

# Consommations électriques et îlots de chaleur urbains : application à la ville de Paris

## Electricity consumption and urban heat island: application to Paris

Brice TREMEAC<sup>1\*</sup>, Mounia BENDADA<sup>1</sup>, Elyes NEFZAOU<sup>2,4</sup>, Martin HENDEL<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire du Froid, des Systèmes Énergétiques et Thermiques (Lafset), Cnam, HESAM Université 292 rue Saint-Martin, F-75003, Paris, France

<sup>2</sup>ESYCOM Lab, UMR 9007, Univ Gustave Eiffel, CNRS, F-77454 Marne-la-Vallée, France

<sup>3</sup>Université de Paris, LIED, UMR 8236, CNRS, F-75013, Paris, France,

<sup>4</sup>ESIEE Paris, Univ Gustave Eiffel, F-93162 Noisy-le-Grand, France

\*(auteur correspondant : brice.tremeac@lecnam.net)

**Résumé** – Le climat des villes est caractérisé par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Si en hiver, l'ICU a tendance à réduire les consommations de chauffage, c'est tout l'inverse pour la production de froid en été se soldant par une augmentation des rejets de chaleur et donc une intensification de l'ICU. Par ailleurs, le déploiement massif de compteurs énergétiques intelligents permet l'accès à d'importantes quantités de données détaillées sur les consommations énergétiques. Les relevés des consommations électriques d'une quarantaine de bâtiments publics tertiaires exploités par la ville de Paris (école, bureaux, conservatoire, etc.) ont été analysés par des outils statistiques. Cette analyse permet de distinguer quatre grandes classes de bâtiments selon la thermo-sensibilité de leur demande électrique à la température extérieure : thermo-sensibilité hivernale, estivale, double thermo-sensibilité hivernale et estivale enfin une classe marginale où les consommations ne sont pas thermosensibles.

**Mots-clés** : îlot de chaleur urbain; climatisation ; consommation énergétique des bâtiments

**Abstract** – The urban heat island (UHI) is one the best known characteristics of urban climate. While UHI tends to limit space heating needs in winter, it significantly increases the need for space cooling in summer. Recently, the mass deployment of smart energy meters provides unprecedented access to detailed energy consumption data. In this study, the electricity consumption of 42 buildings owned by Paris City Hall is analyzed to identify how Parisian buildings are affected by UHI. The study identified four types of buildings, classified according to the thermal sensitivity of their electricity consumption: winter-, summer- and dual-sensitivity and finally buildings with no thermal sensitivity.

**Keywords:** urban heat island; air conditioning; building energy consumption

### Nomenclature

*CEJ* Consommation électrique moyenne journalière, kWh

*ICU* Ilôt de chaleur urbain, °C

*T<sub>ejm</sub>* Température extérieure journalière moyenne, °C

## 1. Introduction

Le climat des villes est caractérisé par le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), caractérisé par des températures plus élevées en moyenne en ville que dans les zones rurales environnantes, notamment lors des pics de chaleur [1]. Un des facteurs contribuant à leur formation est les rejets de chaleur anthropiques, issus des activités humaines. A Paris, l'ICU se manifeste par une augmentation de la température de 3 °C en moyenne intra-muros par rapport aux zones rurales environnantes. Sous conditions anticycloniques, l'ICU parisien atteint régulièrement 10°C,

notamment lors de canicules. Si en hiver, l'ICU a tendance à réduire les consommations de chauffage, c'est tout l'inverse pour la production de froid en été, se soldant par une augmentation des rejets de chaleur et donc une intensification de l'ICU [2] et une éventuelle détérioration de la qualité du sommeil [3]. Par ailleurs, le déploiement massif de compteurs énergétiques intelligents dans les bâtiments durant les dernières années permet désormais d'avoir accès et des quantités de données très importantes, détaillées et facilement accessibles sur les consommations énergétiques. Ces données peuvent être traitées afin de déterminer, a posteriori, les postes d'amélioration d'économie d'énergie [4] [5]. Certains auteurs ont développé des corrélations à une ou plusieurs variables. Par exemple, en Australie Guan *et al.* proposent une corrélation en fonction à la fois de la température extérieure mais également de l'humidité relative de l'air ambiant [6]. Cependant la corrélation proposée n'a été validée que pour 4 bâtiments. Sur des bâtiments récents, Cruz Rios *et al.* ont mis en évidence que, pour 4 bâtiments universitaires à haute performance, les consommations électriques n'étaient pas corrélées à la température extérieure [7].

