

# Vulnérabilité et îlot de chaleur urbain : les facteurs du risque thermique nocturne à Strasbourg

Pierre Kastendeuch<sup>1\*</sup>, Naïs Massing<sup>2</sup>, Elsa Schott<sup>2</sup>, Nathalia Philipps<sup>1</sup>, Karen Lecomte<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ICube, 300 bd Sébastien Brant, 67412 Illkirch Cedex, France

<sup>2</sup> Faculté de géographie, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg Cedex, France

<sup>3</sup> Ville et Eurométropole de Strasbourg, 1 parc de l'Étoile, 67076 Strasbourg Cedex, France

**Résumé** – L'objectif de cette étude est de proposer une carte du risque thermique nocturne en relation avec la vulnérabilité de la population face à l'îlot de chaleur dans l'Eurométropole de Strasbourg (EMS). Dans un premier temps, un indice a été mis au point pour traduire la vulnérabilité de la population urbaine face à la chaleur à travers l'influence de l'exposition, la sensibilité et l'adaptation. Ces trois facteurs ont été estimés pour chaque « Îlot Regroupé pour l'Information Statistique » (IRIS) de l'agglomération, grâce à une combinaison d'une dizaine de variables de substitution (proxy) issues des bases de données de l'INSEE et de l'EMS. Dans un second temps, une carte a été mise au point pour identifier l'intensité de l'îlot de chaleur urbain nocturne (ICU) pour chaque IRIS, en appliquant une méthode qui consiste à relier statistiquement l'intensité de l'ICU à des paramètres morphométriques. Enfin, dans un troisième temps, cette information thermique a été croisée avec l'indice de vulnérabilité pour obtenir le niveau du risque thermique nocturne.

**Mots-clés** : vulnérabilité, risque, chaleur, confort thermique, Strasbourg, îlot de chaleur.

**Abstract – Vulnerability and urban heat island: the factors of nocturnal thermal risk in Strasbourg.** In this study, we propose to produce a map of the nocturnal thermal risk to which the Eurometropolis of Strasbourg (EMS) population is submitted during summer nights. First, we designed a vulnerability index that reflects the influence of exposure, sensitivity, and adaptation of the urban population to heat. These three components of vulnerability are estimated for each IRIS by using ten substitution variables taken from the INSEE and EMS databases. At the same time, we tried to get a map of the nocturnal urban heat island by applying a well-known statistical method that links UHI intensity to local urban parameters. For a second time, the thermal information has been crossed with the vulnerability to obtain a nocturnal thermal risk indicator.

**Keywords:** vulnerability, risk, heat, thermal comfort, Strasbourg, heat island.

\* Auteur de correspondance : [kasten@unistra.fr](mailto:kasten@unistra.fr)

## Introduction

Dans le contexte du changement climatique, les villes sont confrontées à un double problème : d'une part, elles vont devoir faire face à une augmentation de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur en été (Mehl et Tebaldi, 2004 ; IPCC, 2021) et d'autre part, ces espaces artificiels agissent sur les températures puisqu'ils sont propices à la formation du phénomène d'îlot de chaleur nocturne (Oke *et al.*, 2017), ce qui augmente l'occurrence du nombre de nuits tropicales (nuits d'été avec températures

supérieures à 20°C). De ce fait, il est prouvé que la population qui vit en ville subit un stress thermique plus important qu'à la campagne, et Strasbourg ne fait pas exception (Matzarakis *et al.*, 2009 ; Kastendeuch *et al.*, 2020). Or ceci ne va pas sans quelques conséquences sanitaires comme l'ont montré Laaidi *et al.* (2006). Pour éviter que ces problèmes de santé en relation avec la chaleur ne s'aggravent dans le futur, il est d'ores et déjà nécessaire d'anticiper ces situations (Filho *et al.*, 2018). L'obtention d'une carte des zones de la ville à risque permettrait de fournir aux autorités locales

les emplacements nécessitant des mesures et réponses immédiates qui contribueraient à la fois à la durabilité du territoire et à l'amélioration de la qualité de vie de la population. Dans ces conditions, il devient indispensable d'étudier l'aléa physique que constitue l'îlot de chaleur urbain pour en établir l'intensité et la configuration spatiale, tout comme il faut également s'intéresser à la vulnérabilité des populations face à cette chaleur. De très nombreuses villes dans le monde et en France disposent désormais d'une cartographie de l'îlot de chaleur urbain, à l'image de Dijon (Richard *et al.*, 2018) ou de Rennes (Dubreuil *et al.*, 2008). Quant à la vulnérabilité face à la chaleur, elle commence à être prise en compte dans de grandes métropoles, comme Londres (Wolf et McGregor, 2013), Phoenix (Chow *et al.*, 2012) ou Moscou (Zemtsov *et al.*, 2020), mais très peu de travaux y font référence en France. L'un des objectifs de cette étude consiste justement à obtenir une estimation de la vulnérabilité à la chaleur de la population de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) (Schott, 2021), en s'inspirant de la tentative de Buscail *et al.* (2012) qui concerne la ville de Rennes. Conjointement à cette étape préliminaire, une carte a été réalisée pour identifier l'intensité de l'îlot de chaleur nocturne par quartier (Philipps *et al.*, 2020, 2022 ; Weiss, 2022). Au final, ces deux informations ont été croisées pour construire la carte du risque thermique nocturne à l'échelle de l'agglomération (Massing, 2022). Dans cet article, nous décrivons toutes les étapes qui ont conduit à l'obtention de ce résultat final.

## 1. Contexte de l'étude, site et données

La vulnérabilité est un concept complexe mais absolument fondamental à connaître en matière de risques, car plus elle est faible, plus elle amortit l'effet de l'aléa et diminue le risque. Une bonne connaissance de la vulnérabilité permet alors de mettre en place des solutions afin de renforcer la résilience des populations, ainsi que leur adaptation aux aléas : la gestion du risque s'en trouve ainsi facilitée (Lévy et Lussault, 2013).

D'après ce qui est communément admis dans la littérature (e.g. Wilhelmi et Hayden, 2010), la vulnérabilité d'une population face à la chaleur dépend de plusieurs facteurs : son exposition, sa

sensibilité et sa capacité d'adaptation. L'exposition exprime les conditions locales susceptibles d'accentuer la chaleur ; la sensibilité représente le degré avec lequel la population souffre de la chaleur au plan sanitaire ; la capacité d'adaptation décrit le potentiel d'une population à modifier son comportement pour mieux faire face au stress thermique. Ces trois facteurs dépendent fortement d'aspects sociaux et de ce que Cutter *et al.* (2000) appellent la « *composante sociale de la vulnérabilité* », comme par exemple les croyances et habitudes, l'accès à l'information, etc. Il n'est donc pas étonnant de constater que la vulnérabilité puisse être difficile à estimer, étant donné la difficulté d'accéder à ces variables. Malgré tout, des tentatives ont été développées pour tenter d'évaluer la vulnérabilité via un ensemble de variables de substitution issues d'informations statistiques plus facilement disponibles (Wong-Parodi *et al.*, 2015).

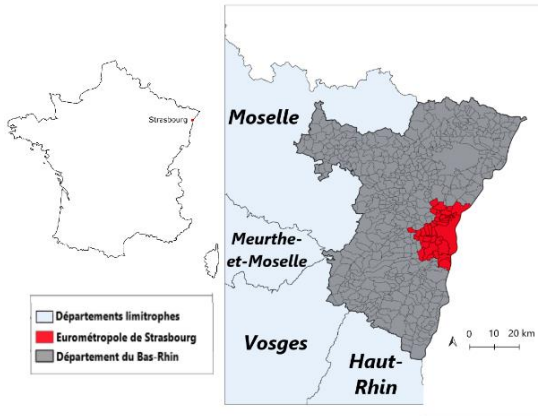
### 1.1. Le site d'étude

L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) se situe dans la région Grand Est et le département du Bas-Rhin (figure 1). Sa population s'élève à 505 272 habitants en 2019 (INSEE), pour une superficie de 338,32 km<sup>2</sup>, soit une densité moyenne de 1493 hab./km<sup>2</sup>. L'échelle d'analyse la plus fine à laquelle il est possible de travailler pour obtenir les différentes informations nécessaires à cette étude est celle de « l'Îlot Regroupé pour l'Information Statistique » (IRIS). Cette échelle s'impose en France, où l'IRIS constitue la « brique » de base en matière de diffusion de données infra-communales par l'INSEE. D'après ce découpage, l'EMS se compose de 195 IRIS allant de quelques kilomètres carrés à une vingtaine (figure 1).

