Réflexions sur l'adaptation des modèles de thermique du bâtiment, à l'étude pluridisciplinaire des risques sanitaires liés aux vagues de chaleur en zone urbaine

Célia Sondaz*[1], Claire Harpet[2], Frédéric Kuznik[1], Didier Soto[3], Lucie Merlier[1]

[1] **CETHIL UMR 5008 - CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1**
9 rue de la physique, 69621 Villeurbanne Cedex
[2] **EVS UMR 5600 - Chaire "Valeurs du soin" - Université Jean Moulin Lyon 3**
[3] **RESALLIENCE, SIXENSE ENGINEERING, VINCI Construction**
***celia.sondaz@insa-lyon.fr**

RESUME. Les épisodes de fortes chaleurs peuvent provoquer des conséquences sanitaires graves et des surmortalités importantes. Actuellement, les simulations thermiques dynamiques du bâtiment sont notamment utilisées pour étudier les problématiques de confort thermique durant ces vagues de chaleur. Ce travail propose une réflexion pour adapter les méthodes de modélisation à la problématique sanitaire en considérant les facteurs environnementaux, physiologiques et socioculturels qui participent à la vulnérabilité des individus à la chaleur.

Suite à l'identification de ces déterminants du risque, il est proposé de coupler un modèle thermique de bâtiment adapté en termes d'échelles temporelles et de phénomènes simulés à un modèle thermo-physiologique permettant de calculer la température centrale du corps, les pertes en eau et le rythme cardiaque. Il est recommandé de compléter ce couplage par des travaux ethnographiques sur des populations réelles pour étudier certains déterminants, sociologiques, physiologiques et socio-économiques et mettre à l'épreuve la modélisation.

MOTS-CLÉS : Modélisation, surchauffe, santé, bâtiments urbains

ABSTRACT. The heat waves may have serious health consequences and cause higher death rates than the normal value. Currently, the thermal building models are used to study the thermal comfort during heat waves. This paper proposes, from a literature study, a discussion to adapt the building modelling methods to health issues and to the study of the environmental, physiological and sociocultural factors that affect the vulnerability to heat.

After identifying these factors, it is suggested to pair a thermal building model with adjusted step time and modelling phenomena with a thermophysiological model. This model calculates the core temperature, the water loss and the cardiac output. It is suggested to complete this coupling with ethnographic survey to study some sociological, physiological and socio-economic factors and to identify the modelling's contributions and limitations.

KEYWORDS : Modelling, overheating, health, urban building

1. INTRODUCTION

Les vagues de chaleur provoquent des taux de surmortalité et de surmorbidité de plus en plus importants : en France, la chaleur a provoqué plus de décès entre 2014 et 2019 que durant les 9 années précédentes (Santé Publique France 2020b) et les trois vagues de chaleur de 2020 sont à l'origine de plus de 1 900 décès en excès (Santé Publique France 2020a). A titre plus exceptionnel, la vague de chaleur de 2021 au Canada a causé une augmentation significative du nombre d'appels d'urgences et d'hospitalisations et plusieurs centaines, a minima, de décès supplémentaires (les bilans officiels ne sont pas encore connus) en 5 jours (Philip et al. 2021). Les périodes de fortes chaleurs sont en effet à l'origine de nombreux problèmes de santé : déshydratation, coup de chaleur, aggravation de pathologies chroniques, trouble du sommeil, etc. (Cheshire 2016; World Health Organization 2018).

Les effets des épisodes caniculaires sont généralement analysés à partir de bilan épidémiologique, à l'échelle d'une ville ou d'une région. Il apparaît cependant intéressant de les étudier à l'échelle individuelle pour identifier plus certainement les facteurs amplifiants ou limitants ce risque et les ambiances thermiques les plus à risque. Les recherches en énergétique du bâtiment et de la ville, jusqu'alors focalisées sur des applications à la consommation d'énergie et au confort thermique, pourraient alors avantageusement s'intéresser à la problématique sanitaire.

