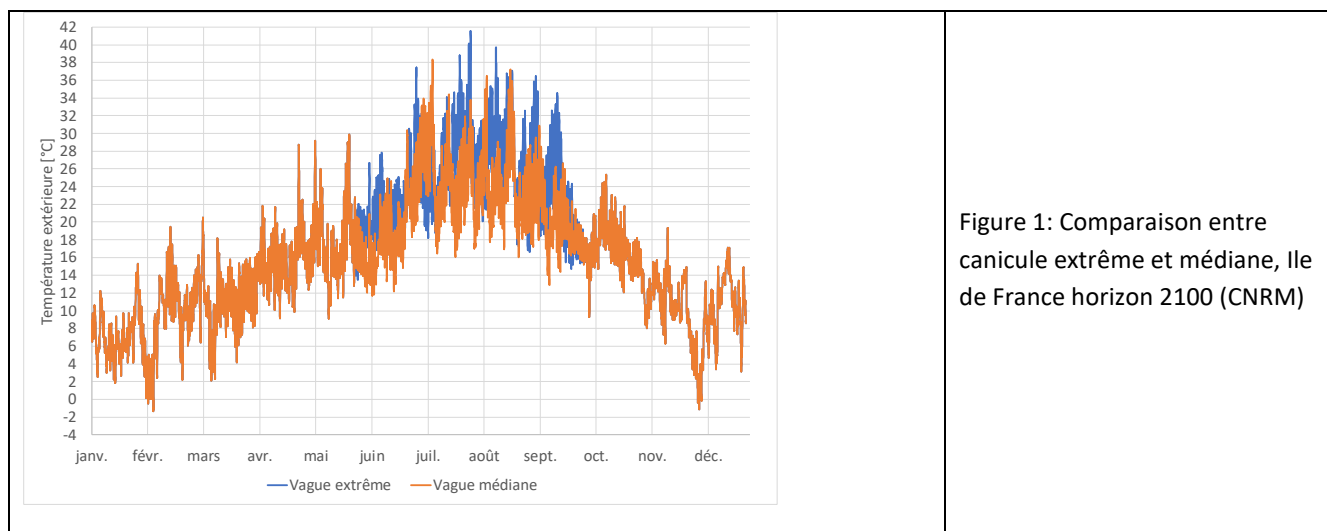
L'approche d'un « Typical Meteorological Year » est choisie pour recréer une année considérée comme typique du climat futur. Le principe de l'approche consiste à extraire, pour un mois donné, l'année la plus « typique » pour ce mois particulier. Par exemple, à partir d'observations sur la période 1991–2020, le mois de janvier 1999 est le plus proche de la moyenne de tous les mois de janvier de la période, le mois de février 2004 le plus proche de la moyenne de tous les mois de février, etc. En concaténant les douze mois extraits, on obtient alors une série d'un an dont les moyennes mensuelles sont au plus proche des moyennes de la période.

L'année moyenne reconstruite par la méthode « Typical Meteorological Year » permet de représenter les conditions climatiques futures moyennes tout en prenant en compte la variabilité inter-journalière. Cependant elle ne permet pas de prendre en compte des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, ou alors de manière très partielle, si par exemple des conditions de vagues de chaleur constantes en été devenaient la norme en climat futur lointain.

Pour « rajouter » le signal d'une vague de chaleur sur l'année moyenne, une approche similaire à la méthode « Typical Meteorological Year » est proposée selon les étapes suivantes :

- le choix d'une définition de vague de chaleur ;
- l'extraction des vagues de chaleurs simulées par l'ensemble EURO-CORDEX ;
- l'extraction des vagues de chaleurs simulées par AROME ;
- la discrimination des types de vagues de chaleurs en fonction de leurs caractéristiques ;
- l'identification de la vague de chaleur simulée par AROME la plus proche de la vague de chaleur EURO-CORDEX d'intérêt.

La figure 1 suivante montre un exemple de profils annuels de température.



2.2. DEFINITION D'UN ECHANTILLON DE BATIMENTS ET DE MESURES D'AMELIORATION

L'objectif est d'étudier la résilience de différents types de bâtiments : maisons individuelles, immeubles de logement collectif, bureaux et bâtiments scolaires. Il est d'autre part utile de considérer différents niveaux de performance : des bâtiments anciens non isolés, et des bâtiments neufs performants.

