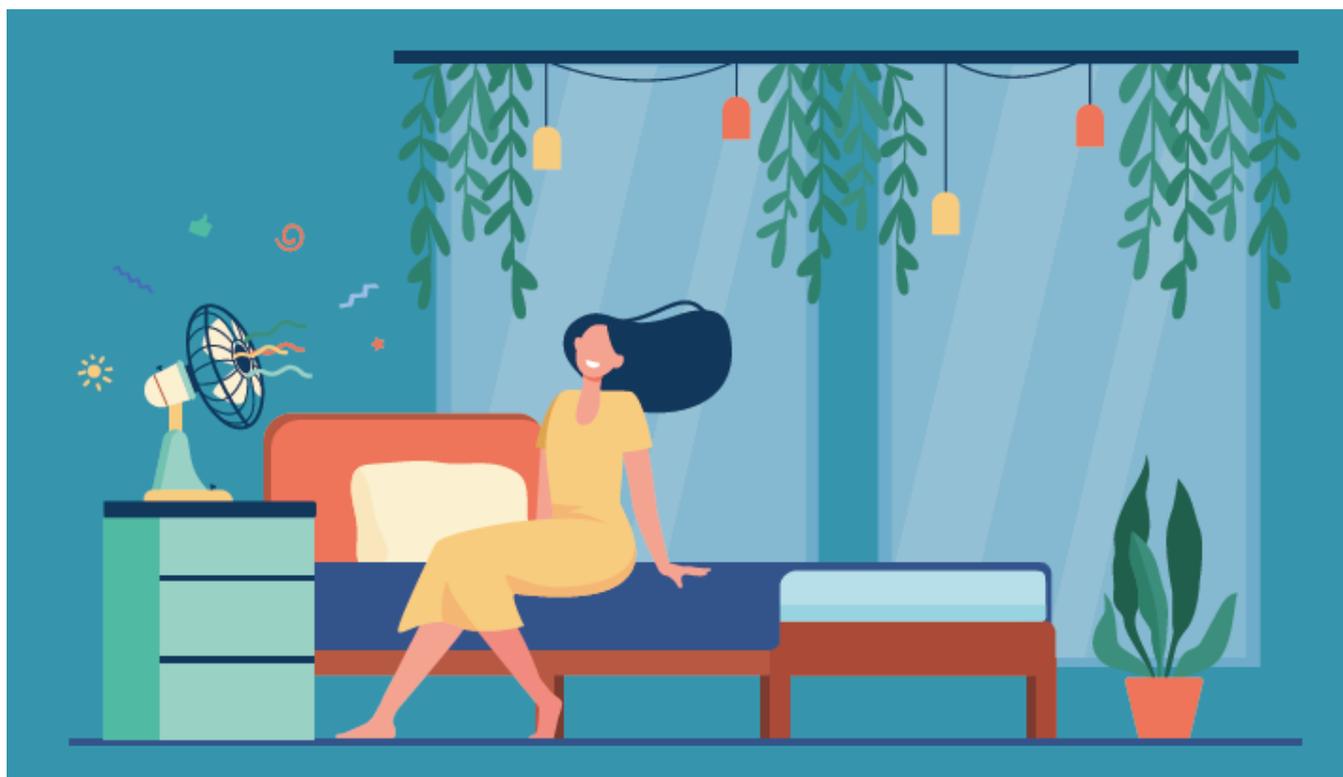


Etat de l'art

Confort thermique estival, vulnérabilité du parc bâti à la surchauffe et comportements d'adaptation aux fortes chaleurs

2024



Rédacteurs :	Relecteurs :
Anaïs MACHARD Tania ABI MOUSSA Jean-Marie ALESSANDRINI Fabrice DE OLIVEIRA Madeleine DEVYS Mohamad EL KADRI Baptiste FOURNIER Gwénaëlle HAESE Lydie LAIGLE Dorothee MARCHAND Letizia ROCCAMENA	Thierry GUIOT Charles PELÉ Florence GUTH

RESUME

Ce rapport présente l'état actuel des connaissances en ce qui concerne la vulnérabilité du cadre bâti français et le risque auquel sont et seront exposés les habitants des logements en périodes de fortes chaleurs. Il met en exergue les difficultés rencontrées pour adapter les bâtiments aux fortes chaleurs et présente les apports du projet RENOPTIM à ce sujet.

Le premier chapitre présente des définitions de risque, vulnérabilité et confort, et met en évidence le défi complexe d'assurer le confort thermique des occupants tout en minimisant les consommations énergétiques, alors que la consommation liée à la climatisation est grandissante en France. Il souligne la nécessité d'inciter à l'utilisation de solutions passives pour minimiser la surchauffe et de recommander la climatisation uniquement lorsque cela devient inévitable. Il résume également une dizaine d'entretiens menés auprès de bailleurs sociaux afin de comprendre comment ils traitent aujourd'hui la problématique de confort d'été dans leurs opérations de réhabilitation.

Le deuxième chapitre met en lumière la complexité de cibler les logements à traiter en priorité. La surchauffe dans les logements dépend à la fois de la capacité des logements à se protéger des apports solaires, de leur inertie thermique qui permet de stocker et déstocker la fraîcheur au moment opportun, et de leur potentiel de rafraîchissement par ventilation naturelle nocturne, fortement lié à leur caractère traversant. Ces différents phénomènes physiques sont intrinsèquement liés, ce qui en complexifie l'analyse. Dans le cadre du projet RENOPTIM, un outil de ciblage des bâtiments les plus vulnérables à la surchauffe, se présentant sous la forme d'un indicateur par bâtiment, sera développé, basé sur des données existantes issues de la Base de Données Nationale des Bâtiments et complété par la connaissance des bailleurs de leur patrimoine. La campagne expérimentale déployée durant l'été 2023 au sein de 76 logements situés dans trois régions de France métropolitaine permettra de valider et renforcer cet indicateur de vulnérabilité à la surchauffe.

Le troisième chapitre présente différents indicateurs, méthodes et modèles qui permettent d'évaluer le confort et le stress thermique, leurs spécificités et les limites des connaissances actuelles. Il décrit également la thermophysologie du corps humain ainsi que les différents types de mesures à l'échelle de l'humain qui permettent d'évaluer expérimentalement les différences d'un individu à un autre. Au sein du projet RENOPTIM, des données expérimentales thermo-physiologiques recueillies au cours de l'été 2023 sur une vingtaine de participants dans les logements français instrumentés permettront d'alimenter ces modèles de confort. Ces expérimentations ont un caractère exceptionnel car aucune expérimentation de cette ampleur n'existe à ce jour en France. Les données recueillies permettront d'incrémenter nos connaissances sur le confort thermique de la population française métropolitaine et permettront de proposer des seuils d'inconfort adaptés aux ressentis des personnes en périodes de fortes chaleurs.

Enfin, le dernier chapitre de ce rapport présente l'évolution des guides d'écogestes destinés à informer les citoyens sur les moyens de réduire leur consommation d'énergie tout en améliorant leur confort thermique en été. Il met en évidence les défis liés aux facteurs socio-économiques et aux pratiques quotidiennes des habitants et souligne l'importance de présenter ces écogestes de façon à ce qu'ils s'insèrent dans leur contexte d'habitudes de vie. Dans le cadre du projet RENOPTIM, une étude sociologique est menée pour mieux comprendre ces aspects, car le comportement des occupants dans leur logement en période de fortes chaleurs peut avoir un impact important sur la surchauffe de celui-ci.

En résumé, ce rapport présente l'état de l'art des connaissances actuelles sur la surchauffe dans les logements français, les différents moyens d'évaluer le confort thermique ainsi que les moyens d'actions à disposition des habitants. Le projet RENOPTIM vise à fournir des outils aux bailleurs sociaux et aux acteurs privés, en France métropolitaine, pour identifier les logements à risque de surchauffe, et élaborer des plans d'action en vue de maintenir le confort tout en limitant la climatisation. Les outils développés et les données collectées contribueront à outiller les bailleurs afin qu'ils puissent prendre des décisions éclairées pour considérer la problématique de l'adaptation aux fortes chaleurs au cours de leur projet de rénovation de leur parc de bâtiments.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
1. PROBLEMATIQUE DE L'ADAPTATION AUX EPISODES DE FORTES CHALEURS	6
1.1 DEFINITIONS	6
1.2 LE RISQUE ET LA VULNERABILITE DES OCCUPANTS DES BATIMENTS FACE AUX EPISODES DE FORTES CHALEURS	8
1.3 LA PENETRATION DE LA CLIMATISATION EN FRANCE	11
1.4 LA RESILIENCE DU BATIMENT FACE AUX FORTES CHALEURS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE	14
1.6 ETAT DES LIEUX DE LA PROBLEMATIQUE DU CONFORT D'ETE AUPRES DES BAILLEURS SOCIAUX DANS LES PROJETS DE RENOVATION.....	15
1.7 CONCLUSION SUR L'ENJEU DU PROJET RENOPTIM : PRENDRE EN COMPTE L'ADAPTATION AUX FORTES CHALEURS DANS LA CONCEPTION ET LA RENOVATION DU BATI EN CONVERGENCE AVEC LES OBJECTIFS DE DECARBONATION	19
2. LA VULNERABILITE DU PARC BATI FRANÇAIS A LA SURCHAUFFE	21
2.1 FACTEURS DETERMINANTS LA SURCHAUFFE DU BATI.....	21
2.2 SEGMENTATION DU PARC DE BATIMENTS.....	26
2.3 CONCLUSION : CARACTERISATION DANS LE PROJET RENOPTIM DE LA VULNERABILITE DU PARC BATI A LA SURCHAUFFE	31
3. LE CONFORT THERMIQUE ET LE STRESS THERMIQUE DE L'INDIVIDU	33
3.1 REGULATION DE LA TEMPERATURE CHEZ L'HUMAIN	33
3.2 EFFET DE LA CHALEUR SUR LA SANTE ET LE CONFORT, DEFINITION DE SEUILS PHYSIOLOGIQUES.....	42
3.4 PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT THERMIQUE	44
3.5 ETUDES EXPERIMENTALES DU CONFORT THERMIQUE EN LIEN AVEC LES PARAMETRES BIOPHYSIOLOGIQUES	46
3.6 MODELES DE CONFORT THERMIQUE ET DE STRESS THERMIQUE.....	48
3.7 CONCLUSION : VERS DES MODELES DE CONFORT THERMIQUE SPECIFIQUES POUR LA POPULATION FRANÇAISE, A DEVELOPPER DANS LE PROJET RENOPTIM	65
4. LES POLITIQUES DE PREVENTION DU RISQUE ET CAPACITES D'ADAPTATION DES OCCUPANTS AUX FORTES CHALEURS	68
4.1 APPROCHES ET DEFINITIONS DES ECOGESTES	68
4.2 LES EVOLUTIONS DES GUIDES PRESENTANT LES ECOGESTES	70
4.3 CONCLUSION : IDENTIFICATION DES ECOGESTES POUR LE CONFORT D'ETE ET NECESSITE D'UNE ENQUETE SOCIOLOGIQUE DANS LE PROJET RENOPTIM	76
CONCLUSION	78
ANNEXE I : INDICES DE STRESS THERMIQUE	79

INTRODUCTION

Alors que l'atténuation du changement climatique est au cœur des priorités politiques, l'adaptation du secteur du bâtiment au changement climatique devient une préoccupation croissante pour les acteurs de terrain, compte tenu des défis posés par les variations climatiques en cours et à venir. L'élévation des températures moyennes, ainsi que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes tels que les canicules, les tempêtes et les inondations, exigent des mesures spécifiques pour renforcer la résilience des bâtiments.

En France, plusieurs enjeux majeurs se posent quant à la résilience du secteur du bâtiment face au changement climatique. Les modèles climatiques indiquent une augmentation rapide de la fréquence, durée et intensité des vagues de chaleur, qui peuvent mener à des températures intérieures élevées, avec comme conséquences des bâtiments peu confortables voir dangereux pour la santé des occupants. Les personnes vulnérables, telles que les personnes âgées, les enfants et les personnes souffrant de problèmes de santé, sont particulièrement exposées aux risques liés au stress thermique, ce qui peut avoir des conséquences graves sur leur santé. La précarité énergétique d'été est un enjeu de santé publique, avec une surmortalité quantifiée à 11,000 personnes lors de l'été 2022 (INSEE, 2022).

Pour cette raison, il est essentiel de prendre en compte les projections climatiques futures à la fois en rénovation ainsi que lors de la conception et de la construction de nouveaux bâtiments, d'étudier de plus près les situations de stress thermique, et de proposer dès aujourd'hui des solutions.

Par conséquent, cela nécessite à la fois des améliorations significatives de l'efficacité énergétique des bâtiments pour contribuer à l'atténuation, mais également d'intégrer des mesures supplémentaires d'adaptation en appliquant des stratégies et solutions d'adaptation pour faire face à ces projections. Le parc de bâtiments existant en France présente une vulnérabilité significative aux fortes chaleurs, menant à des situations d'inconfort thermique et parfois de risque pour ses occupants. Les bâtiments mal ou non adaptés, avec une mauvaise isolation thermique, une ventilation insuffisante ou une conception inadaptée, peuvent aggraver l'effet de la chaleur et augmenter le risque de stress thermique pour les locataires.

Le projet RENOPTIM vise à outiller les bailleurs sociaux afin qu'ils puissent mettre en place, lors d'un processus de rénovation d'un ou plusieurs de leurs bâtiments collectifs en France métropolitaine, des mesures d'adaptation aux fortes chaleurs afin d'améliorer la résilience de ces bâtiments au changement climatique. L'adaptation du secteur du bâtiment est en enjeu fort ; identifier dès aujourd'hui les bâtiments les plus vulnérables (les bâtiments qui exposent le plus les occupants à une ambiance thermique inconfortable voire dangereuse) et implémenter des solutions pour les fortes chaleurs de demain permettra de protéger la population et minimiser les conséquences qui pourraient s'avérer désastreuses sans action rapide.

Ce rapport présente l'état de l'art actuel des connaissances sur cette thématique. Dans un premier chapitre seront abordées les notions de confort, confort thermique, risque, vulnérabilité et résilience, qui seront mises en regard du développement de la climatisation dans les logements français. Dans une deuxième partie, les paramètres du parc bâti (enveloppe, architecture, matériaux, etc.) et les paramètres physiques influant sur les surchauffes internes seront introduits. Dans une troisième partie, la thermophysologie du confort thermique et du stress thermique seront expliquées, pour motiver les orientations scientifiques que le projet RENOPTIM a prises sur cet axe. Dans le dernier chapitre, l'accent est mis sur les campagnes de prévention mises en place par les politiques publiques au cours des dernières années à travers les écogestes car la maîtrise du confort thermique d'été est en partie conditionnée par le comportement des occupants pour minimiser les surchauffes.

PROBLEMATIQUE DE L'ADAPTATION AUX EPISODES DE FORTES CHALEURS

Le changement climatique représente un défi majeur auquel il est crucial de répondre. Les épisodes de fortes chaleurs se multiplient et il devient impératif d'adapter nos bâtiments pour faire face à cette réalité. Ce chapitre aborde différents aspects liés à l'adaptation aux épisodes de fortes chaleurs dans l'habitat. Seront notamment traités l'approche théorique du confort d'été, mettant en évidence son importance en termes de qualité de vie des occupants, ainsi que le risque et la vulnérabilité associés à ces épisodes. L'analyse se penchera également sur la pénétration de la climatisation en France, en considérant les freins et leviers qui l'accompagnent. Enfin, la résilience du bâtiment face aux fortes chaleurs dans un contexte de changement climatique sera discutée, mettant en avant la convergence des objectifs d'atténuation et d'adaptation.

1.1 Définitions

Le risque

Leplat définit en 2006 le risque comme le produit de la probabilité d'occurrence d'un événement non désiré et de la gravité de ses dommages. Ce type de définition inclut une part d'incertitude, associée non seulement à la probabilité, mais aussi à la faiblesse de la prédictibilité des événements futurs, en termes de temporalité, de localisation ou d'effets. C'est sur cette notion d'incertitude que s'est développée, dans les sciences humaines et sociales, et plus particulièrement en psychologie sociale et environnementale, la littérature sur la perception et la représentation des risques par exemple (Marchand et al., 2014). On s'intéresse en psychologie à la perception d'un risque, à son évaluation et à l'adaptation à celui-ci en fonction de la vulnérabilité perçue. La prévention du risque va consister à réduire la vulnérabilité des individus soumis à ce risque en développant des actions avant l'occurrence du risque.

La vulnérabilité à l'échelle de l'individu

Navarro définit en 2022 la vulnérabilité comme la possibilité ou la probabilité qu'un individu ou un groupe d'individus subissent des dommages lors de la survenue d'un événement naturel ou anthropique menaçant leur bien-être, leur vie. Elle serait la résultante de la combinaison de trois composantes : l'exposition différentielle aux risques et aux nuisances, la sensibilité différentielle à ces mêmes risques et nuisances et la capacité différentielle à y répondre, à s'y adapter ou à se remettre des impacts (Downs et al., 2011; Rossignol et al., 2015).

La capacité de faire face à un risque et de réduire la vulnérabilité par des comportements adaptatifs peut être abordée sous l'angle de la résilience individuelle à l'échelle d'une personne ou de stratégie de résilience collective à l'échelle de la collectivité.

Le niveau de vulnérabilité perçue dépend de cinq facteurs clés :

- 1) l'évaluation de l'exposition à un risque ;
- 2) le sentiment de contrôle ou la croyance de l'existence des moyens de protection efficaces ;
- 3) le sentiment d'anticipation de conséquences négatives ;
- 4) les attributions causales, les croyances et théories naïves qui expliquent les événements menaçants ;
- 5) la familiarité avec l'environnement et/ou la menace du fait de la proximité physique, sociale et temporelle des sources de menace.

La vulnérabilité perçue est produite par le sentiment de perte de contrôle face à la situation, l'impossibilité de prévenir ses effets ou de se protéger de l'événement, ainsi que par la difficulté à s'en remettre. L'individu évalue ainsi ses propres ressources et ses possibilités de maîtrise, de contrôle avant, durant ou après l'événement catastrophique. Le contrôle perçu se réfère à la manière dont les individus apprécient le degré d'influence qu'ils peuvent avoir sur l'environnement. Ainsi, afin de reprendre le contrôle, l'individu peut par exemple décider de l'achat d'un climatiseur afin de pouvoir contrôler son ambiance, quand l'utilisation de stratégies passives ne permet de contrôler l'ambiance que de façon partielle.

Le confort, une attente en termes de qualité de vie

Comme exposé dans la définition du confort (Marchand et al., 2023), le confort est devenu un standard de la vie contemporaine, source de multiples normes dans l'aménagement des espaces de vie et de l'habitat et considéré comme un facteur de la qualité de vie. Les recherches sur le confort sont le plus souvent associées à des environnements spécifiques et appropriables, tels que le logement (Sèze, 1994), l'environnement scolaire ou les lieux de travail (Fischer, 1992) pour lesquels l'intérêt a été longtemps performanciel et porté sur le confort

fonctionnel, proche des préoccupations de l'ergonomie (Vischer and Fischer, 2005). Les concepts de confort, de chez-soi et d'attachement au foyer se sont historiquement construits de façon conjointe.

Qu'il s'agisse des espaces intérieurs ou extérieurs, les recherches se sont penchées sur des dimensions spécifiques qui concourent au confort physique. Ainsi, depuis les années 1970, de nombreuses études explorent le confort thermique (Attia et al., 1980; McIntyre, 1973) mais sans prendre en compte sa dimension intégrée (Marchand, 2007). Or, on considère aujourd'hui que la qualité du cadre de vie correspond à une sensibilité de la population qui perçoit son environnement de façon globale (Fleury-Bahi et al., 2017). Pour (Sèze, 1994), le cadre de vie constitue une réalité résidentielle, urbaine et architecturale, vécue subjectivement et psychologiquement. Cela renvoie à une sensibilité à l'égard des aspects environnementaux, tels que les équipements, les services urbains, les espaces verts, l'ambiance, le voisinage et le chez-soi. Dans le domaine de l'habitat, depuis la période post-moderne, le rapport à l'environnement se traduit par de nouvelles attentes. A l'accessibilité économique de tous à un logement doté de confort minimum, de type moderne, se sont ajoutées des sensibilités nouvelles concernant les qualités environnementales, architecturales et spatiales du cadre de vie.

On distingue le confort sensoriel du confort existentiel. Le confort sensoriel est lié aux qualités de l'environnement qui s'adressent aux sens de l'être humain : la lumière, l'air, la vue, la qualité tactile et acoustique des matériaux. Le confort existentiel concerne les qualités environnementales du cadre de vie entraînant des répercussions sur le plan psychique, en particulier sur l'identité et l'épanouissement personnel (Sèze, 1994). Si le confort répond à des besoins fondamentaux, une différenciation des exigences se manifeste en fonction des besoins spécifiques liés au style de vie, à l'activité professionnelle, à l'appartenance sociale et aux expériences antérieures en matière de confort.

Les exigences et, par conséquent, la satisfaction concernant le confort, dont le confort d'été, sont soumises à l'évolution incessante des besoins, qui une fois satisfaits engendrent de nouveaux besoins pour un groupe social donné. En effet, l'amélioration du cadre de vie hausse le degré d'affiliation subjective de l'individu à une classe sociale donnée, ce qui entraîne ensuite l'apparition d'aspirations plus élevées et le changement du système de valeurs de celui-ci (Levy-Leboyer, 1980).

Le confort n'est plus défini seulement en termes techniques par le concepteur, mais également comme une qualité perçue par l'utilisateur. Il ne suffit plus que les objets techniques répondent aux exigences fonctionnelles, ils doivent aussi satisfaire des exigences liées aux caractéristiques psychosociologiques des utilisateurs. Finalement, quatre grandes dimensions peuvent être dégagées de la notion de confort :

- Le confort matériel, lié à la satisfaction des besoins primaires et matériels ;
- Le confort esthétique, subjectif et qui dépend des perceptions individuelles ;
- Le confort social, qui correspond à un équilibre entre le besoin d'être avec les autres et le besoin d'intimité ;
- Le confort de conformité, qui marque l'appartenance à un groupe social donné (Dumur et al., 2004).

En particulier, le confort d'été dans l'habitat et les comportements qui lui sont afférents doivent donc être envisagés selon ces quatre aspirations. Il s'agit :

- De saisir le confort d'été comme la possibilité de satisfaire le besoin primaire de vivre dans un espace vivable d'un point de vue thermique ;
- De reconnaître que l'attente de confort d'été ne peut être homogène à toute la population ;
- De rester vigilant sur le fait que les solutions de rafraîchissement envisagées (écogestes en faveur du confort d'été) ou choisies (propriétaire) ou prédéterminées (locataire) s'inscrivent dans une approche globale du confort dans le logement qui touche au mode d'habiter ;
- D'envisager le confort d'été en fonction de la composition du foyer mais aussi au regard des choix formulés par l'environnement social. Il s'agit en particulier du lien avec la question englobante et de fait mondiale du changement climatique.

Le confort est une notion complexe à cerner, d'une part parce qu'il est difficile d'exprimer ce qui rend une situation confortable ou inconfortable, et d'autre part parce que le confort n'est pas un concept unidimensionnel directement mesurable (Dumur et al., 2004) comme expliqué précédemment. Le confort est lié aux attentes, à la perception, à l'humeur et à la situation. Sa définition fait à la fois appel à une approche négative (absence d'inconfort, qui se caractérise par exemple par l'absence de douleur, d'anxiété, de sensation de froid ou de chaud, etc.) et à une approche positive (satisfaction, contrôle perçu).

Marchand et Weiss ont soulevé en 2009 la question de l'antonymie du confort : l'inconfort est-il le négatif du confort ? Ils ont montré dans le contexte des transports ferroviaires que les dimensions qui construisent le confort n'étaient pas les mêmes que celles qui décrivent l'inconfort. Par exemple, alors que le bruit apparaît comme un facteur d'inconfort source de fortes plaintes dans certains contextes, le silence ou l'absence de bruit ne participent pas du sentiment de confort. En revanche, alors que le silence ou le bruit ne garantissent pas le confort, ils constituent un prérequis de celui-ci. Dans d'autres contextes et selon des variables environnementales et individuelles, le silence peut être source de stress ou d'un sentiment d'insécurité. Les éléments négatifs (qui décrivent une situation d'inconfort) interviennent comme perturbateurs sur les éléments positifs (qui décrivent une situation de confort). Ainsi, le confort n'est pas le contraire de l'inconfort : les deux notions ne sont pas symétriques, mais l'absence d'inconfort est un préalable nécessaire à l'apparition du sentiment de confort. Si le sentiment de confort est rendu possible après l'élimination de gênes qui sont sources d'inconfort, l'absence de gêne ne garantit pas nécessairement le confort.

Cette appréhension de l'inconfort traduit toute la complexité du confort et de l'inconfort thermique dans l'habitat. La question du confort d'été devra être envisagée dans la complexité de la perception et l'évaluation que les personnes ont de leur confort chez eux.

Du confort thermique au stress thermique

L'étude des seuils de température intérieure reste majoritairement liée au concept de confort thermique, tandis que les seuils de température extérieure sont étudiés dans le cadre de la prévention des risques de morbidité et/ou mortalité ; pour cette raison, le langage dans lequel chacun est décrit n'est pas comparable (Anderson et al., 2013).

Pour rendre plus compréhensible cette différence de langage, il est nécessaire d'analyser les définitions du confort thermique et du stress thermique :

- Le **confort thermique** est un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique (ISO 7730, 1984a). L'insatisfaction peut être causée par un inconfort chaud ou froid du corps dans son ensemble ou par un refroidissement (ou un réchauffement) indésirable d'une partie particulière du corps. En raison des différences individuelles, il est impossible de spécifier un environnement thermique qui satisfera tout le monde.
- Le terme **stress thermique** est utilisé pour définir la charge thermique totale de l'organisme provenant de la production de chaleur métabolique et des facteurs environnementaux externes (Hanna and Tait, 2015). Un stress thermique prolongé peut submerger le système de thermorégulation et entraîner une série de symptômes en cascade de gravité croissante, allant des crampes aux coups de chaleurs qui peuvent entraîner le décès.

1.2 Le risque et la vulnérabilité des occupants des bâtiments face aux épisodes de fortes chaleurs

A la suite de la vague de chaleur qui a touché la France en 2003, des études épidémiologiques ont été menées et ont permis d'identifier les facteurs de risques et les populations les plus vulnérables, afin d'orienter les recommandations du Plan National Canicule (PNC) (Pascal M. et al., 2017).

Cinq types de facteurs de risque liés au stress thermique doivent être considérés (Alessandrini et al., 2019) :

- Les facteurs environnementaux : les îlots de chaleur urbains, la densité urbaine, la pollution, l'humidité de l'air, la qualité de construction des bâtiments, etc.
- Les facteurs sociodémographiques : l'âge, le sexe, le niveau d'acclimatation à la chaleur, etc.
- Les facteurs de santé : l'obésité, les maladies préexistantes et la prise de médicaments
- Les facteurs sociaux : la pauvreté et l'isolement social
- Les facteurs comportementaux : vêtements inadéquats, mobilité réduite et consommation de caféine ou d'alcool

Ces facteurs vont impacter la vulnérabilité des personnes à la chaleur et au stress thermique.

Facteurs environnementaux : focus sur le cadre bâti

La vulnérabilité du bâtiment à la chaleur (au sens de la vulnérabilité des occupants dans un bâtiment) pose un problème commun aux risques émergents en remettant en cause une relation de stabilité construite avec le lieu et appelle à des comportements adaptatifs. A l'échelle de l'habitat, le risque remet en question la dimension protectrice attendue de l'habitat. Pour revenir sur des notions de confort soulignées plus haut, l'habitat est envisagé comme un lieu de sécurité, une limite entre l'extérieur et l'intérieur qui protège l'intimité de la personne des agressions externes. La sphère intime permet une protection de soi, et construit un sentiment d'identité par l'appropriation de l'espace (aménagement, ameublement et décoration). L'individu y construit des repères et ainsi l'habitat peut devenir un « chez soi » (Fischer, 2011). Le logement devient un prolongement de soi (Leduc and Delcourt, 2007), où la personne s'exprime dans un lieu connu et maîtrisable. Il renvoie à une image de soi pouvant être valorisante ou dévalorisante aux yeux des autres. Comme le souligne Fijalkow en 2011, dans notre société occidentale le devant de la maison est destiné à l'image que nous voulons montrer en société, la façade exprime un statut social qui renvoie à des jugements et des catégories sociales. L'arrière quant à lui est réservé à l'expression du privé à laquelle l'autre a accès de façon privilégiée.

Après la canicule de 2003, une étude cas-témoins appariée a été réalisée par l'Institut de Veille Sanitaire par le biais d'entretiens auprès de personnes ayant survécu à la période de canicule, appariées aux cas identifiés (personnes habitant à Paris, Orléans, Tours ou l'une des communes du Val-de-Marne, qui résidaient à leur domicile au moins depuis le 4 août 2003, décédées entre le 8 et le 13 août de causes autres qu'accidents, suicides et complications chirurgicales). Elle portait sur la classe d'âge, le sexe et la zone d'habitation. Les variables collectées concernaient les caractéristiques sociodémographiques, les comportements pendant la canicule, l'environnement social et familial, l'autonomie, l'état de santé, les caractéristiques du logement, et celles de l'environnement dans un rayon de 200 m (Bretin et al., 2005). Les questions concernant l'habitat et le proche environnement des témoins ont montré que les principaux facteurs de risque liés aux bâtiments étaient la date de construction ; les bâtiments construits avant 1975 étaient associés à un risque de décès plus élevé que les bâtiments plus récents et le niveau de confort caractérisé ici comme le pourcentage d'unités d'habitation avec des toilettes privées : les bâtiments dont le niveau de confort était plus élevé semblaient plus sûrs.

A l'échelle des logements, les principaux facteurs de risque étaient, par ordre décroissant, l'absence d'isolation thermique (évalué par la date de construction et les questions posées sur l'isolation) et le fait de vivre au dernier étage. En outre, le nombre de pièces diminuait le risque et le nombre de fenêtres l'augmentait. Le gradient de risque en fonction de l'étage (derniers étages exclus) n'était pas statistiquement significatif. Enfin, deux aspects de l'emplacement de la chambre à coucher étaient des facteurs de risque : sa situation directement sous le toit et la durée d'ensoleillement à cet endroit. D'autres facteurs, tels que l'incapacité à créer des courants d'air par ventilation traversante, étaient associés à une augmentation du taux de mortalité (Vandentorren et al., 2006). Une étude plus approfondie des paramètres du bâtiment le rendant vulnérable à la chaleur est proposée dans le chapitre 0.

Facteurs socio-démographiques et de santé

La capacité de l'organisme à évacuer la chaleur dépend de plusieurs facteurs dont l'âge. Par exemple, le patient âgé, du fait du vieillissement cardiovasculaire, n'est plus capable d'augmenter son débit cardiaque dans des proportions suffisantes, voit sa capacité sudorale limitée, perçoit moins la sensation de soif et se déshydrate donc plus vite (le chapitre 0 donne une introduction à la thermorégulation humaine). Par ailleurs, le patient âgé est souvent porteur de maladie chronique (notamment cardiovasculaire et neurologique) et peut recevoir des médicaments qui limitent ses capacités cardiovasculaires. Les médicaments également reconnus comme étant des facteurs de risques documentés sont les diurétiques, les neuroleptiques et les anticholinergiques. L'analyse de l'impact de 2003 (Bretin et al., 2005) a montré que les personnes âgées (65 ans et plus) et très âgées (85 ans et plus) étaient les principales victimes, avec un nombre de décès directement lié à la chaleur (coup de chaleur, hyperthermie et déshydratation) multiplié par 20 ou plus selon l'âge et le sexe, et une surmortalité extrêmement marquée pour les maladies du système nerveux, les troubles mentaux, les maladies de l'appareil respiratoire, génito-respiratoires, endocriniennes, les maladies infectieuses, et les états morbides mal définis. Les patients âgés sont particulièrement concernés, des modifications mineures pouvant, du fait de leur fragilité, se traduire par des troubles du comportement.

Dans l'étude cas-témoins qui a suivi la vague de chaleur à Chicago en 1995, les principaux facteurs de risque de décès par coup de chaleur étaient d'être confiné au lit (*odds ratio* : 8,2) et de vivre seul (*odds ratio* : 2,3). Une surmortalité a également été observée chez les moins de 45 ans, pour des causes majoritairement en lien direct

avec la chaleur, probablement du fait de conditions professionnelles aggravant l'exposition (chantiers extérieurs, port de vêtements de protection, sources de chaleurs).

Enfin, d'autres facteurs diminuent les capacités de l'individu à se soustraire à la chaleur ou à lutter efficacement contre elle par un comportement adapté, tels que l'alcoolémie et la consommation de drogues, les maladies psychiatriques, la dépendance au sens large, la démence (Dagron et al., 2006a).

Par ailleurs, différentes études montrent l'importance des caractéristiques individuelles (sexe, âge, alcool, médication, etc.) dans la perception de la chaleur. L'étude menée par l'équipe d'Averbeck en 2017 nous montre la présence d'une différence entre les sexes, les femmes étant plus sensibles en ce qui concerne la détection thermique et les seuils thermiques de douleur par rapport aux hommes. (Robin and Coudeville, 2022) estime ainsi que les femmes pourraient être avantagées en climat tropical et ce pour plusieurs raisons. Leurs hormones sexuelles favorisent la rétention d'eau et leurs glandes sudoripares sont moins sensibles et produisent moins de sueur. Il apparaît par ailleurs que leur masse corporelle plus faible, en amoindrissant la dépense énergétique liée à son déplacement, permet aux femmes de générer moins d'énergie thermique que les hommes.

La littérature est plus réservée sur l'impact de l'âge sur la perception thermique. En effet, certaines études ont trouvé des différences liées à l'âge dans la perception du confort thermique tandis que d'autres ont trouvé une perception thermique similaire pour différents groupes d'âge. Plus de détails sur l'importance des conditions environnementales (pollution de l'air, zone urbaine, mauvaises conditions de logement), facteurs individuels (enfants, personnes âgées et solitaires), sanitaires (maladie chronique, personnes alitées, hospitalisées) et socioéconomiques (isolement social, personnes sans-abri, pauvreté, faible éducation, etc.) et peuvent être trouvés dans le rapport de l'OMS « Public health advice on preventing health effects of heat » (World Health Organization, 2011).

Santé Publique France propose un continuum de vulnérabilité qui répertorie les populations les plus à risque pour différents niveaux de chaleur (Figure 1).



Figure 1- Augmentation de la population à risque en fonction de l'intensité à la chaleur (Pascal M. et al., 2017)

1.3 La pénétration de la climatisation en France

Le champ des valeurs comme freins ou leviers à la réduction de la climatisation

L'adoption de comportements adaptatifs ne repose pas uniquement et directement sur des stratégies qui seraient parfaitement objectivées visant à réduire le risque et la vulnérabilité, restaurer du confort ou du bien-être. Les comportements sont liés aux représentations que les personnes ont de l'aléa comme des moyens de s'en protéger.

En 1978, Dunlap et Van Liere interrogeaient déjà le mode de vie occidental face aux problématiques écologiques. Ils ont ainsi opposé, en ciblant les injonctions paradoxales auxquelles nous faisons constamment face, la norme de consommation à la norme écologique. La première norme correspond à la croissance visant la prospérité et le progrès, basée sur les évolutions technologiques et l'économie libérale. C'est « le Paradigme Social Dominant ». La seconde norme émerge avec la prise de conscience des limites de la croissance (Meadows et al., 1972) et rejette une vision anthropocentrée du monde pour une vision plus écologique, que les auteurs nomment « le Nouveau Paradigme Environnemental » (Dunlap and Van Liere, 1978).

Transposée à la question posée ici visant à réduire la pénétration des climatiseurs et donc à réduire la consommation énergétique et l'impact carbone, il convient de mesurer une injonction contradictoire qui oppose une attente de sobriété face à une valeur de consommation. On parle de dissonance cognitive pour désigner une tension psychologique générée par ce type de contradiction. La réduction de la dissonance qui permet de retrouver une consonance, un équilibre, une forme de confort personnel va consister à transformer la valeur ou le comportement pour qu'ils soient cohérents. Pour être très schématique, il s'agit soit d'investir dans un climatiseur pour être en adéquation avec la valeur consumériste et obtenir un gain de confort certain ; soit de s'adapter par d'autres leviers pour satisfaire une valeur de sobriété énergétique et économique.

Quelques chiffres sur la climatisation en France en 2023

D'après le rapport de l'ADEME en 2021 sur l'état des lieux de la climatisation dans le bâtiment, en 2020, 25% des ménages sont équipés en climatisation dite « de confort », représentant une consommation énergétique électrique à l'échelle de la France métropolitaine de 5 TWh et 0,9 équivalent de tonnes de CO₂ (la consommation nette d'électricité en France en 2020 était 468 TWh dont 150.2 TWh rattachés au résidentiel, selon le bilan électrique de RTE en 2021). Ce chiffre est en forte croissance car, d'après l'INSEE, en 2016 seulement 11% des ménages étaient équipés de climatiseurs et, selon EDF, en 2019 22% l'étaient. Près de 50% des climatiseurs se trouvent actuellement en Méditerranée, en zone H3, région dans laquelle les maisons ont aussi une plus grande surface ; on y retrouve par conséquent les plus grandes surfaces climatisées.

La climatisation pénètre en France à travers deux types : la climatisation fixe et la climatisation mobile. La climatisation fixe peut se retrouver dans les logements lors du remplacement du système de chauffage par l'installation d'un équipement réversible chaud/froid ou lors d'un achat à maîtriser uniquement le confort d'été. Seuls 9% des ventes d'équipements fixes concernent uniquement la production de froid. Certains ménages qui changent leur système de chauffage peuvent opter pour un système réversible, pour combler ou anticiper leurs besoins en rafraîchissement. A noter que la vente des climatiseurs fixes a doublé entre 2015 et 2020. On notera que, par rapport à la climatisation mobile, la climatisation fixe est davantage règlementée : elle est posée par des professionnels et sujette à des contrats de maintenance si la puissance est > 4 kW¹. La climatisation mobile n'est soumise à aucune exigence de maintenance, mais à des obligations d'écoconception et étiquetage énergétique de l'UE et est vendue dans les magasins de bricolage et les grandes surfaces. Les propos suivants sont issus d'enquêtes réalisées auprès des magasins qui vendent des climatiseurs mobiles :

« Les achats pour les climatiseurs mobiles se font essentiellement lorsque la température ne descend plus la nuit, principalement dans les appartements en centre urbain. Nous constatons une forte demande en région parisienne, lyonnaise, dans l'Est ; il n'y a plus que l'extrême nord du pays, la Normandie et la Bretagne qui restent à l'écart ».

¹ Il est obligatoire de faire entretenir sa PAC tous les 2 ans pour une puissance nominale de 4 kW thermiques à inf. 70 kW (décret n°2020-912 du 28 juillet 2020). L'entretien est réalisé par un professionnel certifié RGE + QUALIPAC.

« Il y a eu une forte croissance de la clim mobile sur l'été 2020 (moins que la croissance d'achat de ventilateurs). Les achats sont très saisonniers et décollent dès qu'il y a une alerte vague de chaleur Météo France. »

En 2020, 460M d'unités de clim mobiles étaient vendues, à comparer avec les 800 M d'unités de climatiseurs fixes. **La climatisation mobile représente actuellement un tiers des climatiseurs installés par les Français.** En termes de répartition dans les logements, le climatiseur mobile est majoritaire dans les logements collectifs d'après une enquête réalisée par CODA Stratégies (Figure 2).

