



HAL
open science

Simulation thermo-hydrrique dynamique de bâtiment et modèle thermo-physiologique : Adaptation et paramétrage pour l'étude des effets des surchauffes urbaines sur la santé

Célia Sondaz, Lucie Merlier, Claire Harpet, Frédéric Kuznik

► To cite this version:

Célia Sondaz, Lucie Merlier, Claire Harpet, Frédéric Kuznik. Simulation thermo-hydrrique dynamique de bâtiment et modèle thermo-physiologique : Adaptation et paramétrage pour l'étude des effets des surchauffes urbaines sur la santé. IBPSA - Conférence Francophone, May 2024, La Rochelle - Ile d'Oléron, France. hal-04920675

HAL Id: hal-04920675

<https://hal.science/hal-04920675v1>

Submitted on 30 Jan 2025

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

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

Simulation thermo-hydrigue dynamique de bâtiment et modèle thermo-physiologique : Adaptation et paramétrage pour l'étude des effets des surchauffes urbaines sur la santé

Célia SONDAZ*¹, Lucie MERLIER², Claire HARPET³, Frédéric KUZNIK⁴

¹ CNRS, INSA Lyon, CETHIL, UMR50, 69621 Villeurbanne 69621, France

² Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL, UMR5008, CNRS, INSA Lyon, Villeurbanne, F-69100, France

³ EVS UMR 5600 - Chaire "Valeurs du soin" - Université Jean Moulin Lyon 3

⁴ INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR50, 69621 Villeurbanne 69621, France

*celia.sondaz@insa-lyon.fr

RESUME. Les périodes de fortes chaleurs impactent la santé physique à travers des contraintes thermiques, cardiovasculaires et d'hydratation. En complément des modèles thermo-hydrigues de bâtiment, les modèles thermo-physiologiques permettent d'étudier ces contraintes à l'échelle individuelle et à l'intérieur des bâtiments. Cela permet de prendre en considération les variations individuelles et les dynamiques d'exposition à la chaleur. Cette contribution discute du paramétrage de l'adaptation du modèle thermo-physiologique JOS3 qui requière des données sur les caractéristiques individuelles, sur le comportement et sur l'exposition. En ce qui concerne l'estimation des données d'exposition à partir de Simulation Thermique Dynamique (STD) de bâtiment, cette contribution examine le niveau de couplage et le pas de temps pour la STD appropriés. Pour des individus moyens, l'utilisation d'un chaînage simple avec un pas de temps de 15 minutes est suffisante.

MOTS-CLÉS : Surchauffe urbaine, stress thermique, modèle thermo-physiologique

ABSTRACT Extreme heat have an impact on physical health through thermal, cardiovascular and hydric strain. In addition to a Building Energy Model (BEM), thermo-physiological dynamic model enables the investigation of these strains at the individual level, inside buildings. This approach allows individual variations and heat exposure dynamics to be taken into account. This contribution discusses the implementation of the adapted JOS3 thermo-physiological model, which requires data about individual characteristics, behaviour and exposure. To estimate exposure data from BEM, this work study the coupling level and the BEM step time required. For average individuals, a simple chaining with a BEM time step of 15 min is adequate.

KEYWORDS: urban overheating, heat stress, thermophysiological model

1. INTRODUCTION

Les conséquences de la chaleur sur la santé sont à la fois physiques, mentales et sociales. Les effets physiques se manifestent de manière diversifiée tant par leur nature que par leur gravité et leur fréquence. Les causes des décès et d'hospitalisation liées à la chaleur sont relativement bien étudiées d'un point de vue épidémiologique (Ramos et al. 2019; Aghamohammadi et Santamouris 2022) : maladies respiratoires ou cardiaques ou dégradation de pathologies existantes (cancer, Parkinson, problème de santé mentale, etc.). Cependant, la chaleur induit également un continuum de symptômes moins graves dégradant la qualité de vie des personnes (Cheshire 2016; Robert et al. 2019).

Ainsi, il est pertinent d'explorer les manifestations du stress thermique à l'échelle individuelle afin de mieux comprendre ses impacts sur la santé – restreint dans ce travail à l'absence de symptômes

physiques et de pathologies. Il est également intéressant d'identifier les expositions thermiques présentant le plus grand risque, ainsi que les facteurs qui amplifient ou réduisent ce risque.