Des bâtiments archétypes ont alors été définis pour les maisons individuelles (existant et neuf), les logements collectifs (haussmannien, années 1960 et neuf), les bureaux et les bâtiments scolaires (années 1960 et neuf), en considérant différents niveaux d'isolation thermique. Des données ont été collectées sur ces bâtiments de manière à pouvoir mettre en œuvre la simulation énergétique et l'ACV.

	Maisons individuelles	Logement collectif	Bureaux	Bâtiments scolaires
Neuf, performant	Maison neuve (2017)	Résidence basse consommation (2016)	Bureaux neufs (2015)	Ecole neuve à Marseille (2018)
Existant	Maison années 1970	Immeuble haussmannien (1880s) HLM (1969)	+ variante non isolée	Ecole à Fabrègues (1960s)

Différentes mesures peuvent être envisagées pour améliorer le confort d'été dans les bâtiments existants. Celles-ci se répartissent en deux sous-groupes : les mesures passives qui ne font appel à aucune force motrice sauf de façon brève et transitoire et les systèmes actifs qui nécessitent le fonctionnement permanent d'un moteur (électrique ou mécanique).

Les solutions passives sont à privilégier car elles n'engendrent pas de consommations énergétiques (électrique ou thermique) en phase d'exploitation. Mais elles ne sont pas toutes exemptes de stratégie de pilotage notamment pour les protections solaires mobiles ou la ventilation. On peut citer : la ventilation naturelle (ouverture de fenêtre, imposte à soufflet, fenêtre de toiture...), les protections solaires amovibles (volets, stores...) ou fixes (casquettes, brise-soleil), l'isolation thermique, l'augmentation de la capacité thermique du bâti, les vitrages adaptés (transmission du rayonnement et transfert thermique), les revêtements de faible absorptivité, les murs ou toitures végétalisés(e)s, et le zonage thermique. Les systèmes actifs considérés sont les suivants : la ventilation mécanique, avec éventuellement un puits climatique, les brasseurs d'air, et la climatisation par compression, éventuellement alimentée par une production d'électricité photovoltaïque.

2.3. CRITERES DE PERFORMANCE CONSIDERES

La réglementation RE 2020 a introduit un nouvel indicateur de confort hygrothermique : le nombre de degrés-heures d'inconfort estival, exprimé en °C.h et noté DH. Il est évalué pour chaque partie de bâtiment thermiquement homogène, c'est-à-dire au niveau de chaque zone thermique.

Le calcul de cet indicateur consiste à sommer, sur chaque pas de temps en période d'occupation, l'écart entre la température opérative de la zone et une température limite d'inconfort chaud prenant en compte le confort adaptatif, basée sur la norme NF EN 16798-1. Conformément à cette norme, la température limite d'inconfort chaud considérée est calculée à chaque pas de temps en fonction de la température extérieure en moyenne glissante journalière. En présence de systèmes qui modifient la sensation thermique des occupants (par la création d'une vitesse d'air, un apport ou une diminution de l'humidité de l'air, etc.), la température limite d'inconfort chaud est modifiée.

Cet indicateur a l'avantage d'intégrer à la fois la durée et l'intensité des périodes d'inconfort et de prendre en compte le phénomène de confort adaptatif qui constitue une approche intéressante du comportement et du ressenti des occupants.

Il présente en cela un intérêt supérieur aux indicateurs plus basiques de type nombre d'heures ou pourcentage d'inconfort au-delà d'une température fixe.

Pensant aux nombreux foyers dépourvus de systèmes de rafraîchissement actif, Givoni a travaillé dans les années 1980 sur l'expression du confort pour des bâtiments naturellement ventilés. Son modèle prend en compte la température résultante (ou opérative), l'humidité, et la vitesse d'air. Le diagramme de Givoni définit sur le diagramme de l'air humide des zones de confort pour une activité sédentaire et avec un habillement adapté à l'été.

Des critères environnementaux (selon l'ACV, par exemple émissions de gaz à effet de serre, impacts sur la santé et la biodiversité) et économiques sont également considérés dans ce projet.

2.4. SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE (STD)

Le modèle physique réduit COMFIE de la suite logicielle Pleiades est utilisé pour la STD des bâtiments. Le modèle a été validé par comparaison à des mesures de températures estivales et à d'autres outils de simulation faisant référence au niveau international. A partir d'une maquette numérique de chaque archétype, des variations paramétriques ont été effectuées via un module programmé en python basé sur le module AMAPOLA de Pleiades. Ceci a permis de générer automatiquement un diagramme affichant l'évolution des degrés-heures, selon différents niveaux d'isolation (cinq épaisseurs d'isolants et trois types de vitrage).