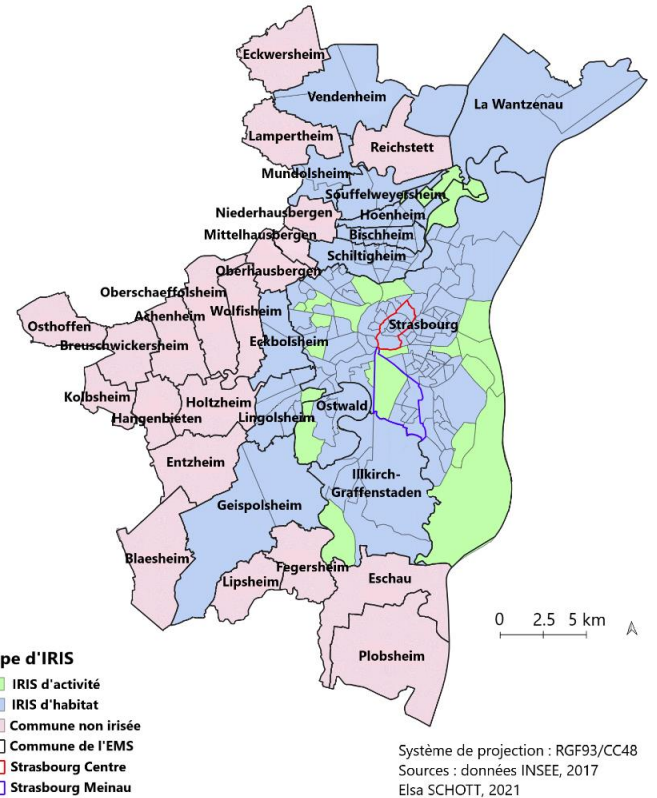
La première étape de ce travail a consisté à mettre au point un indice qui puisse traduire la vulnérabilité de la population par l'intermédiaire d'une valeur numérique affectée à chaque IRIS. Cette valeur est sensée être proportionnelle à la fragilité de la population face à la chaleur, de sorte que les valeurs élevées d'indice expriment une forte vulnérabilité. De plus, comme évoqué ci-dessus, cet indice doit refléter à la fois l'exposition, la sensibilité et l'adaptation à la chaleur de la population, ce qui signifie que ces trois facteurs doivent s'interpréter à l'identique : une population

très exposée, très sensible et dont la capacité d'adaptation est réduite, sera caractérisée par un indice de vulnérabilité élevé. Le premier obstacle à résoudre provient du fait que les facteurs qui composent l'indice de vulnérabilité ne sont pas mesurables directement et qu'ils ne font pas partie des indicateurs disponibles dans les bases de données statistiques françaises. Pour estimer ces facteurs il va falloir passer par l'utilisation de variables de substitution (aussi appelées proxy). Or

le choix de ces variables soulève des problèmes : par exemple aux USA, de nombreuses études n'hésitent pas à utiliser l'origine ethnique des populations comme proxy (Chow *et al.*, 2012), tandis qu'en France, il s'agit d'une donnée non collectée pour des raisons éthiques. Toutes ces difficultés expliquent pourquoi les études sur la vulnérabilité à la chaleur sont toujours entachées de biais liés aux données disponibles.



**Figure 1.** Carte de localisation : France, Bas-Rhin et Eurométropole de Strasbourg (zone en rouge sur la carte des départements) et délimitation des 195 IRIS qui composent l'Eurométropole (carte de droite). Location map: France, Bas-Rhin, Eurometropolis of Strasbourg (red area) and delimitation of the 195 IRIS (on the right map).



## 1.2. Les données

Les sources bibliographiques donnent des pistes pour identifier les principales caractéristiques qui marquent spécifiquement la vulnérabilité de la population par rapport aux vagues de chaleur (Reid *et al.*, 2009 ; Soomar et Soomar, 2023). Parmi les variables à notre disposition, provenant à la fois de l'INSEE et de l'EMS pour l'année 2017, dix proxys ont été retenus dans cette étude (tableau 1).

Le facteur d'exposition repose sur les cinq présumés suivants :

- vivre dans un appartement rend la vulnérabilité plus importante que vivre dans une maison individuelle ;

- un logement de « petite taille » garde et capte plus facilement la chaleur ;
- les logements anciens sont considérés moins bien isolés que les récents, même dans le centre-ville historique ;
- les logements en suroccupation représentent un facteur aggravant ;
- la densité de population accentue l'exposition.

Les proxys définissant le facteur de sensibilité s'inspirent en grande partie du rapport de Swart *et al.* (2012) :

- la population de plus de 65 ans est plus sensible à la chaleur du fait de l'existence potentielle de comorbidités ;

- un IRIS où la mortalité est importante est plus fragile ;
- le système de régulation thermique de la population en bas âge (moins de cinq ans) est moins efficace.

La capacité d'adaptation définie au sens de Wong-Parodi *et al.* (2015) est représentée par deux proxys :

- le niveau d'étude qui influe sur les connaissances (information) et la capacité à trouver des solutions pour contrer la chaleur ;

- le revenu médian qui traduit la capacité à se procurer des biens ou des services pour faire face à la chaleur.

Il paraît évident qu'en fonction des proxys sélectionnés ou disponibles, tout comme la façon dont ils seront combinés, les résultats obtenus pourront différer (ADEME, 2012).

**Tableau 1.** Variables de substitution (proxy) retenues dans cette étude après sélection dans la littérature pour définir les trois facteurs de la vulnérabilité à la chaleur. *Substitution variables (proxy) used in this study after selection from the literature to define the three components of heat vulnerability.*

FACTEURS ET PROXY	VARIABLE ET SIGNIFICATION	VALEUR, UNITÉ
<b>EXPOSITION</b>		
Type de logement	Vivre dans un appartement	Pourcentage
Taille du logement	Logement inférieur à 60 m <sup>2</sup>	Pourcentage
Année de construction du logement	Logement construit avant 1990	Pourcentage
Logement en suroccupation	Résidence en suroccupation (hors studios)	Pourcentage
Densité de population	Densité de population	Habitants/km <sup>2</sup>
<b>SENSIBILITÉ</b>		
Tranche d'âge	Individus de moins de 5 ans	Pourcentage
Tranche d'âge	Individus de plus de 65 ans	Pourcentage
Mortalité	Indice comparatif de mortalité	Indice comparatif de mortalité (calculé par rapport à la moyenne du Grand Est)
<b>ADAPTATION</b>		
Le niveau d'étude	Niveau d'étude de la population influe sur les connaissances et la capacité à s'adapter à la chaleur	Pourcentage de la population de 15 ans ou plus non scolarisée ayant un diplôme inférieur au bac
Le niveau de revenu	Taux de revenu permet de s'adapter en achetant des services/biens pour contrer la chaleur	Revenu médian par IRIS de l'INSEE (€)

