

Cartographie de la vulnérabilité sociale des ICU à l'aide d'un SIG : un outil pour la politique urbaine

Saffa Mansour¹, Aurélie Talon¹, Pierre Breul¹

¹ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, Clermont-Ferrand, France

Résumé

Les îlots de chaleur urbains (ICU) présentent des risques croissants pour l'environnement et la santé publique, affectant les populations vulnérables dans les zones urbaines. Il est essentiel de comprendre ces effets pour construire des villes résilientes, en particulier dans le contexte du changement climatique. Cette étude développe un indice de vulnérabilité sociale aux ICU basé sur un SIG (ICU-IV) afin d'évaluer et de cartographier la vulnérabilité sociale de la Métropole de Clermont-Ferrand. En intégrant des données spatiales, météorologiques et socio-environnementales, la recherche identifie les populations les plus exposées lors d'épisodes de chaleur extrême, en particulier les enfants de moins de 14 ans et les personnes âgées de plus de 65 ans. L'analyse adopte une approche à double scénarios, examinant différents schémas de pondération pour les indicateurs d'exposition, de sensibilité et de capacité d'adaptation. Ces résultats offrent des informations utiles aux urbanistes et aux décideurs politiques, permettant des interventions ciblées pour atténuer les risques liés à la chaleur. En s'appuyant sur des données et des méthodes analytiques libres, cette étude fournit un cadre reproductible pour l'évaluation de la vulnérabilité sociale des ICU dans les contextes urbains de taille moyenne, contribuant ainsi aux efforts visant à renforcer la résilience climatique face aux tendances de l'urbanisation mondiale.

Mots clés Îlot de chaleur urbain (ICU), vulnérabilité sociale, analyse basée sur les SIG, résilience climatique

I. INTRODUCTION

L'urbanisation est l'une des tendances mondiales les plus importantes, avec plus de 55 % de la population mondiale vivant dans des zones urbaines ; une proportion qui devrait atteindre 68 % d'ici 2050 (**United Nation, 2018**). Si les villes sont des centres dynamiques d'activités économiques et humaines, elles présentent également des défis complexes. L'un des plus urgents est l'effet ICU, défini par **Oke and Fuggle (1972)** comme l'augmentation de la température dans les zones urbaines par rapport aux régions rurales environnantes. Ce réchauffement localisé amplifie les effets du changement climatique et contribue à un large éventail de problèmes environnementaux, sociaux et de santé publique.

L'effet ICU est particulièrement préoccupant pour la santé publique, car il augmente la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur. Ces épisodes de chaleur extrême figurent parmi les risques naturels les plus meurtriers au monde. Entre 1998 et 2017, les vagues de chaleur ont fait plus de 166 000 victimes, dont 70 000 lors de la catastrophique canicule européenne de 2003 (**EU**

Strategy on Adaptation to Climate Change, 2021). En France, les vagues de chaleur de 2003, 2006 et 2015 ont été respectivement responsables d'environ 19 490, 1 388 et 3 275 décès (**The International Disaster Database, 2022**). En outre, le risque de mortalité augmente de 1 % à 3 % pour chaque hausse de température de 1 °C. Au niveau national, la surmortalité due à la chaleur est estimée à 20 % pour les personnes âgées de 45 à 74 ans, à 70 % pour celles âgées de 75 à 94 ans et à 120 % pour les personnes âgées de plus de 94 ans (**Kosatsky, 2005**).