2.5. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

L'adaptation des bâtiments au changement climatique peut nécessiter la mise en œuvre de produits de construction (par exemple isolation thermique) et/ou le remplacement de certains éléments (vitrages), ce qui induit des impacts environnementaux liés à la fabrication et à la fin de vie de ces produits. Ces impacts sont évalués par la méthode d'ACV en utilisant l'outil EQUER de Pleiades, qui permet d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre (en équivalent CO₂), le prélèvement de ressources (énergie primaire, eau, matières premières) et les déchets (radioactifs ou non), mais aussi des indicateurs concernant la santé et la biodiversité.

2.6. EVALUATION ECONOMIQUE

Adapter un bâtiment au changement climatique et en particulier aux vagues de chaleur nécessite de réaliser des travaux pour réduire le taux d'inconfort thermique des occupants. Ces travaux vont nécessiter des investissements d'une part mais aussi permettre des économies d'énergie d'autres part. Nous avons donc utilisé plusieurs outils économiques pour évaluer d'une part l'efficacité des travaux à réaliser pour réduire le taux d'inconfort en utilisant les diagrammes de Pareto, puis un autre outil permettant de comparer plusieurs critères techniques pour comparer ces solutions avec les diagrammes parallèles. Finalement, une analyse coût-bénéfice a été utilisée pour évaluer plusieurs scénarios d'investissement permettant d'évaluer les gains économiques sur toute la durée de vie du bâtiment.

3. EXEMPLES DE RESULTATS OBTENUS

3.1. BATIMENT HAUSSMANNIEN A PARIS

La figure 2 montre l'augmentation de l'inconfort entre 2050 et 2100, en fonction de la mise en œuvre d'isolation thermique (par l'intérieur dans ce cas du fait d'une façade classée) et du type de vitrage (simple SV, double DV ou triple TV). La zone thermique la plus exposée (en dessous de la toiture) a été considérée, sous l'hypothèse d'une ventilation traversante (10 vol/h) et d'une vague de chaleur médiane.

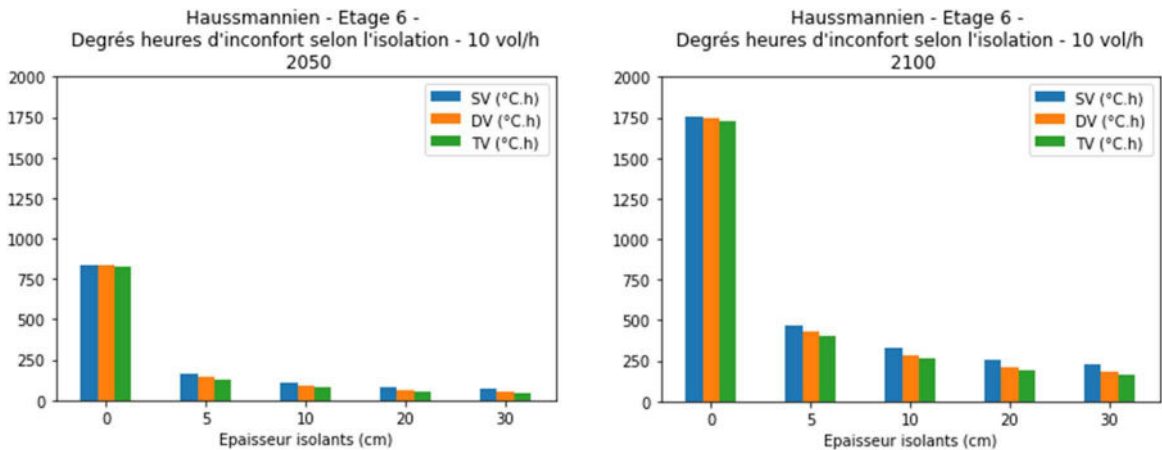


Figure 2 : Tendance d'évolution de l'inconfort dans un immeuble haussmannien à Paris

Les premiers centimètres d'isolant sont très efficaces pour réduire l'inconfort, qui varie ensuite moins nettement avec des épaisseurs plus importantes (ceci étant, une épaisseur suffisante doit être prévue pour réduire la consommation de chauffage). Le remplacement des fenêtres semble avoir peu d'effet sur les surchauffes, il faut noter qu'une occultation à 80 % est considérée (persiennes).