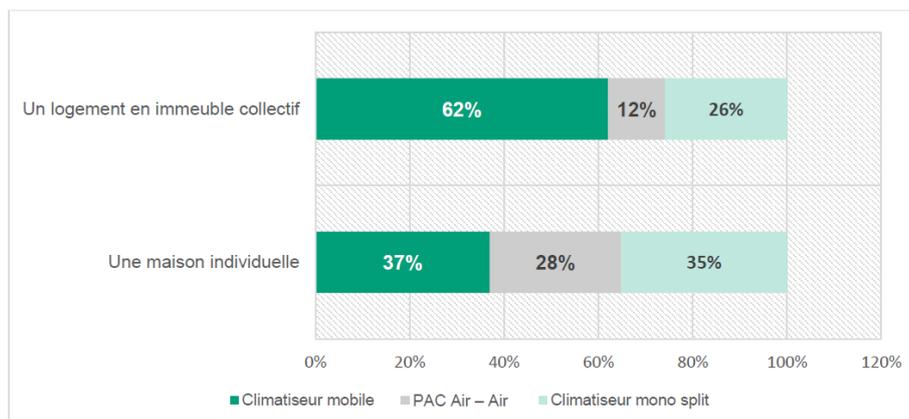


Figure 2 -Type d'équipement utilisé en fonction du type de logement (Enquête CODA Stratégies, (ADEME, 2021))

En termes de consommation, un climatiseur mobile a une consommation bien plus élevée qu'un climatiseur fixe. Par ailleurs, des fuites de gaz frigorigènes plus importantes peuvent avoir lieu pour les climatiseurs mobiles car elles ne sont soumises à aucune exigence de maintenance par des professionnels. Toujours selon l'étude de l'ADEME en 2021, en termes d'émissions carbone liées à la climatisation, aujourd'hui les émissions liées aux gaz frigorigènes sont 4 fois plus importantes que celles liées à la consommation d'énergie, relativement peu émettrice de CO2 en France métropolitaine. En effet, les fuites de gaz frigorigène ont lieu tout au long du cycle de vie d'un climatiseur, comprenant la fabrication et la mise en service des équipements, leur maintenance et leur fin de vie (une partie des fluides n'est ni détruite ni recyclée).

Ce chiffre est méconnu du grand public qui n'a souvent pas conscience de l'impact environnemental lors de l'achat d'un climatiseur en grande surface, alors que près d'un tiers des climatisations aujourd'hui présentes dans les ménages sont des climatiseurs mobiles, donc très énergivores. Le Tableau 1 et la Figure 3, issus du rapport de l'ADEME, illustrent une projection de consommations énergétiques liées à la climatisation (qui ne tient pas compte des climatiseurs mobiles), ainsi qu'une projection des émissions de gaz frigorigène associées, qui devraient diminuer en 2050 avec l'application de la réglementation Européenne F-GAS 517/2014 (en vigueur à partir de 2030).

Tableau 1 : Consommations et émissions de gaz associées à la climatisation en France métropolitaine en 2020 et prévisions pour 2050 (ADEME, 2021) en unités tCo2

	2020	2050 : S0	2050 : S1	2050 : S4
Emissions associées aux consommations énergétiques	0,9	2,0	0,5	1,7
Emissions associées aux émissions de gaz frigorigènes	3,5	0,4	0,3	0,2
Total	4,4	2,4	0,8	1,9

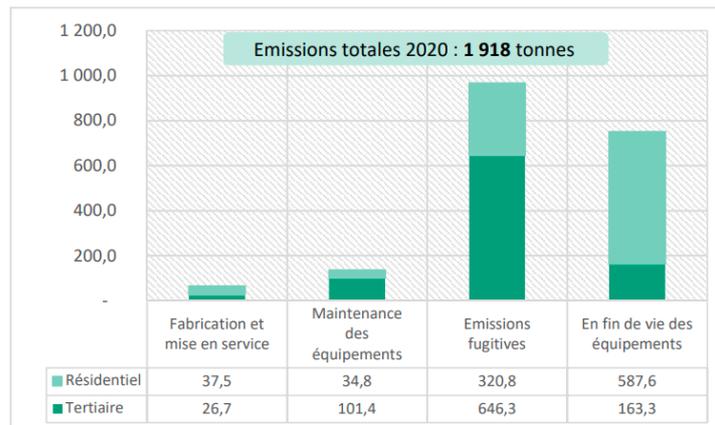


Figure 3 - Quantités de gaz frigorigènes s'échappant annuellement des systèmes de climatisation (tonnes) (ADEME, 2021)

L'efficacité des climatiseurs a été améliorée ces dernières années (de 22% à 32% entre 2009 et 2017 d'après DAIKIN) ; cependant ces efficacités sont calculées pour une température de consigne à 27°C, pour un usage conventionnel et une météo conventionnelle, ce qui ne peut pas être considéré comme une efficacité réelle. Les progrès les plus récents pour les compresseurs concernent la technologie Inverter (Toshiba 1981) qui permet d'adapter la vitesse de la climatisation en fonction de la température ambiante et ainsi économiser jusqu'à 30% d'énergie tout en optimisant le confort. Cependant, la performance des systèmes traditionnels atteint aujourd'hui ses limites, car les fabricants cherchent en priorité à proposer des machines qui répondent aux évolutions rapides de la réglementation F-GAS.

Par ailleurs, d'après l'enquête CODA Stratégies il apparaît que la consigne moyenne aujourd'hui de la climatisation est autour de 22-23°C, pour une utilisation d'environ 8 heures lorsque la température extérieure est entre 26°C et 30°C, ce qui signifie que la climatisation est maintenue en continu afin de garantir le confort. Pourtant, de nombreux conseils sont proposés dans les guides ADEME (et bientôt dans les vidéos « écogestes pour le confort d'été » du projet RENOPTIM) afin de promouvoir un usage sobre de la climatisation et également utiliser des solutions passives en même temps que le recours à la climatisation. Par exemple, toujours d'après cette même étude monter la consigne de 22°C à 27°C permet de diviser par deux la consommation énergétique des appareils de climatisation ; mettre en route la climatisation à partir de 30°C à l'extérieur au lieu de 27°C permet de diviser la consommation énergétique par trois et de diminuer fortement la durée d'utilisation.

Enfin, toujours d'après la même enquête, la moitié des ménages qui ont la climatisation déclarent ne pas avoir mis en place de solutions passives (de type protections solaires, brasseur d'air, isolation, etc.) et, parmi ceux qui n'ont pas la climatisation, près de 70% n'ont pas non plus mis en place de solutions passives (Figure 4). Cela laisse une marge de manœuvre pour l'implémentation des solutions passives, à la fois au sein des logements climatisés et non climatisés du parc français.

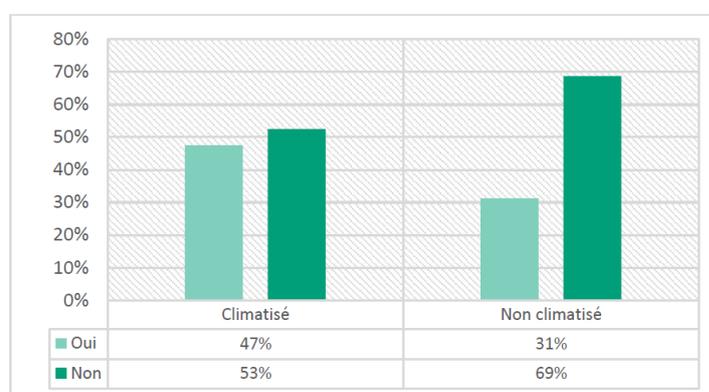


Figure 4 - Climatisation et usage des solutions passives : pratiques des ménages Source : Enquête CODA stratégies auprès de 1200 ménages – Question : Avez-vous pensé à améliorer le confort thermique de votre logement par des mesures passives (protection solaire, isolation, brasseur d'air) ? (ADEME, 2021)

1.4 La résilience du bâtiment face aux fortes chaleurs dans un contexte de changement climatique

Au vu des chapitres précédents, on constate donc une dissonance entre les objectifs d'atténuation et d'adaptation quant à l'aléa climatique des vagues de chaleur. En effet, l'adaptation du bâti pour faire face aux vagues de chaleur exige souvent des mesures telles que l'installation de solutions de rafraîchissement passif, mais également de systèmes de ventilation et de climatisation efficaces. Cependant, ces dernières solutions peuvent entraîner une augmentation de la consommation énergétique et émettent indirectement voire directement des gaz à effet de serre, ce qui est en contradiction avec les objectifs d'atténuation visant à réduire la demande énergétique du secteur du bâtiment.

Différents facteurs influencent la résilience d'un bâtiment à la surchauffe (Attia et al., 2021). Le premier facteur est sa vulnérabilité à la surchauffe. Nos connaissances en termes de vulnérabilité du parc bâti français actuel seront présentées dans le chapitre 2. La vulnérabilité du parc est dépendante du risque de fortes chaleurs : des vagues de chaleur à venir, de l'îlot de chaleur urbain, et également du comportement des occupants. En effet, aujourd'hui les bâtiments neufs ou rénovés livrés peuvent avoir tendance à surchauffer, à cause de mésusages par des occupants non informés ou malheureusement captifs de contraintes sur le bâti. Il convient autant que faire se peut d'utiliser des protections solaires la journée et de ventiler la nuit afin de pouvoir utiliser au mieux la performance du bâtiment. Sans cette utilisation adaptée du bâti, un bâtiment rénové peut présenter plus de risques de surchauffe qu'un bâtiment non rénové. Le deuxième facteur est la résistance du bâti à la surchauffe. Sa résistance dépend de ses caractéristiques thermiques et d'architecture actuelles et des solutions d'adaptations mises en place. Aujourd'hui, la plupart des concepteurs et aménageurs mettent en place des solutions afin d'améliorer la résistance du bâti.

Cependant, deux facteurs sont clés afin d'assurer la résilience dans le futur des bâtiments conçus et rénovés aujourd'hui. Le premier est la robustesse du bâtiment. Elle dépend principalement de son adaptabilité. Par exemple, la présence d'une salle refuge climatisée au sein d'un logement collectif, la prévention aux fortes chaleurs mise en place par les gestionnaires des bâtiments, la possibilité aux occupants d'être acteurs de leur confort thermique etc. Enfin, le dernier facteur est la période de récupération. Cette période est censée être un apprentissage afin d'améliorer la résilience dans le temps. En effet, à la suite de la canicule de 2003, les politiques ont mis en place la vigilance plan canicule, un système de prévention aux fortes chaleurs. Il convient que les acteurs du bâtiment s'approprient ces plans de prévention et les mettent en place au sein de leurs bâtiments. Ces différents facteurs sont résumés dans la Figure 5.

Definition of Resilient Cooling Characteristics and Risk Factors

Resiliency Characteristics	Vulnerability	Resistance	Robustness	Recoverability
Resilient Cooling Characteristics	Overheating Exposure Risk	Overheating Exposure Severity	Overheating Exposure Adjustment	Overheating Exposure Recovery
Risk Factors	Climate Change Scenarios Heat wave events Power Outages Urban Heat Island Load Change (occupancy, solar or other thermal loads)	Building Design (glazed area, thermal mass, ...) Cooling Technology Characteristics Level of Energy Autonomy	Occupant Adaptability Potential Occupant/System Interaction Potential Building Adaptability Potential (thermal safety zones, ...) Smart Readiness Level (System Adaptation) Emergency Control Possibility Energy System Back-Up Availability	Building Design Cooling Technology Characteristics Learning Ability of Building, Systems and Occupants

Figure 5 - Facteurs influençant la résilience d'un bâtiment à la surchauffe (Attia et al., 2021)

1.5 Etat des lieux de la problématique du confort d'été auprès des bailleurs sociaux dans les projets de rénovation

Dans le cadre du projet RENOPTIM, l'Union Sociale pour l'Habitat (USH) a mis en place un groupe projet composé d'organismes volontaires pour participer à ce projet ; ainsi, dix bailleurs de l'habitat social en France métropolitaine ont été interviewés (Immobilière 3F Île-de-France, Immobilière 3F Rhône-Alpes, Immobilière 3F Sud, Gironde-Habitat, Elogie-Siemp, Logirem Marseille, Logis Cévenols, Habitat 13 Bouches-du-Rhône, Alpes Isère Habitat, Tours Habitat). L'objectif de ces entretiens était de comprendre comment le sujet de l'adaptation du bâtiment aux fortes chaleurs est actuellement pris en compte concrètement au sein d'un projet de rénovation. Les résultats présentés ci-après ne sauraient être représentatifs ni de l'ensemble des bailleurs sociaux ni de bailleurs privés (non consultés pour cette étude).

De ces entretiens ressort que la prise de conscience et l'implication des bailleurs dans l'adaptation au changement climatique est relativement récente. Ces dernières années, ils se sont focalisés sur des stratégies d'atténuation en mettant l'accent sur les changements de classe énergétique dans leurs projets de rénovation (éradication des passoires énergétiques et réduction des consommations énergétiques notamment dues au confort d'hiver).

Chez la plupart des bailleurs, **la prise de conscience et la réflexion concernant le confort d'été a été lancée récemment**, depuis 2019, à la suite des canicules récurrentes. Les bailleurs commencent à développer des stratégies d'adaptation au changement climatique et d'amélioration du confort d'été, mais ces stratégies sont encore en cours de structuration.

Le confort d'été et l'adaptation au changement climatique n'est que partiellement traitée dans un projet de rénovation

Lors d'un projet de rénovation, la priorité n°1 énoncée par la majorité des bailleurs est la décarbonation de leur parc, avec comme priorité d'éradiquer les logements à étiquettes G, F et E. Cette priorité est directement motivée par l'ambition politique du gouvernement. Le seul bailleur interviewé qui nous a indiqué qu'améliorer le confort d'été était une priorité dans certains projets de rénovation a déjà l'ensemble de son parc de bâtiments avec des étiquettes DPE entre A et C (Gironde Habitat). D'autres critères qui peuvent être prioritaires par rapport à la question de l'adaptation sont les pathologies, l'attractivité des logements ainsi que les charges des locataires.

Cependant, ce sujet semble être une préoccupation grandissante chez les bailleurs, plus particulièrement ceux localisés dans le Sud et en milieu urbain dense, qui ont bien conscience des problèmes de confort d'été, en particulier à la suite de l'installation de climatiseurs bon marché par certains locataires.

Une stratégie de décarbonation prenant peu en compte l'adaptation

De plus, les bailleurs reconnaissent que la stratégie d'adaptation n'est pas aisée à mettre en œuvre dans le cadre de stratégies de réhabilitation qui étaient centrées jusqu'à présent sur l'atténuation du changement climatique (baisse des émissions de gaz à effet de serre et baisse des consommations énergétiques).

Certains affirment que :

- **Les réhabilitations réalisées récemment (dans les 5 dernières années environ) peuvent parfois contrarier les objectifs d'adaptation** : malgré l'isolation de leur bâti, le confort d'été se trouve peu amélioré et fortement dépendant des comportements des locataires (le bâtiment rénové étant plus sensible aux comportements) ;
- Les bailleurs ont donc du mal à gérer en même temps atténuation et adaptation au changement climatique ;
- Ils **disposent de peu de données leur permettant d'envisager l'apport des solutions proposées sur la réduction de la température dans les logements** et la consommation énergétique ;
- Ils ne souhaitent pas recourir à des équipements de refroidissement pour traiter le confort d'été afin de **ne pas générer des consommations énergétiques supplémentaires peu acceptables** par les locataires dans un contexte d'augmentation du prix de l'énergie et, de plus, augmenter les émissions de gaz à effet de serre.

Les bailleurs localisés dans le Sud ont observé, dans certaines situations, de gros problèmes de confort d'été dans les logements et nous ont fait part de leur sentiment d'être démunis face à certains antagonismes entre décarbonation et adaptation. En effet, certaines solutions d'adaptation (ajouts de protections solaires, brasseurs, climatisations, etc.) qui améliorent le confort d'été peuvent accroître le poids carbone du bâtiment (matériaux des solutions et consommations). Certains bailleurs nous ont fait part de leurs vraies difficultés à concorder les deux et

ce à moindre coût. Dans le Sud de la France, en rénovation, l'installation d'une PAC air-air réversible avec consommation de froid l'été peut dégrader les objectifs de performance énergétique du bâtiment attendue par des labels de rénovation, labels qui permettraient aux bailleurs d'obtenir des financements.

Des objectifs stratégiques à axer sur le confort d'été

Les difficultés énoncées par les bailleurs peuvent s'expliquer en partie par une volonté politique qui était limitée sur le sujet de l'adaptation jusqu'à l'annonce du Ministre en charge du Logement en octobre 2023, ce qui a pu freiner la prise en compte de l'adaptation lors du processus de rénovation. Pour la réhabilitation, les bailleurs suivent les objectifs de l'Etat qui sont fixés uniquement sur la décarbonation, avec peu d'exigences et de subventions sur le confort d'été dans un projet de rénovation. La définition de la précarité énergétique, ou d'un logement décent, impose un critère de température minimum l'hiver, mais rien sur l'été (pas de critère de température à ne pas dépasser l'été). Certains bailleurs ont établi des stratégies pour aller chercher des labels valorisant la prise en compte du confort d'été afin de bénéficier de subventions (par exemple dans la Métropole Aix-Marseille-Provence ou à Paris).

Ce manque de lisibilité dans la volonté politique et les référentiels se décline dans les documents stratégiques des bailleurs. En effet, **la question du confort d'été et de l'adaptation au changement climatique n'est pas encore intégrée dans les stratégies de patrimoine des bailleurs et encore très partiellement intégrée dans les opérations de rénovation**. D'après l'USH (entretien réalisé en septembre 2022), certains bailleurs sociaux et opérateurs (généralement organisés en groupements) ont élaboré et commencent à déployer des plans d'adaptation. Des réflexions sont toutefois en cours entre l'Etat et l'USH afin d'ajouter un indicateur de confort d'été dans le PSP (Plan Stratégique de Patrimoine) des bailleurs et ainsi d'intégrer pleinement cet enjeu dans la stratégie des organismes à partir de 2025.

Enfin, les bailleurs n'ayant pas de contraintes règlementaires leur imposant des objectifs concernant le confort d'été en rénovation, ce sujet est traité de manière volontaire sur certains projets ou dans le cadre d'expérimentations, alors que pour les bâtiments neufs, dû aux contraintes de la RE2020, le questionnement est bien présent.

Peu de données et de méthodes pour caractériser le parc social au regard de sa vulnérabilité aux fortes chaleurs

Au regard du peu d'outils accessibles et de méthodes permettant de traiter un parc conséquent de bâtiments, la plupart des bailleurs a peu de visibilité sur la sensibilité de leur parc aux fortes chaleurs : en somme, ils ne savent pas où sont les problèmes. Cependant, les bailleurs sociaux organisés en groupements et ceux qui souhaitent s'impliquer dans ce domaine d'actions ont pour objectifs de réaliser un diagnostic de leur parc à travers une cartographie permettant d'identifier quels sont les bâtiments et logements particulièrement sensibles aux fortes chaleurs / canicules, du fait de leurs caractéristiques techniques et/ou du développement des îlots de chaleur, afin de définir des interventions prioritaires. Cependant, ils manquent d'outils et de méthodes pour arriver à cette cartographie.

L'étude bibliographique a permis d'identifier que CDC Habitat Social a mis en place un diagnostic de vulnérabilité et a élaboré en 2021 un Plan d'adaptation au changement climatique, qui permet d'évaluer la vulnérabilité de ses logements à travers l'exposition à 11 aléas (précipitations, augmentation des températures, vagues de froid et de chaleur, feux de forêt, etc.). CDC Habitat Social cartographie actuellement son parc immobilier, en s'appuyant aussi sur des scénarios futurs, sous la forme d'un Diagnostic de performance résilience (DPR). *"Ce diagnostic articule à la fois les données connues du bâtiment, mais aussi une visite sur site, qui vient compléter l'analyse sur les composants manquants ou existants"*, détaille Alain Cauchy, directeur Mission Décarbonation du Groupe CDC Habitat. Pour le bailleur, ce DPR est un outil précieux de gestion de son parc immobilier. En attribuant un score global au bâtiment, il permet d'évaluer si des travaux d'adaptation au changement climatique sont nécessaires, tout en donnant une première estimation des coûts.

Parmi les dix bailleurs interviewés dans le cadre du projet RENOPTIM, il ressort qu'**aucun organisme n'a de vision claire sur les logements les plus vulnérables de son parc face aux vagues de chaleur**. Certains ont ou souhaitent appliquer l'outil RITE développé par le CEREMA et l'USH, mais certains bailleurs déplorent l'étude réalisable uniquement à l'échelle logement alors qu'ils rénovent à l'échelle bâtiment. Les chargés d'opération regrettent également que l'outil RITE arrive à la fin de la conception du projet de réhabilitation. Un outil arrivant davantage en

amont, permettant d'orienter les choix d'un projet de rénovation, leur serait utile en complément. **Ils souhaitent un outil pratique et ergonomique, simple à utiliser, qui permette à leurs équipes de conception d'orienter leur programmation avant d'ensuite orienter les MOE**, et qui permette en particulier :

- d'un point de vue stratégique : d'**identifier les bâtiments et logements** les plus sensibles aux fortes chaleurs afin d'appuyer leurs réflexions dans l'élaboration de leur stratégie patrimoniale ;
- d'un point de vue opérationnel : de **proposer des solutions techniques passives** qui permettent de gérer le confort d'été.

En questionnant les bailleurs sur les fichiers météorologiques utilisés par les équipes de MOE, il ressort qu'il est rare qu'une STD ou SED soit réalisée dans le cadre d'un projet de rénovation, ce qui implique qu'aucun fichier prospectif ou de canicule ne soit utilisé, minimisant ainsi lors de la conception les risques actuels et à venir liés aux surchauffes estivales.

Etat des lieux des solutions d'adaptation déployées par les bailleurs

Les bailleurs commencent à définir un certain nombre de solutions applicables à moyen terme dont le coût peut être assumé dans une épure budgétaire tenable. **Les bailleurs sont tous unanimes sur l'objectif d'éviter l'installation de la climatisation à tout prix, pour des raisons à la fois économiques (charges locataires) et écologiques.**

Les solutions installées quasi à l'unanimité sont les protections solaires. Certains bailleurs sont très friands des volets roulants qui coutent peu cher à l'entretien, alors que d'autres bailleurs investissent en complément dans des brise-soleil ou stores bannes à la demande des locataires qui ont des balcons et veulent conserver de la luminosité dans leur logement.

Un bon nombre de bailleurs sont également en réflexion autour de la végétalisation des bâtiments et pourtours, cependant des opérations mises en place récemment ont révélé un certain nombre de difficultés. Cela concerne l'entretien qui peut mener à des coûts élevés, mais aussi des plaintes de la part des locataires concernant des charges supplémentaires ou la présence d'insectes. Un bailleur nous a fait part que *« la végétalisation est anxiogène pour les services techniques de gestion »*.

Les bailleurs attestent d'un besoin de connaissances globales (espèces à planter résistantes aux fortes chaleurs, type de solutions, coûts, entretien, gestion de l'eau, etc.), du fait qu'ils ont du mal à trouver des entreprises compétentes sur le sujet (MOE, paysagistes, bureaux d'études, etc.). Ils se posent également la question de la désimperméabilisation des sols en pourtour de bâtiments mais ont du mal à trouver des matériaux (pavés, gravillons, etc.) permettant un cheminement piéton pérenne sur sols désimperméabilisés.

Malgré ces difficultés, les bailleurs sont très intéressés par la végétalisation du bâtiment et pensent réaliser ces actions au cours de réhabilitations du parc ancien ; ils restent à la recherche d'expertises sur les matériaux, les végétaux résistants au climat chaud et ne demandant pas beaucoup d'arrosage, etc. Ils prévoient également de progresser sur la communication à travers notamment des actions de sensibilisation auprès des locataires sur ce sujet.

En ce qui concerne l'enveloppe du bâtiment, cette partie est déjà traitée par les objectifs de décarbonation. Il semble qu'un bon nombre des logements présents dans le parc des bailleurs interviewés soient traversants, et la contrainte budgétaire de rénovation d'un logement (autour de 60 k€ par logement en 2024, d'après l'USH) ne permet pas de changer le caractère traversant des logements qui ne le sont pas. En questionnant les bailleurs sur leur connaissance quant à l'ouverture des fenêtres la nuit pour favoriser un rafraîchissement nocturne, peu de bailleurs semblaient savoir si les occupants ont recours à cette pratique ou non. **Certains bailleurs nous ont remonté que les facteurs principaux limitant l'ouverture des fenêtres la nuit sont : la présence de moustiques, le bruit extérieur, le sentiment d'insécurité pour les étages les plus bas ; cependant aucun des bailleurs interviewés n'a à ce jour installé de moustiquaires.**

La question des brasseurs d'air a également été posée et il s'avère qu'un seul des bailleurs interviewés songe aujourd'hui à tester des ventilateurs plafonniers dans une prochaine réhabilitation. Enfin, un bailleur a décidé de tester un système innovant de rafraîchissement par évaporation indirecte.

La plupart des bailleurs reconnaît que ces solutions envisagées et mises en place aujourd'hui sont des actions de remédiation qui ne sont pas suffisamment en rupture, compte tenu de l'insatisfaction grandissante des locataires sur le confort d'été, du risque croissant d'installations « sauvages » de climatiseurs et des projections climatiques sur les vagues de chaleur à venir.

Il semble que les bailleurs sont aujourd'hui assez frileux à s'engager vers les solutions d'adaptation qui n'ont pas ou peu de retours d'expériences, telles que de la végétalisation demandant peu d'entretien, les ventilateurs plafonniers, le rafraîchissement évaporatif ou les moustiquaires. La plupart d'entre eux nous a déclaré être en attente de retours d'expériences terrain avant de se lancer vers ces solutions jugées innovantes. Ils ont besoin d'un état de l'art du marché, et d'en savoir plus sur la maturité et l'efficacité des différentes solutions au regard de leur faisabilité technique, mise en œuvre (site occupé, contraintes occupants, etc.) et coût.

Des actions à mener afin de mieux informer et concerter les locataires pour faire face aux fortes chaleurs

Les stratégies pour sensibiliser les locataires aux bonnes pratiques de gestion de leur logement l'été sont très disparates suivant les bailleurs interviewés. Quelques bailleurs ont transmis des guides à leurs locataires pour les aider à améliorer leur confort d'été (s'hydrater, ouvrir les fenêtres la nuit, fermer les stores la journée, identifier les personnes isolées). A noter que les habitants dans le Sud ont déjà les bonnes pratiques alors que les locataires au Nord de la France peuvent ne pas les connaître. Certains bailleurs mènent des campagnes d'information en périodes de forte chaleur en visant en particulier les personnes les plus fragiles (seniors, par exemple) à l'aide de flyers dans les halls d'immeubles.

Quelques bailleurs s'appuient sur d'autres réseaux pour informer leurs locataires, en relayant les communications des collectivités locales sur la gestion des fortes chaleurs et des bulletins météo, en travaillant avec des MOUS (Maitrisés d'œuvre urbaines et sociales) pour l'accompagnement social des occupants, ou en s'appuyant sur les gardiens pour identifier les personnes fragiles. Cependant, d'autres bailleurs nous ont avoué manquer d'outils pour sensibiliser les locataires.

Au travers des entretiens, il semble que la plupart des bailleurs envisagent l'adaptation comme la mise en œuvre de travaux sur le cadre bâti et dans les espaces en pied d'immeubles. Rares sont ceux qui dépassent le « solutionnisme » consistant à s'appuyer sur un ensemble de solutions techniques (sur l'enveloppe, les menuiseries et volets, etc.) pour améliorer le confort d'été. L'adaptation est très rarement abordée comme un processus transversal de repositionnement du bâti dans son milieu (en tirant partie de certains éléments environnementaux du milieu, par exemple) et de recomposition des manières de vivre dans les résidences. Les usages des habitants sont essentiellement pensés comme une appropriation des solutions techniques mises en place par les bailleurs. Ils ne sont pas envisagés comme des opportunités d'envisager d'autres manières de concevoir et réaliser l'adaptation. En effet, seul un des bailleurs interviewés a intégré des questions liées au confort thermique estival dans son enquête de satisfaction envoyée chaque année aux locataires. Cependant, certains bailleurs organisent des actions de concertation afin d'intégrer les prescriptions des habitants au mieux dans leurs documents de programmation.

Enfin, sur le panel des organismes interviewés, quelques-uns envisagent l'adaptation au confort d'été comme un processus multifacettes amenant à améliorer le diagnostic sur l'inconfort ressenti et vécu par les habitants selon leurs profils générationnels et socio-familiaux, leurs pratiques d'habiter, l'environnement territorial et climatique de leurs résidences.

Les bailleurs ont bien conscience qu'il y a **plusieurs points à améliorer dans leurs actions d'adaptation** :

- **L'évaluation difficile de la vulnérabilité à la chaleur de leurs locataires** selon leurs profils socio-économiques et générationnels (présence de personnes âgées, par exemple),
- **La prise en compte insuffisante de la perception du confort d'été par les locataires,**
- **La rare intégration du ressenti et des pratiques d'usage dans la réhabilitation et les actions d'adaptation,**
- **La prise en compte progressive du rapport bâti-environnement** (la réhabilitation du bâti et des espaces extérieurs pouvant s'opérer en parallèle et pas nécessairement lors de la même intervention).

Les bailleurs ont conscience que **l'un des axes principaux d'amélioration est le développement de démarches plus concertées avec les locataires et transversales entre métiers** (réhabilitation du bâti et des espaces extérieurs) permettant de prendre en compte ces différents aspects, démarches sans lesquelles ils risquent de se trouver confrontés à des risques de mal-adaptations ou à des actions d'adaptation mal calibrées qui déboucheraient sur un risque sanitaire ou une précarité énergétique.

Ils émettent l'idée que **certaines solutions d'adaptation rencontrent des limites liées à l'environnement urbain** : présence de moustiques (alors que pas de moustiquaires aux fenêtres), de nuisances sonores ou de sentiment d'insécurité empêchant l'ouverture des fenêtres la nuit par les locataires, surtout ceux situés dans les étages inférieurs au quatrième étage.

Conclusions des entretiens

En conclusion, ces entretiens mettent en évidence un certain nombre de défis à relever. Bien que la prise de conscience croissante des bailleurs concernant l'adaptation au changement climatique soit un pas dans la bonne direction, il est clair que le confort d'été est à intégrer davantage dans les projets de rénovation, impliquant une montée en compétences pour les bailleurs. Les bailleurs vont devoir trouver l'équilibre entre objectifs de décarbonation imposés par le gouvernement et la nécessaire prise en compte du sujet de l'adaptation du parc existant aux vagues de chaleur.

Les stratégies actuelles se concentrent sur des solutions de remédiation telles que les protections solaires, mais ces approches peuvent être perçues comme insuffisantes pour répondre pleinement aux besoins des locataires. Les bailleurs, bien que conscients de la nécessité d'actions plus ambitieuses, hésitent en raison du manque de retours d'expérience et de la difficulté à concilier adaptation et décarbonation, sans qu'aucune bonification financière ne soit systématiquement prévue pour intégrer ce type de travaux. Par ailleurs, le manque de visibilité sur la sensibilité de leur parc aux fortes chaleurs les bloque pour prioriser les opérations nécessitant de façon urgente d'améliorer le confort d'été.

La sensibilisation des locataires et la prise en compte de leurs besoins dans le processus d'adaptation demeurent des domaines à améliorer. Il est impératif que les bailleurs adoptent une approche plus holistique, incluant une collaboration étroite avec les locataires, pour développer des stratégies efficaces prenant en compte les aspects techniques autant que les aspects sociaux.

En somme, la conclusion met en évidence la nécessité de prendre en compte l'enjeu du confort d'été, incitant les bailleurs, les autorités gouvernementales et les acteurs du secteur à travailler de concert pour intégrer pleinement le confort d'été dans les projets de rénovation et faire face aux défis croissants liés au changement climatique.

Il ressort de ces entretiens, une série de pistes qui méritent cependant d'être intégrées dans des démarches d'adaptation au changement climatique conjuguant :

- Des plans stratégiques de patrimoine intégrant un indicateur spécifique au confort d'été et prenant ainsi en compte l'état du parc, l'environnement des bâtiments et les profils des locataires ;
- Des plans de rénovation conjuguant atténuation et adaptation ;
- Des concertations entre des locataires, des métiers des bailleurs et des collectivités locales qui peuvent coopérer sur le sujet.

1.6 Conclusion sur l'enjeu du projet RENOPTIM : prendre en compte l'adaptation aux fortes chaleurs dans la conception et la rénovation du bâti en convergence avec les objectifs de décarbonation

Ce chapitre a exposé les définitions de la vulnérabilité et du risque aux fortes chaleurs, il introduit aussi les notions de confort et des différents facteurs de risque qui peuvent amener aujourd'hui les habitants des bâtiments potentiellement vers des situations de stress thermique. L'enjeu aujourd'hui est double entre protéger les habitants des logements tout en respectant les engagements pour atténuer l'impact du changement climatique. Il y a une vraie problématique observée sur le terrain entre la mise en place de solutions passives d'adaptations pour limiter les surchauffes sans dégrader le confort ou du moins éviter l'inconfort thermique des locataires.

Les outils qui seront développés dans le cadre du projet Renoptim sont dédiés à la fois aux bailleurs sociaux ainsi qu'aux acteurs du parc de bâtiments privés. Ils visent à limiter le recours à la climatisation, en intégrant un calcul détaillé du confort thermique en conditions estivales et à respecter les engagements pour atténuer l'impact du changement climatique. Concrètement il s'agit de donner les moyens à la maîtrise d'ouvrage :

- D'identifier dans son parc les situations d'habitat qui présentent un risque de surchauffe l'été ou durant une vague de chaleur ;
- De permettre à la maîtrise d'ouvrage, du fait de sa connaissance de ses locataires, d'identifier dans son parc les locataires qui présentent un risque de stress thermique dans ces logements en surchauffe et donc les logements à traiter en priorité ;
- De définir un plan d'action pour maintenir le confort au quotidien en limitant la climatisation et éviter le risque sanitaire relatif à l'exposition à la chaleur.

Afin de donner aux bailleurs la possibilité de définir un plan d'actions face aux risques sanitaires pour les occupants dans leurs logements, il est nécessaire d'identifier des situations d'habitat qui présentent des risques thermiques face aux changements climatiques, en étudiant la sensibilité aux vagues de chaleur à la fois des espaces d'habitations offerts par les bâtiments et de leurs occupants.

LA VULNERABILITE DU PARC BATI FRANÇAIS A LA SURCHAUFFE

Le parc bâti français (ici logements collectifs en France métropolitaine) présente des espaces d'habitation qui face aux vagues de chaleur ont parfois des températures intérieures élevées (communément appelées surchauffe). De nombreux bâtiments présentent des caractéristiques qui les rendent plus sensibles aux effets de la chaleur extrême : à iso-occupation, une isolation thermique insuffisante, un dispositif de protections solaires des baies vitrées insuffisant, un rafraîchissement nocturne par ouverture des fenêtres limité, des matériaux de construction à faible inertie thermique, une conception inadaptée, etc. peuvent contribuer à l'accumulation de chaleur plus ou moins élevée à l'intérieur des bâtiments en période de vague de chaleur. En conséquence, les températures intérieures peuvent devenir excessivement élevées, créant un inconfort thermique pour les occupants et augmentant les risques pour la santé, en particulier pour les populations potentiellement plus vulnérables à la chaleur comme les personnes âgées et les enfants. De plus, cette surchauffe peut également entraîner une augmentation de la consommation d'énergie, car les systèmes de climatisation et de rafraîchissement doivent fonctionner de manière plus intense pour maintenir des conditions de confort. Il est donc essentiel d'aborder cette problématique et établir une cartographie des bâtiments à traiter en priorité pour limiter leur surchauffe.

Ce chapitre aborde l'importance de comprendre les phénomènes physiques impactant la surchauffe des bâtiments en période estivale, ainsi que les paramètres associés afin d'évaluer la vulnérabilité du parc bâti français à la surchauffe. Les déterminants du confort d'été identifiés dans des études antérieures seront examinés, afin de comprendre les interactions complexes entre l'architecture, l'enveloppe du bâtiment, les systèmes mais aussi le comportement des occupants.

2.1 Facteurs déterminants la surchauffe du bâti

De nombreuses études du CSTB (2008, 2007, 2003, 1980) se sont penchées sur la question de l'exposition à la chaleur des logements et les pouvoirs publics ont mis à la disposition des professionnels des outils, y compris dans les réglementations depuis 2000, pour identifier les facteurs de risques liés à l'enveloppe et à la morphologie des bâtiments. Des solutions techniques associées à une gestion des équipements mobiles sont venues compléter ces travaux sur la typologie des enveloppes.

Cependant, d'une part il semble que ces travaux soient tombés dans l'oubli, d'autre part ils ont été réalisés sur la base de climats anciens. Il convient également de souligner que les caractéristiques de l'enveloppe des bâtiments sous l'effet des réglementations successives ont fortement évolué ces vingt dernières années. Dès lors, aujourd'hui il n'existe pas à ce jour de photographie en l'état actuel de la vulnérabilité à la surchauffe des logements du parc résidentiel français, bien que cette question, sous l'effet du changement climatique et des canicules à répétition, revienne à l'ordre du jour des acteurs du bâtiment : l'Etat, les syndicats, les bailleurs, les particuliers, etc.

Trois phénomènes physiques liés à l'enveloppe ont un impact sur la surchauffe de l'ambiance intérieure du bâtiment en période estivale :

- Le rayonnement et les apports solaires, principalement par les fenêtres mais également par la toiture pour un logement au dernier étage ;
- L'inertie du bâtiment : sa capacité à stocker/déstocker et déphaser la chaleur ;
- L'évacuation de la chaleur par la ventilation naturelle *via* l'ouverture des baies.

Il convient donc d'étudier les paramètres de l'architecture et de l'enveloppe du bâti, ainsi que ceux liés au comportement des occupants qui peuvent avoir un impact sur ces trois phénomènes physiques.

Une liste des déterminants du confort d'été, identifiés dans des études précédentes, à partir de la littérature, (Bornarel et al., 2014; "Cahiers de la construction - Isoler avec les matériaux biosourcés pour un meilleur confort d'été," 2020; La Roche et al., 2001; Observatoire de l'Immobilier Durable, n.d.), de la thèse de Machard en 2021 et des résultats de l'analyse de vulnérabilité du projet ICARE est proposée dans le Tableau 2

Tableau 2 : Déterminants du bâtiment impactant le confort d'été et phénomènes physiques associés

	Paramètre	Phénomène physique associé		
		Apports internes (solaires ou autres)	Inertie	Rafraichissement par ventilation naturelle
Enveloppe	Propriétés et épaisseur des matériaux notamment ρ , C_p et λ et des parois vitrées et opaques. Ces propriétés et la surface d'échange des matériaux ont un impact sur l'effusivité et la diffusivité, et donc l'inertie. Ces propriétés ont également un impact sur le transfert du flux de chaleur de la face extérieure exposée au soleil vers l'intérieur.	x	x	
	Position de l'isolation pour chaque paroi de l'enveloppe : ITE ou ITI. Une isolation par l'extérieur sera plus efficace pour le confort d'été car elle améliore la part de l'inertie de l'enveloppe qui agit au bénéfice de l'intérieur du logement.		x	
	Épaisseur de l'isolant pour chaque paroi de l'enveloppe qui amortit et déphase le flux de chaleur entrant	x	x	
	Propriétés optiques (albédo et émissivité) des revêtements de toiture et de façade qui conditionnent le bilan radiatif associé au flux solaire incident et au rayonnement thermique des surfaces	x		
	Facteur solaire des baies, qui pilote les apports solaires dans les logements par transmission du rayonnement solaire	x		
Architecture	Taux de vitrage par façade. Un taux de vitrage élevé risque d'augmenter les apports solaires si des protections solaires ne sont pas utilisées, cependant il permettra également d'augmenter le débit de renouvellement d'air par les fenêtres.	x		x
	Orientation des façades et des ouvrants par rapport au soleil et aux vents dominants (le vent dominant est à considérer à hauteur de l'ouvrant et il faut tenir compte des écrans le cas échéant)	x		x
	Caractère traversant qui favorise la ventilation naturelle			x
	Compacité	x	x	x
	Présence de combles pour les maisons individuelles	x		
	Logement en dernier étage qui présente sa toiture exposée au rayonnement solaire	x	x	
	Logement en contact direct avec le sol. Pour le confort d'été il est préférable de ne pas isoler le plancher afin de profiter de l'inertie naturelle du sol.		x	
	Présence de casquettes/balcons aux étages supérieurs qui limitent les apports solaires à travers les baies	x		
Présence de masques solaires (urbains ou arbres) proches, qui limitent les apports solaires à travers les baies et l'exposition solaire en face externe des façades	x			

Systèmes et comportement des occupants	Présence d'espaces tampons, loggias, façade double peau. Attention : ils peuvent réduire la section de passage pour le renouvellement de l'air.	x	x	x
	Sur-ventilation nocturne par la VMC. Les débits d'air peuvent atteindre jusqu'à 1 vol/h, en comparaison avec un débit par les fenêtres de l'ordre de plusieurs 10 vol/h s'il y a du vent.			x
	Présence de protections solaires extérieures mobiles. Elles réduisent les apports solaires la journée, mais si elles restent baissées, elles réduisent la section de passage de l'air.	x		x
	Usage des protections solaires extérieures mobiles	x		
	Ratio d'ouverture de fenêtres. Cela dépend du type de fenêtre : battante, oscillo-battante, etc.			x
	Pratiques d'ouverture et fermeture des fenêtres et portes intérieures			x
	Pratiques des occupants concourant aux apports internes : électro-ménager (cuisine, lavage, froid alimentaire, etc.), audiovisuel, etc.	X		

Les trois phénomènes physiques impactent les conditions intérieures du bâtiment à différents moments de la journée et ont tous un rôle important. Pour cette raison, il est très difficile de généraliser le ou les paramètres ayant le plus d'impact sur la surchauffe d'un logement. A la fois l'enveloppe (propriétés des parois opaques et vitrées, position et épaisseur de l'isolant, l'inertie), l'architecture d'un logement (le taux de vitrage, le caractère traversant, la compacité, la présence d'espaces tampons), ses systèmes, ainsi que son utilisation par les occupants (la gestion des ouvrants, des protections solaires, et l'utilisation de brasseurs d'air par exemple), influent sur les conditions intérieures du logement et créent une potentielle surchauffe. Par ailleurs, les paramètres présentent de nombreuses interactions les uns avec les autres dues au fait qu'ils ont un impact sur les mêmes phénomènes physiques, ce qui rend le problème encore plus complexe.