Les vagues de chaleur mettent particulièrement en danger les groupes vulnérables, notamment les personnes âgées, les jeunes enfants et les personnes souffrant de handicaps physiques ou sociaux (**Rebetez et al., 2009**). En outre, les effets sur la santé des épisodes de chaleur extrême ne sont pas uniformes ; ils dépendent fortement de la vulnérabilité des individus et des communautés (**Health Canada, 2011**). Les acteurs publics locaux en France se concentrent de plus en plus sur la prévention et la réduction des risques humains associés à ces événements climatiques et socio-économiques. Il est essentiel de comprendre les vulnérabilités pour s'attaquer aux impacts de l'effet ICU. La vulnérabilité est un concept à multiples facettes qui englobe des facteurs physiques, sociaux, économiques, environnementaux et institutionnels qui influencent la manière dont les systèmes ou les populations réagissent aux aléas tels que le changement climatique (**Birkmann et al., 2013**). Il est façonné par trois composantes principales : l'exposition au danger, la sensibilité de la population touchée et sa capacité d'adaptation (**IPCC, 2007**). Dans le contexte des ICU, ces facteurs déterminent collectivement la mesure dans laquelle les individus et les communautés sont sensibles aux épisodes de chaleur extrême et capables d'y faire face. Cette étude adopte une double approche de la vulnérabilité, en évaluant à la fois les aspects physiologiques et socio-économiques afin d'obtenir une compréhension globale.

Reid et al. (2009) soulignent l'importance de comprendre la vulnérabilité individuelle à la chaleur, mais ils insistent sur le fait que des facteurs contextuels plus larges, tels que les caractéristiques de lieux spécifiques, jouent également un rôle important dans la détermination des niveaux de risque. Des études récentes ont développé cette idée, soulignant la nécessité pour les villes d'identifier les populations vulnérables, car les risques sanitaires associés aux chaleurs extrêmes ne sont pas uniformément répartis (**Hondula et al., 2015; Jung et al., 2021**). Cette approche ciblée permet une allocation plus efficace des ressources et la conception de plans d'urgence thermique sur mesure, garantissant que les interventions atteignent les personnes les plus à risque.

En réponse à cela, la recherche se concentre sur le développement d'un indice de vulnérabilité aux ICU (ICU-IV) pour la métropole de Clermont-Ferrand afin d'évaluer et de cartographier la vulnérabilité sociale aux ICU. L'ICU-IV intègre des données spatiales, météorologiques et socio-environnementales pour identifier les populations vulnérables, en particulier les enfants (moins de 14 ans) et les personnes âgées (plus de 65 ans), qui courent les plus grands risques en cas de chaleur extrême. En offrant aux urbanistes et aux responsables de la santé publique un outil dynamique pour l'évaluation continue de la vulnérabilité, cette étude vise à faciliter les interventions ciblées pour atténuer les risques liés à la chaleur. Les résultats seront partagés avec Clermont Auvergne Métropole et permettront d'identifier les points chauds et les zones à risque afin de soutenir la planification de la résilience et les mesures d'adaptation au changement climatique.

Cet article est organisé comme suit : la section « méthodologie » décrit le processus de travail et de recherche adopté pour l'étude. La section « zone d'étude » définit la portée géographique et le

contexte de la recherche. L'analyse de la littérature aborde les recherches existantes et les cadres théoriques pertinents. Les sections « collecte » et « traitement des données » décrivent les sources de données et les méthodes de traitement. La section « analyse des données » présente ensuite l'approche analytique, avant de passer aux « résultats » et à la « discussion », où les résultats sont discutés et interprétés.

II. MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de cette étude commence par établir les limites de la recherche, la métropole de Clermont-Ferrand, comme illustré à la Figure 1. L'étude est axée sur l'évaluation de l'indice de vulnérabilité sociale des ICU. Une analyse exhaustive de la littérature est menée pour identifier les principaux indicateurs de vulnérabilité sociale liés aux ICU. La collecte de données comprend des données spatiales, météorologiques et sociodémographiques provenant de différentes sources et de diverses plateformes de données. Les données collectées sont traitées, ce qui inclut le calcul de la température de surface terrestre (LST) et la cartographie démographique. L'analyse des données est effectuée à l'aide d'une méthode de superposition pondérée pour calculer l'indice de vulnérabilité sociale des ICU, où chaque indicateur se voit attribuer un poids en fonction de son influence. Enfin, les résultats sont visualisés et interprétés afin de communiquer efficacement les conclusions et leurs influences sur la vulnérabilité sociale aux ICU à Clermont Auvergne Métropole.