En considérant que la végétalisation à l'échelle urbaine permet au mieux de s'approcher du climat de la zone rurale limitrophe (Chartres dans le cas étudié ici), on peut espérer réduire l'inconfort avec les résultats suivants dans le cas d'une vague de chaleur extrême en 2100 (Figure 3).

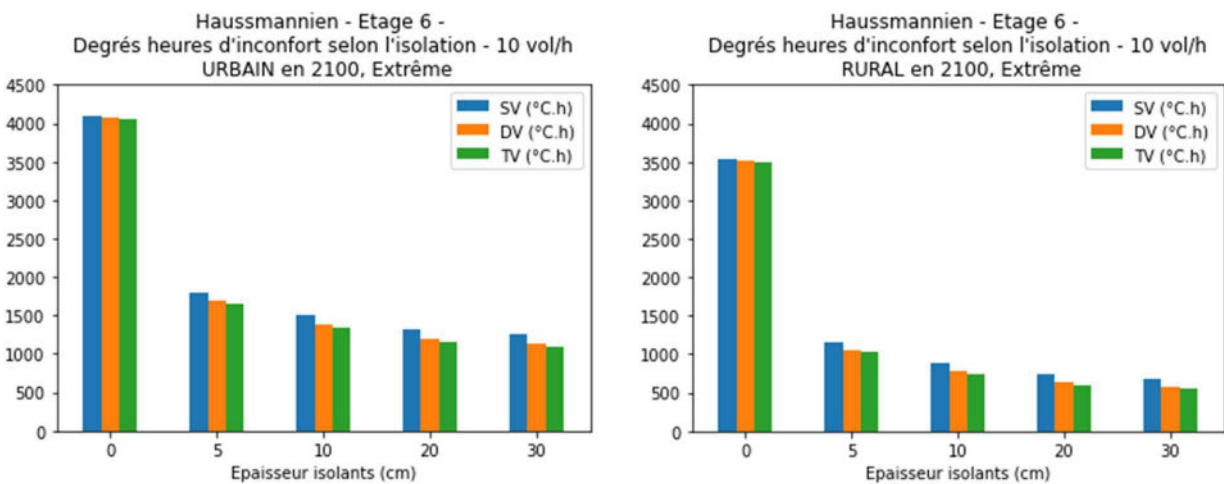


Figure 3 : Influence de l'îlot de chaleur urbain dans le cas d'un immeuble haussmannien à Paris

La végétalisation n'est donc pas suffisante pour atteindre un niveau de confort satisfaisant : la rénovation thermique des bâtiments est indispensable.

3.2. INFLUENCE DE L'INERTIE THERMIQUE

La comparaison, pour un même site (Île-de-France) et une même sévérité de canicule (vague de chaleur médiane), entre le bâtiment haussmannien isolé par l'intérieur et un immeuble HLM, plus inerte et isolé par l'extérieur, montre sur cet exemple l'influence de l'inertie thermique (Figure 4).

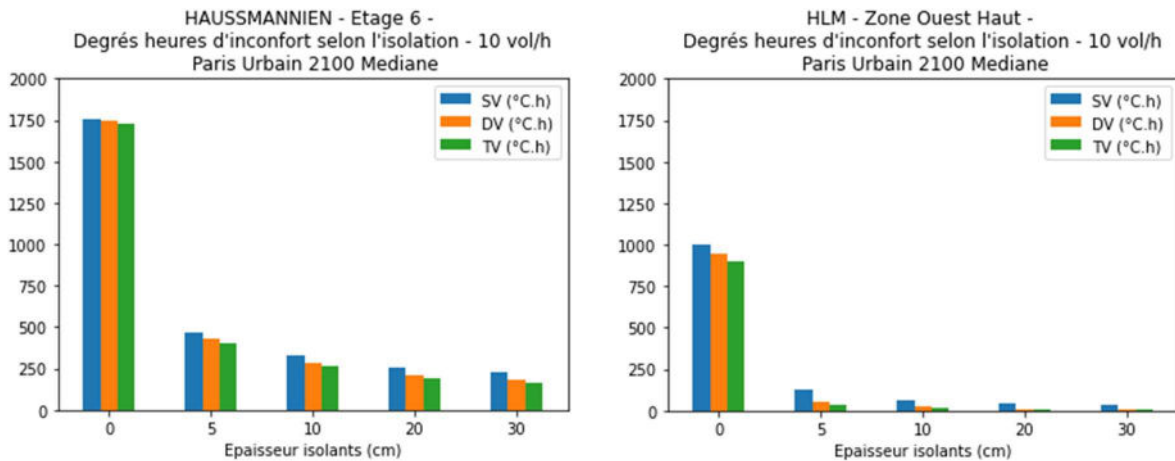


Figure 4 : Comparaison entre HLM (plus inerte, isolation par l'extérieur) et haussmannien