Pour une ville comme Paris, le parc immobilier est très majoritairement constitué de bâtiments anciens et diversifiés. Cette diversité rend complexe une étude cas par cas afin de développer une politique énergétique pertinente. Ainsi l'exploitation des données de consommation énergétique permettra de développer, via une approche globale, une stratégie de gestion des systèmes de climatisation à court et long terme et une meilleure adaptation aux ICU. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail présenté. Les relevés des consommations électriques d'une quarantaine de bâtiments publics tertiaires exploités par la ville de Paris ont été analysés par des outils statistiques. La partie suivante présente le cas d'étude. Nous présentons ensuite la méthodologie développée dans ce travail, puis les résultats obtenus au travers d'une analyse de la pertinence des indicateurs proposés.

## **2. Cas d'étude**

### **2.1. Typologie et caractéristiques des bâtiments étudiés**

Les données anonymes disponibles concernent 42 bâtiments administratifs situés à Paris intra-muros et gérés par la Ville de Paris. Ces bâtiments sont répartis sur l'ensemble de la ville et représentent plusieurs affectations : conservatoire, bibliothèque, piscine, bureaux, mairie, archive etc. Stewart et Oke ont proposé une classification des îlots en fonction de leur typologie [8]. Les bâtiments sont classés dans des îlots de type LCZ2 à savoir : bâtiments de 3 à 9 étages, peu ou pas d'arbres ou espaces verts, matériaux de construction en pierre brique tuile ou béton ainsi qu'une petite plage de température diurne.

### **2.2. Données disponibles**

Pour chaque bâtiment décrit précédemment, nous disposons des courbes de charges, c'est à dire des appels de puissances électriques des bâtiments mesurés au pas de temps de 10 min. Une surface utile est connue pour 40 bâtiments. La période d'étude s'étend d'août 2016 à août 2018. Cependant, les données disponibles ne couvrent pas toute la période pour plusieurs bâtiments, notamment à cause de capteurs défectueux ou d'absence de certains capteurs durant une partie de la période d'étude. Nous disposons également d'informations relatives aux systèmes de production thermique : nombre, puissances et éventuellement réversibilité chaud / froid ainsi de la puissance totale souscrite pour chaque bâtiment auprès du fournisseur d'énergie électrique. Les bâtiments n'étant pas pourvus de station météorologique *in situ*, les données météorologiques de Météo France issues de la station du Parc Montsouris sur la période étudiée ont été utilisées. Il est à noter que ces données sont au pas de temps horaire, supérieur au pas de temps des données de consommations énergétiques. De plus, nous ferons l'hypothèse d'une homogénéité des conditions météorologiques

sur l'ensemble du territoire étudié. Enfin, nous ne disposons pas d'informations relatives à l'occupation des bâtiments (nombre d'occupants, jours d'ouverture et de fermeture), variable explicative importante des consommations énergétiques.

### **3. Méthodologie**

Le traitement des données s'est fait à l'aide de scripts Python maison et du logiciel d'exploration de données Orange. Le travail présenté s'intéresse à la période hivernale ainsi qu'à la période estivale et plus précisément aux périodes de fortes chaleurs. Nous définissons ces périodes à l'aide d'un double critère : une moyenne glissante sur trois jours des températures minimales extérieures supérieure à 16 °C et celle des températures maximales extérieures supérieure à 25 °C.