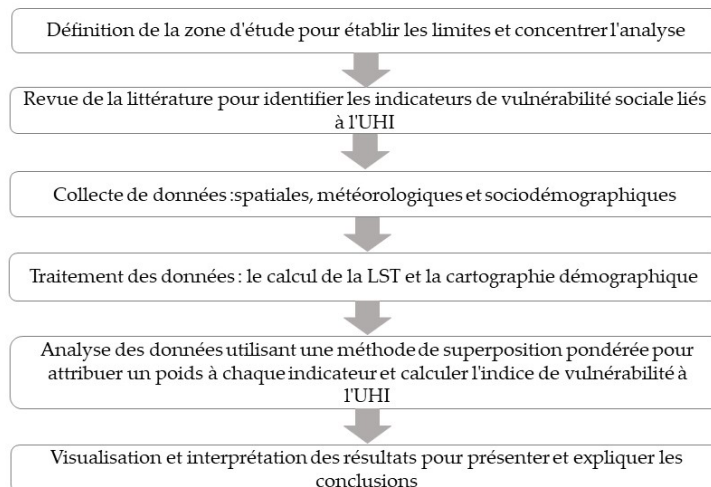


FIGURE 1. Méthodologie de recherche

3.1. Définition de la zone d'étude

La Métropole de Clermont-Ferrand, centrée sur la ville de Clermont-Ferrand, est située dans le département du Puy-de-Dôme, en région Auvergne-Rhône-Alpes, dans le centre de la France. La métropole s'étend sur une superficie de 300,6 km² et compte une population d'environ 300 000 habitants, englobant 21 communes (**Clermont Métropole, 2024**). La métropole est le point central de cette étude. Pour évaluer l'effet de l'ICU et comparer les températures urbaines et rurales, une circonférence de 5 km autour de la métropole a été appliquée. Cette approche a permis d'étendre la zone d'étude à 85 municipalités, comprenant à la fois des zones urbaines et rurales. La zone d'étude est illustrée dans la figure 2.

