

SANTÉ
ENVIRONNEMENT

SEPTEMBRE 2020

ÉTUDES ET ENQUÊTES

INFLUENCE DE CARACTÉRISTIQUES
URBAINES SUR LA RELATION
ENTRE TEMPÉRATURE ET MORTALITÉ
EN ÎLE-DE-FRANCE

En partenariat avec :



Résumé

Influence de caractéristiques urbaines sur la relation entre température et mortalité en Île-de-France

L'îlot de chaleur urbain (ICU) conduit à une surexposition de la population à la chaleur en zone urbaine. Il résulte de la conjonction de situations météorologiques particulières et de certaines caractéristiques urbaines. Cette étude a exploré l'influence de certaines caractéristiques urbaines propices à la formation d'ICU sur la relation entre la température et la mortalité dans les communes d'Île-de-France. L'analyse a porté sur la mortalité totale, sur les étés (juin-septembre) 1990 à 2015. Les données journalières de décès dans chaque commune ont été modélisées par la température journalière moyenne en contrôlant sur l'indice de défaveur sociale, la part de personnes âgées, et quatre indicateurs urbains : la surface artificialisée non-végétalisée, le couvert non-arboré, le taux d'imperméabilisation et la part de la population vivant dans une zone avec un potentiel d'ICU nocturne moyen ou fort.

À Paris et dans la petite couronne, seuls les indicateurs avec une notion explicite de végétalisation influencent le risque de décès associé à une température au percentile 95 de la distribution des températures. Au percentile 99, tous les indicateurs testés influencent le risque de décès, avec des risques relatifs (RR) de décès par rapport à une température médiane plus faibles dans les communes plus végétalisées, plus arborées, ou moins imperméabilisées. Par exemple, on retrouve un RR de 2,17 [1,98 ; 2,38] lorsque la commune présente 60% de couvert non-arboré, et de 2,53 [2,44 ; 2,62] lorsque la commune présente 93% de couvert non-arboré. Dans la grande couronne, l'indicateur de surface non-arborée n'influence pas le risque de décès liés aux fortes chaleurs. On observe par contre des RR plus faibles dans les communes plus végétalisées et moins artificialisées.

Les résultats mettent en évidence que des caractéristiques urbaines contribuant à l'ICU urbain sont associées à un risque plus élevé de décès lié à la chaleur. Des interventions sur ces caractéristiques, en particulier sur la végétalisation et l'imperméabilisation des sols, pourraient donc permettre de réduire les impacts sanitaires des fortes chaleurs. Elles doivent être couplées à d'autres mesures de prévention des effets de la chaleur.

MOTS CLÉS : TEMPÉRATURE, MORTALITÉ, ÎLOT DE CHALEUR URBAIN, ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Citation suggérée : Pascal M, Gorla S, Wagner V, Guillet A, Sabastia M, Cordeau E, *et al.* Influence de caractéristiques urbaines sur la relation entre température et mortalité en Île-de-France. Saint-Maurice : Santé publique France, 2020. 62 p. Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

ISSN : 2609-2174 - ISBN-NET : 979-10-289-0634-4 - RÉALISÉ PAR LA DIRECTION DE LA COMMUNICATION, SANTÉ PUBLIQUE FRANCE - DÉPÔT LÉGAL : SEPTEMBRE 2020

Abstract

Influence of urban characteristics on the relationship between temperature and mortality in Île-de-France

The urban heat island (UHI) results in an over-exposure of urban population to heat. It is created under specific weather-conditioned, combined with urban characteristics. This study explore how urban characteristics know to favor UHI influence the temperature-mortality relationship in the municipalities of the Île-de-France region. We investigated total mortality during summer (June-September) from 1990 to 2015. Daily number of deaths in each municipality were modeled by the daily mean temperature, controlling for a deprivation index, the percentage of inhabitants over 75 age old, and four urban indicators; the proposition of surface without vegetation, the proportion of surface without trees, the impermeabilization of soil, and the proportion of the population living in a neighborhood with a high risk to experience a moderate or high night UHI.

Within Paris and its close suburbs (petite couronne), only the indicators with an explicit notion of vegetation influenced the risk of deaths associated with a temperature at the 95th percentile of the temperature distribution. At the 99th percentile, all the indicators modified the mortality response, with lower relative risk of deaths (compared to a temperature at the 50th percentile) in municipalities with more vegetation, more trees, and more permeable soils. For instance, a RR of 2.17 [1.98:2.38] is found in municipalities with 60% of their surface not covered by trees, and 2.53 [2.44:2.62] in municipalities with 93% of their surface not covered by trees.

In the rest of the region (grande couronne), the proportion of surface without trees did not influence the risk of deaths during extreme heat. Lower RR are still observed in municipalities with more vegetation, and more permeable soils.

Results show that urban characteristics favoring UHI are associated with an higher risk of heat-related deaths. Actions to reduce those characteristics, especially targeting vegetation and soil impermeabilization, could reduce the health impacts of extreme heat. They must be coupled with other initiatives to prevent the adverse effects of heat exposure.

KEY WORDS : TEMPERATURE, MORTALITY, URBAN HEAT ISLAND, ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE

Auteurs

Mathilde Pascal, direction santé environnement, Santé publique France, Saint-Maurice, France

Sarah Gorla, direction appui, traitements et analyses de données, Santé publique France, Saint-Maurice, France

Vérène Wagner, direction appui, traitements et analyses de données, Santé publique France, Saint-Maurice, France

Agnès Guillet, direction appui, traitements et analyses de données, Santé publique France, Saint-Maurice, France

Marine Sabastia, direction appui, traitements et analyses de données, Santé publique France, Saint-Maurice, France

Erwan Cordeau, L'Institut Paris Région, Paris, France

Cécile Maclair, L'Institut Paris Région, Paris, France

Sabine Host, L'Institut Paris Région - Observatoire régional de santé d'Île-de-France, Paris, France

Relecture scientifique

David Kaiser, chef médical, service environnement urbain et saines habitudes de vie - Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal

Abréviations

Ademe	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
IC	Intervalle de confiance
ICU	Îlot de chaleur urbain
IMU	Îlot morphologique urbain
Fdep	<i>French deprivation index</i>
LCZ	<i>Locale climate zone</i>
MICU	Micro îlot de chaleur urbain
MOS	Mode d'occupation des sols
P	Percentile
Pnacc	Plan national d'adaptation au changement climatique
PNC	Plan national canicule
RR	Risque relatif

Sommaire

1. CONTEXTE	6
1.1 La nécessité d'adapter les villes à la chaleur	6
1.2 L'îlot de chaleur urbain.....	7
1.3 Objectifs.....	10
2. MÉTHODE	11
2.1 Zone et période d'étude	11
2.2 Données de mortalité.....	11
2.3 Données de population	11
2.4 Données de températures.....	11
2.5 Identification des vagues de chaleur	11
2.6 Caractéristiques urbaines testées	12
2.6.1 Proportion de surface artificialisée et non végétalisée	12
2.6.2 Surface non-arborée.....	13
2.6.3 Taux d'imperméabilisation	13
2.6.4 Part de la population vivant dans un îlot morphologique urbain à potentiel d'ICU nocturne moyen ou fort.....	14
2.7 Indice de défaveur sociale	15
2.8 Analyses statistiques	15
2.8.1 Interaction entre vague de chaleur et caractéristiques urbaines	15
2.8.2 Interaction entre relation température-mortalité et les caractéristiques urbaines...	16
3. RÉSULTATS	17
3.1 Caractéristiques de la zone d'étude	17
3.1.1 Population et mortalité	17
3.1.2 Température moyenne estivale et vagues de chaleur.....	17
3.1.3 Caractéristiques urbaines testées.....	18
3.1.4 Caractéristiques sociodémographiques	22
3.2 Interaction entre vague de chaleur, caractéristiques urbaines et mortalité	23
3.3 Interactions entre la relation température-mortalité et caractéristiques urbaines	25
4. DISCUSSION	31
4.1 Synthèse et mise en perspective des résultats	31
4.2 Intérêt pour la santé publique.....	32
4.3 Perspectives	35
5. ANNEXES	37
5.1 Cartographie des indicateurs à une échelle infra-communale	37
5.2 Descriptif des données météorologiques	42
5.3 Corrélation des caractéristiques urbaines testées	44
5.4 Courbes température – mortalité selon la caractéristique urbaine.....	50
5.5 RR exprimés pour des percentiles communs à toute la région.....	53
5.6 Résultats analyse de sensibilité effet spatial – pour Paris et petite couronne	55
5.7. Résultats pour l'agglomération parisienne.....	57

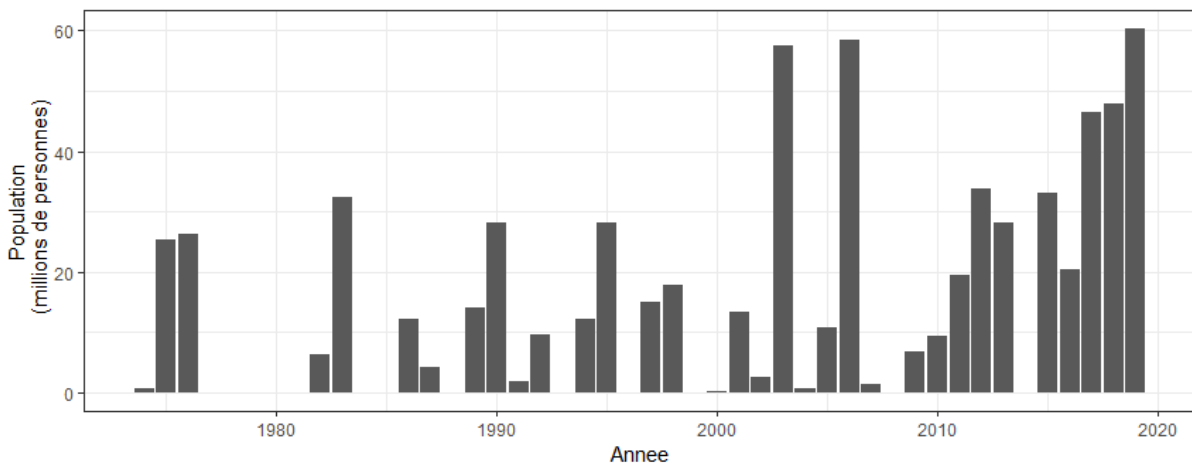
1. CONTEXTE

1.1 La nécessité d'adapter les villes à la chaleur

Les canicules, telles que définies par le plan national canicule ont causé près de 38 000 décès entre 1973 et 2019 en France métropolitaine (Géodes 2019). Elles sont de plus en plus fréquentes et étendues, ce qui se traduit par une augmentation de la taille de la population exposée au moins une fois par été à une canicule (Figure 1) (Pascal *et al.* 2019). Ces tendances vont s'aggraver dans les prochaines années du fait du changement climatique d'origine anthropique ; la contribution du changement climatique à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des canicules du type de celles observées en 2015, 2017, 2018 et 2019 est sans équivoque (vanOldenborgh *et al.* 2019).

I FIGURE 1 I

Taille de la population exposée au moins une fois dans l'été à une canicule répondant à la définition du plan national canicule en France métropolitaine entre 1973 et 2019



L'adaptation à la chaleur est une priorité de santé publique. En France, plusieurs études épidémiologiques ont mis en évidence une augmentation rapide du risque de décès et de recours aux soins d'urgences lorsque la température augmente (Wagner 2018; Corso, Pascal, and Wagner 2017; Fouillet *et al.* 2006; Fouillet *et al.* 2008; Rey *et al.* 2007; Le Tertre *et al.* 2006; Pascal, Le Tertre, and Saoudi 2012 ; Pascal *et al.* 2016; Pascal 2018 ; Atiki 2019). Cette augmentation du risque survient dès des températures modérées, et suit une relation non-linéaire très sensible à l'intensité de la chaleur. Par exemple, entre 2000 et 2010, dans 18 villes métropolitaines françaises, l'effet de la chaleur sur la mortalité apparaissait dès des températures moyennes journalières variant de 13 à 21°C selon la ville (Corso, Pascal, and Wagner 2017). 1,2% [IC 95% 1,1 :1,2] de la mortalité totale annuelle était attribuable à la chaleur, soit 13 855 [13 338 :14 403] décès (Corso, Pascal, and Wagner 2017). Des projections sous un climat plus chaud estiment que dans ces mêmes villes, sans adaptation de la population, la mortalité attribuable à la chaleur serait au moins de 1,7% sous un réchauffement de +1,5°C, 2,4% sous un réchauffement de +2°C et 6,5% sous un réchauffement de 4°C (Vicedo-Cabrera *et al.* 2018).

Un des enseignements principaux de ces études est de souligner le potentiel disruptif de certaines vagues de chaleur, avec des augmentations très rapides de la mortalité et du recours aux soins d'urgences, concentrées sur quelques jours. Par exemple, l'été 2003 totalise 50% de la mortalité associée aux vagues de chaleur en France entre 1970 et 2013. La mortalité

associée aux vagues de chaleur entre 2014-2019 (5 500 décès en cinq ans) est déjà supérieure à celle observée entre 2004 et 2013 (2 200 décès en 10 ans) ('Geodes' 2019).

La prévention des effets de la chaleur doit donc couvrir un large spectre de situations ; d'un côté la chaleur habituelle, correspondant à un risque faible, cumulé sur un nombre conséquent de jours, et de l'autre la chaleur exceptionnelle, correspondant à un risque très fort, cumulé sur un nombre réduit de jours. L'adaptation se concentre actuellement sur la chaleur exceptionnelle, via le Plan national Canicule, en ciblant les comportements individuels, et l'identification et l'accompagnement des populations très vulnérables. En zone urbaine, un intérêt particulier est porté aux actions de réductions de l'îlot de chaleur urbain (ICU), qui semblent prometteuses pour réduire le risque en complément des interventions ciblées sur les comportements et les populations les plus vulnérables (Benmarhnia 2018).

1.2 L'îlot de chaleur urbain

L'ICU désigne un microclimat généré par la concentration d'activités humaines, et se traduisant par une élévation de la température en zone urbaine par rapport aux zones rurales voisines (Figure 2). Il dépend des propriétés physiques de la ville (ex : occupation des sols, matériaux de construction, morphologie de la ville, activité anthropique...) et de conditions météorologiques favorables, caractérisées notamment par un vent faible et un ciel dégagé (Gruber 2013 ; Colombert 2008)(Figure 2, Tableau 1).

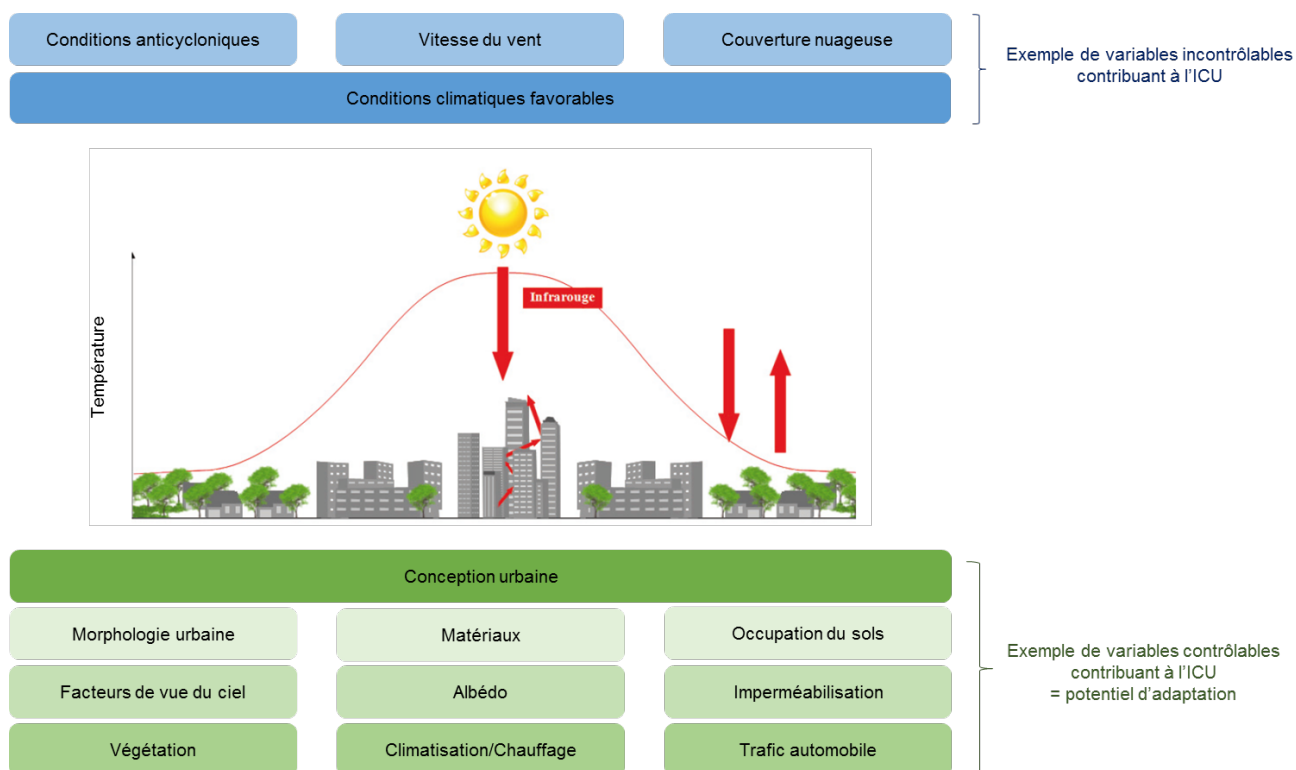
I TABLEAU 1 I

Principaux facteurs contribuant à l'ICU

Facteurs	Nature de la contribution
Eau	Stocke la chaleur prélevée à l'air ambiant et permet de l'évacuer, conduisant à un refroidissement localisé
Végétation	Élimine de la chaleur via l'évapotranspiration et l'ombre, conduisant à un refroidissement localisé. De plus, les surfaces ombragées ne stockent pas d'énergie solaire et ne contribue pas à l'ICU la nuit.
Matériaux de constructions et de revêtement	Aggrave ou diminuent l'ICU selon la nature des matériaux. Les matériaux lisses et clairs sont globalement plus froids que les matériaux rugueux et sombres.
Facteur de vue du ciel	Conditionne la facilité avec laquelle les échanges radiatifs avec le ciel peuvent se réaliser et réduire l'ICU nocturne. Schématiquement, les quartiers anciens, denses et compact, s'échauffent faiblement mais se refroidissent peu la nuit, les formes péri-urbaines s'échauffent fortement la journée, mais se refroidissent davantage la nuit.
Activités humaines (dont climatisation)	Génèrent de la chaleur additionnelle (20% de l'ICU)
Trafic	Réchauffe l'air ambiant et émet des polluants qui génèrent un effet de serre additionnel diminuant le refroidissement nocturne radiatif.
Imperméabilisation	Empêche d'avoir de l'eau de surface et de la végétation, qui refroidissent l'air par évaporation et évapotranspiration.

I FIGURE 2 I

Schématisation du phénomène d'îlot de chaleur urbain



En France, des ICU marqués par une élévation de température de 7 à 8°C peuvent par exemple être observés à Toulouse, Strasbourg ou Paris pendant les nuits d'été (Lambert-Habib *et al.* 2013). En moyenne annuelle, les différences de températures nocturnes sont de l'ordre de 2°C à 3°C entre Paris et les zones rurales voisines (Gruber 2013). On observe également d'importantes variations de températures à l'intérieur même des villes, constituant des micro-îlots de chaleur urbains (MICU) (Figure 3). L'ICU et les MICU peuvent varier rapidement au sein d'une journée et dans l'espace, à des échelles de quelques mètres.

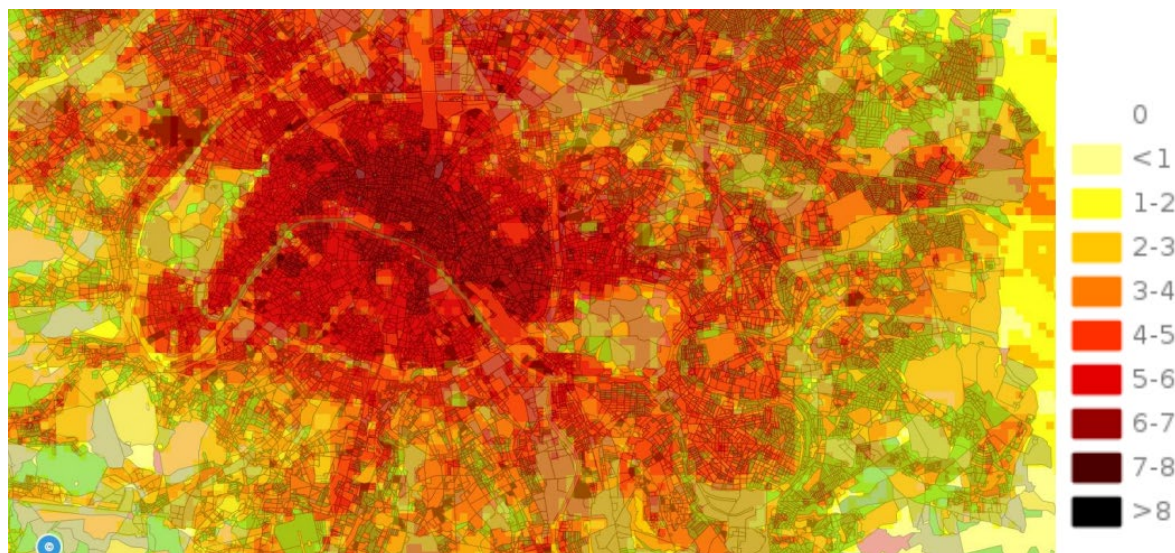
La surexposition aux températures chaudes due à l'ICU et aux MICUs se répercute *a priori* en risque sanitaire. Par exemple, une étude cas-témoin a montré que pendant la canicule de 2003 à Paris la mortalité dans les quartiers les plus exposés aux fortes chaleurs était le double de celle observée dans les quartiers les moins exposés alors que la différence de température (moyenne sur la durée de l'épisode) n'atteignait qu'un demi-degré (Laaidi *et al.* 2012). La même étude avait également montré que la présence de végétation autour du domicile des cas et des témoins avait probablement eu un effet protecteur, avec un odds ratio de 0,37 [0,10 :0,9] pour les domiciles ayant un environnement proche très végétalisé comparé aux environnements sans végétation (dans un rayon de 100 m autour du domicile, en analyse univariée) (Bretin *et al.* 2005). Au Royaume-Uni, l'ICU aurait contribué à environ la moitié de la mortalité totale observée en août 2003 (Heaviside, Cai, and Vardoulakis 2015; Heaviside, Vardoulakis, and Cai 2016).