## 2. Combinaison des proxys définissant les facteurs d'exposition, de sensibilité et d'adaptation

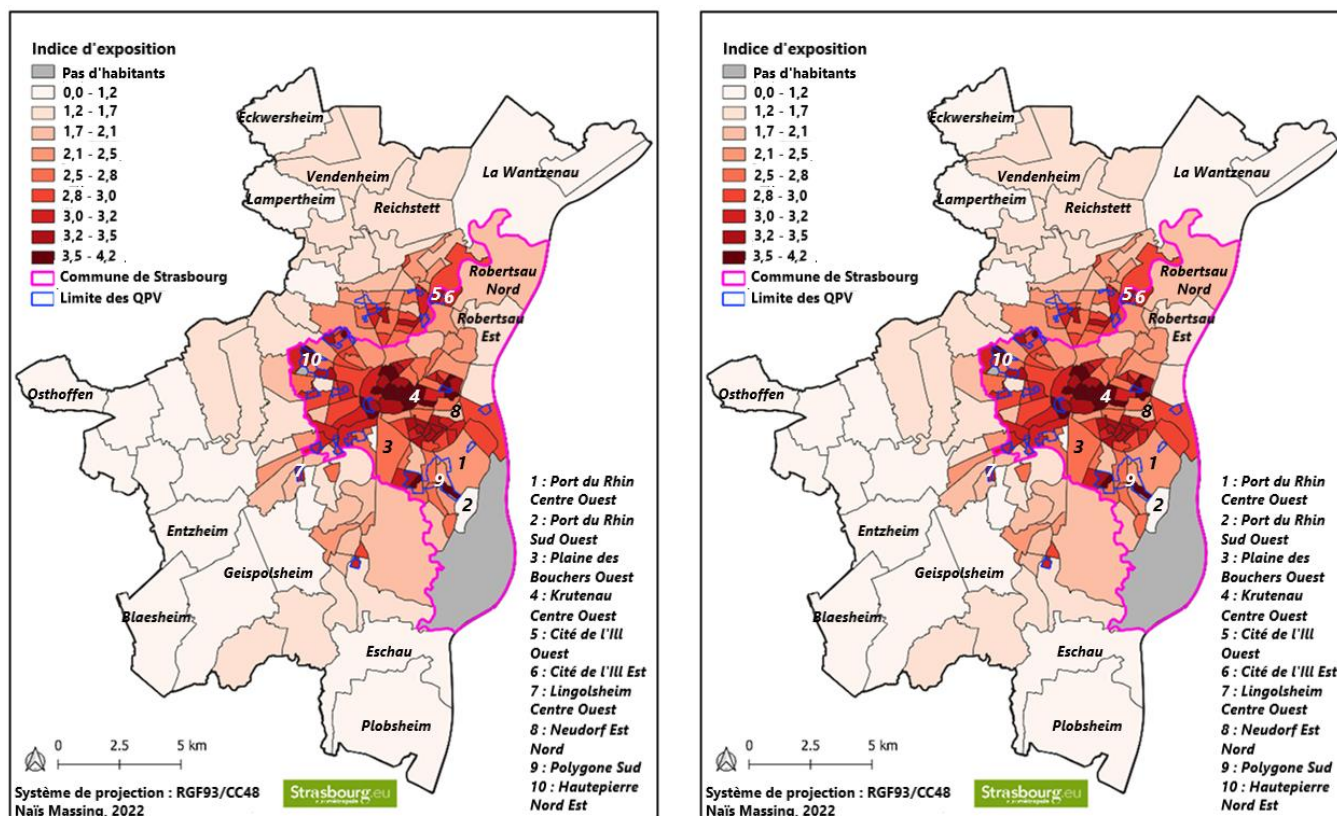
Etant donné que les dix proxys qui caractérisent les facteurs d'exposition, de sensibilité et d'adaptation s'expriment dans des unités variées (cf. tableau 1), ils ont été normalisés selon la méthode « Min-Max » :  $X_{norm} = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$  (Salvati

*et al.*, 2003). La normalisation permet d'obtenir une valeur adimensionnelle comprise entre zéro et un, qui exprime le fait que plus la valeur est proche de un, plus la vulnérabilité augmente. Pour respecter cette convention, le proxy concernant le revenu a été normalisé pour exprimer le fait que les populations avec de faibles revenus sont davantage vulnérables, ce qui se traduit par la formule :  $X_{norm} = (X_{max} - X) / (X_{max} - X_{min})$ . Les facteurs d'exposition (Fe), de sensibilité (Fs) et d'adaptation (Fa) ont été obtenus

en additionnant les valeurs de leurs proxys respectifs :  $F_i = \sum X_{norm}$

A titre d'exemple, la figure 2 représente les valeurs brutes obtenues par IRIS pour les facteurs d'exposition ( $F_e$ ) et d'adaptation ( $F_a$ ) en 2017. La carte d'exposition montre un contraste entre la commune de Strasbourg et le reste, puisque la première contient quasiment tous les IRIS les plus exposés. En effet, cette commune possède la densité de population de loin la plus importante et davantage de logements (respectivement 2,2 et 2,6 fois plus que la moyenne de l'Eurométropole). De plus, les logements y ont été construits généralement bien avant les années 1990 (12 % datent d'avant 1919 et 64 % entre 1919 et 1990) et sont de petite taille (68 m<sup>2</sup> en moyenne). Les autres communes

présentent plus de maisons individuelles (11,1 % à Schiltigheim ou 27,8 % à Hoenheim par exemple, pour seulement 6,5 % à Strasbourg) et une moins grande densité de population. Ainsi, plus on s'éloigne de la commune de Strasbourg, plus la composante d'exposition est faible (3 à 4 fois moins forte). Par ailleurs, une grande partie des Quartiers Prioritaires de la Ville (QPV, identifiés en bleu) sont compris parmi les IRIS les plus exposés à la chaleur. Il faut préciser que le QPV est un dispositif de la politique de la ville du gouvernement français, rassemblant les zones urbaines les plus pauvres, nécessitant une intervention des pouvoirs publics, notamment en termes de rénovation urbaine : ils sont définis par IRIS, sur la base du revenu des habitants par rapport au revenu médian de référence de la ville ou du pays.



**Figure 2.** Carte des valeurs brutes par IRIS du facteur d'exposition à la chaleur (à gauche) et de celui de l'adaptation (à droite) dans l'Eurométropole de Strasbourg. Les quartiers prioritaires de la ville (QPV) sont délimités en bleu ; la commune de Strasbourg est délimitée en rose. La discrétisation a été réalisée avec la méthode des ruptures naturelles de Jenks. *Map of raw values by IRIS of the heat exposure proxy (left) and that of adaptation (right) in the Eurometropolis of Strasbourg. The priority districts of the city (QPV) are delimited in blue. The discretization was carried out with the method of natural discontinuities of Jenks.*

Pour le facteur d'adaptation, la carte montre une différence assez marquée entre les IRIS qui comprennent les QPV et les autres. En effet, les

QPV correspondent aux quartiers qui ont la capacité d'adaptation la plus faible (et donc une valeur d'indice élevée). Les IRIS qui ont une capacité

d'adaptation plus importante se situent au nord de Strasbourg et dans le centre-ville. Il y a ainsi une grande différence entre ces espaces et tous les IRIS qui sont à l'ouest et au sud. Cette différence s'explique par le fait que les personnes habitant dans les IRIS au centre et au nord ont un niveau de diplôme et des revenus plus importants et sont considérés comme plus aptes à s'adapter à la chaleur. En effet, on estime que de par leurs revenus, l'achat de matériel permettant de se protéger de la chaleur peut s'avérer plus facile, tandis que le niveau de diplôme suggère l'accès à un meilleur niveau d'information (Wong-Parodi *et al.*, 2015).

### 3. Elaboration d'un indice synthétique pondéré de la vulnérabilité à la chaleur

L'indice de vulnérabilité ( $V$ ) résulte de la combinaison des trois facteurs obtenus précédemment, c'est-à-dire l'exposition, la sensibilité et l'adaptation. Pour le construire, les trois facteurs ont d'abord été normalisés ( $F_{norm}$ ) selon la méthode « Min-Max » (Salvati *et al.*, 2003), puis combinés par addition en leur accordant un poids ( $\alpha$ ) spécifique :  $V = \sum(F_{norm} \cdot \alpha)$ . Dans la littérature traitant de la vulnérabilité à la chaleur, la stratégie qui consiste à donner un poids proportionnel au nombre de proxys ayant servi à construire les facteurs est la plus souvent utilisée (e.g. Rathi *et al.*, 2022). En conséquence, les poids sont de 0,5, 0,3 et 0,2 respectivement pour l'exposition, la sensibilité et l'adaptation. Une seconde possibilité existe, qui consiste à donner un poids plus important à certains facteurs selon l'appréciation d'experts. Cette seconde possibilité a été testée en accordant un coefficient plus important à la sensibilité (0,5) qu'à l'exposition (0,3), sans modifier le facteur d'adaptation. Ainsi, dans ce second cas de figure, on admet que la sensibilité à la chaleur joue un rôle prépondérant, notamment à travers l'âge (Banmarhnia *et al.*, 2015).

