

INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE COMPORTEMENT DU BÂTIMENT DANS SON ENVIRONNEMENT URBAIN : QUEL FICHER MÉTÉO FUTUR UTILISER ?

Sihem GUERNOUTI¹, Auline RODLER², Jeremy BERNARD³, Marjorie MUSY⁴, Benjamin MORILLE⁵, Adrien GROS⁶.

¹ Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, sihem.guernouti@cerema.fr

² Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, auline.rodler@cerema.fr

³ Université de Göteborg et chercheur associé au Lab-STICC, Guldhedsgatan 5a - 41320 Göteborg, jeremy.bernard@qu.se

⁴ Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, marjorie.musy@cerema.fr

⁵ Soleneos, benjamin.morille@soleneos.fr

⁶ Soleneos, adrien.gros@soleneos.fr

Résumé :

Deux outils, CCWorldWeatherGen et Meteonorm sont aujourd'hui disponibles pour générer des données horaires météorologiques futures qui peuvent être utilisées en entrée des outils de simulation de la performance énergétique des bâtiments. Ces générateurs ont été développés à partir de méthodes différentes qui peuvent conduire à des résultats différents. Dans ce papier, nous proposons d'utiliser ces outils pour générer des données futures et comparer les fichiers météorologiques obtenus à l'aide d'indicateurs statistiques pour mieux comprendre leurs différences. Ces fichiers sont ensuite utilisés pour réaliser des simulations thermiques dynamiques de bâtiments afin d'évaluer leur impact sur la prédiction des besoins énergétiques et du confort thermique.

Mots-Clés : Changement climatique, fichiers météorologiques, canicule, simulation

Abstract:

Two tools, CCWorldWeatherGen and Meteonorm are currently available to generate hourly future weather data that can be used as input to building energy performance simulation tools. These generators have been developed using different methods which may lead to different results. In this paper, we propose to use these tools to generate future data and compare the obtained meteorological files using statistical indicators to better understand their differences. These files are then used to perform dynamic thermal simulations of buildings in order to evaluate their impact on the prediction of energy needs and thermal comfort.

Keywords: Climate change, weather files, heat wave, simulation

Introduction

Les dynamiques des profils de consommation des bâtiments vont évoluer avec le changement climatique avec des consommations hivernales très faibles et des appels de puissance de climatisation plus importants en été et en période de canicule. La vulnérabilité d'un bâtiment au changement climatique dépendra de sa typologie constructive mais également de l'environnement urbain dans lequel il est situé qui engendre des modifications microclimatiques locales. Il est donc nécessaire de comprendre l'influence de la typologie et de l'environnement urbain d'un bâtiment sur son comportement face au changement climatique afin de proposer des solutions d'adaptation et de résilience. La simulation thermique dynamique (STD) est un outil qui permet de simuler et d'analyser le comportement thermique des bâtiments sous différentes conditions climatiques. Pour cela, un fichier météorologique à une résolution horaire au minimum est indispensable pour mener les calculs. Ce fichier doit comprendre au moins ces cinq variables physiques :

température sèche de l'air, rayonnement global horizontal, humidité relative de l'air, vitesse du vent, direction du vent. Généralement, 20 à 30 années d'observation de ces variables météorologiques sont « moyennées » pour générer un fichier météorologique constitué d'une seule année, défini comme typique du climat du site étudié (Herrera et al., 2017). Afin de prévoir le climat futur, les climatologues utilisent des modèles climatiques globaux (MCG) et des modèles climatiques régionaux (MCR). Un MCR est généralement imbriqué dans un MCG, qui lui fournit une condition initiale et des conditions limites dépendantes du temps (Rummukainen, 2010). Cependant, la résolution spatiale et temporelle actuelle des MCR est trop grossière pour les STD. Nous pouvons trouver dans la littérature diverses méthodes pour augmenter la résolution spatiale et temporelle afin de créer des fichiers météorologiques futurs appropriés à la STD à l'échelle d'un bâtiment (Herrera et al., 2017; Nielsen and Kolarik, 2021). Ces méthodes sont communément appelées descente d'échelle. Il existe deux approches principales : la descente d'échelle dynamique basée sur une simulation des processus physiques et la descente d'échelle statistique. Les méthodes de descente d'échelle les plus utilisées sont le *morphing* ou l'outil Climate Change World Weather Generator, tous deux classés comme des méthodes de descente d'échelle statistique (Nielsen and Kolarik, 2021). Cependant, les fichiers météorologiques obtenus à partir de ces nombreuses méthodes peuvent avoir des différences importantes pour certaines variables.