INDICE DE VULNÉRABILITÉ SOCIALE UHI : ZONE D'ÉTUDE

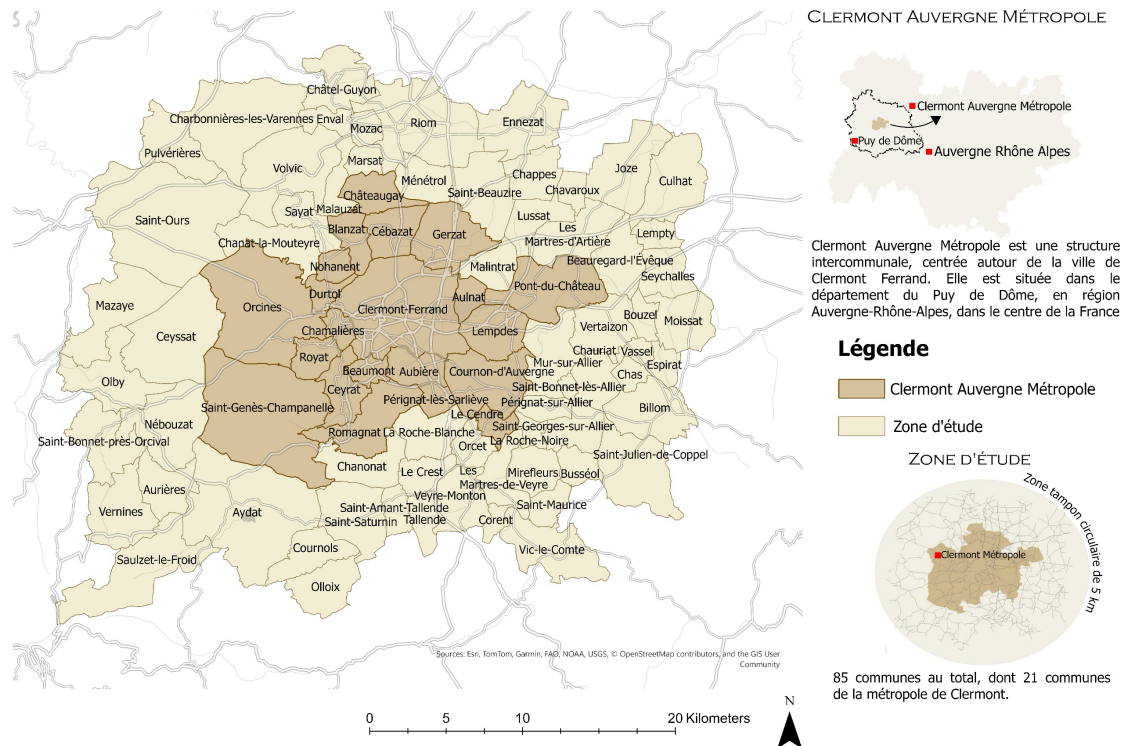


FIGURE 2. Zone d'Étude

Clermont Auvergne Métropole représente une zone urbaine de taille moyenne, qui offre une occasion unique d'aborder une dimension sous-explorée de la recherche sur les ICU. Alors que la plupart des études sur les ICU se concentrent sur les grandes zones métropolitaines, où des ensembles de données étendus sont facilement disponibles, les villes de taille moyenne font l'objet d'un manque d'attention relatif. En se concentrant sur la Métropole de Clermont-Ferrand, cette étude vise à l'utiliser comme un cas pilote pour des contextes urbains similaires afin de mieux comprendre les effets de l'ICU dans les villes de cette taille.

3.2. Revue de la littérature : indicateurs de vulnérabilité sociale à l'ICU

La vulnérabilité est le degré auquel un système est exposé et incapable de s'adapter aux effets négatifs du changement climatique, y compris la variabilité et les événements extrêmes. Le cadre de vulnérabilité du GIEC (IPCC, 2007) défini comme « Vulnérabilité = Exposition + Sensibilité – Capacité d'adaptation », reste central dans les études sur la vulnérabilité des ICU. Cette section examine les méthodes utilisées pour identifier les principaux indicateurs de vulnérabilité sociale liés à l'effet ICU.

La plupart des études utilisent le cadre de vulnérabilité du GIEC (2007) comme modèle de base, soulignant l'interconnexion des effets des ICU. Par exemple, **Sidiqui et al. (2022)** appliquent une analyse géospatiale combinée à des données socio-démographiques pour élaborer des cartes de vulnérabilité thermique urbaine. Leur approche intègre des variables telles que la réduction de la végétation, le pourcentage de surfaces imperméables et des facteurs socio-économiques comme la

population âgée et l'accès aux soins médicaux. Cette méthode met en évidence l'influence des conditions locales sur les risques liés à la chaleur urbaine.

De même, **Abrar et al. (2022)** utilisent un indice de vulnérabilité à la chaleur (IVC) basé sur 26 paramètres, intégrant des données satellitaires, des statistiques démographiques et des données météorologiques pour identifier les zones vulnérables à la chaleur à Dhaka. Les deux études montrent l'efficacité de la combinaison des facteurs environnementaux et sociaux pour des évaluations précises de la vulnérabilité. Toutefois, tandis que **Sidiqui et al (2022)** analysent la variabilité spatiale à l'échelle micro, l'IVC d' **Abrar et al. (2022)** adopte une approche régionale.

L'étude de **Techar et al. (2023)** repose sur une approche intégrant les réglementations d'urbanisme dans l'évaluation de la vulnérabilité aux ICU. Cette intégration comble le fossé entre climatologie et politique urbaine, apportant une avancée méthodologique pour la cartographie de la vulnérabilité.

Un thème récurrent dans les études est l'impact disproportionné des ICU sur les populations marginalisées. **Grislain-Létrémy et al. (2024)** examinent le lien entre exposition aux ICU et inégalités socio-économiques, montrant que les communautés à faible revenu habitent plus souvent des zones à risque, avec peu d'espaces verts et un habitat de mauvaise qualité. Ces résultats rejoignent ceux de **Quintana-Talvac et al. (2021)**, qui soulignent une « iniquité thermique » dans les villes côtières moyennes, où les minorités raciales et ethniques subissent davantage les risques sanitaires liés à la chaleur en raison d'un urbanisme inadapté et d'un accès limité aux infrastructures de rafraîchissement.

