

# Méthodologie pour la constitution d'un ensemble restreint de canicules, issues de projections climatiques, utilisable pour des simulations thermiques dynamiques

Adrien Toesca<sup>1</sup>, Damien David<sup>\*1</sup>, Kévyn Johannes<sup>1</sup>, Michel Lussault<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univ Lyon, INSA Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008,  
9 rue de la physique, 69621 Villeurbanne, France,  
\*damien.david@insa-lyon.fr

<sup>2</sup> University of Lyon, UMR 5600, EVS  
Lyon, France

---

*RESUME.* Dans le contexte des changements climatiques, les simulations thermiques dynamiques (STD) permettent de tester la capacité des bâtiments passifs (non climatisés) à maintenir des conditions de confort acceptable pendant les canicules. Cependant des données de projections climatiques, contenant des canicules, sont nécessaires afin d'alimenter les outils de STD. L'objectif de la méthodologie en 4 étapes que cet article propose, est de constituer un jeu de données météorologiques de canicules, restreint et représentatif d'une localité. La méthodologie est testée pour l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry. Les deux premières étapes consistent à collecter des données de projections climatiques et à détecter les canicules contenues dans ces données. Pour l'aéroport Lyon Saint-Exupéry, 2384 canicules ont été détectées. Les deux dernières étapes consistent à caractériser les canicules et à sélectionner un ensemble de canicules distinctes, représentatif de la diversité météorologique d'une localisation donnée. Pour Lyon, 1183 canicules distinctes ont été sélectionnées. Des études supplémentaires seront nécessaires pour réduire la taille de cette sélection.

*MOTS-CLÉS :* Canicules, projections climatiques, confort d'été

---

*ABSTRACT.* In the context of climate change, Dynamic Thermal Simulations (DTS) are used to test the ability of passive buildings to maintain acceptable comfort conditions during heat waves. However, climate projection data, including heat waves, are needed to feed the DTS tools. The objective of the 4-step methodology proposed in this paper is to build up a limited heat wave weather dataset representative of a locality. The methodology is tested for Lyon Saint-Exupéry airport. The first two steps consist in collecting climate projection data and detecting heat waves contained in these data. For Lyon Saint-Exupéry airport, 2384 heat waves were detected. The last two steps consist in characterising the heat waves and selecting a set of distinct heat waves, representative of the meteorological diversity of a given location. For Lyon, 1183 distinct heat waves were selected. Further studies will be needed to reduce the size of this selection.

*KEYWORDS:* Heatwaves, climate projections, summer comfort

---

## 1. INTRODUCTION

Dans le contexte des changements climatiques, les événements climatiques extrêmes, comme les canicules, seront de plus en plus fréquents, intenses et longs. Les températures extrêmes sont sources d'inconfort et de problèmes de santé dans les environnements extérieurs et intérieurs des bâtiments. C'est particulièrement le cas pour les bâtiments passifs, qui ne disposent pas de système de refroidissement actif pour assurer une ambiance intérieure confortable. Selon Santamouris (2019), 92% des bâtiments résidentiels peuvent être considérés comme passifs pour les conditions estivales en Europe.

Afin d'évaluer la capacité des bâtiments passifs actuels à maintenir une ambiance intérieure confortable ou saine pendant les canicules futures, des données météorologiques représentatives des futurs événements extrêmes sont nécessaires. Cet article décrit une méthodologie en 4 étapes permettant d'obtenir un ensemble de fichiers météorologiques, représentatif d'une localisation donnée, contenant des canicules distinctes, prenant en compte des effets du réchauffement climatique durant les décennies à venir et pouvant être utilisés dans les outils de simulation thermique dynamique (STD). Dans cet article, la méthodologie est développée pour le cas de l'aéroport Lyon Saint Exupéry.

Chaque section de l'article détaille une étape de la méthodologie décrite sur la figure 1. Les deux premières étapes ont pour objectifs de constituer un jeu de données des futures canicules possibles. Les deux dernières étapes permettent de caractériser les canicules, et en se basant sur cette caractérisation, de sélectionner un ensemble de canicules distinctes, représentatif de la diversité météorologique d'une localisation donnée.