Une étude menée en 2023 par Machard et d'autres chercheurs a présenté une analyse de sensibilité des paramètres impactant la surchauffe d'un logement collectif T5 neuf RE2020 isolé par l'extérieur, au dernier étage d'un bâtiment traversant orienté Nord-Sud avec un balcon sur la façade Sud. Dans une première partie, une quinzaine de caractéristiques du bâti pouvant impacter la surchauffe intérieure ont été étudiés. Cette partie a permis de démontrer que les paramètres impactant le plus la surchauffe de ce logement cas d'étude en particulier étaient l'inertie de la toiture et du plancher (due à une grande surface de ceux-ci comparé à la surface des murs extérieurs), le taux de vitrage, les propriétés optiques de la toiture (albédo et émissivité), et la capacité du logement à ventiler *via* le contrôle d'ouverture des fenêtres. L'ajout de protections solaires extérieures mobiles n'est pas crucial pour réduire la surchauffe du logement car ce cas d'étude dispose d'une loggia sur la façade Sud, qui réduit considérablement les apports solaires reçus sur la façade, et agit comme une casquette sur l'espace intérieur du logement. Une casquette supplémentaire attenante à la loggia orientée Sud ou des masques solaires environnants avaient donc peu d'impact sur la surchauffe car la loggia est très efficace pour limiter le rayonnement solaire. En revanche, le rayonnement diffus par la paroi Nord entièrement vitrée représentait la partie la plus importante de rayonnement entrant. Pour un logement avec une architecture différente, les résultats auraient été différents.

Par ailleurs, le climat a également un impact, or il varie d'une ville à l'autre et, pour une ville donnée, il va évoluer du fait du changement climatique. La Figure 6 montre les résultats d'une analyse de sensibilité temporelle approfondie avec la méthode de Sobol (Saltelli et al., 2010) qui démontre la hiérarchisation des différents paramètres sur 5 jours estivaux consécutifs pour 3 séquences climatiques différentes :

- Paris avec le climat actuel de type TMY (Typical Meteorological Year), des températures diurnes entre 25°C et 28°C et des températures nocturnes qui descendent à 16°C ;
- Paris avec une future vague de chaleur, des températures diurnes autour de 40°C et des températures nocturnes autour de 25°C ;

- Carpentras avec une future vague de chaleur, des températures diurnes autour de 45°C et des températures nocturnes entre 25°C et 30°C.

Les paramètres qui varient sont les suivants :

- Coefficients d'absorptivité et d'émissivité de la toiture : Roof α & ϵ
- TM Ceiling : inertie du plafond
- TM Floor : inertie du sol
- Glazing % : pourcentage de vitrage sur les façades Nord et Sud [35-95]
- Wopen % : pourcentage de fenêtres ouvert [0-1]
- SP Wopen : consigne de température intérieure qui autorise l'ouverture de fenêtres [15-24]

L'ouverture des fenêtres pour favoriser le rafraîchissement par ventilation naturelle est conditionnée par plusieurs facteurs :

- Les fenêtres peuvent être ouvertes uniquement si la température intérieure dépasse la température extérieure avec un écart de 1°C ;
- Les fenêtres peuvent être ouvertes uniquement lorsque la température intérieure dépasse la température de consigne (qui varie selon le paramètre SP Wopen qui module cette température de consigne) ;
- Chaque fenêtre peut être ouverte de 0 à 100%, cette ouverture est modulée par le coefficient Wopen% qui varie de 0 à 1 (0 pour 0% et 1 pour 100%).

Le coefficient S_{Ti} représente l'indice global de sensibilité de Sobol, c'est-à-dire à la fois l'influence d'un paramètre et l'influence de ce paramètre combiné à un ou plusieurs autres sur l'indicateur de sortie, dans notre cas la surchauffe du logement.

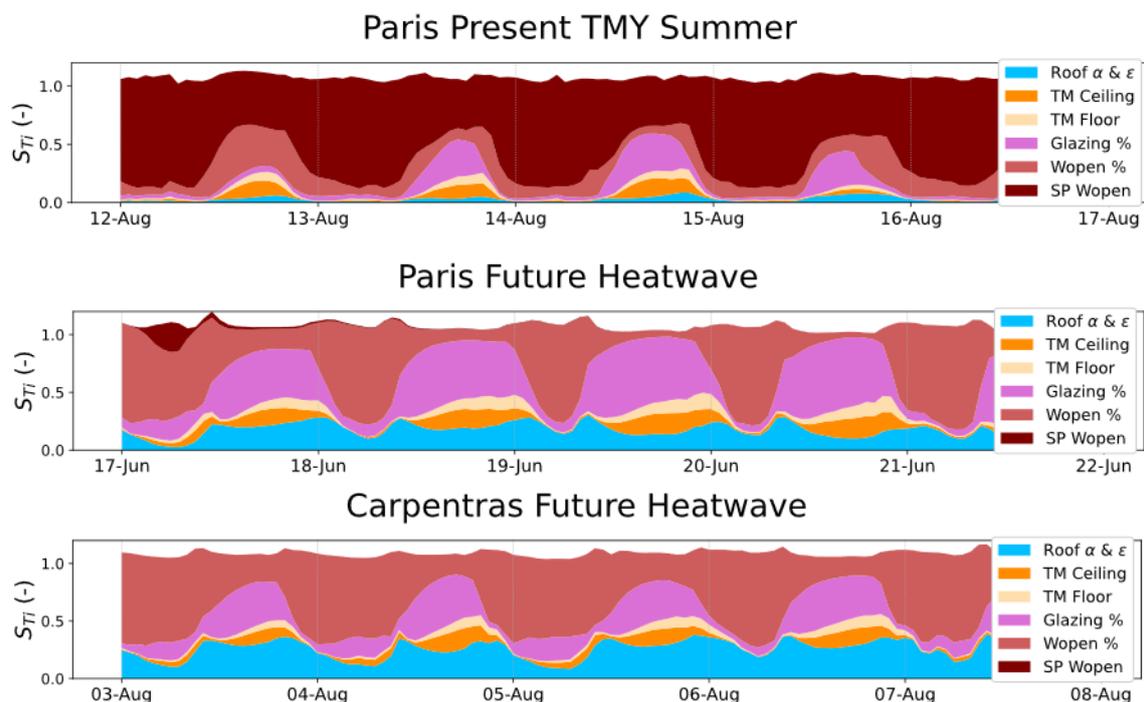


Figure 6 - Analyse de sensibilité temporelle des paramètres impactant la surchauffe d'un même logement l'été (Machard et al., 2023)

On observe une différence marquante entre les deux climats parisiens : lors de l'été typique à Paris, le paramètre ayant le plus d'influence est la consigne d'ouverture des fenêtres. Cette consigne varie entre une température opérative de 15°C (équivalente à la température extérieure minimale) et 24°C (équivalente à la température extérieure de début de soirée/milieu de matinée). Ce résultat traduit le fait que c'est la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres qui pilote et permet de maintenir le confort thermique dans le logement, l'effet visible en journée également peut être expliqué par l'interaction du phénomène avec l'inertie du logement. En contraste, lors

de la vague de chaleur future à Paris, le paramètre le plus impactant la nuit est le pourcentage d'ouverture des fenêtres. Alors que les températures opératives sont toujours supérieures à 24°C, le potentiel de ventilation doit être maximisé par une grande ouverture de baies afin de maintenir le confort. Par ailleurs, la période de ventilation est plus courte, elle débute aux alentours de 23h (moment où la température extérieure redescend en dessous de la température opérative) alors que durant le climat présent elle début autour de 20h. On constate un allongement de la période où l'inertie pilote les conditions environnementales du logement, à cheval avec le moment où les fenêtres sont ouvertes. La journée, les paramètres impactant le phénomène physique lié au rayonnement (le taux de vitrage des baies, les propriétés de la toiture) ont un impact plus important, étant donné que la ventilation naturelle ne suffit plus à rafraîchir le logement, les autres paramètres jouent un rôle prépondérant en comparaison. Enfin, en comparant les résultats à Carpentras pour un même type de climat, on observe des variations sur la période nocturne. A Carpentras, le potentiel de ventilation naturelle est utilisé durant plus d'heures nocturnes qu'à Paris.

Dans le projet CSTB-EDF ImpaCt du RéchAuffement Climatique sur la Rénovation et la concEption des Bâtiments (ICARE), il a été montré que les éléments ayant le plus d'impact sur la surchauffe d'un logement dans un bâtiment de logements collectifs sont le taux de vitrage, le caractère traversant du logement ainsi que le ratio d'ouverture des fenêtres qui module de renouvellement d'air de rafraîchissement nocturne, la présence de protections et de masques autour du logement, le fait que le bâtiment soit isolé ou non, ainsi que l'inertie. Ces travaux mènent à des conclusions similaires aux travaux de thèse d'Anaïs Machard.

Pour ce projet, deux architectures de logement ont été étudiées : un logement « type » de 66 m², en étage intermédiaire d'un bâtiment collectif, et un studio en dernier étage non traversant. Pour ces deux types de logements, environ 4 000 simulations ont été réalisées dans chaque ville cas d'études (Nantes, Paris et Nîmes) pour différents climats présents et futurs, annuels typiques (Th-C, 2050 normal) et caniculaires (Th-D, extreme_CNRM, extreme_GFDL). Pour ces simulations l'indicateur de confort thermique de la réglementation DH est calculé. Une modélisation par régression linéaire multiple de l'indicateur DH a été réalisée afin de calculer un coefficient pour chaque paramètre. Les résultats sont présentés pour le logement « type » dans la Figure 7. Dans tous les climats, il s'avère que le caractère traversant d'un logement domine et son importance augmente au fur et à mesure que le climat se réchauffe. Ce paramètre est largement majoritaire. Cependant il convient de noter que, dans cette étude, l'îlot de chaleur urbain, et donc l'augmentation des températures nocturnes, n'a pas été pris en compte, ce qui tendrait à réduire l'influence de ce paramètre. Le taux de vitrage a également une importance grandissante au cours du réchauffement. Le U moyen des parois ne semble pas être un critère prépondérant, ce qui peut s'expliquer du fait que les murs extérieurs ont une surface moins importante que les planchers hauts et bas.

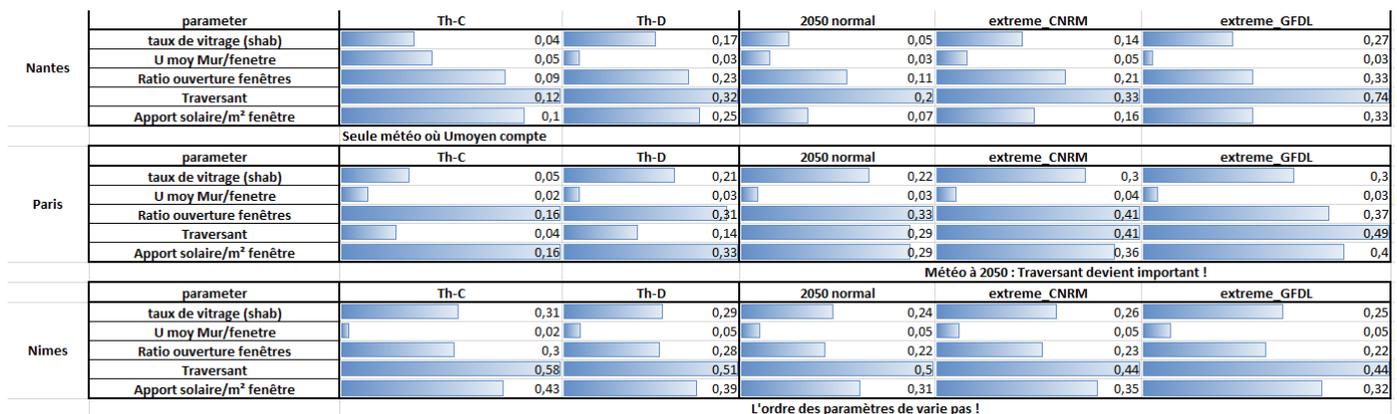


Figure 7 - Paramètres impactant la surchauffe d'un appartement type d'un bâtiment de logements collectifs

Les résultats pour le studio non traversant en dernier étage sont différents (Figure 8). Ainsi, étant donné que le potentiel de rafraîchissement est limité par le caractère non traversant du logement, les apports solaires sont un paramètre très impactant à Nantes et à Paris. A Nîmes et dans les climats les plus extrêmes, il semble que c'est le U de la toiture qui a le plus d'impact. Le rayonnement solaire étant plus impactant dans le Sud, il convient d'adapter les propriétés de la toiture, notamment y apporter de l'inertie et/ou de l'isolation.

	parameter	Th-C	Th-D	2050 normal	extreme CNRM	extreme GFDL
Nantes	taux de vitrage (shab)	0,16	0,16	0,1	0,14	0,14
	U moy Mur/fenetre	0,09	0,09	0,08	0,12	0,07
	Ratio ouverture fenêtres	0,1	0,15	0,09	0,12	0,18
	Toit U	0,11	0,16	0,03	0,12	0,21
	Apport solaire/m ² fenetre	0,3	0,27	0,18	0,23	0,23
					pour extrême GFDL, Apport soalaire reste	
Paris	taux de vitrage (shab)	0,05	0,06	0,06	0,06	0,03
	U moy Mur/fenetre	0,06	0,05	0,05	0,06	0,02
	Ratio ouverture fenêtres	0,07	0,11	0,08	0,1	0,14
	Toit U	0,09	0,12	0,13	0,12	0,23
	Apport solaire/m ² fenetre	0,18	0,17	0,14	0,17	0,12
					pour extrême GFDL, c'est toit U qui pren	
Nimes	taux de vitrage (shab)	0,15	0,15	0,08	0,07	0,07
	U moy Mur/fenetre	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
	Ratio ouverture fenêtres	0,17	0,19	0,16	0,17	0,18
	Toit U	0,37	0,4	0,41	0,39	0,38
	Apport solaire/m ² fenetre	0,07	0,06	0,01	0	0
					L'ordre reste inchangé	

Figure 8 - Paramètres impactant la surchauffe d'un studio non traversant au dernier étage d'un bâtiment de logements collectifs

Les limites de ces études sont :

- Ces résultats sont issus de simulations avec des limitations dans la modélisation des paramètres physiques, notamment la ventilation par les fenêtres ;
- Le comportement des occupants dans le logement est fixe alors que, dans la réalité, ce comportement diffère fortement d'un logement à un autre et impacte grandement le risque de surchauffe ;
- Les simulations sont réalisées sur des climats prospectifs futurs issus de modèles qui ont également leurs incertitudes.

Par ailleurs, il est possible pour un cas d'étude de hiérarchiser les paramètres impactant la surchauffe pour des conditions requises définies. Une analyse paramétrique multicritères permet d'optimiser une conception. Cependant, la démarche est coûteuse pour être généralisée sur toutes les conceptions. Par ailleurs, les conditions requises que ce soit le climat ou les usagers sont incertaines et rarement associées à une probabilité d'occurrence pour connaître quelles conditions doivent être étudiées en priorité. Cet exercice d'ingénierie est peu commun dans le secteur résidentiel voire exceptionnel dans la rénovation.

Nous sommes donc confrontés aux difficultés suivantes :

- Des conditions météorologiques aux limites qui sont incertaines et variables tout comme le comportement des occupants ;
- Des phénomènes dynamiques qui dépendent de l'étroite intrication des composants de l'enveloppe et du comportement des occupants ;
- D'une hétérogénéité forte du parc résidentiel.

En conséquence il est difficile d'extrapoler une situation à une autre, le retour d'expériences pour calquer des solutions toutes faites ne se peut se réaliser sans une étude contextualisée approfondie. Aujourd'hui, on ne dispose pas d'une photographie claire du parc de bâtiments français qui permettrait de classer les logements en fonction de leur vulnérabilité à la surchauffe, comme nous l'avons avec l'étiquette DPE pour l'énergie.

2.2 Segmentation du parc de bâtiments

Une première étape possible est de réaliser une segmentation en typologies du parc de bâtiments français. La question qui se pose alors est la suivante : est-il plus judicieux de réaliser une segmentation « représentative du parc » (qui soulève une question secondaire, représentative selon quels critères ?), ou bien de réaliser une segmentation des bâtiments directement en fonction de leur vulnérabilité à la surchauffe ?

En effet, la notion de représentativité est relative. Elle dépend de la lecture que nous souhaitons faire de notre ensemble et plus encore de l'action que l'on souhaite conduire par la suite. Le bâtiment est fortement marqué par les techniques de construction, les innovations, les réglementations et les modes architecturaux qui évoluent suivant les époques. Ainsi la date de construction est bien souvent un critère privilégié pour parler de représentativité. Une autre approche amènerait à segmenter les logements en fonction de leur vulnérabilité à la

surchauffe, indépendamment des critères habituellement retenus pour construire des typologies (année de construction, par exemple).

Classification par typologie préexistante : un exemple qui illustre la difficulté

La première approche, usuellement utilisée, est la typologie représentative des différents systèmes constructifs, qui aboutit à une classification en N types de tout le parc. Ces classifications sont multiples, dont l'une est présentée ici en particulier ; il s'agit d'une étude énergétique bien connue (POUGET Consultants, 2017).

Cette étude s'intéresse aux logements français métropolitains construits jusqu'à 2000 et les classe en 10 typologies de maisons individuelles et 16 typologies de logements collectifs. En analysant ces typologies et leurs caractéristiques dans cette étude et en considérant les éléments structurants du confort d'été, ces typologies peuvent être regroupées de manière à former 7 typologies *a priori* pour le confort thermique d'été (Tableau 3).

Tableau 3 : Classification des bâtiments par typologies

Typologies de l'étude initiale	Typologies pour le confort thermique d'été
Immeubles de bourg av48	Typologie 1
Immeubles haussmaniens	
Immeubles éclectique av 48	
Immeubles HBM av 48	Typologie 1'
Immeubles Pastiche 48-74	Typologie 2
Petits collectifs 48-74	
Immeuble bourgeois 48-74	Typologie 3
Immeubles intermédiaires 68-74	Typologie 3'
Barres 48-74	Typologie 4
Tours 48-74	Typologie 4'
Habitat intermédiaire 75-81	Typologie 5
Petits collectifs 75-81	
Barres 75-81	
Tours 75-81	
Immeubles 82-89	Typologie 6
Immeubles 90-2000	Typologie 7

Cependant, cette analyse typologique a été construite autour de la performance énergétique des bâtiments, ainsi le critère principal retenu pour séquencer les logements est l'année de construction. En partie à cause de ce biais, de nombreuses informations, impactantes pour le confort thermique d'été, manquent dans la description des typologies, comme :

- La présence de protections solaires ;
- La présence de masques (présence de balcon, par exemple) ;
- Le caractère traversant des logements ;
- L'albédo des murs : le revêtement de surface des façades n'est pas décrit ;
- L'albédo des toitures : le matériau de couverture est indiqué mais ne permet pas toujours d'en conclure l'albédo (plusieurs matériaux possibles, ou alors des matériaux à albédo variable suivant les types choisis) ;
- L'épaisseur d'isolant n'est pas indiquée et donc le déphasage ne peut être déduit ;
- Le ratio d'ouverture de fenêtres (certes difficile à indiquer mais il est important de mentionner que ce paramètre est à la fois très influent et très difficile à estimer) ;

- L'approche typologique déconnecte le bâtiment de son environnement alors que ce dernier a de forts impacts sur le confort thermique d'été dans le bâtiment :
 - L'exposition au bruit ou à d'autres éléments impactant l'ouverture des fenêtres (moustiques, sécurité, etc.) ;
 - La zone géographique : zone climatique, altitude, exposition au vent d'été ;
 - Le microclimat comme la proximité aux îlots de chaleur ou de fraîcheur (proximité à un lac, à un parc, etc.) ;
 - Mais, en supplément, certaines caractéristiques du bâtiment, peuvent être liées à son environnement, à sa localisation. Par exemple, les matériaux de toiture dans certaines régions (parfois même imposés par le PLU). Les informations à la fin de l'étude typologique sur les matériaux de construction des bâtiments anciens peuvent être un apport intéressant en ce sens.

En plus de ces éléments manquants, il est aussi important de souligner que les informations issues de l'étude typologique étaient parfois peu précises et peu compréhensibles. En conséquence, la reclassification typologique est peu fiable et ne saurait être une base solide pour analyser la vulnérabilité du parc français à la surchauffe. Il s'avère qu'il est complexe de trouver toutes les données nécessaires à la modélisation d'un logement pour évaluer sa surchauffe. Des logiciels de simulation thermique dynamique (STD) requièrent des paramètres d'entrée détaillés, ce qui peut conduire à une complexité accrue de désagréger les paramètres afin de correctement modéliser un logement sans introduire d'erreurs.

En conclusion, au vu des éléments manquants dans les différentes typologies présentées, l'idéal sera de construire la classification *ad hoc* directement à partir de la question de la vulnérabilité des bâtiments à la surchauffe. C'est l'approche initiée dans l'analyse de vulnérabilité du projet de recherche ICARE. Afin de réaliser cette classification, il convient de se renseigner sur les données disponibles à l'échelle du parc de bâti français, notre base de données la plus complète étant à ce jour la Base de Données Nationale des Bâtiments (BDNB), accessible depuis le portail ("Go Rénove Particuliers," 2023).

Vers une classification des logements directement en fonction de la vulnérabilité à la surchauffe : les données disponibles

La BDNB a été initialement construite dans le cadre du projet GoRénove (programme Profeel financé par les CEE) et a regroupé, organisé, croisé et assemblé de nombreuses bases de données nationales existantes : les fichiers fonciers, les DPE, etc. La BDNB permet d'agréger et de rendre simplement utilisable des informations issues de différentes bases de données, elle est régulièrement mise à jour et en constante amélioration. A date, elle couvre la majorité des bâtiments de logements en France.

Aujourd'hui les informations disponibles et accessibles sur les bâtiments sur la BDNB sont :

- Année de construction
- Nombre logements
- Usage principal (ex : *résidentiel collectif*)
- Générateur chauffage principal (DPE) (ex : *chaudière fioul standard*)
- Générateur chauffage appoint (DPE)
- Générateur ECS principal (ex : *chaudière fioul standard*)
- Générateur ECS appoint
- Type de vitrage (ex : *simple vitrage*)
- Type d'isolation mur (ex : *isolation thermique par l'intérieur*)
- Position de l'isolation des planchers (ex : *plancher non isolé*)
- Type isolation toiture (ex : *toiture non isolée*)
- Date DPE (ex : *2013-12-16*)
- Numéro du DPE représentatif du bâtiment (ex : *1313V2002898V*)
- Logement traversant (ex : *traversant Est-Ouest*)
- Identifiant bâtiment BDNB.

Des exemples de réponses ont été mises en italique pour donner une idée du niveau de précision des réponses. La BDNB donne des informations à l'échelle du bâtiment alors qu'elle est nourrie en partie par des données à l'échelle du logement (celles issues du DPE, par exemple). Il faut donc prendre en compte l'échelle à laquelle est rattachée chaque information exposée, pour savoir quand il y a eu extrapolation.

Base de données DPE : des forces et des faiblesses

La majorité des informations de la BDNB qui peuvent nourrir la réflexion sur les bâtiments de logement collectif par rapport au confort d'été est aujourd'hui liée au DPE. La couverture des DPE sur les logements collectifs est donc aujourd'hui partielle.

Il est à noter que de nombreuses informations sont disponibles dans le DPE (même dans la version antérieure à sa récente refonte, en 2021) : « Le DPE décrit le bâtiment ou le logement (surface, orientation, murs, fenêtres, matériaux, etc.), ainsi que ses équipements de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire, de rafraîchissement et de ventilation. Il indique, suivant les cas, soit la quantité d'énergie effectivement consommée (sur la base de factures), soit la consommation d'énergie estimée pour une utilisation standardisée du bâtiment ou du logement. » (<https://data.ademe.fr/datasets/dpe-france>)

Le modèle de données du DPE est assez conséquent. L'ensemble des éléments de l'inspection sur site, que le diagnostiqueur peut renseigner, sont dans le Guide d'inspection sur site (Ministère du Logement, 2009)

De nombreux éléments sont présents et directement liés à des déterminants de confort thermique d'été : matériaux et niveau d'isolation, présence de système de rafraîchissement, présence de protections solaires, etc.

Il est à noter que :

- La fiabilité des données récupérées dans la base de données des DPE est très variable (erreurs de saisie, faible fiabilité des diagnostiqueurs, données d'entrée parfois « avantageuses » par rapport à la réalité, DPE non imposable avant sa refonte en 2021) ;
- Certains paramètres sont encore moins bien remplis que d'autres, comme les balcons par exemple. Comme la présence de balcon n'avait pas d'impact sur le calcul des étiquettes DPE, peu de diagnostiqueurs renseignent la présence de balcon. Quand l'information pour « présence de balcon » est « oui », alors il est assez sûr que le balcon est présent. Cependant, quand la réponse à « présence de balcon » est vide, il est difficile de savoir s'il n'y a pas de balcon ou si la réponse n'a seulement pas été intégrée.

L'amélioration dans le temps de cette situation est certaine et, de plus, à notre connaissance, il n'y a aucune autre alternative robuste. Ainsi, cette base de données sera utilisée dans le cadre du projet RENOPTIM, afin d'estimer la vulnérabilité à la surchauffe des logements des bailleurs, et un calcul de confort thermique prédictif y sera adossé.

Certains déterminants du confort d'été peuvent être liés à des informations disponibles à l'échelle du parc. Par exemple, l'albédo des toitures est fortement lié aux matériaux de couverture des toitures qui peuvent être géographiquement généralisables pour une période de construction ancienne. La Figure 9 est un exemple de matériaux de toitures par région issu de l'étude Pouget en 2017.

A terme, des valeurs d'albédo seront calculées par la BDNB à une maille de 10 m grâce aux données sentinel-2 (Projet Sat4BDNB, CSTB-CNES-CESBIO), ce qui devrait pouvoir permettre de caractériser l'albédo des toitures des bâtiments.

MATÉRIAUX / REGION	MIDI-PYRÉNÉES								NORD-PAS-DE-CALAIS	PAYS DE LA LOIRE			PICARDIE	POITOU-CHARENTES	PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR			
	Bigorre	Tarn et Garonne	Rouergue	Gascogne	Toulouse	Béarn	Quercy	Bastide	Flandre Artois	Vendée	Marine Anjou	Pays nantais	Picarde Oise	Poitou	Marseille	Provence	Dauphiné	Angoumois Aunis Saintonge
Charpente																		
chêne	x	x			x	x	x			x	x	x	x	x		x	x	x
châtaignier	x	x				x	x			x	x			x			x	x
peuplier	x	x											x				x	x
pin	x						x			x					x			x
bouleau													x					
merisier																		
sapin	x				x												x	
orme					x								x					
épicéa	x												x					
hêtre	x				x		x						x	x				
Toiture																		
ardoise	x		x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x
tuiles								x										
tuiles mécanique	x				x				x	x			x				x	
chaume			x					x	x	x		x	x				x	
tuile canal ("tige de botte") (tuile ronde)	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	x
tuile romaine									x									
brique						x												
roseaux ou paille									x									
tuile plate ("picon")	x		x		x	x	x			x			x	x			x	x
panne flamande (en S)								x					x					
bardeaux de bois										x							x	
lauze (lave, schiste, calcaire, granit, gres)			x		x	x	x										x	
plomb																		
tôle																		
tuile vernissée																		
zinc								x										

Figure 9 – Matériaux de toiture par région

Autres informations sur l'environnement extérieur pouvant impacter le confort thermique estival à l'intérieur des bâtiments

D'autres données peuvent être utiles pour caractériser les paramètres impactant le confort d'été. La première est le contexte urbain dans lequel s'inscrit le logement ; s'il se situe en ville, il subit probablement le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Afin de cartographier ce risque, un outil développé en interne au CSTB, « Sat4BNB », permet de caractériser l'ICU de différentes zones urbaines, à partir de paramètres tels que la géométrie des bâtiments et des rues, l'albédo des surfaces, la végétation du quartier (Figure 10). La caractérisation se fait à l'échelle de l'IRIS, d'un arrondissement, ou d'une ville entière. Par ailleurs, les régimes de vent en zone urbaine seront à estimer afin d'estimer le potentiel de ventilation naturelle pour les bâtiments.

La Figure 10 démontre l'impact relatif de ces différents paramètres. Cet indicateur d'ICU sera prochainement intégré dans la BDNB et permet d'estimer le risque de surchauffe nocturne dans le quartier autour du bâtiment. L'outil Urban Weather Generator (Bueno et al., 2013), développé par le MIT, permet de reconstituer un fichier météorologique prenant en compte le microclimat autour d'un bâtiment situé en ville.

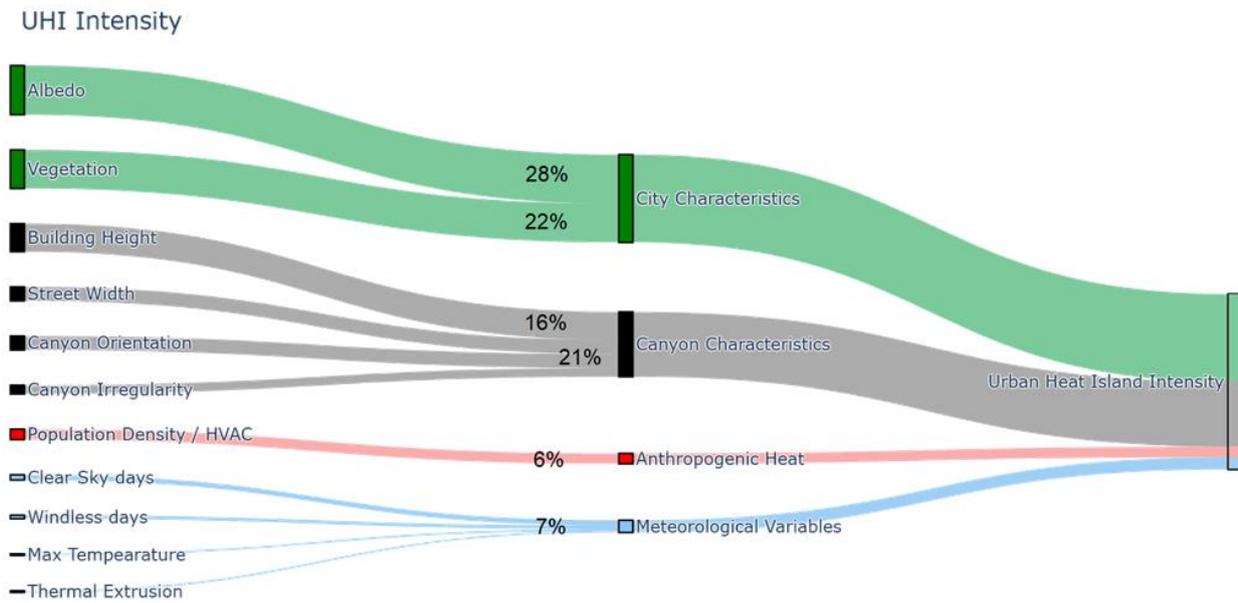


Figure 10- Impact des différentes variables sur le calcul de l'impact des ICU [outil Sat for ICU4BDNB]

D'autres données, telles que l'acoustique autour du logement, le taux de cambriolages dans le quartier, la présence de moustiques, peuvent être des freins à l'ouverture des fenêtres pour favoriser le rafraîchissement nocturne, il convient de tenir compte de ces facteurs limitants dans la suite d'outil RENOPTIM. Le moustique tigre notamment est présent dans la majorité des départements français, comme l'atteste la carte du Ministère de la Santé publiée en 2023.

En ce qui concerne l'exposition au bruit, il est possible de récupérer des données des niveaux de bruit moyens en façade en journée, soirée et nuit pour des études spécialisées. Le CSTB a travaillé avec le CEREMA pour l'intégration de cartes de bruits à la BDNB, ce qui a permis de calculer un indicateur d'exposition au bruit pour chaque bâtiment de la BDNB. Cet indicateur pourra être utilisé notamment comme facteur limitant lors des scénarios d'ouverture des fenêtres pour la ventilation nocturne.

Enfin, afin de cibler les logements à traiter en priorité, l'étude du cadre bâti est importante mais également celle des populations vulnérables. L'âge des locataires peut nous renseigner sur le potentiel risque sanitaire au sein d'un bâtiment ou d'un logement. Une base de données appelée FiLoSoFi a été créée par l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) et répertorie l'âge des habitants. Cette base est gratuite et consultable via par exemple le logiciel open source QGIS. Elle fournit des informations sur le nombre d'habitants, leur sexe et la distribution de leur âge à différents endroits en France, en se basant sur les déclarations de revenus des ménages français. Les données sont disponibles sur l'ensemble du territoire, à l'échelle de l'IRIS ; elles sont mises à jour tous les 2 ans et sont basées sur le dernier recensement de la population réalisé par l'INSEE. Ces données peuvent être exploitées dans l'outil RENOPTIM afin de fournir une carte de vulnérabilité des bâtiments à la surchauffe et pointer vers des localisations potentiellement plus à risque pour des personnes âgées.

2.3 Conclusion : caractérisation dans le projet RENOPTIM de la vulnérabilité du parc bâti à la surchauffe

Ce chapitre a abordé les facteurs déterminants de la surchauffe bâtiment ainsi que la complexité de cibler les logements à traiter en priorité. D'une part, les phénomènes physiques impactant la surchauffe sont tous interconnectés et il est donc difficile de hiérarchiser les paramètres impactant pour tous les bâtiments. D'autre part, l'accès aux données est conditionné par la fiabilité des données DPE croisées aux données de la Base de Données Nationale des Bâtiments.

L'outil RENOPTIM a pour ambition de proposer dans un premier temps un outil de ciblage qui permettra à chaque bailleur d'avoir une vue globale de la situation de son parc en termes de risque de surchauffe. L'outil permettra d'évaluer ce risque à la fois en l'état actuel, ainsi qu'en milieu de siècle en utilisant des projections futures issus de modèles de climats qui intègrent des canicules passées et futures, et l'îlot de chaleur urbain dans le cas des

bâtiments en ville. Cet outil sera adossé à la BDNB afin de récupérer les données des bâtiments du parc des bailleurs. La base de données actuelle recense 12,5 millions de DPE de logements et la base des fichiers fonctions renseigne les informations de 36,8 millions de logements.

A partir de simulations massives de bâtiments et d'évaluation de la surchauffe, des métamodèles seront développés, ils permettront de calculer rapidement un indice de surchauffe pour chaque bâtiment. L'outil RENOPTIM permettra une saisie afin que le bailleur puisse compléter ce premier niveau d'informations issu des bases de données avec la connaissance de son patrimoine. Le bailleur pourra ainsi avoir accès à une vision des logements représentant les risques de surchauffe les plus élevées dans son parc, qu'il pourra utiliser en complément de sa connaissance de ses locataires afin de décider quels logements cibler en priorité pour implémenter des solutions.

La campagne expérimentale effectuée en France dans 76 logements (du parc à la fois social et privé), répartis dans 3 régions climatiques (Paris, Bordeaux, Alès/Marseille), permettra d'apporter une connaissance terrain des logements qui surchauffent le plus. Cette campagne permettra de mettre en évidence, en complément des résultats des modèles, le ressenti thermique des locataires aux conditions intérieures de leurs logements en périodes de fortes chaleurs ainsi que leurs habitudes de vie (habitudes d'adaptations aux fortes chaleurs telles que la gestion d'ouverture des fenêtres, l'usage de protections solaires ou de ventilateurs, etc.).

Enfin, dans un second temps l'outil RENOPTIM permettra d'apporter des propositions concrètes aux bailleurs sociaux de solutions techniques à implémenter dans les logements prioritaires afin de donner plus de place à l'adaptation au changement climatique dans leur processus de rénovation.

LE CONFORT THERMIQUE ET LE STRESS THERMIQUE DE L'INDIVIDU

Les ambiances thermiques dans le bâtiment ont des impacts directs sur le bien-être des occupants ainsi que sur leur santé. Dans ce chapitre, les concepts de confort, d'inconfort et de stress thermique de l'individu sont explicités d'un point de vue physiologique.

Les règles de bonnes pratiques données par les normes sur l'ergonomie des ambiances intérieures distinguent les ambiances thermiques dans la norme NF EN ISO 11399 (Tableau 4 ci-dessous). Les ambiances modérées, dites de « confort », sont évaluées avec les indices PMV et PPD explicités dans la norme NF EN ISO 7243 (CEN TC 122). Les ambiances chaudes sont évaluées avec l'indice WBGT qui est explicité dans la norme NF EN ISO 7243 (CEN TC 122).

Tableau 4 : Evaluation des ambiances thermiques à l'aide des Normes internationales

Paramètre évalué	Type d'ambiance thermique		
	Chaude	Modérée	Froide
	Moyens d'évaluation		
Confort et contrainte	Indice de température humide et de globe noir, WBGT Débit de sudation requise, SW_{req}	Indices de vote moyen prévisible, PMV et de pourcentage prévisible d'insatisfaits, PPD	Indice du pouvoir refroidissant du vent, WCI Isolement requis du vêtement, IREQ

L'évaluation des deux aspects, le risque sanitaire en ambiance chaude et le confort thermique en ambiance modérée, est difficile à appréhender du fait qu'elle dépend à la fois :

- Des variables environnementales (température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température radiante) ;
- De l'occupant lui-même (principalement son métabolisme lié à son activité physique et sa vêtue).

Les réponses physiologiques et la perception thermique de l'environnement varient d'une personne à une autre selon le sexe, l'âge, l'acclimatation et beaucoup d'autres facteurs. La frontière entre les ambiances modérées et chaudes est floue car, d'une part, les limites d'application des normes ne sont pas précisées, et, d'autre part, les frontières entre le confort thermique et le risque sanitaire varient d'un individu à l'autre. En effet, certaines personnes peuvent se sentir confortables alors qu'elles sont à la limite du risque, alors que certains individus peuvent craindre le risque alors qu'ils ne sont pas réellement en situation de danger thermique. **Autrement dit, les normes actuelles sont des points d'appui mais n'apportent pas de réponses exhaustives à un sujet qui relève encore de la recherche.**

3.1 Régulation de la température chez l'humain

Le corps humain est homéotherme, ce qui signifie qu'il doit maintenir une température corporelle constante sur une plage étendue de températures environnantes grâce à un système de thermorégulation. Cette régulation thermique est cruciale pour permettre aux réactions biochimiques nécessaires au bon fonctionnement des organes du corps humain de s'effectuer de manière optimale, préservant ainsi l'intégrité de ses fonctions vitales. Le corps humain va donc protéger le noyau au détriment des parties périphériques (bras, jambes, oreilles, , etc.) comme l'illustre la Figure 11 (cf. représentation de gauche).