### **4. Résultats et discussion**

Les deux premières méthodes basées sur des régressions simples ou multiples, linéaires ou polynomiales, n'ont pas abouti à des résultats concluant vu le faible nombre de variables explicatives disponibles. En effet, outre les données climatiques, peu d'autres informations dépendant du jour, telles que l'occupation ou les horaires d'ouverture étaient connues. Par conséquent, on se focalisera dans la suite de ce document sur la présentation des résultats obtenus par classification des données disponibles. La classification des données a été réalisée à deux niveaux. Tout d'abord celui du bâtiment : classification des points de consommations journalières en fonction des températures moyennes ce qui permet de dégager des groupes de points distincts, ou clusters, révélateurs de comportements journaliers différents, en fonction du type de jour considéré (ici jour chaud, jour tempéré, jour froid, jour d'ouverture, jour de fermeture). Deuxièmement, celui du parc de bâtiments considéré : classification des différents bâtiments en fonction du nombre et de type de clusters obtenus pour chaque bâtiment dans l'étape précédente.

#### **4.1. Classification des consommations journalières pour un bâtiment unique**

L'analyse de l'ensemble des bâtiments a permis de mettre en évidence quatre catégories de thermo-sensibilité : hivernale, estivale, mixte (à la fois hivernale et estivale) et une non thermo-sensibilité. Chacune de ces catégories est illustrée par les résultats d'un bâtiment type dans la suite de ce paragraphe. Les figures représentent, pour tous les jours de la période étudiée, la consommation électrique moyenne journalière (CEJ) normalisée par la surface en fonction de la température extérieure journalière moyenne ( $T_{ejm}$ ). Les jours chauds et tempérés, c'est-à-dire dont la  $T_{ejm}$  est supérieure au seuil de déclenchement de systèmes de chauffage, sont matérialisés par la couleur bleue. Les jours en période de chauffe, c'est-à-dire ceux dont la  $T_{ejm}$  est inférieure à 18°C, sont indiqués en rouge. A ce niveau de l'étude, le classement a été réalisé de manière visuelle.

##### **4.1.1. Thermo-sensibilité hivernale**

La première famille se compose de treize bâtiments. Elle se caractérise tout d'abord par une tendance linéaire à pente négative en période de chauffe, c'est à dire pour les basses températures, qui est plus ou moins marquée selon les bâtiments. Un exemple est proposé en Figure 1. Il s'agit de bureaux possédant un système énergétique chaud/froid réversible. La première analyse de cette figure montre deux branches dans le nuage de points. La première branche, correspondant aux valeurs de CEJ les plus faibles, entre 0,04 et 0,06 kWh/m<sup>2</sup>, représente le talon de consommation du bâtiment, c'est-à-dire la consommation minimale en période de non occupation (jours non ouvrés, jours fériés, etc.). On observe que les consommations de cette branche sont relativement constantes et qu'elles ne dépendent pas de façon significative de la température. La deuxième branche, contenant des points avec une amplitude importante, présente une évolution décroissante de la

consommation journalière normalisée avec l'augmentation de la  $T_{ejm}$ . En hiver, on peut constater une surconsommation probablement due à une utilisation du chauffage et de l'éclairage artificiel plus importante. Pour les températures les plus élevées, supérieures à la température seuil de déclenchement des systèmes de chauffage, une pente horizontale est observée. En d'autres termes, aucune surconsommation significative qui pourrait être attribuée à l'utilisation des systèmes de climatisation pour des températures extérieures élevées, dépassant les 30°C en l'occurrence, n'est observée. En effet, on observe des consommations comparables pour des journées tempérées ( $T_{ejm} \sim 20^\circ\text{C}$ ) et des journées chaudes ( $T_{ejm} > 26^\circ\text{C}$ ).