On ne remarque pas de différences flagrantes entre les répartitions spatiales de la vulnérabilité obtenues par ces deux pondérations. Il y a néanmoins un contraste un peu moins fort pour les communes de la seconde couronne lorsque l'on accroit le rôle de la sensibilité. En effet, celles-ci apparaissent plus vulnérables à la chaleur car la population y est effectivement plus âgée qu'au centre de Strasbourg : 40 % des Strasbourgeois ont

plus de 40 ans, pour 57 % à Eckwersheim par exemple. La seconde pondération paraît plus pertinente, car elle accorde davantage d'importance au facteur clé que représente la sensibilité : en effet, ce n'est pas parce que le facteur d'exposition a été obtenu avec plus de variables qu'il doit pour autant jouer un rôle plus important que le facteur de la sensibilité. Au contraire, de nombreuses études insistent sur l'importance de l'âge des populations dans la vulnérabilité à la chaleur (e.g. Banmarhnia *et al.*, 2015). Les résultats obtenus avec la seconde pondération (figure 3) montrent que parmi les IRIS ayant acquis les dix plus grandes valeurs, un seul se situe à l'extérieur de Strasbourg : il s'agit d'un IRIS d'activité situé à Schiltigheim. Les autres font principalement partie des QPV et sont au cœur d'un programme de renouvellement urbain et du Plan Climat de la ville (e.g. Neudorf Est Nord, HautePierre Nord Est, Polygone sud...).

### 4. Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain nocturne à Strasbourg

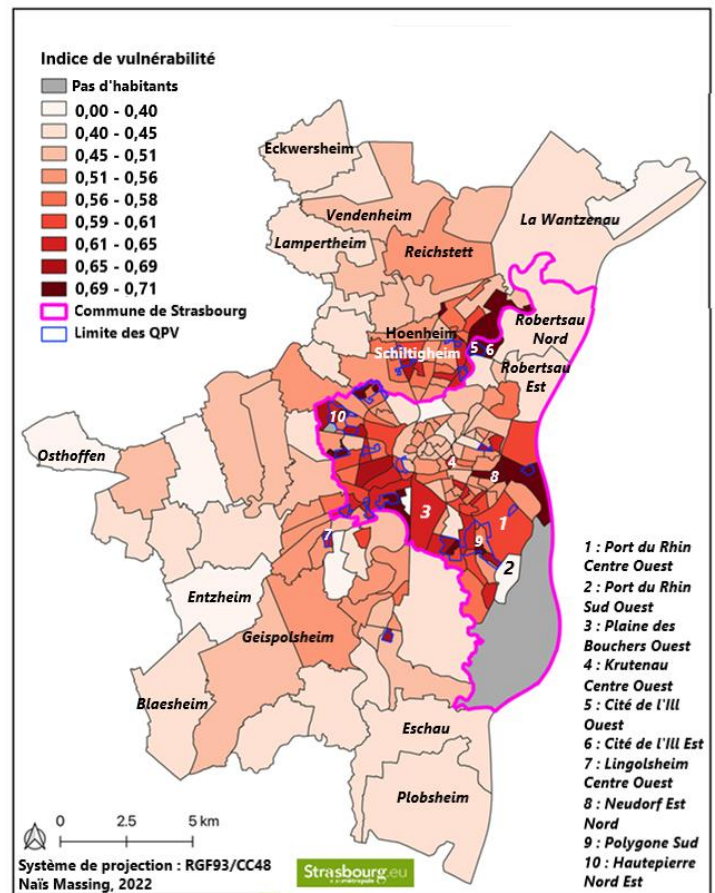
L'indice de vulnérabilité à la chaleur n'est qu'une première étape dans l'analyse du risque. En effet, ce dernier dépend aussi de l'événement (*i.e.* l'aléa) qui est susceptible de porter atteinte à la population. En l'occurrence, l'aléa qui nous préoccupe est l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui se manifeste dans la canopée urbaine et qui se traduit par des températures de l'air plus chaudes en ville qu'à la campagne la nuit (Oke *et al.*, 2017). En augmentant le nombre de nuits tropicales (Cantos *et al.*, 2019), ce phénomène dégrade le confort thermique (He *et al.*, 2021) et altère le repos nocturne (Léger *et al.*, 2013), ce qui est néfaste pour la récupération physiologique et l'organisme (Royé *et al.*, 2021). Remarquons qu'il y a plusieurs avantages à travailler sur la chaleur nocturne : comparativement à ce qui se passe le jour, la majorité de la population se repose à son domicile, c'est-à-dire à l'endroit même où elle est recensée par l'INSEE. Cette conjonction évite d'avoir à tenir compte des déplacements de population qui ont inévitablement lieu en journée et qui peuvent biaiser l'étude. De plus, la chaleur diurne dépend étroitement du rayonnement solaire (Halawa *et al.*, 2014), des effets d'ombre, du fait que l'on se trouve à l'intérieur ou à l'extérieur, ce qui est beaucoup

moins le cas de nuit (en été) à Strasbourg où l'essentiel de la population est à l'intérieur avec les fenêtres ouvertes pour ventiler au maximum les

appartements. Ainsi, de nuit, la carte de la vulnérabilité peut être plus aisément comparée ou combinée à une carte de l'ICU, sans trop de biais.

**Figure 3.** Carte des valeurs brutes par IRIS de l'indice de vulnérabilité à la chaleur dans l'Eurométropole de Strasbourg. Les quartiers prioritaires de la ville (QPV) sont délimités en bleu ; la commune de Strasbourg est délimitée en rose. La discrétisation a été réalisée avec la méthode des ruptures naturelles de Jenks.

*Map of raw values by IRIS of the heat vulnerability index in the Eurometropolis of Strasbourg. The priority districts of the city (QPV) are delimited in blue. The discretization was carried out with the method of natural discontinuities of Jenks.*



La cartographie de l'intensité de l'ICU nocturne a été réalisée selon la méthode statistique proposée par Bottyán et Unger (2003). Elle repose sur le présupposé que l'intensité de l'ICU observé au sein d'une zone donnée peut s'expliquer par des variables descriptives du milieu urbain concerné. L'avantage de cette méthode est sa simplicité de mise en œuvre, mais elle possède deux inconvénients : d'une part, c'est une méthode qui reste entachée d'une certaine incertitude inhérente à la procédure statistique ; d'autre part, elle nécessite l'utilisation d'un nombre important de stations implantées en milieu urbain et représentatives de l'hétérogénéité spatiale de la ville. En effet, cette méthode suppose qu'une équation de régression linéaire multiple est en mesure de prédire les intensités d'ICU en tout point de la ville, ce qui paraît très réducteur et potentiellement illusoire. Pour trouver cette équation et sa configuration la