L'objectif de ce travail est d'identifier le fichier météo qui semble le plus approprié pour analyser l'impact du changement climatique sur le comportement thermique des bâtiments. Ce travail est réalisé dans le contexte du projet CoolParks, dont le cas d'étude est la ville de Nantes (France) présentant un climat tempéré océanique. Nous avons sélectionné deux outils largement utilisés par la communauté scientifique, notamment pour leur facilité de générer des fichiers météo typiques (TMY¹ ou EPW²) : CCWorldWeatherGen (CCWWG) et Meteonorm (Nielsen and Kolarik, 2021). CCWWG permet de générer des fichiers météo sur le changement climatique prêts à être utilisés dans des programmes de STD. Il repose sur les données générées par le modèle HADCM3 avec le scénario A2 (CCWWG, 2013), il est basé sur la méthode de *morphing* (Belcher et al., 2005). Meteonorm permet de générer des données horaires futures à partir d'un modèle stochastique.

1. Méthodologie

Comparaison des fichiers météo

Afin de comparer les performances de CCWWG et de Meteonorm, nous avons calculé l'écart des données climatiques obtenues avec ces outils et celles issues d'observations réelles. Nous avons ainsi utilisé les données de l'ECA&D³. Plusieurs variables météorologiques sont accessibles pour plus de 18000 stations européennes et méditerranéennes qui comprennent les températures maximales et minimales journalières, les précipitations journalières, etc. Nous avons ainsi considéré la période entre 1990 et 2019 comme période de référence pour la ville de Nantes conformément aux recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui propose d'utiliser 30 années de données pour caractériser le climat d'une période donnée. Les données observées sont les températures maximales et minimales journalières ainsi que le rayonnement global horizontal journalier. Les périodes de référence et de projection utilisées pour l'étude comparative sont présentées dans le Tableau 1. Le scénario de changement climatique A2 (RCP8.5) est utilisé, étant donné que c'est le seul qui soit disponible avec CCWG.

Tableau 1: Récapitulatif des données d'analyse : les données du climat actuel sont utilisées pour la validation et celle du climat futur, pour la comparaison

Outils	Climat actuel- 2020	Climat futur- 2050	Résolution temporelle
Observation	1990-2019		Jour
CCWG	2010-2039	2040-2069	heure
Meteonorm	2015-2025	2045-2055	heure

¹ Typical Meteorological Year version 2

² Enregyplus Weather

³ European Climate Assessment & Dataset : <https://www.ecad.eu/dailydata/predefinedseries.php>

Les trois indicateurs climatiques utilisés pour l'étude comparative sont :

1-Les températures extrêmes : En ce qui concerne l'observation, les extremums sont directement disponibles pour la ville de Nantes avec une fréquence journalière. Pour les données CCWG et Meteonorm (données simulées avec une fréquence horaire), les extremums sont déterminés en choisissant comme température maximale journalière le maximum des températures horaires de la journée et la température minimale journalière le minimum des températures horaires de la journée.

2-Les degrés jours (DJ) de chaud et de froid : Pour un lieu donné, le degré jour est la différence entre la température de l'air extérieure et une température de référence à l'intérieur du bâtiment sur une période donnée qui permet de réaliser des estimations de consommations d'énergie thermique pour maintenir un bâtiment confortable en fonction de la rigueur de l'hiver ou de la chaleur de l'été (Day and Karayiannis, 1998). Le nombre de DJ quotidien est calculé de la façon suivante :

Moy = $(T_X + T_N) / 2$: Température Moyenne de la journée.