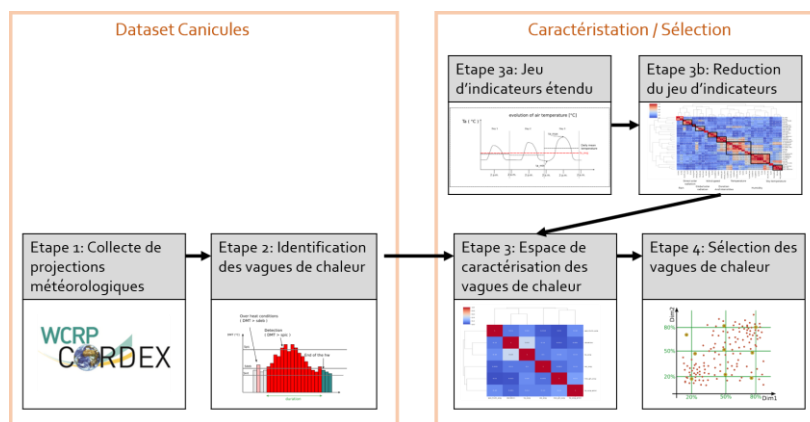


Figure 1 : schéma explicatif de la méthodologie

## 2. ETAPE 1 : COLLECTER DES DONNEES DE PROJECTIONS CLIMATIQUES

L'objectif de cette étape est de collecter des données météorologiques de projections climatiques pour une période allant jusqu'à 2100, et pour plusieurs scénarios RCP (Representative Concentration Pathway). Ces données doivent être physiquement réalistes, capables de représenter les canicules et utilisables pour réaliser des STD.

Selon Machard et al. (2020), les données de projections climatiques issues des simulations RCM (Modèles de Climat Régional) du projet EuroCORDEX répondent à ces objectifs. Un résultat de projections climatiques est formé par l'association d'un scénario RCP et d'un modèle. Un modèle est composé d'un GCM (Modèle de Climat Global), d'un RCM (Modèle de Climat Régional) et d'un ensemble (Jeu de perturbations initiales appliqué lors des simulations). Les GCM et RCM modélisent les interactions entre les différentes composantes du système climatique (l'atmosphère, les océans, les fleuves, le sol, etc.) sous des forçages externes tels que les radiations solaires et les gaz à effet de serre. Le projet EuroCORDEX a été encadré par le World Climate Research Program (WCRP) et rassemble toutes les projections climatiques réalisées sur le domaine européen. Les données disponibles sont : soit des résultats bruts de simulations (CORDEX), soit des données dont le biais a été ajusté par rapport aux écarts avec la période historique (CORDEX-Ajusté).

Pour que des données de projections climatiques soient exploitables en STD, elles doivent inclure un jeu de variables minimum. Ce jeu de variable doit être suffisant pour reconstituer l'ensemble des

données contenues dans un fichier météorologique d'entrée de STD (type EnergyPlusWeatherFile). Le tableau 1 décrit le jeu de variable minimum utilisé dans le cadre de cette étude. Il contient trois variables supplémentaires par rapport au jeu de variables minimum proposé par Machard et al. (2020) : le rayonnement infrarouge incident et les deux composantes de la vitesse d'air qui permettent de calculer la direction du vent.

Les données météorologiques utilisées en STD sont au pas de temps horaire. Les pas de temps des résultats de projections climatiques disponibles des projets CORDEX et CORDEX-Ajusté ne sont que rarement disponible au pas de temps horaire. Afin de les ramener au pas de temps horaires, des interpolations ont été réalisés. Pour minimiser l'effet de l'interpolation, un pas de temps maximum a été fixé pour chaque variable (Tableau 1). Les résultats de projections climatiques CORDEX seront sélectionnés seulement si le pas de temps disponible est inférieur au pas de temps maximum pour toutes les variables.

| Symboles CORDEX | Variabiles issues de EuroCORDEX                          | Pas de temps |
|-----------------|--|--------------|
| tas             | Température d'air sec [K]                                | 3hrs         |
| huss            | Humidité spécifique [kg/kg]                              | 3hrs         |
| ps              | Pression atmosphérique [Pa]                              | 3hrs         |
| clt             | Fraction nuageuse [%]                                    | 3hrs         |
| rsds            | Rayonnement global horizontal [W/m <sup>2</sup> ]        | 3hrs         |
| sfcwind         | Vitesse du vent [m/s]                                    | 3hrs         |
| pr              | Précipitation [kg/m <sup>2</sup> /s]                     | 3hrs         |
| <b>rlds</b>     | <b>Rayonnement infrarouge incident [W/m<sup>2</sup>]</b> | <b>3hrs</b>  |
| <b>uas</b>      | <b>Vitesse du vent vers l'Est [m/s]</b>                  | <b>6hrs</b>  |
| <b>vas</b>      | <b>Vitesse du vent vers le Nord [m/s]</b>                | <b>6hrs</b>  |