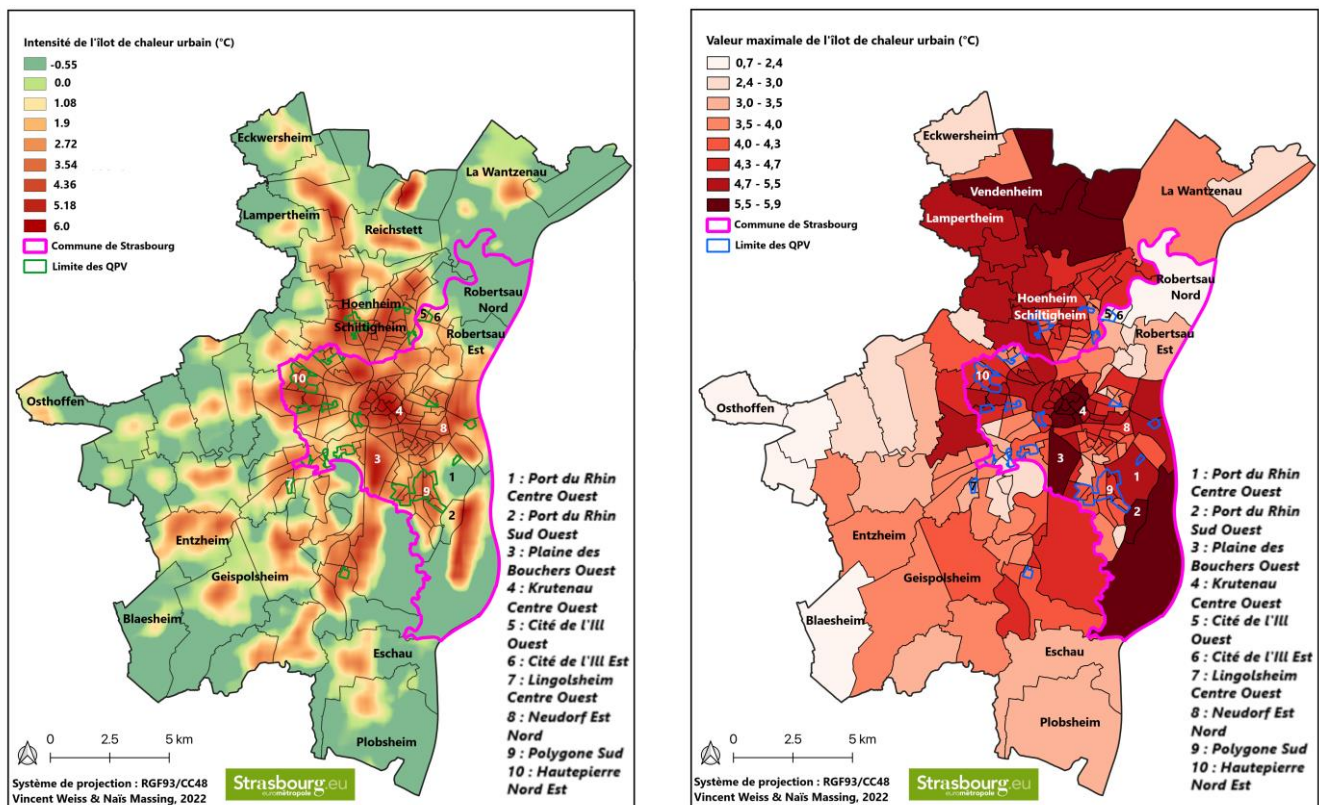
plus adaptée, la formule doit être calculée à partir d'un jeu de données dans lequel les intensités d'ICU mesurées dans les différents quartiers de la ville sont liées à des paramètres morphologiques et d'occupation du sol qui sont parfois difficiles à estimer (cf. ci-dessous).

Dans notre étude, ce sont les paramètres qui définissent les *Local Climate Zones* (LCZ) d'après la classification de Stewart et Oke (2012) qui sont utilisés comme descripteurs du milieu urbain, à savoir : longueur de rugosité, *Sky View Factor*, etc. Ces paramètres ont été calculés en tout point de l'EMS via un système d'information géographique (SIG), en utilisant des bases de données vectorielles et raster, dont le détail des procédures est fourni dans le manuscrit de Montauban (2019). Les valeurs de ces descripteurs ont été calculées le plus fidèlement possible pour les sites de dix-sept stations météorologiques urbaines installées par notre équipe

dans le cadre du programme INTERREG IV Atmo-IDEE. Parallèlement, les intensités d'ICU ont été estimées pour ces dix-sept stations, sur la période 2013-2016. Plusieurs équations de régressions linéaires multiples ont ensuite été testées entre les valeurs d'ICU d'été (juin, juillet et août sur la période 2013-2016) et différentes combinaisons de descripteurs liés à la morphologie urbaine. La qualité de ces régressions variant fortement en fonction des paramètres introduits en prédicteurs, seule la régression au coefficient de détermination le plus élevé a été retenue.

Tous les détails concernant les traitements statistiques liés à cette démarche sont consultables dans les travaux de Philipps *et al.* (2020, 2022) et Weiss (2022). Il en résulte que la combinaison la

plus significative ( $R^2 = 0,845$  ; erreur-type = 0,652) implique la fraction de surface bâtie, la fraction de surface perméable, le pourcentage de surface végétalisée, la rugosité globale et la rugosité spécifique de la végétation (Weiss, 2022). L'application de cette équation de régression multiple à partir des couches d'informations spatialisées obtenues par Montauban (2019) a permis d'obtenir la carte brute de l'ICU d'été (figure 4, gauche), puis celle simplifiée qui ne retient que la valeur maximale de l'ICU pour chaque IRIS (figure 4, droite). Le choix du maximum se justifie par le fait qu'on cherche à identifier les IRIS où l'aléa est le plus fort. Cette information sur la valeur du maximum de l'ICU par IRIS, sera utilisée ci-après pour être recoupée avec celle de l'indice de vulnérabilité par IRIS.



**Figure 4.** Cartes de l'intensité moyenne de l'îlot de chaleur urbain nocturne calculées selon la méthode statistique proposée par Bottyán et Unger (2003) dans l'Eurométropole de Strasbourg en été (juin, juillet et août) sur la période 2013-2016, à 23 h UTC. A gauche, la carte initiale et à droite, avec la valeur du maximum par IRIS. Les quartiers prioritaires de la ville (QPV) sont délimités en bleu ; la commune de Strasbourg est délimitée en rose. Source des données de base : Montauban (2019), d'après un traitement statistique effectué par Weiss (2022) et la cartographie réalisée par Massing (2022). *Maps of the average intensity of the nocturnal urban heat island calculated according to the statistical method proposed by Bottyán and Unger (2003) in the Eurometropolis of Strasbourg in summer (June, July and August) over the period 2013-2016, at 23:00 UTC. On the left, in high resolution and on the right, with the value of the maximum by IRIS. The priority districts of the city (QPV) are delimited in blue. QPVs are outlined in blue. Source of basic data: Montauban (2019), based on statistical processing by Weiss (2022) and mapping by Massing (2022).*