Ainsi, réduire l'ICU pourrait contribuer à réduire l'exposition, et *in fine* à réduire l'impact sanitaire lié à la chaleur pendant une canicule similaire à celle de 2003, i.e. une chaleur exceptionnelle. On dispose toutefois de peu d'études sur l'influence de l'ICU sur la mortalité lors de canicules moins exceptionnelles. Les résultats de ces travaux suggèrent globalement

que vivre dans un MICU augmente le risque de décès pendant les vagues de chaleur (Benmarhnia 2018; Schinasi, Benmarhnia, and De Roos 2018).

I FIGURE 3 I

Ilot de chaleur nocturne estival (en °C) sur Paris (à 250m de résolution) superposé aux îlots morphologiques urbains (disponible sur <http://mapuce.orbisgis.org>)



La légende représente l'écart en °C entre une simulation du climat urbain et une simulation rurale¹, lors d'un épisode météorologique estival correspondant à un type de temps favorisant l'ICU

La lutte contre les ICU est un des axes prioritaires du second plan d'adaptation au changement climatique français (Pnacc-2) (solidaire; 2018). Les actions de réduction de l'ICU vont chercher à modifier les variables urbaines contrôlables, et donc liées à l'aménagement urbain et aux choix des matériaux. Par exemple, en France, l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) a recensé plusieurs initiatives d'adaptation au changement climatique visant à améliorer le confort thermique en ville, par exemple des actions de végétalisation et de réduction de l'imperméabilisation des sols à Lyon (Ademe). La végétalisation des villes permet de réduire localement la température (Gago *et al.* ; Ren *et al.* 2013), tout en répondant à une demande sociétale de plus de nature en ville (Lambert-Habib *et al.* 2013).

A Paris, diverses méthodes de rafraîchissements fondées sur les matériaux et l'usage de l'eau en ville sont testées en complément des actions de végétalisation ("Plan de santé environnementale pour Paris" 2018). L'introduction de surfaces végétalisées et perméables est une piste de plus en plus suivie, d'autant que ce type d'intervention est également susceptible d'avoir des impacts bénéfiques plus larges sur la santé que la simple réduction de l'ICU : amélioration de la qualité de l'air, promotion de modes de déplacement actifs, réduction de la sédentarité, amélioration du lien social... (Pascal 2019 ; Guigère 2009).

Si les bénéfices sanitaires de lutter contre l'ICU et les MICUs sont qualitativement identifiés, il demeure pertinent de chercher à en avoir une approche quantitative, et en particulier de mieux comprendre dans quelle mesure l'ICU et les MICUs influencent la relation entre la température et la mortalité.

¹ Simulation urbaine à partir du modèle météorologique Meso-NH à 250 de résolution horizontale paramétrée de manière à simuler de façon assez réaliste le climat urbain sur Paris.

La simulation rurale correspond au même modèle dans lequel on remplace la ville par la végétation environnante. La différence des deux permet d'estimer l'effet de la ville sur les conditions météorologiques, et l'ICU.

Une des limites dans l'interprétation et l'utilisation des résultats des études épidémiologiques actuelles provient de la diversité des méthodes employées pour caractériser les ICUs et MICUs (Schinasi, Benmarhnia, and De Roos 2018). Cette diversité d'approches pour caractériser l'ICU pose également problème aux climatologues urbains, et des efforts d'harmonisation sont en cours (Hidalgo *et al.* 2019). Une revue de la littérature des ICU estimés à travers le monde entre 1950 et 2007 conclut que la moitié des études examinées n'étaient pas en mesure de mesurer correctement l'ICU (Stewart 2011). Plusieurs approches sont désormais disponibles pour aborder un ICU sur un même territoire, en exploitant des mesures (stations météorologiques, images satellites, images thermiques...) ou des modèles (modèles de climatologie urbaine, ou d'occupation des sols) (Ademe 2017). Toutefois, la caractérisation spatio-temporelle fine d'un ICU (incluant les MICUs) étant très coûteuse, elle limite encore aujourd'hui la capacité à collecter les longues séries de données nécessaires à la réalisation d'études épidémiologiques. Ainsi, à défaut de mesurer directement l'ICU, on peut se concentrer sur le rôle des facteurs environnementaux qui favorisent sa création et qui sont également ceux sur lesquels joueront les politiques d'adaptation.

1.3 Objectifs

L'objectif de cette étude est d'explorer l'influence de caractéristiques urbaines pouvant favoriser la formation d'ICU et MICUs sur la relation entre la température et la mortalité en Île-de-France. Les facteurs liés à l'urbanisme et propices à la formation d'ICU et de MICUs font l'objet d'un nombre croissant de travaux, visant majoritairement à orienter les politiques d'aménagement urbain (Colombert 2008; Cordeau 2017). Il est intéressant de quantifier l'influence que ces facteurs ont sur la relation température-mortalité, ce qui permettrait à terme de quantifier les gains sanitaires attendus de modification de certains d'entre eux.

L'analyse s'est concentrée sur la région Île-de-France, compte-tenu de l'importance de l'ICU et des MICUs dans cette région (Lemonsu *et al.* 2015), de la taille de la population exposée, et la puissance statistique qui en découle. La région bénéficie également de nombreux travaux sur l'identification des caractéristiques urbaines susceptibles de conduire à des MICUs (Cordeau 2017).

Une extension à d'autres zones sera envisageable dans les prochaines années, selon l'avancée des connaissances et la disponibilité des données environnementales.

2. MÉTHODE

L'approche retenue est une analyse en séries temporelles, modélisant la mortalité journalière en fonction de la température, de la tendance temporelle, de la saison, du jour de la semaine, les jours fériés, de caractéristiques socio-économiques, et d'une interaction avec des caractéristiques d'urbanisme de la commune. L'objectif est de rechercher si cette interaction modifie la relation entre la température mesurée par une station de référence départementale de Météo-France et la mortalité observée dans chaque commune.

2.1 Zone et période d'étude

L'étude porte sur 1 157 communes de la grande couronne, 123 communes de la petite couronne, et 20 arrondissements parisiens (selon le référentiel Insee 2014). Les éventuels changements de code Insee au cours de la période d'étude ont été pris en compte.

La période d'étude est contrainte par la disponibilité des données sanitaires (mortalité jusqu'en 2015) et environnementales. Elle s'étend de 1990 à 2015. L'analyse a été réalisée sur les mois d'été (de juin à septembre inclus).

Les résultats sont présentés pour Paris et la petite couronne, et pour la grande couronne. Un focus sur l'agglomération parisienne est également présenté en Annexe.

2.2 Données de mortalité

Le compte de décès journalier (mortalité totale, tous âges) a été obtenu pour chaque commune auprès du CépiDC de l'Inserm.

2.3 Données de population

La population communale des recensements 1990, 1999, 2010 et 2015 (population totale et 75 ans et plus) a été obtenue auprès de l'Insee. Une extrapolation linéaire a été réalisée pour estimer la population les années entre les dates des recensements.

2.4 Données de températures

On ne dispose pas de relevés de températures pour toutes les communes d'Île-de-France. Le choix s'est donc porté sur des stations départementales, qui permettent de disposer de longues séries de données homogènes de températures. Les données journalières de températures minimales et maximales ont été obtenues auprès de Météo-France pour les stations Paris-Montsouris, Melun, Trappes, Orly et Roissy. Ces stations servent de stations de référence pour le système d'alerte canicule et santé (Sacs) respectivement pour les départements 75-92-93-94, 77, 78, 91 et 95. Les données mesurées à la station de référence d'un département sont utilisées pour chacune des communes de ce département.

2.5 Identification des vagues de chaleur

Il n'existe pas de définition générique des vagues de chaleur ; la relation entre la température et la mortalité étant sans seuil (mais avec des ruptures de pentes), chaque définition de vagues de chaleur répond à des objectifs opérationnels. Celle utilisée par le plan national canicule cible les vagues de chaleur les plus intenses, soit un nombre très restreints d'événements. Pour cette étude, le choix a été fait d'utiliser une définition climatologique issue des travaux menés par Météo-France pour caractériser les événements climatiques extrêmes sur des

critères climatologiques, sans *a priori* sur leur impact sanitaire possible (Soubeyroux *et al.* 2016).

Cette définition permet d'identifier davantage de vagues de chaleur que la définition du plan national canicule, et ainsi d'augmenter la puissance statistique de l'étude. Une étude comparative menée sur la période 1970-2014 a par ailleurs mis en évidence que les jours identifiés par la définition du plan national canicule l'étaient également par la définition climatologique utilisée ici (Pascal *et al.* 2019).

Sous cette définition, les vagues de chaleur correspondent à des périodes d'au moins trois jours, pendant lesquelles la température moyenne dépasse le percentile 97,5, et au moins un jour le percentile 99,5, de la température moyenne journalière du département sur la période 1981-2010. Deux vagues de chaleur successives sont fusionnées si elles sont séparées par moins de trois jours, et que la température ne descend pas en dessous du percentile 95 pendant ces trois jours (Soubeyroux *et al.* 2016). Les seuils correspondants à chaque station de référence sont reportés dans le Tableau 2.

Pendant les vagues de chaleur, on calcule chaque jour la sévérité, correspondant à l'écart entre la température observée et le percentile 97,5. Chaque vague de chaleur est résumée par sa durée, sa sévérité cumulée, et son intensité, qui représente la plus forte sévérité journalière observée pendant la vague de chaleur (Pascal *et al.* 2019). La variable intensité a été utilisée pour créer deux classes de vagues de chaleur : non-extrême (intensité inférieure à 2,5) et extrême (intensité supérieure ou égale à 2,5).

I TABLEAU 2 I

Seuils utilisés pour définir les vagues de chaleur dans les stations de références départementales

Départements	Station de référence	Percentiles 1981-2010 de la température moyenne journalière (°C)		
		95	97,5	99,5
75, 92, 93, 94	Paris-Montsouris	22,9	24,3	26,9
77	Melun	21,5	22,8	25,3
78	Trappes	21,5	22,9	25,7
91	Orly	22,2	23,6	26,1
95	Roissy	21,9	23,3	26,0

2.6 Caractéristiques urbaines testées

Plusieurs caractéristiques urbaines susceptibles d'influencer la relation température-mortalité via leur influence sur l'ICU ont été explorées indépendamment. Ainsi quatre indicateurs ont été testés.

2.6.1 Proportion de surface artificialisée et non végétalisée

La proportion de surface artificialisée et non végétalisée a été calculée dans chaque commune, à partir des données Corine Land Cover des années 2000, 2006, et 2012.

Corine Land Cover fournit un inventaire en 44 postes de l'occupation des sols, à partir d'images satellites. L'information est disponible sur une surface d'au minimum 25 ha ("Corine Land Cover France - Guide d'utilisation" 2009). L'indicateur a été construit à partir de cet inventaire en prenant en compte le ratio des surfaces classées dans les postes 11 à 13 sur la

surface communale totale. Toutes les surfaces classées dans les postes 14 et 2 à 5 ont été exclues, étant considérées comme artificialisées mais végétalisées, ou non-artificialisées (Tableau 3). Ainsi, plus cet indicateur est élevé moins la commune dispose d'espaces végétalisés ou d'espaces bleus (eaux de surfaces visibles). Compte-tenu de la résolution spatiale initiale, les petites surfaces ne sont pas prises en compte et cet indicateur fourni une information beaucoup moins précise que les données du mode d'occupation des sols (MOS²) de L'Institut Paris Région, en particuliers dans les territoires très urbanisés.

Une cartographie des postes Corine Land Cover est disponible en Annexe 1.

I TABLEAU 3 I

Postes Corine Land Cover retenus dans le calcul de l'indicateur proportion de surface artificialisée et non végétalisée

Poste	Description	Statut
11	Zones urbanisées	Inclus
12	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communications	Inclus
13	Mines, décharges et chantiers	Inclus
14	Espaces verts artificialisés, non agricoles	Exclus
2	Territoires agricoles	Exclus
3	Forêt et milieux semi-naturels	Exclus
4	Zone humide	Exclus
5	Surface en eau	Exclus

2.6.2 Surface non-arborée

La surface non-arborée a été construite à partir des images satellites du programme Copernicus d'observation de la terre par satellite. Ce programme estime la densité de la canopée à une échelle spatiale de 20 m x 20 m, à partir d'images satellites à haute résolution (Sentinel 2 et Landsat 8) pour l'année 2015 (Copernicus 2015). Les données ont été agrégées à l'échelle de la commune pour calculer la proportion de surface de la commune sans présence d'arbre. Plus cet indicateur est élevé moins la commune est arborée (mais elle peut avoir d'autres types de végétation, ainsi que des espaces bleus).

Une cartographie de la couverture arborée à l'échelle infra-communale est disponible en Annexe 1.

2.6.3 Taux d'imperméabilisation

Le MOS de L'Institut Paris Région est un inventaire détaillé en 81 postes³ couvrant la région d'Île-de-France, fondé sur des analyses fines de photos aériennes ('MOS du ciel à la carte' 2013). Il fournit pour l'Île-de-France une information plus fine que Corine Land Cover ; en particulier, les petites surfaces qui ne sont pas visibles via Corine Land Cover le sont dans le MOS. De plus, il est utilisé comme outil d'aide à la décision pour les projets d'urbanisme en Île-de-France.

Les informations détaillées du MOS ont permis de calculer un taux d'imperméabilisation communal à partir des taux d'imperméabilisation moyens par poste MOS. 47 postes ont été utilisés pour ce calcul.

² Le MOS est une définition et production propre à L'Institut Paris Région, produit tous les 4/5 ans depuis 1987, et qui n'a pas d'équivalents avec ce niveau de précision ailleurs en France.

³ La nomenclature du MOS est consultable en ligne à l'adresse <https://www.institutparisregion.fr/index.php?id=1349>

Le taux d'imperméabilisation moyen sur la commune permet de qualifier globalement le contexte « minéral » d'une commune, mais il ne fournit pas, seul, d'information détaillée sur l'origine de cette imperméabilisation qui peut relever de zones d'habitat ou d'autres occupations des sols. Par exemple, une forte imperméabilisation peut être due à la présence de sites industriels ou d'infrastructures routières, sans que cela préjuge de la situation des quartiers résidentiels.

Une cartographie du taux d'imperméabilisation à l'échelle infra-communale est disponible en Annexe 1.

2.6.4 Part de la population vivant dans un îlot morphologique urbain à potentiel d'ICU nocturne moyen ou fort

L'Institut Paris Région a réalisé, pour l'année 2012, un travail d'identification des îlots morphologiques urbains (IMU) selon leur potentiel d'ICU, à partir d'une classification internationale des caractéristiques urbaines des îlots, les *local climate zone* (LCZ) (Cordeau 2017). La démarche, résumée ici, est largement détaillée dans les rapports de l'IAU (Cordeau 2017) (Cordeau 2016), et les données sont accessibles en ligne (https://cartoviz.iau-idf.fr/?id_appli=imu).

L'IMU est un référentiel géographique à très fine échelle (« pâté de maisons »), documentant plusieurs caractéristiques morphologiques des zones bâties et naturelles de la région (Cordeau 2016). L'IAU a défini la LCZ pour chacun des 259 844 IMU de la région. Chaque commune est composée de plusieurs dizaines d'IMU (de 22 à 996 selon la commune).

La classification LCZ a été développée pour proposer un référentiel pour l'analyse des ICU et du climat urbain, et harmoniser la recherche internationale sur ces sujets (Stewart and Oke 2012). Le principe est de documenter, à une échelle fine, plusieurs paramètres pouvant modifier le climat localement, puis, de classer les combinaisons possibles en 10 types de LCZ « bâtis » et 7 types de LCZ « naturels » (une typologie des LCZ est présentée en Annexe 1). À chacun de ces types est associée une gamme d'admittance (qui exprime une facilité de transfert énergétique), d'albédo (qui exprime le pouvoir réfléchissant), et de production de chaleur anthropique, qui va favoriser ou non la survenue d'un ICU. Des campagnes de mesures menées dans différentes villes du monde ont montré que, les nuits claires et calmes, on observait bien un gradient de température croissant allant des LCZ « naturels », vers les LCZ « bâtis ouverts » et « bâti compacts » (Stewart and Oke 2012).

À partir de la classification des IMU en LCZ, L'Institut Paris Région a noté le potentiel d'ICU nocturne et diurne de chaque IMU pour l'année 2012, en faisant des hypothèses sur le rôle des propriétés thermiques des différents paramètres documentés dans les LCZ. Il a été vérifié que cette approche par IMU/LCZ cartographiait correctement les gradients de température nocturne pendant la vague de chaleur d'août 2003 (Cordeau 2017). Ces travaux de l'IAU sur la chaleur urbaine permettent de qualifier les effets de chaleur urbaine en fonction des caractéristiques d'urbanisme au niveau local de l'îlot (« pâté de maisons »). Cette interprétation a été faite sur l'état d'occupation du sol 2012. Pour en obtenir un indicateur communal, le choix a été fait de travailler sur le pourcentage de population résidant dans un IMU avec un potentiel d'ICU nocturne moyen ou fort.

Pour pouvoir utiliser cette information sur la période 1990-2015, en prenant en compte d'éventuelles évolutions notables dans les caractéristiques de l'IMU, un indicateur dérivé a été calculé pour les années 1990, 1999 et 2008 en pondérant l'indicateur 2012 sur l'évolution du taux d'imperméabilisation, et l'évolution de l'habitat collectif. Ces deux variables permettent de prendre en compte le déséquilibre potentiel entre les sols bâtis/construits/revêtus et les sols à

caractère naturel et rafraîchissant, et les différences morphologiques des zones d'habitat (individuel vs collectif).

Une cartographie des zones à effets d'ICU à l'échelle infra-communale est disponible en Annexe 1.

2.7 Indice de défaveur sociale

L'indice de défaveur social, *French deprivation index* (Fdep), permet de caractériser le milieu socioéconomique dans lequel vivent les individus d'une aire géographique donnée. Il a été pris en compte dans l'analyse comme facteur de confusion.

Cet indice est fondé sur les données du recensement et prend en compte la dimension matérielle de la défaveur sociale (revenu fiscal médian, part des diplômés de niveau baccalauréat, part des ouvriers et part des chômeurs dans la population active) (Rey *et al.* 2009).

Le Fdep a été recueilli à l'échelle communale pour l'année 2009.

2.8 Analyses statistiques

2.8.1 Interaction entre vague de chaleur et caractéristiques urbaines

Cette première analyse explore l'influence possible de la caractéristique urbaine testée sur le lien entre une variable « vague de chaleur » et la mortalité. La variable vague de chaleur comprend trois classes : absence de vague de chaleur, vague de chaleur non extrême, vague de chaleur extrême.

La mortalité journalière communale (mortalité totale tous âges) est modélisée à l'aide d'un modèle linéaire généralisé avec une distribution poissonnienne en prenant en compte la surdispersion des données.

Le modèle inclut l'indice de défaveur sociale de la commune, la part de personnes âgées de 75 ans et plus, le jour de la semaine, les jours fériés, la saisonnalité et la tendance à long-terme, la température moyenne, et une interaction entre la variable vague de chaleur et la caractéristique urbaine étudiée. On concentre cette analyse sur un effet additionnel « vague de chaleur » qui viendrait renforcer la réponse de la mortalité à la température, et sur une influence de la caractéristique urbaine sur cet effet additionnel.

Dans ce modèle, la tendance à long terme et la saisonnalité de la mortalité sont modélisées à l'aide d'une *natural spline* du temps, avec 3 degrés de liberté par été.

L'association avec la température est modélisée à l'aide de modèles non-linéaires à retards distribués (Gasparrini *et al.* 2015). Ces modèles permettent de décrire des associations non-linéaires retardées en combinant deux fonctions définissant d'une part l'association dose-réponse et d'autre part l'association dans la dimension des retards. L'association dans la dimension des retards représente la variation temporelle du risque après une exposition spécifique et elle estime la distribution des effets immédiats et retardés sur l'ensemble de la période des retards. Plus précisément, dans notre étude, l'association dans la dimension des températures est modélisée à l'aide d'une *B-spline* quadratique avec deux nœuds internes placés aux percentiles 50 et 90 de la distribution des températures. Le choix du nombre et de la position des nœuds a été obtenu à l'aide du critère d'Akaike. L'association dans la dimension des retards est modélisée à l'aide d'une *natural spline* avec deux nœuds internes équidistants dans l'échelle log afin de permettre plus de flexibilité dans la première partie de la courbe des

retards où plus de variabilité est attendue. La période des retards étudiée est fixée à 10 jours. L'association température-mortalité est ensuite réduite à l'association cumulée, en cumulant les risques sur la période des retards.