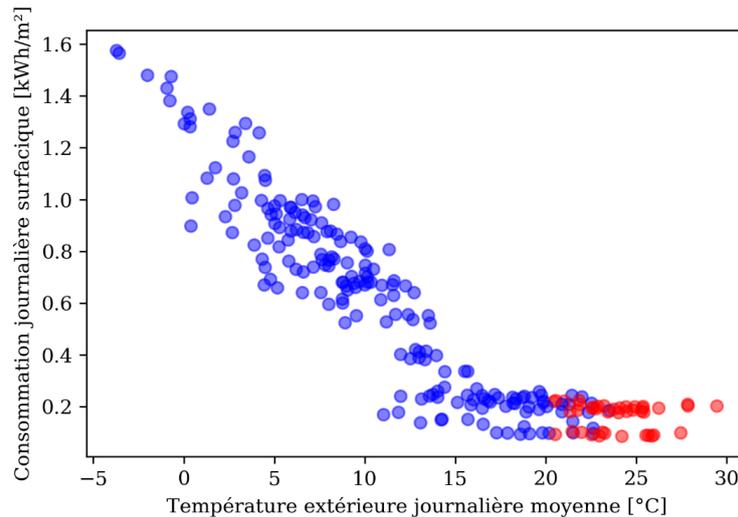


Figure 1 : Consommations électriques journalières normalisées (par la surface du bâtiment) en fonction de la température extérieure journalière moyenne pour un bâtiment type à thermo sensibilité hivernale et deux branches.

#### 4.1.2. Thermo-sensibilité estivale

Nous présentons sur la Figure 2 les CEJ normalisées en fonction de la  $T_{ejm}$  pour un bâtiment type à thermo-sensibilité estivale. À la différence du cas précédent, ce bâtiment ne présente pas de talon de consommation. Ce bâtiment est une bibliothèque (fermeture uniquement le lundi) et nous pouvons supposer que l'éclairage est quasi constant tout au long de l'année. De plus, les jours chauds entraînent une augmentation significative de la consommation journalière moyenne normalisée. À une température de l'air extérieur supérieure à 16 °C, la régulation et/ou les utilisateurs semblent déclencher les groupes froids entraînant une augmentation de la consommation énergétique. Nous pouvons constater que l'augmentation de la consommation concerne également des jours non identifiés comme "chaud". Dans cet exemple, la définition d'un jour chaud utilisée classiquement n'est pas un critère suffisant pour prédire la consommation électrique en lien avec les groupes frigorifiques.

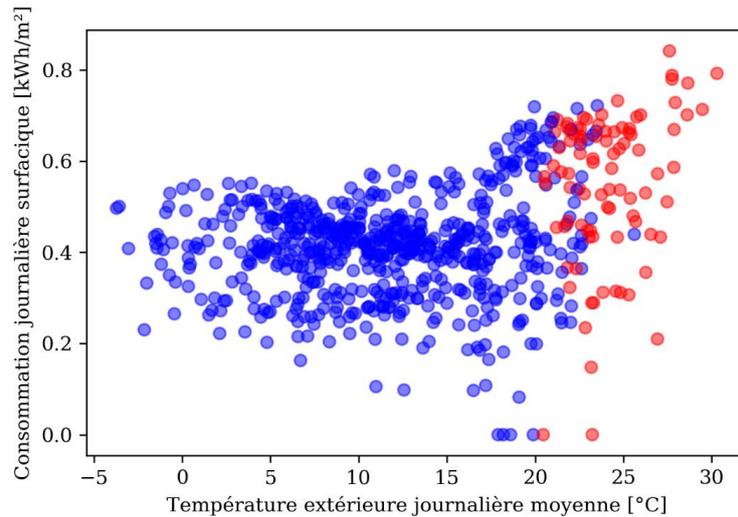


Figure 2 : Consommations électriques journalières normalisées (par la surface du bâtiment) en fonction de la température extérieure journalière moyenne pour un bâtiment type à thermo-sensibilité estivale.