Les recherches en thermique du bâtiment et de la ville, jusqu'alors focalisées sur des applications à la consommation d'énergie et au confort thermique, s'élargissent à présent à la problématique sanitaire. Les modèles thermo-hydriques du bâtiment fournissent des variables d'ambiance thermo-hydrique, qui, associées à des données sur l'occupant telles que les activités et les vêtements, permettent le calcul d'indicateurs de stress thermique, c'est-à-dire de la charge thermique imposée au corps. Il existe de nombreux indices biométéorologiques basés sur des variables d'expositions thermiques (Ioannou et al. 2022). Cependant, ces indicateurs ne prennent que peu en compte les différences individuelles et les effets dynamiques de l'exposition à la chaleur. De plus, ils visent à quantifier le stress thermique ou la potentielle astreinte thermique, c'est-à-dire les réactions physiologiques au stress thermique, mais pas à comprendre les manifestations physiques associées.

Cette contribution propose alors de compléter un modèle thermo-hydrique de bâtiment par un modèle thermo-physiologique afin d'étudier les réponses physiologiques au stress thermique. Cette contribution discutera du paramétrage du modèle thermo-physiologique pour l'étude des expositions intérieures lors des périodes de fortes chaleurs en milieu urbain. Une première partie présentera une adaptation du modèle thermo-physiologique et les variables à étudier. Puis, les paramètres nécessaires en entrée du modèle thermo-physiologique seront détaillés. Finalement, un zoom sera réalisé sur la liaison entre la Simulation Thermique Dynamique (STD) de bâtiment et le modèle thermo-physiologique : le niveau de couplage requis et le pas de temps nécessaires en sorties de STD seront questionnés.

2. ADAPTATION D'UN MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE POUR L'ETUDE DE L'ASTREINTE THERMIQUE

Les modèles thermo-physiologiques visent à simuler le transfert de chaleur à l'intérieur du corps humain et ses réponses thermorégulatrices. Ces modèles calculent, entre autres, les températures corporelles centrales et cutanées et les flux thermiques échangés avec l'ambiance. Il existe de nombreux modèles thermo-physiologiques variant en termes de nombre de nœuds de calcul, d'adaptation à des ambiances non uniformes, d'individualisation possible, d'adaptation à des populations vulnérables, et de sorties (Katić, Li, et Zeiler 2016). Parmi ces différents modèles, le modèle JOS 3 (Jointed Circulation System) (Takahashi et al. 2021) a été choisi dans ce travail, notamment pour son adaptation aux ambiances modérément chaudes et sa prise en compte des effets de l'âge. Ce modèle simule les réponses thermo-physiologiques d'un individu placé dans des environnements transitoires et non uniformes, en divisant le corps en 17 segments : tête, poitrine, dos, pelvis, bras, jambes, etc. Chacun de ces segments est composé de 2 ou 4 nœuds de tissus (noyau, muscle, graisse et peau), d'une artère et d'une veine (*Figure 1*). La thermorégulation est modélisée 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 se manifestent en ambiance modérée.

Toutefois, pour étudier les manifestations physiques du stress thermique, il est essentiel de simuler des variables représentatives des trois types d'astreintes associées au stress thermique : l'astreinte thermique (coup de chaleur, troubles du sommeil (Buguet et al. 2023), etc.), l'astreinte cardiovasculaire

(syncope (Cymes et al. 2021), œdèmes, etc.) et l'astreinte hydrique (déshydratation, épuisement par la chaleur, crampes (Eichner 2007), etc.). Ces astreintes peuvent en particulier être étudiées via la température centrale, le taux de déshydratation, le gradient de température entre le noyau du corps et la peau et la fréquence cardiaque. Toutes ces variables n'étant pas calculées par le modèle JOS 3, celui-ci a été adapté. Le modèle cardiovasculaire de (Kraning et Gonzalez 1997) permettant de calculer la fréquence cardiaque et les limites de vasodilatation ainsi qu'un bilan hydrique, et le modèle de (Deng et al. 2018) permettant de calculer les effets de la déshydratation sur la thermorégulation ont donc été inclus à JOS 3 dans le cadre de ce travail.