Le confort thermique est considéré comme l'absence d'insatisfaction liée à l'environnement thermique ressenti alors que la santé est associée à "un état de complet bien-être physique, mental et social" avec une absence de pathologie ou d'infirmité (OMS 1946). La sensation thermique instantanée et donc le confort sont essentiellement affectés par l'état de la peau - température et mouillure -, alors que les conséquences de la chaleur sur la santé physique sont liées à l'état des organes - cœur, cerveau, reins, etc. - et donc à la température centrale, aux pertes en eau et au rythme cardiaque. De plus, les échelles de temps pour l'étude du risque sanitaire dû aux surchauffes urbaines varient entre plusieurs jours et plusieurs semaines. Ces durées correspondent à celles des vagues de chaleur et des études épidémiologiques. D'autant plus que les pathologies dues à des expositions à des températures ambiantes modérément élevées, comme certains coups de chaleur, peuvent se déclencher après plusieurs jours d'exposition. Les réactions du corps, les adaptations de l'individu et donc les échelles de temps et les variables à étudier pour la santé sont différentes de celles nécessaires pour les problématiques de confort.

Dans ce contexte, cet article, basé sur un travail bibliographique, discute des enjeux méthodologiques d'une étude pluridisciplinaire des risques sanitaires lors des vagues de chaleur en présentant tout d'abord les déterminants, physiologiques, socioculturels et liés à l'habitat, du risque sanitaire. Puis, l'intérêt est porté sur l'utilisation d'outils de modélisation pour étudier cette problématique. Enfin, les apports des méthodes de Sciences Humaines et Sociales (SHS) à cette problématique sanitaire sont discutés.

2. LES DETERMINANTS DE VULNERABILITE A LA CHALEUR

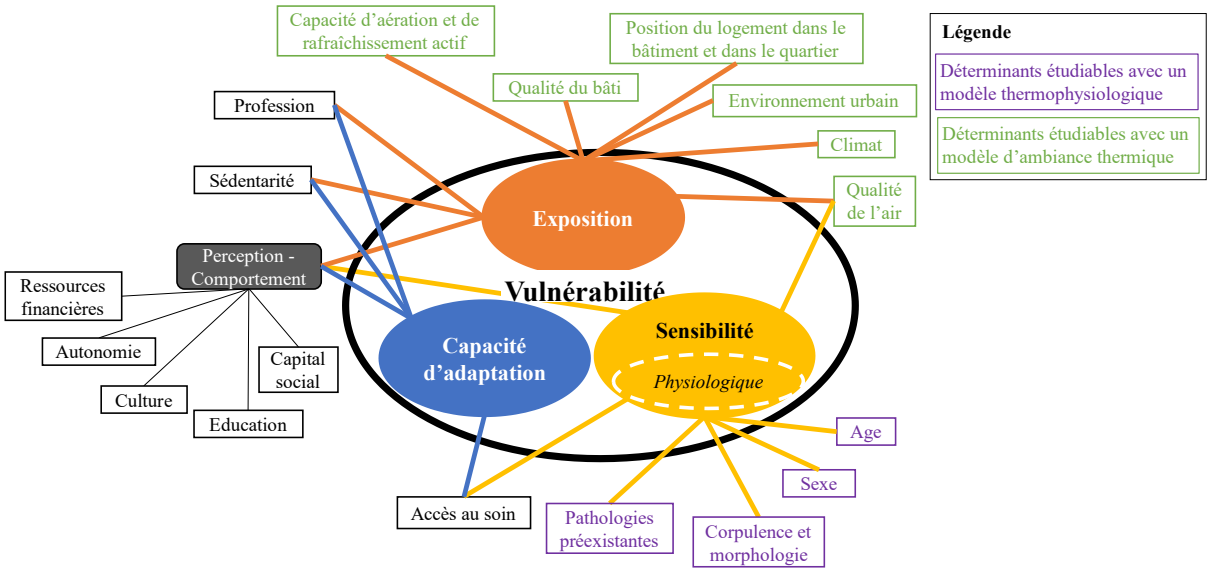

Figure 1 : Les différents déterminants affectant la vulnérabilité à la chaleur

Dans le domaine de l'étude du changement climatique, la vulnérabilité est le "degré auquel les éléments d'un système sont affectés par des changements climatiques" (ADEME 2014). Concernant le risque sanitaire lié à la chaleur, la vulnérabilité de chacun est la rencontre de son exposition à la chaleur,

c'est-à-dire de facteurs environnementaux liés notamment au lieu de vie, de sa sensibilité, c'est-à-dire de sa propension à être affectée par la chaleur, et de sa capacité à s'adapter et à se protéger. La Figure 1 montre les déterminants qui participent à la vulnérabilité d'après (Laaidi et al. 2014; Cramer et Jay 2016).