La population de chaque commune était introduite dans le modèle en tant que « *offset* ».

2.8.2 Interaction entre la relation température-mortalité et les caractéristiques urbaines

Ce second modèle explore l'influence possible de la caractéristique urbaine étudiée sur toute la gamme des températures rencontrées pendant la période d'étude, sans cibler spécifiquement les vagues de chaleur.

Pour cette analyse, le modèle inclut l'indice de défaveur sociale de la commune, la part de personnes âgées de 75 ans et plus, le jour de la semaine, les jours fériés, la saisonnalité et la tendance à long-terme, la température moyenne, introduite comme un terme non-linéaire à retards distribués sur 10 jours, selon la même approche que précédemment (Gasparrini *et al.* 2015). Une interaction entre ce terme de température et la caractéristique urbaine est prise en compte. Les résultats présentés comparent les relations température-mortalité obtenues pour les communes représentant un faible niveau de la caractéristique urbaine étudiée (correspondant au percentile 5 de la distribution), et un niveau élevé (percentile 75 ou 95).

L'ensemble des analyses a été réalisé avec le logiciel R, et le package *dlnm* (Gasparrini 2011).

Enfin, en analyse de sensibilité, un modèle non linéaire à retards distribués avec une composante spatiale a aussi été considéré pour prendre en compte une éventuelle hétérogénéité spatiale résiduelle. L'effet aléatoire est modélisé à l'aide d'un modèle CAR (*conditional autoregressive model*). Pour cette analyse le package *mgcv* (et la fonction *gam*) de R a également été utilisé. Pour des raisons de temps de calcul très longs, cette analyse n'a été réalisée que pour la zone de Paris et la petite couronne.

Les résultats sont présentés séparément pour Paris et la petite couronne, et pour la grande couronne, et en annexe pour l'agglomération parisienne. Dans le corps du rapport, les RR sont présentés pour des percentiles calculés pour chaque zone d'étude ; les RR pour une étendue commune sont présentés en annexe.

3. RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques de la zone d'étude

3.1.1 Population et mortalité

La zone d'étude rassemblait 10 660 075 habitants en 1990, et 11 785 218 en 2015. L'accroissement démographique est plus marqué dans la Grande couronne : la population a été multipliée par 2 ou plus dans 23 communes de la zone (par plus de 10 dans 3 communes du 77). La part des 75 ans et plus est passée de 5,4% de la population à 6,5% de la population entre 1990 et 2015.

L'étude a porté sur les 1 918 100 décès enregistrés entre 1990 et 2015 dans la zone d'étude, dont 1 131 287 (59%) à Paris et dans la petite couronne. Le nombre de décès observé les mois d'été (de juin à septembre inclus) est de 601 643, dont 355 539 (59%) à Paris et dans la petite couronne (Tableau 4)(Paris et la petite couronne représentent également 59% de la mortalité régionale année entière).

3.1.2 Température moyenne estivale et vagues de chaleur

Les températures moyennes estivales enregistrées dans les stations utilisées pour chaque département sont très corrélées entre elles (Annexe 2). Elles sont globalement plus élevées à Paris et dans la petite couronne que dans la grande couronne, avec une étendue des températures moyennes observées allant respectivement de 10,1 à 32,5°C et de 8,5 à 29,7°C. Les percentiles élevés de la distribution des températures sur la période 1990-2015 sont plus élevés dans les départements les plus urbanisés (Tableau 5).

Entre 18 et 26 vagues de chaleur sont identifiées selon le département entre 1990 et 2015, correspondant à un total de 114 à 157 jours. Il s'agit majoritairement de vagues de chaleur « non extrêmes », seules 6 vagues de chaleur sont classées « extrêmes » (5 en 2003 et 1 en 1990) (Annexe 2).

I TABLEAU 4 I

Nombre et taux de décès par département pendant les étés 1990 à 2015

	Nombre total de décès 1990-2015 en été	Taux pour 100 000 habitants en 1990	Taux pour 100 000 habitants en 2015
75	131 146	293	190
77	65 900	220	207
78	67 721	194	184
91	57 636	191	196
92	82 424	258	191
93	71 616	216	183
94	70 353	241	192
95	54 847	202	188

I TABLEAU 5 I

Percentiles élevés des températures moyennes estivales entre 1990 et 2015

Département	P50	P75	P95	P99	P99.5
75, 93, 94, 92	19,5	22,0	25,6	27,9	29,1
91	18,9	21,4	24,8	27,2	28,2
95	18,7	21,0	24,7	27,2	28,1
77	18,4	20,7	24,0	26,4	27,3
78	18,2	20,6	24,2	26,6	27,9

3.1.3 Caractéristiques urbaines testées

Les quatre indicateurs considérés varient peu au cours du temps. Par exemple, les corrélations entre les données 1990, 2006 et 2012 de l'indicateur de surface artificialisée – non végétalisée sont de 0,99. Des corrélations supérieures à 0,99 sont également retrouvées pour le taux d'imperméabilisation 1990, 1999 et 2012. Aussi, par la suite, nous avons utilisé l'indicateur 2006 pour la surface non-végétalisée, et l'indicateur 2012 pour le taux d'imperméabilisation.

L'Annexe 3 détaille la corrélation entre les indicateurs. Les indicateurs surface artificialisée non végétalisée, surface non arborée et taux d'imperméabilisation sont bien corrélés à Paris et dans la petite couronne. Dans la grande couronne, la surface artificialisée non végétalisée et le taux d'imperméabilisation sont bien corrélés. On peut par contre avoir des communes peu artificialisées et végétalisées mais avec très peu d'arbres. La part de la population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU moyen ou fort est bien corrélée au taux d'imperméabilisation, et moins aux autres indicateurs.

Les tableaux et figures ci-dessous décrivent les quatre indicateurs (Tableau 6, Figure 4 à 7). Les communes les moins végétalisées, les moins arborées et les plus imperméabilisées sont concentrées sur la zone de Paris et de la petite couronne. Les parts de la population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU moyen ou fort les plus élevées sont centrées sur les arrondissements parisiens.

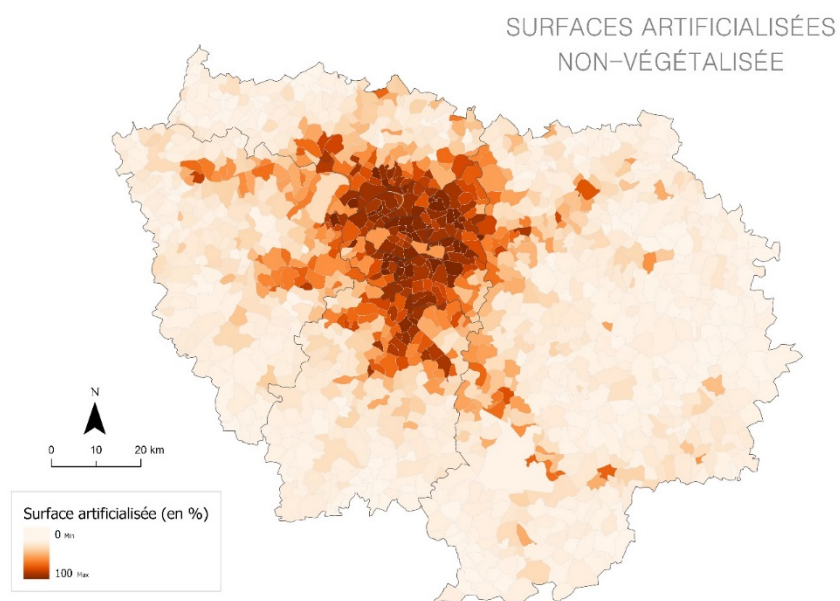
I TABLEAU 6 I

Distribution des caractéristiques étudiées

		Min	P25	P50	Moyenne	P75	P95	Max
Mortalité journalière en été	Paris et petite couronne (143 communes)	0	0	0	0,8	1	3	34
	Grande couronne (1 157 communes)	0	0	0	0,07	0	1	13
Part des personnes de 75 ans et plus	Paris et petite couronne (143 communes)	0,52	3,95	5,38	5,52	7,11	9,01	10,63
	Grande couronne (1 157 communes)	0	2,90	4,60	5,16	6,60	11,14	46,15
Fdep 2009	Paris et petite couronne (143 communes)	- 3,85	- 1,94	- 0,97	-0,95	0,12	1,25	1,94
	Grande couronne (1 157 communes)	- 3,85	- 1,44	- 0,90	-0,91	- 0,31	0,54	1,78
Surface artificielle 2006	Paris et petite couronne (143 communes)	0,18	0,76	0,90	0,83	0,97	1	1
	Grande couronne (1 157 communes)	0	0,04	0,09	0,19	0,26	0,73	1
Couverture non arborée (2015)	Paris et petite couronne (143 communes)	0,36	0,80	0,89	0,85	0,93	0,97	1
	Grande couronne (1 157 communes)	0,23	0,69	0,81	0,78	0,90	0,98	1
Taux d'imperméab. 2012	Paris et petite couronne (143 communes)	0,13	0,38	0,50	0,48	0,59	0,67	0,76
	Grande couronne (1 157 communes)	0,05	0,06	0,08	0,13	0,15	0,36	0,53
Part de la population 2012 IMU nocturne moyen/fort	Paris et petite couronne (143 communes)	0	0,34	0,60	0,59	0,91	1	1
	Grande couronne (1 157 communes)	0	0	0	0,05	0,03	0,29	0,78

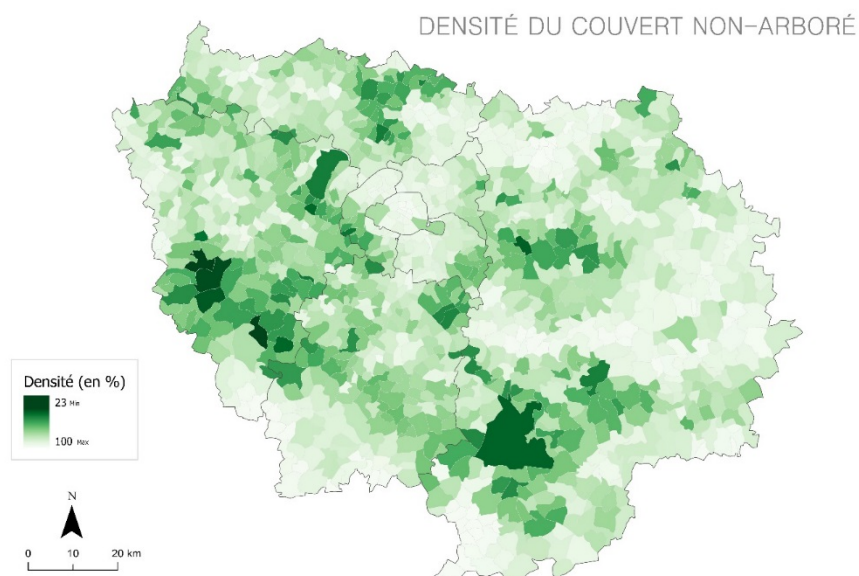
I FIGURE 4 I

Surface artificialisée non-végétalisée



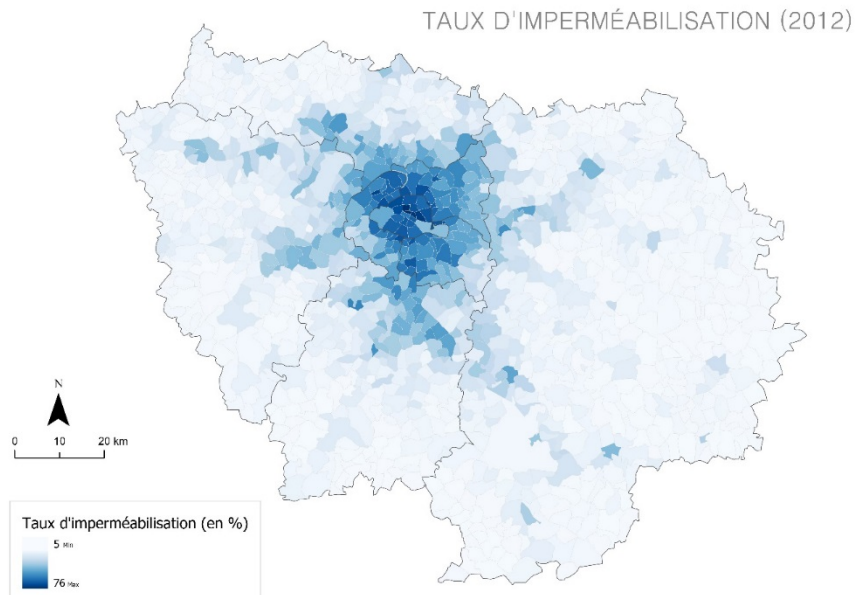
I FIGURE 5 I

Couvert non arboré



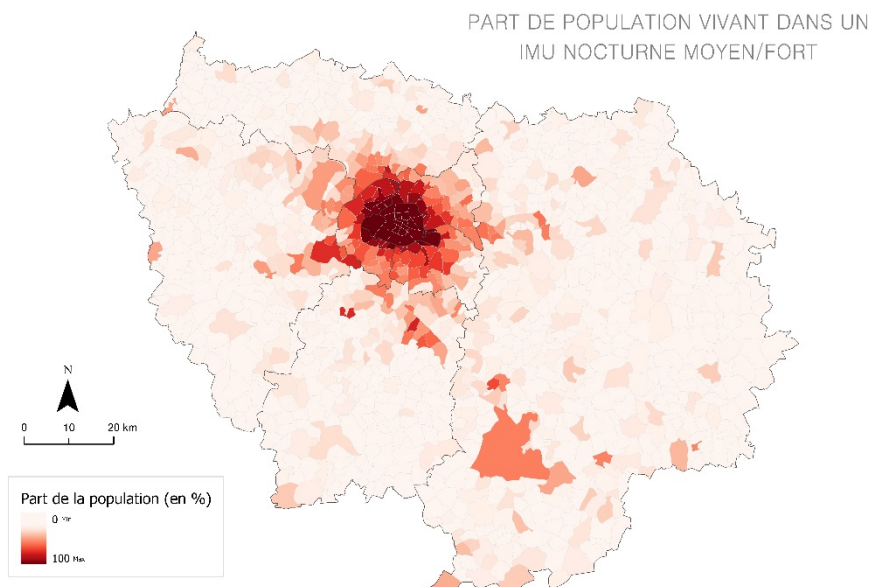
I FIGURE 6 I

Taux d'imperméabilisation 2012



I FIGURE 7 I

Part de population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen ou fort

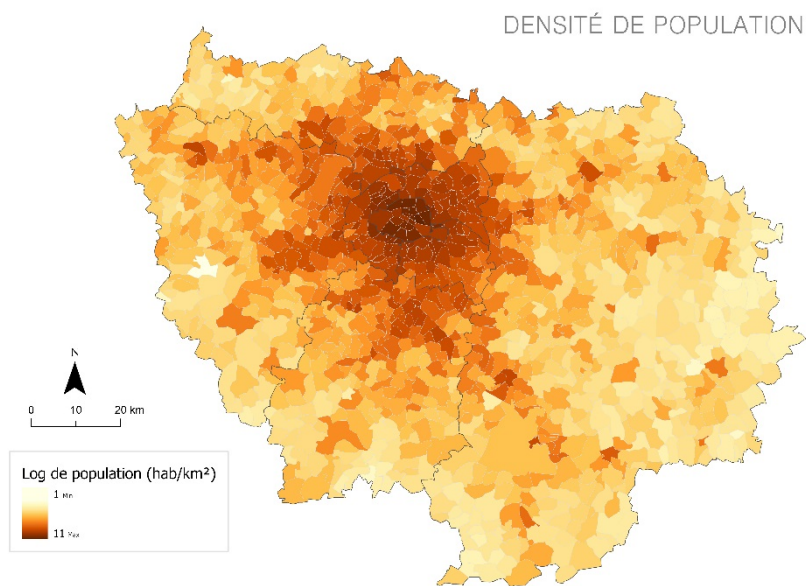


3.1.4 Caractéristiques sociodémographiques

Les quatre indicateurs testés sont très liés à la densité de population (Figure 8). La distribution géographique de l'indice de défaveur social et de la part de personnes âgées de 75 ans et plus est moins contrastée, même si les arrondissements parisiens ont un Fdep plus bas (i.e. présentent une population plus favorisée) (Figure 9 et 10).

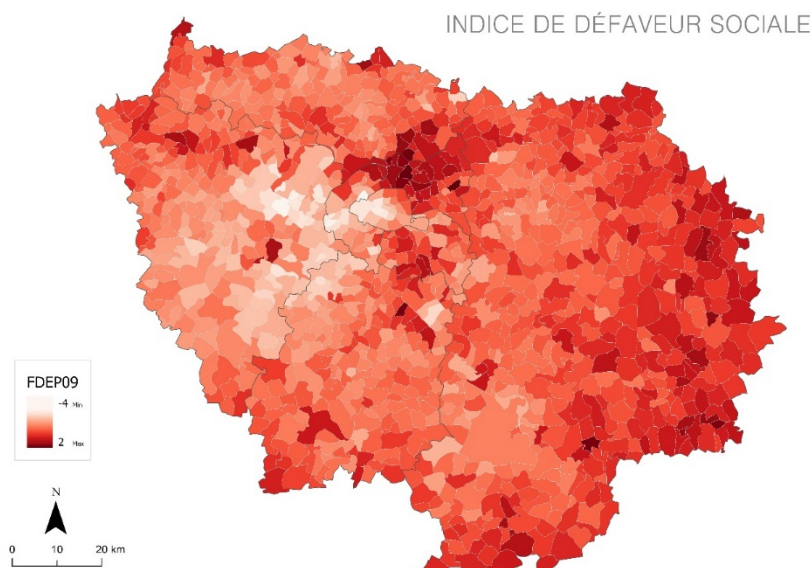
I FIGURE 8 I

Densité de population



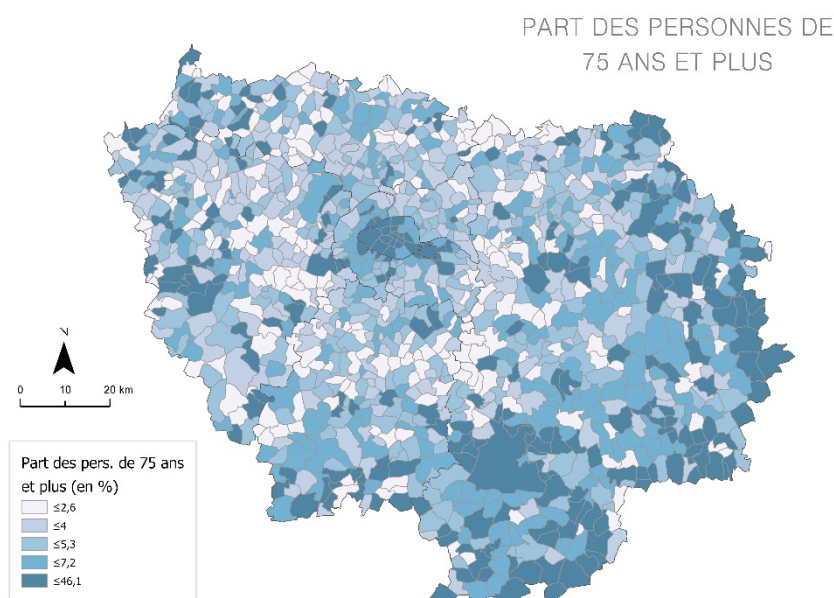
I FIGURE 9 I

Indice de défaveur social



I FIGURE 10 I

Part de la population de 75 ans et plus



3.2 Interaction entre vague de chaleur, caractéristiques urbaines et mortalité

Pour chaque indicateur, les résultats sont exprimés sous la forme de risque de décès lié à un effet additionnel de la vague de chaleur dans une commune présentant un indicateur élevé (percentile 75) ou très élevé (percentile 95), par rapport à une commune présentant un indicateur faible (percentile 5). Les valeurs de ces percentiles pour chacun des indicateurs sont indiquées dans le Tableau 7.

Les caractéristiques urbaines étudiées ne modifient pas le risque de décès lié à un éventuel effet vague de chaleur pendant les vagues de chaleur non extrême (Tableau 8).

Le risque de décès pendant les vagues de chaleur extrême augmente avec la valeur des indicateurs testés, quel que soit l'indicateur considéré à Paris et dans la petite couronne. Par exemple, le risque de décès pendant une vague de chaleur extrême est de 1,94 [1,82 ; 2,06] pour une commune avec 97% de surface artificialisée non végétalisée alors que le risque est de 1,56 [1,39 ; 1,76] pour une commune avec 37% de surface artificialisée non végétalisée (Tableau 8).

Ces effets sont plus faibles dans les communes de grande couronne : on observe une influence des indicateurs surface artificialisée non végétalisée et taux d'imperméabilisation sur le risque de décès pendant une vague de chaleur extrême (Tableau 8). L'indicateur couverture non-arborée n'a par contre pas d'influence.

À noter que dans le Tableau 8 les résultats sont exprimés pour des percentiles calculés séparément pour Paris et la petite couronne et la grande couronne. Les résultats présentés pour des percentiles correspondant à la distribution commune sur toute l'Île-de-France sont présentés en Annexe 5. Ainsi, le RR associé à une vague de chaleur extrême passe de 1,56 [1,39 ; 1,76] à 1,77 [1,65 ; 1,89] quand la surface artificialisée non végétalisée augmente de

37 à 73% dans une commune de Paris et la petite couronne. Dans une commune de la grande couronne, il passe de 1,37 [1,27 ; 1,47] à 1,49 [1,38 ; 1,60].