Il est à noter que les modèles thermo-physiologiques ne prennent cependant pas en compte certains effets d'une exposition longue à la chaleur comme l'acclimatation, et qu'ils ne sont pas validés pour des expositions de plusieurs jours ni en condition de vie réelle.

3. PARAMETRES REQUIS POUR LE MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE

Le paramétrage de modèles thermo-physiologiques peut être une source d'erreurs importantes. La *Figure 1* présente les données nécessaires comme paramètres du modèle JOS 3 adapté. Cette liste est plus longue que ce qui est généralement requis dans les modèles thermo-physiologiques à cause de la volonté d'évaluation des astreintes thermiques, cardiaques et hydriques, et concerne les caractéristiques de l'individu, son comportement et son exposition.

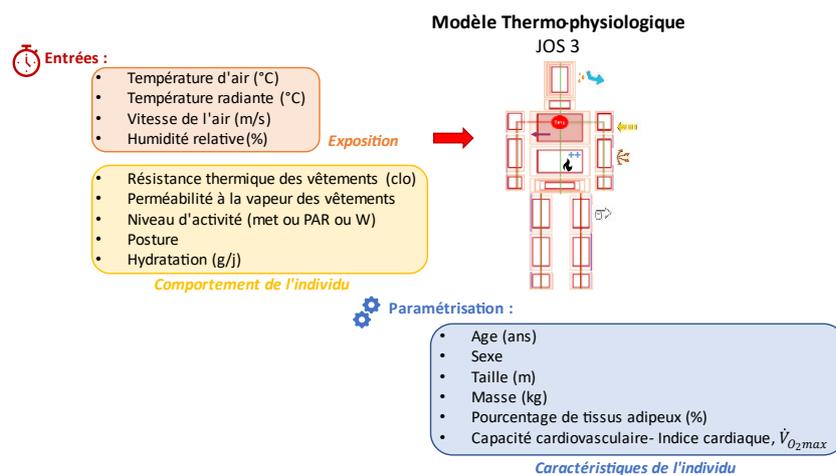


Figure 1 : Les paramètres d'un modèle thermo-physiologique – l'exemple de JOS 3.

3.1. CARACTERISTIQUES DE L'INDIVIDU

Pour créer le mannequin numérique, les propriétés du modèle JOS 3 sont adaptées à l'individu considéré. La masse, le pourcentage de tissus adipeux vont affecter la composition et la propriété des tissus tandis que la taille, la masse et le sexe vont permettre de calculer la surface corporelle disponible pour les échanges thermiques avec l'environnement et le métabolisme de base. La thermorégulation est elle aussi adaptée en fonction des caractéristiques individuelles – âge et sexe – et des capacités cardiovasculaires – la consommation maximale d'oxygène¹ et l'index cardiaque².

¹ La consommation maximale d'oxygène $\dot{V}_{O_2,max}$ correspond au volume maximal de dioxygène que l'individu peut consommer par unité de temps lors d'un exercice dynamique aérobie maximal. Ce paramètre a été ajouté à JOS 3 pour le calcul de la fréquence cardiaque par le modèle de (Kraning et Gonzalez 1997).

² L'indice cardiaque est le débit cardiaque au repos normalisé par la surface corporelle (Patel, Durland, et Makaryus 2024). Dans JOS 3, ce paramètre permet d'évaluer le débit cardiaque et les débits sanguins initiaux.

Ces paramètres permettent d'adapter la simulation à un individu particulier, mais certains, comme les paramètres cardiovasculaires, sont difficiles à connaître, notamment chez les personnes les plus vulnérables à la chaleur, sans mettre en place des expérimentations spécifiques. Toutefois, la sensibilité à la consommation maximale d'oxygène des températures corporelles et de la déshydratation calculées par JOS 3 s'est avérée significative uniquement en cas d'efforts physiques importants (supérieur à 3 fois le métabolisme de base). Il apparaît donc que la paramétrisation cardiovasculaire de JOS 3 pour l'étude d'un stress thermique passif en intérieur peut être faite à partir de données statistiques issues de bases de données comme celle de (Loe et al. 2013) pour les paramètres cardiovasculaires ou de Santé Publique France (InVS 2011) pour les paramètres anthropométriques.