2.1. LES DETERMINANTS AFFECTANT L'EXPOSITION

L'exposition thermique des individus est directement en rapport avec les lieux fréquentés. Or dans les pays développés, les adultes passent environ 70% de leur temps à leur domicile (World Health Organization 2018). L'étude des déterminants liés au logement tels que la qualité constructive du logement, son orientation, le nombre et la surface des fenêtres, la position du logement dans le bâtiment, etc. est donc nécessaire pour comprendre le risque sanitaire lié aux vagues de chaleur.

Les ambiances extérieures qui sont visitées par les individus et qui interagissent directement avec l'ambiance intérieure ont également un impact sur l'exposition à la chaleur. Ainsi, l'aménagement urbain a un effet sur le risque sanitaire. Cette thématique n'est cependant pas discutée dans ce travail.

2.2. LES DETERMINANTS AFFECTANT LA SENSIBILITE

Les attributs physiologiques des individus affectent les performances thermiques du corps et ses capacités de thermorégulation. Par exemple, les femmes ont un débit de sudation plus faible que les hommes, elles sont capables de dissiper moins de chaleur par évaporation et ont donc potentiellement une moins bonne tolérance à la chaleur. Les mécanismes par lesquels les déterminants physiologiques affectent la sensibilité (Dufour et Candas 2007; Takahashi et al. 2021; Koulmann et Malgoyre 2018; Cramer et Jay 2016) sont présentés sur la Figure 2. Il apparaît alors essentiel d'étudier les réactions du corps à la chaleur en fonction des caractéristiques de l'individu.

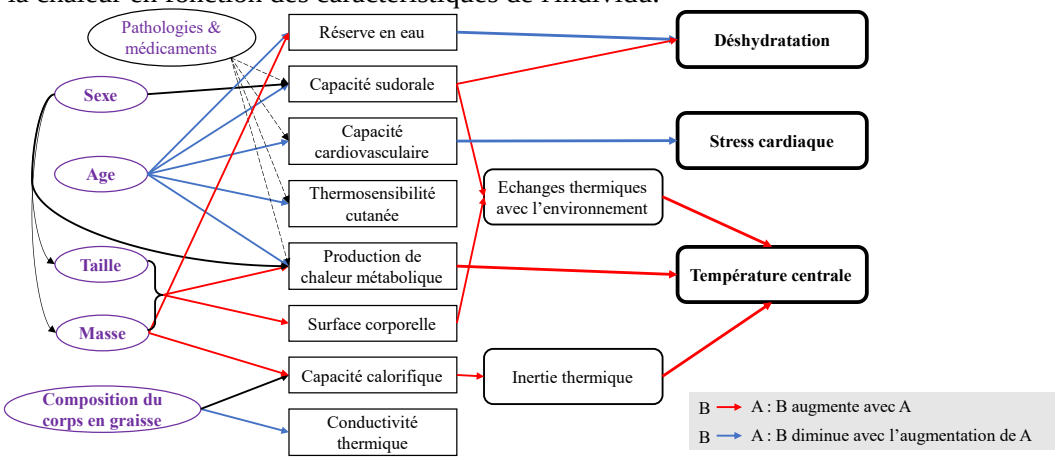

Figure 2 : Effet des déterminants physiologiques sur le risque sanitaire

2.3. LES DETERMINANTS AFFECTANT LE COMPORTEMENT ET LES CAPACITES D'ADAPTATION

Le comportement et les habitudes des individus (lieux fréquentés, stratégie d'ouverture des fenêtres et des protections mobiles, hydratation, habillement, activité, etc.) ainsi que leurs propres perceptions de leurs ressentis thermiques ont un impact important sur les trois composantes de la vulnérabilité. Par exemple, une personne peut porter un gilet en pleine canicule, parce qu'elle ne ressent pas la chaleur comme la plupart des individus, ou ne pas suivre les recommandations du Plan National Canicule car elle ne se considère pas comme une personne fragile.