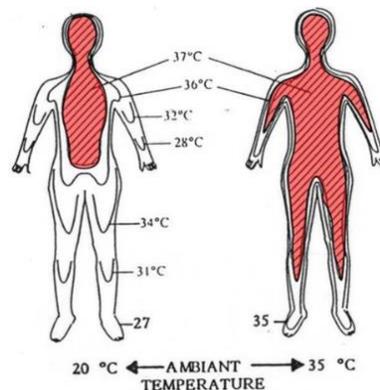


Figure 11 - Répartition de température au sein du corps humain pour deux températures ambiantes différentes (Aschoff and Wever, 1958)

Il existe deux conditions principales à l'homéothermie :

- Une température centrale relativement constante

En effet, la température centrale du corps est constamment évaluée par des thermorécepteurs centraux et comparée à une valeur de référence proche de 37 °C. Cette valeur de référence varie légèrement de manière circadienne ; entre 36°C la nuit et 38-39°C en cas d'efforts prolongés. L'augmentation de cette référence est provoquée par l'activité de plusieurs cytokines agissant au niveau central, comme des médiateurs entre le système nerveux et les organes (Swynghedauw, 2009). Lorsque les récepteurs thermiques de la peau et du cerveau repèrent des variations par rapport à cette référence, le mécanisme de régulation central est activé, faisant intervenir les neurones thermosensibles localisés dans la région pré-optique de l'hypothalamus, comme l'ont décrit Dagron et d'autres chercheurs en 2006. L'hypothalamus joue ainsi un rôle essentiel dans la gestion des processus autonomes et physiologiques du corps humain, assurant le maintien de la régulation thermique et l'équilibre global de la chaleur corporelle (Kingma et al., 2012). **A l'inverse de la température centrale, la température moyenne cutanée peut varier de manière plus importante en fonction des conditions environnementales** et n'est pas homogène en fonction des différentes parties du corps ; elle est par exemple d'environ 29 à 30°C au niveau des pieds et d'environ 34 à 35°C au niveau de la tête. Des variations de 10°C peuvent être enregistrées en fonction des conditions extérieures (Candas, 2000). **Ce sont ces fluctuations qui permettent de dissiper la chaleur dans l'environnement de manière plus ou moins importante et de garantir la seconde condition.**

- Un équilibre entre gains et pertes de chaleur

Le bilan thermique du corps doit demeurer proche de l'équilibre, c'est-à-dire qu'il doit y avoir un équilibre entre les gains et les pertes de chaleur. Le maintien d'une température centrale constante nécessite que la production de chaleur (thermogenèse) soit équilibrée par une perte de chaleur équivalente (thermolyse) (Thellier, 1999). Or, au cours de l'évolution, en raison de sa confrontation à de longues périodes de climats froids et glaciaires, la sélection naturelle a favorisé les mécanismes permettant d'accroître la production de chaleur, appelée la thermogenèse, par rapport à ceux visant à réduire ou éliminer cette production, comme l'a décrit Siva en 2006.

L'équilibre du bilan thermique (Vogt, 1985) du corps humain, nécessite qu'à tout instant :

$$S = M - W - R - K - C - C_{res} - E - E_{res} = 0$$

avec :

S (W/m²) : flux thermique de stockage ou bilan thermique

M (W/m²) : production de chaleur des oxydations cellulaires appelée métabolisme énergétique

W (W/m²) : flux énergétique correspondant au travail extérieur fourni par le corps

R (W/m²) : flux thermique échangé par rayonnement au niveau de la surface cutanée

K (W/m²) : flux thermique échangé par conduction au niveau des aires cutanées au contact d'éléments solides

C (W/m²) : flux thermique échangé par convection au niveau de la surface cutanée

C_{res} (W/m²) : flux thermique échangé par convection respiratoire

E (W/m²) : flux thermique échangé par évaporation cutanée

E_{res} (W/m²) : flux thermique échangé par évaporation respiratoire

Ainsi, l'homme est équipé d'un système de régulation thermique, qui fonctionne selon un mécanisme de rétrocontrôle négatif, et qui peut déclencher à la fois des mécanismes spécifiques inconscients (régulation autonome) et des mécanismes conscients (régulation comportementale) pour rétablir l'équilibre thermique (Bigouret, 2012; Hensel, 1981).

Dans la suite de cette section, la description des mécanismes de thermorégulation et des facteurs d'influence intrinsèques individuels et comportementaux portera sur **les réponses de thermorégulation en contexte chaud**.

Réponses de thermorégulation en contexte chaud

En réponse à un besoin de refroidissement corporel, la thermolyse favorise des échanges thermiques « passifs » grâce à l'évaporation (cutanée et respiratoire), le rayonnement (émission d'infrarouges), la conduction (tissulaire, avec les solides et avec l'air emprisonné dans la vêtue) et le transport de chaleur par le sang au niveau de la peau puis la convection avec l'air. L'ensemble des voies de pertes de chaleur par des échanges dits passifs est représenté sur la Figure 12.

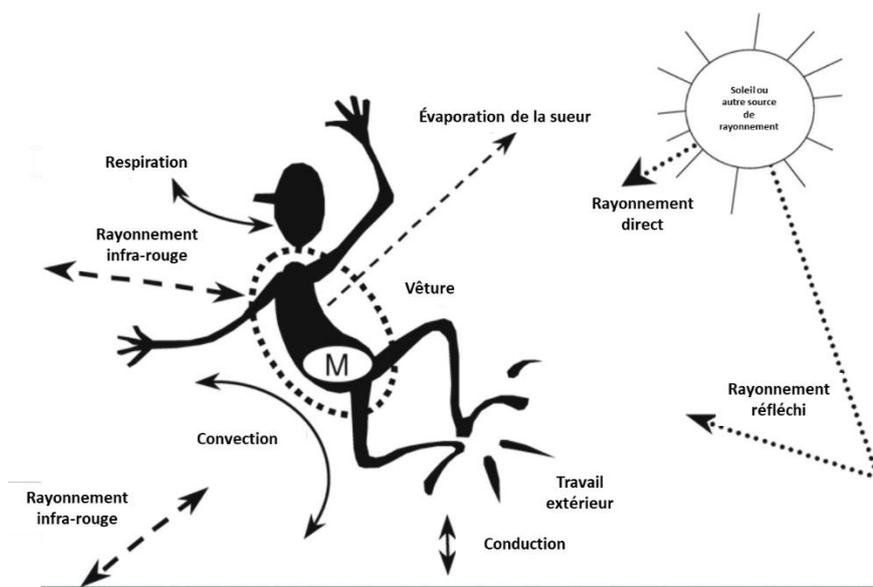


Figure 12 : Représentation schématique des voies de pertes de chaleur de l'organisme. M = production de chaleur métabolique (adapté de (Havenith, 2005))

Dans un second temps, comme le montre la Figure 13, la thermorégulation active inconsciente, dite autonome, réagit à l'hyperthermie de manière double. En effet, elle repose sur la vasodilatation cutanée et l'évaporation sudorale.

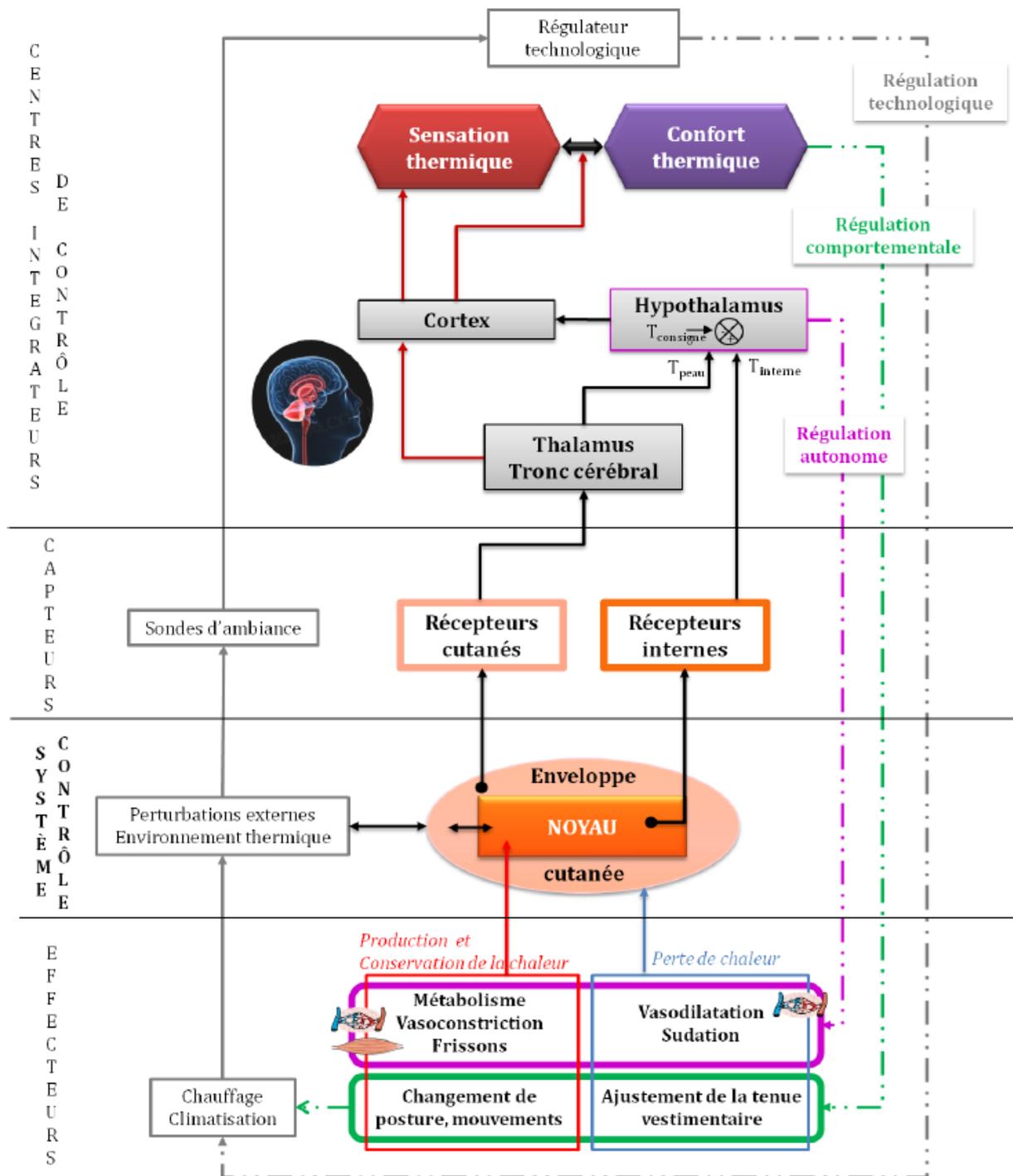


Figure 13 : Schéma de principe de la thermorégulation avec la boucle de régulation autonome, comportement et technologique (Bigouret, 2012)

Lors d'une exposition au chaud, les réponses vasomotrices se traduisent par une vasodilatation, qui correspond à une augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins. Ce mécanisme permet au débit sanguin d'être augmenté de manière significative (jusqu'à 10 fois plus) pour dissiper la chaleur depuis le noyau vers la peau (Lehmuskallio et al., 2002). La dilation des vaisseaux influence le niveau de conductance cutanée qui peut être multipliée par 8 et provoquer une différence de température centrale et cutanée de moins de 1°C.

Lorsque la vasodilatation ne suffit plus à dissiper suffisamment de chaleur, le mécanisme de sudation est déclenché. Ce dernier s'appuie sur la sécrétion sudorale et sur l'évaporation. La sécrétion sudorale repose sur l'activité des glandes sudoripares. Il existe 3 types de glandes sudorales qui diffèrent par leurs caractéristiques originelles et fonctionnelles mais ce sont les glandes sudoripares eccrines qui sont les plus nombreuses (entre 2 et

4 millions) et qui interviennent dans la thermorégulation. Elles se situent à la fois sur les régions glabres et non glabres de la peau, mais ne se sont pas réparties de manière uniforme. Leur densité est la plus forte sur les paumes des mains et les plantes des pieds (environ 250 à 550 glandes/cm²), tandis que sur le visage, le tronc et les membres, leur densité est 2 à 5 fois inférieure ; pour autant, elles sont réparties sur l'ensemble de la surface cutanée, ce qui les rend premières responsables de la thermorégulation (Baker, 2019). C'est l'augmentation de la température corporelle centrale en particulier, et respectivement de la température de la peau et du flux sanguin cutané qui l'accompagne, qui est détectée par les thermorécepteurs centraux et cutanés. Cette information est traitée par l'aire pré-optique de l'hypothalamus pour déclencher la réponse sudomotrice (Filingeri, 2016). **Enfin, l'évaporation de la sueur sécrétée permet le refroidissement du corps.** La perte de chaleur potentielle due à l'évaporation de la sueur résulte de la combinaison de l'énorme capacité du corps humain à transpirer et de la chaleur latente de vaporisation de la sueur qui s'élève à 2426 joules par gramme de sueur à 30°C (Wenger, 1972). Les taux maximaux de transpiration humaine se situent entre 1,5 et 2,5 L/h. **En conséquence, et en supposant que toute la sueur produite soit évaporée, des niveaux de transpiration peuvent théoriquement fournir entre 1 000 et 1 700 W de perte de chaleur** (Blatteis, 1998; Gagnon and Crandall, 2018).

Influence du niveau de vêture

Les vêtements ont la capacité de modifier les échanges thermiques en agissant comme une barrière aux transferts de chaleur et d'humidité qui ont lieu entre la peau et l'environnement. Ils réduisent les flux de chaleur par convection, rayonnement et évaporation cutanée. Ces modifications des flux thermiques dépendent de plusieurs facteurs, notamment les propriétés thermiques des vêtements, leur capacité à permettre l'évaporation, ainsi que les mouvements corporels, la perméabilité de l'air à travers les tissus et l'absorption d'eau, entre autres (McCullough et al., 1985; Vogt, 1985).

Pour simplifier l'analyse, on suppose souvent que les transferts de chaleur entre la peau et les vêtements se font principalement par conduction. L'isolation thermique intrinsèque d'un ensemble vestimentaire est souvent mesurée à l'aide d'un indice appelé « clo », équivalent à une résistance thermique, exprimé en m² °C W⁻¹ et couramment exprimé en unité « clo ». Ce chiffre représente l'isolation nécessaire pour maintenir un équilibre thermique pour une personne sédentaire assise dans une pièce où la température de l'air est à 21°C, une humidité relative de 50%, une vitesse de l'air inférieure à 0,51 m/s et présentant une température de peau de 33,3°C. En termes simples, 1 clo équivaut à 0,155 m².°C.W⁻¹ (Candas, 2000). Les normes AFNOR NF EN ISO 7730 et NF EN ISO 9920 (2006 ; 2007) permettent la détermination de la valeur de l'indice clo grâce à l'utilisation de tableaux regroupant des données d'isolation thermique pour des ensembles vestimentaires types ou par type d'éléments vestimentaires.

Influence des facteurs humains individuels

Age

Les mécanismes de thermorégulation décrits dans la section précédente évoluent en fonction de l'âge, l'augmentation de l'âge entraînant notamment une réduction progressive de la sudation (Blatteis, 1998), une diminution du flux sanguin (Holowatz, 2010) et de la fréquence cardiaque. Cependant, la diminution du taux de transpiration avec le vieillissement a été principalement attribuée à des mécanismes liés à une diminution de la capacité aérobie et à l'acclimatation à la chaleur (peut-être en raison d'une diminution de la sensibilité des glandes sudoripares à la stimulation cholinergique du système nerveux), plutôt qu'à l'âge en tant que tel (Baker, 2019). Chez les personnes âgées, le rythme circadien de la température corporelle présente une amplitude réduite, une phase avancée et une stabilité réduite (Van Someren et al., 2002).

La production de chaleur du corps humain évolue avec l'âge. **Luo et d'autres chercheurs ont mis en avant en 2018 les disparités de production métabolique comme un enjeu important pour l'étude du confort thermique dans les bâtiments de demain.** La Figure 14 présente l'évaluation du taux métabolique de base (TMB, taux métabolique de base, ou BMR en anglais) en fonction de l'âge et du sexe.

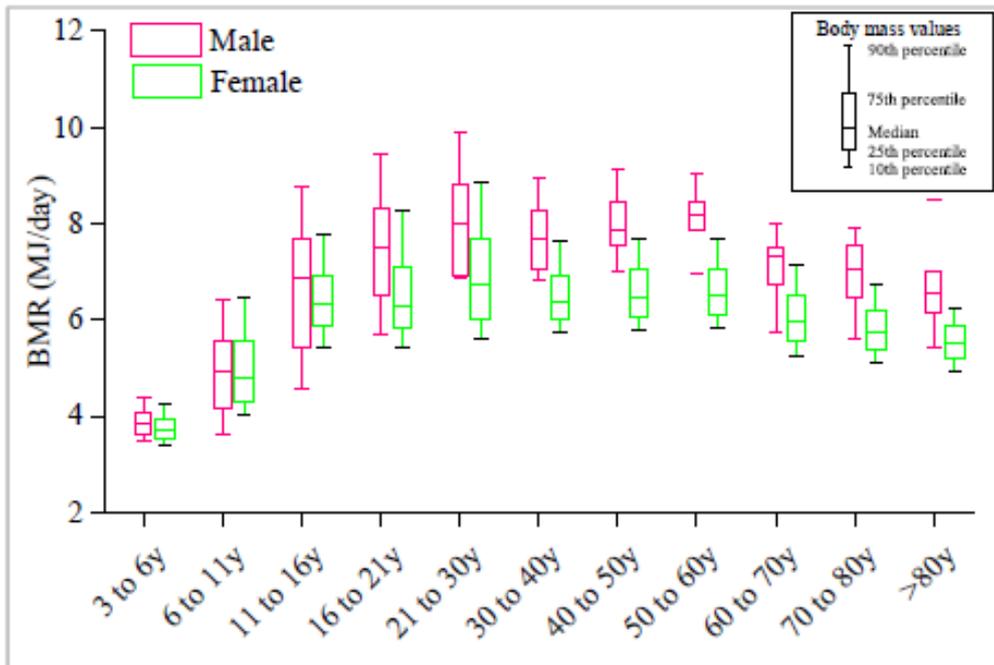


Figure 14 : Variance du taux métabolique de base (BMR) en fonction de l'âge, de la masse du corps et du genre, extrait de (Luo et al. 2018)

Sexe

Les réponses thermiques à des variations de températures environnantes, les mécanismes de régulation de la perte de chaleur et les réactions à la charge thermique interne pendant l'exercice diffèrent entre les hommes et les femmes et s'expliquent grâce à divers facteurs.

Les femmes disposent généralement d'un ratio de surface corporelle sur leur masse corporelle plus important, d'une quantité de graisse sous-cutanée plus élevée et d'une capacité d'exercice moindre (Kaciuba-Uscilko and Grucza, 2001). Il est souvent rapporté que les hommes présentent des taux de transpiration plus élevés que les femmes ; plusieurs facteurs, dont certains sont des effets indépendants du sexe et d'autres dus à des caractéristiques physiques confondantes, semblent y contribuer en fonction de la conception de l'étude. Les hommes ont une réactivité cholinergique et un taux de transpiration maximal supérieurs à ceux des femmes.

Cependant, lorsque l'on tient compte de ces différences dans le cadre d'études expérimentales, les différences entre les sexes dans la production de sueur dépendent de certaines combinaisons de conditions environnementales qui entraînent des besoins d'évaporation élevés pour l'équilibre thermique. La densité des glandes sudoripares est généralement plus élevée chez les femmes que chez les hommes (en raison notamment d'une surface corporelle plus faible). Par conséquent, les taux de transpiration plus faibles chez les femmes, soulignés par certaines études, résultent d'une production plus faible par glande. Par ailleurs, les taux de sudation observés chez les hommes, plus élevés que chez les femmes (par exemple dans les études transversales), peuvent généralement être attribués à une masse corporelle et à une production de chaleur métabolique plus importantes (intensités absolues d'exercice plus élevées), plutôt qu'au sexe en tant que tel (Baker, 2019).

Dans l'ensemble, même s'il apparaît que les femmes montrent une température centrale, une température cutanée, une fréquence cardiaque, une pression artérielle et des seuils de sudation plus élevés que les hommes (Havenith, 2005), en réponse à un stress thermique chaud, il semble que les femmes ne soient pas désavantagées sur le plan de la thermorégulation par rapport aux hommes pour la plupart des activités et des conditions environnementales typiquement rencontrées. En effet, elles parviennent à maintenir leur température corporelle centrale à des niveaux similaires à ceux des hommes grâce à une plus grande efficacité d'évaporation de la sueur. De plus, les fluctuations hormonales tout au long du cycle menstruel influencent la thermorégulation chez les femmes, créant ainsi des différences dans la température corporelle au repos et dans les réponses thermiques aux

variations de température en fonction de la phase du cycle (Kaciuba-Uscilko and Gruzca, 2001). La ménopause modifie également le point de consigne et de sensibilité pour la sudation (Havenith, 2005).

Morphologie

Les différences de taille et de masse corporelle entre les individus influencent la thermorégulation de deux manières : d'abord, en impactant le processus physique d'échange de chaleur (notamment l'isolation thermique et le rapport surface/masse corporelle) ; ensuite, en impactant l'énergie nécessaire au déplacement de la masse corporelle des individus. **La surface corporelle joue un rôle essentiel en déterminant la zone d'échange thermique pour la chaleur sèche (convective et radiative) ainsi que pour la chaleur évaporative, ce qui a un impact direct sur les réponses au stress thermique. En général, une plus grande surface corporelle est donc bénéfique dans ce contexte.**

D'autre part, la masse corporelle est un facteur important car elle détermine la charge métabolique, notamment lorsqu'un individu porte un poids, comme lors de la marche. Cela signifie que la masse corporelle est positivement corrélée à la production de chaleur. De plus, la masse corporelle joue un rôle dans la capacité de stockage de la chaleur corporelle, ce qui revêt une importance cruciale lors d'expositions passives à la chaleur. Par ailleurs, en cas d'obésité extrême, la fonction cardiaque est réduite, ce qui entraîne également une diminution de la tolérance à la chaleur (Havenith, 2005).

Influence de l'âge, sexe, taille et poids sur le métabolisme

Au niveau du métabolisme, (Harris and Benedict, 1918) ont construit des équations permettant de calculer le métabolisme de base en fonction de l'âge, du sexe, de la taille et du poids.

Pour les hommes :

$$M(W)=0,0484\times(66,4730+13,7516m+5,0033l-6,7550a)$$

Pour les femmes :

$$M(W)=0,0484\times(655,0955+9,5634m+1,8496l-4,6756a)$$

avec

a : Age (entre 21 et 70 ans) [*ans*]

m : Poids (entre 30 et 125 kg) [*kg*]

l : Taille (entre 151 et 200 cm) [*cm*]

Rythmes biologiques

Chez l'être humain, on distingue 3 grands rythmes biologiques dont les périodes sont plus ou moins longues :

- Les rythmes ultradiens, inférieurs à 24h, (exemple des cycles de sommeil paradoxal),
- Les rythmes circadiens, sur 24h (exemple des cycles éveil/sommeil),
- Les rythmes infradiens, supérieurs à 24h (exemple du cycle menstruel).

Les mécanismes de thermorégulation peuvent suivre des rythmes chronobiologiques qui font varier la valeur de consigne de la température centrale sur du long terme. En effet, dans un système circadien humain correctement réglé, on constate une variation de la température corporelle au cours du cycle circadien ; la température rectale varie de près de 1°C, elle atteint son pic en fin d'après-midi et son minimum vers la fin de la phase de sommeil (Aschoff, 1983). Elle est donc en général plus faible la nuit et plus élevée le jour. La variation circadienne de la température rectale est une conséquence des rythmes circadiens endogènes de la production et de la perte de chaleur. **Au cours de la nuit, les mécanismes de régulation sont principalement orientés vers la conservation de la chaleur, tandis que la journée, ils favorisent la perte de chaleur** (Krauchi and Wirz-Justice, 1994), Figure 15.

Le rythme circadien a un impact sur le niveau de production métabolique, la fréquence cardiaque et la répartition de la circulation sanguine entre le noyau et les extrémités périphériques (mains, pieds).

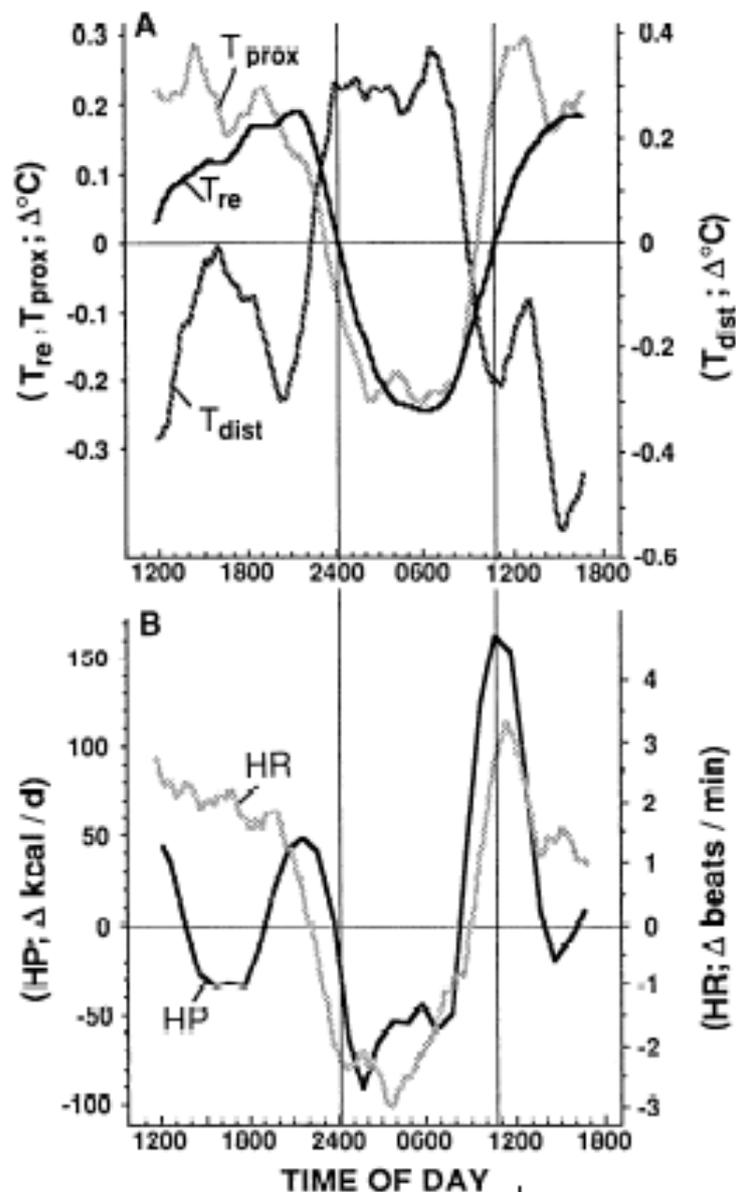


Fig. 4. A: smoothed circadian rhythm in rectal (T_{re}) and skin temperatures at distal regions (mean of hand and foot = T_{dist}) and proximal regions (mean of forehead, stomach, infraclavicular region, and thigh = T_{prox}). Crossing points through the weighted 24-h mean values of T_{re} , T_{dist} , and T_{prox} were at 2405, 2220, and 2310 h in evening and at 1045, 0855, and 0935 h in morning. B: smoothed circadian rhythm in heat production (HP) and heart rate (HR). Crossing points were at 2205 h for HR and at 2340 h for HP in the evening and at 0855 h for HR and 0815 h for HP in the morning. Data points are 3-h moving averages of deviations from weighted 24-h means ($n = 7$ subjects) from 1100 to 1730 h. Thin vertical lines indicate crossing points of T_{re} through weighted 24-h mean value. For statistics see RESULTS.

Figure 15 : Evolution de la température rectale, de la température cutanée du noyau (T_{prox}), de la température des extrémités périphériques (T_{dist}) ; de la fréquence cardiaque et de la production de chaleur en fonction de l'heure de la journée issu de (Krauchi and Wirz-Justice, 1994)

Chez les femmes, une variation faible mais constante de la température corporelle basale peut être observée tout au long du cycle menstruel. En règle générale, au cours de ces rythmes infradiens, la température corporelle est plus élevée d'environ 0,4°C pendant le début de la phase lutéale du cycle (après l'ovulation) que pendant le reste de la phase lutéale et la phase folliculaire (Refinetti and Menaker, 1992).

Enfin, il y a un effet saisonnier sur la chronobiologie. Les mécanismes de la thermorégulation et du sommeil évoluent en fonction des conditions climatiques saisonnières et de la durée d'accès à la lumière du jour. Pour les conditions climatiques, on parlera d'acclimatation (cf. paragraphe ci-après). En effet, (Tsuzuki et al., 2015) ont démontré que le niveau et l'accès à lumière du jour exercent une influence sur le sommeil.

La qualité du sommeil

Le sommeil est un élément fondamental pour la santé et le bien-être général. La qualité, la durée et la facilité d'endormissement du sommeil peuvent être influencées par divers facteurs environnementaux, notamment la température et l'humidité. Le sommeil est lié au rythme circadien et à la thermorégulation.

Une température ambiante confortable est cruciale pour un sommeil de bonne qualité. Des températures trop élevées ou trop basses peuvent perturber le sommeil (Okamoto-Mizuno and Mizuno, 2012). Les températures plus fraîches favorisent généralement l'endormissement le soir. Le corps baisse naturellement sa température interne pour initier le sommeil, donc une chambre fraîche peut aider ce processus. Dans l'étude (Okamoto-Mizuno and Mizuno, 2012), les auteurs suggèrent l'utilisation de courant d'air à des fins de rafraîchissement de la zone d'endormissement. Des études suggèrent que dormir dans un environnement légèrement frais peut favoriser un sommeil plus profond et plus réparateur. Des températures élevées sont souvent associées à des réveils fréquents durant la nuit, réduisant la qualité globale du sommeil.

Un niveau d'humidité trop élevé ou trop bas peut causer de l'inconfort, perturbant ainsi le sommeil. L'humidité élevée peut donner une sensation de lourdeur et de chaleur, tandis qu'une faible humidité peut assécher les voies respiratoires. Une humidité excessive ou insuffisante peut perturber le sommeil, en particulier lorsqu'elle aggrave des conditions comme la congestion nasale ou la sécheresse de la gorge. De plus, des niveaux d'humidité inappropriés peuvent exacerber des problèmes respiratoires tels que l'asthme ou les allergies, influençant négativement la qualité du sommeil.

La température idéale pour dormir est généralement considérée entre 16°C et 20°C, bien que cela puisse varier selon les individus. Un seuil de température maximal est préconisé de 24°C par l'OMS. Une humidité relative confortable pour le sommeil se situe entre 30% et 50%. Les conditions extrêmes de température et d'humidité peuvent perturber les cycles de sommeil, réduire la durée du sommeil profond et augmenter la latence d'endormissement.

Acclimatation

Une exposition prolongée à la chaleur engendre une modification de la capacité de réponse, physiologique ou comportementale (ventilation, isolation vestimentaire, consigne de température des systèmes, etc.), de l'individu au stress thermique, c'est l'acclimatation. Pour la réponse physiologique, **l'acclimatation permet de réduire la contrainte thermique du corps et d'améliorer le fonctionnement de la thermorégulation**. Elle se traduit par une amélioration des caractéristiques de la sudation qui montre un point de consigne plus bas et un gain plus élevé, à une meilleure répartition de la transpiration sur le corps et à une plus grande efficacité de la transpiration (rapport évaporation/production plus élevé) (Baker, 2019; Savourey et al., 2003), ainsi qu'à une meilleure stabilité circulatoire (réduction du débit sanguin périphérique et du seuil de déclenchement de la vasodilatation et une augmentation modérée de la fréquence cardiaque) (Armstrong and Kenney, 1993).

Maladies et dysfonctionnements de l'organisme

En cas de fièvre, une augmentation de la température corporelle est observée mais celle-ci est défendue par l'organisme. Le refroidissement du corps entraîne l'activation de mécanismes de conservation de la chaleur par l'organisme (frissons, vasoconstriction) afin de maintenir la température à ce niveau. L'hypertension est responsable de la réduction des performances circulatoires et entraîne une réduction des volumes d'éjection systolique (volume de sang que le cœur éjecte à chaque battement) et du débit cardiaque. A l'inverse, le niveau de sudation est accru chez les sujets hypertendus (Havenith, 2005). Il existe plusieurs conditions qui induisent une température centrale constamment haute ou basse : par exemple, certaines lésions ou tumeurs cérébrales, différentes pathologies endocriniennes, une addiction aux drogues.

Dans des environnements très chauds, la thermorégulation impacte les fonctions cardiovasculaires et l'homéostasie des fluides corporels de telle sorte que les changements induits dans les fonctions circulatoires ainsi que la déshydratation limitent les réponses thermorégulatrices (Baker, 2019; Blatteis, 1998).

Autres facteurs individuels

L'endurance et l'entraînement physique sont également associés à de meilleures performances des mécanismes de perte de chaleur (augmentation de la sudation, du débit sanguin et réduction de la température centrale et du rythme cardiaque pour les sujets pratiquant une activité physique en environnement chaud). (Bigouret, 2012) a étudié l'effet de variations de la température ambiante sur deux groupes de sujets construits à partir de leur degré de frilosité déclaré. Un individu frileux est défini comme quelqu'un qui est sensible au froid et qui se plaint de son environnement thermique plus que la majorité des individus. Les individus dits « frileux » présentent une activité microcirculatoire plus intense sur les joues avec une vasoconstriction plus forte au froid et une vasodilatation plus forte au chaud que l'autre groupe « non sensible au froid ».

3.2 Effet de la chaleur sur la santé et le confort, définition de seuils physiologiques

Comme présenté précédemment, l'être humain est homéotherme, ce que l'on peut représenter ou modéliser. Un modèle théorique est présenté par la Figure 16. Ce modèle présente de multiples thermo-effecteurs (sudation ou frisson) et de multiples gammes de températures. Une gamme de température centrale est associée à une régulation autonome limitée, c'est-à-dire la zone de thermoneutralité. Cette zone est également appelée zone nulle ou inter-seuil. La température corporelle peut fluctuer à l'intérieur de ces seuils (seuils de température corporelle bas et haut, TSB et TSH). Si l'on s'écarte à droite ou à gauche de ces seuils, c'est-à-dire que température corporelle s'écarte de la zone de thermoneutralité, les mécanismes de frissonnement et de sudation seront déclenchés.

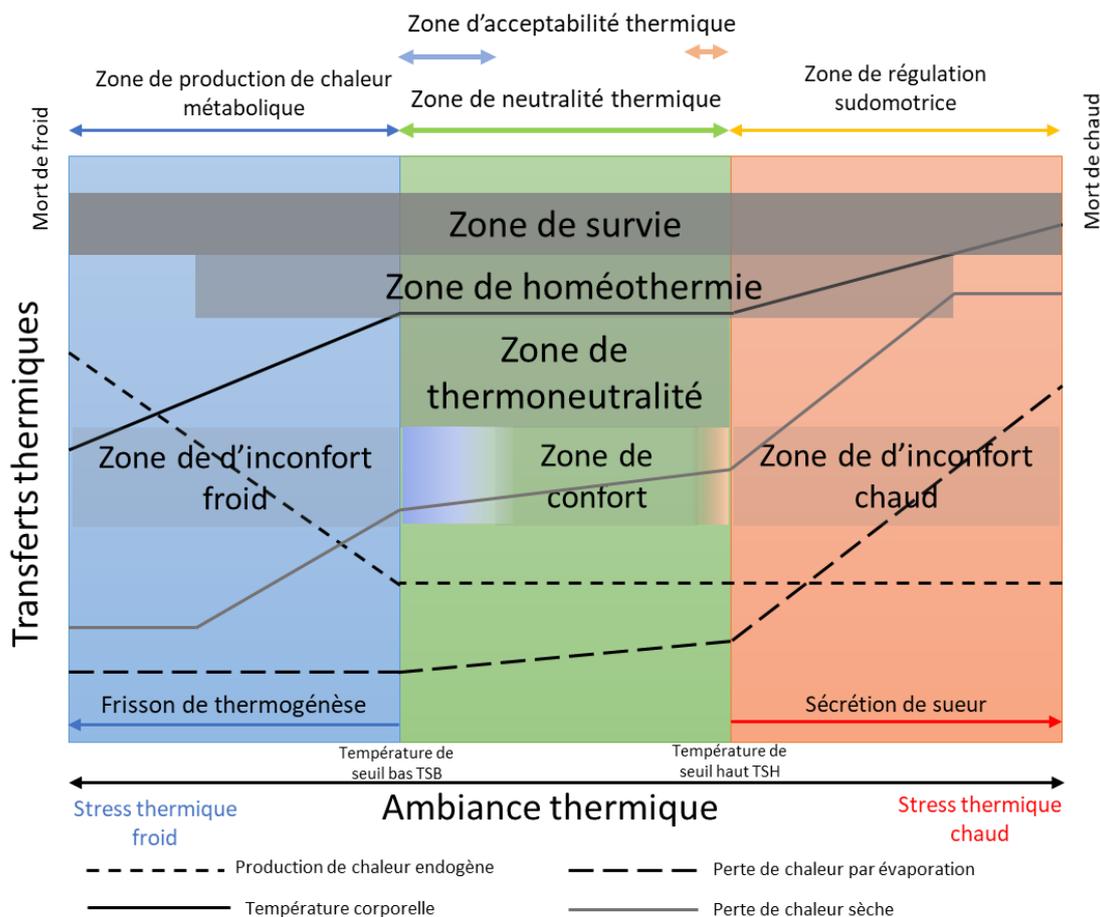


Figure 16 : Modèle théorique des actions thermorégulatrices à différentes températures ambiantes (version modifiée de (Parkinson et al., 2016))

Le schéma illustre les différentes zones de réactions physiologiques du corps humain en réponse à l'ambiance thermique, c'est-à-dire l'environnement de température dans lequel une personne se trouve. Voici une explication de chaque zone et des termes :

- Zone de production de chaleur métabolique : elle indique que le corps produit de la chaleur simplement par ses processus métaboliques normaux.
- Zone de neutralité thermique : c'est la plage de température ambiante où le corps ne doit pas dépenser d'énergie supplémentaire pour se refroidir ou se réchauffer afin de maintenir une température corporelle stable.
- Zone de régulation sudomotrice : le corps commence à réguler activement sa température par la transpiration (sudation) pour se refroidir lorsque l'environnement devient trop chaud.
- Zone de survie : elle représente les extrêmes de température que le corps peut tolérer et survit sans subir de dommages irréversibles.
- Zone d'homéothermie : le corps maintient une température interne stable malgré les variations de température extérieure.
- Zone de thermoneutralité : le corps est à l'aise, sans avoir besoin de générer ou de dissiper activement de la chaleur.
- Zone de confort : au sein de la zone de thermoneutralité, elle est considérée comme l'état le plus confortable pour le corps humain.
- Zones d'inconfort froid/chaud : elles indiquent où le corps commence à ressentir de l'inconfort en raison du froid ou de la chaleur et doit générer plus de chaleur (par le frisson) ou se refroidir davantage (par la sudation).
- Frisson de thermogenèse : c'est la réponse au froid où le corps génère de la chaleur par des contractions musculaires involontaires (frisson).
- Sécrétion de sueur : c'est la réponse à la chaleur où le corps se refroidit par l'évaporation de la sueur sur la peau.