### 4.1.3. Thermo-sensibilité mixte

La thermo-sensibilité mixte est une combinaison des deux comportements décrits dans les deux paragraphes précédents. Plus la température extérieure augmente et plus la consommation électrique diminue : réduction du chauffage électrique et de l'éclairage. À l'intersaison, la consommation électrique est quasi-constante et correspond principalement à l'éclairage. Dès que les températures extérieures augmentent, la climatisation est mise en rouge, augmentant la consommation électrique. Les données d'un bâtiment type de cette catégorie, qui est également une bibliothèque/médiathèque, sont représentées sur la Figure 3. Ainsi, la typologie d'utilisation du bâtiment ne semble pas être un critère suffisant pour prédire de la consommation électrique ou du moins le comportement de celle-ci.

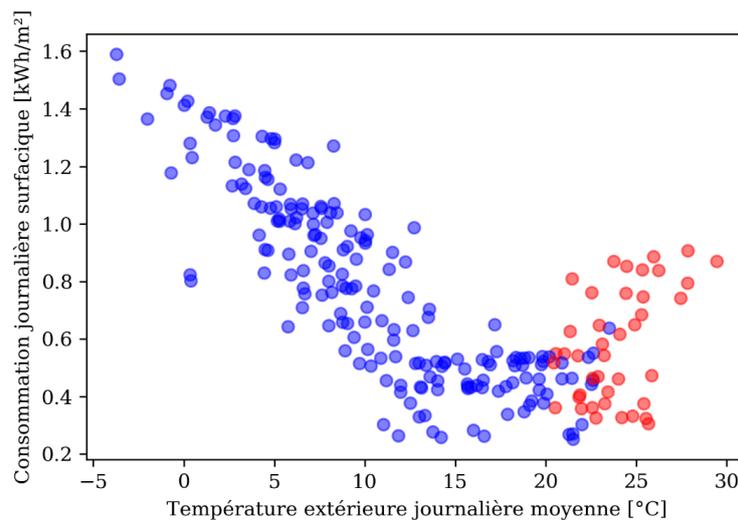


Figure 3 : Consommations électriques journalières normalisées (par la surface du bâtiment) en fonction de la température extérieure journalière moyenne pour un bâtiment type à thermo sensibilité mixte.

#### 4.1.4. Consommations non thermosensibles

Le dernier comportement identifié est celui de bâtiments dont la consommation électrique journalière n'est pas sensible à la température extérieure. Ce comportement est le moins intéressant pour ce travail car les variables explicatives dont nous disposons, en l'occurrence les données météorologiques, ne permettent pas de l'expliquer. Il ne sera donc pas décrit plus en détail ici d'autant plus qu'il est très peu observé dans le parc étudié comme on le verra par la suite.

