

FICHIERS MÉTÉOROLOGIQUES DE VAGUES DE CHALEUR FUTURES POUR ÉVALUER LA RÉSILIENCE THERMIQUE DES BÂTIMENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Anaïs MACHARD ^{1,2}, Emmanuel BOZONNET ¹, Agnese SALVATI ^{3,4},
Mamak POURABDOLLAHTOOTEKABONI ⁵, Abhishek GAUR ⁶.

¹ Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE, UMR CNRS 7356), La Rochelle Université, 23 Avenue Albert Einstein, 17000 La Rochelle, France, emmanuel.bozonnet@univ-lr.fr

² Département Energie et Environnement, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 84 Avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée CEDEX 2, France, anaïs.machard@cstb.fr

³ Institute for Energy Futures, Brunel University London, Uxbridge, UK

⁴ Barcelona School of Architecture ETSAB-UPC, Diagonal 649, 08028 Barcelona, Spain, agenese.salvati@upc.edu

⁵ Department of Energy, Politecnico di Torino, 10129 Turin, Italy, mamak.pootkaboni@polito.it

⁶ National Research Council Canada, Construction Research Centre, 1200 Montreal Road, Building M24, Ottawa, ON K1A 0R6, Canada, abhishek.gaur@nrc-cnrc.gc.ca

Résumé : Cet article présente une méthodologie développée pour reconstituer des fichiers météorologiques comprenant des vagues de chaleur futures extrêmes comme données d'entrée pour les simulations thermiques dynamiques de bâtiments. Des fichiers ont été développés pour douze villes dans le monde, réparties selon la classification des zones de l'ASHRAE à partir de données CORDEX. Ces fichiers météorologiques peuvent être utilisés pour comparer différentes solutions de rafraîchissement et analyser la résilience thermique du bâtiment à la surchauffe dans des périodes extrêmes futures.

Mots-Clés : vagues de chaleur, surchauffe, bâtiment, résilience

Abstract: FUTURE HEATWAVE WEATHER FILES TO ASSESS BUILDINGS THERMAL RESILIENCE TO CLIMATE CHANGE - This paper proposes a methodology to reconstruct meteorological files to be used as input data for building simulations and focused on extreme future heatwaves. Built from CORDEX data, these files have been developed for twelve cities around the world, distributed according to the ASHRAE zone classification. These weather files will be useful to compare different cooling solutions and analyze the building thermal resilience to overheating in future extreme periods.

Keywords: heatwaves, overheating, buildings, resilience

Introduction

Les chiffres actuels et les projections de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prédisent une augmentation fulgurante de la climatisation de « confort » dans le monde. Aujourd'hui, la consommation d'électricité mondiale liée à la climatisation représente 10% de la consommation globale, et elle devrait tripler d'ici à 2050. Aux consommations d'énergie s'ajoute l'impact environnemental colossal des fuites des réfrigérants (Agence Internationale de l'Énergie 2018). En France, ces dernières années l'usage et l'équipement en climatisation des ménages est en très forte augmentation, ce qui peut être corrélé aux canicules récurrentes : alors qu'en 2016 11 % des ménages étaient équipés en climatisation d'après l'INSEE, en 2019 c'étaient 22 % des ménages et 26 % fin 2020 (ADEME 2021).

Dans ce contexte, le projet Annexe 80 « Resilient Cooling for Buildings » a vu le jour au sein du programme « Energy in Buildings and Communities » de l'Agence Internationale de l'Énergie (« IEA EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings » 2022). L'objectif de ce projet international de recherche est de soutenir une transition rapide des bâtiments vers des solutions résilientes de limitation des surchauffes et peu consommatrices, que ce soit par des solutions de climatisation (systèmes dits actifs) ou par des solutions de rafraîchissement dits passifs. Le terme « Resilient cooling » est utilisé ici pour désigner des solutions qui intègrent l'échelle de l'individu et de la société dans son ensemble, ainsi que leur capacité à résister, ou à prévenir, les effets de surchauffe des habitats liés au changement climatique. Le concept de résilience dans le domaine du bâtiment a fait l'objet d'un état de l'art et de définitions des concepts spécifiques à ce projet

(Miller et al. 2021 ; Attia et al. 2021 ; Zhang et al. 2021). Afin de qualifier et quantifier ces impacts thermiques, il a été également nécessaire de déterminer l'exposition à la chaleur, qui impacte directement le risque de surchauffe des bâtiments. Un groupe de travail spécifique à sa caractérisation, et à la production de séquences climatiques, a été mis en place. Les fichiers météorologiques créés ont été utilisés comme données d'entrée du groupe de travail pour les simulations thermiques de bâtiment (Zhang et al. 2021).