Pour calculer des besoins de chauffage :

- Si $S_{chaudeur} > T_X$ (cas fréquent en hiver) : $DJ = S_{chaudeur} - Moy$
- Si $S_{chaudeur} \leq T_N$ (cas exceptionnel en début ou en fin de saison de chauffe) : $DJ = 0$
- Si $T_N < S_{chaudeur} \leq T_X$ (cas possible en début ou en fin de saison de chauffe) :

$$DJ = (S_{chaudeur} - T_N) \times \left(0.08 + 0.42 \times \frac{S_{chaudeur} - T_N}{T_X - T_N} \right)$$

Pour calculer des besoins de climatisation :

- Si $S_{froid} > T_X$: $DJ = 0$
- Si $S_{froid} \leq T_N$: $DJ = Moy - S_{froid}$
- Si $T_N < S_{froid} \leq T_X$:

$$DJ = (T_X - S_{froid}) \times \left(0.08 + 0.42 \times \frac{T_X - S_{froid}}{T_X - T_N} \right)$$

Avec : T_N : température minimale du jour J, T_X : température maximale du jour J, S : seuil de température de référence choisi (pour le chaud et le froid).

Les cumuls de Degrés Jour s'obtiennent de façon simple en additionnant les Degrés Jour quotidiens, obtenus sur la période de cumul souhaitée. Nous avons défini ici, la période de chauffage entre le 1er octobre et le 20 mai et la période de refroidissement entre le 21 mai et le 30 septembre (bornes traditionnellement utilisées en France métropolitaine). Les seuils de la température de référence pour le chaud ($S_{chaudeur}$) et pour le froid (S_{froid}) sont fixés respectivement à 18°C et 26°C (Bernard, 2017).

3- Le nombre de jour de canicule : En France, les seuils de déclenchement d'une alerte canicule diffèrent pour chaque département (Wagner et al., 2018). Pour la ville de Nantes, l'alerte canicule est déclenchée lorsque pendant au moins deux jours consécutifs la température maximale dépasse 34°C et la température minimale dépasse 20°C.

Les indicateurs produits avec les fichiers météorologiques issus de CCWG et Meteonorm sont comparés avec ceux produits à partir des fichiers d'observation pour la période de climat actuel et entre eux pour la période de climat futur.

Application à la simulation thermique des bâtiments

Les fichiers météo générés par CCWG et Meteonorm sont ensuite utilisés pour simuler le comportement de deux typologies de bâtiments résidentiels à Nantes (**figure 1**). L'objectif est d'évaluer comment l'utilisation de ces deux fichiers peut impacter la consommation énergétique et le confort thermique dans chaque bâtiment par rapport à une simulation de référence basée sur des données observées. Les données observées décrites précédemment sont des données journalières et ne peuvent donc être utilisées en entrée de la STD. Nous avons donc sélectionné une année supposément représentative du climat nantais de ces 30 dernières années à partir des données observées à la station Météo-France de Bouguenais (station la plus proche de Nantes). Sur la base d'une analyse menée selon les 3 indicateurs précédemment présentés, l'année 2013 a été choisie comme année de référence parmi 5 années de données horaires (2010 à 2015) que nous avons à notre disposition. Les simulations ont été réalisées avec Trnsys17 (Klein et al., n.d.). Les masques solaires ainsi que l'utilisation des occultations n'ont pas été considérés dans les deux cas pour se placer dans la situation estivale la plus défavorable. L'indice de perméabilité à l'air a été défini selon l'année

de construction des bâtiments. Il est de $1 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ et de $3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ respectivement pour les typologies 2 et 1. Une ventilation mécanique est considérée dans la typologie 2 avec un taux de renouvellement d'air de 0.6 vol/h. L'orientation est la même pour les deux cas d'étude avec la façade vitrée orientée à l'ouest. Les gains thermiques internes considérés selon l'occupation sont donnés dans la **figure 1**.