#### 4.2. Classification des courbes de thermo-sensibilité pour le parc de bâtiments

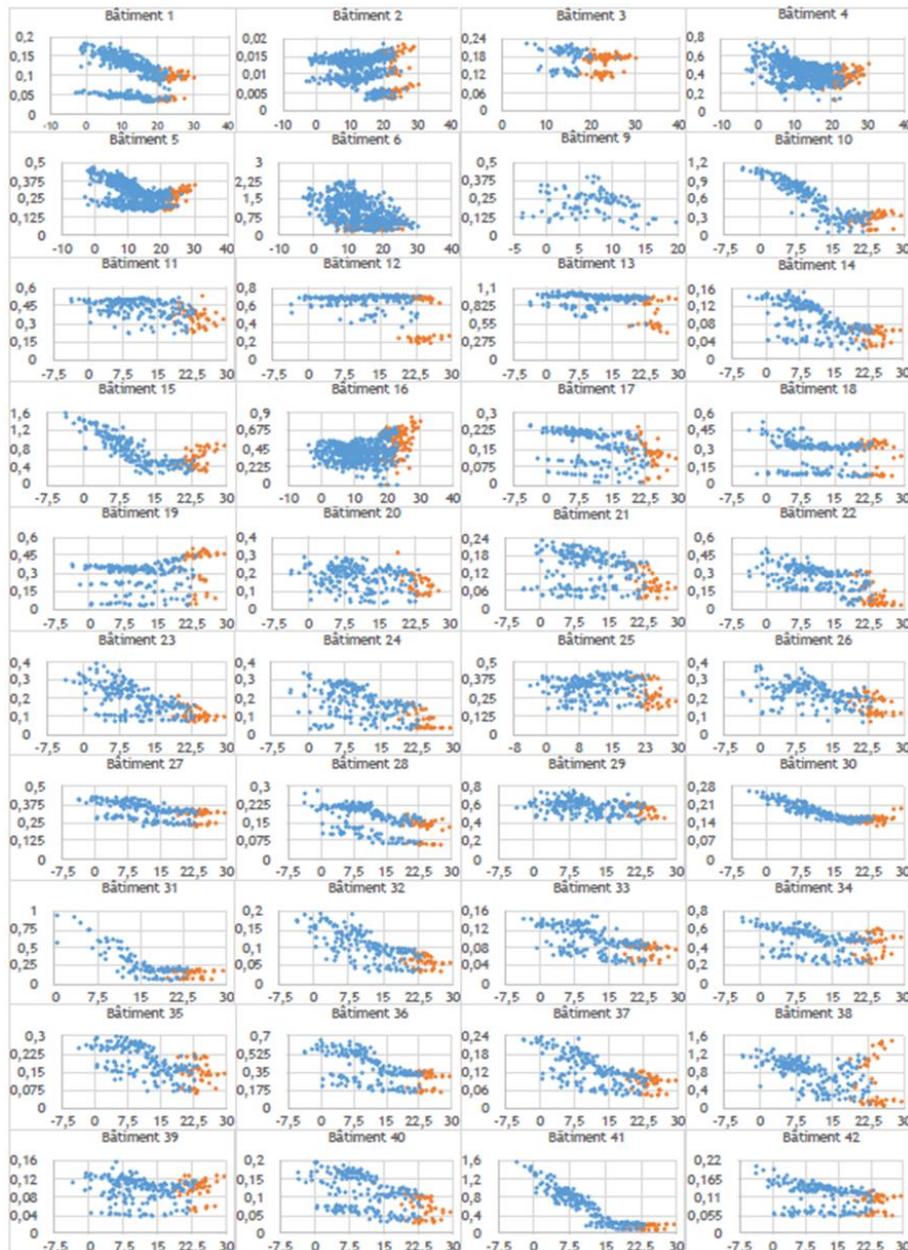


Figure 4 : consommations électriques journalières surfaciques en fonction de la Tejm pour les 40 bâtiments considérés.

Nous présentons sur la Figure 4 les données de la totalité des bâtiments considérés dans cette étude. Comme déjà indiqué précédemment, nous avons l'information de la surface utile pour 40 bâtiments sur les 42. Cela nous permet de quantifier le nombre de bâtiment pour chaque

comportement et chaque catégorie de thermo-sensibilité. Nous résumons ces informations dans le Tableau 1. Nous rapportons également sur le même tableau les puissances souscrites cumulées et les puissances de froid installées cumulées pour chaque catégorie. En effet, afin de décrire le comportement et la thermo-sensibilité globale du parc, les puissances souscrites sont à prendre en compte. Une catégorie de bâtiment affectera d'autant plus le comportement global du parc que sa puissance souscrite est élevée. Par ailleurs, le ratio de puissance de froid sur la puissance souscrite donne des éléments d'explication quant à la thermo-sensibilité de tel ou tel bâtiment, telle ou telle catégorie. L'observation d'une thermo-sensibilité est plus probable pour les bâtiments dont le ratio puissance froid installée / puissance souscrite est élevée. En moyenne la puissance froid par bâtiment est plus élevée pour les bâtiments thermo-sensibles (Tableau 1)

À la lecture du Tableau 1, on peut observer qu'une majorité écrasante des bâtiments est thermosensibles, avec plus des deux tiers présentant une thermo-sensibilité hivernale, ce qui est attendu vu la localisation géographique du parc considéré. Par ailleurs environ 8% des bâtiments présente une thermo-sensibilité estivale et 20% des bâtiments présentent une thermo-sensibilité mixte.