Au sein de la communauté de recherche de la thermique du bâtiment, le développement de fichiers météorologiques futurs incluant des extrêmes de température est un sujet de recherche nouveau et complexe, qui fait débat au sein de la communauté. Historiquement, les fichiers météorologiques utilisés comme données d'entrées des simulations de bâtiment pour caractériser les besoins en énergie (chauffage et refroidissement) des bâtiments sont une année type représentative d'une trentaine d'années historiques (ISO 2006). Ce sont ces données climatiques (réglementaires) qui sont utilisées par tous les acteurs de la construction pour définir les objectifs de performance énergétique des bâtiments neufs et qui n'incluent pas les spécificités des besoins croissants de rafraîchissement. L'objectif ici est donc de compléter l'approche traditionnelle des données climatiques, basée uniquement sur la performance liée au chauffage, pour une meilleure prise en compte de la performance énergétique globale des bâtiments, qui reposera de plus en plus sur les effets de la climatisation avec les effets d'amplification liés au réchauffement climatique.

L'année type est construite par une sélection de mois statistiquement les plus proches de la médiane, pour quatre variables météorologiques : la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire global et la vitesse du vent (second ordre). Ces dernières décennies, des fichiers météorologiques types incluant des projections climatiques de changement climatique ont été développés (CCWeatherGen, WeatherShift, Meteororm) et sont largement utilisés par la communauté scientifique de la thermique du bâtiment. Cependant, le changement climatique influe non seulement sur l'augmentation de la médiane de la température mais également la variance. Pour cette raison, utiliser seulement des années types futures n'est pas suffisant pour évaluer le risque de surchauffe de bâtiments lors de futures canicules. La méthodologie mise en œuvre ici, initialement proposée par (Machard et al., 2020), a permis de reconstituer des fichiers météorologiques comprenant des vagues de chaleur futures à partir de projections de modèles de climat régionaux. Une vingtaine d'institutions ont préparé des fichiers météorologiques comprenant des vagues de chaleur futures, qui sont présentées dans cet article. Ces données d'entrée pour les simulations thermiques dynamiques de bâtiment sont critiques pour l'évaluation de la performance et/ou de la résilience des différentes technologies de climatisation ou rafraîchissement. Chaque stratégie sera alors évaluée sous différentes conditions : un cas durant l'année future type, un cas durant la vague de chaleur extrême, un cas durant la vague de chaleur extrême avec une coupure de réseau électrique.

1. Méthodologie

La méthodologie adoptée pour générer les fichiers météorologiques futurs comme données d'entrée pour les simulations thermiques de bâtiments consiste en une succession d'étapes présentées sur la **figure 1**. Les données climatiques sont extraites (STEP 1) de la base de données CORDEX sur les périodes contemporaines (2000-2019) et futures (2041-2060 et 2081-2100). Les données brutes du modèle climatique régional sont ensuite corrigées avec des observations disponibles sur une vingtaine d'années historiques pour les différentes variables climatiques (STEP 2). Certaines variables nécessaires et manquantes ont été calculées par des modèles complémentaires, comme la répartition du rayonnement solaire global en rayonnement solaire direct et diffus. Enfin, à partir des périodes de vingt ans futurs de données débiaisées, des fichiers météorologiques d'années types et vagues de chaleur futures ont été reconstitués (STEP 3).