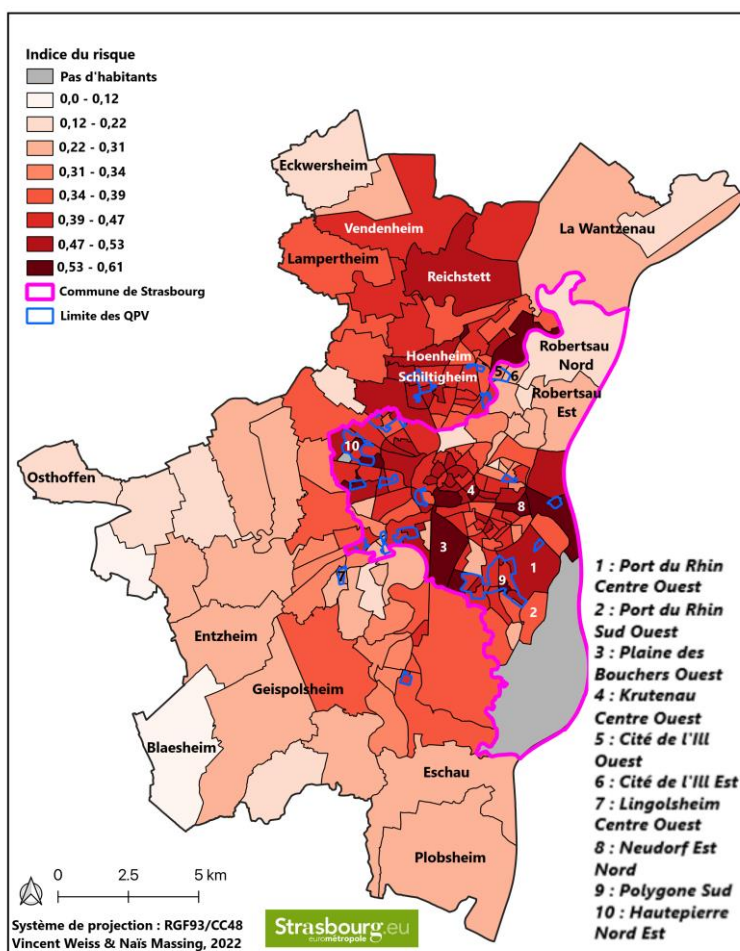
Il faut noter que la méthode proposée par Bottyán et Unger (2003) génère des valeurs négatives en zone rurale ou dans les parcs (cf. figure 4, gauche), car elle a été conçue exclusivement pour être utilisée en milieu urbain : en conséquence, toutes les valeurs négatives qui ont été obtenues dans les secteurs ruraux ou forestiers ont été représentées en vert sur la carte de gauche (figure 4). D'autre part, les noyaux urbains qui correspondent aux différentes communes apparaissent nettement sur cette carte, notamment ceux de la seconde couronne, ce qui montre que l'algorithme fonctionne bien en zone urbaine. Remarquons qu'il convient d'être prudent concernant cette carte d'îlot de chaleur, car la méthode possède des faiblesses inhérentes à l'incertitude contenue dans les données qui sont utilisées, aussi bien en termes de températures, que des paramètres morphologiques estimés par traitements SIG (longueur de rugosité, *Sky View Factor*, etc.). Par exemple, la longueur de rugosité n'est calculée qu'avec les bâtiments simplifiés (toits plats) et le *Sky View Factor* ne tient pas compte des arbres.

## 5. Combinaison de la vulnérabilité et de l'ICU pour la mise au point d'un indice du risque thermique nocturne

L'indice du risque nocturne par rapport à la chaleur ( $R$ ) est obtenu en multipliant la valeur de l'indice synthétique pondéré de la vulnérabilité ( $V$ ) avec la valeur normalisée de l'îlot de chaleur urbain nocturne ( $ICU_{norm}$ ) :  $R = ICU_{norm} \times V$ . Ce calcul fournit forcément une valeur de risque comprise entre zéro et un, mais il est important de se remémorer que même en présence d'une valeur proche de zéro, le risque reste présent dans l'absolu, puisqu'il ne peut être nul dans un IRIS urbanisé : du fait de la normalisation qui a été appliquée, la valeur zéro est attribuée à l'IRIS où le risque est le plus faible. En partant de ce postulat, nous pouvons dire que le risque est le plus fort sur toute une diagonale de l'EMS qui s'étend du nord-ouest jusqu'au sud-est (figure 5).

**Figure 5.** Carte du risque thermique nocturne d'été par IRIS estimé par la combinaison de la vulnérabilité et de l'îlot de chaleur. Les quartiers prioritaires de la ville (QPV) sont délimités en bleu ; la commune de Strasbourg est délimitée en rose.

*Map of summer nocturnal thermal risk by IRIS estimated by the combination of vulnerability and heat island. The priority districts of the city (QPV) are delimited in blue; the municipality of Strasbourg is delimited in pink.*

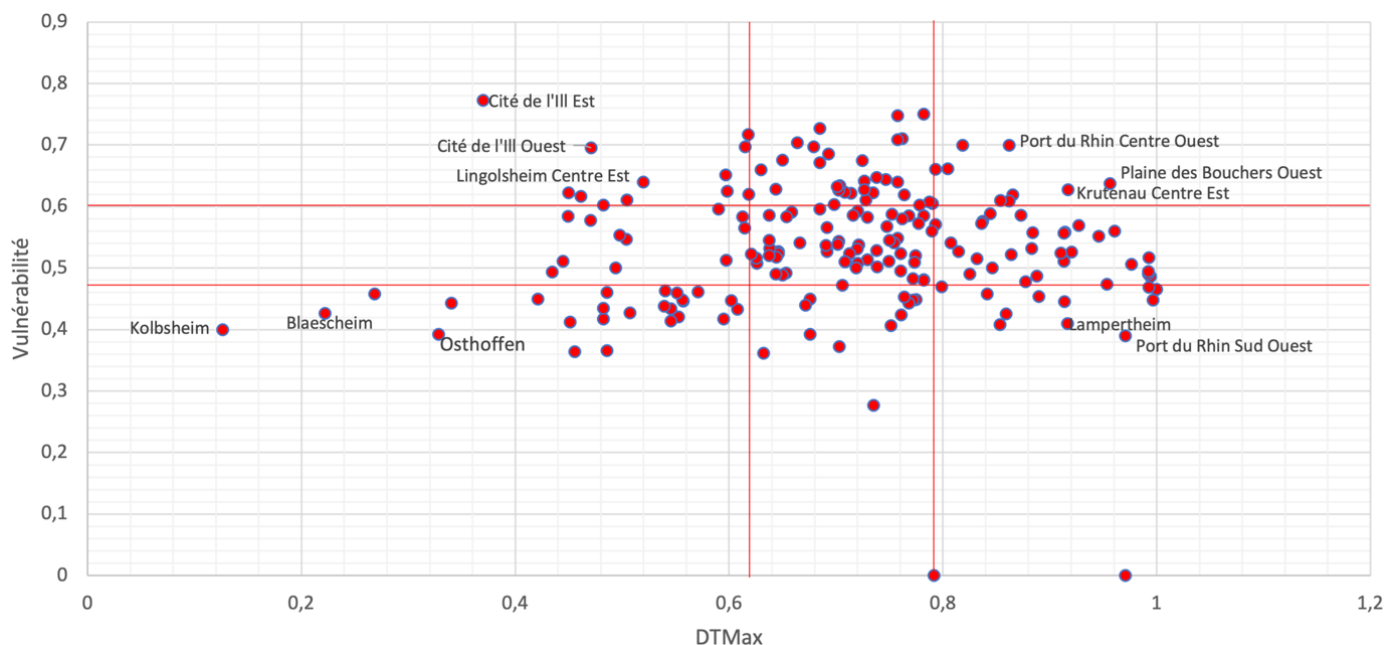


La commune de Strasbourg n'est pas complètement uniforme et composée seulement d'IRIS à risque fort : certains apparaissent à risque moindre, comme par exemple celui de La Robertsau (secteur nord-est), où l'îlot de chaleur urbain est peu intense et la population peu vulnérable. On voit aussi que les IRIS des communes au nord de l'EMS, Schiltigheim, Hoenheim ou encore Reichstett sont à risque fort : ce sont des communes où l'ICU est très élevé en raison d'une forte urbanisation et l'absence de végétation.

Sur cette carte, tous les IRIS dont l'indice est très élevé sont classés comme des zones en « activité » par l'INSEE et sont concernés à la fois par un ICU fort et une vulnérabilité importante (un IRIS d'activité contient au moins 1000 salariés et au moins deux fois plus d'emplois salariés que de population résidente). Les IRIS qui contiennent des QPV ressortent également plus à risque du fait que leur population apparaît comme particulièrement vulnérable et qu'ils sont parfois localisés dans des secteurs à fort îlot de chaleur. La figure 5 montre également que les quartiers où le risque est important ne sont pas nécessairement ceux du centre-ville de Strasbourg mais peuvent s'étendre sur un territoire plus large dans l'Eurométropole.

Cela signifie que la lutte contre l'ICU et/ou la vulnérabilité au sein de l'EMS ne doit donc pas être axée uniquement sur le centre-ville, mais doit pouvoir être étendue à l'ensemble du territoire.