Le schéma montre également les types de transferts thermiques (par exemple, perte de chaleur sèche et par évaporation) et les seuils de température bas (TSB) et haut (TSH) correspondant aux zones de stress thermique froid et chaud, respectivement. **Les températures de seuil, la température cutanée, les températures centrales et les niveaux d'intensité des mécanismes physiologiques sont des indicateurs physiologiques de l'inconfort d'été.**

L'identification des différentes zones (seuils) est un enjeu fondamental pour l'évaluation de l'impact des situations climatiques rencontrées par les usagers. Ces différents seuils peuvent se décliner sur plusieurs critères physiologiques objectifs tels que la température de peau, la température centrale ou encore le taux de sudation pour les ambiances thermiques chaudes, afin de caractériser l'impact des ambiances thermiques sur l'humain.

Définition de la zone TNZ (zone de confort)

La zone de thermoneutralité (TNZ) est définie par (Henderson and Halsey, 2022) comme la plage de température ambiante à laquelle :

- Le métabolisme est au repos (hypothèse de travail) ;
- Le débit sanguin est au minimum sans perte de chaleur sèche (convection, conduction et rayonnement) ;
- Le corps humain n'a pas besoin ni de suer ni de frissonner.

Cette TNZ est définie par des limites hautes et basses (cf. Figure 16). Dans (Havenith and Fiala, 2015; Parsons, 2009) les auteurs définissent la limite basse comme : « the maximum gradient ($T_{skin} - T_{air}$) over which the body can maintain its temperature without increase in heat production ». Pour une personne nue, cette limite est fixée à 4,7°C. Cela correspond à une température ambiante de 28,5°C. La définition de la zone de neutralité thermique a été reformulée comme Kingma et al. 2012 : « **la plage de température ambiante à laquelle la régulation de la température n'est obtenue que par le contrôle de perte de chaleur sensible (sèche), c'est-à-dire sans évolution dans la production de chaleur métabolique ou la perte de chaleur par évaporation. La zone thermoneutre (TNZ) sera donc différente lorsque l'isolation vestimentaire, la posture ou le métabolisme basal varient** ».

La zone de thermoneutralité dépend du sexe, de l'âge, du poids et de la taille, de la composition du corps humain (dont la graisse) et du niveau d'acclimatation. La connaissance de l'évolution de cette zone permet d'identifier l'état du corps humain vis-à-vis des sollicitations climatiques et donc l'identification de la zone de confort ou d'inconfort dans laquelle le corps humain se trouve. Dans ce cadre, l'utilisation d'un modèle thermo-physiologique bio-inspiré du corps prend tout son sens. (Gagge et al., 1967) **définissent comme confortable la plage de température moyenne de peau comprise entre 31.5 °C et 35.5 °C.**

3.4 Perception de l'environnement thermique

La capacité à percevoir l'environnement thermique représente une caractéristique sensorielle humaine essentielle, utilisée pour initier ou ajuster des comportements spécifiques visant à maintenir l'homéostasie et à assurer la survie. En ce sens, elle peut être comparable à l'un de nos 5 sens. **En complément des mécanismes de régulation autonomes décrits précédemment, la régulation de la température corporelle s'accomplit de manière consciente en recherchant des environnements thermiquement neutres et confortables (Hensel, 1981), ou en adoptant des comportements spécifiques.** Dans l'ensemble, ces stratégies comportementales s'appuient sur notre capacité à détecter les variations de température et d'humidité à la fois à l'intérieur de notre corps et à la surface de notre peau, ainsi que dans notre environnement externe (Filingeri, 2016).

Ce qui distingue la perception des grandeurs physiques de l'environnement de la perception du confort thermique, c'est que la première est une expérience rationnelle qui peut être décrite, par exemple pour la température, en termes de « froid » et de « chaud », et est axée sur une évaluation objective du monde rapportée à une échelle de référence individuelle. En revanche, le confort thermique relève d'une expérience émotionnelle qui peut être qualifiée en termes « d'agréable » et de « désagréable ». Comme le fait remarquer (McIntyre, 1981), la signification des termes tels que "agréable" et "confortable" n'est pas absolue, mais dépend de l'expérience individuelle et des attentes.

La perception de l'environnement est possible grâce aux sensations somatiques extéroceptives (somesthésie) fournies par le système nerveux cutané sensoriel. Celui-ci est composé de récepteurs spécifiques qui convertissent l'énergie associée au stimulus thermique en signaux bioélectriques transmis relayés au système nerveux central qui les interprète en une perception de l'environnement (Meilgaard et al., 2007). Les thermorécepteurs cutanés sont capables de détecter des variations de température de l'ordre de 0,01°C. Pour plus de détails sur les différentes étapes du processus de perception de stimuli thermiques, il est possible de se référer aux travaux de (Filingeri, 2016), par exemple.

La perception thermique permet à l'individu de réagir de deux manières :

- En mettant en place des comportements d'adaptation conscients par des mouvements spécifiques effectués grâce au cortex moteur :
 - o **Changement de posture** pour limiter ou augmenter les pertes de chaleur ;
 - o **Changement de tenue vestimentaire** pour modifier l'isolation entre le corps et l'environnement ;
 - o **Changement du niveau d'activité physique** pour modifier la production de chaleur ;
 - o **Changement de zone** pour aller dans un environnement moins extrême ou modification de l'environnement thermique en utilisant les possibilités du bâtiment (ouverture de fenêtre ou porte, ou régulation technologique par l'utilisation du chauffage ou de la climatisation) ;
- En exprimant verbalement la perception grâce à la verbalisation de la pensée obtenue grâce au lobe frontal et à l'aire de Broca (Musso et al., 2003).

L'expression d'une perception thermique peut avoir trois dimensions principales :

- Une dimension qualitative de l'état thermique de l'individu ou de l'environnement (chaud/froid),
- Une dimension quantitative (très chaud, un peu froid, etc.),
- Et une dimension hédonique relative à l'appréciation de l'état thermique (aspect agréable, confortable ou préférence thermique par exemple).

Pour évaluer ces différentes dimensions de la perception thermique ressentie, des échelles de réponse existent et permettent de qualifier et quantifier la sensation thermique déclarée, le confort thermique déclaré ainsi que d'autres aspects hédoniques relatifs à l'environnement.

La norme NF EN ISO 10551 établit des méthodes de mesure et de l'utilisation d'échelles de jugement pour l'évaluation et l'appréciation de l'environnement physique (AFNOR, 2019). Elle permet de préciser des aspects subjectifs de la perception de l'état thermique de l'individu, de l'environnement et du confort. Cette norme est essentielle pour définir les plages de confort. Sa mise en œuvre est relativement simple, mais l'interprétation des réponses peut s'avérer plus complexe.

Sensation thermique

Même si la sensation thermique n'a été définie pour le moment que comme l'étape précédant la perception consciente, une fois prises en compte les projections des différentes sensations et leur confrontation avec la mémoire de l'expérience et l'état physiologique et psychologique de l'individu, elle correspond ici au jugement thermo-sensoriel, c'est-à-dire la réponse verbale issue du traitement cognitif de la sensation.

L'échelle d'évaluation de la sensation thermique définie dans la norme est présentée dans le Tableau 5 ci-dessous après la question : « Comment vous sentez-vous maintenant ? »

Tableau 5 : Echelle pour l'évaluation de la sensation thermique (AFNOR, 2019)

Pôles	Degrés	Formulation des degrés
CHAUD	(+5)	Extrêmement chaud
	(+4)	Très chaud
	+3	Chaud
	+2	Modérément chaud
	+1	Légèrement chaud
INDIFFÉRENCIATION	0	Ni chaud, ni froid
FROID	-1	Légèrement froid
	-2	Modérément froid
	-3	Froid
	(-4)	Très froid
	(-5)	Extrêmement froid

La tendance centrale des jugements perceptifs obtenus en appliquant l'une des échelles ci-dessus (en forme continue) produit un vote moyen observé qui peut être comparé au vote moyen prévisible (indice PMV) déterminé selon l'ISO 7730, sur des degrés de +3 à -3 et décrit dans la suite de ce document.

Confort thermique

Il semble que le confort dépende de la totalité des commodités qui apportent du plaisir, créant une sensation agréable perçue par nos sens et notre esprit, pouvant même engendrer un certain plaisir (Candas, 2000). Le confort thermique est défini dans l'ASHRAE comme un état d'esprit qui exprime la satisfaction à l'égard de l'environnement thermique et qui est exprimé par l'évaluation subjective (ASHRAE Standard 55-2004, 2004).

L'échelle de jugement proposée dans la norme NF EN ISO 10551 est la suivante (Tableau 6) après la question « Trouvez-vous cela... ? »

Tableau 6 : Echelle pour l'évaluation de la sensation thermique (AFNOR, 2019)

Pôles	Degrés	Formulation des degrés
	0	Confortable
INCONFORT	1	Légèrement inconfortable
	2	Inconfortable
	3	Très inconfortable
	4	Extrêmement inconfortable

En rassemblant tous les avis qui indiquent l'inconfort, on calcule un pourcentage observé de personnes insatisfaites, lequel peut être comparé à un pourcentage prévu d'insatisfaction (indice PPD) déterminé conformément à la norme ISO 7730.

Préférence thermique

Enfin, une troisième question relative à la préférence thermique permet de réaliser l'estimation subjective des sensations et du confort. En effet, cette estimation est normalisée sur les combinaisons logiques des réponses aux questions posées présentées précédemment et sur cette dernière afin de pouvoir décider ou non du confort thermique. L'échelle de préférence thermique proposée dans la norme NF ISO 10551 est présentée dans le Tableau 7 ci-dessous en réponse à la consigne « Veuillez indiquer comment vous préféreriez être maintenant. »

Tableau 7 : Echelle pour l'évaluation de la préférence thermique (AFNOR, 2019)

Pôles	Degrés	Formulation des degrés	Equivalent pour une échelle à 3 degrés
PLUS CHAUD	+3	Beaucoup plus chaud	Plus chaud
	+2	Plus chaud	
	+1	Un peu plus chaud	
	0	Ni plus chaud ni plus froid (sans changement)	
PLUS FROID	-1	Un peu plus froid	Plus froid
	-2	Plus froid	
	-3	Beaucoup plus froid	

Les échelles de préférence sont employées dans les évaluations car elles permettent d'obtenir des jugements de "valeur" de la part des sujets. Lorsqu'un sujet évaluant une sensation indique qu'il a "légèrement chaud", cela ne permet de savoir s'il préfère ressentir cette chaleur ou non. **Les échelles de préférence comparent comment le sujet se sent à la manière dont il aimerait se sentir.** L'option "sans changement" indique un certain niveau d'acceptabilité, de préférence et de satisfaction (AFNOR, 2019). L'idéal est atteint lorsque le sujet n'a pas de préférence particulière. **Cependant, le confort peut être atteint même si l'état n'est pas optimal.** Il peut également être difficile d'atteindre le confort lorsque les préférences de l'individu le dirigent vers le risque d'inconfort. En principe, le confort est atteint dès lors que le sujet ne se déclare pas en situation inconfortable (Candas, 2000).

Acceptabilité

D'autres types d'échelles peuvent également être utiles en fonction des objectifs de l'expérience. Par exemple, si l'on souhaite mesurer un pourcentage de satisfaction, une question fermée (où le sujet doit choisir entre oui ou non) telle que « Êtes-vous satisfait(e) ? » peut fournir une mesure directe. L'évaluation du plaisir peut également être d'intérêt dans certains cas. L'évaluation de l'acceptabilité personnelle est aussi intéressante puisqu'elle requiert un jugement sophistiqué basé sur ce qu'un sujet ressent comme acceptable dans un contexte particulier.

Plusieurs échelles d'expression de l'acceptabilité personnelle sont présentées dans la norme, un exemple est donné dans le Tableau 8 en réponse à la question : « Comment jugez-vous cet environnement (climat local) de votre point de vue personnel ? »

Tableau 8 : Echelle d'expression de l'acceptabilité personnelle (AFNOR, 2019)

Tout à fait acceptable	Tout juste acceptable	Tout juste inacceptable	Tout à fait inacceptable
------------------------	-----------------------	-------------------------	--------------------------

Cette approche permet de recueillir des jugements plus nuancés qui peuvent montrer une relation linéaire avec le "pourcentage observé d'insatisfaits", tel qu'il est défini après l'échelle de jugements évaluatifs du niveau de confort.

3.5 Etudes expérimentales du confort thermique en lien avec les paramètres biophysiques

De nombreuses études se sont intéressées à la qualification de la perception du confort en se basant sur les réponses déclaratives des occupants. L'introduction de la mesure physiologique pour objectiver les résultats est relativement récente. (Persiani et al., 2021) ont présenté dans leur revue de la littérature l'intérêt des signaux

physiologiques pour évaluer le confort intérieur dans le secteur du bâtiment. **Les auteurs soulignent l'importance de l'interaction entre les facteurs environnementaux intérieurs et les signaux physiologiques, en identifiant la réponse humaine aux facteurs de stress environnementaux.**

La revue de littérature effectuée par (Mansi et al., 2021) présente les indicateurs physiologiques en lien avec le confort thermique, et décrit les différents moyens de mesure existants, notamment pour la mesure de la fréquence cardiaque, les températures de peau ou l'activité sudorale. Elle montre également que les études du confort utilisant les mesures physiologiques réalisées *in situ* ou permettant de faire les mesures sur des sujets libres de leurs mouvements comme en situation réelle sont quasiment inexistantes.

De nombreuses études ont étudié les variations de la température moyenne de la peau en réponse à des environnements thermiques variés. Par exemple, (Lai et al., 2017) positionne des capteurs thermiques cutanés pour mesurer la température de peau en 10 emplacements.

Le laboratoire PULSE du CSTB met en œuvre régulièrement des expérimentations *in situ* pour mesurer le confort thermique dans des bâtiments d'habitation ou tertiaires, dans des espaces extérieurs et dans des conditions thermiques chaudes ou froides. Des mesures physiologiques sont effectuées en complément de mesures déclaratives et environnementales, en utilisant des thermoboutons pour la mesure des températures centrale et cutanée, et des montres connectées pour la mesure de la fréquence cardiaque (Haese et al., 2023).

(Yao et al., 2007) ont analysé les résultats obtenus par 14 méthodes de calcul de la température de peau moyenne à partir de mesures locales dans des environnements thermiques allant de 21 à 29°C. Leurs résultats montrent que le modèle de Burton (3 points de mesure) permet d'obtenir des résultats similaires pour la température cutanée moyenne en comparaison à d'autres méthodes utilisant plus de points de mesure (Colin/Houdas (10 points de mesure), Hardy/DuBois (12 points de mesure), Stolwijk/Hardy (10 points de mesure non pondérés), et Mitchell/Wyndham (15 points de mesure non pondérés)). Le modèle de Burton est, en raison de sa simplicité et de sa commodité, tout à fait adapté aux mesures *in situ*, pendant des périodes de mesure relativement longues. En effet, cela permet de réduire le nombre de capteurs et de les positionner sur des zones compatibles avec la vie réelle (torse, avant-bras et tibia). Pour calculer la température moyenne de peau (T_{sk}), des coefficients pondérateurs sont appliqués tels que :

$$T_{sk} = 0,14 \times T_{avant-bras} + 0,5 \times T_{torse} + 0,36 \times T_{tibia} \text{ (Eq. 2)}$$

Dans un environnement froid ou frais (21°C/24°C), les sensations ressenties au niveau des différentes parties du corps présentent une plus grande variabilité que dans un environnement neutre ou chaud (26°C/29°C). De plus, il semble que **les différences de température de peau entre les différentes zones corporelles se réduisent à mesure que la température de l'environnement augmente**, dans une plage allant de 21°C à 29°C (Yao et al., 2007).

Certaines études répertoriées dans (Mccraty and Shaffer, 2015) ont révélé que la fréquence cardiaque est généralement plus élevée dans un environnement chaud que dans un environnement froid. Le rapport basse fréquence sur haute fréquence (LF/HF), qui représente l'équilibre entre les activités parasympathiques et sympathiques, augmente lorsque la sensation de confort thermique diminue et tend vers des valeurs faibles lorsque les sujets ressentent une sensation neutre. La fréquence cardiaque est également un indicateur du niveau d'activité et permet une estimation plus précise du métabolisme basal et instantané des individus.

(Gagge et al., 1969) ont mené une série d'expériences pour décrire la réponse physiologique (métabolisme, perte de chaleur par évaporation, température de peau moyenne, températures tympanique et rectale) à différentes températures ambiantes (entre 10 et 30°C). Leurs résultats expérimentaux ont montré que l'inconfort dû à la chaleur est principalement lié à la transpiration de la peau. **Les variations de l'inconfort dû à la chaleur ne sont pas liées aux variations de la température cutanée ou de la température de l'air ambiant, mais l'inconfort dû à la chaleur présente une corrélation multiple élevée avec la température rectale et la température cutanée.** La sensation thermique est très corrélée à la température de la peau ou de l'air ambiant, tandis qu'elle est faiblement corrélée à la transpiration ou à la conductance de la peau, et n'est pas liée au taux métabolique ou à la température centrale.

A la fin de ce chapitre, le protocole de mesure choisi dans le projet RENOPTIM est présenté.

3.6 Modèles de confort thermique et de stress thermique

Plusieurs indices et modèles ont été développés pour estimer le confort thermique et le risque sanitaire dans une ambiance thermique donnée. Cette section présente un panorama de certains indices et modèles, leurs entrées, leurs sorties et leurs niveaux de simplicité.

Indices de confort thermique

Le PMV/PPD

L'indice PMV (Predicted Mean Vote) a été développé par Fanger en 1970 (Fanger, 1970). Il est basé sur l'équation de bilan thermique de corps humain et considère que la neutralité thermique est obtenue à l'équilibre, lorsque la chaleur produite par le corps humain (une personne moyenne) est égale à la chaleur dissipée vers l'environnement sous forme sensible et latente.

L'ensemble des termes de l'équation de bilan thermique explicitée dans la section précédente sont calculés en fonction des conditions environnementales à l'intérieur du bâtiment ainsi que deux paramètres liés au métabolisme et la vêtue de l'occupant. Cela conduit à 6 variables qui sont présentées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Paramètres influant sur le confort thermique

Variables environnementales : conditions à l'intérieur du bâtiment	Température de l'air	°C
	Température radiante	°C
	Humidité relative	%
	Vitesse de l'air	m/s
Variables liées à la personne	Métabolisme	Met
	Résistance thermique des vêtements	clo

Le PMV est la calibration empirique sur plus de 3000 étudiants de l'équation du bilan thermique afin d'exprimer ce bilan en terme de sensation thermique sur l'échelle de l'ASHRAE (ASHRAE Standard 55-2004, 2004) (Tableau 10). Elle varie de « -3 » pour « Très froid » à « +3 » pour très chaud.

Tableau 10 : Echelle ASHRAE de la sensation thermique

PMV	Echelle ASHRAE
+3	Très chaud
+2	Chaud
+1	Légèrement chaud
0	Neutre
-1	Légèrement froid
-2	Froid
-3	Très froid

Afin de savoir si les occupants sont en situation de confort thermique, Fanger a proposé l'indice PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) qui correspond au pourcentage des sujets qui sont insatisfaits dans un environnement thermique donné. Il a ensuite élaboré une relation entre les indices PMV et PPD :

$$PPD = 100 - 95 \times \exp [-(0,03353 \times PMV^4 + 0,2179 \times PMV^2)]$$

La Figure 17 permet de prédire le PPD en fonction du PMV. Cette figure montre que le PPD n'est jamais nul même pour une sensation thermique neutre (PMV=0).

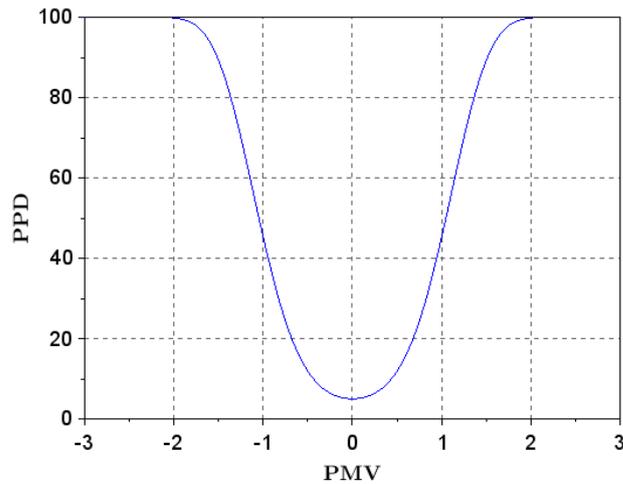


Figure 17 - L'indice PPD en fonction de l'indice PMV

Les indices PMV/PPD ont été développés dans un contexte des pièces climatisées où les conditions environnementales sont bien maîtrisées. Ces indices sont actuellement utilisés dans la norme (ISO 7730, 1984) (ISO 7730, 1984b) et la norme ASHRAE Standard 55 (ASHRAE Standard 55-2004, 2004) pour classifier les environnements intérieurs en trois catégories. La catégorie I est la plus confortable et la catégorie III est la moins confortable (Tableau 11).

Tableau 11 : Classification des ambiances thermiques selon les indices PMV/PPD

Catégorie	PMV	PPD [%]
A (I)	$-0,2 < PMV < 0,2$	< 6
B (II)	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 10
C (III)	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 10

Les indices PMV et PPD sont basés sur des expériences effectuées dans des laboratoires avec des conditions uniformes de vêture, du niveau d'activité et de la température de l'air. De plus, les sujets n'avaient pas le moyen d'influencer voire de modifier l'ambiance thermique dans laquelle ils se trouvaient et n'avaient pas le loisir de faire varier leur vêture par exemple. **Or, il est légitime de se poser la question de savoir si les classes de confort thermique définies précédemment sont en adéquation avec la sensation thermique dans des circonstances où l'usager peut interagir fortement avec son environnement voire s'adapter à celui-ci.**

Pour répondre à ces questions, plusieurs études expérimentales ont été menées. La sensation thermique des occupants dans des environnements intérieurs contrôlés a été mesurée. Arens et al. (Arens et al., 2010) ont analysé trois bases de données issues de 3 expériences. La première base de données nommée ASHRAE RP 884 contient les résultats d'enquêtes réalisées avec des occupants de 45 bâtiments (bureaux climatisés) situés en Australie et au Canada et ceci aussi bien en hiver qu'en été. La deuxième base de données a été complétée à l'aide d'enquêtes réalisées auprès d'occupants de 26 bâtiments de bureaux en Europe sur une année entière. La troisième base de données provient d'enquêtes menées auprès de 38 occupants d'un bâtiment neuf équipé d'une ventilation naturelle. **Arens et al. ont conclu que, dans ces conditions, la sensation thermique n'est pas toujours en adéquation avec les classes de confort thermique définies dans les normes ISO 7730 (ISO 7730, 1984b) ou ASHRAE Standard 55 (ASHRAE Standard 55-2004, 2004) par exemple.**

Le confort adaptatif

Une analyse de la précision du PMV-PPD sur la ASHRAE Global Thermal Comfort Database II (107583 échantillons) a été réalisée dans les travaux de (Cheung et al., 2019). Des différences importantes (« Poor performance ») ont été identifiées par les auteurs entre les prédictions du confort thermique grâce aux indices PMV/PPD et les mesures exprimées par les occupants, plus particulièrement quand il s'agit des bâtiments non climatisés. Dans ce contexte,

une nouvelle approche a été développée, basée sur la capacité du corps humain à s'adapter aux conditions environnementales et sur l'influence de l'historique du confort thermique à court terme ou à long terme sur le jugement de l'environnement thermique intérieur. Cette approche est appelée « confort adaptatif ».

Ce modèle a été développé par de Dear et Brager (de Dear et al., n.d.) en analysant les résultats d'une enquête effectuée auprès d'occupants de bâtiments de différents pays situés dans différents continents. Les résultats des enquêtes concernent essentiellement la sensation thermique, la température neutre et la température préférée pour un environnement thermique donné. De Dear et Brager ont collecté 21,000 données brutes pour plusieurs zones situées en Angleterre, au Pays de Galles, en Thaïlande, en Californie, au Canada, en Australie, au Pakistan, en Grèce, à Singapour et dans l'Etat du Michigan (USA). Ces données renseignent sur la sensation thermique, l'acceptabilité de l'environnement (agréable ou désagréable), la résistance thermique de la vêtue, le métabolisme des sujets, les variables environnementales (température d'air et de globe noir, vitesse et turbulence de l'air et humidité relative) ainsi que sur les données météorologiques.

Cette grande quantité de données a permis d'effectuer une analyse statistique qui a abouti à une corrélation entre la température intérieure opérative préférée et la température extérieure autour du bâtiment. Cette corrélation s'exprime par :

$$T_c = a \times T_{ext,ref} + b \quad (1)$$

avec :

T_c : Température intérieure préférée [°C]

$T_{ext,ref}$: Température extérieure de référence [°C]

a, b : Coefficients de corrélation

Afin de prendre en compte l'aspect « adaptatif », la $T_{ext,ref}$ est calculée en fonction de l'historique de la température extérieure. Deux approches peuvent être appliquées : la température moyenne mensuelle et la température moyenne glissante. Dans un premier temps, la température moyenne mensuelle a été utilisée puisqu'elle est basée sur un historique de la température de l'air extérieur. Cependant, Nicol et Humphreys (Nicol and Humphreys, 2002) ont proposé une équation de la température moyenne glissante, qui est une moyenne exponentielle pondérée. Cette équation s'exprime par :

$$\theta_{rm}(d) = (1 - \alpha)(\theta_{ed-1} + \alpha \times \theta_{ed-2}^2 + \dots + \alpha^{n-1} \times \theta_{ed-n}^n)$$

avec :

α : Coefficient compris entre 0 et 1

θ_{ed-i} : Température moyenne journalière du i^e jour précédant le jour d

Dans la norme européenne EN 15251 et sa révision EN16798, l'approche adaptative est appliquée en utilisant les équations de la température moyenne extérieure glissante sur 7 jours et de la température opérative intérieure préférées suivantes :

$$\theta_{rm}(d) = \frac{\theta_{ed-1} + 0,8 \times \theta_{ed-2} + 0,6 \times \theta_{ed-3} + 0,5 \times \theta_{ed-4} + 0,4 \times \theta_{ed-5} + 0,3 \times \theta_{ed-6} + 0,2 \times \theta_{ed-7}}{3,8}$$

$$T_c = 0,33 \times \theta_{rm} + 18,8$$

Cette approche est appliquée dans les cas des ambiances intérieures non climatisées. Les ambiances intérieures sont classifiées selon cette méthode en 3 classes comme l'indiquent le Tableau 12 et la Figure 18. D'après la norme, la classe I est utilisée pour les bâtiments accueillant des personnes vulnérables, la classe II est utilisée pour les bâtiments neufs et la classe III pour les bâtiments existants, dans lesquelles les exigences de confort par les occupants sont moins élevées que dans les bâtiments neufs.

Tableau 12 : Classification des ambiances thermiques intérieures selon le confort adaptatif (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2019)

Classe	Limite basse	Limite haute
I	$T_c - 3$	$T_c + 2$
II	$T_c - 4$	$T_c + 3$
III	$T_c - 5$	$T_c + 4$

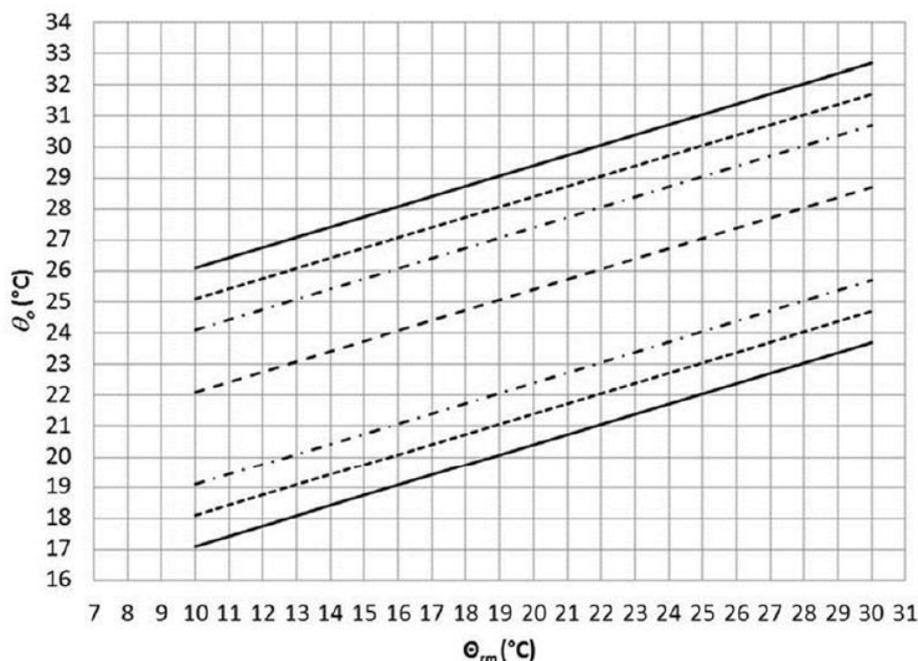


Figure 18 : Température intérieure préférée en fonction de la température moyenne extérieure glissante et 3 classes de confort thermique selon le confort adaptatif

Les seuils de confort adaptatif peuvent être réhaussés si la vitesse d'air est élevée. **La présence d'un brasseur d'air plafonnier dans une pièce équivaut à une vitesse d'air moyenne à l'échelle de la pièce d'environ 0.5 m/s, ce qui permet de relever les seuils de confort d'environ 2°C d'après la Figure 19, alors que l'utilisation directe de ventilateurs proches du corps peut atteindre une vitesse de 1.5 m/s conduisant à une relève du seuil de confort de +3.5°C.**

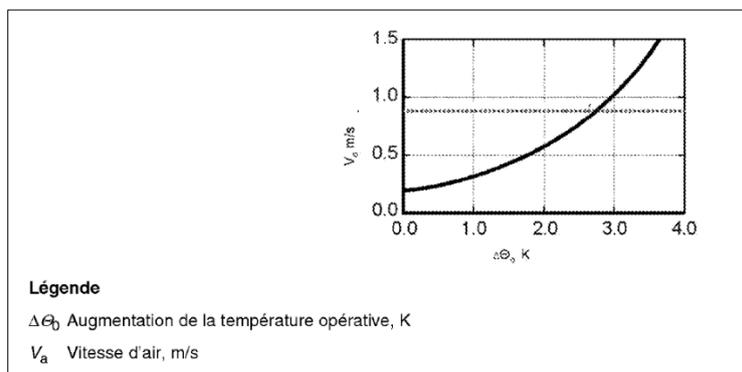


Figure 19 : Augmentation de la température opérative de confort selon la vitesse d'air, issu de la norme EN 15251

Cependant, au-delà d'une combinaison de température et humidité, il peut être dangereux d'utiliser des ventilateurs. **La limitation de la convection intervient lorsque la convection ne permet plus de compenser les échanges thermiques (convection et évapotranspiration). Le corps humain stocke alors de l'énergie, ce qui induit une augmentation de la température centrale et des risques d'hyperthermie. Ce risque est modulé suivant l'acclimatation (3.1.2).** La Figure 20 est issue des travaux de (Jay et al., 2015) qui propose des limites d'applications.

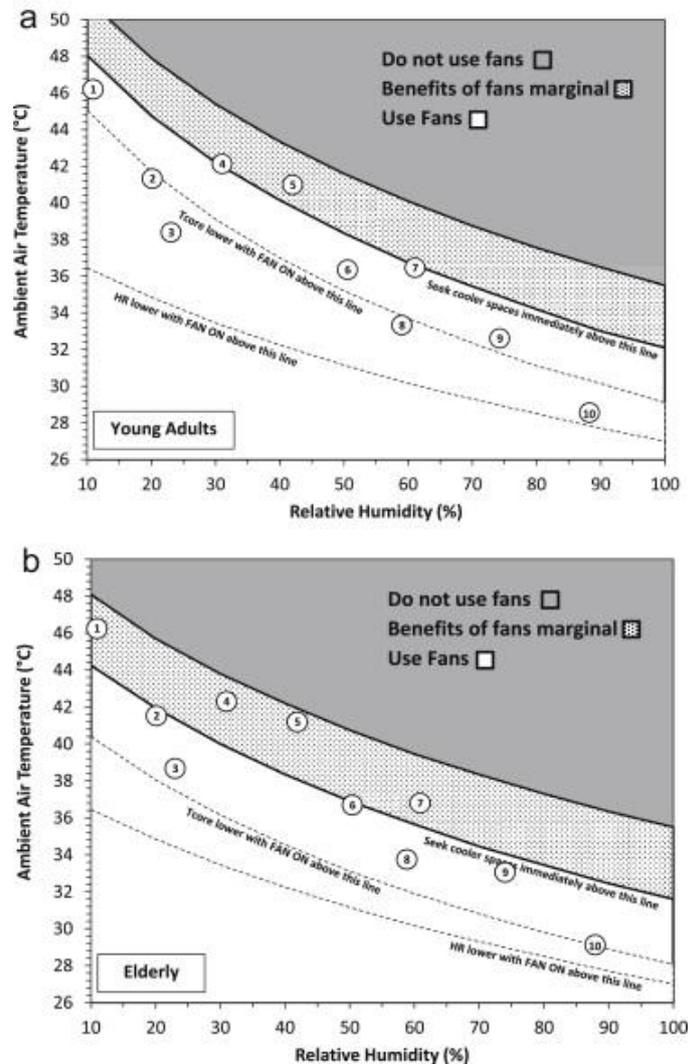


Figure 20 - Précautions d'usage des ventilateurs en périodes de fortes chaleurs proposées par (Jay et al., 2015)

Enfin, la norme EN15251 sur le confort adaptatif est applicable uniquement pour des environnements avec une température extérieure journalière moyenne maximale de 30°C, par manque de données empiriques durant de fortes températures en Europe. Des travaux récents de Nicols et al. ont exploré les limites du confort adaptatif dans une variété de climats et cultures (Japon, Pakistan, Népal, Europe). On observe par exemple qu'au Pakistan, des personnes se sont déclarées confortables pour des températures extérieures et intérieures d'environ 35°C (Figure 21).

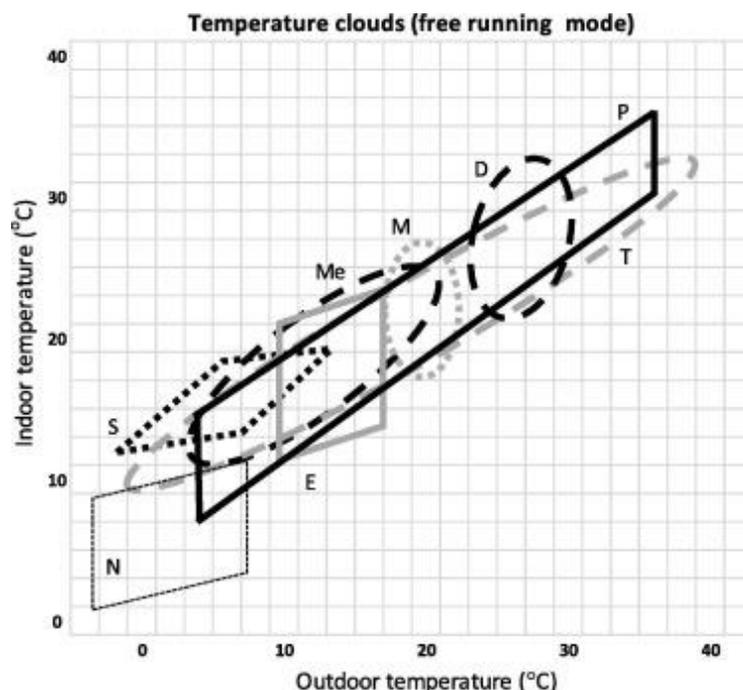


Figure 21 – Nuages de confort adaptatif par pays. N : Népal, S : Shangai (Chine), E : England, summer, Me Melbourne (Australie), M Moscou (Russie), D: Darwin (Australie), P : Pakistan, T : Tokyo, (Japon)

L'indicateur réglementaire Degré Heure (DH) de la réglementation thermique RE2020

L'indicateur Degré-Heure (DH) est le nouvel indice de la réglementation environnementale française RE2020. Il est basé sur l'approche du confort adaptatif. La limite haute de confort utilisée est celle de la catégorie I, modulée à un maximum de 28°C la journée entre la limite de confort adaptatif et 28°C, avec une température maximale de confort nocturne fixe de 26°C. L'indicateur est donc calculé avec des seuils plus bas que la catégorie I et donc l'inconfort calculé est assez précautionneux. De la même façon que pour les seuils limites du confort adaptatif, une augmentation de la vitesse d'air (pour simuler la présence d'un brasseur d'air) permet d'augmenter la température seuil d'environ 2°C.

Au-delà de cette température limite, sont quantifiés des degrés heures (DH) d'inconfort. L'environnement intérieur est considéré confortable si $DH < 350 \text{ °C.h}$, il est considéré comme acceptable si $350 \text{ °C.h} < DH < 1250 \text{ °C.h}$ et la conception n'est pas acceptable si $DH > 1250 \text{ °C.h}$.

D'après (Attia et al., 2023), comparée aux autres réglementations en Europe, la réglementation française est la plus avant-gardiste car elle est basée sur la norme de confort adaptatif et propose un seuil limite spécifique pour la nuit.

Cependant, alors que cet indicateur permet d'évaluer le confort thermique, il reste limité afin d'évaluer un potentiel stress thermique, et ce pour plusieurs raisons :

- Les mesures empiriques de la norme sont basées sur des mesures européennes, des mesures spécifiques à la population française seraient plus adaptées ;
- Les seuils de confort journaliers sont bornés à 28°C (plus bas que la catégorie I de la norme européenne), qui est une température de confort mais ne renseigne pas sur le risque et donc le danger pour les occupants ;
- Les DH sont comptabilisés en tant que somme de °C.h de dépassement de la température limite, mais ne donne pas d'information ni sur la température journalière maximum atteinte, ni sur la température nocturne maximale atteinte, ni sur une durée d'exposition à la chaleur en heures consécutives. C'est pourtant la combinaison de ces paramètres qui permettra de proposer une limite de risque à ne pas dépasser, à définir avec des professionnels de santé.

Le diagramme de Givoni

Le diagramme de Givoni peut être utilisé pour estimer le confort thermique des occupants en connaissant la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air. Cette méthode consiste à déterminer des zones de confort thermique dans le diagramme psychrométrique et vérifier si les conditions environnementales étudiées appartiennent à ces zones de confort (Figure 22).

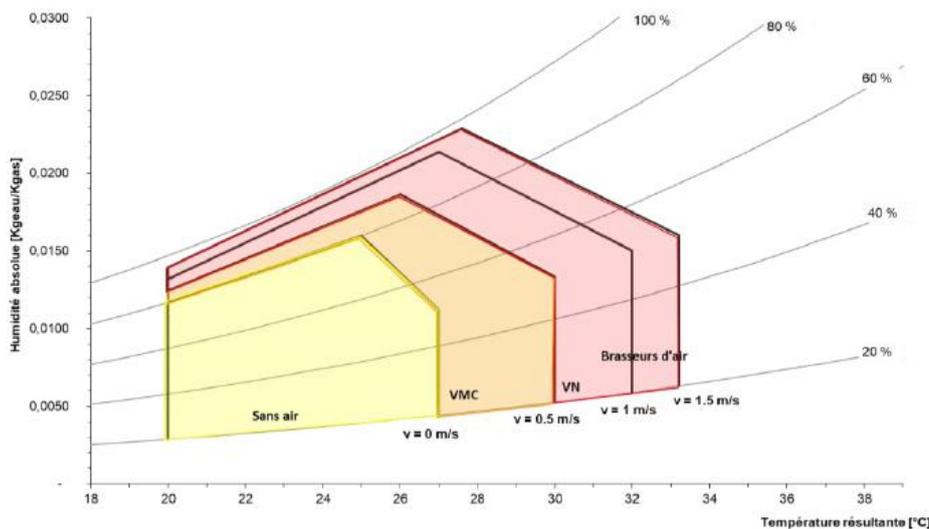


Figure 22 : Diagramme de Givoni et zones de confort thermique (Lauzet, 2019)

Ce diagramme a été utilisé pour déterminer le nombre des heures d'inconfort thermique. Cette méthode a été largement utilisé pour estimer le confort thermique dans les zones tropicales (Yézouma et al., 1998).