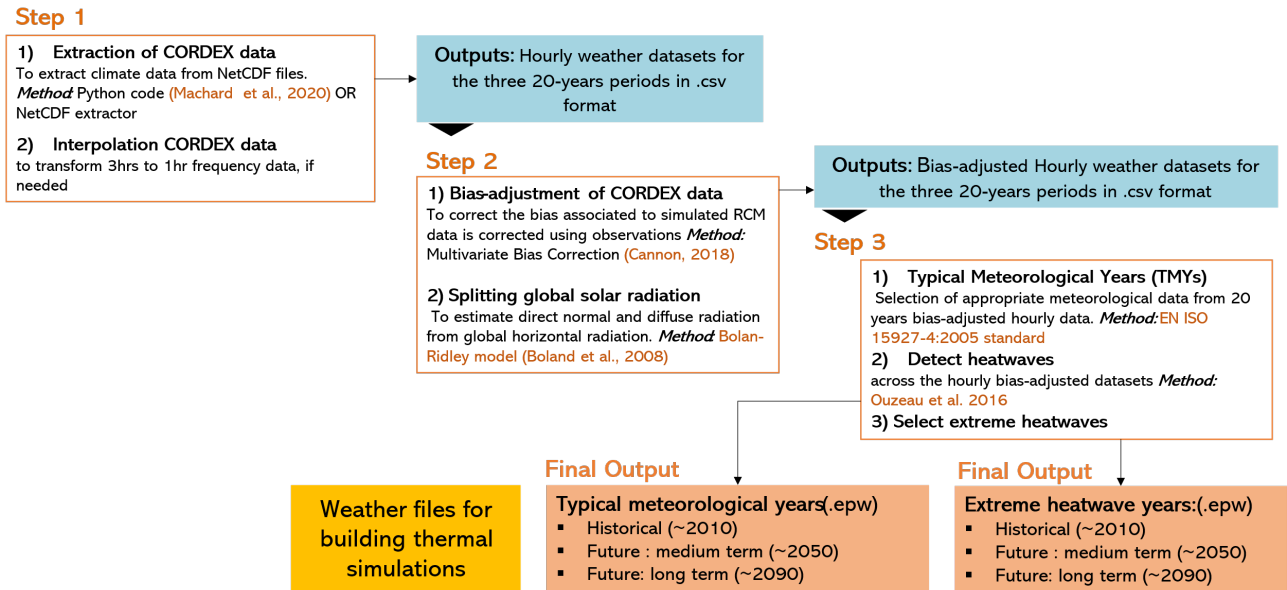


figure 1 – Méthodologie de reconstitution des fichiers météorologiques à partir de la base de données CORDEX

1.1. Sélection des villes

Les fichiers météorologiques ont été créés pour 14 villes représentatives de 10 zones climatiques selon la classification de l'association américaine de chauffage, ventilation et climatisation ASHRAE (ASHRAE 2013) présentées sur la figure 2 - classification différente d'autres approches géographiques, mais spécifique au domaine du conditionnement des ambiances habitées. Les villes ont été choisies en termes d'impacts et donc de population minimum (toutes les villes ont plus de 1.5 M d'habitants et incluent des mégalo-poles telles que Sao Paulo et Buenos Aires), ainsi qu'à l'exigence de données d'observations historiques disponibles pour corriger les biais sur une vingtaine d'années consécutives passées.

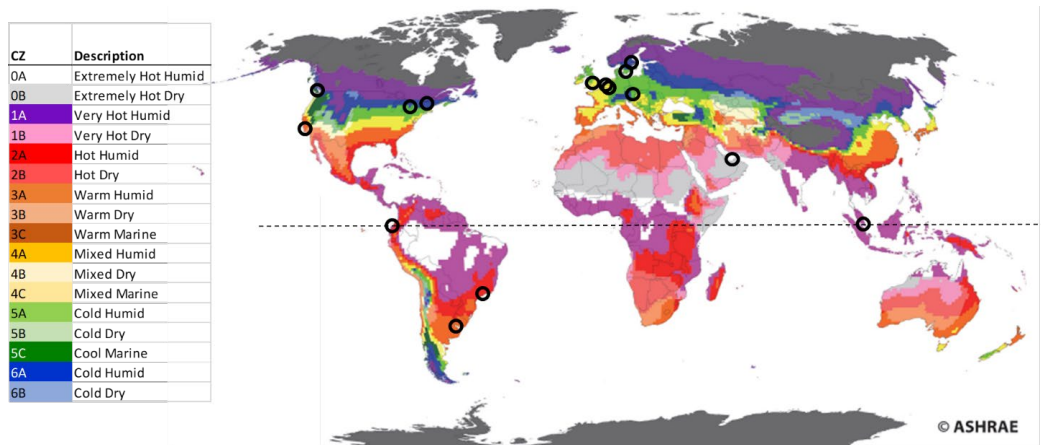


figure 2 - Villes sélectionnées et zones climatiques de l'ASHRAE selon la norme 169-2013 (ASHRAE 2013)

1.2. Sources des données climatiques

Les données climatiques sont issues de la base de données CORDEX. Trois modèles de climat régional proposaient des données sur tous les domaines, nous avons sélectionné le modèle global MPI-M-MPI-ESM-LR couplé au modèle régional REMO-2015 par manque de ressources pour utiliser les trois modèles. Ce modèle est connu pour être un modèle médian comparé aux autres modèles en ce qui concerne les projections de température (Flato et al. 2013). Le scénario socio-économique RCP 8.5 a été choisi pour étudier le risque le plus élevé. Les données sont disponibles à une échelle de 12.5 km sur le domaine européen et à 25 km

pour les autres domaines. Elles sont à un pas de temps horaire sur le domaine européen et trihoraire sur les autres domaines. Les variables téléchargées sont présentées sur le **Tableau 1**.