La Figure 1 montre les déterminants sociologiques, culturels et économiques qui impactent les comportements et représentations et met en avant la nécessité de développer une méthodologie hybride entre sciences de l'ingénieur, physiologie et SHS.

3. APPORTS DE LA MODELISATION

Dans un premier temps, cet article s'intéresse plus spécifiquement à l'étude, par des déterminants physiologiques et de ceux liés à l'exposition par la modélisation numérique. En effet, les réactions du corps à la chaleur sont simulables avec des modèles thermo-physiologiques et pour étudier l'exposition dans les bâtiments, il est possible d'utiliser des modèles de Simulation Thermique Dynamique (STD). La modélisation numérique permet ainsi une analyse dynamique des variables physiologiques sur des temps longs en condition de stress thermique, sans mettre en danger des individus, avec la possibilité de modifier des paramètres pour évaluer leurs effets sur les conséquences des surchauffes urbaines.

3.1. LES MODELES THERMO-PHYSIOLOGIQUES

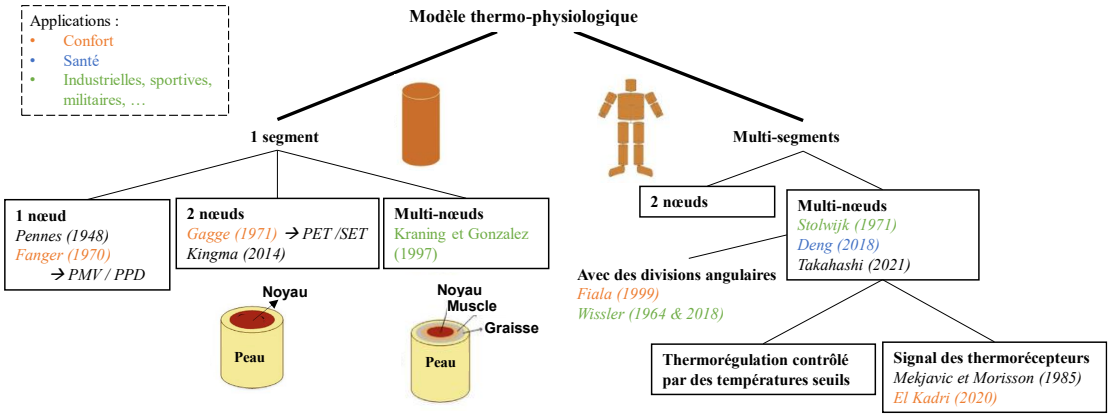

Figure 3 : Classification des modèles thermo-physiologiques inspirée de (Katić, Li, et Zeiler 2016)

Les modèles thermo-physiologiques dynamiques (Figure 3) simulent la diffusion de chaleur dans le corps en prenant en compte les mécanismes de thermorégulation. Ces modèles calculent ainsi les températures corporelles centrales et cutanées, les flux thermiques échangés avec l'ambiance ainsi que d'autres variables physiologiques telles que le débit cardiaque. Ces modèles sont généralement divisés en deux systèmes : passif et actif.

Le système passif représente la physique du corps et modélise la production de chaleur métabolique et les transferts de chaleur dans le corps et avec l'environnement proche : par convection, rayonnement, évaporation et respiration. Il y a d'abord eu des modèles à un seul segment et un seul nœud : une température unique est calculée pour tout le corps. Puis il y a eu des modèles à deux nœuds. Le corps est alors schématisé par deux cylindres concentriques : le cylindre central représente le noyau où est produite la chaleur métabolique et le second cylindre représente la peau, où sont calculés les échanges avec l'environnement et les effets de la thermorégulation. Des modèles multinœuds puis multisegments ont été développés pour représenter les différents tissus corporels et la géométrie réelle du corps.