La température effective (ET*), PMV*, SET

La Température Effective (ET*) est un indice basé sur le modèle à deux nœuds de Gagge (Gagge et al., 1971). Il s'agit d'un modèle de thermorégulation dynamique simplifié qui calcule les échanges thermiques dans le corps et entre le corps et l'environnement en fonction des 4 variables environnementales, du niveau de l'activité et de la résistance thermique de la vêtue. Les deux nœuds du modèle sont deux cylindres concentriques qui représentent le noyau et la peau.

L'ET* représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50% d'humidité relative et dans laquelle un sujet échange la même quantité de chaleur sensible et latente que dans l'environnement réel. L'ET* prend en compte la mouillure cutanée, ce qui rend cet indice plus adapté pour l'évaluation de l'inconfort chaud. Ensuite, l'ET* a été utilisée à la place de la température opérative dans le modèle de Fanger pour calculer un nouvel indice appelé PMV*.

La Température Effective Standard (SET) est la forme standardisée de l'ET*. Elle représente la température sèche équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative dans laquelle un sujet, tout en portant des vêtements normalisés pour l'activité concernée, aurait la même humidité de la peau et le même échange de chaleur à la surface de la peau que dans l'environnement étudié. L'échelle de SET selon l'ASHRAE est donnée dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Echelle de la température effective standard (SET)

SET (°C)	Sensation thermique	Astreint thermique
> 37,5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de la thermorégulation
34,5 – 37,5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30,0 – 34,5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25,6 – 30,0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22,2 – 25,6	Confortable et acceptable	Neutralité
17,5 – 22,2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14,5 – 17,5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10,0 – 14,5	Très froid	Très inacceptable

Deux autres indices sont proposés par l'ASHRAE basés sur le modèle de Gagge et similaires aux indices PMV/PPD : the SENSation Thermique TSENS et l'inconfort thermique DISC. Les échelles de ces deux indices sont données dans le Tableau 14.

Tableau 14 - Echelle des indices TSENS et DISC

Valeur	TSENS	DISC
+5	Intolérablement chaud	Intolérable
+4	Très chaud	Tolérance limitée
+3	Chaud	Très inconfortable
+2	Légèrement chaud	Inconfortable
+1	Tiède	Légèrement inconfortable mais acceptable
0	Neutre	Confortable
-1	Frais	-
-2	Légèrement froid	-
-3	Froid	-
-4	Très froid	-
-5	Intolérablement froid	-

Indices de stress thermique

Le rôle principal des mécanismes physiologiques est de maintenir la température du corps humain à un niveau constant dans une large gamme de température d'humidité et de vent ambiants afin d'assurer le bon fonctionnement des organes internes. Cependant, des conditions thermiques extrêmes peuvent entraîner des stress thermiques excessifs conduisant à des défaillances de ces mécanismes et aboutissant à des pathologies comme l'hyperthermie, la déshydratation ou le coup de chaleur. Ces risques peuvent augmenter après une longue exposition à un stress thermique. Cette section traite des différents indices de stress thermique et leurs domaines d'utilisation.

Le lecteur trouvera en Annexe I une présentation plus détaillée de ces indices, ainsi que différentes classes d'ambiance thermique qui permettent une première approche pour évaluer le risque.

WBGT

Le Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) a été développé dans les années 1957 par l'Organisation mondiale de la santé (OMS)(Budd, 2008). Il est actuellement adopté par la norme internationale ISO 7243 (ISO 7243, 2020) pour déterminer l'effet de la température de l'air, de l'humidité relative, de la vitesse de l'air et de la température radiante sur la santé du corps humain. C'est un indice de stress thermique largement utilisé dans les environnements de travail. Il combine trois mesures : la température humide (wet bulb temperature), la température du globe (globe temperature) et la température de l'air ambiant. La température humide est mesurée à l'aide d'un thermomètre à bulbe mouillé, la température du globe est mesurée à l'aide d'un thermomètre à globe noir et la température de l'air ambiant est mesurée à l'aide d'un thermomètre sec. Ces mesures sont ensuite combinées selon une formule spécifique pour obtenir le WBGT. Les données empiriques utilisées pour construire le WBGT ont été obtenues à partir d'études impliquant des individus exposés à différentes conditions de chaleur et d'humidité, notamment dans des environnements de travail, des laboratoires ou des simulations contrôlées. Ces études ont permis de recueillir des données sur les réponses physiologiques, la transpiration, les températures de surface et les sensations thermiques des individus.

Le WBGT est principalement adapté aux environnements extérieurs de travail, car les données empiriques sont basées sur une population de militaires. Ainsi, il est difficile d'extrapoler le WBGT pour évaluer le risque sanitaire dans des environnements résidentiels intérieurs pour différentes typologies d'individus.

Heat Stress Index

L'indice de stress thermique a été développé en 1955 (Belding et Hatch) par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) aux États-Unis. Il combine plusieurs paramètres, y compris la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Les données mesurées sont utilisées dans une formule spécifique pour calculer l'indice de stress thermique, qui est ensuite classé en différentes catégories pour évaluer le niveau de stress thermique. L'indice de stress thermique fournit une estimation du niveau de stress thermique ressenti par le corps humain en fonction de ces paramètres. Il peut être utilisé dans des environnements de travail pour évaluer les risques associés à la chaleur excessive et pour guider les mesures de prévention et de protection des travailleurs. Cependant, il est important de noter que l'indice de stress thermique du NIOSH est principalement destiné à être utilisé dans des environnements de travail industriels. Il ne tient pas compte de facteurs individuels tels que l'âge, la condition physique ou les vêtements portés.

Humidex

L'humidex a été développé en 1979 par des scientifiques canadiens pour représenter la perception humaine de la chaleur en fonction de la température de l'air et de l'humidité relative, en particulier dans conditions chaudes et humides. Il est basé sur des calculs empiriques qui prennent en compte la température de l'air et l'humidité relative pour estimer la température ressentie par le corps humain. L'humidex tient compte de l'effet de l'humidité sur la capacité du corps à dissiper la chaleur par la transpiration. Cependant, il est important de noter que l'humidex ne prend pas en compte d'autres facteurs tels que le rayonnement solaire direct, la vitesse du vent, l'activité physique ou la durée d'exposition, qui sont des éléments importants dans l'évaluation du stress thermique.

Lorsque les conditions de chaleur et d'humidité deviennent extrêmes, l'humidex peut également être utilisé comme indicateur de stress thermique, car des niveaux élevés d'humidex peuvent entraîner des difficultés accrues pour le corps à se refroidir efficacement. Cependant, pour une évaluation plus précise du stress thermique dans des environnements de travail ou des conditions physiques intenses, d'autres indices comme le WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) ou l'indice de stress thermique (Heat Stress Index) sont généralement recommandés. Par ailleurs, l'humidex est plutôt utilisé pour des environnements extérieurs.

UTCI

L'UTCI est un indice de stress thermique plus récent qui prend en compte plusieurs paramètres pour évaluer le confort thermique dans différentes conditions (Fiala et al., 2012). Il intègre des facteurs tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et l'activité physique. L'UTCI fournit une évaluation globale du niveau de stress thermique ressenti par le corps humain. Cependant, il est principalement utilisé pour des environnements extérieurs. Cet indicateur correspond au métamodèle du modèle de corps humain de Fiala-FE pour une personne moyenne correspondant aux paramètres figés dans le modèle. L'ambiance est considérée comme stationnaire. Les catégories de stress thermique sont présentées en [annexe I](#).

Il apparaît qu'aucun de ces indices n'est suffisamment satisfaisant afin d'évaluer les conditions intérieures des bâtiments résidentiels en période potentielle de stress thermique. Ces différents indicateurs ne tiennent pas compte :

- De la variabilité individuelle des populations d'usagers (âge, poids, taille, sexe, etc.) et son impact sur la thermorégulation,
- De l'acclimatation,
- De la chronobiologie et son impact sur la thermorégulation (différence jour et nuit),
- **Du caractère dynamique et transitoire des ambiances.**

Modèles de thermorégulation

Le point commun des indices de confort et de stress thermique décrits précédemment est qu'ils sont dédiés à des environnements statiques et uniformes. Ils considèrent que le corps humain est un corps physique ponctuel qui n'a pas de réaction en propre du fait de la variation des conditions environnementales (cf. la modélisation associée au PMV expliquée plus haut). Le corps humain ne détecte pas la température de l'environnement directement, il détecte sa température cutanée grâce aux thermorécepteurs situés dans la peau. Donc, afin de pouvoir estimer la sensation thermique perçue par un individu dans une ambiance donnée, il est légitime de chercher à calculer la température cutanée. Cela peut être établi grâce à un modèle dit de thermorégulation du corps humain.

Plusieurs modèles de thermorégulation ont été développés pour simuler les réponses physiologiques du corps humain et prédire ses températures cutanées et centrales (Fiala et al., 1999; Salloum et al., 2007; Stolwijk, 1971; Tanabe et al., 2002; Wissler, 2018). **Ces modèles consistent généralement en un système passif, qui représente l'ensemble des tissus de corps humain et est le siège des échanges de chaleur dans le corps, et un système actif, qui simule les mécanismes physiologiques tels que le frissonnement, le débit sanguin cutané et la sudation.** L'évolution de ces modèles est présentée dans la Figure 23.

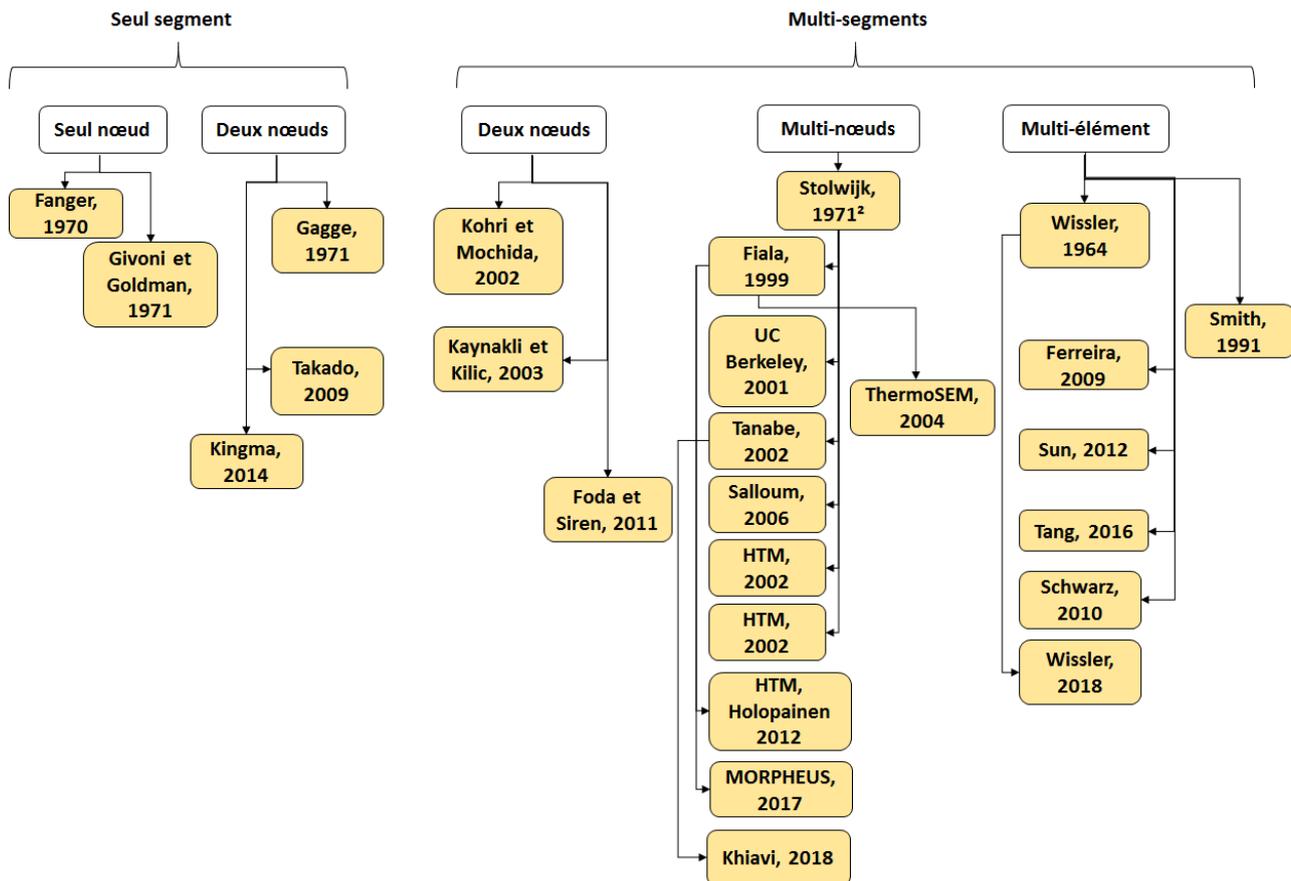


Figure 23 : Diagramme de l'évolution des modèles de thermorégulation humaine, adapté de (Katić et al., 2016)

Pour appréhender l'impact sur le corps humain des ambiances thermiques de l'extrêmement froid à l'extrêmement chaud, le CSTB réalise des travaux de recherche sur la thermique du vivant depuis 2008. **Dans ce cadre, le modèle NHTM (Neuro Human Thermal Model, El Kadri et al. 2020), basé sur la neurophysiologie, a été développé au CSTB pour calculer les réponses physiologiques d'un individu exposé à des conditions environnementales instationnaires hétérogènes.** Ce modèle consiste en deux systèmes, le système passif et le système actif (cf. Figure 24).

Le système passif représente le corps humain de point de vue thermo-physique et simule les transferts de chaleur entre les tissus et entre le corps et l'environnement. Il est basé ici sur celui du modèle de Wissler, développé pour la NASA (Wissler, 2018) [6]. Il consiste en 21 cylindres représentant les tronçons du corps humain. Chaque cylindre est discrétisé en 21 couches dont 15 pour les tissus et 6 pour les vêtements, et chaque couche est discrétisée en 12 secteurs angulaires.

Le système actif calcule les mécanismes physiologiques avec lesquelles le corps humain maintient sa température centrale à un niveau constant nécessaire pour assurer le bon fonctionnement des organes intérieurs. Il est l'ensemble des mécanismes physiologiques pilotés par l'hypothalamus tels que le frissonnement, la vasomotion et la sudation. Ces mécanismes sont basés sur les signaux des thermorécepteurs situés dans la peau et dans le centre du corps humain. De plus, le NHTM est individualisable. **Les paramètres des systèmes passif et actif sont modifiables afin de pouvoir simuler plusieurs types de populations.**

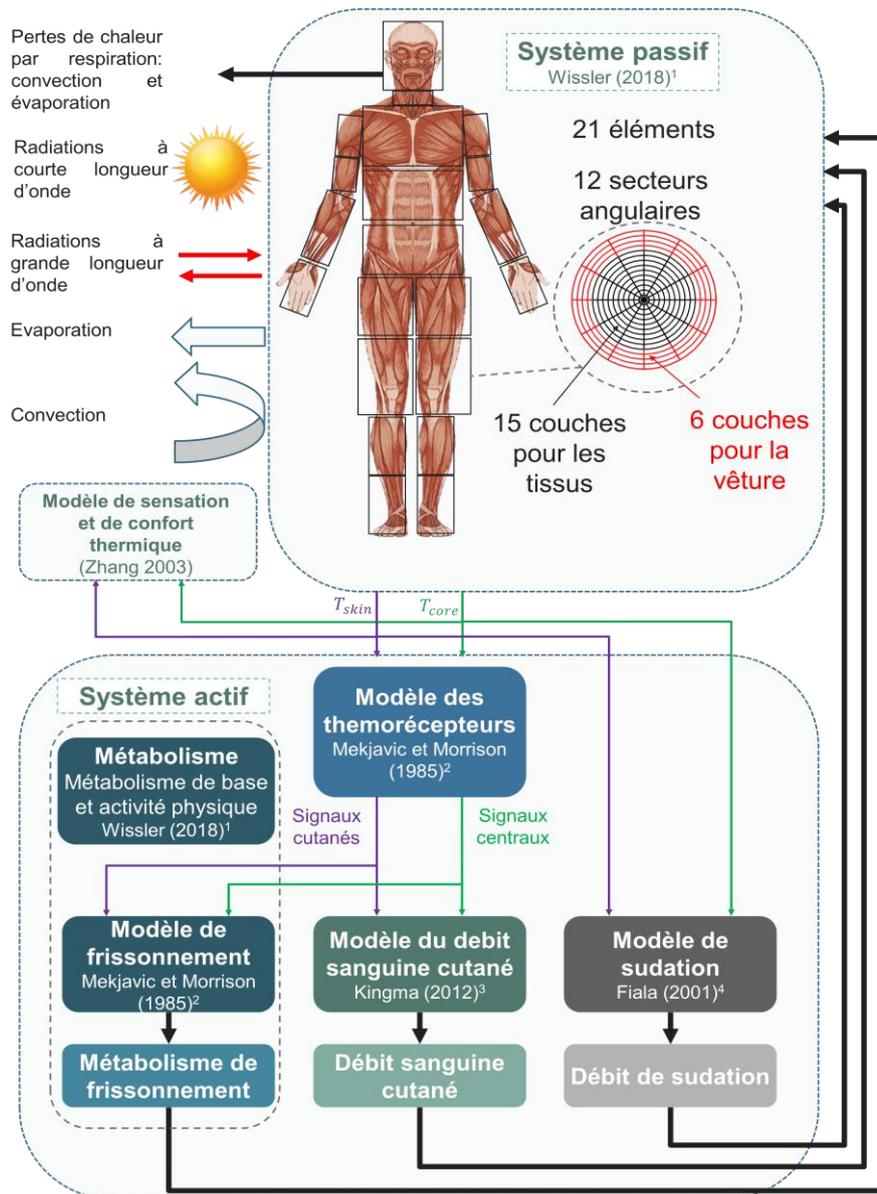


Figure 24 : Schéma du modèle NHTM

Le code de calcul NHTM est donc composé de plus de 5000 nœuds de calcul avec une résolution au pas de temps de 3s, ce qui rend son utilisation dans les simulations de type STD coûteuse en temps et complexe par le grand nombre de variables d'entrée (températures d'air, humidités relatives, températures moyennes rayonnantes, vitesses d'air pour chaque nœud à la périphérie du modèle, métabolisme, etc.). Une exploitation du modèle NHTM passe par l'utilisation de métamodèles simplifiés suivant la même démarche que le développement de l'UTCI. **Ces métamodèles seront développés dans le cadre du projet RENOPTIM, afin d'évaluer le confort de manière plus fine, utilisant des données mesurées sur des sujets de la population française.**

Le NHTM est couplé au modèle de DTS de Fiala. Ce modèle permet d'évaluer la sensation thermique dynamique à partir de la température de peau. L'un des plus connus est le modèle de Fiala (2003). Ce modèle DTS (Dynamic Thermal Sensation) s'exprime de la façon suivante :

$$DTS = 3 \tanh(fsk + \Phi + \Psi)$$

avec :

$$fsk = \begin{cases} b_1 \times \overline{DT_{sk,m}} & \overline{DT_{sk,m}} \geq 0 \\ b_2 \times \overline{DT_{sk,m}} & \overline{DT_{sk,m}} < 0 \end{cases} \text{ (Comportement statique)}$$

$$\overline{DT}_{sk,m} = T_{sk,m} - T_{sk,m_neutralité}$$

$$\Phi = \begin{cases} 0 & DT_{hy} - b_4 \leq 0 \text{ Ou } \overline{DT}_{sk,m} - b_5 \leq 0 \\ b_3 \times \exp\left(\frac{b_6}{DT_{hy} - b_4}\right) \times \exp\left(\frac{b_7}{\overline{DT}_{sk,m} - b_5}\right) & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\Psi = \frac{t_- + t_+}{1 + \Phi}$$

$$t_- = \begin{cases} b_8 \times \frac{dT_{sk,m}}{dt} & \frac{dT_{sk,m}}{dt} \leq 0 \\ 0 & \frac{dT_{sk,m}}{dt} > 0 \end{cases}$$

$$t_+ = \begin{cases} \frac{b_9 \times \left(\frac{dT_{sk,m}}{dt}\right)_{max}}{1 + z} \times \exp(b_{10} \times Dt) & \frac{dT_{sk,m}}{dt} > 0 \\ 0 & \frac{dT_{sk,m}}{dt} \leq 0 \end{cases}$$

$$z = \begin{cases} \frac{\frac{dT_{sk,m}}{dt}}{\left(\frac{dT_{sk,m}}{dt}\right)_{max}} & \frac{dT_{sk,m}}{dt} > 0 \\ 0 & \frac{dT_{sk,m}}{dt} \leq 0 \end{cases}$$

$\left(\frac{dT_{sk,m}}{dt}\right)_{max}$: Dérivée maximale positive de la température moyenne de la peau.

Dt : Temps passé depuis la dernière occurrence de la dérivée maximale positive de la température moyenne de la peau (°C)

$T_{sk,m_neutralité}$: Température moyenne de peau caractéristique de la thermoneutralité

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$ et b_{10} : Coefficients de régression présentés dans le

Tableau 15 suivant :

Tableau 15 : Valeur des coefficients de régression des équations du modèle de sensation de Fiala 1998 et 2003

Coefficient	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10
Fiala 1998 [8]	1,026	0,298	6,66 2	0	5	-0,56 5	7,634	0,114	0,137	-0,68 1
Fiala 2003 [7]	1,078	0,301	7,94	-0,4	4	-0,90 2	7,612	0,114	0,137	-0,68 1

Le DTS de Fiala a fait l'objet d'un comparatif dans (Koelblen et al., 2018) qui a démontré un bon accord sur un large spectre d'ambiances. Le DTS, Fiala et al. 2023, a fait l'objet d'une bonne concordance générale avec les observations expérimentales pour des températures ambiantes comprises entre 13°C et 48°C et des niveaux d'activité entre 1 et 10 met. Dans la suite des travaux sur le projet RENOPTIM, les modèles proposés seront inspirés du modèle de Fiala 2003 avec une adaptation possible des coefficients, de la température $T_{sk,m_neutralité}$ (en fonction des saisons ou de l'acclimatation) et l'intégration de la température centrale. En effet, la version originale du DTS a été développée avec la prise en compte des variations de la température centrale.

Takada et al. 2013 ont aussi développé un modèle de prédiction de la sensation thermique. Ce modèle s'appuie sur la régression de fonction tangent hyperbolique avec ou sans normalisation de la température, comme décrit dans l'équation suivante.

$$TSV = a_1 + a_2 \left[\frac{1}{2} + \frac{a \tan\left(\frac{T_{sk,n} - a_3}{a_4}\right)}{\pi} \right] + a_5 \left[\frac{1}{2} + \frac{a \tan\left(\frac{\frac{dT_{sk,n}}{dt} - a_6}{a_7}\right)}{\pi} \right]$$

avec

$$T_{sk,n}(t) = T_{sk}(t) - T_{sk,0}$$

Tsk0 correspond à la température de normalisation

Avec les coefficients suivants avec la normalisation :

Regression coefficients and correlation coefficient ("NN" or nonlinear equation with normalization of skin temperature).

Regression coefficient							Correlation coefficient	Number of data
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7		
11.018	-12.511	2.430	-2.791	-3.969	-0.035	-0.203	0.873	6082

Avec les coefficients suivants sans la normalisation :

Table 7

Regression coefficients and correlation coefficient ("N" or nonlinear equation without normalization of skin temperature).

Regression coefficient							Correlation coefficient	Number of data
a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7		
-6.116	35.861	39.484	2.064	3.686	-0.038	0.169	0.839	6082

En plus du calcul du confort thermique dynamique issus de la température de peau, le NHTM est capable d'estimer les variables physiologiques permettant d'appréhender les effets de l'exposition des individus à des stress thermiques. Ces variables dynamiques sont la température centrale et les pertes hydriques par transpiration, sudation et évaporation.

Dans cette section, les indices de confort thermique ainsi que les indices de stress thermique ont été présentés. Ils diffèrent par leurs domaines d'application, leurs entrées, leurs sorties et leurs complexités. Le Tableau 16 donne un résumé de ces indices, leurs entrées, leurs sorties ainsi de quelques caractéristiques.

Tableau 16 - Comparaison des indices de confort et de stress thermique

Indice	Entrées	Sorties	Caractéristiques/Limites connues	Domaines d'application																				
Indices de confort thermique																								
PMV/PPD	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative • Vitesse de l'air • Température radiante moyenne • Métabolisme • Résistance thermique des vêtements 	<ul style="list-style-type: none"> • Predicted Mean Vote (PMV), échelle de -3 (froid) à +3 (chaud) • Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) pour un PMV donné 	<ul style="list-style-type: none"> -Basé sur des expérimentations effectuées sur de jeunes adultes scandinaves -Surestime le confort thermique dans les environnements non climatisés -Les classes de confort thermique nécessitent une climatisation énérgivore - Indice pour les ambiances statiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisé souvent pour des environnements climatisés, domaine d'application précisé dans la norme ISO 7730 																				
aPMV (Adaptive Predicted Mean Vote)	<ul style="list-style-type: none"> • Température d'air, • Humidité, • vitesse de l'air, • activité • métabolique, • Isolation des vêtements, 	<ul style="list-style-type: none"> • Température intérieure préférée • 3 classes de confort thermique intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> +Basé sur des bases de données de différents pays, -Ne prend pas en compte les différences interindividuelles - Indice pour les ambiances statiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisé pour des environnements climatisés 																				
ePMV (Adjusted Predicted Mean Votes with Expectancy Factor), (Ole Fanger and Toftum, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Température d'air, • Humidité, • vitesse de l'air, • activité • métabolique, • Isolation des vêtements, • e_coefficient expectancy factor 	<ul style="list-style-type: none"> • Température intérieure préférée • 3 classes de confort thermique intérieur 	<p>+</p> <table border="1"> <caption>Table 1. Expectancy factors for non-air-conditioned buildings in warm climates</caption> <thead> <tr> <th>Expectation</th> <th colspan="2">Classification of non-air-conditioned buildings</th> <th>Expectancy factor, e</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Location</th> <th>Warm periods</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>High</td> <td>In regions where air-conditioned buildings are common</td> <td>Occurring briefly during the summer season</td> <td>0.9-1.0</td> </tr> <tr> <td>Moderate</td> <td>In regions with some air-conditioned buildings</td> <td>Summer season</td> <td>0.7-0.9</td> </tr> <tr> <td>Low</td> <td>In regions with few air-conditioned buildings</td> <td>All seasons</td> <td>0.5-0.7</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> - Indice pour les ambiances statiques 	Expectation	Classification of non-air-conditioned buildings		Expectancy factor, e		Location	Warm periods		High	In regions where air-conditioned buildings are common	Occurring briefly during the summer season	0.9-1.0	Moderate	In regions with some air-conditioned buildings	Summer season	0.7-0.9	Low	In regions with few air-conditioned buildings	All seasons	0.5-0.7	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisé pour des environnements climatisés et non climatisés et pour les ambiances chaudes
Expectation	Classification of non-air-conditioned buildings		Expectancy factor, e																					
	Location	Warm periods																						
High	In regions where air-conditioned buildings are common	Occurring briefly during the summer season	0.9-1.0																					
Moderate	In regions with some air-conditioned buildings	Summer season	0.7-0.9																					
Low	In regions with few air-conditioned buildings	All seasons	0.5-0.7																					
Confort adaptatif	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne extérieure glissante 	<ul style="list-style-type: none"> • Température intérieure préférée • 3 classes de confort thermique intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> +Basé sur des bases de données de différents pays, -N'est pas applicable si la moyenne de la température extérieure glissante dépasse 30°C (pas de données dans la norme, bien que des études existent en pays chauds au-delà de ces valeurs seuils) -Prend en compte indirectement le métabolisme, la résistance thermique des vêtements -Ne prend pas en compte l'humidité relative -Ne prend pas en compte les différences interindividuelles - Indice pour les ambiances statiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisé pour des environnements non climatisés 																				

Indice	Entrées	Sorties	Caractéristiques/Limites connues	Domaines d'application
DH RE2020		Inconfort calculé en DH sur l'été		
Diagramme de Givoni	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative • Vitesse de l'air 	<ul style="list-style-type: none"> • Confort/non confort 	+Basé sur le diagramme psychrométrique -Sous-estime les risques sanitaires sur les personnes vulnérables - indice pour les ambiances statiques	<ul style="list-style-type: none"> • Dédié à des environnements tropicaux
DTS (Fiala et al. 2003)	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne de peau et sa dérivé • Température centrale et sa dérivé 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensation thermique échelle de -3 (froid) à +3 (chaud) 	+ Contient une composante statique et dynamique + contient une température de thermoneutralité $T_{sk,m_neutralité}$ pouvant être adapté.	Applicable pour : <ul style="list-style-type: none"> • Des températures d'air de 10 à 48°C • Des clo de 0.1 à 1.2, • Un métabolisme de 1 à 10 met
TSV(Takada et al., 2013)	<ul style="list-style-type: none"> • Température moyenne de peau et sa dérivé 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensation thermique échelle de -3 (froid) à +3 (chaud) 	+Adapter pour le confort d'été	Applicable pour : <ul style="list-style-type: none"> • Des températures d'air de 20 à 38°C • Des clo de 0.3, • Un métabolisme de 1 à 1.2 met
Indices de stress thermique				
WBGT	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Température humide • Température radiante 	WBGT	-Ne prennent pas en compte les différences interindividuelles (âge, condition physique, etc.) - Indice pour les ambiances statiques	<ul style="list-style-type: none"> • Dédié à des environnements extérieurs de travail de travail, domaine d'application précisé dans la norme 7243
HSI	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative • Rayonnement solaire • Vitesse du vent 	HSI		?
Humidex	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative 	Humidex		?
HI	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative 	HI		?

Indice	Entrées	Sorties	Caractéristiques/Limites connues	Domaines d'application
UTCI	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative • Vitesse de l'air • Température radiante • Métabolisme • Résistance thermique des vêtements 	UTCI	+Basé sur un modèle thermophysique approfondi + Métamodèle du modèle de Fiala, donc rapide en temps de calcul -Ne prend pas en compte les différences interindividuelles -Ne tiens pas compte de l'acclimatation - Indice pour les ambiances statiques	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisé souvent pour des environnements extérieurs
Indices pouvant être utilisés pour évaluer à la fois le confort et le stress thermique				
ET*, PMV*, SET	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative • Température radiante moyenne • Vitesse de l'air • Métabolisme • Résistance thermique de la vêtue 	ET*, PMV*, SET	+Basé sur un modèle thermophysique à deux nœuds (Gagge) -N'est pas applicable dans des conditions non uniformes (asymétrie de température et de rayonnement) -Ne simule qu'une personne standard - Indice pour les ambiances statiques	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de l'utiliser dans un environnement uniforme transitoire
NHTM	<ul style="list-style-type: none"> • Température de l'air • Humidité relative • Vitesse de l'air • Température radiante • Métabolisme • Résistance thermique des vêtements 	<ul style="list-style-type: none"> • Températures cutanées et centrales • Taux de déshydratation • 	+Modèle de thermorégulation approfondi +Dédié à des environnements instationnaires hétérogènes +Prend en compte les différences interindividuelles -N'est pas encore validé pour des activités physiques intenses	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisé pour tout type d'environnements • De l'extrêmement froid à l'extrêmement chaud, • Utilisé pour la construction de métamodèles (similaire à la construction de l'UTCI avec le modèle de Fiala)

3.7 Conclusion : vers des modèles de confort thermique spécifiques pour la population française, à développer dans le projet RENOPTIM

Le projet RENOPTIM a pour ambition d'améliorer les modèles de confort thermique existant, en les adaptant à la population française métropolitaine. Les données de la campagne expérimentale recueillies sur le confort thermique (mesures physiologiques et psychologiques sur une vingtaine de participants, ressentis thermiques de 80 participants en France métropolitaine) permettront de remettre en question les indicateurs de confort et de stress thermique existants et de recalibrer les seuils d'inconfort aux ressentis de la population française en périodes estivales et de fortes chaleurs.

Deux « niveaux » d'expérimentation ont été prévus : un niveau « base » et un niveau « avancé ». Le niveau « base » concernera l'ensemble des 76 logements instrumentés dans le cadre de l'étude, et consistera en une mesure des réponses déclaratives des occupants.

Afin de disposer de données déclaratives quantitatives suffisamment précises mais également compatibles avec les contraintes de l'expérimentation, le questionnaire permettant de mesurer le niveau de confort thermique devra :

- convenir à une durée d'expérimentation relativement longue (plusieurs mois) ; l'objectif est que les participants répondent sur toute la durée et ne se lassent pas. Il a été conçu pour ne pas être trop contraignant et pouvoir être renseigné au maximum 3 fois dans la journée. Les plages horaires ont été définies pour être suffisamment larges et pour couvrir des moments clés de la journée en termes de variations possibles de niveaux de confort thermique (entre 6h et 9h, entre 16h et 20h et entre 21h et 02h).
- présenter un niveau de compréhension abordable pour les participants à l'étude.

Six questions seront posées à chaque présentation du questionnaire. Ces questions et les échelles correspondantes ont été choisies et adaptées d'après la revue de littérature présentée précédemment, et au contexte de l'étude (confort d'été notamment).

La première question permettra de connaître le niveau d'activité des participants dans les 10 minutes précédant la réponse au questionnaire. En effet, cette information est une donnée illustrative qui permet d'expliquer les réponses suivantes sur la perception du confort thermique. Elle se présente sous la forme suivante :

Q1. Veuillez indiquer votre niveau d'activité dans les 10 minutes précédant ce moment.

1. Aucune activité (repos, couché)
2. Activité sédentaire (travail sur ordinateur, TV, lecture)
3. Activité légère/moyenne (cuisine, rangement, ménage, etc.)

La deuxième question permettra de connaître le niveau de vêture des participants. La revue de littérature a montré l'importance de ce paramètre sur les mécanismes de thermorégulation et constitue également une donnée d'entrée des modèles de confort. Le niveau de détails de l'échelle a été dégradé pour pouvoir être utilisable dans le contexte de l'étude mais permettra d'obtenir une indication du clo.

Q2. Veuillez indiquer votre niveau de vêture MAINTENANT

1. Je suis vêtu de manière légère (short ou robe fine)
2. Je suis moyennement vêtu (pantalon, chemise)
3. Je suis fortement vêtu (pull, veste ou foulard)

Les quatre questions suivantes porteront sur l'évaluation de la sensation thermique, du confort thermique, du niveau d'acceptabilité et de satisfaction. Le nombre de points utilisé pour chaque échelle a été adapté de la norme NF EN ISO 10551 pour être simple d'utilisation et à un niveau de compréhension abordable pour l'ensemble des participants et au contexte chaud :

Q3. Comment VOUS sentez-vous MAINTENANT ? Avez-vous

1. Légèrement froid
2. Ni chaud, ni froid
3. Légèrement chaud
4. Chaud
5. Très chaud

Q4. Comment trouvez-VOUS cet environnement MAINTENANT ?

1. Très inconfortable
2. Inconfortable
3. Légèrement inconfortable
4. Confortable

Q5. Comment jugez-VOUS cette ambiance thermique MAINTENANT ?

1. Tout à fait inacceptable
2. Tout juste inacceptable
3. Tout juste acceptable
4. Tout à fait acceptable

Q6. Etes-vous MAINTENANT satisfait de cette ambiance thermique ?

1. Insatisfait
2. Tout juste insatisfait
3. Tout juste satisfait
4. Satisfait

Ce questionnaire sera renseigné par les participants par l'intermédiaire d'une « box confort » développée spécifiquement pour l'étude par le CSTB et permettant la saisie des réponses via un écran tactile. Cette box mesurera également deux paramètres clés de l'environnement thermique : la température de l'air et l'humidité relative. Il sera placé dans la pièce principale du logement afin d'être facilement accessible par l'occupant et de donner une mesure représentative du confort perçu.

Le niveau « avancé » de l'expérimentation est prévu pour **compléter ces mesures déclaratives « grande échelle » par des mesures physiologiques sur un panel restreint de 20 participants choisis parmi le panel global des 76 logements**. En effet, la compréhension des mécanismes physiologiques de thermorégulation et la présentation des différents modèles de confort dans la section précédente montrent que certaines données physiologiques sont essentielles au développement d'indices et de modèles ayant pour vocation d'estimer le confort thermique et le risque sanitaire. Il est donc nécessaire de les mesurer expérimentalement afin de faire progresser la connaissance sur ces paramètres pour la population française.

Un questionnaire de caractérisation des sujets a été développé afin de recueillir les données en lien avec les caractéristiques intrinsèques des sujets (âge, sexe, taille, poids, activité physique, etc.). Ces données permettront notamment l'estimation du métabolisme basal des volontaires qui est une donnée d'entrée des modèles thermo-physiologiques.

Des mesures physiologiques en continu seront réalisées sur une durée de 7 jours consécutifs. Les mesures physiologiques ont été choisies pour être représentatives des modifications des mécanismes de thermorégulation en ambiance chaude et pour répondre aux besoins de calibration des modèles thermo-physiologiques décrits dans la section précédente.

Les indicateurs physiologiques retenus dans cette étude sont : la température cutanée, la température centrale et la fréquence cardiaque. En effet, la description des mécanismes de thermorégulation a montré que la température cutanée est modifiée par la vasodilatation en réponse à des environnements thermiques chaud et peut être utilisée comme un indice pour estimer la sensation thermique individuelle (Yao et al., 2007). La température centrale est également un bon indicateur du stress thermique et du risque de surchauffe. Enfin, la fréquence cardiaque est un indicateur du niveau d'activité et permet une estimation plus précise du métabolisme basal et instantané.

Les températures cutanées seront mesurées à l'aide d'enregistreurs de données thermo-bouton 22L en acier inoxydable (ProgesPlus, France), fixés sur la peau grâce à des pansements biomédicaux, en trois endroits du corps (positionnés sur la poitrine du côté du cœur, sur l'avant-bras gauche et sur le tibia droit). Ces capteurs ont été choisis pour leurs caractéristiques spécifiques de taille réduite et leur mémoire interne pour l'enregistrement, qui sont tout à fait adaptées aux contraintes de l'expérimentation. La température centrale sera mesurée à l'aide du même matériel et placée sur une zone proche de l'aisselle gauche. Les acquisitions de température cutanée et de température centrale seront réalisées avec un pas de temps de 5 minutes.

Enfin la fréquence cardiaque sera monitorée grâce à l'utilisation d'une montre connectée (modèle Kalenji HR500) portée au poignet et avec une fréquence d'acquisition à la seconde. Les données brutes issues de la montre seront collectées grâce à une connexion Bluetooth établie entre la box confort et la montre. L'écriture des données sera réalisée sur une carte SD située dans la box.

La mesure du niveau de sudation n'a pas été prévue dans cette expérimentation du fait d'une plus grande complexité de mise en œuvre de la mesure. Toutefois, il représente un paramètre d'intérêt qui pourra être investigué dans de futures études, avec l'identification de capteurs compatibles avec la mesure embarquée.

Ces guides ont tout d'abord été conçus par les acteurs publics tels que le ministère de la transition écologique et solidaire et l'ADEME. Puis, ils ont été progressivement conçus par des collectivités, des comités locaux de la maîtrise de l'énergie (notamment dans les DROM et le Sud de la France) et par des acteurs professionnels et associatifs.