Tableau 1 – Données CORDEX utilisées pour la reconstitution des fichiers météorologiques

	Domaine Europe (EUR)	Autres domaines (AFR, SEA, EU, SAM, NAM)
Température de l'air	tas	tas
Humidité relative ou spécifique	hurs	huss
Rayonnement solaire global	rsds	rsds
Vitesse du vent	sfcWind	sfcWind
Pression atmosphérique	ps	ps
Couverture nuageuse	clt	

1.3. Correction du biais

La correction du biais des variables climatiques est une étape critique, en particulier pour les extremums de la distribution. Les méthodes de quantile delta mapping (QDM) (Cannon, Sobie, et Murdock 2015) et la correction multivariable (MBCn) (Cannon 2018) ont été utilisées. La méthode QDM préserve les projections du modèle climatique tout en corrigeant les biais dans les quantiles. Les données futures corrigées sont obtenues en ajoutant au modèle climatique les projections dans les quantiles. La méthode QDM a été appliquée à toutes les variables climatiques. Puis, la méthode MBCn a été utilisée (uniquement sur les variables température, humidité et pression atmosphérique) afin de corriger l'interconnexion entre les différentes variables. Le biais des variables a été corrigé indépendamment pour chaque mois afin de préserver la variabilité du climat. Cette étape a été validée en comparant les données corrigées et les observations sur la période de référence. Par exemple, on a pu observer les effets de la correction sur la température qui était surévaluée dans les villes les plus chaudes, et sous-évaluée dans les villes moins chaudes durant la période historique.

1.4. Élection des vagues de chaleur

Les vagues de chaleur ont été sélectionnées pour chaque période de données corrigées sur 20 ans à partir de la méthodologie proposée par (Ouzeau et al. 2016), validée à l'échelle de la France. Cette détection à partir de seuils relatifs permet d'étendre la méthodologie à d'autres types de climat. Elle a donc été choisie pour caractériser les vagues de chaleur d'une façon simple et standardisée dans tous les climats. Trois seuils permettent la détection des vagues de chaleur, calculés sur des percentiles des vingt années de température historiques : Le seuil Spic (99.5 percentile), le seuil Sdeb (97.5) et le seuil Sint (95). Les vagues de chaleur peuvent être caractérisées par trois critères : l'intensité (température journalière maximum en °C), la durée (nombre de jours) et la sévérité (°C.jours au-dessus du seuil Sdeb). Pour chaque ville et chaque période, la vague de chaleur la plus intense, la plus sévère et la plus longue ont été sélectionnées. Souvent, la vague de chaleur la plus sévère est également la plus intense, ou la plus longue.

On peut noter que les seuils définis ici sur la base des vingt années historiques sont indépendants des typologies de construction, des caractéristiques des populations, des systèmes de climatisation et de tous les autres paramètres de résilience. En effet, cette approche doit permettre d'analyser et de comparer sur des bases identiques et objectives des stratégies d'adaptation, de résilience ou les performances. Les années futures sont analysées à seuils constants, ce qui permet aussi de montrer l'évolution de l'exposition aux vagues de chaleur des bâtiments, des systèmes, et des occupants.

2. Analyse des résultats : Vagues de chaleur futures extrêmes sélectionnées

Nous avons ainsi obtenu le nombre, l'intensité et la durée des vagues de chaleur pour chaque ville et chaque période (**figure 3**). Alors qu'aucune des villes n'a fait face à plus de dix vagues de chaleur durant la période contemporaine, on constate une augmentation très forte du nombre de vagues de chaleur dans le futur, notamment dans les quatre villes les plus proches de l'équateur (zones climatiques de l'ASHRAE 0 à 2). En effet, à Singapour cela correspondrait à une moyenne de trois canicules par an d'ici le milieu de siècle, et sept par ans d'ici la fin du siècle contre une tous les trois ans aujourd'hui. A Guayaquil et Sao Paulo le nombre

de vague de chaleurs détecté sur la fin du siècle est également impressionnant, supérieur à 150. L'augmentation dans les autres villes est moins contrastée mais toujours élevée, la plupart des villes présentent plus de vingt vagues de chaleurs dans le futur moyen-terme, soit en moyenne une vague de chaleur chaque année.