Le système actif représente, quant à lui, les mécanismes de thermorégulation visant à maintenir constante la température centrale du corps. En réaction à la chaleur, le système actif modélise la sudation pour dissiper de la chaleur par évaporation et la vasodilatation pour augmenter les transferts thermiques, par le sang, du centre du corps vers la peau. Dans la plupart des modèles, les réponses thermorégulatrices se déclenchent quand les températures corporelles sont supérieures à un seuil et leur intensité est proportionnelle à l'écart avec ce seuil. Puis, des modèles se sont basés sur le comportement neurologique réel et ont modélisé dynamiquement les fréquences des signaux électriques envoyés par les thermorécepteurs. L'un de ces modèles est le Neuro Human Thermal Model (El Kadri et al. 2020), composé de 21 segments, 15 couches et 12 secteurs angulaires et conçu pour étudier le confort.

Pour l'étude des problématiques de santé, les modèles thermo-physiologiques doivent calculer la température centrale, le niveau de déshydratation via le débit de sudation et les pertes par la respiration, le rythme cardiaque et le gradient entre températures centrale et cutanée représentatif de la contrainte vasculaire. Il existe peu de modèles qui simulent le rythme cardiaque et la déshydratation (Kraning et Gonzalez 1997), il faut donc adapter les modèles existants à la problématique sanitaire. Il sera alors possible d'utiliser des indices de risques existants tels que le PSI (Physiological Strain Index) qui donne une échelle d'astreinte thermique à partir de la température rectale et du rythme cardiaque (Moran, Shitzer, et Pandolf 1998). Il est également souhaitable que ces modèles permettent d'étudier les dépassements des seuils de la norme ISO 7933: 2004 et les durées durant lesquelles ils sont dépassés. Ces seuils sont de 38°C pour la température rectale et de 3% de la masse du corps pour la déshydratation.

Sur la base de ces modèles thermo-physiologiques, l'étude du risque à l'intérieur des bâtiments est possible en couplant l'un de ces modèles à un outil de STD adapté.

3.2. LE COUPLAGE AVEC UN MODELE DE SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE ADAPTE

Des travaux de couplage entre modèle thermo-physiologique et modèle d'ambiance thermique ont déjà été effectués. Toutefois, ces travaux ont été faits pour étudier le confort thermique (El Kadri et al. 2020) ou pour étudier le risque pour des populations très spécifiques (astronautes (Thellier 1999)). Le couplage d'un outil de STD avec un modèle thermo-physiologique pour la problématique sanitaire est encore peu étudié et requiert de choisir soigneusement l'outil de STD et éventuellement de l'adapter.

En effet, il existe de nombreux outils de STD conçus d'abord pour optimiser les consommations de chauffage puis le confort été et permettant de calculer l'évolution temporelle des variables thermiques d'un bâtiment à partir de ses caractéristiques, des sollicitations extérieures et des charges internes.

Pour l'étude de la problématique sanitaire, la STD doit fournir les sollicitations thermiques, hydriques et aérauliques du lieu où se situe l'individu comme entrée du modèle thermo-physiologique (Figure 4). En amont de ce couplage, il sera important de s'assurer de la cohérence des échelles et résolutions spatiales et temporelles. En effet, les pas de temps des modèles thermo-physiologiques varient de quelques secondes (El Kadri et al. 2020) à une heure pour les systèmes passifs les moins précis (Gagge, Stolwijk, et Nishi 1971). Une étude précise du modèle thermo-physiologique choisi, de sa sensibilité aux variables d'ambiances et de ses constantes de temps permettra d'assurer la cohérence entre le modèle de corps humain et celui de bâtiment.