3.2. COMPORTEMENT DE L'INDIVIDU

Dans les modèles thermo-physiologiques, la connaissance du niveau d'activités et de la résistance thermique des vêtements est nécessaire à chaque pas de temps. Le niveau d'activités, également requis pour les modélisations thermo-hydriques de bâtiment, permet d'estimer la production métabolique à partir du métabolisme de base. Il est possible d'évaluer la production métabolique expérimentalement à partir de la fréquence cardiaque ou de la consommation d'oxygène (AFNOR 2021), mais plus communément des tableaux d'équivalence entre activités et niveau de métabolisme sont utilisés (AFNOR 2006; FAO 2005). Les vêtements vont quant à eux affecter les transferts convectifs, radiatifs et évaporatifs. Dans JOS3 comme dans beaucoup de modèles thermo-physiologiques, ils sont simplement représentés par l'ajout d'une résistance thermique et d'une résistance évaporative qui peuvent être estimées grâce des tableaux de valeurs standards (AFNOR 2006).

À ces entrées habituelles de comportements, il a été rajouté dans JOS 3 une entrée concernant l'hydratation. La quantité d'eau ingérée correspond à la quantité de boisson bue à laquelle s'ajoute le contenu en eau des aliments ingérés. Pour estimer précisément cette quantité, pour un individu et une journée particulière, il est donc nécessaire de réaliser un suivi de son alimentation. De manière plus générale, les données statistiques de l'étude INCA 3 réalisée en France en 2014-2015 sur plus de 3000 adultes (ANSES 2017), renseignent sur les valeurs moyennes par sexe, tranche d'âge et saison.

3.3. EXPOSITION

L'exposition thermique est modélisée dans JOS 3 par une température d'air, une température radiante, une humidité relative, une vitesse de l'air et éventuellement un apport par rayonnement solaire supplémentaire. Ces données peuvent être précisées globalement ou pour chacun des segments du corps afin de modéliser une ambiance thermique non uniforme. Ce paramétrage de l'ambiance thermique nécessite donc de préciser indirectement la localisation de l'individu et éventuellement ses déplacements.

4. INTEGRATION D'UN MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE EN AVAL D'UNE MODELISATION THERMO-HYDRIQUE DE BATIMENT

Pour l'étude de l'astreinte thermique en ambiance thermique intérieure, il est donc possible de compléter une STD, ici réalisé avec le logiciel EnergyPlus, avec une modélisation avec JOS 3. L'outil EnergyPlus a été choisi dans ce travail, car il dispose des modèles thermiques, hydriques et radiatifs, divise les apports de l'occupant en part convective, radiative et latente, et possède un pas de temps flexible. Les conditions de liaisons des deux modèles vont être discutées dans cette partie.

4.1. TRAITEMENT DES APPORTS THERMIQUES LIES A L'OCCUPANT : CHAINAGE OU COUPLAGE ?

Comme présenté sur la *Figure 2*, si la STD fournit les températures et humidités au modèle thermo-physiologique, celle-ci est dépendante des apports internes, notamment ceux liés à l'occupant. En première approche, il est possible de supposer que ces apports sont égaux à la production de chaleur métabolique, sensible et latente, et donc d'utiliser le métabolisme de base multiplié par le niveau d'activités en entrée de la STD. Cette supposition est vraie à condition qu'il n'y ait pas de stockage de chaleur dans le corps. Or les températures corporelles évoluent en réalité et c'est d'ailleurs ce qu'on cherche à évaluer en utilisant un modèle thermo-physiologique. Afin de prendre en compte ces variations de températures corporelles, il convient donc de réaliser un couplage entre les 2 modèles avec les flux thermiques et hydriques échangés entre le corps et l'ambiance qui est calculée par le modèle thermo-physiologique comme apport interne lié à l'occupant dans la STD.