Enfin, en analyse de sensibilité, un modèle avec une composante spatiale a été considéré. Les résultats présentés en Annexe 6 sont très proches de ceux obtenus sans composante spatiale.

I TABLEAU 7 I

Percentiles utilisés pour l'expression des risques relatifs

	Percentile	Paris et Petite couronne	Grande couronne
Surface artificialisée non-végétalisée	5	37	0
	75	97	26
	95	100	73
Couverture non arborée	5	60	49
	75	93	90
	95	97	98
Taux d'imperméabilisation	5	21	6
	75	59	15
	95	67	36
Part de la population vivant dans un IMU moyen à fort	5	2	0
	75	92	3
	95	100	29

I TABLEAU 8 I

Modification du risque de décès pendant les vagues de chaleur selon la caractéristique urbaine testée

	Paris et petite couronne		Grande couronne	
	RR vague de chaleur non extrême	RR vague de chaleur extrême	RR vague de chaleur non extrême	RR vague de chaleur extrême
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 5	1,03 [0,98 ; 1,08]	1,56 [1,39 ; 1,76]	0,98 [0,94 ; 1,02]	1,25 [1,13 ; 1,38]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 75	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,92 [1,80 ; 2,04]	0,97 [0,95 ; 1,01]	1,33 [1,23 ; 1,44]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 95	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,94 [1,82 ; 2,06]	0,96 [0,93 ; 0,99]	1,49 [1,38 ; 1,60]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 5	1,04 [0,99 ; 1,09]	1,60 [1,44 ; 1,78]	0,96 [0,92 ; 1,01]	1,56 [1,40 ; 1,73]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 75	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,90 [1,79 ; 2,02]	0,98 [0,95 ; 1,02]	1,42 [1,31 ; 1,54]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 95	1,00 [0,98 ; 1,03]	1,94 [1,82 ; 2,07]	0,99 [0,95 ; 1,03]	1,39 [1,27 ; 1,53]
RR pour un taux d'imperméabilisation correspondant au percentile 5	1,05 [1,00 ; 1,10]	1,72 [1,55 ; 1,90]	0,97 [0,93 ; 1,01]	1,29 [1,17 ; 1,42]
RR pour un taux d'imperméabilisation au percentile 75	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,88 [1,77 ; 2,00]	0,97 [0,94 ; 1,00]	1,34 [1,24 ; 1,45]
RR pour un taux d'imperméabilisation au percentile 95	1,00 [0,97 ; 1,02]	1,92 [1,79 ; 2,06]	0,96 [0,934 ; 0,99]	1,47 [1,36 ; 1,58]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 5	1,05 [1,00 ; 1,10]	1,71 [1,54 ; 1,89]	0,96 [0,92 ; 0,99]	1,37 [1,26 ; 1,49]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 75	1,00 [0,98 ; 1,03]	1,89 [1,78 ; 2,01]	0,96 [0,93 ; 0,99]	1,38 [1,28 ; 1,49]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 95	1,00 [0,97 ; 1,03]	1,91 [1,79 ; 2,03]	0,97 [0,95 ; 1,00]	1,44 [1,34 ; 1,55]

3.3 Interactions entre la relation température-mortalité et caractéristiques urbaines

Pour ce modèle, les résultats sont exprimés sous la forme d'un risque relatif de décès cumulé sur les 0-10 jours suivant l'exposition à une température donnée par rapport à une température moyenne. Les Figure 11 et 12 illustrent les RR associés aux températures estivales dans des communes très et peu arborées de Paris et la Petite couronne, et de la Grande couronne. A Paris et Petite couronne, l'effet des températures modérées est le même dans les communes

peu arborées (97% de couvert non arboré) et très arborées (60% de couvert non arboré). Au-delà de 30°C, l'augmentation du RR avec la température est plus élevée dans les communes peu arborées. Dans la Grande couronne, on n'observe pas d'influence de cet indicateur sur la relation température-mortalité.

Les courbes similaires pour les autres indicateurs sont présentées en Annexe 4. On retrouve un profil identique pour tous les indicateurs, i.e. une influence à partir des températures extrêmes, plus marquée à Paris et dans la Petite couronne.

Le Tableau 9 résume les RR associés à des températures élevées (percentile 95 de la distribution des températures) et extrêmes (percentile 99 de la distribution des températures). Ces RR sont estimés pour différentes valeurs des indicateurs urbains testés, correspondant aux percentiles 5, 75 et 95 détaillés dans le Tableau 7.

À Paris et dans la Petite couronne, seuls les indicateurs avec une notion explicite de végétalisation (surfaces artificielles non-végétalisées et couverture non arborée) influencent le risque de décès associé à une température au percentile 95. Par exemple, le RR associé à cette température est environ 7% plus élevé dans les communes plus artificialisées ou moins arborées que dans les communes peu artificialisées ou très arborées (pour le couvert non arboré, RR 1,66 [1,56 ; 1,76] au percentile 5 vs 1,78 [1,74 ; 1,82] au percentile 75). Au percentile 99, tous les indicateurs testés influencent le RR de décès, avec des RR retrouvés beaucoup plus faibles dans les communes peu artificialisées, très arborées, ou peu imperméabilisées. Par exemple, le RR est environ 18% plus élevé dans les communes moins arborées (pour le couvert non arboré, RR 2,17 [1,98 ; 2,38] au percentile 5 vs 2,53 [2,44 ; 2,62] au percentile 75). Dans tous les cas, il y a peu de différences entre les RR retrouvés pour un indicateur très fort (au percentile 95) ou fort (au percentile 75) (Tableau 9).

Dans la Grande couronne, l'indicateur de surface non arborée ne joue pas sur le RR de décès. Pour les autres indicateurs, on observe de nouveau un risque plus élevé dans les communes moins végétalisées et plus imperméabilisées, en particulier pour les communes avec des valeurs très fortes d'indicateurs (au percentile 95) (Tableau 9). Par exemple, pour une température au percentile 99, le risque de décès est 17 % plus élevé dans les communes plus imperméabilisées (RR 1,91 [1,75 ; 2,09] au percentile 5 vs 2,23 [2,10 ; 2,36] au percentile 95).

Les résultats présentés pour des percentiles correspondant à la distribution commune sur toute l'Île-de-France sont présentés en Annexe 5. Ils illustrent les mêmes tendances que pour des étendues par zone. Par exemple, à Paris et la petite couronne, le RR associé à une température correspondant au percentile 99 de la distribution des températures moyennes est de 2,17 [1,98 ; 2,38] pour une commune présentant 60% de surface non-arborée, et de 2,57 [2,47 ; 2,68] pour une commune présentant 97% de surface non-arborée. En grande couronne, ces RR sont respectivement de 1,99 [1,87 ; 2,11] et 1,94 [1,80 ; 2,10].

Les résultats du modèle avec composante spatiale, présentés en Annexe 6, sont très proches de ceux obtenus sans composante spatiale.

Enfin, l'Annexe 7 présente les résultats estimés pour une zone d'étude correspondant à l'agglomération parisienne, qui regroupe des communes de Paris et de la petite couronne avec quelques communes de Grande couronne. Les résultats vont dans le sens de ceux observés à Paris et la petite couronne, avec des RR légèrement plus faibles.

I TABLEAU 9 I

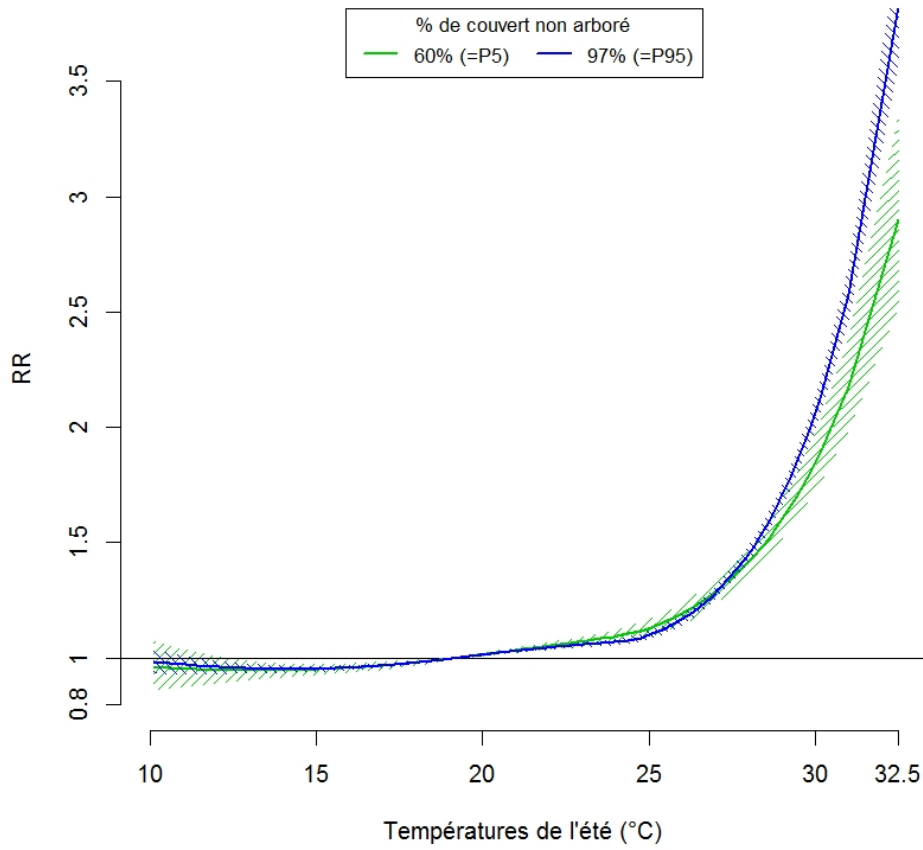
RR associé à différentes températures et caractéristiques urbaines⁴

	Paris et Petite couronne		Grande couronne	
	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 29,3°C (P95)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 31,0°C (P99)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 27,7°C (P95)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 29,5°C (P99)
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 5	1,66 [1,56 : 1,76]	2,18 [1,97 : 2,41]	1,48 [1,41 : 1,56]	1,88 [1,71 : 2,06]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 75	1,78 [1,74 : 1,82]	2,53 [2,44 : 2,63]	1,53 [1,48 : 1,58]	2,00 [1,88 : 2,13]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 95	1,79 [1,75 : 1,83]	2,55 [2,45 : 2,65]	1,62 [1,57 : 1,68]	2,24 [2,11 : 2,38]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 5	1,66 [1,57 : 1,76]	2,17 [1,98 : 2,38]	1,51 [1,44 : 1,59]	2,00 [1,83 : 2,18]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 75	1,78 [1,74 : 1,82]	2,53 [2,44 : 2,62]	1,52 [1,47 : 1,57]	1,95 [1,83 : 2,08]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 95	1,79 [1,75 : 1,84]	2,57 [2,47 : 2,68]	1,52 [1,45 : 1,59]	1,94 [1,79 : 2,10]
RR pour un taux d'imperméabilisation correspondant au percentile 5	1,75 [1,66 : 1,84]	2,35 [2,16 : 2,56]	1,49 [1,43 : 1,57]	1,91 [1,75 : 2,09]
RR pour un taux d'imperméabilisation au percentile 75	1,76 [1,73 : 1,80]	2,49 [2,41 : 2,58]	1,53 [1,48 : 1,58]	2,01 [1,89 : 2,14]
RR pour un taux d'imperméabilisation au percentile 95	1,77 [1,72 : 1,82]	2,52 [2,41 : 2,64]	1,62 [1,57 : 1,67]	2,23 [2,10 : 2,36]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 5	1,72 [1,64 : 1,81]	2,28 [2,10 : 2,48]	1,53 [1,48 : 1,59]	2,03 [1,90 : 2,17]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 75	1,77 [1,73 : 1,81]	2,52 [2,43 : 2,61]	1,54 [1,49 : 1,59]	2,04 [1,92 : 2,17]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 95	1,78 [1,73 : 1,82]	2,54 [2,44 : 2,64]	1,60 [1,55 : 1,64]	2,17 [2,06 : 2,29]
RR moyen sur toutes les communes	1,76 [1,73 : 1,80]	2,47 [2,39 : 2,55]	1,57 [1,53 : 1,62]	2,12 [2,02 : 2,22]

⁴ Les RR sont exprimé par rapport à la température moyenne de la distribution ; 19,2°C pour Paris et la petite couronne, 18,2°C pour la grande couronne.

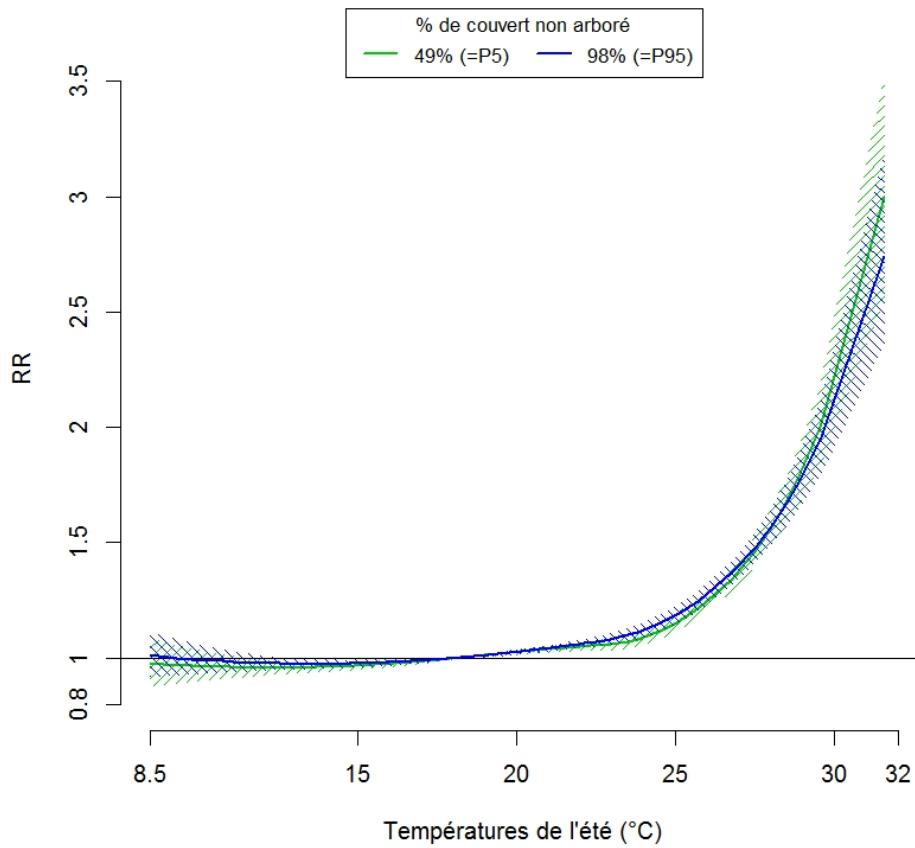
I FIGURE 11 I

Relations température-mortalité dans les communes peu et très arborées – Effet cumulé sur 10 jours – Paris et petite couronne



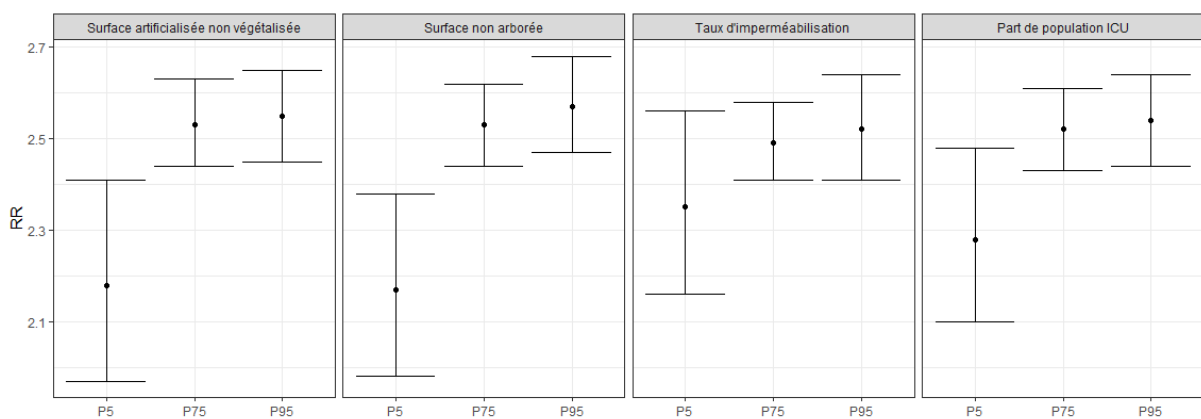
I FIGURE 12 I

Relations température-mortalité dans les communes peu et très arborées – Effet cumulé sur 10 jours – Grande couronne



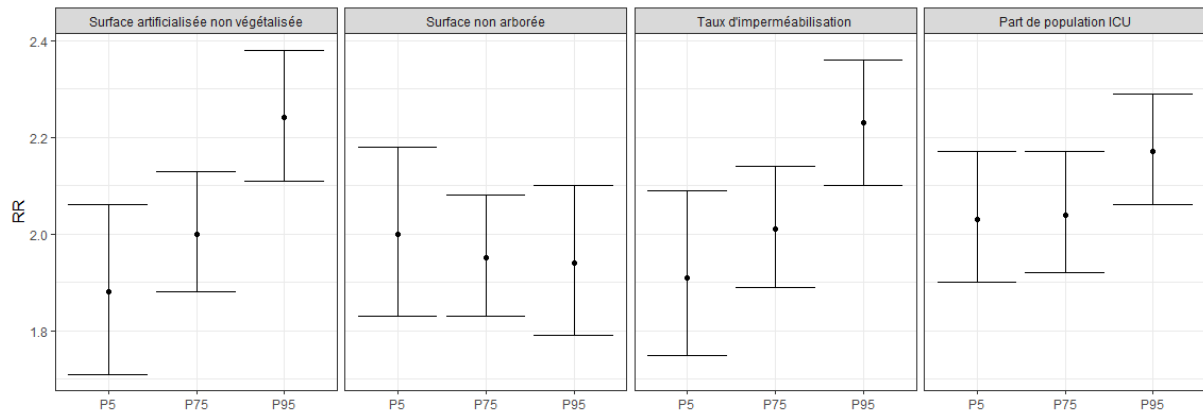
I Figure 13 I

RR de décès pour une température au percentile 99 comparativement au P50 pour les communes de Paris et de la petite couronne



I FIGURE 14 I

RR de décès pour une température au percentile 99 comparativement au P50 pour les communes de la grande couronne



4. DISCUSSION

4.1 Synthèse et mise en perspective des résultats

Cette étude quantifie une réduction du risque de décès lié aux très fortes chaleurs dans les communes présentant des caractéristiques non propices à la formation d'ICU. L'analyse a pris en compte les biais possibles liés à la population, soit la part des personnes âgées et la défaveur sociale. La pollution de l'air n'a pas été prise en compte, par manque de données représentatives de l'ensemble de la zone pour toute la période d'étude. Elle peut contribuer à une augmentation du risque associé à la température. Une étude sur les arrondissements parisiens avait conclu à un risque de décès plus élevé pendant les vagues de chaleur dans les zones présentant des concentrations plus élevées de particules fines (Benmarhnia *et al.* 2017). Ainsi, il est possible qu'une partie des effets retrouvés ici reflètent un effet de la pollution de l'air (*a priori* les zones moins artificialisées et plus végétalisées sont associées à une pollution de l'air plus faible en moyenne annuelle).

Une des limites de cette étude est de n'avoir pu utiliser qu'une station de référence météorologique par département, ce qui conduit à lisser les différences infra-départementales d'exposition. Une analyse précédente testant différentes manières d'utiliser l'information d'un plus grand nombre de stations météorologiques pour Paris et la petite couronne dans les modèles épidémiologiques avait conclu à des résultats très similaires en utilisant une ou plusieurs stations. La raison en est vraisemblablement que l'implantation des stations météorologiques répond à des critères stricts pour assurer la validité des données pour la modélisation météorologique, aboutissant à une grande homogénéité de la mesure (Schaeffer *et al.* 2016). Pour améliorer les analyses épidémiologiques, il faudrait pouvoir disposer de mesures de températures réalisées avec comme premier objectif la caractérisation de l'exposition de la population.

Les résultats indiquent que l'ensemble des indicateurs testés influencent la relation température – mortalité à partir de températures relativement élevées, mais ne jouent pas sur la réponse à des températures estivales plus usuelles. De même, ils réduisent l'effet additionnel « vague de chaleur » pendant les vagues de chaleur extrême, mais pas pendant les autres vagues de chaleur (qui ne se traduisent pas forcément par un effet additionnel par rapport à l'effet de la température seule, i.e. ne prenant pas en compte la notion de durée liée à la vague de chaleur).