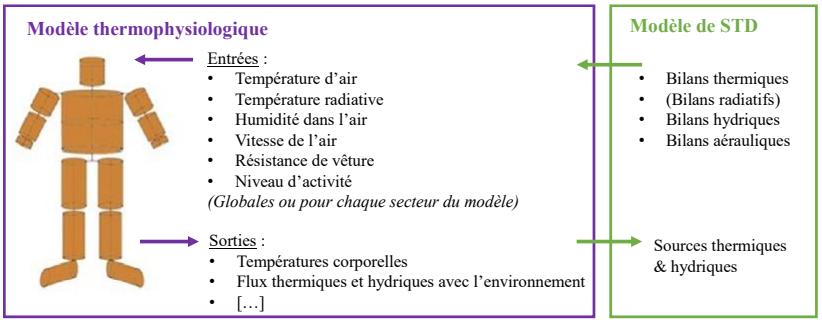

Figure 4 : Les éléments à coupler entre les modèles thermo-physiologiques et de STD

Par ailleurs, l'outil de STD utilisé doit prendre en compte la présence de l'occupant comme une source de chaleur et d'humidité. Il faudra, pour cela, se questionner sur le niveau de couplage : un calcul itératif des apports du corps à l'ambiance à chaque pas de temps est-il indispensable ? Il conviendra alors de s'interroger sur la sensibilité des modèles de STD aux variations d'apports liés aux occupants.

Enfin, les individus peuvent agir sur leur logement, en ouvrant les fenêtres par exemple, et ainsi modifier leur exposition thermique. Il sera donc pertinent d'étudier, grâce à ce couplage et à des travaux ethnographiques, les déterminants liés aux habitudes et aux perceptions thermiques des occupants.

3.3. EXEMPLE AVEC LE MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE JOS 3 (TAKAHASHI ET AL. 2021)

La modélisation dans un objectif de santé ne nécessite pas de connaître les températures de chaque tissu du corps ni la température cutanée locale avec une grande précision, mais plutôt la température centrale et les réactions de thermorégulation. Il est donc possible d'utiliser un modèle multisegment peu découpé, tel que le modèle JOS 3. Cela permettra de limiter le temps de calcul, de réduire le risque d'imprécisions sur les données physiologiques qui restent méconnues pour des individus "non - standards" et d'être utilisable par des thermiciens et non des physiologistes.

Le modèle JOS 3 (Jointed Circulation System) simule les réponses thermo-physiologiques d'un individu placé dans des environnements transitoires et non uniformes, en considérant l'âge, le sexe, la taille, la masse, le pourcentage de graisse et l'indice cardiaque. Il divise le corps en 17 segments. Chacun de ces segments est divisé en 2 ou 4 couches et est composé d'une artère et d'une veine. Un bilan thermique est réalisé sur chaque nœud, avec certains termes modifiés par la thermorégulation. JOS 3 modélise la thermorégulation à partir de températures seuils définies comme les températures d'équilibre sans thermorégulation dans une ambiance neutre. Les réponses thermorégulatrices modélisées sont la vasomotricité, la sudation, le frissonnement, mais aussi la thermogénèse non frissonnante et l'anastomose artérioveineuse, deux mécanismes qui interviennent en ambiance modérée.

Le modèle JOS 3 n'a pas été développé pour étudier la problématique de santé. Il est donc nécessaire d'adapter ce modèle, notamment en intégrant les limites de la thermorégulation qui existent sur des temps longs. Lorsqu'un individu perd de l'eau et qu'il ne se réhydrate pas, il n'est plus en capacité de suer autant qu'un individu correctement hydraté : la sudation et la vasodilatation se déclenchent alors pour des températures plus élevées et le débit de sueur est plus faible (Deng et al. 2018). Il est donc nécessaire d'ajouter à JOS 3 une variable de déshydratation et appliquer les effets de la déshydratation sur les équations de contrôle de la thermorégulation. Il existe aussi des limites cardiovasculaires affectant les capacités de vasodilatation (Kraning et Gonzalez 1997) qu'il faudrait intégrer au modèle.

Pour le couplage avec la STD, les entrées de JOS 3 peuvent être indiquées de manière globale pour le corps entier puisque la problématique de santé est avant tout liée à la température centrale et à des variables de thermorégulation globale. Un modèle de STD de type multizone nodal semble donc adapté.