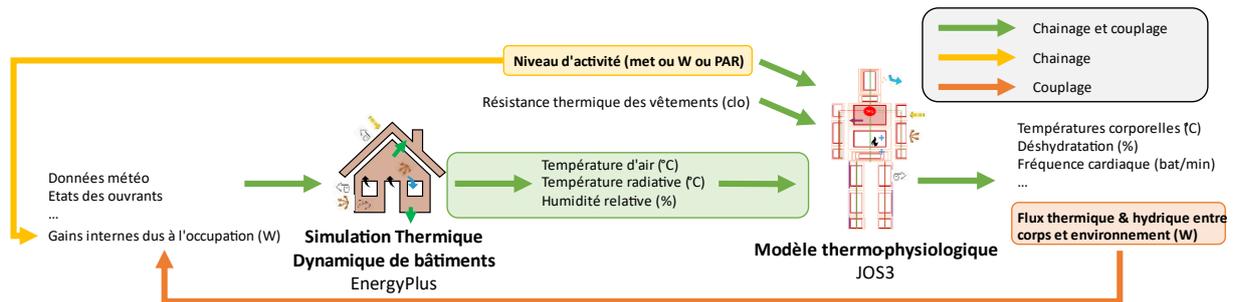


Figure 2 : Liaisons possibles entre les modèles EnergyPlus et JOS 3

Pour évaluer l'erreur commise lors de la réalisation d'un chainage simple par rapport à un couplage, les deux types de simulations ont été réalisés en considérant un appartement T2 en R+3 (orientation EST) situé dans un bâtiment d'habitat collectif RT2012 dans lequel se situe un "individu standard" (homme, 20 ans, 1,72m, 74kg) qui dort dans la chambre pendant la nuit ($PAR^3 = 1$ de 20 h à 8 h), qui nettoie et range son logement ($PAR = 2,8$ dans le séjour de 10 à 11 h et de 17 à 18 h) et qui se repose dans le séjour le reste de la journée ($PAR = 1,2$). Les simulations ont été réalisées avec les données météo de Lyon-Bron de 2023 et les résultats ont été étudiés pour la vague de chaleur d'août 2023.

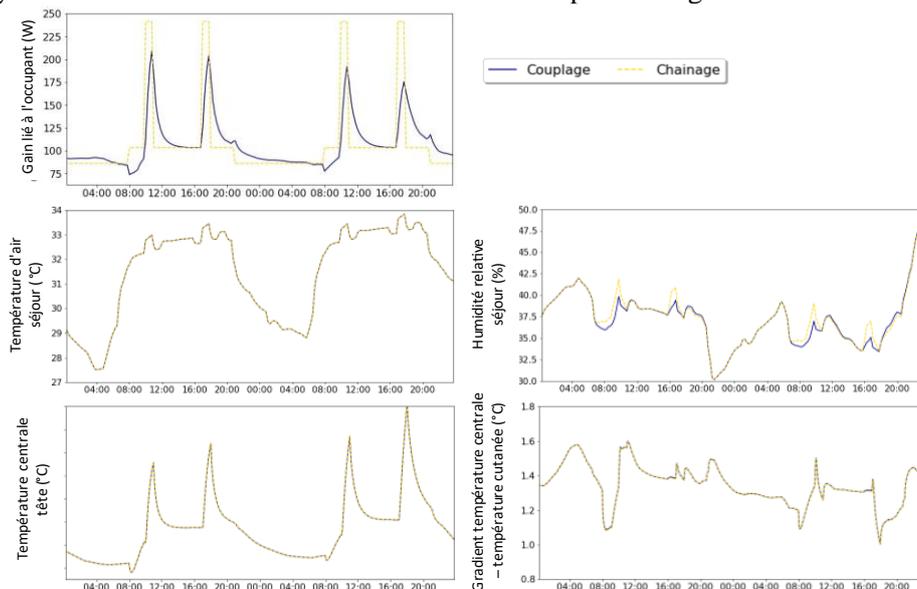


Figure 3 : Résultats de la comparaison entre chainage et couplage pour le cas d'un individu standard dans un logement RT2012 en R+3 orienté à l'Est

³ Physical Activity Ratio : Coût énergétique d'une activité par rapport au métabolisme de base (FAO 2005)

Un extrait des résultats est présenté sur la *Figure 3*. Il apparaît que malgré des différences d'apports internes pouvant atteindre par moment 157 W, les écarts de température d'air dans le logement restent inférieurs à 0,1 °C et ceux de l'humidité spécifiques inférieurs à 2 g_E/kg_{AS}. Les écarts sur les sorties thermo-physiologiques sont par conséquent négligeables : maximum 0,04 °C pour la température centrale, 0,1 °C pour le gradient entre température centrale et température cutanée, 2 bat/min pour la fréquence cardiaque et 0,01% pour la déshydratation.