Tableau 1 : Jeu de variable minimum pour chaque projection climatique permettant de constituer un fichier météorologique

| Modèles<br>GCM        | Cordex   |        |       | Cordex Ajusté |        |        |
|-----------------------|----------|--------|-------|---------------|--------|--------|
|                       | RCM      | RCP 26 | RCP45 | RCP 85        | RCP 45 | RCP 85 |
| CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | ALADIN63 | X      | X     | X             |        |        |
| CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | RAMCO22E | X      | X     | X             |        |        |
| CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 | RCA4     |        | X     | X             | X      | X      |
| ICHEC-EC-EARTH        | RAMCO22E |        | X     | X             | X      | X      |
| IPSL-IPSL-CM5A-MR     | RCA4     |        | X     | X             | X      | X      |
| MOHC-HadGEM2-ES       | RAMCO22E | X      | X     | X             | X      | X      |
| MOHC-HadGEM2-ES       | RCA4     | X      | X     | X             | X      | X      |
| MPI-M-MPI-ESM         | RCA4     | X      | X     | X             | X      | X      |
| NCC-NorESM1-M         | RCA4     | X      | X     | X             |        |        |
| ICHEC-EC-EARTH        | RAMCO22E | X      | X     | X             |        |        |
| ICHEC-EC-EARTH        | RCA4     | X      | X     | X             | X      | X      |

Tableau 2 : Liste des modèles GCM-RCM utilisés pour cette étude ainsi que les scénarios RCP et les projets associés. Les croix signifient la disponibilité des données.

Le tableau 2 détaille les 44 résultats de projections climatiques qui ont été collectés pour cet article. Ils sont issus de 11 modèles de projections climatiques différents. Parmi ces 44 résultats, 14 sont issus de données dont le biais a été corrigé et 30 sont des résultats bruts de simulation. Les résultats de projections climatiques sont donnés pour la période de 2007 à 2097, ce qui représente 3960 années

simulées. Toutes les données collectées correspondent à la localisation de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry.

### 3. ETAPE 2 : IDENTIFIER LES VAGUES DE CHALEUR

L'objectif de cette étape est d'identifier les canicules contenues dans les données de projections climatiques collectées. Il n'y a pas de définition universelle des canicules mais 4 méthodes de détection de canicules ont été testées et comparées : la méthode « Spic, Sdeb, Sint » de Ouzeau et al. (2016), « IBM » de Pascal et al. (2006), « EHF » de Nairn et al., (2014) et « HWMI » de Russo et al. (2014).

Le tableau 3 indique le nombre de canicules détectées par RCP et par projet pour chacune de ces méthodes et pour tous les modèles. La valeur entre parenthèses correspond au nombre moyen annuel de canicules détectées. Le nombre de canicules détectées sur les données de projections climatiques dé-biaisées (CORDEX-Ajusté) est plus important que celui sur les données brutes même si le nombre de modèle disponible pour les données ajustées est moins important. Il semblerait que, sans la correction du biais, les températures des projections du projet CORDEX soient sous-estimées, résultant donc en un nombre de canicules plus faible. Pour la suite de l'étude, seules les canicules issues du projet CORDEX-Ajusté seront utilisées.

| Méthode de détection | CORDEX |            |            | CORDEX-Ajusté |                       |
|----------------------|--------|------------|------------|---------------|-----------------------|
|                      | RCP    | RCP26      | RCP45      | RCP45         | RCP85                 |
| Spic, Sdeb, Sint     |        | 405 (0,6)  | 691 (0,7)  | 1063 (1,1)    | 1065 (1,7) 1319 (2,1) |
| IBMn, IBMx           |        | 316 (0,4)  | 638 (0,6)  | 1133 (1,1)    | 810 (1,27) 1419 (2,2) |
| EHF                  |        | 2227 (3,0) | 3493 (3,4) | 3915 (3,9)    | 3781 (5,9) 3860 (6,0) |
| HWMI                 |        | 1767 (2,4) | 2807 (2,8) | 3502 (3,5)    | 4055 (6,3) 4320 (6,7) |