De plus, de premières simulations avec JOS 3 ont été réalisées pour identifier les pas de temps nécessaires pour la STD. La température centrale évolue lentement et est, relativement aux températures cutanées, peu sensible aux variations de températures d'air. Par exemple, lors d'une transition d'ambiance de 28°C-40% à 34°C-40%, la température rectale augmente de 0,2°C et la valeur stationnaire (temps de stabilisation à 90%) est atteinte en 2h30 alors que la température cutanée moyenne augmente de presque 2°C et sa valeur stationnaire est atteinte en moins de 15 minutes. Le couplage avec un modèle de STD pour l'étude du risque sanitaire requiert d'observer de manière fine les évolutions de la température centrale et le gradient entre cette température et les températures cutanées. Le pas de temps pour la STD requis est donc compris entre quelques dizaines de minutes à une heure.

L'outil de simulation EnergyPlus, par exemple, apparaît donc approprié pour un couplage avec JOS 3 puisqu'il contient des modèles thermiques, radiatifs, aérauliques et hydriques et que son pas de temps

est modifiable (Peuportier 2015). Pour assurer la justesse du couplage, il est toutefois nécessaire de modifier la prise en compte des occupants pour la lier au modèle thermo-physiologique.

4. APPORTS DES ETUDES SHS ET PERSPECTIVES

Le couplage d'un modèle de STD et d'un modèle thermo-physiologique adapté permettra de mettre en évidence les ambiances thermiques les plus risquées pour la santé de l'individu (via l'observation des variables physiologiques) et d'étudier certains déterminants affectant l'exposition et la sensibilité thermo-physiologique (position du logement dans le bâtiment et dans la ville, position, type, qualité et utilisation des ouvrants et des protections solaires, âge, sexe, morphologie des occupants, etc.). Pour comprendre les effets des déterminants agissant sur la capacité d'adaptation, les comportements et la perception, il apparaît nécessaire de mobiliser des approches SHS, avec notamment des observations et des enquêtes de terrain, permettant d'identifier les caractéristiques comportementales individuelles et collectives, les conditions socio-économiques, le niveau d'information et de sensibilisation, ainsi que le capital social, agissant comme autant de freins que de leviers pour amplifier le risque physiologique.

Des études statistiques ou épidémiologiques (comme présenté dans l'étude bibliographique de (Ellena, Breil, et Soriani 2020)) permettent déjà d'identifier, sur de larges échantillons, des déterminants du risque tels que la composition du foyer, les ressources financières ou le niveau d'études. Des études ethnographiques sur des échantillons plus petits seraient utiles pour comprendre comment ces facteurs participent à la vulnérabilité des individus. La méthode d'observation participante permettrait d'approcher par les récits expérientiels l'effet de l'isolement social, de l'autonomie et de la perception de son environnement. Ainsi, la connaissance du risque et des stratégies de protection mises en place seraient discutées. Un suivi quotidien des personnes pourrait être utilisé pour analyser la sensation thermique, la tolérance à la chaleur et la santé perçue.

De plus, les enquêtes de terrain permettraient de compléter et de mettre à l'épreuve l'approche purement numérique en tenant compte de phénomènes socioculturels plus difficilement modélisables. Toutefois, le développement de cette méthodologie requiert de créer un dialogue entre plusieurs disciplines, dont la thermique du bâtiment, la thermo-physiologie et l'ethnographie, avec encore peu de perméabilité entre elles et structurées avec un vocabulaire, un rythme de recherche et des attentes très différentes. Il apparaît donc nécessaire de construire cette méthode par itération et expérimentation.

5. CONCLUSION

Cette contribution a mis en évidence l'intérêt de coupler un modèle de STD à un modèle thermo-physiologique pour l'étude des problématiques de santé durant les épisodes de surchauffe urbaine. Ce couplage requiert de porter une attention particulière aux échelles de temps, à la modélisation des limites de thermorégulation et aux interactions entre l'individu et le bâtiment. Il est proposé d'utiliser le modèle JOS 3 et un outil de STD afin de surveiller que, durant une vague de chaleur, l'augmentation de la température centrale du corps ainsi que les pertes en eau restent sous des seuils acceptables.