Par conséquent, un chaînage d'EnergyPlus et du modèle JOS3 est suffisant pour l'étude des manifestations physiologiques des fortes chaleurs dans la configuration étudiée. Cette conclusion a été retrouvée pour des cas où l'individu est au repos pendant 24 h et pour un autre bâtiment RT2012.

4.2. PAS DE TEMPS NECESSAIRES EN ENTREE DU MODELE THERMO-PHYSIOLOGIQUE

Afin de réaliser pertinemment ce chaînage, il est également nécessaire de questionner le pas de temps nécessaire pour la STD vis-à-vis des constantes de temps de JOS 3. Des simulations ont donc été réalisées avec différents pas de temps en entrée de JOS 3.

Un individu standard nu et au repos a été modélisé, d'abord pendant une heure dans une ambiance neutre (température opérative permettant la thermoneutralité – 50% - 0,1 m/s) pour initialiser la simulation, puis pendant 12h avec une température opérative variant aléatoirement de plus ou moins 0,5 °C toutes les minutes, et enfin pendant de nouveau une heure en ambiance neutre pour éviter les erreurs de coupure lors du calcul de la moyenne. Pour garantir des variations cohérentes avec ce qui peut être rencontré lors de stress thermique en intérieur, la température opérative était comprise entre 23 et 35 °C. La même simulation a ensuite été répétée avec une température opérative moyenne sur 5, 15, 30 puis 60 minutes. Le pas de temps de calcul de JOS 3 est resté réglé à 1 minute.

La *Figure 4* montre un exemple d'étude du pas de temps de la température. La température centrale apparaît très peu sensible aux pas de temps en entrée : l'écart est toujours inférieur à 0,07 °C (pour comparaison une augmentation de température centrale de 1 °C est considérée comme la limite à ne pas dépasser pour éviter une astreinte à la chaleur d'après la norme ISO 9886 (Robert et al. 2019)), mais la dynamique de variation de la température centrale est différente avec un pas de temps en entrée supérieure à 30 min. La déshydratation et la fréquence apparaissent aussi très peu sensibles au pas de temps en entrée. En revanche, le gradient entre température centrale et température cutanée est très sensible aux variations de température opérative. Les écarts peuvent être très importants pour des entrées toutes les 30 ou 60 min, respectivement jusqu'à 0,4 °C (soit 18% d'écart relatif) et 0,8 °C (soit 61% d'écart relatif) alors qu'une réduction du gradient de 2 °C peut être à l'origine d'une réduction des capacités physiques et de fatigue (Cuddy, Hailes, et Ruby 2014).

Pour confirmer ces observations, la distribution des erreurs a été étudiée sur 100 cas similaires, c'est-à-dire sur 100 évolutions aléatoires pendant 12 heures de la température opérative (entre 23 et 35°C) pour un individu nu au repos (50% - 0,1 m/s). Les résultats obtenus confirment que le gradient entre température centrale et température cutanée impose le choix du pas de temps en entrée. Une moyenne de la température opérative toutes les 15 minutes garantit une erreur inférieure à 0,3°C sur ce gradient. Un pas de temps de 15 min apparaît donc être un bon compromis pour étudier l'astreinte thermique tout en limitant le temps de calcul. Cette conclusion a été confirmée par la réalisation d'études similaires considérant la température d'air, la température radiante et l'humidité relative.