Selon ce résultat, il sera plus facile de protéger les immeubles où une isolation par l'extérieur est possible.

3.3. MAISON ANCIENNE

Les maisons anciennes ont généralement des murs épais, et un plancher sur terre-plein en contact avec le sol, ce qui leur confère une très forte inertie thermique. Dans la situation la plus défavorable (Nîmes, horizon 2100 extrême), le nombre de degrés-heures d'inconfort est de 1250 °C.h. Selon les critères du diagramme de Givoni, un brasseur d'air permet de passer de 77% à 92 % d'heures de confort.

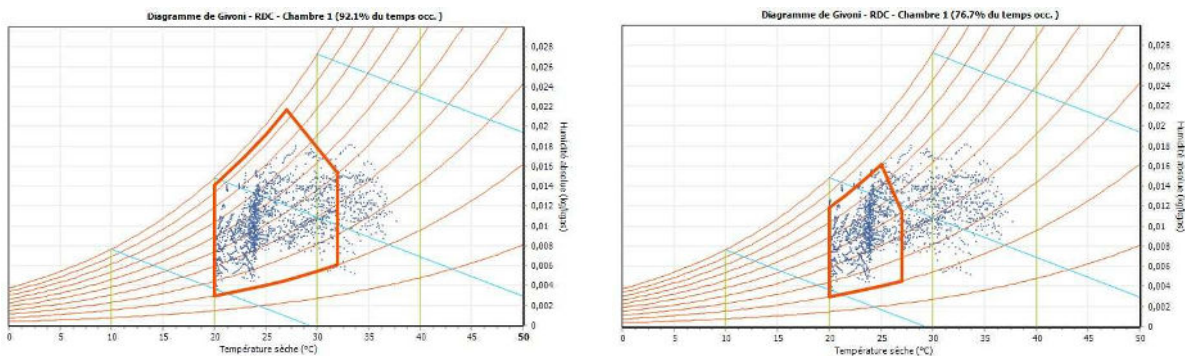


Figure 5 : Maison ancienne, comparaison avec (à gauche) et sans (à droite) brasseur d'air

Il faut espérer que les objectifs de protection du climat seront respectés et dans le sud de la France, sans doute faudra-t-il compléter les mesures passives par exemple en mettant en œuvre une climatisation adiabatique, moins consommatrice d'énergie que les systèmes thermodynamiques.

3.4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Dans l'exemple de l'immeuble HLM en Ile de France, une rénovation permettant de réduire l'inconfort à 50 degrés-heures à l'horizon 2100 dans le cas d'une vague de chaleur médiane induit des impacts liés au remplacement des fenêtres par des doubles vitrages et à la mise en œuvre d'isolation thermique (20 cm sur les façades et la toiture). Mais ces impacts sont faibles par rapport à la réduction des impacts liés au chauffage (supposé au gaz dans cet exemple). D'autre part, l'immeuble devrait être climatisé en l'absence de rénovation. La figure 6 montre la comparaison des émissions de gaz à effet de serre avec et sans rénovation, les contributeurs liés aux consommations d'eau et d'électricité restant inchangés.