Afin d'avoir une vision complète de cette problématique et des déterminants qui participent de la vulnérabilité à la chaleur, ce couplage doit être associé avec des études de sciences humaines et sociales pour comprendre les représentations sociales de la tolérance à la chaleur, les comportements, la santé perçue et les capacités d'adaptation. Le développement exploratoire de cette approche hybride permettra de mettre en évidence les apports et les limites de chacune des deux méthodologies.

6. REMERCIEMENTS - Cet article est associé au projet 80 Prime METEORS qui a obtenu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI.

7. BIBLIOGRAPHIE

ADEME. 2014. « Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique ».

Cheshire, W. P. 2016. « Thermoregulatory Disorders and Illness Related to Heat and Cold Stress ». *Autonomic Neuroscience* 196 (avril): 91-104.

Cramer, M., et O. Jay. 2016. « Biophysical Aspects of Human Thermoregulation during Heat Stress ». *Autonomic Neuroscience* 196 (avril): 3-13.

Deng, Q., J. Zhao, W. Liu, et Y. Li. 2018. « Heatstroke at Home: Prediction by Thermoregulation Modeling ». *Building and Environment* 137 (juin): 147-56.

Dufour, A., et V. Candas. 2007. « Ageing and Thermal Responses during Passive Heat Exposure: Sweating and Sensory Aspects ». *European Journal of Applied Physiology* 100 (1): 19-26.

El Kadri, M., F. De Oliveira, C. Inard, et F. Demouge. 2020. « New Neurophysiological Human Thermal Model Based on Thermoreceptor Responses ». *International Journal of Biometeorology* 64 (12): 2007-17.

Ellena, M, M Breil, et S Soriani. 2020. « The Heat-Health Nexus in the Urban Context: A Systematic Literature Review Exploring the Socio-Economic Vulnerabilities and Built Environment Characteristics ». *Urban Climate* 34 (décembre): 100676.

Gagge, A. P., J. A. J. Stolwijk, et Y. Nishi. 1971. « An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatiry Response », 17.

Katić, K., R. Li, et W. Zeiler. 2016. « Thermophysiological Models and Their Applications: A Review ». *Building and Environment* 106 (septembre): 286-300.

Koulmann, N., et A. Malgoyre. 2018. « Les différences physiologiques homme-femme : quel impact sur l'aptitude physique au combat ?: » *Revue Défense Nationale* N° 808 (3): 81-84.

Kraning, K., et R. Gonzalez. 1997. « A Mechanistic Computer Simulation of Human Work in Heat That Accounts for Physical and Physiological Effects of Clothing, Aerobic Fitness, and Progressive Dehydration ». *Journal of Thermal Biology* 22 (4-5): 331-42.

Laaidi, K., A. Ung, M. Pascal, et P. Beaudeau. 2014. « Vulnérabilité à la chaleur : actualisation des connaissances sur les facteurs de risque », septembre, 7.

Moran, D. S., A. Shitzer, et K. B. Pandolf. 1998. « A Physiological Strain Index to Evaluate Heat Stress ». *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 275 (1): R129-34.

OMS. 1946. *Constistution de l'Organisation Mondiale de la Santé*.

Peuportier, B. 2015. *Énergétique des bâtiments et simulation thermique: modèles, mise en oeuvre, études de cas*. Paris: Eyrolles.

Philip, S. Y., S.F. Kew, G. J. van Oldenborgh, F. S. Anslow, et al. 2021. « Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021 ». Preprint. Earth system change: climate scenarios.

Santé Publique France. 2020a. « Canicule et Santé ». *Bulletin de Santé Publique*, 2020, Santé Publique France édition.

———. 2020b. « Influence de caractéristiques urbaines sur la relation entre température et mortalité en Île-de-France », septembre.

Takahashi, Y., A. Nomoto, S. Yoda, et al. 2021. « Thermoregulation Model JOS-3 with New Open Source Code ». *Energy and Buildings* 231 (janvier): 110575.

World Health Organization. 2018. « WHO Housing and Health Guidelines. » Geneva.