Tableau 3 : Nombre de canicules totales par RCP et projet (tous modèles confondus) et le nombre moyen par an (divisé par le nombre de modèle et le nombre d'année simulée)

Les méthodes « EHF » et « HWMI » détectent beaucoup plus de canicules que les deux autres méthodes, principalement en dehors de la période estivale (Mai et Septembre). Les moyennes des températures des canicules sont de 24.8°C (« EHF ») et 25.6°C (« HWMI »), soit plus de 3°C de moins que pour les deux autres méthodes. Cette étude s'intéresse aux canicules suffisamment chaudes pour causer des problèmes d'inconfort dans les bâtiments, c'est pourquoi, ces deux méthodes ne sont pas retenues.

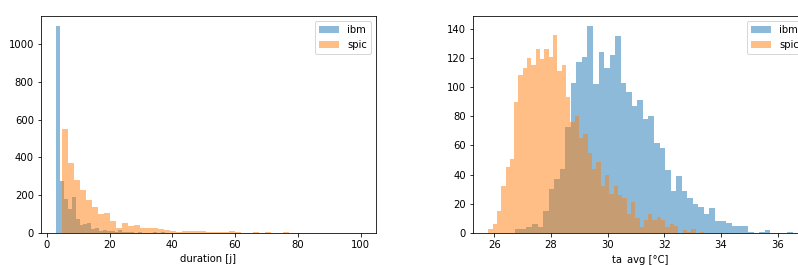


Figure 2 : Histogrammes des durées (à gauche) et des températures moyennes (à droite) des canicules détectées par les deux méthodes « ibm » (en bleu) et « Spic, Sdeb, Sint » (en orange)

Il y a 90% de correspondance entre les périodes de canicules détectées avec les méthodes « IBM » et « Spic, Sdeb, Sint ». Cependant les canicules identifiées avec la méthode « Spic, Sdeb, Sint » sont plus longues de 8 jours et moins chaudes de 2°C en moyenne comme le montrent les histogrammes de la figure 2. La méthode « IBM » permet d'identifier le « cœur » des canicules, c'est pourquoi elles sont en moyenne plus chaudes et plus courtes. L'histogramme de gauche montre que les durées définies par la méthode « Spic, Sdeb, Sint » sont plus échelonnées. C'est pour cette raison que la méthode « Spic, Sdeb, Sint » est retenue, l'échelonnage des durées facilitera en effet la distinction entre les différentes canicules.

A l'issue de cette étape, le jeu de données est constitué de 2384 canicules, détectées par la méthode de Ouzeau et al. (2016), pour la localisation de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry. Ces données sont toutes issues des données de projections climatiques du projet CORDEX-Ajusté (cellules en vert dans le tableau 3).

#### 4. ETAPE 3 : CARACTERISER LES CANICULES

L'objectif de cette étape est de définir un jeu d'indicateurs restreint, nécessaire pour caractériser les canicules. Pour cela, un jeu d'indicateurs élargi a d'abord été arbitrairement établi. Ensuite, à l'aide d'une méthode statistique, ce jeu d'indicateurs a été réduit en conservant uniquement des indicateurs indépendants et significatifs. Le jeu d'indicateurs restreint forme un espace de caractérisation des canicules.

##### 4.1. JEU D'INDICATEURS ELARGI

Le jeu d'indicateurs est tout d'abord constitué de grandeurs statistiques calculées sur les données météorologiques disponibles : la moyenne (avg), le maximum (max), le minimum (min), l'amplitude journalière moyenne (damp\_avg), la moyenne des minimums et maximums journalier (dmin\_avg/dmax\_avg), et les moyennes nocturne et diurne (nighttime/daytime). Ce jeu d'indicateurs contient également les calculs d'intensité de canicules définis par Ouzeau et al. (2016), Nairn et al. (2014) et Russo et al. (2014) (intensity\_spic/intensity\_ehf/intensity\_hwmi respectivement). D'autres indicateurs spécifiques ont été développés afin de caractériser le potentiel de rafraîchissement disponible pendant une canicule. Ils sont représentés sur la figure 3 par les surfaces sous les courbes (en bleu pour le potentiel de rafraîchissement par évaporation, en orange celui par rayonnement thermique, en jaune celui par protection solaire, et enfin en gris celui par ventilation naturelle). Tous les indicateurs du jeu élargi sont listés sur les ligne/colonne de la matrice affichée sur la figure 4.