Les résultats retrouvés sont cohérents avec ceux rapportés par une revue récente de la littérature réalisée par Schinasi *et al.* ; le risque de décès associé à une température « chaude » par rapport à une température « froide » est 5% plus élevé dans les zones moins végétalisées (méta-analyse réalisée à partir de 6 articles, avec des approches très variées pour modéliser l'influence de la température, et pour définir le degré de végétalisation des zones considérées)(Schinasi, Benmarhnia, and De Roos 2018). A Paris, pendant les vagues de chaleur définies par les critères du plan national canicule (plus intenses que la définition utilisée dans cette étude), le risque de décès était plus faible dans les communes plus végétalisées (Benmarhnia *et al.* 2017). A Lisbonne, l'influence de la végétation (définie par un indicateur de télédétection (NDVI)) sur le risque de décès des personnes de 65 ans et plus en lien avec la chaleur est plus importante aux très fortes températures. Par exemple, chaque degré au-dessus du percentile 99 de l'indicateur de température testé (UTCI) est associée à un RR de 1,15 [1,12 :1,18] dans les zones avec un NDVI faible (1^{er} quartile), vs 1,05 [1,04 :1,06] dans les zones avec un NDVI moyen (3^e quartile). Pour une température au percentile 95, ces RR sont respectivement de 1,04 [1,03 :1,05] et 1,02 [1,02 :1,03] (Burkart *et al.* 2016). A Séoul, le RR associé à une augmentation de 1°C au-dessus du percentile 90 est également plus élevé dans les communes avec un NDVI faible (RR 1,04 [1,02 :1,06] dans les zones peu végétalisées, vs 1,02 [0,95 :1,05] dans les zones très végétalisées) (Son *et al.*

2016). A Barcelone, la présence d'arbre dans un rayon de 500 m autour du lieu de résidence ne modifie pas les risques de décès pendant les vagues de chaleur. Un indicateur de « perception » de présence de végétation issu d'un questionnaire de recensement est par contre associé à une augmentation du risque, i.e. un RR plus élevé pendant les vagues de chaleur dans les communes où un nombre plus important d'habitants déclarent une absence de végétation (RR 1,60 [1,35 :1,89] avec plus de 66% d'habitants percevant un manque de végétation, vs 1,16 [0,98 :1,36] avec moins de 14% d'habitants percevant un manque de végétation (Xu *et al.* 2013). Aux Etats-Unis (Michigan), un risque de décès cardiovasculaire des personnes âgées de 65 ans et plus lié à la chaleur intense est retrouvé plus élevé dans les communes moins végétalisées (surface de la commune à partir de l'occupation des sols)(RR 1,17 [1,06 : 1,29] dans une commune non végétalisée à 91% vs 0,98 [0,89 :1,07] dans une commune non végétalisée à 39%) (Gronlund *et al.* 2015).

L'étude sur Lisbonne retrouve un bénéfice en passant d'une végétalisation faible à moyenne (du 1^{er} au 2^e quartile), mais pas d'une végétation moyenne à importante, suggérant qu'une petite augmentation de la surface végétalisée peut se traduire par un bénéfice important (Burkart *et al.* 2016). Une tendance similaire est suggérée à Barcelone, avec un bénéfice important de passer de plus de 66% de population percevant un manque de végétation à 50-66% de population, puis peu de différence à des proportions plus faibles (Xu *et al.* 2013). Cet effet n'est pas si clair dans nos résultats sur Paris et la petite couronne, où il y a peu de différences de risque entre les communes très artificialisées et fortement artificialisées par exemple.

Il faut cependant noter que toutes ces études utilisent des indicateurs construits relativement à au degré de végétalisation de chaque ville. La comparaison entre villes est donc délicate, puisqu'une zone classée comme peu végétalisée à partir de la distribution d'une ville donnée pourrait être considérée comme très végétalisée par rapport à la distribution d'une autre ville.

Il n'a pas été retrouvé d'études examinant un indicateur comparable à la part de population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU moyen ou fort, ou le taux d'imperméabilisation seul.

Aucun des indicateurs testés dans cette étude ne constitue une mesure directe de la température ni de l'ICU. De plus, s'agissant d'une étude écologique, il n'a pas été possible de prendre en compte dans cette analyse certains facteurs individuels susceptibles d'influencer le risque de décès liés aux fortes chaleurs. En particulier, l'exposition à l'intérieur des logements, et l'équipement en climatisation n'a pas pu être évalué dans cette étude alors qu'ils sont peut-être corrélés à certains des indicateurs testés, et à la défaveur sociale. Ces indicateurs étant définis au niveau communal, ils peuvent représenter un effet propre et/ou des caractéristiques sociales différentes entre les communes.

4.2 Intérêt pour la santé publique

Les résultats obtenus indiquent que des caractéristiques urbaines contribuant à l'ICU sont associées à des risques plus élevés de décès aux très fortes chaleurs. Ils confirment que des interventions sur ces caractéristiques pourraient réduire l'impact sur la mortalité de la chaleur intense et des vagues de chaleur extrême, en particulier dans les communes de Paris et de la petite couronne.

Bien que les différences de RR soient de l'ordre de 5-10% entre les communes avec un niveau élevés et faibles d'une caractéristique urbaine favorisant l'ICU, les répercussions sont importantes. Par exemple, si la causalité des indicateurs étudiés ici était établie, on estimerait à 884 [491 :1236] décès dus aux vagues de chaleur extrêmes, évitables si toutes les communes de Paris et la petite couronne avaient une surface non-artificialisée non-

végétalisée de 37% au maximum⁵. Ceci représenterait 19% de la mortalité observée pendant ces vagues de chaleur extrêmes. À titre d'illustration, des communes ayant une surface non-artificialisée non-végétalisée inférieure ou égale à 37% sont Ville-d'Avray (92 077 ; 3 136 habitants par km²), Boissy-Saint-Léger (94 004 ; 1 769 habitants au km²) ou Coubron (93 015 ; 1 162 habitants par km²) par exemple.

Le bénéfice sanitaire serait également notable pour une intervention moins ambitieuse ; il serait de 15 décès évités [8 :22] si toutes les communes avec une surface non-artificialisée non végétalisée supérieure à 97% atteignaient cette valeur de 97%.

Les bénéfices sont plus faibles mais toutefois présents dans les communes de la grande couronne ; si toutes les communes y atteignaient une proportion de surface non-artificialisée non végétalisée de 26% au maximum, 155 décès [11 :308] seraient évités pendant les vagues de chaleur extrême, soit 6,6% de la mortalité observée pendant ces événements. Ces résultats donnent un ordre de grandeur de l'intérêt sanitaire d'agir sur ces composantes urbaines. Par ailleurs, cet ordre de grandeur représente uniquement le gain espéré pendant les périodes de vagues de chaleur, et ne prend pas en compte les bénéfices qui pourraient être observés tout au long de l'été.

De plus, les analyses se sont concentrées sur la mortalité, qui ne représente qu'une petite partie des impacts de la chaleur sur la santé (Figure 16), et qui va être conditionnée par un ensemble de facteurs individuels et sociaux (préexistence d'une pathologie chronique, facilité d'accès aux soins, entourage...). La chaleur se traduit également par une augmentation du recours aux soins d'urgences pour diverses causes (Atiki 2019; Laaidi *et al.* 2015), tant chez les adultes que les enfants (Xu *et al.* 2014). Des travaux mettent également en évidence des effets sur la santé mentale et la capacité cognitive (Lohmus 2018) ou sur l'issue de la grossesse (Kuehn and McCormick 2017). On peut faire l'hypothèse que les différences de risques retrouvées sur la mortalité seraient également retrouvées pour le recours aux soins et la morbidité, potentiellement dans des ordres de grandeurs plus importants. Par exemple, à Toronto, le nombre d'appels aux urgences pour une cause liée à la chaleur est près de 15 fois plus important dans les quartiers avec très peu d'arbres (moins de 5% de couvert arboré) que dans les quartiers très arborés (>70% de couvert arboré) (Graham *et al.* 2016). Le bénéfice d'intervention sur les caractéristiques urbaines est donc plus large que le seul impact sur la mortalité.

Il faut également noter que les indicateurs testés dans cette étude étant moyennés à l'échelle de la commune, ils donnent une indication globale, et sous-estiment probablement les bénéfices obtenus à une échelle plus fine. Ils ne permettent pas non plus de déduire, quelle est, à l'échelle fine, l'action la plus intéressante dans chaque quartier. L'indicateur moyen de surface non-arborée ne prend pas en compte le type d'essence d'arbre, ou leur accessibilité, ni les méthodes de gestion des espaces verts. Il ne prend pas non plus en compte les autres surfaces naturelles de pleine terre à couvert végétal (agricole, herbacé, arbustive), leur réserve et disponibilité en eau en période d'été. Par exemple, à Paris et la petite couronne, on retrouve un bénéfice associé à la présence des arbres aux très fortes températures, *a priori* pendant des périodes où la sécheresse limite l'évapotranspiration. L'influence positive des arbres dépend alors majoritairement de l'ombre et de la réduction du rayonnement solaire. Il a par ailleurs été montré que l'ombre était très efficace pour réduire le budget énergétique théorique d'une personne réalisant une activité physique modérée à intense (marche, vélo) ; les effets de l'évapotranspiration sont insuffisants pour réduire ce budget en l'absence d'ombre (Vanos *et al.*). A l'avenir, des approches visant à arroser davantage les espaces verts pendant les très fortes chaleurs pourraient augmenter ce rôle de l'évapotranspiration, et conduire à un gain

⁵ Cette estimation est faite en comparant le nombre de décès attribuables aux vagues de chaleur obtenus en appliquant le modèle à la situation actuelle (utilisant les valeurs observées dans chaque commune), et à une situation théorique où une valeur idéale est appliquée uniformément à toutes les communes, toutes choses (population, défaveur social, taux de mortalité) égales par ailleurs.

sanitaire encore plus positif. Plusieurs travaux de recherche permettent d'éclairer les stratégies de végétalisation et les besoins d'arrosage pour augmenter l'efficacité de l'évapotranspiration (Cordeau 2014; de Munck 2013).

De plus, la végétalisation des villes est *a priori* associée à des effets sanitaires plus larges que la seule réduction de l'ICU. Elle permet également sous certaines conditions d'améliorer la qualité de l'air, ou de promouvoir l'activité physique (Pascal 2019). Plusieurs revues de la littérature établissent des liens positifs entre l'accès à des espaces verts et la santé (santé mentale, morbidité, mortalité), y compris en diminuant les inégalités sociales de santé (Beaudoin 2017; OMS 2016). La Figure 15 schématise l'ensemble des mécanismes via lesquels la végétation peut contribuer à l'adaptation au changement climatique.

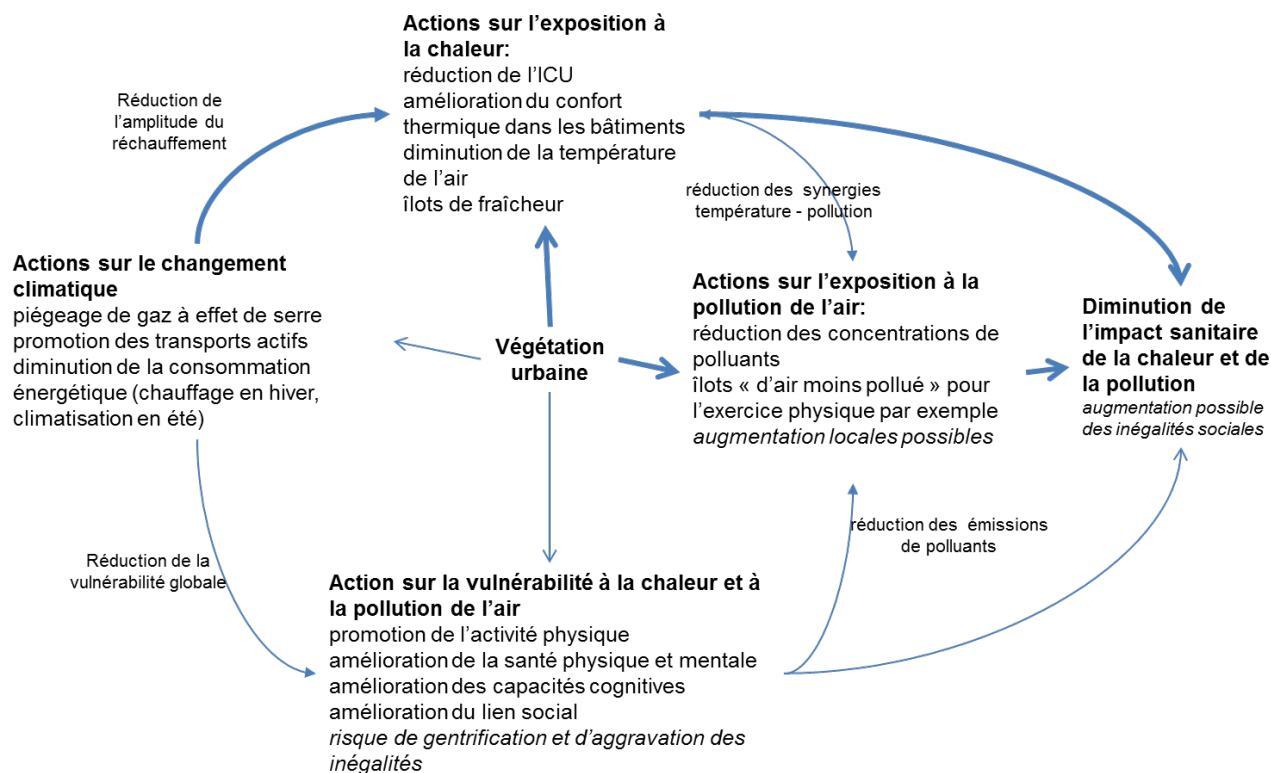
Parmi les autres indicateurs testés, un taux d'imperméabilisation des sols faible va également avoir un effet positif propre ; en contribuant à la gestion du ruissellement urbain et des risques associés. Quant à la réduction des IMU à fort potentiel d'ICU elle pourrait permettre de réduire la consommation énergétique pendant l'été, en limitant les besoins en climatisation. En effet, si la climatisation permet de réduire ponctuellement le risque individuel, elle augmente le risque collectif, d'une part en augmentant immédiatement la température de l'air extérieur, et d'autre part en contribuant à la hausse des émissions de gaz à effet de serre et au changement climatique. Il s'agit donc, compte-tenu des technologies actuelles, d'une mesure de prévention associée à des fortes inégalités (d'une part entre les personnes pouvant en bénéficier ou non, et d'autre part entre la génération actuelle et les générations futures).

Enfin, d'autres facteurs pouvant avoir un effet positif sur la santé via leur action sur l'ICU et via une action plus large n'ont pas été directement testés dans cette étude. Il s'agit en particulier des espaces bleus, dont les effets bénéfiques sur la santé et le bien-être sont documentés (Völker and Kistemann 2011). De même, le trafic automobile et les revêtements des voies de circulation qui contribuent à l'ICU ont également des effets importants sur la santé via leur action sur la pollution de l'air (Perez *et al.* 2013), le bruit, et la sédentarité.

Du point de vue de la santé publique, il y a donc de nombreux avantages à modifier l'environnement urbain pour aller vers des villes moins artificialisées, moins imperméabilisées, avec plus d'arbres et d'espaces verts et bleus.

I FIGURE 15 I

Schématisation de l'influence globale de la végétation sur les impacts sanitaires de la pollution de l'air et de la chaleur (Pascal 2019)



Toutefois, indépendamment des bénéfices globaux attendus de ces évolutions, les résultats de ce travail montrent que le problème sanitaire des fortes chaleurs ne sera pas résolu uniquement par ces approches. En effet, les différences de risques observées sont limitées aux températures les plus chaudes ; une augmentation non-linéaire de la mortalité avec la température demeure observée même dans les communes avec des caractéristiques urbaines moins propices à l'ICU. L'adaptation à la chaleur ne peut donc pas se limiter à des interventions sur l'urbanisme visant à réduire l'ICU. Elles doivent être impérativement couplées avec d'autres types de prévention des effets de la chaleur (par exemple concernant le confort thermique des bâtiments, ou les comportements individuels).

4.3 Perspectives

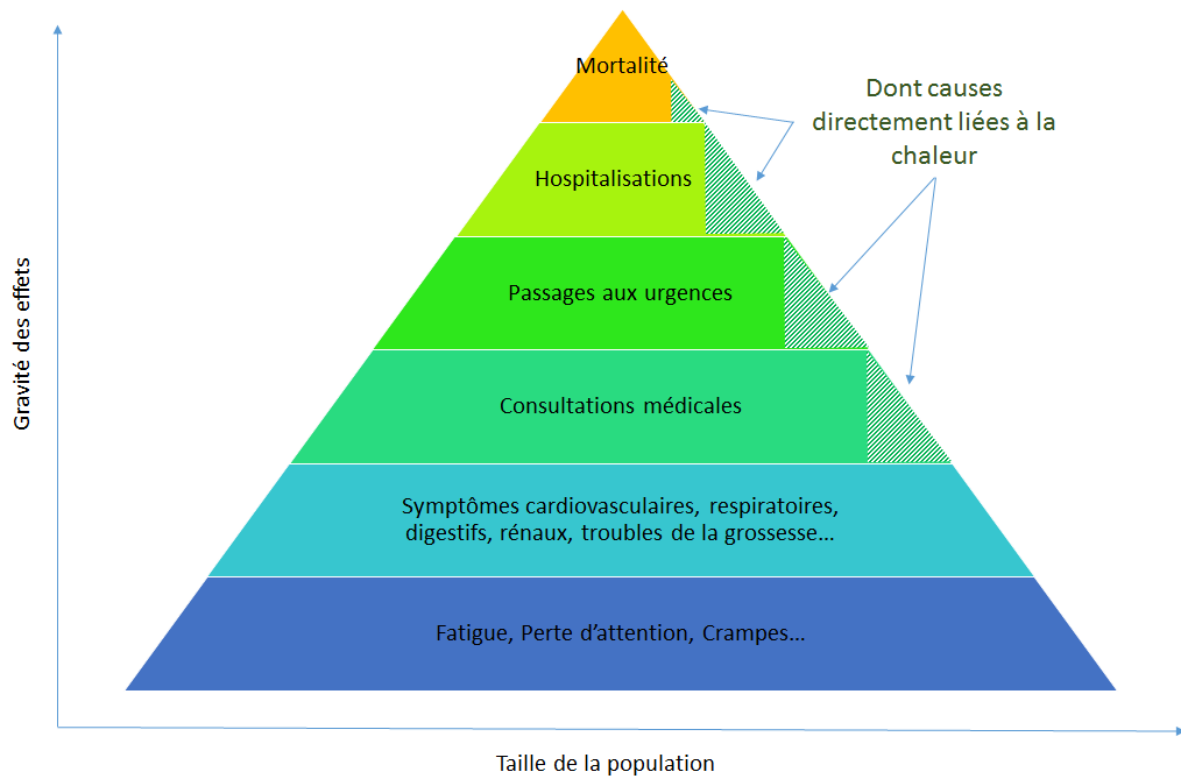
- Ainsi que discuté ci-dessus, plusieurs analyses supplémentaires devraient être envisagées pour approfondir la portée des résultats obtenus ici, notamment : étudier les impacts sur le recours aux soins d'urgences
- étudier l'influence d'une mesure plus directe de l'ICU sur la mortalité, en s'appuyant par exemple sur des modèles de météorologie urbaine.
- approfondir l'étude de l'influence des espaces végétalisés s'appuyant sur des indicateurs plus détaillés prenant en compte si possible la nature de ces espaces (étendues, type de végétation, en lien avec la pleine terre, sa réserve et eau et la disponibilité de l'eau selon les systèmes racinaires...), et une approche plus large des retombées sanitaires que le seul rôle de médiateur de l'ICU.
- produire des données sur l'exposition des populations dans les bâtiments et sur l'utilisation de systèmes de climatisation.

- documenter les retombées sanitaires d'interventions visant à réduire l'ICU (par exemple par des approches d'évaluation quantitative des impacts sanitaires).

Il serait également intéressant de reproduire ce type d'analyse dans d'autres zones, compte-tenu des spécificités sociodémographiques de l'Île-de-France et de l'agglomération parisienne. Les limites à la transposabilité de cette approche viendront de la puissance statistique et de la disponibilité des données, qui imposeront de travailler sur de grandes agglomérations. Les indicateurs de surface non-artificialisée et non-végétalisée, et de couverture non-arborée, peuvent être facilement reproduits ailleurs. Le MOS et les données sur la part de la population urbaine vivant dans un IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort sont propres à l'Île-de-France, et ne sont a priori pas disponibles sans développement spécifique dans d'autres zones.