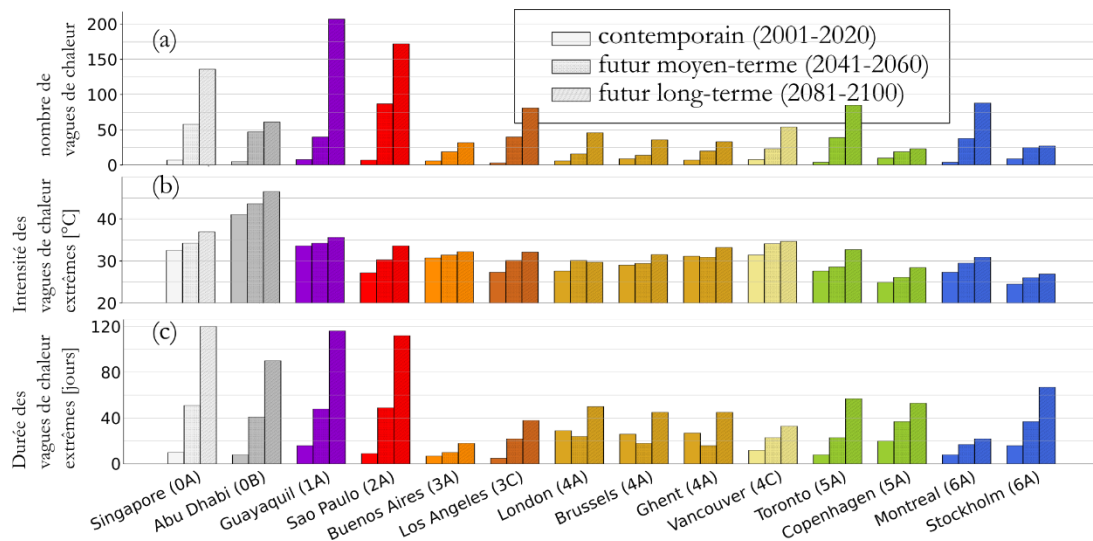


figure 3 – Vagues de chaleurs (nombre, intensités, et durées), par ville et périodes d'étude (modèle climatique MPI-M-MPI-ESM-LR/REMO 2015, scénario socio-économique RCP 8.5)

Concernant l'intensité de la vague de chaleur la plus extrême (**figure 3b**), on constate une très forte augmentation de la température journalière moyenne atteinte durant la canicule pour certaines villes, jusqu'à + 5 °C (Abu Dhabi, Sao Paulo, Los Angeles, Toronto). Dans les autres villes, bien que l'augmentation soit moins marquée elle est bien présente, avec des nuances : pour certaines villes (Londres, Vancouver, Montréal, Stockholm) l'augmentation est plus marquée entre le moyen-terme et aujourd'hui, alors que dans d'autres (Singapour, Guayaquil, Toronto, Copenhague) l'augmentation est plus forte durant la fin de siècle.

Enfin, pour la durée de la vague de chaleur la plus extrême sélectionnée (**figure 3c**), on peut observer une forte augmentation dans les quatre villes les plus chaudes (canicule d'au moins un mois en milieu de siècle, et de plus de trois mois à la fin du siècle). A Buenos Aires, en contraste avec Sao Paulo, l'augmentation de la durée des vagues de chaleur est plutôt faible (ce qui est également remarqué pour l'intensité et pour le nombre de canicules futures). Pour presque toutes les villes, la vague de la chaleur la plus longue du milieu du siècle est d'une durée supérieure à trois semaines. On peut noter une forte augmentation de la durée de la vague de chaleur en fin de siècle à Stockholm (plus de deux mois), à Copenhague et à Toronto, ce qui est remarquable pour ces villes au climat froid.