##### 4.2. JEU D'INDICATEURS RESTREINT

Pour ne conserver que les indicateurs indépendants, la méthode de classification hiérarchique agglomérative UPGMA (Unweighted Pair Group Method with Arithmetic mean) a été utilisée. Appliquée sur la matrice contenant les corrélations entre les indicateurs (en valeurs absolue), la méthode définit un dendrogramme qui permet de regrouper les indicateurs fortement corrélés entre eux. Les groupements formés sont identifiés par les rectangles sur la figure 4. Il s'avère que les indicateurs sont regroupés autour de leur grandeur météorologique associée (température, humidité, rayonnement, vent, pluie). Afin de réduire l'espace à un jeu d'indicateurs indépendants, un seul indicateur est conservé dans chaque groupe. De plus, certains groupes d'indicateurs ne sont pas conservés (rectangle rouge sur la figure 4) car ils correspondent à des grandeurs qui n'ont que très peu d'influence sur le comportement thermique des bâtiments. C'est le cas notamment du groupe « pluie ». Les précipitations sont faibles et

ne sont donc pas responsables d'une baisse de température. Les canicules peuvent donc être caractérisées par un espace composé de 6 indicateurs, listés dans le tableau 4.

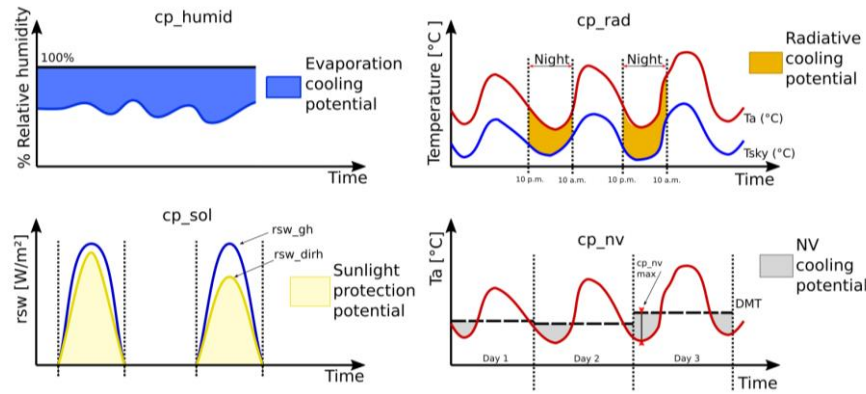


Figure 3 : Potentiel de rafraîchissement (par évaporation en haut à gauche, par protection du rayonnement direct en bas à gauche, par rayonnement thermique nocturne en haut à droite et par ventilation naturelle en bas à droite)