I FIGURE 16 I

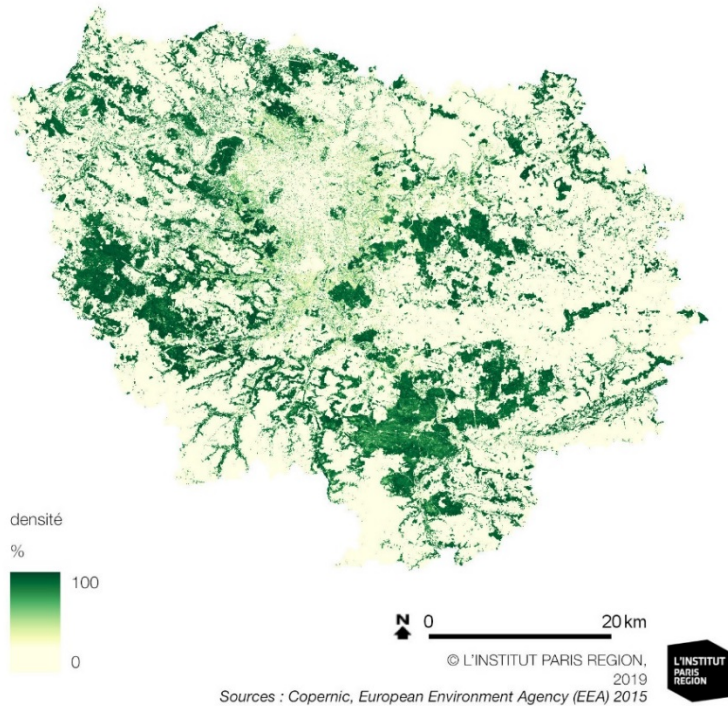
Pyramide des effets sanitaires de la chaleur sur la santé



I FIGURE 18 I

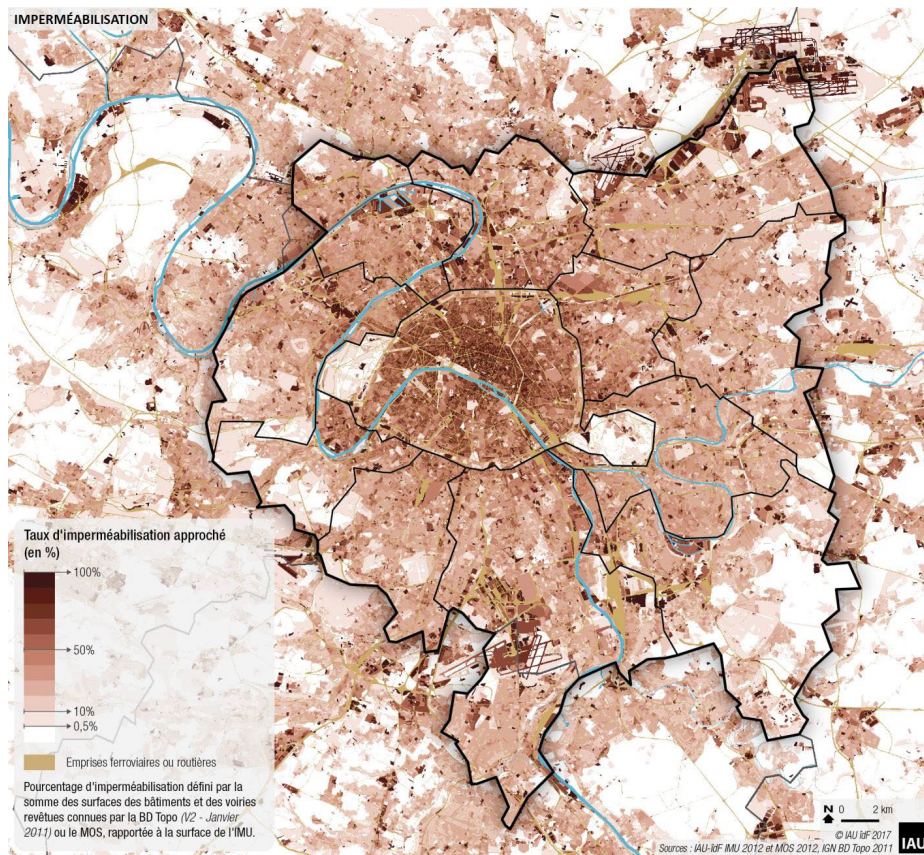
Couverture arborée

Densité du couvert arboré



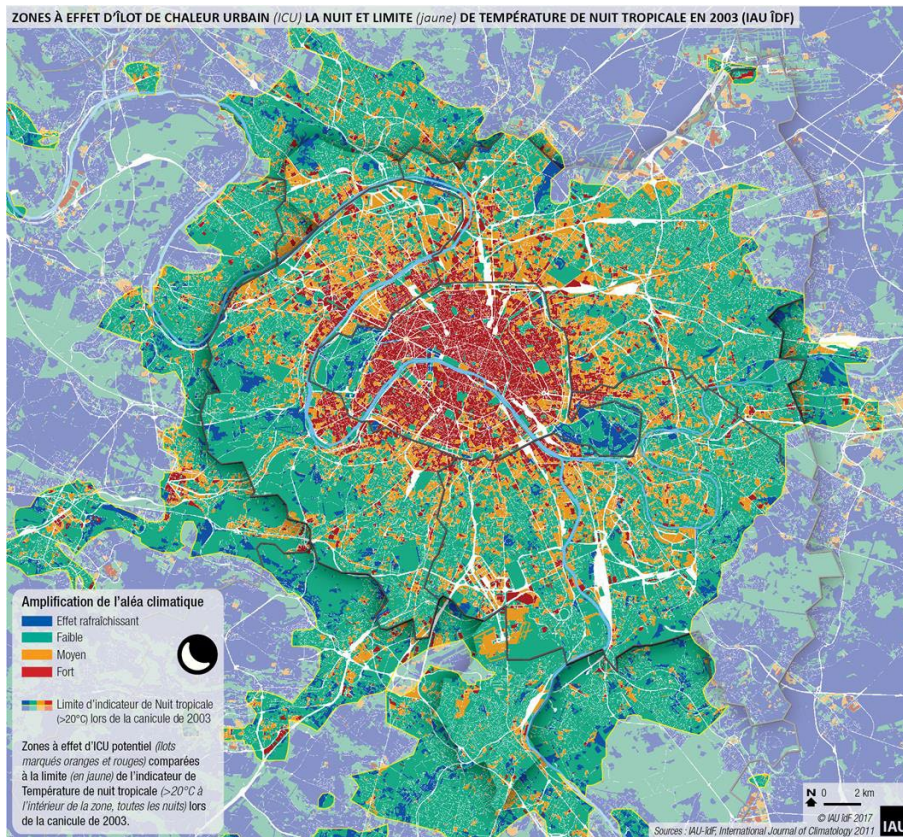
I FIGURE 19 I

Taux d'imperméabilisation




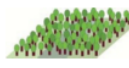



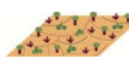




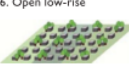

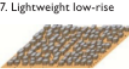
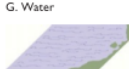



I FIGURE 20 I

Zones à effet d'îlot de chaleur urbain



I FIGURE 21 I

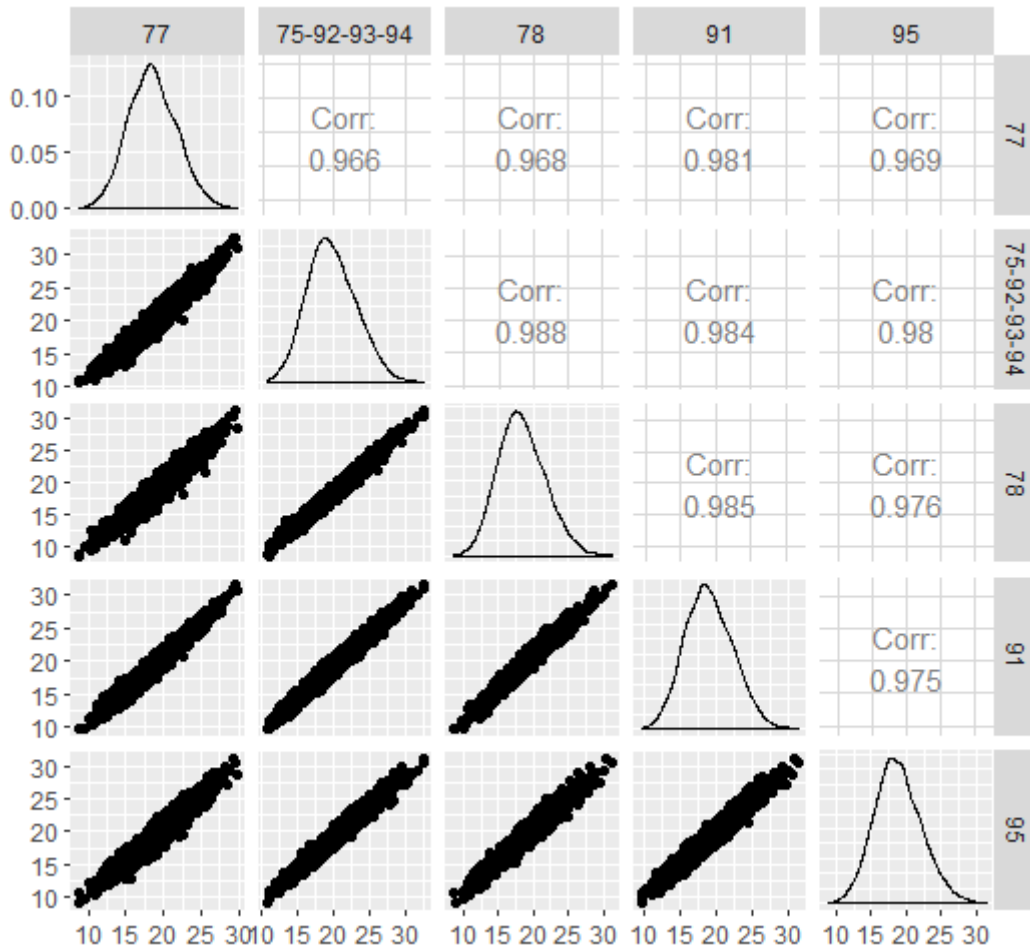
Type de LCZ

Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact mid-rise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open mid-rise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	<p>b. bare trees</p>	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p>s. snow cover</p>	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
		<p>d. dry ground</p>	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		<p>w. wet ground</p>	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

5.2 Descriptif des données météorologiques

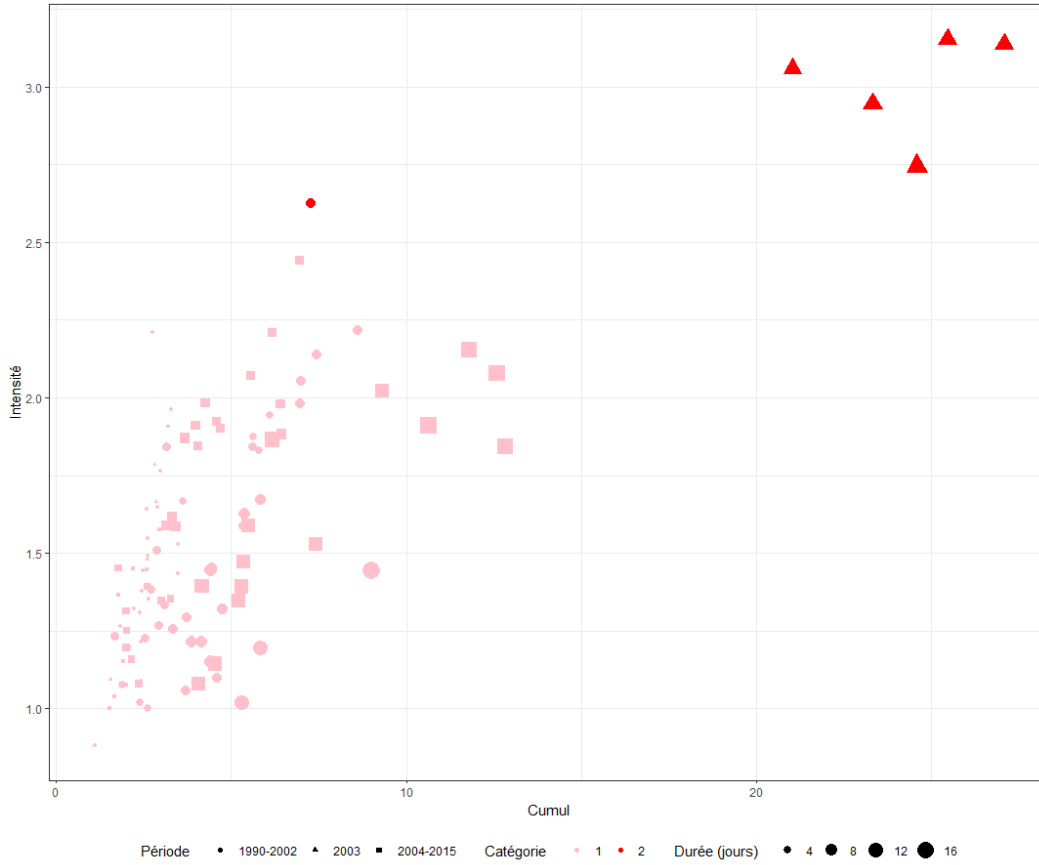
I FIGURE 22 I

Distribution des températures journalières moyennes estivales (juin-août) des stations de référence du Sacs, et degré de corrélation entre les stations – 1990-2015



I FIGURE 23 I

Caractéristiques (intensité, sévérité cumulé, durée) des vagues de chaleur inclus dans le modèle 1



5.3 Corrélation des caractéristiques urbaines testées

I TABLEAU 10 I

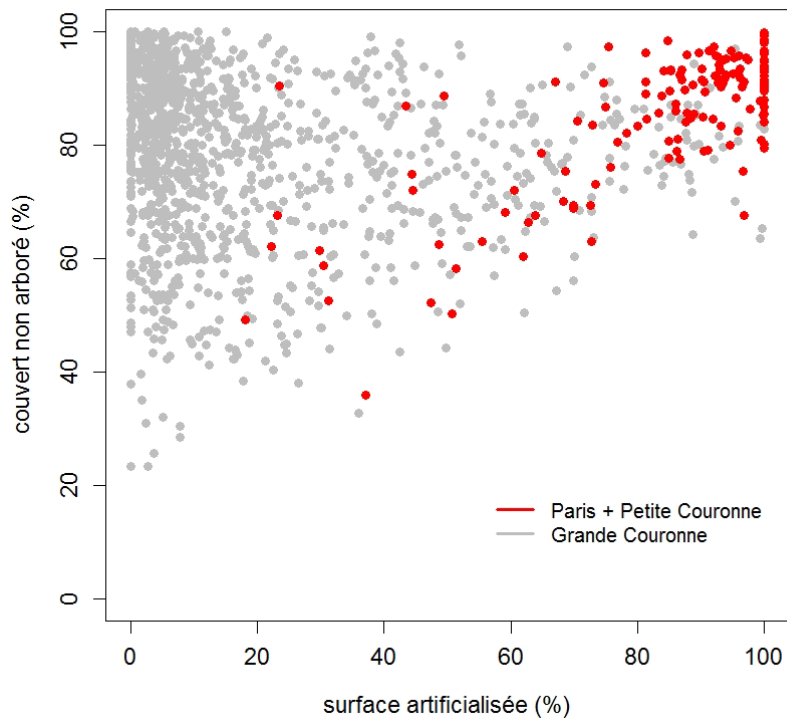
Corrélation entre les caractéristiques urbaines

	FDEP	% de population >75 ans et plus	surface artificialisée non-végétalisée 2006	taux imperméabilisation 2012	Part de la population IMU moyen/fort 2012	Surface non arborée
FDEP09		-0.62	0.17	0.005	-0.18	0.20
% de population >75 ans et plus	0.12		0.33	0.44	0.60	0.32
surface artificialisée non-végétalisée 2006	-0.03	-0.15		0.78	0.47	0.74
taux imperméabilisation 2012	-0.002	-0.19	0.95		0.80	0.81
part de la population IMU moyen/fort 2012	0.10	-0.04	0.62	0.69		0.61
Surface non arborée	0.36	-0.04	-0.09	-0.05	-0.07	

Bleu : Paris et petite couronne - Vert : grande couronne

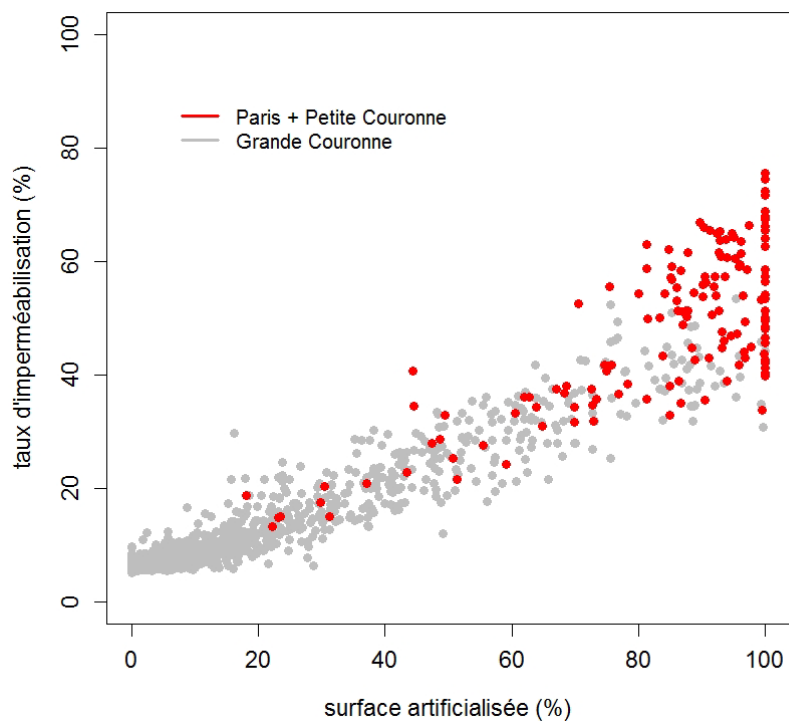
I FIGURE 24 I

Surface artificialisée non végétalisée vs couvert non arboré



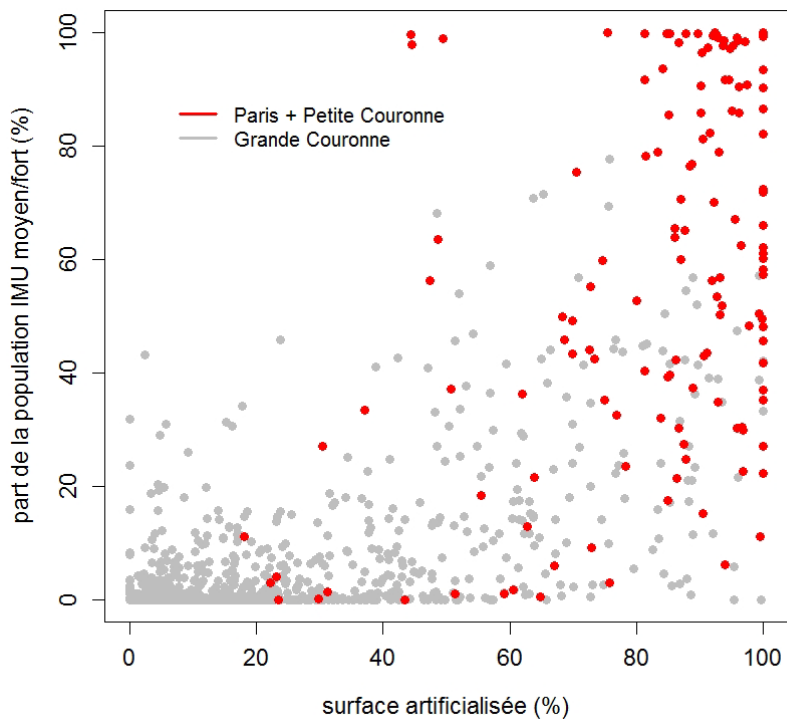
I Figure 25 I

Surface artificialisée non végétalisée vs taux d'imperméabilisation



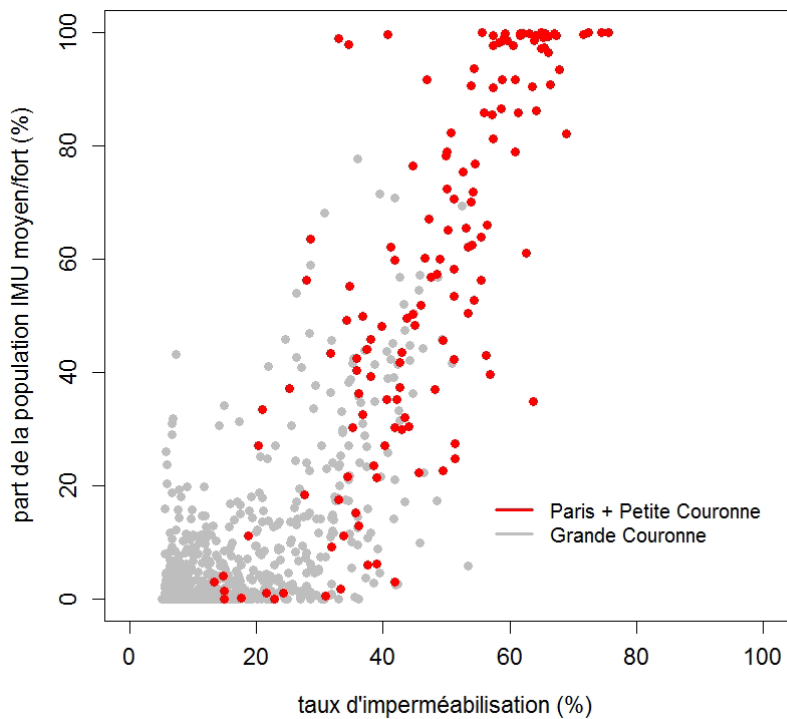
I FIGURE 26 I

Surface artificialisée non végétalisée vs part de la population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU moyen ou fort



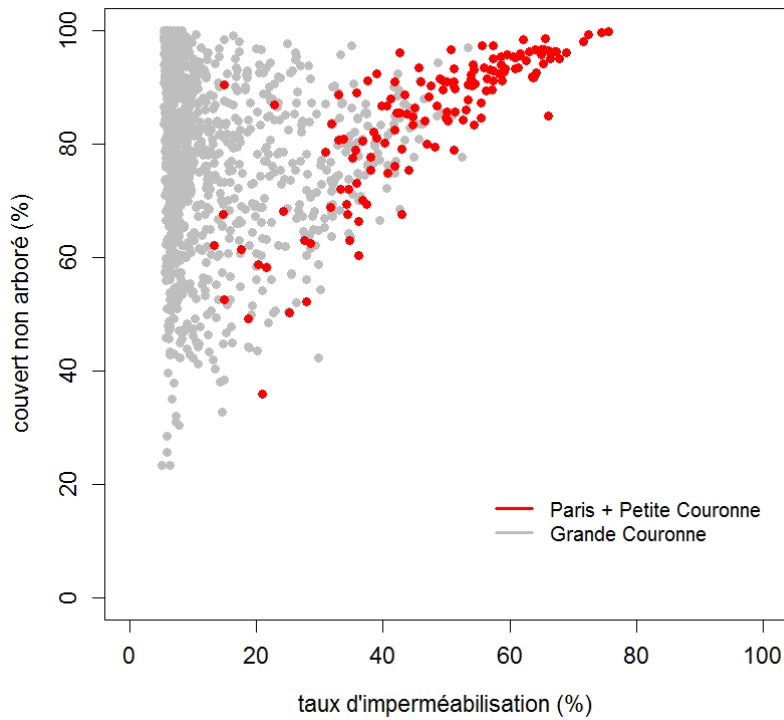
I FIGURE 27 I

Taux d'imperméabilisation vs part de la population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU moyen ou fort