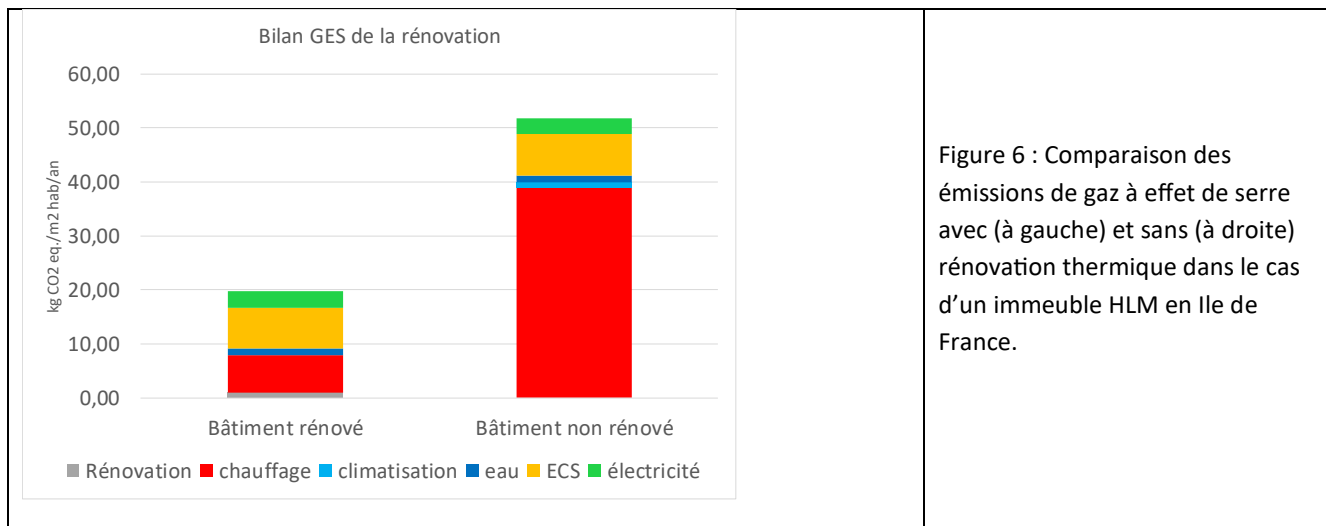


Figure 6 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre avec (à gauche) et sans (à droite) rénovation thermique dans le cas d'un immeuble HLM en Ile de France.

L'étude sur les autres critères environnementaux ne fait pas apparaître de transfert d'impact : la réduction des émissions de GES n'induit pas d'augmentation des autres impacts.

3.5. ASPECTS ECONOMIQUES

Pour l'exemple du HLM étudié, nous observons que la rentabilité d'un projet de rénovation dépend de nombreux facteurs qui peuvent significativement peser sur les modèles financiers. Les éléments les plus dimensionnants étant l'éligibilité aux subventions ma prim'renov, l'évolution du prix de l'énergie à horizon 2100 qui peut varier significativement et en particulier du gaz pour l'exemple étudié, la prise en compte des besoins de climatisation qui n'ont pas été considérés dans cette étude (seulement les coûts liés au chauffage sont pris en compte) qui pourront améliorer significativement la rentabilité si une meilleure isolation est réalisée. D'autre part, on remarque dans l'exemple étudié, le TRI (Taux de Rentabilité Interne) le plus élevé est atteint pour le scénario avec l'investissement le plus faible autour de 600 000€. Cela est dû à la très bonne efficacité des solutions d'isolation par l'extérieur. Les investissements supplémentaires concernant l'isolation des fenêtres a plutôt tendance à faire baisser le taux de rentabilité interne. On notera toutefois qu'il peut être nécessaire de remplacer des fenêtres pour d'autres raisons que de l'isolation thermique, cet investissement serait alors plutôt opportuniste : lorsqu'il devient nécessaire dans tous les cas de changer les fenêtres, les remplacer par des fenêtres avec de meilleures caractéristiques thermiques.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les tendances obtenues par cette étude présentent des incertitudes importantes, liées en particulier aux scénarios climatiques prospectifs considérés dans les simulations.

Les résultats présentés ci-dessus correspondent à une ventilation traversante, permettant d'obtenir un débit d'air élevé si les fenêtres sont ouvertes. D'autres simulations ont été réalisées en considérant un taux de renouvellement d'air de 2 vol/h. Pour éviter les risques d'intrusion, il existe des systèmes incluant une ouverture d'imposte et/ou de fenêtre en toiture. Un calcul aéraulique permettrait d'évaluer le débit d'air correspondant. Mais en zone de bruit, il faudrait mettre en œuvre un système de ventilation muni de chicanes ce qui réduirait le débit. On suppose également que les occupants ouvrent leurs fenêtres les nuits d'été si la température extérieure est inférieure à la température intérieure et que celle-ci est supérieure à 22 °C. Ils sont, d'autre part, supposés fermer des stores durant les périodes chaudes. Sans ce comportement de bonne gestion, les surchauffes deviennent très importantes.