Conclusion et Perspectives

Les fichiers météorologiques incluant les différents types de canicules futures selon les critères définis ici sont nécessaires pour le développement des solutions de rafraîchissement étudiées dans la communauté de l'énergétique du bâtiment. Ce travail marque une première étape dans la constitution de fichiers de référence permettant l'inter-comparaison de stratégies face aux vagues de chaleur futures, représentatives de toutes les zones climatiques de l'ASHRAE. Ces fichiers seront accessibles en open data, et pourraient être réutilisés pour des études d'adaptation à la chaleur dans des domaines proches (ex. cultures, serres, élevage). La méthodologie répliquable est adaptable, p. ex. pour d'autres modèles ou scénarios socio-économiques, ou encore pour quantifier les incertitudes liées aux modèles de projections climatiques utilisés. Par ailleurs, alors que la plupart des bâtiments sont situés en ville, ces fichiers n'incluent pas l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui a été étudié aussi en première approche par des modèles simplifiés (Machard, et al. 2020). Enfin, les périodes de vingt années futures de données corrigées développées dans ce travail ouvrent des perspectives d'amélioration de la sélection de canicules spécifiques au climat local de certaines villes (par exemple, ajouter l'humidité comme paramètre de détection pour les villes où le climat est très humide).

Remerciements

Les auteurs remercient le World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate (WGRC), le Working Group on Coupled Modelling (WGCM), l'Institut Max Planck pour avoir mis les données de climat à disposition à travers le programme CORDEX, et les différents instituts qui ont contribué à la production de ces fichiers météos.

Bibliographie

ADEME. 2021. « La climatisation dans le bâtiment - Etat des lieux et prospective à 2050 ».

Agence Internationale de l'Énergie. 2018. « The Future of Cooling », **92**.

ASHRAE. 2013. *ANSI/ASHRAE standard 169-2013, Climatic Data for Building Design*.

Attia, Shady, Ronnen Levinson, Eileen Ndongo, Peter Holzer, Ongun Berk Kazanci, Shabnam Homaei, Chen Zhang, et al. 2021. « Resilient Cooling of Buildings to Protect against Heat Waves and Power Outages: Key Concepts and Definition ». *Energy and Buildings* 239 (mai): 110869. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110869>.

Cannon, Alex J. 2018. « Multivariate Quantile Mapping Bias Correction: An N-Dimensional Probability Density Function Transform for Climate Model Simulations of Multiple Variables ». *Climate Dynamics* **50** (1-2): 31-49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>.

Cannon, Alex J., Stephen R. Sobie, Trevor Q. Murdock. 2015. « Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? » *Journal of Climate* **28** (17): 6938-59. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.

Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, et al. 2013. « Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». Cambridge University Press.

« IEA EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings ». 2022. *Energy in Buildings and Communities Programme 2022*. <https://annex80.iea-ebc.org/>.

ISO. 2006. *NF EN ISO 15927-4 Performance hygrothermique des bâtiments - Calcul et présentation des données climatiques. Partie 4 : Données horaires pour l'évaluation du besoin énergétique annuel de chauffage et de refroidissement*.

Machard, Anaïs, Christian Inard, Jean-Marie Alessandrini, Charles Pelé, et Jacques Ribéron. 2020. « A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data ». *Energies* **13** (13): 3424. <https://doi.org/10.3390/en13133424>.

Machard, Anaïs, Simon Martinez, Emmanuel Bozonnet, Eleonora Lacedra, et Christian Inard. 2020. « How to Assess Ecodistrict Resilience to Urban Heat Stress under Future Heatwaves? A Case Study for the City of Paris ». *ICRBE Procedia*, septembre, 11-24. <https://doi.org/10.32438/iCRBE.202044>.

Miller, Wendy, Anaïs Machard, Emmanuel Bozonnet, Nari Yoon, Dahai Qi, Chen Zhang, Aaron Liu, et al. 2021. « Conceptualising a Resilient Cooling System: A Socio-Technical Approach ». *City and Environment Interactions* **11** (août): 100065. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100065>.

Ouzeau, G., J.-M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, et S. Planton. 2016. « Heat Waves Analysis over France in Present and Future Climate: Application of a New Method on the EURO-CORDEX Ensemble ». *Climate Services* **4** (décembre): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>.

Zhang, Chen, Ongun Berk Kazanci, Shady Attia, Ronnen Levinson, Sang Hoon Lee, Peter Holzer, Agnese Salvati, et al. 2021. « IEA EBC Annex 80 - Dynamic Simulation Guideline for the Performance Testing of Resilient Cooling Strategies », **28**.

Zhang, Chen, Ongun Berk Kazanci, Ronnen Levinson, Per Heiselberg, Bjarne W. Olesen, Giacomo Chiesa, Behzad Soudagar, et al. 2021. « Resilient Cooling Strategies – A Critical Review and Qualitative Assessment ». *Energy and Buildings* **251** (novembre): 111312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312>.