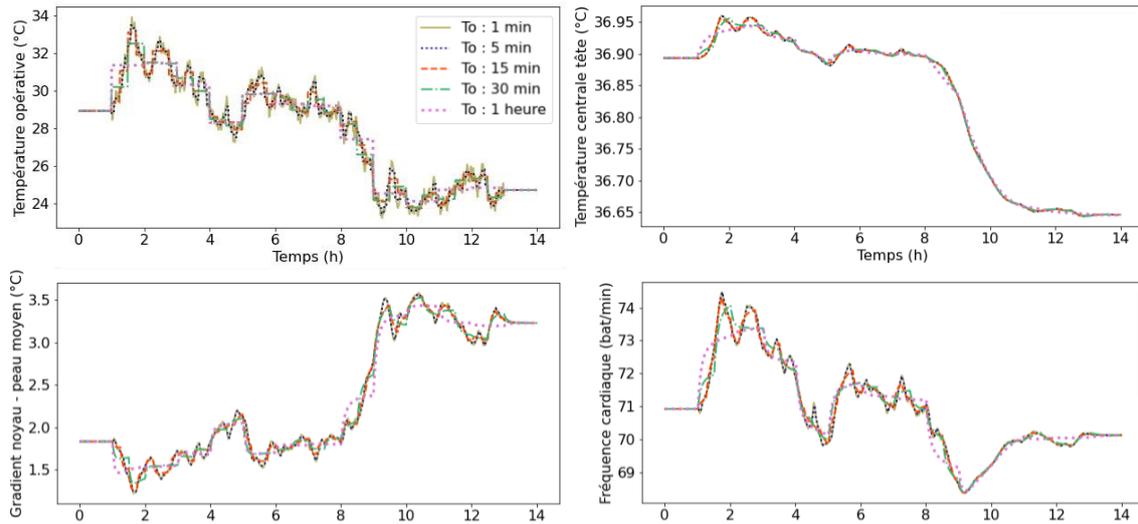


Figure 4 : Pas de temps en entrée de JOS 3 – Simulations pour l'étude de la température opérative

5. CONCLUSIONS

Afin de mieux appréhender les effets de l'astreinte thermique en ambiance intérieure pendant les périodes de fortes chaleurs en milieu urbain, cette contribution propose l'emploi, en complément d'une STD, d'un modèle thermo-physiologique dynamique adapté à l'étude des trois types d'astreintes liés à la chaleur et discute de l'un des enjeux de l'utilisation d'un tel modèle : son paramétrage.

Un modèle thermo-physiologique nécessite en entrée des données sur l'individu - âge, sexe, taille, masse, indice cardiaque par exemple -, sur son comportement - activités, vêtements et hydratation - et surtout sur son exposition. Pour les données d'exposition lorsque celle-ci sont estimées à partir d'une STD, cette contribution a montré la pertinence d'un chainage simple entre un modèle thermo-hydrigue de bâtiment avec un pas de temps de 15 minutes et un modèle thermo-physiologique, à condition d'harmoniser les consignes d'activités dans les deux modèles. Ces conclusions doivent toutefois être vérifiées sur d'autres bâtiments et d'autres niveaux d'activités.

Pour les paramètres liés à l'individu, des données d'individus moyens ont été utilisées dans cette contribution, mais il est également possible de simuler un individu spécifique. Cette option requiert la collecte de nombreuses données, parfois difficiles à obtenir, ainsi que le suivi du comportement de l'individu. Pour cela, une démarche d'enquête de terrain *in situ* avec suivi d'individu est actuellement expérimentée dans un projet qui allie les sciences de l'ingénieur aux sciences humaines et sociales. La mise en perspective de la modélisation et du terrain permet alors d'interroger les apports et les limites de la modélisation pour des conditions de vie réelle et par rapport à la problématique des conséquences sanitaires des surchauffes urbaines et des facteurs de vulnérabilité qui les affectent.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet a obtenu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires de la MITI.

7. BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. 2006. Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. NF EN ISO 7730.
- . 2021. Ergonomie de l'environnement thermique - Détermination du métabolisme énergétique. NF EN ISO 8996.