On constate des approches distinctes de ces écogestes selon les acteurs :

- Le Ministère de la Transition Ecologique propose une approche assez large de ces écogestes en les positionnant dans l'environnement de vie des habitants prenant en compte leur logement, leur cadre bâti, mais aussi les espaces extérieurs (“#Écologiecheznous,” 2020).
- L'ADEME a tout d'abord adopté une approche qui se concentre sur les écogestes dans le logement et le cadre bâti. Cette approche s'est structurée autour de la maîtrise des dépenses d'énergie, pour s'élargir progressivement au confort d'été, aux questions de transition énergétique (EnR, par exemple) et écologique (déchets, eau, végétalisation, etc.) (ADEME, 2022).
- Les collectivités locales ont tout d'abord développé des démarches d'écoresponsabilité concernant leurs services, leurs territoires et la sensibilisation de leurs salariés : voir la démarche publiée par l'Association des Maires de France (Agence Parisienne du Climat, 2020). Puis, elles se sont de plus en plus appuyées sur l'ADEME et les associations, pour informer leurs administrés ou citoyens sur les guides d'écogestes existants, les adapter à leur parc de logements et leur climat spécifique, et les rendre visibles sur leurs sites Internet. Enfin, les collectivités se sont servies de ces guides pour s'impliquer dans des démarches de soutien à l'initiative citoyenne : voir la publication du guide du CLER sur le site de l'Agence Parisienne pour le Climat (*[Guide] 100 gestes pour réduire ses consommations*, 2020). Ces guides s'inscrivent dorénavant dans les démarches du défi DECLICS (Défi Citoyen Locaux d'Implication pour le Climat et la Sobriété) qui accompagnent les ménages dans la réduction de leurs consommations d'eau et d'énergie et leur production de déchets. De plus, avec l'avènement des TEPOS (Territoires à Energie POSitive), des collectivités se sont investies dans la réalisation de guides écogestes s'inscrivant dans les démarches TEPOS et de transition énergétique (Stephan et al., 2008).
- Les acteurs associatifs tel le CLER (réseau pour la transition énergétique) adoptent plutôt une approche des écogestes resituée dans deux questionnements principaux : celui de la sobriété des modes de vie et celui de l'efficacité et de la transition énergétique appréhendées par rapport à la question climatique (*[Guide] 100 gestes pour réduire ses consommations*, 2020).
- Les grands bailleurs sociaux (3F, par exemple) ont eux aussi développé des guides écogestes davantage centrés sur le logement et l'unité d'habitation et les gestes du quotidien à adopter (3F, 2018)
- Enfin, des groupements d'acteurs professionnels, privés et chercheurs ont aussi développé de tels guides notamment dans l'objectif d'atteindre les résultats envisagés de consommation énergétique liées à des innovations constructives (maisons à énergie positive, par exemple) (Cercle Promodul INEF4, 2020).

On retient qu'il est important de positionner les écogestes dans l'environnement de vie des habitants, leur logement, leur cadre bâti et les espaces extérieurs, ainsi que des démarches de sensibilisation soutenant l'initiative citoyenne en montrant les co-bénéfices sur les consommations et les possibilités d'adaptation au changement climatique.

Depuis une dizaine d'années, des évolutions notables ont eu lieu dans les manières, d'une part, d'appréhender ces écogestes et, d'autre part, de construire des analyses et des guides pour les promouvoir.

Les évolutions dans l'appréhension des écogestes

Les documents et guides publiés par le Ministère de la transition écologique et l'ADEME révèlent une évolution dans l'appréhension des écogestes. On est en quelque sorte passé d'une approche des écogestes dans laquelle « éco » signifie « économie » (de ressources, par exemple) à une approche où « éco » signifierait davantage écocitoyenneté. Il s'agit non seulement d'éviter une consommation de ressources défavorables aux dépenses des ménages (à leur pouvoir d'achat, par exemple) mais aussi aux ressources locales et celles de la planète.

Cette manière de présenter les écogestes renvoie à une économie de ressources devant s'articuler à des environnements et climats changeants (la question de la santé et du bien-être), tout en veillant à ne pas accroître les inégalités et à soutenir une gouvernance laissant une marge d'action aux citoyens. C'est dans cette perspective que s'inscrivent par exemple les projets de « familles à énergie positive » (<https://cler.org/defi-familles-energie-positive/>) et les récents programmes CEE (notamment dans les DROM).

Cette évolution correspond aussi à un élargissement de la thématique des écogestes, notamment à sa connexion aux questions de « sobriété » qui renouvellent la manière de considérer la place des citoyens en leur conférant un rôle d'acteur à même d'agir en faveur de pratiques « écoresponsables ». Ces questions de sobriété occupent une place de plus en plus importante dans les publications des réseaux associatifs tel que le CLER (CLER, 2021), de sociologues (GoodPlanetmag, 2021) et de chercheurs en sciences politiques (Semal et al., 2014). La notion de sobriété est intéressante à considérer dans la mesure où elle inscrit les écogestes dans les pratiques quotidiennes de citoyens amenés à faire évoluer leurs pratiques de vie quotidienne, ce qui conduit à s'interroger sur les facteurs sociaux, collectifs et culturels qui freinent ou déterminent, individuellement et collectivement, les changements de pratiques de consommation et d'habiter.

Cet aspect renvoie à un changement de posture intellectuelle et opérationnelle dans les manières de considérer les écogestes. On assiste au passage d'une approche « normative » des écogestes à une approche plus compréhensive. L'approche normative se caractérise par des injonctions comportementales renvoyant parfois à une édicition descendante et institutionnelle de comportements, tandis que l'approche plus compréhensive vise à informer le citoyen sur les impacts de ses actions (sur ses dépenses de consommation et les ressources de la planète) et les manières de réduire ces impacts. De plus, cette approche compréhensive s'étend à l'analyse des co-bénéfices attendus sur le confort et le bien-être en tenant compte des interactions possibles entre l'être humain et ses milieux de vie sous l'angle de ses perceptions, ressentis, comportements adaptatifs, et pour les sciences humaines et sociales (SHS) de ses formes d'engagement dans une « écologisation » de ses pratiques (Doré, 2009).

Enfin, cette évolution concerne le passage des dimensions individuelles aux dimensions plus collectives de la mise en œuvre des écogestes, et la prise en considération des environnements situés : spécificités des climats et de leur évolution. Ces deux derniers points sont importants à considérer : dimensions collectives et citoyennes ET référence plus affirmée aux climats locaux. Ils témoignent du fait que les écogestes, dans leur réalisation et mise en œuvre, sont dépendants de la gouvernance multi-partenariale locale et du climat local, ainsi que des profils des individus (personnes âgées, enfants, composition socio-familiale, etc.), de leurs conditions sociales de vie et de logement, de leurs milieux de vie (urbain, périurbain, rural, littoral, etc.), ainsi que des conditions qui rendent possibles ou non la mise en œuvre des écogestes (on détaillera ce point par la suite).

On retient une évolution visant à considérer l'occupant comme acteur à même d'agir en faveur de pratiques écoresponsables et de l'adoption des écogestes, selon une approche plus compréhensive l'informant des impacts de ces actions et des apports des écogestes sur son confort et sa sobriété.

Cette évolution progressive des manières d'appréhender les écogestes est importante à considérer pour comprendre, d'une part, les évolutions constatées dans les guides qui leur sont dédiés, mais aussi en analyser les apports et les limites.

4.2 Les évolutions des guides présentant les écogestes

L'évolution des thématiques abordées

L'analyse comparative des guides sur les écogestes dans le logement et les bâtiments, sur une période de dix ans (des années 2008-10 aux années 2019-21) fait émerger les tendances d'évolutions suivantes.

Les thématiques abordées ne sont plus uniquement organisées selon un **découpage « classique » qui concerne essentiellement les systèmes techniques du logement et ses qualités d'ambiance (le chauffage, les équipements électriques, l'éclairage, ou l'eau, l'air, etc.)**, mais deviennent plus « personnalisés » en montrant l'usager ou l'occupant dans son logement (par des pictogrammes en situation de vie), et en lui adressant des messages forts ou significatifs concernant ses pratiques d'usage, mais aussi son confort. Cette mise en situation vise à indiquer à l'habitant comment il peut tirer parti des systèmes techniques installés et des interfaces du logement avec son

environnement (ombrage, vent, etc.) pour atteindre un niveau de confort satisfaisant pour lui-même, tout en étant vigilant à ne pas « surconsommer » des ressources défavorables au devenir de la planète. Sous-jacent à cette démarche, il y a un bien un raisonnement d'optimisation positionnant l'habitant comme un être rationnel qui va tenir compte des multiples critères qui vont déterminer sa consommation et sa satisfaction vis-à-vis de son milieu de vie.

A ces thématiques classiques (chauffage, ventilation, etc.) s'ajoutent, à partir de 2011 mais surtout 2018, **les thématiques du confort d'été, de l'usage de la climatisation (notamment pour les DROM et régions chaudes de France), de la sobriété et de l'information écocitoyenne**. Ces thématiques deviennent plus explicitement articulées à la prise en considération du changement climatique qui est dorénavant explicité et référencé dans la plupart des guides sur les écocestes.

Le confort d'été : une thématique davantage prise en compte

Le guide de l'ADEME de 2019 intitulé « Guide des écocestes dans l'habitat : agissons ensemble au quotidien » de la Direction Régionale Corse témoigne de cette évolution (ADEME, 2019). Ce guide propose des astuces et suggère des améliorations que l'habitant peut réaliser lui-même à moindre frais en situation de confort d'hiver comme d'été : insert pour une cheminée, volets protecteurs, rideau obstruant, plantes à feuilles caduques, etc. Il est davantage mis l'accent sur la circulation de l'air, l'aération naturelle (pour des questions de rafraîchissement et de santé), le rafraîchissement nocturne, l'utilisation de la climatisation à bon escient.

A partir de 2018, le confort d'été devient une question davantage traitée dans ces guides, qui tiennent compte davantage de l'occupant dans son logement. Ces guides insistent sur les moyens dont dispose l'habitant pour se protéger de la chaleur, rafraîchir son logement et utiliser en dernier recours une climatisation.

De plus, l'ADEME a publié en 2011 un guide sur **le confort d'été** qui a été réactualisé en 2020 « Chaud dehors, frais dedans ». Celui-ci s'adresse aux propriétaires de maisons et d'appartements dans des copropriétés. Ce guide insiste sur les moyens dont dispose l'habitant pour se protéger de la chaleur, rafraîchir son logement et utiliser à bon escient une climatisation. Parmi les actions envisagées, on peut noter :

- Créer de l'ombre en protégeant les baies vitrées des apports solaires par des stores, des volets roulants, la fermeture des fenêtres,
- Limiter les apports de chaleur internes,
- Placer des plantations sur la terrasse ou le balcon pour limiter la surface minérale exposée au soleil,
- Ouvrir les fenêtres la nuit et créer des circulations d'air pour évacuer la chaleur stockée à l'intérieur.

Favoriser l'air en mouvement et les brasseurs d'air, afin d'évacuer la transpiration et favoriser un ressenti corporel de rafraîchissement (guide de 2011). Ainsi, la question de la **climatisation** devient moins un « tabou » : elle est **reconnue comme pouvant constituer une solution à explorer, lorsque toutes les autres solutions ont déjà été expérimentées (aération nocturne, brasseurs d'air, protections solaires, végétalisation, etc.) et que les conditions de son utilisation sont respectées**, afin d'éviter des « chocs thermiques » préjudiciables à la santé et des dépenses d'énergie trop importantes.

Le dernier guide de l'ADEME en 2020 énonce ainsi de nombreux conseils pour choisir et installer une climatisation, et en préciser les inconvénients. **La climatisation en lien avec le confort d'été devient un sujet reconnu comme nécessaire pour les personnes vulnérables qui n'arrivent pas à se rafraîchir autrement** (ADEME, 2020).

Un autre guide élaboré par un programme CEE intitulé CLIM'ECO (Association française du froid, 2020) se concentre particulièrement sur l'usage à bon escient de la climatisation, notamment dans les territoires DROM. L'élaboration de ce guide a été coordonnée par l'Association Française du Froid (AFF) qui porte ce programme d'économies d'énergie (CEE) visant à sensibiliser, informer et former les ménages, collectivités et entreprises des DROM à un meilleur usage de la climatisation. Ce programme est soutenu par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire et l'ADEME. Il est cofinancé par ENGIE et Vivo Energy Réunion (ENGEN).

Ce guide reprend la démarche engagée par l'ADEME pour l'adapter aux territoires DROM. On retrouve le même découpage des thématiques liées au confort d'été et à la climatisation. Toutefois, les conseils adressés à l'habitant sont formulés en précisant davantage les agencements possibles du logement et en expliquant les raisons guidant les choix d'usage et d'interfaces de l'habitant avec son logement, ainsi que les économies d'énergie qui peuvent en être attendues. Ce guide propose 8 écocestes dont 4 dédiés aux gestes qui permettent de réduire la température à

l'intérieur du logement et 4 liés à l'utilisation de la climatisation dans l'objectif d'en limiter les consommations d'énergie.

Ce guide met aussi l'accent sur la notion de confort en précisant les facteurs qui influencent la perception du confort : température, humidité relative, vitesse de l'air, l'activité physique de l'occupant. Il tient compte également des saisons (sèches ou humides) qui influencent les changements du climat et peuvent conduire l'habitant à pratiquer des écogestes différents selon les saisons, la localisation et l'orientation de son logement. Enfin, ce guide précise pour chacun des écogestes suggérés une évaluation moyenne des économies d'énergie attendues exprimées en pourcentage. L'habitant a ainsi accès à une information qui lui donne une « fourchette » possible des économies pouvant être réalisées, ce qui peut constituer une source de motivation à la réalisation de l'écogeste, compte tenu du niveau moyen de revenus très bas dans les DROM.

Les conseils adressés à l'habitant pour atteindre un confort d'été s'organisent autour de la ventilation naturelle et par ventilateur, la limitation des apports de chaleur (internes et externes) et des apports solaires (protections extérieurs, casquettes, etc.)

Ainsi, les conseils adressés à l'habitant incluent davantage les gains apportés par ces écogestes en termes d'économie de consommation mais aussi de confort.

Des guides applicatifs dans les DROM dont certains conseils peuvent être transposés à l'hexagone

Un autre guide celui élaboré par le comité territorial pour la Maitrise de l'Energie de Nouvelle Calédonie (Comité Territorial pour la Maitrise de l'Energie, n.d.) est intéressant à signaler car il présente une partie applicative sur le confort thermique, la ventilation et la climatisation. Ce guide apporte des conseils très pratiques faciles à visualiser pour l'habitant en lui **proposant plusieurs options et écogestes possibles, afin qu'il mette en pratique ceux qu'il juge prioritaires pour son confort ou bien ceux qu'il peut mettre en œuvre facilement pour obtenir des économies d'énergie**. La démarche proposée consiste à suggérer la réalisation de plusieurs écogestes parmi lesquels l'habitant fait sa sélection. **Mais on lui demande d'évaluer sa propre démarche « écoresponsable »** par un système de points à chaque écogeste réalisé et un score total obtenu (cumul et addition des écogestes réalisés).

Cette démarche est assez astucieuse au sens où elle évite de démotiver l'habitant ou de le culpabiliser ; **elle tient compte des raisons pour lesquelles il n'est pas en mesure de réaliser tel ou tel écogeste** (ne pas avoir de climatiseur, ne pas avoir de persiennes réglables ou de volets extérieurs, etc., le score intégrant ce genre de questions). De plus, le guide donne des repères chiffrés (des ordres de grandeur sur les baisses de consommation attendues ou les différences de température acceptables, par exemple) et des conseils techniques qui concernent le choix et la durée d'utilisation de la climatisation, ou l'installation des brasseurs et des stores, etc.

Ce guide accompagne ainsi **un processus d'apprentissage de l'habitant et une montée en compétences** : il donne des informations utiles pour augmenter la capacité d'agir de l'habitant. L'intérêt de ce guide est d'expliquer les conséquences de certaines habitudes prises sur le fonctionnement des équipements (leur durée de vie, leur consommation, etc.) et d'apporter à l'habitant les informations nécessaires lui permettant d'être mieux armé pour réguler son confort thermique et moins subir la chaleur qui peut s'emmagasiner dans son logement.

Ces guides prennent mieux en compte les conditions dans lesquelles ces écogestes peuvent être réalisés et du libre arbitre de l'habitant pour les adopter, selon ses conditions de logements et d'équipements, et sa montée en compétence par des conseils avisés et argumentés.

Mettre d'avantage l'accent sur la sobriété et la participation citoyenne : le défi Déclics autour de 100 écogestes

Cette tendance à s'adresser à l'habitant tout en lui donnant des informations et des repères utiles en vue d'une prise de conscience de ses impacts sur l'environnement et d'un changement de ses habitudes de vie s'est développée ces dernières années. Comme nous l'avons souligné dans la première partie, le langage et le « cadrage » utilisés pour présenter les écogestes, en définir les finalités et les modalités d'application évoluent de façon significative. Comme le montre le dernier guide, réactualisé en 2021, des « 100 écogestes pour réduire efficacement ses consommations d'énergie et d'eau à la maison » autour du défi Déclics – Ensemble pour le climat est à ce titre révélateur (CLER, n.d.).

Dorénavant les écogestes s'inscrivent dans une démarche collective autant qu'individuelle et dans un esprit de sobriété qui renvoie à la prise de conscience du lien existant entre les pratiques quotidiennes et habitudes de vie, et les consommations d'énergie et de ressources qui leur sont liées. Cette approche se traduit par des évolutions dans les messages diffusés et les démarches proposées dans ce guide. L'introduction en page 4 est à ce titre illustrative : « *Les modes de consommation de l'énergie sont aussi divers que les habitudes de vie dans notre société. Au-delà de quelques messages généraux, il est nécessaire d'identifier les conseils les plus pertinents à suivre, selon les contextes particuliers et les motivations de chacun-e. Les habitudes jouent aussi beaucoup sur notre aptitude à adopter de nouveaux comportements. Nous vous proposons donc de faire vos propres choix, éclairés par des conseils objectifs ! Ce guide propose de nombreuses pistes pour vous aider à choisir les actions à mettre en œuvre progressivement ou les comportements à faire évoluer* ».

L'organisation du guide est conçue pour **faciliter l'appropriation par les habitants : le découpage proposé est celui des pièces du logement ou de la maison**. Ainsi les écogestes présentés sont listés, précisés et expliqués selon les pièces (le salon, la cuisine, les chambres, etc.), ce qui permet de les rapporter aux conditions d'usage des habitants dans chaque pièce, aux pratiques qu'ils y développent et au confort ou à l'ambiance recherchée différente. Décrire les écogestes en fonction des pièces permet de **les ancrer dans les pratiques de vie quotidienne et les caractéristiques du logement**. C'est un avantage non négligeable lorsqu'on s'adresse aux habitants et que l'on souhaite les interpeller, les faire se questionner sur leurs habitudes de vie et les amener progressivement à revoir certaines de leurs pratiques. Cette organisation des écogestes par pièce à vivre est toutefois complétée à la fin du guide par un index par pôle de consommation (isolation et ventilation, chauffage, ECS, cuisson, lavage, etc.), ce qui est assez astucieux car l'habitant peut choisir soit une lecture par pièce, soit une lecture par « fonction », à sa convenance et selon ses besoins d'informations et d'accompagnement.

Il est important de souligner que, pour chaque pièce, il est indiqué quels sont :

- **les écogestes les plus simples à mettre en place,**
- **les écogestes les plus impactants sur la consommation des ressources et les économies d'énergie.**

C'est à l'habitant d'arbitrer entre ces deux types d'écogestes en fonction de ses possibilités, conditions de logement, taille de la famille, etc.

Comparé aux autres guides, celui-ci s'adresse directement à l'habitant en tenant compte de ses pratiques et habitudes de vie dans son logement, lui suggère une démarche d'ensemble de « sobriété » en lui rappelant les enjeux de transition et du changement climatique. Ce guide positionne l'habitant comme un contributeur de cette transition sobre, un être « pensant » en lui apportant des bases de connaissances structurantes, tout en restant souples dans ses conseils, afin de laisser le changement de pratique à la marge d'appréciation et d'action de l'habitant. C'est une posture qui évite les biais d'injonctions comportementales fondées sur des considérations techniques peu entendables par l'habitant qui caractérisaient les premiers guides d'écogestes.

Une des limites de ce guide est qu'il n'aborde finalement pas les questions d'adaptation et de confort d'été car il se centre sur la réduction des consommations d'énergie et, de ce fait, reste cantonné aux questions d'atténuation. Cette remarque montre la relative étanchéité des domaines d'action et surtout la séparation des corpus entre « sobriété et atténuation » d'un côté et « confort et adaptation » de l'autre. Cette limite est importante à souligner car elle témoigne d'une relative « étanchéité » des savoirs et des pratiques entre atténuation et adaptation qui transparait encore dans les guides sur les écogestes. Ce point constitue un levier à prendre en considération en faveur d'une démarche d'amélioration de ces guides qui devront mieux concilier atténuation et adaptation du point de vue l'usager ou de l'habitant.

Pour faciliter l'appropriation des écogestes par les habitants : le découpage proposé est celui des pièces du logement ou de la maison, afin de les ancrer dans les pratiques de vie quotidienne et les caractéristiques du logement, ce qui est une information importante pour élaborer des vidéos sur les écogestes.

Une évolution consistant à indiquer les évaluations d'économies obtenues par les écogestes

Les analyses et les guides produits prennent de plus en plus en compte les effets possibles des écogestes sur les économies d'énergie et leur évaluation. La plupart des guides présentés s'accordent sur un ensemble d'évaluations « moyennées » qui précisent des ratios exprimés en pourcentage et des correspondances entre les écogestes susceptibles d'être réalisés et les économies attendues. Ces évaluations visent à motiver l'habitant dans la réalisation de ces écogestes.

Parmi les évaluations les plus citées, on peut lister les suivantes qui concernent l'utilisation de la climatisation :

- 1°C en moins dans le réglage de la température assurée par la climatisation, c'est près de 15% en plus sur la consommation électrique (Guide du comité territorial pour la maîtrise de l'énergie de Nouvelle-Calédonie) ;
- Jusqu'à 25 % d'économie réalisée dans l'utilisation de la climatisation en décalant le point de consigne à 26°C au lieu de 20°C (Guide Clim'éco) ;
- Jusqu'à 15 % d'économie sur la consommation du climatiseur en protégeant les fenêtres par un occultant : rideaux ou brise-soleil, revêtement réfléchissant, mise en place d'écran ou de casquette ; économies supplémentaires en nettoyant régulièrement le climatiseur (Guide Clim'éco).

D'autres évaluations concernent des conseils techniques sur le choix des appareils, l'agencement des espaces et des teintes renvoyant le rayonnement du soleil :

- Une teinte de toiture claire peut réduire jusqu'à 40 % les apports de chaleur dans un logement (même guide), mais cela peut aussi dégrader le confort thermique en hiver en France métropolitaine.
- L'installation d'un chauffe-eau solaire individuel peut diviser la facture d'eau chaude par 2 voire par 3 en Corse (Guide ADEME).
- La façon la plus économe de faire sécher le linge et de réduire la température est de l'étendre à l'air libre ou bien de le mettre proche d'un ventilateur (sensation de rafraîchissement).

Ces différentes citations permettent de préciser ce sur quoi les différents acteurs s'accordent et comment ils justifient l'importance d'adopter des écogestes **pour des habitants en leur apportant des repères et des évaluations leur permettant d'évaluer ce que peut leur apporter la mise en œuvre des écogestes en termes d'économies d'énergie mais aussi de confort**. Toutefois, ces évaluations sur ce que les habitants peuvent attendre des conseils promulgués, ne peuvent constituer à elles seules un moyen de les inciter à passer à l'acte.

Une évolution qui tend à restituer les écogestes dans un développement de la sobriété et de l'adaptation au changement climatique ?

On a vu que les nouveaux guides, tel celui des 100 écogestes de la démarche Déclics, insistent sur la sensibilisation et la démarche collective nécessaires pour faire prendre conscience aux habitants de leur rôle et pouvoir d'agir en faveur de leur confort mais aussi des ressources de la planète. Ils mettent aussi l'accent sur l'importance de resituer ces écogestes dans des pratiques de sobriété ou bien d'adaptation au changement climatique. Cette sensibilisation donne un sens ou une signification nouvelle aux écogestes pour l'habitant. Il ne s'agit plus uniquement d'adapter ses comportements pour optimiser ses consommations et son confort, mais de devenir un contributeur parmi d'autres à la réduction de l'empreinte environnementale de ses pratiques de vie en incorporant cet enjeu dans ses habitudes de vie.

A la différence de la notion d'écogeste qui intègre une dimension comportementale et individuelle forte, et parfois technocentrée au sens où l'habitant se trouve enjoint de « mieux » utiliser ses équipements et son logement en s'appuyant sur les conseils techniques qui lui sont promulgués, les notions de sobriété et d'adaptation au changement climatique apportent une dimension plus collective (de mutualisation d'un certain nombre de risques et d'économies, d'espaces et d'équipements) et une dimension processuelle (d'expérimentations, d'apprentissage, de montée en compétences, d'expertise d'usage, de pouvoir d'agir, etc.). Ces dimensions sont intéressantes à considérer, afin de faire évoluer l'analyse des écogestes et de l'adapter aux défis énergétiques et climatiques actuels. Elles sont aussi jugées pertinentes pour entrevoir les dimensions sociales notamment de solidarité des réponses à apporter à des défis (Association negaWatt, 2018).

Or ces deux enjeux de sobriété et d'adaptation présentent une plus grande possibilité d'interroger :

- Les modes et pratiques de vie au regard des significations et des **valeurs** qu'ils recouvrent pour les habitants (des familles ne souhaitent pas laver leur linge à 30 degrés de peur que les enfants arrivent tâchés à l'école) ;
- Les **contraintes d'usage (des lieux habités, par exemple)** auxquels les habitants peuvent être confrontés, selon leur situation socio-familiale de vie, qui parfois les empêchent de mettre en œuvre des écogestes (logements non traversants empêchant une ventilation naturelle, donnant sur des voies bruyantes empêchant d'ouvrir les fenêtres la nuit, par exemple)
- Les **formes** de solidarité et de **mutualisation possibles** qui peuvent apporter un saut quantitatif et qualitatif dans des trajectoires de transition et l'écologisation des pratiques de vie quotidienne.

Aujourd'hui, l'hybridation des savoirs entre ceux capitalisés par des ingénieurs et ceux issus des SHS (Sciences Humaines et Sociales) ne semble pas être assez développée, afin de favoriser ce croisement de regards permettant d'opérer ce saut qualitatif.

On constate bien une évolution de **la notion de confort qui intègre davantage la perception et le ressenti (physiologique, psychologique et mental) des habitants vis-à-vis du changement des ambiances et du climat. Mais les conditions sociologiques de l'action ou de l'inaction sont encore peu explorées**, ainsi que celles pouvant expliquer les inerties et les verrous existants dans les changements des pratiques. C'est un axe de réflexion et de recherche qu'il conviendra de davantage explorer et sur lequel certains programmes CEE ont tenté d'avancer, tel que le programme ECCO DOM que le CSTB a coordonné avec l'USHOM (Union Sociale pour l'Habitat des Outre-Mer).

Une intégration dans les guides des apports d'expertises issues de l'ingénierie et de la recherche

Les **guides** sur les écogestes **prennent surtout en compte les apports d'expertises des professionnels** du bâtiment et de l'énergie, et ceux de **l'ingénierie** et de la **recherche**, mais finalement peu les approches des SHS (Sciences Humaines et Sociales).

On constate cette dernière évolution dans les guides élaborés des groupements de professionnels et de chercheurs, tel le cercle Promodul INEF qui a sorti en avril 2020, un guide intitulé « Améliorer la qualité de vie et le confort des occupants : 5 enseignements à retenir » (Cercle Promodul INEF4, 2020) et le livre blanc de Adexsi intitulé « la gestion énergétique naturelle » (ADEXSI, n.d.). On voit ainsi se développer une expertise scientifique et technique sur les zones et les critères du confort (d'été, visuel, acoustique, etc.), qui est de plus en plus appréhendé en mettant en lien des connaissances physiques et physiologiques, mais sans réellement introduire pour l'instant des analyses de sciences humaines et sociales. Ces expertises sont affinées et consolidées pour justifier des choix faits dans l'amélioration du cadre bâti et les écogestes susceptibles de parvenir à des zones de confort acceptables pour l'occupant.

Le confort notamment d'été est défini au point de rencontre de ces caractéristiques techniques de l'habitat (enveloppe avec une bonne inertie, vitrage performant, etc.) et du fonctionnement physiologique des occupants. Cependant, **cette approche techniciste du confort accorde peu de référence aux approches sociologiques du confort davantage basées sur le ressenti et la perception des espaces intérieurs et extérieurs, la pratique de l'environnement proche et du voisinage, la proximité aux équipements et espaces de fraîcheur** et de ressourcement, et l'attachement affectif aux lieux et espèces, etc. comme cela a été exposé dans le chapitre 0. Ces critères et celui aussi de pouvoir agir sur son milieu de vie jouent sur le sentiment de confort, ou l'appréhension de l'inconfort, d'après les sociologues.

Des améliorations à apporter dans les différentes appréhensions du confort et de l'inconfort d'été et le croisement des approches physiques, physiologiques ou sociologiques ?

Le Guide Bio-Tech « Confort d'été passif » produit par l'association de l'ICEB (ICEB, 2014) nous semble important à signaler pour mieux indiquer les avancées sur le confort et l'inconfort et identifier le chemin qui reste à parcourir pour un meilleur croisement avec les SHS pour ce type d'outils. Ce guide vise à vulgariser les normes, standards, méthodes de calcul et solutions architecturales et techniques du confort d'été passif. La conception de nouveaux bâtiments à faibles besoins de chauffage, bien isolés et profitant des apports solaires, peut générer des inconforts en été si cette question n'est pas traitée en simultané. Elle oblige les concepteurs à s'emparer de cette problématique. Elle préconise que bien en été, sans climatisation ni rafraîchissement, c'est possible.

Loin du recours habituel aux systèmes énergivores, ce guide démontre que les solutions aux problèmes du confort d'été relèvent à la fois des comportements, du paysage, avec l'aménagement et la végétalisation des espaces extérieurs, et aussi de l'architecture, avec des bâtiments conçus avec une enveloppe rigoureusement fermée aux apports solaires d'été et largement ouverte à la ventilation naturelle.

Selon ce rapport très dense et argumenté, la « conception du confort d'été passif implique des arbitrages « été/hiver » et une approche globale, dès la conception, qui va de l'environnement extérieur à l'aménagement et à l'utilisation du bâtiment, dans une logique vertueuse » (p. 6). Elle implique aussi une adaptation des usages et des espaces dans le temps. En « bridant fortement l'adaptation comportementale spontanée, tant spatiale (poste de travail fixe, appartements non traversants, etc.) que temporelle (horaires de travail, rythmes sociaux, etc.), les

environnements et modes de vie contemporains imposent soit une adaptation physiologique qui se révèle souvent pénible ou inconfortable comme nous allons le voir, soit une gestion thermique du bâtiment » (p. 7).

Il faut donc tout faire pour réduire ce dilemme cornélien, entre « satisfaire son confort individuel immédiat » et « éviter le changement climatique de demain » :

- En redonnant plus de liberté d'adaptation comportementale aux individus,
- En considérant que le devoir de conseil des programmistes, AMO, ou architectes concerne aussi l'usage des bâtiments durables, par exemple l'habillement, la gestion des horaires et des lieux, etc. (p.8).

Ainsi, « nos sensations de confort et d'inconfort ne relèvent pas seulement de notre physiologie ou même de nos émotions et de notre culture. Elles mettent aussi en jeu nos capacités d'adaptation » (p. 8). Par ailleurs, la littérature scientifique relie souvent les attitudes et comportements environnementaux, d'une part, et les valeurs, d'autre part.

Ainsi, « le discours moralisateur ne semble pas marcher (ce qui explique au moins en partie les résultats limités des politiques de conscientisation ou de dramatisation) : seules les motivations profondes (constitutives de nos préférences spontanées et idéaux) ou la conviction personnelle, qui donnent son sens à notre vie et nous permet de trouver l'énergie d'anticiper et d'agir dans le long terme (projets, visions, etc.) » (p. 12).

Les paramètres d'inconfort sont localisés et sont liés à l'hétérogénéité des ambiances. C'est notamment « l'inconfort par asymétrie de rayonnement. Il provient d'une trop grande différence de température de rayonnement de paroi de chaque côté du corps, et aussi par la différence de température entre la tête et les pieds (la température du sol) » (p. 15).

Les guides actuels se réfèrent à des approches biophysiques des écogestes qui incorporent des éléments de psychologie environnementale et du ressenti de l'occupant, améliorant les connaissances entre les caractéristiques techniques des environnements et des ambiances, et celles du ressenti et du comportement des usagers et habitants. Ils intègrent notamment les interactions entre les paramètres d'ambiance et les paramètres de comportement (habillement, activité, ressenti corporel et du confort, etc.).

Les approches des écogestes et leur incorporation dans des guides se réfèrent donc peu à des approches SHS. Des thèmes tels que les valeurs et les pratiques des habitants, la relation tissée avec leur logement et leur environnement, les contraintes engendrées par ces environnements de vie qui peuvent constituer des freins et des verrous à l'adoption des écogestes sont encore peu mobilisées.

Il convient de remarquer que les approches SHS ont développé des analyses critiques de la manière dont les institutions et collectivités et acteurs professionnels appréhendent les écogestes, surtout lorsqu'ils sont considérés comme des injonctions à des comportements adaptatifs de la part des habitants qui prennent peu en compte leurs conditions de logements, leurs marges d'action limitées sur leur confort, les sens et significations que peuvent revêtir ces écogestes dans des environnements bâtis spécifiques. La critique se fonde sur la reconnaissance d'arbitrages impossibles à réaliser par les habitants qui se trouvent soumis à des injonctions d'adapter leurs comportements sans toujours disposer des moyens ni des conditions leur permettant de déployer une capacité d'agir dans ce sens.

4.3 Conclusion : identification des écogestes pour le confort d'été et nécessité d'une enquête sociologique dans le projet RENOPTIM

L'analyse rétrospective des différents guides des écogestes témoigne du développement d'une approche plus compréhensive visant à informer le citoyen sur les marges d'action dont il dispose pour réduire ses consommations d'énergie et de ressources, et développer des pratiques qui l'aident à améliorer son confort d'été. Cette approche compréhensive se traduit par des informations données à l'habitant sur le mieux-être qu'il peut tirer de certains gestes visant à rafraîchir et ventiler son logement, et les économies qu'il peut attendre d'une utilisation à bon escient des équipements (stores, brasseurs d'air, appareils de rafraîchissement et de chauffage, etc.), visant à temporiser les interfaces entre le bâti et les espaces extérieurs ou l'environnement qui peuvent aussi être obtenues par végétalisation.

La plupart des guides proposent des présentations qui s'écartent du découpage en « corps de métiers » du logement (ventilation, chauffage, ouvrants, etc.) pour aller vers une description plus proche d'une mise en situation des usages au quotidien de l'habitant dans chacune des pièces du logement et à différents moments ou saisons (jour/nuit, été/hiver, etc.). L'objectif est de resituer les écogestes dans des habitudes de vie et des agencements du logement, afin qu'ils soient perçus par l'habitant comme aisés à mettre en œuvre et à sa portée

par des gestes « simples » et des « astuces » techniques contribuant à une « expertise d'usage ». Ces guides visent ainsi à proposer des repères sur des pratiques possibles dont l'adoption se traduit par des co-bénéfices attendus sur les économies d'énergie et la capacité de l'habitant à arbitrer ces choix selon ses attentes de confort et d'économies. Certains vont même jusqu'à indiquer des démarches de sobriété dont l'habitant peut devenir l'initiateur par expérimentation, partage, apprentissage et capitalisation. En ce sens, ces guides représentent **l'habitant comme pouvant être l'initiateur « éclairé » ou « raisonné » de ses pratiques de sobriété.**

Les différents enseignements tirés de cette analyse sur l'évolution des guides des écogestes nous conduisent à favoriser un support vidéo de sensibilisation aux écogestes qui resitue l'occupant dans son logement, en lui indiquant les gestes essentiels qu'il peut adopter de jour comme de nuit, en cas de fortes chaleurs. Cela nous permet aussi de sélectionner 6 écogestes qui nous apparaissent importants pour permettre à l'habitant :

- **De mieux se protéger des apports solaires ;**
- **De mieux ventiler la nuit ;**
- **De mieux utiliser des ventilateurs ;**
- **D'éviter les apports de chaleur par ses propres pratiques de vie ;**
- **D'avoir recours à la végétalisation ;**
- **D'utiliser en dernier lieu la climatisation, s'il ne peut pas faire autrement et qu'il est particulièrement vulnérable aux fortes chaleurs.**

Cette analyse des guides nous a enfin permis de sélectionner des messages clairs, utilisés avec un langage simple, explicite et facile à comprendre, qu'il paraît important d'intégrer dans les supports vidéo qui seront développés ultérieurement.

Si cette approche s'écarte d'une approche normative caractérisée par des injonctions comportementales et accorde une attention plus grande à une « capacité d'agir » de l'habitant, on peut toutefois s'interroger sur la faible prise en compte :

- **Des caractéristiques des logements et des statuts d'occupation** (locataires du parc social, par exemple) qui limitent parfois cette capacité d'agir de l'habitant, celui-ci n'ayant pas toujours la possibilité d'intervenir sur des transformations de son logement dans l'habitat social par exemple ;
- **Des facteurs environnementaux, socio-familiaux, économiques, culturels, générationnels** qui peuvent expliquer les difficultés, les freins comme les prédispositions à la mise en œuvre des écogestes ;
- **Des pratiques au quotidien déjà développées par les habitants pour compenser des « mal-adaptations » de leur logement qu'il conviendrait d'analyser pour mieux comprendre le vécu du confort d'été** dans différentes situations réelles d'habiter et les marges possibles d'amélioration de l'habitat qui seraient pensées en considérant les déterminants des pratiques des habitants.

Une étude sociologique, réalisée sur un autre projet CEE nommé ECCO DOM menée par le CSTB, montre ainsi que la mise en œuvre des écogestes dans l'habitat social se confronte à :

- Des caractéristiques des logements qui en rendent l'application délicate : manque de stores extérieurs, de casquettes pare-soleil, de logements traversants, etc. ; logements dont l'environnement urbain est bruyant qui limitent les possibilités d'aération nocturne, par exemple ;
- Des spécificités socio-familiales qui n'en favorisent pas l'adoption : familles avec beaucoup d'enfants en bas âge plus difficiles à sensibiliser, familles pauvres n'ayant pas les moyens d'adapter leur logement, etc. ;
- Des valeurs héritées de pratiques de vie en lien avec la nature et le vivant qui favorisent une sensibilité environnementale propice à l'adoption d'écogestes, mais plus difficile à pérenniser dans l'habitat social.

Ainsi, les réflexions ultérieures menées dans le programme RENOPTIM **devront intégrer l'analyse de ces facteurs propres aux caractéristiques du bâti, au statut d'occupation des habitants (locataires ou propriétaires, par exemple), à l'environnement de vie et aux milieux urbains habités, mais aussi aux situations socio-familiales qui peuvent expliquer les pratiques adoptées et les contraintes rencontrées** comme les attitudes, ressentis et marges d'action possibles des habitants sur le confort d'été.

C'est pourquoi dans le cadre du projet RENOPTIM, une étude sociologique sera menée auprès des habitants et des bailleurs en intégrant ces facteurs ou variables qui peuvent expliquer les écogestes adoptés comme les contraintes rencontrées dans leur mise en œuvre.

CONCLUSION

Ce rapport a présenté un panorama des connaissances et les différents verrous scientifiques à propos de l'impact des fortes chaleurs sur les occupants dans les logements du parc de bâtiments français.

Tout d'abord, la problématique de la climatisation pénétrante en France a été introduite en regard des attentes de confort de la population française et de l'augmentation des températures et du nombre et intensité des canicules. Sans la mise en place de solutions d'adaptations passives ou la combinaison de solutions passives et actives, l'ADEME prédit la pénétration de la climatisation dans 80% des logements français en 2050. Ces attentes de confort sont mises en perspective une fois connues les difficultés des bailleurs à conjuguer à la fois les objectifs de décarbonation et d'adaptation aux fortes chaleurs lors des réhabilitations de bâtiments, à la fois par manque d'incitations, d'expérience, de compétences et de budget.