Les résultats montrent que pour se protéger efficacement des canicules, il faut associer une isolation thermique à une surventilation nocturne suffisante (au moins 2 à 3 vol/h) et à des protections solaires. Le comportement des usagers en termes de gestion des ouvertures et des occultations joue alors un rôle majeur. Cette étude montre aussi qu'une isolation

par l'extérieur est à privilégier, l'inertie thermique étant favorable au confort. La végétalisation des façades et l'utilisation de puits climatique améliorent aussi le confort des bâtiments. Enfin, ne rafraîchir qu'une partie d'un bâtiment (zonage thermique) réduirait la consommation pour la climatisation active, qui pourrait s'avérer nécessaire dans le sud de la France où les températures risquent d'être particulièrement élevés d'ici la fin du 21ème siècle.

Les résultats de ces évaluations ont permis d'étudier des recommandations à l'intention des professionnels et des politiques publiques. Du matériel pédagogique a par ailleurs été élaboré en vue de proposer des formations concernant l'usage de la Simulation Thermique Dynamique dans le cadre d'un « diagnostic canicule ». Il serait utile d'étendre l'étude à des régions dont les conditions climatiques extrêmes ne sont pas encore trop contraignantes aujourd'hui, mais qui pourront le devenir à terme.

RÉSUMÉ

Le changement climatique impose d'adapter les bâtiments pour assurer un niveau de confort suffisant durant des périodes de canicule de plus en plus sévères. L'enjeu est de parvenir à cet objectif à moindre coût et à moindre impact environnemental, en construction neuve mais aussi en ce qui concerne le parc existant. Après une phase d'état de l'art et de retours d'expérience sur la canicule de 2019, des données de projection climatique ont été élaborées, une liste de mesures d'adaptation et des échantillons de bâtiments types ont été constitués (maisons individuelles, logements collectifs, bâtiments tertiaires) en considérant différentes époques de construction. Des critères de performance ont été définis pour évaluer l'efficacité des différentes solutions d'adaptation proposées. Ces critères concernent les risques de surchauffe, en tenant compte de la notion de confort adaptatif, mais aussi la performance environnementale évaluée par analyse de cycle de vie (en incluant les effets éventuels des mesures d'adaptation sur les besoins de chauffage et de climatisation). L'objectif est ainsi d'évaluer les mesures d'adaptation par différents indicateurs, par exemple : degrés-heures d'inconfort, bilan CO₂, indicateurs ACV concernant la santé, la biodiversité et les ressources, coûts. Les résultats de ces évaluations, qui dépendent du type de bâtiment, du climat considéré et du comportement des occupants, sont diffusés auprès de maîtres d'ouvrages, bureaux d'études techniques, administration en charge de la réglementation, chercheurs et autres organismes concernés par ces sujets. Les données climatiques prospectives élaborées dans le cadre de ce projet sont diffusées auprès d'utilisateurs d'outils de simulation thermique dynamique. Les connaissances acquises lors de ce projet pourront contribuer à orienter les politiques publiques visant à améliorer la résilience des bâtiments face aux vagues de chaleur.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2004C0021

Étude réalisée par : Bruno PEUPORTIER, Robin MONNIER et Patrick SCHALBART (ARMINES-CES), Aude LEMONSU et Benjamin LEROY (CNRM), Eric FRANÇOIS, Etienne WURTZ et Ophélie OUVRIER-BONNAZ (CEA-INES), Nicolas ZIV et Karim SELOUANE (Resalliance), Eduardo SERODIO, Robin Pionnier et Stéphane THIERS (IZUBA Energies) 2023 pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Bruno PEUPORTIER (ARMINES)

Appel à projet de recherche : « Vers des bâtiments responsables » Edition 2020

Coordination technique - ADEME : SCHOEFFTER Marc
Direction/Service : Bâtiment, Direction Villes et Territoires Durables

CITATION DE CE RAPPORT

Auteur(s) personnes physiques et /ou morales, (éventuellement ADEME si contribution intellectuelle au projet ; nota bene: la copropriété des résultats ADEME/bénéficiaire peut être un indice de contribution effective de l'ADEME). **Année de publication.** Titre du Rapport. Nombre de pages.

PEUPORTIER Bruno, ARMINES, LEMONSU Aude, CNRM, FRANÇOIS Eric, CEA-INES, ZIV Nicolas, Resalliance, SERODIO Eduardo, IZUBA Energies 2023. Résilience. Note de synthèse, 10 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne
<https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.