- Aghamohammadi, Nasrin, et Mat Santamouris, éd. 2022. *Urban Overheating: Heat Mitigation and the Impact on Health*. *Advances in Sustainability Science and Technology*. Singapore: Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-4707-0>.
- ANSES. 2017. « Troisième étude individuelle nationale des consommations alimentaires (Etude INCA3) ». Rapport d'expertise collective n°2014-SA-0234 – Etude INCA3.
- Buguet, Alain, Manny W. Radomski, Jacques Reis, et Peter S. Spencer. 2023. « Heatwaves and Human Sleep: Stress Response versus Adaptation ». *Journal of the Neurological Sciences* 454 (novembre): 120862. <https://doi.org/10.1016/j.jns.2023.120862>.
- Cheshire, W. P. 2016. « Thermoregulatory Disorders and Illness Related to Heat and Cold Stress ». *Autonomic Neuroscience* 196 (avril): 91-104. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2016.01.001>.
- Cuddy, John S., Walter S. Hailes, et Brent C. Ruby. 2014. « A Reduced Core to Skin Temperature Gradient, Not a Critical Core Temperature, Affects Aerobic Capacity in the Heat ». *Journal of Thermal Biology* 43 (juillet): 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.04.002>.
- Cymes, Iwona, Rakesh Jalali, Katarzyna Glińska-Lewczuk, Ewa Dragańska, Beata Giergielewicz-Januszko, et Jerzy Romaszko. 2021. « The Association between the Biometeorological Indicators and Emergency Interventions Due to Fainting: A Retrospective Cohort Study ». *Science of The Total Environment* 770 (mai): 145376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145376>.
- Deng, Q., J. Zhao, W. Liu, et Y. Li. 2018. « Heatstroke at Home: Prediction by Thermoregulation Modeling ». *Building and Environment* 137 (juin): 147-56. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.017>.
- Eichner, E Randy. 2007. « The Role of Sodium in “Heat Cramping” ». *Sports Medicine* 37 (4): 368-70. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737040-00024>.
- FAO. 2005. « Human Energy Requirements: Report of a Joint FAO/ WHO/UNU Expert Consultation ». *Food and Nutrition Bulletin* 26 (1): 166.
- InVS. 2011. « Anthropométrie, Adultes : Tableaux de distribution ENNS ». *Santé Publique France*. 7 juillet 2011. <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/enns-etude-nationale-nutrition-sante/anthropometrie-adultes-tableaux-de-distribution-enns>.
- Ioannou, Leonidas G., Konstantinos Mantzios, Lydia Tsoutsoubi, Sean R. Notley, Petros C. Dinas, Matt Brearley, Yoram Epstein, et al. 2022. « Indicators to Assess Physiological Heat Strain – Part 1: Systematic Review ». *Temperature* 9 (3): 227-62. <https://doi.org/10.1080/23328940.2022.2037376>.
- Katić, K., R. Li, et W. Zeiler. 2016. « Thermophysiological Models and Their Applications: A Review ». *Building and Environment* 106 (septembre): 286-300. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.031>.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(97\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00031-4).
- Loe, Henrik, Øivind Rognmo, Bengt Saltin, et Ulrik Wisløff. 2013. « Aerobic Capacity Reference Data in 3816 Healthy Men and Women 20–90 Years ». Édité par Alejandro Lucia. *PLoS ONE* 8 (5): e64319. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064319>.
- Patel, Nishil, Justin Durland, et Amgad N. Makaryus. 2024. « Physiology, Cardiac Index ». In *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539905/>.
- Ramos, Yuddy, Jean-Pierre Trépanier, Alexandre St-Denis, Stéphanie Susser, Cong Dung Tran, Centre intégré de santé et de services sociaux de Laval, et Direction de santé publique. 2019. *Vague de chaleur de l'été 2018: rapport d'enquête épidémiologique*. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/4006591>.
- Robert, L, E Turpin-Legendre, J Shettle, C Tissot, C Aubry, et B Siano. 2019. « Travailler dans une ambiance thermique chaude ». INRS, 25.
- Takahashi, Yoshito, Akihisa Nomoto, Shu Yoda, Ryo Hisayama, Masayuki Ogata, Yoshiichi Ozeki, et Shin-ichi Tanabe. 2021. « Thermoregulation Model JOS-3 with New Open Source Code ». *Energy and Buildings* 231 (janvier): 110575. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110575>.