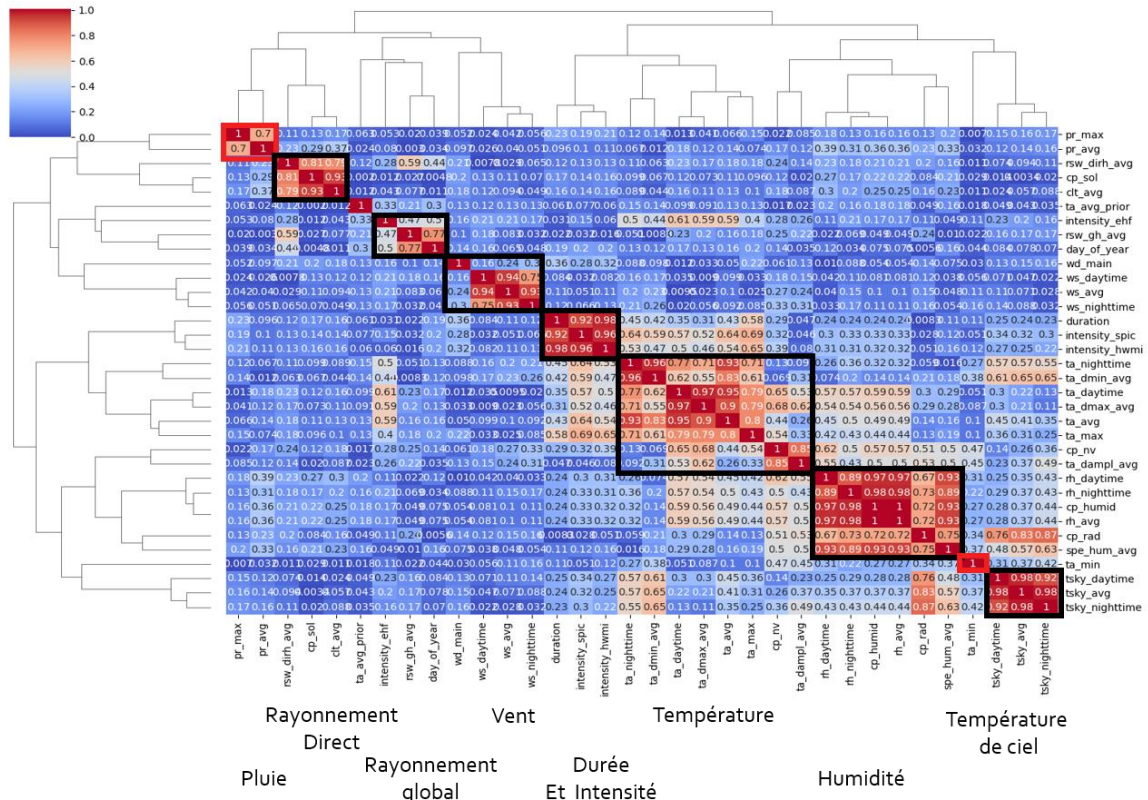


Figure 4 : Matrice de corrélation (en valeur absolue) entre les différents indicateurs caractérisant les canicules. Les fortes corrélations sont représentées en rouge, et les faibles en bleu. En bas de la figure sont représentés les groupes d'indicateurs fortement corrélés entre eux.

## 5. ÉTAPE 4 : SÉLECTIONNER DES CANICULES

Lors de la deuxième étape, 2384 canicules ont été identifiées pour la localisation de l'aéroport de Lyon Saint-Exupéry. Il s'agit maintenant de sélectionner, dans cet ensemble de données, un ensemble réduit de canicules distinctes, représentatif de la diversité météorologique d'une localisation donnée.

Dans cet article, une première méthode de sélection a été testée. Elle se fait sur un maillage régulier de l'espace de caractérisation précédemment défini. La figure 5 représente schématiquement un maillage pour un espace à 2 dimensions. Pour chaque indicateur, une valeur de maillage maximale (Q95, 95<sup>ème</sup> percentile) et une valeur minimale (Q5, 5<sup>ème</sup> percentile) ont été définies. Les valeurs de maillages intermédiaires sont distribuées régulièrement entre ces deux valeurs extrêmes. Le nombre de points de maillage par indicateur a été choisi arbitrairement. Le tableau 4 affiche les valeurs minimales, maximales ainsi que le nombre de points de maillage pour chacun des indicateurs de l'espace, représentant un total de 4800 points de maillage.

Chacune des 2384 canicules détectées est ensuite associée au point du maillage le plus proche en utilisant un calcul de distance euclidienne sur les données normalisées au préalable. Les canicules qui sont associées au même point de maillage sont considérées comme similaires. Dans ce cas, c'est la canicule située au plus près du point de maillage qui est sélectionnée. A l'issue de cette méthode, il reste toujours 1183 canicules distinctes dans cet espace de caractérisation. Le point du maillage le plus représenté (21 canicules similaires) est décrit dans le tableau 5.

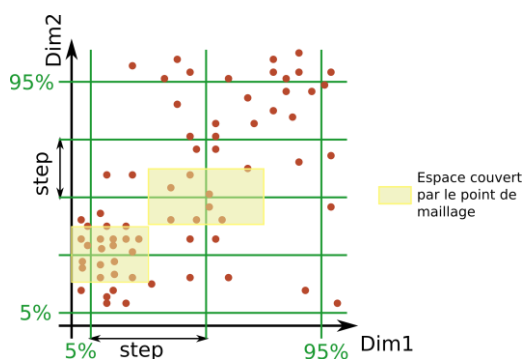


Figure 5 : Schéma représentant le maillage d'un espace à deux dimensions. C'est ce principe de maillage qui a été utilisé pour l'espace de caractérisation des canicules