Du fait du calcul qui est utilisé pour combiner la vulnérabilité et l'ICU, un même indice de risque peut être obtenu par des combinaisons différentes de valeurs de vulnérabilité et d'ICU. Une valeur de risque de 0,2 par exemple, recouvre des réalités différentes : elle peut correspondre à une valeur de vulnérabilité de 0,8 et une valeur d'ICU normalisée de 0,2, tout comme le contraire. D'autre part, comme la vulnérabilité et l'aléa agissent en même temps, ils peuvent tout aussi bien se compenser, que se renforcer. La figure 6 est un moyen graphique empirique pour identifier ces situations et faire la distinction entre tous les IRIS selon les 1<sup>ers</sup> et 3<sup>èmes</sup> quartiles des deux variables. Cette représentation montre bien que certains IRIS très vulnérables ne présentent pas un îlot de chaleur très important : c'est le cas de la Cité de l'III Est, Cité de l'III Ouest et de Lingolsheim Centre-Est par exemple. A l'inverse, les IRIS de Lampertheim ou de Port du Rhin Sud-Ouest ont un îlot de chaleur élevé, avec une vulnérabilité relativement faible.



**Figure 6.** Graphique bivarié comparant l'indice de vulnérabilité (ordonnées) avec l'îlot de chaleur normalisé (abscisses) pour les 195 IRIS de l'Eurométropole de Strasbourg en 2017. Les lignes représentent le premier et troisième quartile des variables. Pour des raisons de lisibilité seuls certains IRIS, dont ceux utilisés dans le texte ont été clairement identifiés. *Bivariate graph comparing the vulnerability index (ordinates) with the normalized heat island (abscissas) for the 195 IRIS of the Strasbourg Eurometropolis in 2017. The lines represent the first and third quartile of the variables. For reasons of readability, only certain IRIS, including those used in the text, have been clearly identified.*

En complément, certains IRIS sont soumis à une vulnérabilité forte et un ICU important : c'est le cas du Port du Rhin Centre-Ouest, de la Plaine des Bouchers Ouest, ou encore de la Krutenau Centre-Est. Au contraire, Kolbsheim, Blaesheim et Osthoffen font partie des IRIS avec une vulnérabilité et un ICU plutôt faibles. Dans une certaine mesure, cette méthode empirique, rend possible l'identification des actions qu'il faut mener en priorité dans chaque IRIS pour y faire baisser le risque : elle permet de savoir s'il faut agir sur l'aléa et/ou la vulnérabilité simultanément ou plutôt sur l'un des deux ?

## 4. Discussion

Durant ces dernières décennies, les composantes socio-géographiques ont nettement émergé dans les études de climatologie urbaine, en complément des aspects purement physiques qui continuent à être abordés. Cette dimension complémentaire permet de déterminer les quartiers où la population est le plus susceptible de subir des contraintes sanitaires liées à la chaleur. Déterminer la vulnérabilité est donc important et c'est ce que nous avons tenté de faire dans ce projet de recherche. Cependant, notre travail sur le sujet a mis en lumière quelques limites méthodologiques. Certaines variables potentiellement très utiles n'ont pas pu être obtenues, car leurs données ne sont pas facilement accessibles (ou payantes) ou n'existent pas, comme celles sur l'état de santé de la population ou les caractéristiques thermiques des bâtiments. D'autres variables existent (e.g. diabète, obésité chez les moins de 15 ans, maladie vasculaire cérébrale, maladies respiratoires), mais ne sont pas à la bonne résolution spatiale : elles sont fournies par communes et non par IRIS, ce qui pose un problème pour le recoupement des informations, notamment pour la commune principale de Strasbourg qui se décompose de 116 IRIS sur les 195 de l'Eurométropole.

Par ailleurs, l'indice de vulnérabilité qui est proposé est obtenu en additionnant les variables proxy tout en leur donnant un poids arbitraire fondé sur les usages les plus courants observés dans la littérature. Or cette méthode d'agrégation n'est peut-être pas la plus adéquate. Il serait éventuellement plus pertinent de s'appuyer sur une méthode

multiplicative ou sur l'utilisation de poids différents. Nos résultats sont également entachés de certains biais liés aux variables utilisées : par exemple il peut s'avérer que certains bâtiments construits avant 1990 ont été soumis à des rénovations énergétiques et sont parfois plus efficaces en termes d'isolation thermique que des bâtiments plus récents. L'exposition des logements ainsi que l'étage peuvent aussi être des facteurs d'exposition qui n'ont pas pu être utilisés ici. Ainsi, les appartements situés au rez-de-chaussée seront a priori mieux protégés de la chaleur que ceux situés sous les combles.

S'agissant de l'aléa, la méthode utilisée repose sur un traitement statistique de reconstruction de l'ICU nocturne qui atteint ses limites en termes de précision : par exemple, l'erreur-type de la carte présentée dans cet article est de 0,64°C (figure 4). Cette approximation est liée aux variables explicatives utilisées dans le modèle statistique (e.g. la fraction de surface bâtie, le pourcentage de surface végétalisée, la rugosité spécifique de la végétation...), dont l'obtention est elle-même sujette à des erreurs. Le *Sky View Factor* par exemple est très influencé par la présence d'arbres mais les calculs n'en tiennent pas forcément compte. Ensuite, il y a une variabilité naturelle au sein des quartiers puisque des études ont montré qu'à l'intérieur d'un quartier homogène au sens des LCZ (et donc en termes de caractéristiques morphométriques), l'ICU n'atteint pas forcément la même intensité partout (e.g. Madelin et Dupuis, 2022). Toutes ces approximations peuvent parfois se cumuler, ce qui accroît l'incertitude lors de l'application de la méthode et l'aboutissement cartographique.

Ce qu'attendent souvent les décideurs est une carte du risque thermique diurne. Une telle carte est extrêmement difficile à réaliser car le confort thermique de jour dépend plus du rayonnement solaire que de la température de l'air, ce qui lui confère une très forte variabilité spatiale tout au long de la journée. C'est beaucoup moins le cas la nuit, car en l'absence de rayonnement solaire, la température redevient le facteur dominant et les différences sont moins fortes. D'autre part, en journée, l'analyse est biaisée par le déplacement de la population qui ne se cantonne pas forcément à

son lieu de résidence et qui vaque à ses occupations, ce qui crée un hiatus entre les données de recensement et la population réelle qui occupe une zone. La carte thermique de nuit a l'avantage d'être plus représentative, puisque la structure spatiale de l'îlot de chaleur ne varie pas selon les heures, et sa fiabilité est supérieure, car la population se cantonne à son domicile ; par ailleurs d'un point de vue sanitaire elle concerne la phase de repos qui est cruciale au niveau physiologique quand il s'agit de faire face à la chaleur.

## Conclusion

L'objectif de cette étude consistait à réaliser une cartographie du risque thermique nocturne dans l'Eurométropole de Strasbourg. La méthode utilisée a permis d'obtenir un indice de ce risque par « Îlot Regroupé pour l'Information Statistique » (IRIS). Elle consiste à croiser l'information sur la vulnérabilité de la population à la chaleur avec celle de l'îlot de chaleur urbain nocturne. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une grande variabilité entre les différents IRIS qui composent l'Eurométropole de Strasbourg. Les quartiers prioritaires de la ville (QPV) sont souvent concernés par un risque fort, à la fois du fait qu'ils sont soumis à un ICU élevé et parce qu'ils apparaissent comme vulnérables. Ce travail est susceptible de fournir des pistes à la collectivité strasbourgeoise pour prioriser des actions dans les zones urbaines où le risque est maximal, soit en agissant pour diminuer la vulnérabilité (Thouret et D'Ercole, 1996), soit en tentant de remédier à l'îlot de chaleur urbain (Aflaki *et al.*, 2017). Dans les zones très densément bâties, où il est difficile de lutter contre l'ICU, même en introduisant de la végétation, il est toujours possible d'agir sur la vulnérabilité en réduisant l'exposition, la sensibilité ou en améliorant la capacité d'adaptation des populations à travers des mesures organisationnelles ou structurelles. Ainsi, par exemple, diminuer la vulnérabilité peut se faire en menant des opérations de sensibilisation pour améliorer l'adaptation ou en encourageant l'isolation des bâtiments pour diminuer l'exposition.