Nom	Classe	Période	Bâtiment exemple (vue Ouest)	Bâtiment exemple (Façades arrières)	composants	Coefficient de transmission thermique (W/m ² .K)	Maison individuelle		Habitat Collectif		
							Heure	Jour Ouvré	Weekend	Jour Ouvré	Weekend
Typologie 1	1 : Maison individuelle mitoyenne	Avant 1948			Mur	1.7	0h à 7h	2,53	2,53	3,05	3,05
					Dalle	3.55					
					Toit	1.35					
					Fenêtre	4.8					
Typologie 2	6 : Petit logement collectif	2012 - 2020			Mur	0.18	7h à 9h	9,1	9,1	9,8	9,8
					Dalle	0.21					
					Toit	0.15					
					Fenêtre	1.4					
							9h à 18h	1,2	7,7	1,2	8,4
							18h à 19h	7,7	7,7	8,4	8,4
							19h à 23h	9,1	9,1	9,8	9,8
							23h à 0h	2,53	2,53	3,05	3,05

figure 1 : Gauche : Informations générales et techniques des deux cas d'étude simulés (TABULA Project Team, 2012) ; Droite : Apports internes (W/m²) selon les jours de la semaine et le type d'habitat (Jan, 2018)

2. Résultats et discussion

Comparaison des fichiers météo

La figure 2 présente les écarts de températures des extremums calculés entre les données observées (1990 -2019) et celles issues des deux outils pour la période 2020. Nous pouvons y observer que pour la période hivernale, les températures minimale et maximale moyennes simulées par CCWWG sont globalement supérieures ou égales à celles observées tandis que le contraire est observé pour Meteonorm (températures max et min simulées inférieures ou égales à celles observées). Pour la période estivale, les températures maximale et minimale moyennes simulées par CCWWG sont aussi globalement supérieures à celles observées. Concernant Meteonorm, nous constatons que la température minimale moyenne est supérieure à celle observée alors que la température maximale moyenne est inférieure à celle-ci.

Modèles	Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CCWWG	MIN	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT	VERT
	MAX	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE
Meteonorm	MIN	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE
	MAX	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE	ROUGE

figure 2 observée (Tobs). – VERT : Test - Tobs > 0.5°C, JA: Ecart de température d'air estimée (Test) par les outils par rapport à celle UNE : 0.5°C >= Test - Tobs > -0.5°C et ROUGE Test - Tobs < 0.5°C

Le calcul des degrés jours de chauffage permet de constater que les hivers projetés avec Meteonorm sont plus rudes que l'observation (**Figure 3**). Ceci est cohérent avec ce nous avons observé précédemment. En effet, nous avons constaté que l'hiver, la température max ou min calculée par Meteonorm est globalement inférieure ou égale à celle observée, c'est-à-dire que l'hiver simulé est beaucoup plus froid que l'hiver observé et par conséquent plus de chauffage est nécessaire. La même cohérence est observée pour CCWWG pour lequel les extremums sont globalement supérieurs ou égaux à l'observation, engendrant des hivers plus cléments qui nécessitent moins de chauffage (Figure 3). Les degrés jours de climatisation sont quant à eux, inférieurs aux données observées. Cependant, les Dj simulés par CCWWG sont supérieurs à ceux simulés par Meteonorm (Figure 3), ce qui signifie qu'il faut plus de climatisation avec le fichier CCWWG qu'avec celui de Meteonorm. Ceci s'explique par le fait que la température CCWWG est supérieure ou égale à la température observée pour la période estivale alors que l'inverse est constaté pour Meteonorm. Le graphique de droite de la **Figure 3** permet d'observer que pour une température max supérieure à 30°C et une température min supérieure à 18°C pendant seulement une journée, le nombre de jours de canicule dans le fichier Metenorm est le double de celui de CCWWG. Cette même observation est constatée lorsque l'on décompte le nombre de jours où ces mêmes conditions météorologiques sont présentes pendant 2 jours consécutifs. L'analyse des variations temporelles des deux fichiers météo a montré plus de pics de températures dans celui de Metenorm que CCWWG. En comparaison avec les données observées, CCWWG sous-estime le nombre de jours de canicule alors que Meteonorm les surestime. Il faut noter ici que les limites de canicule ont été

modifiées car celles définies pour la ville de Nantes ($T_{max}>34^{\circ}\text{C}$ et $T_{min}>20^{\circ}\text{C}$) n'ont jamais été satisfaites dans les deux fichiers météo.