| Indicateurs                           | Abréviation  | Valeur min (Q5)         | Valeur max (Q95)     | Nombre de points | Pas                   |
|---------------------------------------|--------------|-------------------------|----------------------|------------------|-----------------------|
| Température moyenne                   | Ta_avg       | 26.61 °C                | 30.68 °C             | 5                | 1.02 °C               |
| Durée                                 | Durée        | 5 jours                 | 39 jours             | 5                | 8.5 jours             |
| Vitesse de vent moyenne               | Ws_avg       | 1.89 m/s                | 3.69 m/s             | 4                | 0.6 m/s               |
| Rayo. solaire global horizontal moyen | Rsw_gh_avg   | 206.77 W/m <sup>2</sup> | 317 W/m <sup>2</sup> | 4                | 36.7 W/m <sup>2</sup> |
| Humidité spécifique moyenne           | Hum_spe_avg  | 7.43 ge/kgas            | 13.26 ge/kgas        | 4                | 1.9 ge/kgas           |
| Temp. moyenne précédant la canicule   | Ta_avg_prior | 19.65 °C                | 27.16 °C             | 3                | 3.75 °C               |

Tableau 4 : Noms des indicateurs composant l'espace de caractérisation des canicules, ainsi que les valeurs retenues pour le maillage régulier composé de 4800 points

| Indicateurs | Ta_avg  | Durée   | Ws_avg | Rsw_gh_avg           | hum_spe_avg  | Ta_avg_prior |
|-------------|---------|---------|--------|----------------------|--------------|--------------|
| Valeurs     | 27.6 °C | 5 Jours | 2.46   | 280 W/m <sup>2</sup> | 9.37 ge/kgas | 23.4 °C      |

Tableau 5 : Valeurs des indicateurs pour le point du maillage le plus représenté par le jeu de canicule

## 6. CONCLUSION

La méthodologie développée dans cet article permet de sélectionner des fichiers de projections météorologiques contenant des canicules utilisables pour de la simulation thermique dynamique. Un espace de caractérisation des canicules composé d'indicateurs météorologiques significatifs et indépendants a été créé, permettant d'identifier 1183 canicules différentes sur les 2384 canicules détectées pour la localisation de l'aéroport de Lyon Saint Exupéry. Ce nombre reste conséquent pour qu'une STD d'un bâtiment soit réalisée pour chacune de ces canicules. Afin de réduire encore ce nombre, d'autres méthodes de sélection (étape 4 de la méthodologie) seront testées dans de futurs travaux. Les premières pistes des auteurs consistent à utiliser des algorithmes de clustering permettant de rassembler les canicules proches entre elles mais appartenant à différents points du maillage défini par cet article.

## 7. REMERCIEMENTS

Nous remercions le Groupe de travail sur le climat régional du Programme mondial de recherche sur le climat (World Climate Research Program, WCRP), ainsi que le Groupe de travail sur la modélisation couplée, ancien organe de coordination de CORDEX et groupe responsable du CMIP5. Nous remercions également les groupes de modélisation climatique (énumérés dans le tableau 2 du présent document) pour avoir produit et mis à disposition les résultats de leurs modèles. Nous remercions également l'infrastructure de la Earth System Grid Federation, un effort international dirigé par le Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison du ministère américain de l'énergie, le European Network for Earth System Modelling et d'autres partenaires de la Global Organisation for Earth System Science Portals (GO-ESSP).

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- 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>.
- Nairn, John, et Robert Fawcett. 2014. « The Excess Heat Factor: A Metric for Heatwave Intensity and Its Use in Classifying Heatwave Severity ». *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12 (1): 227-53. <https://doi.org/10.3390/ijerph120100227>.
- 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>.
- Pascal, Mathilde, Karine Laaidi, Martine Ledrans, Elsa Baffert, Céline Caserio-Schönemann, Alain Le Tertre, Jacques Manach, Sylvia Medina, Jérémie Rudant, et Pascal Empereur-Bissonnet. 2006. « France's Heat Health Watch Warning System ». *International Journal of Biometeorology* 50 (3): 144-53. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0003-x>.
- Santamouris, Mat. 2019. *Cooling Energy Solutions for Buildings and Cities*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/10901>.
- Russo, Simone, Alessandro Dosio, Rune G. Graversen, Jana Sillmann, Hugo Carrao, Martha B. Dunbar, Andrew Singleton, Paolo Montagna, Paulo Barbola, et Jürgen V. Vogt. 2014. « Magnitude of Extreme Heat Waves in Present Climate and Their Projection in a Warming World ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119 (22): 12,500-12,512. <https://doi.org/10.1002/2014JD022098>.