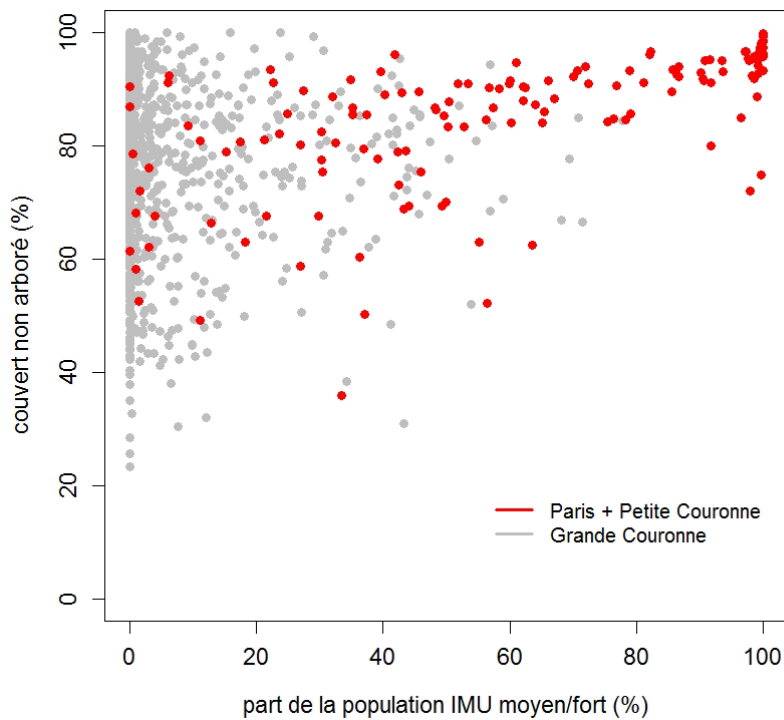
I FIGURE 28 I

Taux d'imperméabilisation vs couvert non arboré



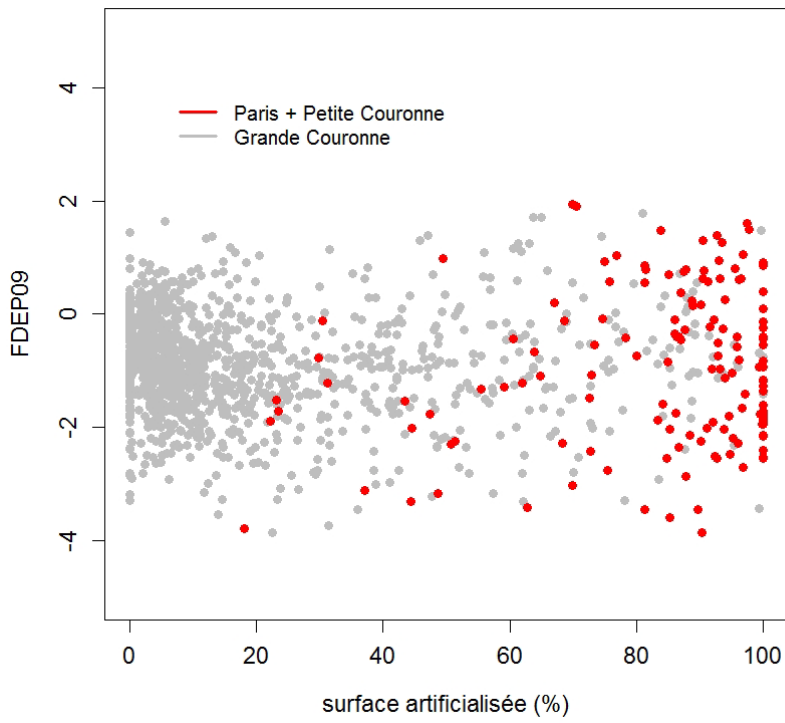
I FIGURE 29 I

Part de la population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU moyen ou fort vs couvert non arboré



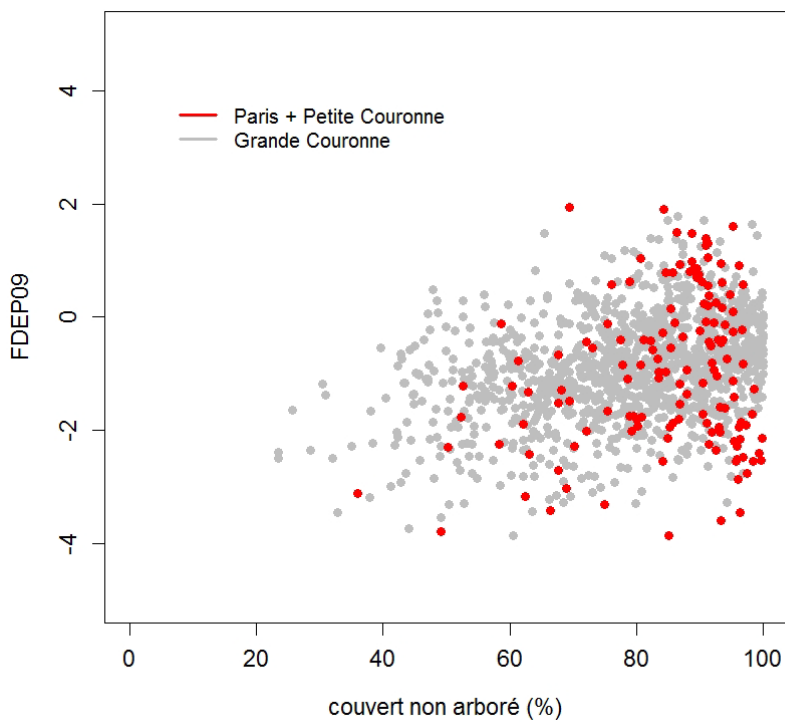
I FIGURE 30 I

Surface artificialisée non végétalisée vs FDEP



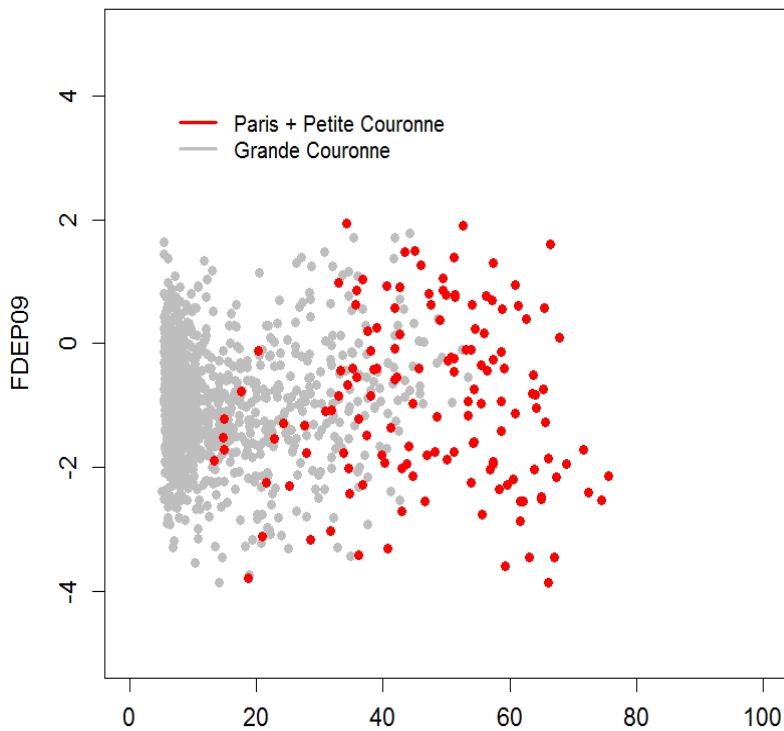
I FIGURE 31 I

Couvert non arboré vs FDEP



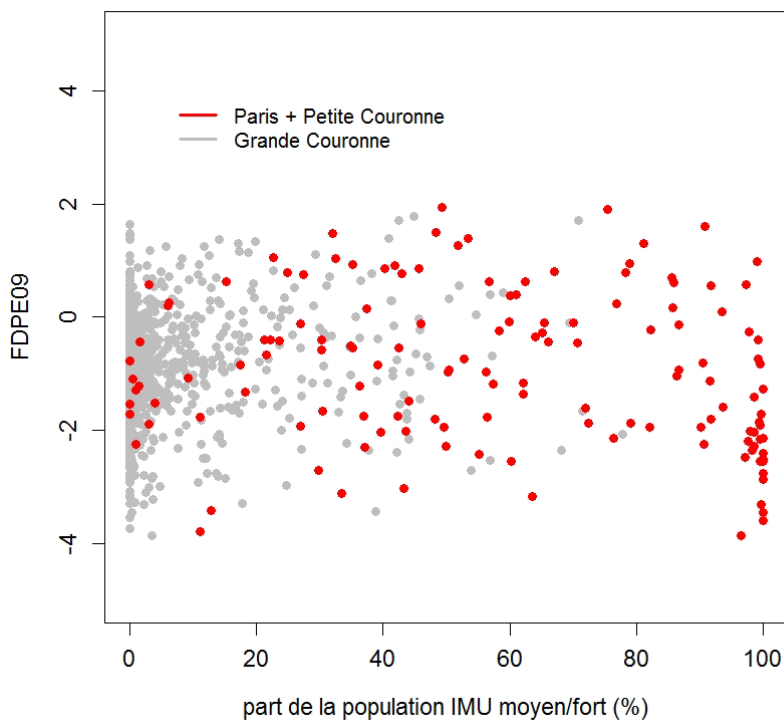
I FIGURE 32 I

Taux d'imperméabilisation vs FDEP



I FIGURE 33 I

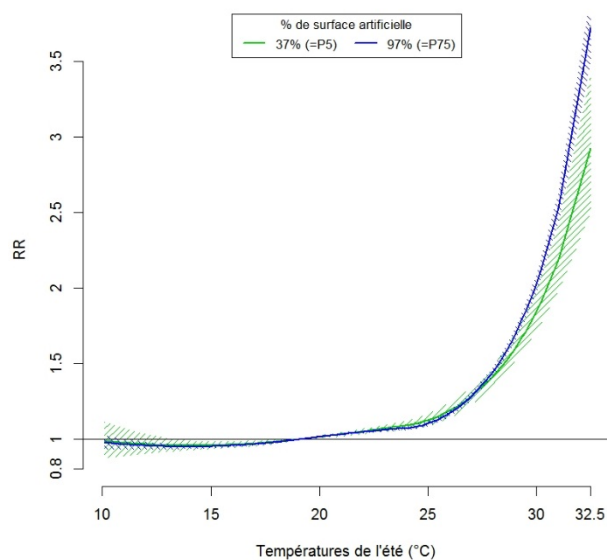
Part de la population vivant dans un IMU à potentiel d'ICU moyen ou fort vs FDEP



5.4 Courbes température – mortalité selon la caractéristique urbaine

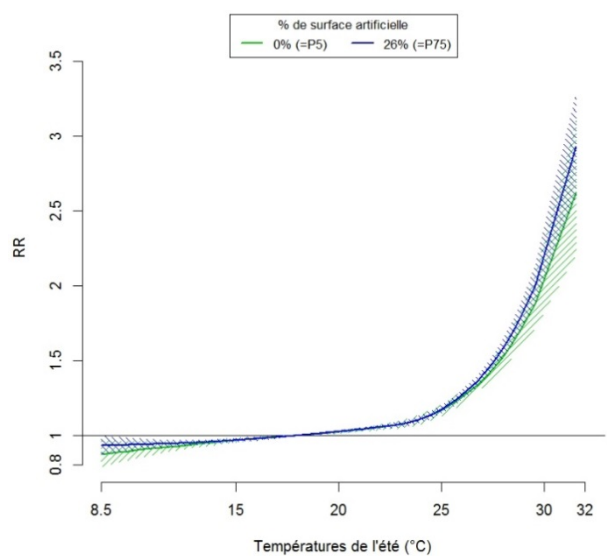
I FIGURE 34 I

Relations température-mortalité dans les communes peu et très artificialisées – Effet cumulé sur 10 jours – Paris et petite couronne



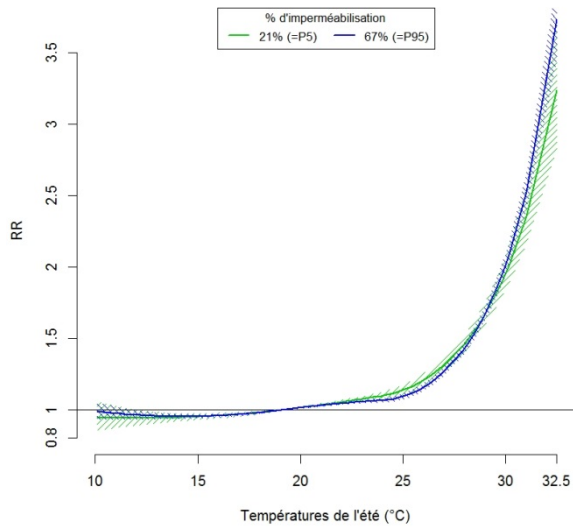
I FIGURE 35 I

Relations température-mortalité dans les communes peu et très artificialisées – Effet cumulé sur 10 jours – Grande couronne



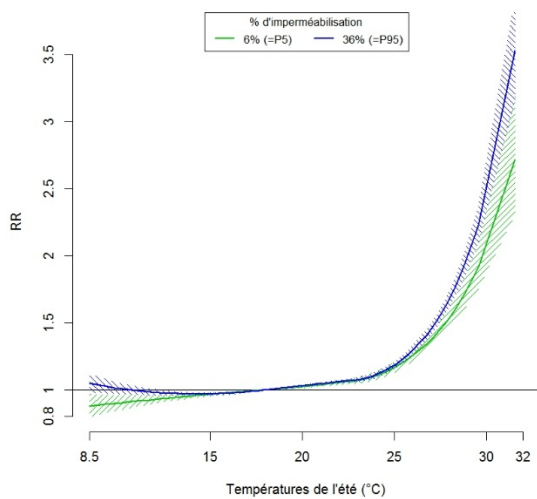
I FIGURE 36 I

Relations température-mortalité dans les communes peu et très imperméabilisées – Effet cumulé sur 10 jours – Paris et petite couronne



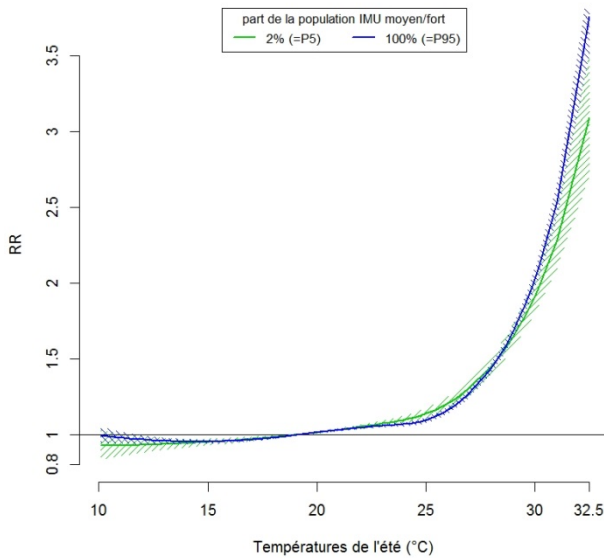
I FIGURE 37 I

Relations température-mortalité dans les communes peu et très imperméabilisées – Effet cumulé sur 10 jours – Grande couronne



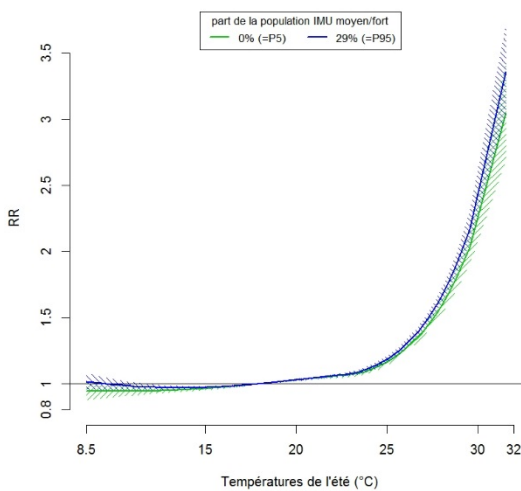
I FIGURE 38 I

Relations température-mortalité dans les communes avec peu et beaucoup d'habitants vivant dans un IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen ou fort – Effet cumulé sur 10 jours – Paris et petite couronne



I FIGURE 39 I

Relations température-mortalité dans les communes avec peu et beaucoup d'habitants vivant dans un IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen ou fort – Effet cumulé sur 10 jours – Grande couronne



5.5 RR exprimés pour des percentiles communs à toute la région

I TABLEAU 11 I

Modification du risque de décès pendant les vagues de chaleur selon la caractéristique urbaine testée exprimée pour des valeurs de la caractéristique correspondant à une distribution commune

	Paris et petite couronne		Grande couronne	
	Vague de chaleur non-extrême	Vague de chaleur extrême	Vague de chaleur non-extrême	Vague de chaleur extrême
RR pour une surface non-végétalisée égale à 37%	1,03 [0,98 ; 1,08]	1,56 [1,39 ; 1,76]	0,97 [0,94 ; 0,99]	1,37 [1,27 ; 1,47]
RR pour une surface non-végétalisée égale à 73%	1,02 [0,99 ; 1,04]	1,77 [1,65 ; 1,89]	0,96 [0,93 ; 0,99]	1,49 [1,38 ; 1,60]
RR pour une surface non-arborée égale à 60%	1,04 [0,99 ; 1,09]	1,60 [1,44 ; 1,78]	0,97 [0,93 ; 1,00]	1,52 [1,50 ; 1,65]
RR pour une surface non-arborée égale à 97%	1,00 [0,98 ; 1,03]	1,94 [1,82 ; 2,07]	0,99 [0,95 ; 1,03]	1,40 [1,27 ; 1,53]
RR pour un taux d'imperméabilisation égal à 21%	1,05 [1,00 ; 1,10]	1,72 [1,55 ; 1,90]	0,98 [0,94 ; 0,99]	1,38 [1,28 ; 1,48]
RR pour un taux d'imperméabilisation égal à 36%	1,03 [1,00 ; 1,07]	1,78 [1,65 ; 1,92]	0,96 [0,94 ; 0,99]	1,47 [1,37 ; 1,58]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égal à 2%	1,05 [1,00 ; 1,01]	1,71 [1,54 ; 1,89]	0,96 [0,93 ; 0,99]	1,37 [1,27 ; 1,49]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égal à 29%	1,03 [1,00 ; 1,07]	1,76 [1,63 ; 1,91]	0,97 [0,95 ; 1,00]	1,44 [1,34 ; 1,55]

I TABLEAU 12 I

RR associé à différentes températures et caractéristiques urbaines, pour des valeurs de la caractéristique correspondant à une distribution commune

	Paris et Petite couronne		Grande couronne	
	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 29,3°C (P95)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 31,0°C (P99)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 27,7°C (P95)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 29,5°C (P99)
RR pour une surface non-végétalisée égale à 37%	1,66 [1,56 ; 1,76]	2,18 [1,97 ; 2,41]	1,55 [1,51 ; 1,60]	2,05 [1,95 ; 2,17]
RR pour une surface non-végétalisée égale à 73%	1,73 [1,69 ; 1,78]	2,38 [2,28 ; 2,49]	1,62 [1,57 ; 1,68]	2,24 [2,11 ; 2,38]
RR pour une surface non-arborée égale à 60%	1,66 [1,57 ; 1,76]	2,17 [1,98 ; 2,38]	1,51 [1,46 ; 1,57]	1,99 [1,87 ; 2,11]
RR pour une surface non-arborée égale à 97%	1,79 [1,75 ; 1,84]	2,57 [2,47 ; 2,68]	1,52 [1,46 ; 1,59]	1,94 [1,80 ; 2,10]
RR pour un taux d'imperméabilisation égal à 21%	1,75 [1,66 ; 1,84]	2,35 [2,16 ; 2,56]	1,56 [1,51 ; 1,60]	2,06 [1,96 ; 2,18]
RR pour un taux d'imperméabilisation égal à 36%	1,76 [1,70 ; 1,81]	2,41 [2,28 ; 2,54]	1,62 [1,57 ; 1,67]	2,23 [2,10 ; 2,36]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort égale à 2%	1,72 [1,64 ; 1,81]	2,28 [2,10 ; 2,48]	1,54 [1,48 ; 1,59]	2,04 [1,91 ; 2,17]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort égale à 29%	1,74 [1,68 ; 1,80]	2,35 [2,22 ; 2,49]	1,60 [1,55 ; 1,64]	2,17 [2,06 ; 2,29]

5.6 Résultats analyse de sensibilité effet spatial - Résultats pour Paris et petite couronne

I TABLEAU 13 I

Modification du risque de décès pendant les vagues de chaleur selon la caractéristique urbaine testée – modèle avec composante spatiale, Paris et petite couronne