A partir de l'analyse des 3 indicateurs, nous pouvons dire qu'en moyenne, sur une année, CCWWG est le mieux adapté pour étudier l'effet du changement climatique car il présente des températures moyennes proches de celles observées. Pour les périodes de canicule, Meteonorm semble être mieux adapté car malgré une sous-estimation notable de la température maximale moyenne en été, il permet de représenter plus de jours de canicule.

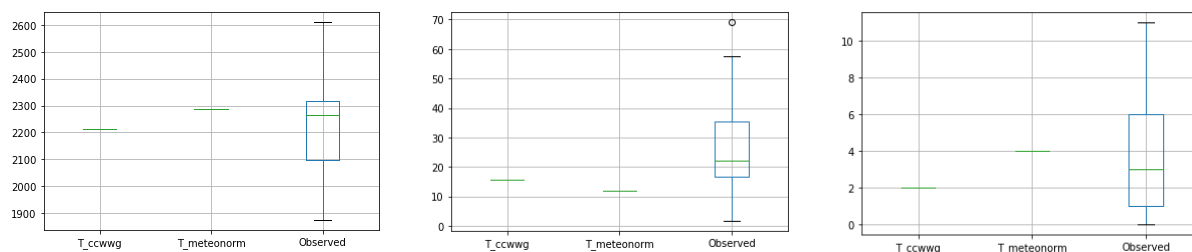


figure 3: Degrés Jours ($^{\circ}\text{C j}$) de : gauche : chaud - milieu: froid /droite : Nombre de jours de canicule pour $T_{max}>30^{\circ}\text{C}$ et $T_{min}>18^{\circ}\text{C}$ pendant une seule journée

Application à la simulation thermique des bâtiments

La Figure 4 présente les besoins énergétiques annuels pour 2020 pour les deux typologies de bâtiments. Nous observons que ces besoins sont sous-estimés par les deux outils et ce pour les deux typologies. CCWWG estime mieux les besoins pour la typologie 1 qui a plus de besoins de chauffage et Meteonorm ceux de la typologie 2 qui est mieux isolée et a des besoins de refroidissement plus important. La Figure 5 montre qu'il n'est pas aisé de trancher sur le choix du fichier météo pour les périodes caniculaires bien que nous ayons auparavant vu que Meteonorm semblait être plus adapté pour les périodes chaudes. En effet, nous pouvons constater d'une part que les deux outils sous-estiment largement les besoins de refroidissement en comparaison avec la référence. D'autre part, pour les différentes zones thermiques de la typologie 1, Meteonorm estime un peu mieux les besoins mais c'est l'inverse qui est observé pour la typologie 2. L'analyse des fichiers météo, nous a montré que la température et le rayonnement du CCWWG étaient plus élevés que ceux de Meteonorm. Etant donné que la typologie 2 a un taux de vitrage plus élevé que la typologie 1, les apports solaires sont plus importants avec CCWWG qu'avec Meteonorm. Ceci explique probablement les besoins plus importants avec CCWWG pour cette typologie. Le choix dépend ainsi non seulement de la typologie mais aussi des conditions météorologiques de la période de canicule étudiée.



figure 4: Analyse globale des besoins énergétiques annuels calculées avec les fichiers de référence (ref), de Meteonorm (MET) et CCWorldWeatherGenerator (CCWWG) pour 2020

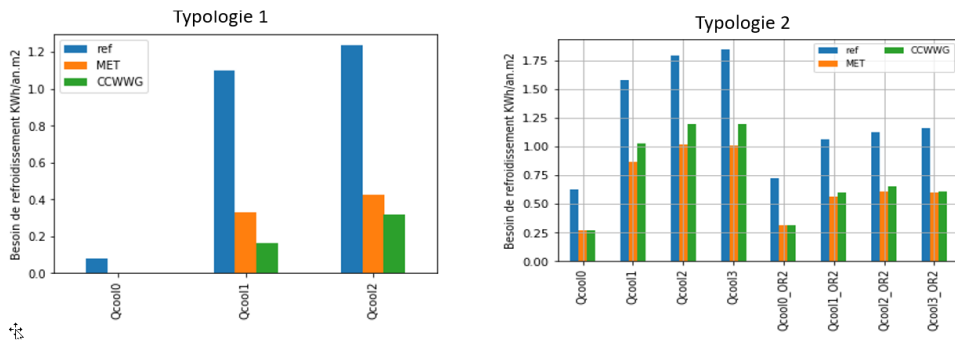


figure 5: Besoins de refroidissement en période de canicule en 2020 (3 jours du 20/07 au 22/07) pour chaque zone thermique des typologies 1 et 2