Les différents critères qui conditionnent la vulnérabilité d'un bâtiment à la surchauffe ont été identifiés et classifiés et l'analyse montre que leur importance relative est très variable suivant les situations. Elle ne peut se réduire à une classification fondée sur la représentation des modes constructifs. En ce qui concerne le parc de bâtiments existants, alors que l'architecture n'est *a priori* pas modifiable, l'enveloppe, les systèmes et le comportement des occupants sont *a priori* modulables, suivant les objectifs d'atténuation et les contraintes terrains. Différents paramètres liés à la réduction des apports solaires, à la capacité du bâtiment à stocker ou déphaser la chaleur et sa capacité à l'évacuer par ventilation ont été répertoriés. L'outil RENOPTIM permettra, à partir des données de la Base de Données Nationale des Bâtiments complétées par celles des bailleurs, de cibler les bâtiments les plus susceptibles de présenter des surchauffes pendant les vagues de chaleur parmi un parc de bâtiments donné.

L'impact de la surchauffe sur le confort et le stress thermique des occupants du bâtiment a été explicité. Il a été mis en exergue qu'aujourd'hui, les modèles et indicateurs pour évaluer l'inconfort en périodes de surchauffe sont limités, à la fois dans leur période de validation et parce que l'indicateur ne permet pas d'évaluer un risque sanitaire lié à une durée d'exposition à la chaleur. Avec sa campagne expérimentale, le projet RENOPTIM a pour objectif de raffiner ces indicateurs afin de mieux définir les zones de confort ou d'inconfort acceptables, spécifiques à la population française métropolitaine qui ne mettent pas les occupants en danger. La définition plus précise de la limite du confort devrait permettre *in fine* de limiter le recours à la climatisation à la fois pour prendre en compte cette contrainte lors de la rénovation thermique d'un bâtiment et pour orienter les campagnes de prévention auprès des occupants.

Enfin, une analyse des différents guides sur les écogestes au cours des dernières années a mis en avant les évolutions des parties pris ainsi que la prise en compte du confort d'été dans ces guides. Dans le cadre du projet RENOPTIM, une étude sociologique sera mise en place afin de mieux comprendre les différentes situations qui peuvent expliquer les pratiques des locataires. Des vidéos « écogestes » pour le confort d'été seront créées et mises à disposition des bailleurs à destination de leurs locataires, afin de les accompagner pour qu'ils développent des pratiques les aidant à améliorer leur confort d'été. Ces vidéos seront montrées dans un premier temps à travers une démarche d'interview des locataires et des chargés de clientèle afin de mieux comprendre leurs problématiques, leurs limites à l'application de ces écogestes et préconiser les chemins de mises à disposition efficaces pour ce type de média et de public. Enfin, les résultats de cette étude sociologique seront utilisés pour compléter l'interprétation des mesures et améliorer la prise en compte du comportement des occupants en périodes de fortes chaleurs dans les modèles physiques.

ANNEXE I : INDICES DE STRESS THERMIQUE

Wet Bulb Globe Temperature

L'indice Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) a été développé par les forces armées des Etats-Unis afin d'estimer le danger lié au stress thermique dans les campus d'entraînement (Budd, 2008). Il est actuellement adopté par la norme internationale ISO 7243 (ISO 7243, 2020) pour déterminer l'effet de la température de l'air, de l'humidité relative, de la vitesse de l'air et de la température radiante sur la santé du corps humain.

L'indice WBGT est une moyenne pondérée de la température sèche, de la température humide et de la température de globe noir :

$$WBGT = 0,7 \times T_{wb} + 0,2 \times T_{globe} + 0,1 \times T_{db} \quad (2)$$

avec :

T_{wb} : Température du bulbe humide [°C]

T_{globe} : Température de globe noir [°C]

T_{db} : Température sèche de l'air [°C]

La température sèche est la température mesurée par un thermomètre dont le bulbe est exposé à l'air ambiant dont souhaite mesurer sa température. La température humide est la température mesurée par un thermomètre dont le bulbe est couvert par une mèche saturée d'eau. La température humide est toujours inférieure à la température sèche sauf si l'humidité relative est égale à 100% (Figure 25).

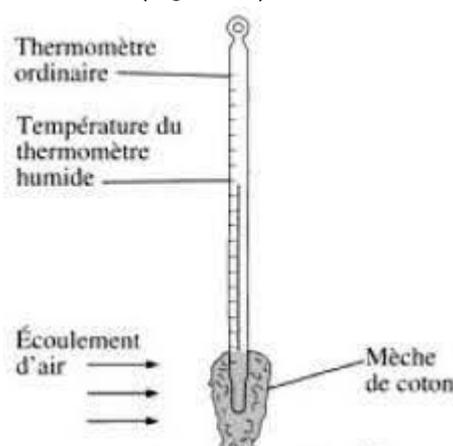


Figure 25 : Mesure de la température humide

La température du globe noir, comme son nom l'indique, est la température mesurée à l'intérieur d'un globe de métal noir creux d'un diamètre égal à 15 cm. La température mesurée est utilisée pour le calcul de la température radiante (Figure 26).



Figure 26 : Globe noir pour la mesure de la température radiante

Dans les environnements uniformes où la température radiante est proche de la température de l'air, l'équation simplifiée de l'indice WBGT s'écrit :

$$WBGT = 0,7 \times T_{wb} + 0,3 \times T_{globe}$$

Cet indice est généralement utilisé pour les ambiances extérieures où les sujets effectuent une activité physique. Le Tableau 17 donne les limites des intensités des activités physiques pour certaines gammes de WBGT.

Tableau 17 : Activités autorisées pour plusieurs niveaux de WBGT (US, Bureau of Medecine and Surgery, n.d.)

WBGT [°C]	Activités autorisées
26,6 – 29,3	Précaution requise dans la planification d'un exercice intensif pour les personnes non acclimatées
29,4 – 31,0	Les activités physiques intenses doivent être évitées pour les nouvelles personnes non acclimatées pendant les 3 premières semaines d'exposition à la chaleur
31,1 – 32,2	Activités intenses réduites pour toutes les personnes ayant moins de 12 semaines d'entraînement dans les ambiances chaudes
> 32,2	Les activités intenses sont interdites pour tous.

Le WBGT est également utilisé dans la norme ISO 7243 (ISO 7243, 2017) pour évaluer l'effet de la chaleur sur une personne pendant son exposition au cours d'une journée de travail. Le Tableau 18 donne les limites de référence de WBGT en fonction du métabolisme et de l'acclimatation à la chaleur.

Tableau 18 : Limites de référence de WBGT en fonction du métabolisme (ISO 7243)

Métabolisme [W]	Limite pour des personnes acclimatées à la chaleur [°C]	Limite pour des personnes non acclimatées à la chaleur [°C]
100 – 125	33	32
125 – 235	30	29
235 – 360	28	26
360 – 465	26	23
> 465	25	20

Heat stress Index

L'indice Heat Stress Index (HSI) a été développé par Belding et Hatch (Belding and Hatch, 1955) dans le but d'estimer l'effet du stress thermique dans une ambiance thermique donnée. Cet effet est estimé en fonction de la capacité évaporatoire du corps humain. Le HSI s'exprime par :

$$HSI = \frac{\text{taux d'évaporation requis } E_{req}}{\text{taux d'évaporation maximal } E_{max}} \times 100 \quad (3)$$

Les taux d'évaporation requis et maximal sont calculés en fonction de la température de l'air et de l'humidité relative en supposant que la température cutanée est égale à 35°C. Les effets du stress thermique sur le corps humain selon l'indice HSI sont donnés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : Effets du stress thermique sur le corps humain selon l'indice HSI

		Humidité relative [%]												
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Température [°C]	27	27	27	27	27	28	28	28	29	29	29	30	30	31
	28	28	28	28	29	29	29	30	31	32	32	33	34	35
	29	29	29	29	30	31	32	32	33	34	36	37	38	39
	30	30	31	31	32	33	34	35	36	38	39	41	42	44
	31	31	32	33	34	35	37	38	39	41	43	45	47	49
	32	33	33	35	36	38	39	41	43	45	47	50	53	56
	33	34	36	37	38	41	42	44	47	49	52	55	58	
	34	36	38	39	41	43	46	48	51	54	57			
	36	38	40	42	44	47	49	52	56					
	37	41	43	45	47	51	53	57						
	38	43	46	48	51	54								
	39	46	48	51	54									
	40	48	51	55										
	41	51	54											
42	54													
43	58													

Warning	Warning extrême	Risque	Risque extrême
Fatigue possible	Coup de soleil, crampes musculaires, épuisement par la chaleur possible	Coup de soleil, crampes musculaires, épuisement par la chaleur	Coup de chaleur ou coup de soleil

Humidex

L'indice Humidex a été développé au Canada par J. M. Masterton et F. A. Richardson (Masterton, 1979) pour intégrer les effets combinés de la température et de l'humidité. Il est calculé par :

$$Humidex = T_{air} + 0,5555 \times \left(6,112 \times 10^{7,5 \times \frac{T_{air}}{237,7 + T_{air}}} \right) \times \frac{HR}{100} \quad (4)$$

Les effets du stress thermique sur le corps humain selon l'indice Humidex sont donnés dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Effets du stress thermique sur les humains selon Humidex (Masterton, 1979)

		Humidité relative [%]								
		20	30	40	50	60	70	80	90	100
Température [°C]	21	-	-	-	22	24	25	26	28	29
	25	-	-	26	28	30	32	33	35	37
	30	-	31	34	36	38	41	43	45	48
	31	-	33	35	38	40	43	45	48	50
	32	-	34	37	40	42	45	47	50	53
	33	-	36	39	41	44	47	50	52	55
	34	-	37	40	43	46	49	52	55	58
	35	-	38	42	45	48	51	54	57	-
	36	-	40	44	47	50	53	57	60	-
	37	-	42	45	49	52	56	59	-	-
	38	40	43	47	51	54	58	-	-	-
	39	41	45	49	53	57	-	-	-	-
	40	43	47	51	55	-	-	-	-	-
	41	44	48	53	57	-	-	-	-	-
	42	46	50	54	-	-	-	-	-	-
43	47	51	56	-	-	-	-	-	-	

Aucun risque ni inconfort	Inconfort palpable mais pas de risque majeur	Très inconfortable	Coup de chaleur, danger

Heat Index

Le Heat Index (HI) est un indice qui combine la température de l'air et l'humidité relative, dans des zones d'ombre, pour simuler la température perçue par le corps humain. Cet indice a été développé par Steadman en 1979 (Steadman, 1979). Le HI s'exprime par l'équation suivante :

$$HI = c_1 + c_2 \times T_{air} + c_3 \times HR + c_4 \times T_{air} \times HR + c_5 \times T_{air}^2 + c_6 \times HR^2 + c_7 \times T_{air}^2 \times HR + c_8 \times T_{air} \times HR^2 + c_9 \times T_{air}^2 \times HR^2$$

avec :

T_{air} : Température de l'air [°C]

HR : Humidité relative [%]

c_1 : -8,87469475556

c_2 : 1,61139411

c_3 : 2,33854883889

c_4 : -0,14611605

c_5 : -0,012308094

c_6 : -0,0164248277778

c_7 : $2,211732 \times 10^{-3}$

c_8 : $7,2546 \times 10^{-4}$

c_9 : $3,582 \times 10^{-6}$

Les effets du stress thermique sur le corps humain selon l'indice HI sont donnés dans le Tableau 21.

Tableau 21 - Effets du stress thermique sur le corps humain selon l'indice HI

		Humidité relative [%]										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Température [°C]	21	64	65	66	67	68	69	70	70	71	71	72
	23,9	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
	26,6	73	75	77	78	79	81	82	85	86	88	91
	29,4	78	80	82	84	86	88	90	93	97	102	108
	32,2	83	85	87	90	93	96	100	106	113	122	
	35	87	90	93	96	101	107	114	124	136		
	37,8	91	95	99	104	110	120	132	144			
	40,6	95	100	105	113	123	135	149				
	43,3	99	105	112	123	137	150					

Fatigue	Coup de soleil, crampes musculaires, épuisement physique	Épuisement, coup de chaleur possible	Risque élevé de coup de chaleur / coup de soleil

Universal Thermal Climate Index

L'indice Universal Thermal Climate Index (UTCI) est un indice développé par la Société Internationale de Biométéorologie (ISB) et le COST Action 730 (Bröde et al., 2012) pour estimer la réaction physiologique du corps humain dans une ambiance thermique donnée. Cet indice est basé sur le modèle thermophysique dynamique de Fiala et al. (Fiala et al., 1999). Il est défini comme la température équivalente causant, pour des conditions de référence, les mêmes réponses physiologiques que dans l'ambiance étudiée. Les conditions de références sont définies par un métabolisme relatif à une vitesse de marche égale à 4 km/h, une vitesse de l'air de 0,5 m/s et une humidité relative égale à 50%. L'échelle de sensation thermique en fonction de la température équivalente calculée grâce à l'indice UTCI est donnée dans le Tableau 22.

Tableau 22 : Catégories de stress thermique selon l'indice UTCI, construites sur les réponses physiologiques du corps humain, issu de (Błażejczyk et al., 2013)

UTCI (°C) range	Stress Category	Physiological responses
above +46	extreme heat stress	<ul style="list-style-type: none"> - increase in T_{re} time gradient - steep decrease in total net heat loss - averaged sweat rate >650 g/h, steep increase
+38 to +46	very strong heat stress	<ul style="list-style-type: none"> - core to skin temperature gradient < 1K (at 30 min) - increase in T_{re} at 30 min
+32 to +38	strong heat stress	<ul style="list-style-type: none"> - dynamic Thermal Sensation (DTS) at 120 min >+2 - averaged sweat rate > 200 g/h - increase in T_{re} at 120 min - latent heat loss >40 W at 30 min - instantaneous change in skin temperature > 0 K/min
+26 to +32	moderate heat stress	<ul style="list-style-type: none"> - change of slopes in sweat rate, T_{re} and skin temperature: mean (T_{skm}), face (T_{skfc}), hand (T_{skhn}) - occurrence of sweating at 30 min - steep increase in skin wettedness

REFERENCES

- 3F, 2018. Guide des écogestes [WWW Document]. URL <https://www.groupe3f.fr/3f/mediacenter/publications/guide-des-eco-gestes> (accessed 7.19.23).
- ADEME, 2022. Eau et énergie : Comment réduire la facture ?
- ADEME, 2021. La climatisation dans le bâtiment - Etat des lieux et prospective à 2050.
- ADEME, 2020. Chaud dehors, frais dedans - Garder son logement frais en été.
- ADEME, 2019. Guide des écogestes dans l'habitat.
- ADEXSI, n.d. Livre Blanc Confort : Les leviers de la gestion naturelle du confort. URL <https://www.adexsi.fr/livre-blanc/confort>
- Agence Parisienne du Climat, 2020. [Guide] 100 gestes pour réduire ses consommations. Agence Parisienne du Climat.
- Alessandrini, J.-M., Ribéron, J., Da Silva, D., 2019. Will naturally ventilated dwellings remain safe during heatwaves? *Energy and Buildings* 183, 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.033>
- Anderson, M., Carmichael, C., Murray, V., Dengel, A., Swainson, M., 2013. Defining indoor heat thresholds for health in the UK. *Perspect Public Health* 133, 158–164. <https://doi.org/10.1177/1757913912453411>
- Arens, E., Humphreys, M.A., de Dear, R., Zhang, H., 2010. Are 'class A' temperature requirements realistic or desirable? *Building and Environment* 45, 4–10.
- Armstrong, C.G., Kenney, W.L., 1993. Effects of age and acclimation on responses to passive heat exposure. *Journal of Applied Physiology* 75, 2162–2167. <https://doi.org/10.1152/jappl.1993.75.5.2162>
- Aschoff, J., 1983. Circadian control of body temperature. *Journal of Thermal Biology* 8, 143–147. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(83\)90094-3](https://doi.org/10.1016/0306-4565(83)90094-3)
- Aschoff, J., Wever, R., 1958. Kern und schale im Warmehaushalt des Menschen. *Naturwissenschaften* 477–485.
- ASHRAE Standard 55-2004, 2004. Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, ANSI/ASHRAE, Atlanta.
- Association française du froid, 2020. Guide sur les CLIM'ECOgestes.
- Association negaWatt, 2018. La sobriété énergétique : Pour une société plus juste et plus durable.
- Attia, M., Engel, P., Hildebrandt, G., 1980. Quantification of thermal comfort parameters using a behavioural indicator. *Physiology & Behavior* 24, 901–909. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(80\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0031-9384(80)90148-1)
- Attia, S., Benzidane, C., Rahif, R., Amaripadath, D., Hamdy, M., Holzer, P., Koch, A., Maas, A., Moosberger, S., Petersen, S., Mavrogianni, A., Maria Hidalgo-Betanzos, J., Almeida, M., Akander, J., Khosravi Bakhtiari, H., Kinnane, O., Kosonen, R., Carlucci, S., 2023. Overheating calculation methods, criteria, and indicators in European regulation for residential buildings. *Energy and Buildings* 292, 113170. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113170>
- Attia, S., Rahif, R., Corrado, V., Roonen Levinson, Laouadi, A., Wang, L., Sodagar, B., Anais Machard, Rajat Gupta, Olesen, B.W., Zinzi, M., Heiselberg, P., Hamdy, M., 2021. Framework to evaluate the resilience of different cooling technologies. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33998.59208>
- Averbeck, B., Seitz, L., Kolb, F.P., Kutz, D.F., 2017. Sex differences in thermal detection and thermal pain threshold and the thermal grill illusion: a psychophysical study in young volunteers. *Biol Sex Differ* 8, 29. <https://doi.org/10.1186/s13293-017-0147-5>
- Baker, L.B., 2019. Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature* 6, 211–259. <https://doi.org/10.1080/23328940.2019.1632145>
- Belding, H.S., Hatch, T.F., 1955. Index for evaluating Heat Stress in Terms of resulting Physiological Strains. *Heating, Piping and Air Conditioning* 27, 129–36.
- Bigouret, A., 2012. Caractérisation des différences interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesures biophysiques cutanées (PhD Thesis). INSA de Lyon.
- Blatteis, C.M., 1998. Physiology and pathophysiology of temperature regulation. World Scientific.
- Błażejczyk, K., Jendritzky, G., Bröde, P., Fiala, D., Havenith, G., Epstein, Y., Psikuta, A., Kampmann, B., 2013. An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Geogr. Pol.* 86, 5–10. <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>

- Bornarel, A., Brindel Beth, S., Brisedou, B., Bussolino, E., Cortesse, S., Fradin, J., Mansouri, Y., Monaco, F.-X., Raoust, M., Serieis, M., 2014. Les guides biotech : Confort d'été passif. Groupe de travail coordonné par l'ICEB.
- Bretin, P., Ledrans, M., Vandentorren, S., Zeghnoun, A., 2005. Etude des facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003. Juillet 2004.
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., 2012. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol* 56, 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Budd, G., 2008. Wet-bulb globe temperature (WBGT)-its history and limitations.pdf. *Journal of Science and Medicine in Sport* 11, 20–32.
- Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., Pigeon, G., 2013. The urban weather generator. *Journal of Building Performance Simulation* 6, 269–281. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>
- Cahiers de la construction - Isoler avec les matériaux biosourcés pour un meilleur confort d'été, 2020. . Cahiers de la profession 71.
- Candas, V., 2000. Confort thermique. Ressources énergétiques et stockage. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be9085>
- Cercle Promodul INEF4, 2020. Améliorer la qualité de vie et le confort des occupants : 5 enseignements à retenir.
- Cheung, T., Schiavon, S., Parkinson, T., Li, P., Brager, G., 2019. Analysis of the accuracy on PMV – PPD model using the ASHRAE Global Thermal Comfort Database II. *Building and Environment* 153, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.055>
- CLER, 2021. Notre énergie : Transition / Territoires / Solidarité. La revue du CLERC - Réseau pour la transition énergétique.
- CLER, n.d. Familles à énergie positive - Guide des 100 écogestes.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2019. Performance énergétique des bâtiments - Ventilation des bâtiments (No. EN 16798-1:2019).
- Comité Territorial pour la Maitrise de l'Énergie, n.d. Le guide des écogestes : Comment réduire durablement sa facture d'électricité !
- CSTB, 2008. [cahiers CSTB, 2008] Améliorer le confort d'été dans l'habitat collectif - Guide de solutions pratiques à l'usage des décideurs du secteur de l'habitat social, e-Cahiers du CSTB, Cahier 3619.
- CSTB, 2007. [RT 2005 - ST 2007-001] Solution technique relative au respect des exigences de confort d'été de la RT 2005.
- CSTB, 2003. [cahiers CSTB, 2003] Guide technique - Systèmes de climatisation à faible consommation d'énergie - Guide de faisabilité et de prédimensionnement, Cahiers du CSTB, Cahier 3454.
- CSTB, 1980. [cahiers CSTB, 1980] Exemples de solutions pour faciliter l'application du règlement de construction des bâtiments d'habitation, Titre IV Confort d'été, Cahiers du CSTB 1648.
- Dagron, C., Hausfater, P., Riou, B., 2006a. Physiopathologie, présentation clinique et complications du coup de chaleur. *Journal Européen des Urgences* 19, 154–158. [https://doi.org/10.1016/S0993-9857\(06\)76349-X](https://doi.org/10.1016/S0993-9857(06)76349-X)
- Dagron, C., Hausfater, P., Riou, B., 2006b. Physiopathologie, présentation clinique et complications du coup de chaleur. *Journal Européen des Urgences* 19, 154–158. [https://doi.org/10.1016/S0993-9857\(06\)76349-X](https://doi.org/10.1016/S0993-9857(06)76349-X)
- de Dear, R., Brager, G., Cooper, D., n.d. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference 312.
- Doré, A., 2009. François Mélard (éd), Écologisation. Objets et concepts intermédiaires: Bruxelles, Peter Lang, coll. « Ecopolis », 2008. rac 3. <https://doi.org/10.3917/rac.006.0171>
- Downs, T.J., Ross, L., Goble, R., Subedi, R., Greenberg, S., Taylor, O., 2011. Vulnerability, Risk Perception, and Health Profile of Marginalized People Exposed to Multiple Built-Environment Stressors in Worcester, Massachusetts: A Pilot Project: Vulnerability, Risk Perception, and Health Profile of Marginalized People. *Risk Analysis* 31, 609–628. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01548.x>
- Dumur, E., Barnard, Y., Boy, G., 2004. Designing for Comfort. *Human Factors in Design* 111–127.
- Dunlap, R.E., Van Liere, K.D., 1978. The "New Environmental Paradigm." *The Journal of Environmental Education* 9, 10–19. <https://doi.org/10.1080/00958964.1978.10801875>
- #Écologiecheznous : découvrez les gestes simples pour améliorer votre environnement [WWW Document], 2020. . Ministère Écologie Énergie Territoires. URL <https://www.ecologie.gouv.fr/ecologiecheznous-decouvrez-10-gestes-simples-ameliorer-votre-environnement> (accessed 7.18.23).

- El Kadri, M., 2020. Thermo-neurophysiological Model of the Human Body for the Study of Thermal Comfort in Non-uniform Transient Climatic Conditions (In French). PhD Dissertation, La Rochelle University, La Rochelle.
- Fanger, P.O., 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. DANISH TECHNICAL PRESS. Copenhagen, Denmark, Technical University of Denmark.
- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., Jendritzky, G., 2012. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *Int J Biometeorol* 56, 429–441. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0424-7>
- Fiala, D., Lomas, K.J., Stohrer, M., 1999. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology* 87, 1957–1972. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.5.1957>
- Fijalkow, Y., 2011. Sociologie du logement–Paris: Ed. La Découverte, Coll. Repères.
- Filingeri, D., 2016. Neurophysiology of Skin Thermal Sensations, in: Prakash, Y.S. (Ed.), *Comprehensive Physiology*. Wiley, pp. 1429–1491. <https://doi.org/10.1002/cphy.c150040>
- Fischer, G.-N., 2011. Psychologie sociale de l’environnement - 2e édition. Dunod.
- Fischer, G.-N., 1992. Psychologie sociale de l’environnement. Dunod, Toulouse: Privat.
- Fleury-Bahi, G., Pol, E., Navarro, O. (Eds.), 2017. Handbook of Environmental Psychology and Quality of Life Research, *International Handbooks of Quality-of-Life*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31416-7>
- Gagge, A.P., Fobelets, A.P., Berglund, L.G., n.d. A STANDARD PREDICTIVE INDEX OF HUMAN RESPONSE TO THE THERMAL ENVIRONMENT 23.
- Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Hardy, J.D., 1967. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environmental Research* 1, 1–20. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(67\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0013-9351(67)90002-3)
- Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Saltin, B., 1969. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. *Environmental Research* 2, 209–229. [https://doi.org/10.1016/0013-9351\(69\)90037-1](https://doi.org/10.1016/0013-9351(69)90037-1)
- Gagnon, D., Crandall, C.G., 2018. Chapter 13 - Sweating as a heat loss thermoeffector, in: Romanovsky, A.A. (Ed.), *Handbook of Clinical Neurology*. Elsevier, pp. 211–232. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63912-7.00013-8>
- Go RénoVe Particuliers [WWW Document], 2023. URL <https://particulier.gorenove.fr/> (accessed 7.18.23).
- GoodPlanetmag, 2021. Anaïs Rocci, sociologue à l’ADEME : « l’objectif de la sobriété est de trouver un modèle de société qui permette à la fois de respecter les limites des ressources planétaires et à chaque personne de vivre décemment ». URL <https://www.goodplanet.info/2021/09/08/anais-rocci-sociologue-a-lademe-lobjectif-de-la-sobriete-est-de-trouver-un-modele-de-societe-qui-permette-a-la-fois-de-respecter-les-limites-des-ressources-planetaires-et-a/>
- [Guide] 100 gestes pour réduire ses consommations, 2020. . Agence Parisienne du Climat.
- Hanna, E., Tait, P., 2015. Limitations to Thermoregulation and Acclimatization Challenge Human Adaptation to Global Warming. *IJERPH* 12, 8034–8074. <https://doi.org/10.3390/ijerph120708034>
- Harris, J., Benedict, F., 1918. A Biometric Study of Human Basal Metabolism. *Nutrition Laboratory and Station for Experimental Evolution* 370–373.
- Havenith, G., 2005. Temperature Regulation, Heat Balance and Climatic Stress, in: Kirch, W., Bertollini, R., Menne, B. (Eds.), *Extreme Weather Events and Public Health Responses*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 69–80. https://doi.org/10.1007/3-540-28862-7_7
- Havenith, G., Fiala, D., 2015. Thermal Indices and Thermophysiological Modeling for Heat Stress, in: Prakash, Y.S. (Ed.), *Comprehensive Physiology*. Wiley, pp. 255–302. <https://doi.org/10.1002/cphy.c140051>
- Henderson, M.E.T., Halsey, L.G., 2022. The metabolic upper critical temperature of the human thermoneutral zone. *Journal of Thermal Biology* 110, 103380. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103380>
- Hensel, H., 1981. Thermoreception and temperature regulation.
- Holowatz, L., A., 2010. Aging and the control of human skin blood flow. *Front Biosci* 15, 718. <https://doi.org/10.2741/3642>
- ICEB, 2014. Confort d’été passif.

- IEA EBC || Annex 80 || Resilient Cooling || IEA EBC || Annex 80 [WWW Document], 2023. URL <https://annex80.iea-ebc.org/> (accessed 7.18.23).
- INSEE, 2022. Évolution du nombre de décès entre le 1er janvier et le 31 décembre 2022. URL <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6206305?sommaire=4487854>
- ISO 7243, 2020. ISO 7243:1989 [WWW Document]. ISO. URL <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/01/38/13895.html>
- ISO 7243, 2017. Ambiances chaude - estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basée sur l'indice WBGT (température humide et de globe noir) (No. EN ISO 7243:2017 F). Bruxelles.
- ISO 7730, 1984a. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Standard Organization.
- ISO 7730, 1984b. Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. International Standard Organization.
- Jay, O., Cramer, M.N., Ravanelli, N.M., Hodder, S.G., 2015. Should electric fans be used during a heat wave? *Applied Ergonomics* 46, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.07.013>
- Kaciuba-Uscilko, H., Grucza, R., 2001. Gender differences in thermoregulation: Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care 4, 533–536. <https://doi.org/10.1097/00075197-200111000-00012>
- Katić, K., Li, R., Zeiler, W., 2016. Thermophysiological models and their applications: A review. *Building and Environment* 106, 286–300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.031>
- Kingma, B.R.M., Frijns, A.J.H., Saris, W.H., van Steenhoven, A.A., van Marken Lichtenbelt, W.D., 2012. Mathematical Modeling of Human Thermoregulation: A Neurophysiological Approach to Vasoconstriction, in: Madani, K., Dourado Correia, A., Rosa, A., Filipe, J. (Eds.), *Computational Intelligence, Studies in Computational Intelligence*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 307–316. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27534-0_20
- Koelblen, B., Psikuta, A., Bogdan, A., Annaheim, S., Rossi, R.M., 2018. Thermal sensation models: Validation and sensitivity towards thermo-physiological parameters. *Building and Environment* 130, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.020>
- Krauchi, K., Wirz-Justice, A., 1994. Circadian rhythm of heat production, heart rate, and skin and core temperature under unmasking conditions in men. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 267, R819–R829. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.1994.267.3.R819>
- La Roche, P., Quiros, C., Bravo, G., Gonzalez, E., Machado, M., 2001. Keeping cool: Principles to avoid overheating in buildings. PLEA, Passive and Low Energy Architecture International in association with Research, Consulting and Communications (RC & C), Kangaroo Valley, NSW.
- Lai, D., Zhou, X., Chen, Q., 2017. Measurements and predictions of the skin temperature of human subjects on outdoor environment. *Energy and Buildings* 151, 476–486. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.009>
- Lauzet, N., 2019. Cumulative consideration of climate warning and urban overheating in frugal building design, centered on occupant comfort : Methodological proposals. Université Bretagne Sud, Nantes, France.
- Leduc, F., Delcourt, J.-B., 2007. Aider, soigner, accompagner les personnes à domicile: Un éclairage sur l'intime. *Gérontologie et société* 30 / n° 122, 145. <https://doi.org/10.3917/g.s.122.0145>
- Lehmuskallio, E., Hassi, J., Kettunen, P., 2002. The skin in the cold. *International Journal of Circumpolar Health* 61, 277–286. <https://doi.org/10.3402/ijch.v61i3.17475>
- Leplat, J., 2006. La notion de régulation dans l'analyse de l'activité. pistes. <https://doi.org/10.4000/pistes.3101>
- Levy-Leboyer, C., 1980. *Psychologie et Environnement*.
- Luo, M., Wang, Z., Ke, K., Cao, B., Zhai, Y., Zhou, X., 2018. Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge. *Building and Environment* 131, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.005>
- Machard, A., 2021. Towards mitigation and adaptation to climate change: Contribution to Building Design. Université de La Rochelle, La Rochelle.
- Machard, A., Inard, C., Alessandrini, J.M., Devys-Peyre, F., Martinez, S., Ribéron, J., Pelé, C., 2023. Climate change influence on buildings dynamic thermal behavior during summer overheating periods: An in-depth sensitivity analysis. *Energy and Buildings* 284, 112758. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112758>

- Mansi, S.A., Barone, G., Forzano, C., Pigliatile, I., Ferrara, M., Pisello, A.L., Arnesano, M., 2021. Measuring human physiological indices for thermal comfort assessment through wearable devices: A review. *Measurement* 183, 109872. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109872>
- Marchand, D., 2007. Analyse psychologique des freins et des motivations des propriétaires de maisons individuelles dans leur projet de rénovation thermique. Rapport final sur le panel de propriétaires de maisons individuelles. CSTB.
- Marchand, D., Depeau, S., Karine, W., 2014. L'individu au risque de l'environnement. In Press.
- Marchand, D., Pol, E., Weiss, K., 2023. 100 Key Concepts in Environmental Psychology, Routledge. ed. 4 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxford, OX14 4RN.
- Marchand, D., Weiss, K., 2009. Représentations sociales du confort dans le train : vers une conceptualisation de la notion de confort social: *Les Cahiers Internationaux de Psychologie Sociale* Numéro 84, 107–124. <https://doi.org/10.3917/cips.084.0107>
- Masterton, J.M., 1979. Humidex: a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada, Atmospheric Environment, Downsview, Ont.
- Mccratty, R., Shaffer, F., 2015. Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity, and Health Risk. *Glob Adv Health Med* 4, 46–61. <https://doi.org/10.7453/gahmj.2014.073>
- McCullough, E.A., Jones, B.W., Huck, J., 1985. A comprehensive data base for estimating clothing insulation. *Ashrae Trans* 91, 29–47.
- McIntyre, D., 1973. A guide to thermal comfort. *Applied Ergonomics* 66–72.
- McIntyre, D.A., 1981. Chapter 13 Design Requirements for a Comfortable Environment, in: *Studies in Environmental Science*. Elsevier, pp. 195–220. [https://doi.org/10.1016/S0166-1116\(08\)71090-2](https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71090-2)
- Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens, I.I.I., 1972. Limits to growth. [Interrelationship between energy sources, population, food, environment, and industrial products].
- Meilgaard, M.C., Civille, G.V., Carr, B.T., 2007. *Sensory evaluation techniques* 4th ed CRC Press LLC. New York.
- Ministère de la Santé et de la Prévention, 2023. Cartes de présence du moustique tigre (*Aedes albopictus*) en France métropolitaine. URL <https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-microbiologiques-physiques-et-chimiques/especes-nuisibles-et-parasites/article/cartes-de-presence-du-moustique-tigre-aedes-albopictus-en-france-metropolitaine> (accessed 10.6.23).
- Ministère du Logement, 2009. Diagnostic de Performance Énergétique : Guide inspection sur site.
- Musso, M., Moro, A., Glauche, V., Rijntjes, M., Reichenbach, J., Büchel, C., Weiller, C., 2003. Broca's area and the language instinct. *Nat Neurosci* 6, 774–781. <https://doi.org/10.1038/nn1077>
- Navarro, 2022. La vulnérabilité, in: *Les 100 Notions de La Psychologie Environnementale*, In D. Marchand, E. Pol et K. Weiss (Dir.). Paris, pp. 258–259.
- Nicol, J.F., Humphreys, M.A., 2002. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings* 34, 563–572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- Observatoire de l'Immobilier Durable, n.d. Guide des actions adaptatives au changement climatique.
- Okamoto-Mizuno, K., Mizuno, K., 2012. Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm. *J Physiol Anthropol* 31, 14. <https://doi.org/10.1186/1880-6805-31-14>
- Ole Fanger, P., Toftum, J., 2002. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings* 34, 533–536. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00003-8)
- Parkinson, T., de Dear, R., Candido, C., 2016. Thermal pleasure in built environments: alliesthesia in different thermoregulatory zones. *Building Research & Information* 44, 20–33. <https://doi.org/10.1080/09613218.2015.1059653>
- Parsons, K., 2009. Maintaining health, comfort and productivity in heat waves. *Global Health Action* 2, 2057. <https://doi.org/10.3402/gha.v2i0.2057>
- Pascal M., M., Wagner, V., Corso, M., 2017. Impacts de la température sur la mortalité dans dix-huit zones urbaines françaises entre 2000 et 2010. *Santé Publique France*, Saint-Maurice.
- Persiani, S.G.L., Kobas, B., Koth, S.C., Auer, T., 2021. Biometric Data as Real-Time Measure of Physiological Reactions to Environmental Stimuli in the Built Environment. *Energies* 14, 232. <https://doi.org/10.3390/en14010232>
- POUGET Consultants, 2017. Analyse détaillée du parc résidentiel existant. PACTE.

- Refinetti, R., Menaker, M., 1992. The Circadian Rhythm of Body Temperature.
- Robin, N., Coudeville, G.R., 2022. Fonctionnement cognitif en climat tropical: Bulletin de psychologie Numéro 575, 27–41. <https://doi.org/10.3917/bupsy.575.0027>
- Rossignol, N., Delvenne, P., Turcanu, C., 2015. Rethinking Vulnerability Analysis and Governance with Emphasis on a Participatory Approach: Rethinking Vulnerability Analysis and Governance. *Risk Analysis* 35, 129–141. <https://doi.org/10.1111/risa.12233>
- Salloum, M., Ghaddar, N., Ghali, K., 2007. A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models. *International Journal of Thermal Sciences* 46, 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.017>
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., Tarantola, S., 2010. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications* 181, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>
- Savourey, G., Launay, J.C., Melin, B., 2003. Physiopathologie et prévention des troubles liés à l'exposition à la chaleur ou au froid.
- Semal, L., Szuba, M., Villalba, B., 2014. « Sobriétés » (2010-2013): une recherche interdisciplinaire sur l'institutionnalisation de politiques locales de sobriété énergétique. *Nat. Sci. Soc.* 22, 351–358. <https://doi.org/10.1051/nss/2014053>
- Sèze, C., 1994. Confort moderne: Une nouvelle culture du bien être, Ed. Autrement. ed.
- Silva, J.E., 2006. Thermogenic Mechanisms and Their Hormonal Regulation. *Physiological Reviews* 86, 435–464. <https://doi.org/10.1152/physrev.00009.2005>
- Steadman, R.G., 1979. The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. *J. Appl. Meteor.* 18, 861–873. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2)
- Stephan, G., Mascarau, G., Oberlé, S., 2008. Les collectivités et l'éco-responsabilité. Association des Maires de France & Associations départementales de Maires et l'ADEME.
- Stolwijk, J.A.J., 1971. A mathematical model of physiological temperature regulation in man (Technical Report No. 19710023925). NASA, WASHINGTON, Unites States.
- Swynghedauw, B., 2009. Conséquences médicales du réchauffement climatique. *La Presse Médicale* 38, 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2008.02.022>
- Takada, S., Matsumoto, S., Matsushita, T., 2013. Prediction of whole-body thermal sensation in the non-steady state based on skin temperature. *Building and Environment* 68, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.06.004>
- Tanabe, S., Kobayashi, K., Nakano, J., Ozeki, Y., Konishi, M., 2002. Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD). *Energy and Buildings* 10.
- Thellier, F., 1999. L'homme et son environnement Thermique. Modélisation.
- Tsuzuki, K., Morito, N., Nishimiya, H., 2015. Sleep quality and air conditioner use. *Extrem Physiol Med* 4, A129, 2046-7648-4-S1-A129. <https://doi.org/10.1186/2046-7648-4-S1-A129>
- US, Bureau of Medicine and Surgery, n.d. Chapitre 3: Prevention of heat and cold stress injuries, in: Manual of Naval Preventive Medicine. NAVMED P-5010-3, Washington DC.
- Van Someren, E.J., Raymann, R.J., Scherder, E.J., Daanen, H.A., Swaab, D.F., 2002. Circadian and age-related modulation of thermoreception and temperature regulation: mechanisms and functional implications. *Ageing research reviews* 1, 721–778.
- Vandentorren, S., Bretin, P., Zeghnoun, A., Mandereau-Bruno, L., Croisier, A., Cochet, C., Ribéron, J., Siberan, I., Declercq, B., Ledrans, M., 2006. August 2003 Heat Wave in France: Risk Factors for Death of Elderly People Living at Home. *European Journal of Public Health* 16, 583–591. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckl063>
- Vischer, J.C., Fischer, G.-N., 2005. Une approche de l'évaluation des environnements de travail : La méthode diagnostique. *Le Travail Humain* 73–95.
- Vogt, J.-J., 1985. Confort physiologique. Thermique pour l'industrie. <https://doi.org/10.51257/a-v1-b2180>
- Wenger, C.B., 1972. Heat of evaporation of sweat: thermodynamic considerations. *Journal of Applied Physiology* 32, 456–459. <https://doi.org/10.1152/jappl.1972.32.4.456>

Wissler, E.H., 2018. Human temperature control. Springer Berlin Heidelberg, New York, NY.

World Health Organization, 2011. Public health advice on preventing health effects of heat. World Health Organization.

Yao, Y., Lian, Z., Liu, W., Shen, Q., 2007. Experimental Study on Skin Temperature and Thermal Comfort of the Human Body in a Recumbent Posture under Uniform Thermal Environments. *Indoor and Built Environment* 16, 505–518. <https://doi.org/10.1177/1420326X07084291>

Yézouma, C., Godefroy, T., Yves, T.M., 1998. CLIMAT ET CONFORT THERMIQUE. *Sud-Sciences et Technologies* 2, 6.