Sensibilité	Nombre	%	Puissance souscrite cumulée (kW)	%	Puissance max cumulée (kW)	%	Puissance froid cumulée (kW)	%
Insensible	3	7,7	458	8,6	373	8,2	515	9,1
Hivernale	25	64,1	3044	57,2	2365	52,2	3496	62,1
Mixte	8	20,5	1114	20,9	1113	24,6	885	15,7
Estivale	3	7,7	706	13,3	681	15,0	736	13,1

Tableau 1 : Synthèse des bâtiments classés par thermo-sensibilité. Pour chaque catégorie, la somme des puissances souscrites ainsi que la somme des puissances de froid installées sont rapportées.

## 5. Conclusion

Ce travail exploratoire de traitement des données de consommations électriques de 42 bâtiments tertiaires de la ville de Paris cherchait à caractériser la thermo-sensibilité des consommations de ces bâtiments. Il a permis de constater qu'une majorité écrasante des bâtiments sont thermo-sensibles et qu'une partie non négligeable présente une thermo-sensibilité estivale malgré une localisation géographique au nord de la France. On a pu également observer à partir de l'analyse des données une dépendance des consommations à l'occupation malgré le manque d'informations et de données quant à cette variable. Des pistes d'explication de ces comportements ont été identifiées dans les puissances de froid installées mais n'ont pas, pour l'instant, été complètement explorées. C'est une direction que nous suivrons dans la suite des travaux. Par ailleurs, l'étude du lien entre consommations électriques et ilots de chaleur urbain était un objectif principal de ce travail. Cela va au-delà d'une simple caractérisation de la thermo-sensibilité hivernale, estivale ou mixte, vers la caractérisation d'une thermo-sensibilité aux températures élevées extrêmes. Il s'agit là d'un trait fin de la thermo-sensibilité estivale, qui n'apparaît pas de façon évidente dans les résultats préliminaires présentés dans le présent article mais qui sera un axe de travail prioritaire dans la suite de ce projet.

## Références

- [1] A. Lemonsu et V. Masson, « Simulation of a Summer Urban Breeze Over Paris », *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 104, n° 3, p. 463-490, sept. 2002, doi: 10.1023/A:1016509614936.
- [2] B. Tremeac *et al.*, « Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures », *Applied Energy*, vol. 95, p. 102-110, juill. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.02.015.

- [3] M. Hendel, K. Azos-Diaz, et B. Tremeac, « Behavioral adaptation to heat-related health risks in cities », *Energy and Buildings*, vol. 152, p. 823-829, oct. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.063.
- [4] M. Bourdeau, X. Guo, et E. Nefzaoui, « Buildings energy consumption generation gap: A post-occupancy assessment in a case study of three higher education buildings », *Energy and Buildings*, vol. 159, p. 600-611, janv. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.062.
- [5] M. Bourdeau, X. qiang Zhai, E. Nefzaoui, X. Guo, et P. Chatellier, « Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques », *Sustainable Cities and Society*, vol. 48, p. 101533, juill. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101533.
- [6] H. Guan, S. Beecham, H. Xu, et G. Ingleton, « Incorporating residual temperature and specific humidity in predicting weather-dependent warm-season electricity consumption », *Environ. Res. Lett.*, vol. 12, n° 2, p. 024021, févr. 2017, doi: 10.1088/1748-9326/aa57a9.
- [7] F. Cruz Rios, H. Naganathan, W. K. Chong, S. Lee, et A. Alves, « Analyzing the Impact of Outside Temperature on Energy Consumption and Production Patterns in High-Performance Research Buildings in Arizona », *J. Archit. Eng.*, vol. 23, n° 3, sept. 2017, doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000242.
- [8] I. D. Stewart et T. R. Oke, « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies », *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 93, n° 12, p. 1879-1900, déc. 2012, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

### **Remerciements**

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à la Mairie de Paris pour l'accès aux données de consommations électriques des bâtiments de son parc immobilier.