Conclusion

Cette étude a permis de montrer que le choix de l'outil de génération du fichier météo du changement climatique dépend de l'objectif visé. En effet, pour étudier les périodes chaudes, Meteonorm semble être le mieux adapté pour les deux typologies de bâtiments étudiées (non isolé et fortement isolé), alors que CCWWG est plus adapté pour l'étude des périodes froides (essentiellement pour la typologie 2). Une des limites de cette étude réside dans le choix de l'année de référence pour les simulations thermiques ; il serait donc intéressant de mener le travail de comparaison avec une année de données horaires représentatives de la réalité et d'utiliser d'autres typologies pour savoir si le choix du générateur dépendra uniquement de la période d'intérêt de l'étude (hiver, été, année) ou s'il est lié aussi à la typologie constructive des bâtiments. Enfin, l'utilisation d'autres scénarios du changement climatique autre que le scénario A2 ainsi que la prise en compte de l'effet de l'îlot de chaleur urbain font partie des perspectives futures de ce travail.

Remerciements :

Ces travaux de recherche sont menés dans le cadre du projet CoolParks lauréat de l'appel à projets MODEVAL URBA 2019 et co-financé par l'ADEME. Nous tenons à remercier Hafsa KHAYE pour le travail réalisé dans son master (2019-2020).

Bibliographie

- Belcher, S., Hacker, J., Powell, D., 2005. Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology* **26**, 49–61. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>
- Bernard, J., 2017. Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine (phdthesis). École centrale de Nantes.
- CCWWG, 2013. Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data - CCWorldWeatherGen [WWW Document]. University of Southampton Blogs. URL <https://energy.soton.ac.uk/climate-change-world-weather-file-generator-for-world-wide-weather-data-ccworldweathergen/>
- Day, A.R., Karayiannis, T.G., 1998. Degree-days: Comparison of calculation methods. *Building Services Engineering Research and Technology* **19**, 7–13. <https://doi.org/10.1177/014362449801900102>
- Guan, L., 2009. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment* **44**, 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.021>
- Herrera, M., Natarajan, S., Coley, D.A., Kershaw, T., Ramallo-González, A.P., Eames, M., Fosas, D., Wood, M., 2017. A review of current and future weather data for building simulation. *Building Services Engineering Research and Technology* **38**, 602–627. <https://doi.org/10.1177/0143624417705937>
- Jan, A., 2018. Les bâtiments résidentiels urbains face au changement climatique : étude du comportement thermique et analyse de sensibilité (Master's thesis). Ecole Nationale des travaux publics de l'état, Cerema.

Klein, S.A., Duffie, J.A., Mitchell, J.C., Kummer, J.P., Thornton, J.W., Bradley, D.E., Arias, D.A., Beckman, W.A., Duffie, N.A., Braun, J.E., n.d. Standard Component Library Overview 90.

Nielsen, C.N., Kolarik, J., 2021. Utilization of Climate Files Predicting Future Weather in Dynamic Building Performance Simulation – A review. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2069, 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012070>

Rummukainen, M., 2010. State-of-the-art with regional climate models. *WIREs Climate Change* **1**, 82–96. <https://doi.org/10.1002/wcc.8>

TABULA Project Team, 2012. Application of building typologies for modelling the energy balance of the residential building stock. IWU, Darmstadt.

Wagner, V., Ung, A., Calmet, C., Pascal, M., 2018. Évolution des vagues de chaleur et de la mortalité associée en France, 2004-2014 / Evolution of heat waves and associated mortality in France, 2004-2014. *Bulletin Epidemiologique Hebdomadaire* 16–17.