	Vague de chaleur non-extrême	Vague de chaleur extrême
RR pour une surface non-végétalisée égale au P5	1,03 [0,98 ; 1,08]	1,56 [1,39 ; 1,76]
RR pour une surface non-végétalisée égale au P75	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,92 [1,80 ; 2,04]
RR pour une surface non-végétalisée de P95	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,94 [1,82 ; 2,06]
RR pour une surface non arborée égale à P5	1,04 [0,99 ; 1,09]	1,60 [1,44 ; 1,78]
RR pour une surface non arborée égale à P75	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,91 [1,79 ; 2,02]
RR pour une surface non arborée égale à P95	1,00 [0,98 ; 1,03]	1,95 [1,82 ; 2,07]
RR pour un taux d'imperméabilisation égal au P5	1,05 [1,00 ; 1,10]	1,71 [1,55 ; 1,90]
RR pour un taux d'imperméabilisation égal au P75	1,01 [0,98 ; 1,03]	1,88 [1,77 ; 2,00]
RR pour un taux d'imperméabilisation égal au P95	1,00 [0,97 ; 1,02]	1,92 [1,80 ; 2,06]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égale au P5	1,05 [1,00 ; 1,10]	1,71 [1,54 ; 1,89]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égale au P75	1,00 [0,98 ; 1,03]	1,89 [1,78 ; 2,01]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égale au P95	1,00 [0,97 ; 1,03]	1,91 [1,79 ; 2,04]

I TABLEAU 14 I

RR associé à différentes températures et caractéristiques urbaines, pour des valeurs de la caractéristique correspondant à une distribution commune - modèle avec composante spatiale, Paris et petite couronne

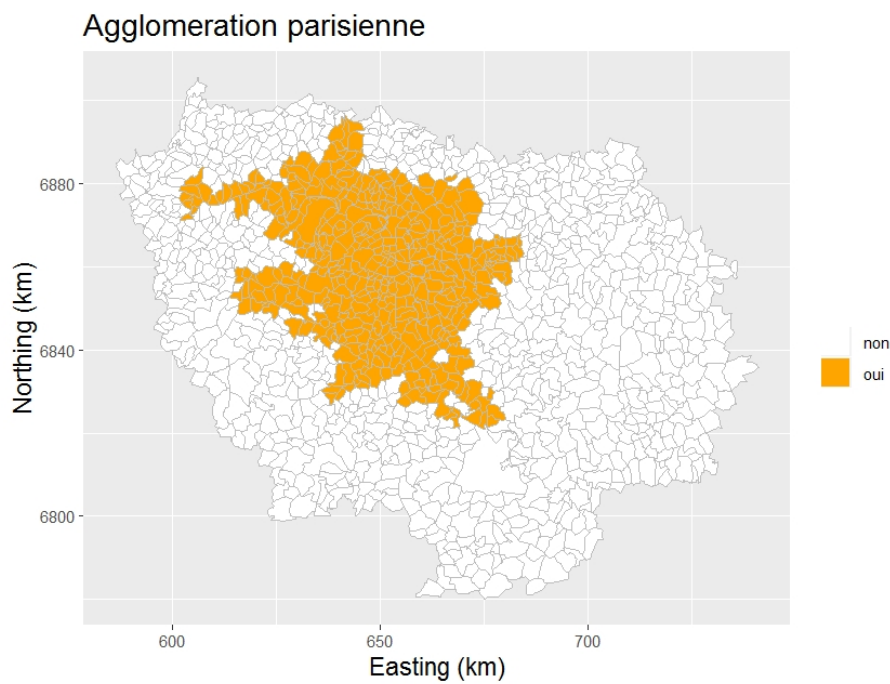
	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 29,3°C (P95)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 31,0°C (P99)
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 5	1,66 [1,56 ; 1,76]	2,18 [1,98 ; 2,41]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 75	1,78 [1,74 ; 1,82]	2,53 [2,44 ; 2,63]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 95	1,79 [1,75 ; 1,83]	2,55 [2,45 ; 2,65]
RR pour une surface non arborée correspondant au percentile 5	1,66 [1,57 ; 1,76]	2,17 [1,98 ; 2,38]
RR pour une surface non arborée correspondant au percentile 75	1,78 [1,74 ; 1,82]	2,53 [2,44 ; 2,62]
RR pour une surface non arborée correspondant au percentile 95	1,79 [1,75 ; 1,84]	2,57 [2,47 ; 2,68]
RR pour un taux d'imperméabilisation correspondant au percentile 5	1,75 [1,66 ; 1,84]	2,35 [2,16 ; 2,56]
RR pour un taux d'imperméabilisation correspondant au percentile 75	1,76 [1,73 ; 1,80]	2,49 [2,41 ; 2,58]
RR pour un taux d'imperméabilisation correspondant au percentile 95	1,77 [1,72 ; 1,82]	2,52 [2,41 ; 2,64]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égale au P5	1,72 [1,64 ; 1,81]	2,28 [2,10 ; 2,48]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égale au P75	1,77 [1,73 ; 1,81]	2,52 [2,43 ; 2,61]
RR pour une part de population vivant dans un IMU avec un potentiel d'IMU nocturne moyen fort égale au P95	1,78 [1,73 ; 1,82]	2,54 [2,44 ; 2,64]
RR moyen sur toutes les communes	1,76 [1,73 ; 1,80]	2,47 [2,39 ; 2,55]

5.7. Résultats pour l'agglomération parisienne

L'agglomération parisienne est composée de 431 communes (Figure 40). Le nombre de décès observés sur la période étudiée est de 528 597.

I FIGURE 40 I

Communes composant l'agglomération parisienne



I TABLEAU 15 I

Modification du risque de décès pendant les vagues de chaleur selon la caractéristique urbaine testée – résultat pour l'agglomération parisienne

	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 28,4°C (P95)	RR cumulé sur l'ensemble des retards pour une température de 30,5°C (P99)
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 5 (=16%)	1,52 [1,45 :1,59]	2,03 [1,86 :2,22]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 75 (=88%)	1,58 [1,56 :1,60]	2,27 [2,21 :2,34]
RR pour une surface non-végétalisée correspondant au percentile 95 (=100%)	1,59 [1,56 :1,62]	2,32 [2,24 :2,39]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 5 (=50%)	1,51 [1,45 :1,58]	2,02 [1,86 :2,19]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 75 (=88%)	1,58 [1,56 :1,60]	2,27 [2,21 :2,33]
RR pour une surface non-arborée correspondant au percentile 95 (=96%)	1,60 [1,57 :1,63]	2,33 [2,25 :2,40]
RR pour un taux d'imperméabilisation correspondant au percentile 5 (=10%)	1,58 [1,52 :1,64]	2,16 [2,01 :2,32]
RR pour un taux d'imperméabilisation au percentile 75 (=43%)	1,58 [1,55 :1,60]	2,25 [2,18 :2,31]
RR pour un taux d'imperméabilisation au percentile 95 (=63%)	1,58 [1,55 :1,61]	2,30 [2,23 :2,38]
RR pour une part de population dans une IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 5 (=0%)	1,58 [1,53 :1,63]	2,17 [2,06 :2,30]
RR pour une part de population dans un IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 75 (=46%)	1,58 [1,55 :1,61]	2,24 [2,17 :2,31]
RR pour une part de population dans un IMU à potentiel d'ICU nocturne moyen/fort au percentile 95 (=99%)	1,58 [1,55 :1,61]	2,31 [2,24 :2,39]
RR moyen sur toutes les communes	1,58 [1,56 :1,61]	2,27 [2,21 :2,33]

Références bibliographiques

- Ademe. Actions d'adaptation au changement climatique en France, aujourd'hui. In:
2017. "Diagnostic de la surchauffe urbaine: méthodes et applications territoriales." In,
1:64.
- Atiki, N; Pascal, M; Wagner, V;. 2019. 'Influence de la chaleur sur quelques causes de recours
aux d'urgences en France métropolitaine durant les étés 2015-2017', *Bull Epidemiol
Hebd*: 9-14.
- Beaudoin, M; Levasseur, ME. 2017. "Verdire les villes pour la santé de la population." In.:
Institut national de santé publique du Québec.
- Benmarhnia, T.; Beaudou, P;. 2018. 'Les villes et la canicule: se préparer au futur et prévenir
les effets sanitaires des îlots de chaleur urbain', *Bull Epidemiol Hebd*: 354-57.
- Benmarhnia, Tarik, Wahida Kihal-Talantikite, Martina S. Ragetti, and Séverine Deguen. 2017.
'Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris:
A cluster analysis approach', *Science of The Total Environment*, 592: 288-94.
- Bretin, P., S. Vandentorren, A. Zeghnoun, and M. Ledrans. 2005. "Etude des facteurs de risque
de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août
2003. Juillet 2004." In, 116 p. Saint-Maurice: Institut de veille sanitaire.
- Burkart, K., F. Meier, A. Schneider, S. Breitner, P. Canário, M. J. Alcoforado, D. Scherer, and
W. Endlicher. 2016. 'Modification of heat-related mortality in an elderly urban population
by vegetation (Urban green) and proximity to water (Urban blue): Evidence from Lisbon,
Portugal', *Environ Health Perspect*, 124: 927-34.
- Colombert, M. 2008. 'Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les
différents moyens d'intervention sur la ville', Paris-Est.
- Copernicus. 2015. 'Tree cover density 2015'. <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/tree-cover-density/status-maps/2015>.
- Cordeau, E. 2014. "Les stratégies de végétalisation pour aider la ville à faire face à la canicule."
In *Note rapide Environnement*, 1:6. Paris, France: L'Institut Paris Region.
2016. "Les îlots morphologiques urbains (IMU)." In, 1-120. IAU.
2017. "Adapter l'Île-de-France à la chaleur urbaine." In, 155. Paris.
- "Corine Land Cover France - Guide d'utilisation." In. 2009. 1:22.
- Corso, M., M. Pascal, and V. Wagner. 2017. 'Impacts de la chaleur et du froid sur la mortalité
totale en France entre 2000 et 2010', *Bull Epidemiol Hebd*: 634-40.
- de Munck, C;. 2013. 'Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour
l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville', Institut
National Polytechnique de Toulouse.
- Fouillet, A., G. Rey, F. Laurent, G. Pavillon, S. Bellec, C. Guihenneuc-Jouyaux, J. Clavel, E.
Jougla, and D. Hemon. 2006. 'Excess mortality related to the August 2003 heat wave
in France', *Int Arch Occup Environ Health*, 80: 16-24.
- Fouillet, A., G. Rey, V. Wagner, K. Laaidi, P. Empereur-Bissonnet, A. Le Tertre, P. Frayssinet,
P. Bessemoulin, F. Laurent, P. De Crouy-Chanel, E. Jougla, and D. Hemon. 2008. 'Has
the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave
of summer 2003? A study of the 2006 heat wave', *Int J Epidemiol*, 37: 309-17.
- Gago, E. J., J. Roldan, R. Pacheco-Torres, and J. Ordóñez. 'The city and urban heat islands:
A review of strategies to mitigate adverse effects'.

- Gasparri, A. 2011. 'Distributed lag linear and non-linear models in R: The package dlnm', *Journal of Statistical Software*, 43: 2-20.
- Gasparri, A., Y. Guo, M. Hashizume, E. Lavigne, A. Zanobetti, J. Schwartz, A. Tobias, S. Tong, J. Rocklöv, B. Forsberg, M. Leone, M. De Sario, M. L. Bell, Y. L. L. Guo, C. F. Wu, H. Kan, S. M. Yi, M. De Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, P. H. N. Saldiva, Y. Honda, H. Kim, and B. Armstrong. 2015. 'Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study', *The Lancet*, 386: 369-75.
- 'Geodes'. 2019.
- Graham, Drew A., Jennifer K. Vanos, Natasha A. Kenny, and Robert D. Brown. 2016. 'The relationship between neighbourhood tree canopy cover and heat-related ambulance calls during extreme heat events in Toronto, Canada', *Urban Forestry & Urban Greening*, 20: 180-86.
- Gronlund, C. J., V. J. Berrocal, J. L. White-Newsome, K. C. Conlon, and M. S. O'Neill. 2015. 'Vulnerability to extreme heat by socio-demographic characteristics and area green space among the elderly in Michigan, 1990-2007', *Environmental Research*, 136: 449-61.
- Gruber, C; Meskel, E; Desplat, J; Gantois, M; . 2013. "L'îlot de chaleur urbain à Paris - Un microclimat au coeur de la ville." In, 1:8. Paris, France: Agence parisienne du climat.
- Guigère, M; . 2009. "Mesures de lutttes aux îlots de chaleur urbains." In, 1:95. Québec: INSPQ.
- Heaviside, C., X. M. Cai, and S. Vardoulakis. 2015. 'The effects of horizontal advection on the urban heat island in Birmingham and the West Midlands, United Kingdom during a heatwave', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141: 1429-41.
- Heaviside, C., S. Vardoulakis, and X. M. Cai. 2016. 'Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK', *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 15.
- Hidalgo, J., G. Dumas, V. Masson, G. Petit, B. Bechtel, E. Bocher, M. Foley, R. Schoetter, and G. Mills. 2019. 'Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations', *Urban Climate*, 27: 64-89.
- Kuehn, L., and S. McCormick. 2017. 'Heat Exposure and Maternal Health in the Face of Climate Change', *Int J Environ Res Public Health*, 14.
- Laaidi, K., A. Ung, M. Pascal, and P. Beaudeau. 2015. 'Vulnérabilité à la chaleur : actualisation des connaissances sur les facteurs de risque', *Bull Epidemiol Hebd*: 76-82.
- Laaidi, K., A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, and P. Beaudeau. 2012. 'The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave', *Environ Health Perspect*, 120: 254-59.
- Lambert-Habib, M. L., J. Hidalgo, C. Fedele, A. Lemonsu, and C. Bernard. 2013. 'How is climatic adaptation taken into account by legal tools? Introduction of water and vegetation by French town planning documents', *Urban Climate*, 4: 16-34.
- Le Tertre, A., A. Lefranc, D. Eilstein, C. Declercq, S. Medina, M. Blanchard, B. Chardon, P. Fabre, L. Filleul, J. F. Jusot, L. Pascal, H. Prouvost, S. Cassadou, and M. Ledrans. 2006. 'Impact of the 2003 heatwave on all-cause mortality in 9 French cities', *Epidemiology*, 17: 75-9.
- Lemonsu, A., V. Viguié, M. Daniel, and V. Masson. 2015. 'Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France)', *Urban Climate*, 14: 586-605.
- Lohmus, M. 2018. 'Possible Biological Mechanisms Linking Mental Health and Heat-A Contemplative Review', *Int J Environ Res Public Health*, 15.

- 'Mos du ciel à la carte'. 2013. 1:52.
- OMS. 2016. "Urban green spaces and health: a review of evidence." In. Bonn, Allemagne: OMS Europe.
- Pascal, M, V Wagner, M Corso, K Laaidi, and A Le Tertre. 2019. "Évolutions de l'exposition aux canicules et de la mortalité associée en France métropolitaine entre 1970 et 2013." In, 69 p. Saint-Maurice: Santé publique France.
- Pascal, M., P. de Crouy Chanel, V. Wagner, M. Corso, C. Tillier, M. Bentayeb, M. Blanchard, A. Cochet, L. Pascal, S. Host, S. Gorla, A. Le Tertre, E. Chatignoux, A. Ung, P. Beaudeau, and S. Medina. 2016. 'The mortality impacts of fine particles in France', *Science of The Total Environment*, 571: 416-25.
- Pascal, M., A. Le Tertre, and A. Saoudi. 2012. 'Quantification of the heat wave effect on mortality in nine French cities during summer 2006', *PLoS Currents*.
- Pascal, M; Daoudi, J; Fouillet, A; Lapostolle, A; Empereur-Bissonnet, P; Pouey, J; Retel, O; Thiam, MM; Ung, A;. 2018. 'Principaux enseignements de la surveillance sanitaire des impacts des vagues de chaleur de 2015 à 2017 en France', *Bull Epidemiol Hebd*: 326-33.
- Pascal, M; Laaidi, K; Beaudeau, P;. 2019. 'Intérêt des espaces verts et ombragés dans la prévention des impacts sanitaires de la chaleur et de la pollution de l'air en zone urbaine', *A paraître*.
- Perez, L., C. Declercq, C. Iníguez, I. Aguilera, C. Badaloni, F. Ballester, C. Bouland, O. Chanel, F. B. Cirarda, F. Forastiere, B. Forsberg, D. Haluza, B. Hedlund, K. Cambra, M. Lacasanã, H. Moshhammer, P. Omorepe, M. Rodríguez-Barranco, S. Medina, and N. Kuñzli. 2013. 'Chronic burden of near-roadway traffic pollution in 10 European cities (APHEKOM network)', *European Respiratory Journal*, 42: 594-605.
- "Plan de santé environnementale pour Paris." In. 2018. 1:75. Paris, France: Mairie de Paris.
- Ren, Z., X. He, H. Zheng, D. Zhang, X. Yu, G. Shen, and R. Guo. 2013. 'Estimation of the relationship between urban park characteristics and park cool island intensity by remote sensing data and field measurement', *Forests*, 4: 868-86.
- Rey, G., E. Jouglu, A. Fouillet, and D. Hémon. 2009. 'Ecological association between a deprivation index and mortality in France over the period 1997 - 2001: Variations with spatial scale, degree of urbanicity, age, gender and cause of death', *BMC Public Health*, 9.
- Rey, G., E. Jouglu, A. Fouillet, G. Pavillon, P. Bessemoulin, P. Frayssinet, J. Clavel, and D. Hémon. 2007. 'The impact of major heat waves on all-cause and cause-specific mortality in France from 1971 to 2003', *Int. Arch Occup Environ Health*, 80: 615-26.
- Schaeffer, L., P. de Crouy-Chanel, V. Wagner, J. Desplat, and M. Pascal. 2016. 'How to estimate exposure when studying the temperature-mortality relationship? A case study of the Paris area', *Int J Biometeorol*, 60: 73-83.
- Schinasi, L. H., T. Benmarhnia, and A. J. De Roos. 2018. 'Modification of the association between high ambient temperature and health by urban microclimate indicators: A systematic review and meta-analysis', *Environmental Research*, 161: 168-80.
- solidaire;, Ministère de la transition écologique et. 2018. "Le plan national d'adaptation au changement climatique Pnacc-2." In, 1-26. Paris, France.
- Son, J. Y., K. J. Lane, J. T. Lee, and M. L. Bell. 2016. 'Urban vegetation and heat-related mortality in Seoul, Korea', *Environmental Research*, 151: 728-33.

- Soubeyroux, JM., G. Ouzeau, M. Schneider, O. Cabanes, and R. Kounkou-Arnaud. 2016. 'Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur', *La Météorologie*, 94: 6.
- Stewart, I. D. 2011. 'A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature', *International Journal of Climatology*, 31: 200-17.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke. 2012. 'Local climate zones for urban temperature studies', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 1879-900.
- vanOldenborgh, G, S Philip, S Kew, R Vautard, O Boucher, F Otto, K Haustein, JM Soubeyroux, A Ribes, Y Robin, S Seneviratne, M Vogel, P Stott, and M van Aalst. 2019. "Human contribution to the record-breaking June 2019 heat wave in France." In, 1:32.
- Vanos, J. K., J. S. Warland, T. J. Gillespie, G. A. Slater, R. D. Brown, and N. A. Kenny. 'Human energy budget modeling in urban parks in toronto and applications to emergency heat stress preparedness'.
- Vicedo-Cabrera, A. M., Y. Guo, F. Sera, V. Huber, C. F. Schleussner, D. Mitchell, S. Tong, M. S. Z. S. Coelho, P. H. N. Saldiva, E. Lavigne, P. M. Correa, N. V. Ortega, H. Kan, S. Osorio, J. Kyselý, A. Urban, J. J. K. Jaakkola, N. R. I. Rytí, M. Pascal, P. G. Goodman, A. Zeka, P. Michelozzi, M. Scortichini, M. Hashizume, Y. Honda, M. Hurtado-Diaz, J. Cruz, X. Seposo, H. Kim, A. Tobias, C. Íñiguez, B. Forsberg, D. O. Åström, M. S. Ragettli, M. Rössli, Y. L. Guo, C. F. Wu, A. Zanobetti, J. Schwartz, M. L. Bell, T. N. Dang, D. Do Van, C. Heaviside, S. Vardoulakis, S. Hajat, A. Haines, B. Armstrong, K. L. Ebi, and A. Gasparrini. 2018. 'Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios', *Climatic Change*, 150: 391-402.
- Völker, Sebastian, and Thomas Kistemann. 2011. 'The impact of blue space on human health and well-being – Salutogenetic health effects of inland surface waters: A review', *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214: 449-60.
- Wagner, V; Ung, A; Calmet, C; Pascal, M;. 2018. 'Evolution des vagues de chaleur et de la mortalité associée en France, 2004-2014', *Bull Epidemiol Hebd*: 320-25.
- Xu, Y., P. Dadvand, J. Barrera-Gómez, C. Sartini, M. Mari-Dell'Olmo, C. Borrell, M. Medina-Ramón, J. Sunyer, and X. Basagaña. 2013. 'Differences on the effect of heat waves on mortality by sociodemographic and urban landscape characteristics', *Journal of Epidemiology and Community Health*, 67: 519-25.
- Xu, Z., P. E. Sheffield, H. Su, X. Wang, Y. Bi, and S. Tong. 2014. 'The impact of heat waves on children's health: a systematic review', *Int J Biometeorol*, 58: 239-47.