Un verrou important, qui n'a pas pu être résolu, a été identifié dans cette étude : il s'agit de l'absence de données par IRIS sur l'état sanitaire de la population de l'Eurométropole. Pourtant l'ajout de ces informations

permettrait d'augmenter considérablement la représentativité de l'indice de vulnérabilité. Pour en tenir compte il faudrait lancer un recensement spécifique en lien avec les autorités sanitaires locales (ORS, hôpitaux, médecins...).

**Remerciements** : nos remerciements vont au projet de recherche COOLTREES de l'ANR qui a financé le stage d'Elsa Schott, ainsi qu'au service des espaces verts de l'EMS qui a financé le stage de Naïs Massing. Une mention également au service de Géomatique de l'Eurométropole quant à sa réactivité par rapport au traitement des données, ainsi qu'à l'Observatoire Régional de Santé (ORS).

## Références

- ADEME, 2012. Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique. 64 p.
- Aflaki A., Mirnezhad M., Ghaffarianhoseini A., Ghaffarianhoseini A., Omrany H., Wang Z-H, Akbari H., 2017. Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131-145.
- Benmarhnia T., Deguen S., Kaufman J. S., Smargiassi A., 2015. Review article: Vulnerability to heat-related mortality: A systematic review, meta-analysis, and meta-regression analysis. *Epidemiology*, 26, 781-793.
- Bottyan Z., Unger J., 2003. A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 75, 233-243.
- Buscail C., Upegui E., Viel J.-F., 2012. Mapping heatwave health risk at the community level for public health action. *International Journal of Health Geographics*, 11, 38.
- Cantos J. C., Serrano-Notivoli R, Miró J., Meseguer-Ruiz O., 2019. Tropical nights on the Spanish Mediterranean coast, 1950-2014. *Climate Research*, 78, 225-236.
- Chow W. T. L., Chuang W.-C., Gober P., 2012. Vulnerability to extreme heat in metropolitan phoenix: spatial, temporal, and demographic dimensions. *The Professional Geographer*, 64, 286-302.
- Cutter L., Mitchell J., Scott M., 2000. Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, 90, 713-737.
- Dubreuil V., Quenol H., Planchon O., Clergeau H., 2008. *Variabilité quotidienne et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain à Rennes : premiers résultats du programme ECORURB*. XXIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Montpellier, 21, 221-227.
- Filho W. L., Icaza L. E., Neht A., Klavins M., Morgan E. A.,

2018. Coping with the impacts of urban heat islands. A literature-based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1140-1149.
- Halawa E., van Hoof J., Soebarto V., 2014. The impacts of the thermal radiation field on thermal comfort, energy consumption and control – A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 907-918.
- He B. J., Wang J., Liu H., Ulpiani G., 2021. Localized synergies between heat waves and urban heat islands: Implications on human thermal comfort and urban heat management. *Environmental Research*, 193, 110584.
- Léger D., Adrien J., Muzet A., Gronfier C., 2013. Quel environnement pour un bon sommeil ? *Dossier de Presse*, INSV, 29 p.
- IPCC, 2021. *Summary for Policymakers*. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 p.
- Kastendeuch P. P., Schott E., Philipps N., Najjar G., 2020. *Changement climatique et confort thermique à Strasbourg*. Rapport technique, 25 p.
- Laaïdi M., Laaïfi K., Besancenot J.-P., 2006. Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming. *International Journal of Biometeorology*, 51, 145-153.
- Lévy J., Lussault M., 2013. *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Paris, Belin, 1034 p.
- Madelin M., Dupuis V., 2022. *Structure fine de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir d'un réseau de stations non conventionnelles*. 35<sup>ème</sup> colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie, 6 p.
- Massing N., 2022. *Etude de la vulnérabilité des populations de l'Eurométropole de Strasbourg face au phénomène d'îlot de chaleur urbain*. Mémoire de Master 2 de l'Université de Strasbourg, 81 p.
- Matzarakis A., De Rocco M., Najjar G., 2009. Thermal bioclimate in Strasbourg. The 2003 heat wave. *Theoretical Applied Climatology*, 98, 209-222.
- Meehl G. A., Tebaldi C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, 994-997.
- Montauban O., 2019. *Une approche vectorielle pour classifier des données et vecteurs dans le but d'extraire une cartographie des zones climatiques locales des quartiers de Strasbourg*. Mémoire de soutenance de diplôme d'Ingénieur INSA, 99 p.
- Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. A., 2017. *Urban climates*. Cambridge. Cambridge University press, 546 p.
- Philipps N., Kastendeuch P., Najjar G., 2020. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). *Climatologie*, 17, 10, 11 p.
- Philipps N., Landes T., Kastendeuch P., Najjar G., 2022. Urban Heat Island mapping using Local Climate Zone classification: A case study in Strasbourg city. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9, 57-67.
- Rathi S. K., Chakraborty S., Mishra S. K., Dutta A., Nanda L., 2022. A heat vulnerability index: Spatial patterns of exposure, sensitivity and adaptive capacity for urbanites of four cities of India. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19(1), 283.
- Reid C. E., O'Neil M. S., Gronlund C. J., Brines S. J., Brown D. G., Diez-Roux A. V., Schwartz J., 2009. Mapping community determinants of heat vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, 117, 1730-1736.
- Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., Pohl B., 2018. How relevant are Local Climate Zones and Urban Climate Zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, 26, 258-274.
- Royé D., Sera F., Tobías A., Lowe R., Gasparrini A., Pascal M., deDonato F., Nunes B., Teixeira J.P., 2021. Effects of Hot Nights on Mortality in Southern Europe. *Epidemiology*, 32(4), 487-498.
- Salvati N., Perna C., Marchetti S., 2023. *Studies in theoretical and applied statistics*. Springer International Publishing, 547 p.
- Schott E., 2021. *Etude exploratoire de la vulnérabilité de l'Eurométropole de Strasbourg face à l'îlot de chaleur urbain atmosphérique*. Mémoire de Master 2 de l'Université de Strasbourg, 104 p.
- Stewart I. D., Oke T. R., 2012. Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.
- Soomar S. M., Soomar S.M., 2023. Identifying factors to develop and validate a heat vulnerability tool for Pakistan – A review. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 19, 5 p.
- Swart R., Fons J., Geertsema W., van Hove B., Gregor M., Havranek M., Jacobs C., Kazmierczak A., Krellenberg K., Kuhlicke C., Peltonen L., 2012. *Vulnerability Indicators*. ETC-CCA and ETC-SIA technical report, 178 p.
- Thouret J.-C., D'Ercole R., 1996. Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. *Cahiers des sciences humaines*, ORSTOM, 32, 407-422.
- Weiss V., 2022. *Etude cartographique de l'îlot de chaleur et de fraîcheur saisonniers dans l'Eurométropole de Strasbourg entre 2013 et 2016*. Mémoire de Master 2 de l'Université de Strasbourg, 80 p.
- Wilhelmi O., Hayden M., 2010. Connecting people and place: a new framework for reducing urban vulnerability to extreme heat. *Environmental Research Letters*, 5, 1, 7 p.
- Wolf T., McGregor G., 2013. The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather*

and *Climate Extremes*, 1, 59-68.

Wong-Parodi G., Fischhoff B., Strauss B., 2015. Resilience vs. adaptation: Framing and action. *Climate Risk Management*, 10, 1-7.

Zemtsov S., Shartova N., Varentsov M., Konstantinov P., Kidyayeva V., Shchur A., Timonin S., Grischchenko M., 2020. Intraurban social risk and mortality patterns during extreme heat events: A case study of Moscow, 2010-2017. *Health & Place*, 66, 102429.

**Citation de l'article** : Kastendeuch P., Massing N., Schott E., Philipps N., Lecomte K., 2023. Vulnérabilité et îlot de chaleur urbain : les facteurs du risque thermique nocturne à Strasbourg. *Climatologie*, 20, 9.