Comparativement, **Nayak et al. (2018)** soulignent l'importance des facteurs démographiques, notamment l'âge (< 5 ans, > 65 ans), dans les profils de vulnérabilité. Leur indice de vulnérabilité à la chaleur met ces populations en priorité, ainsi que les inégalités de revenu, soulignant les risques aggravés pour les populations socioéconomiquement défavorisées.

Tout en nous appuyant sur les études existantes et leurs indicateurs, nous adaptons notre approche au contexte régional, en veillant à ce que les variables choisies correspondent aux données disponibles et aux contraintes temporelles du projet. Bien que certaines méthodologies offrent des résultats intéressants, leur applicabilité peut être limitée par l'usage de données propriétaires ou restreintes, soulignant ainsi l'importance d'adapter les évaluations pour exploiter au mieux les données accessibles. Notre objectif est de tirer des enseignements pertinents malgré ces contraintes, en répondant aux défis spécifiques de la zone d'étude. Dans cette recherche, nous pallions les limites des évaluations existantes de la vulnérabilité aux ICU en exploitant des données open-source et des API pour évaluer l'intensité des ICU et cartographier la vulnérabilité sociale au sein de la Métropole de Clermont-Ferrand. En nous appuyant sur le cadre de vulnérabilité du GIEC, nous intégrons des données spatiales, météorologiques et socio-démographiques afin d'évaluer les impacts des ICU sur les enfants de moins de 14 ans et les personnes âgées de plus de 65 ans, identifiés comme groupes particulièrement à risque. En combinant les données d'intensité des ICU avec des indicateurs de vulnérabilité issus de la littérature—tels que l'accès aux espaces verts, la densité de population et le statut social—nous développons un indice de vulnérabilité aux ICU (ICU-IV).

3.3. Collecte des données

Cette étude intègre des données provenant de plusieurs plateformes. Les données spatiales ont été obtenues via l'Open Data Clermont Métropole (**Open Data Clermont Auvergne Métropole, 2025**), le portail open data du gouvernement français (**data.gouv.fr, 2024**) et la plateforme OpenDataSoft (**Opendatasoft, 2024**). Les données météorologiques proviennent de l'API OpenWeatherMap (**OpenWeatherMap, 2024**) et de la plateforme USGS Earth Explorer (**USGS.Gov, 2024**). Les données socio-démographiques ont été recueillies auprès de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (**Recensement de La Population | Insee, 2021**). Enfin, les données topographiques ont été collectées via l'API Google.

En raison de la disponibilité limitée des données météorologiques pour chaque commune, des données historiques ont été collectées via l'API OpenWeatherMap, qui offre un ensemble complet d'informations météorologiques, incluant les conditions actuelles, historiques et prévues. Les variables clés incluent la température (min, max, matin, après-midi, soir, nuit), la pression (hPa), la couverture nuageuse (%), l'humidité (%), les précipitations (mm) et la vitesse maximale du vent (m/s) avec sa direction (°). Un script Python a été utilisé pour automatiser et gérer efficacement la collecte des données. Cette approche économique et flexible s'aligne avec plusieurs études intégrant diverses sources de données et fournissant des analyses exploitables pour relever les défis urbains (**Aljer et al., 2024; Itair et al., 2024; Mansour et al., 2024**).

Les données ont été collectées pour les mois critiques de juillet et août des années 2015, 2019, 2023 et 2024, identifiées comme des années particulièrement chaudes d'après les analyses du site Meteoblue (**Météo Clermont-Ferrand, 2024**). Ces données météorologiques historiques ont ensuite été intégrées aux plateformes SIG pour la visualisation spatiale et l'analyse ultérieure, comme illustré à la Figure 3.

INTENSITÉ DES ICU : DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES HISTORIQUES (05/08/2023 - 25/08/2023)

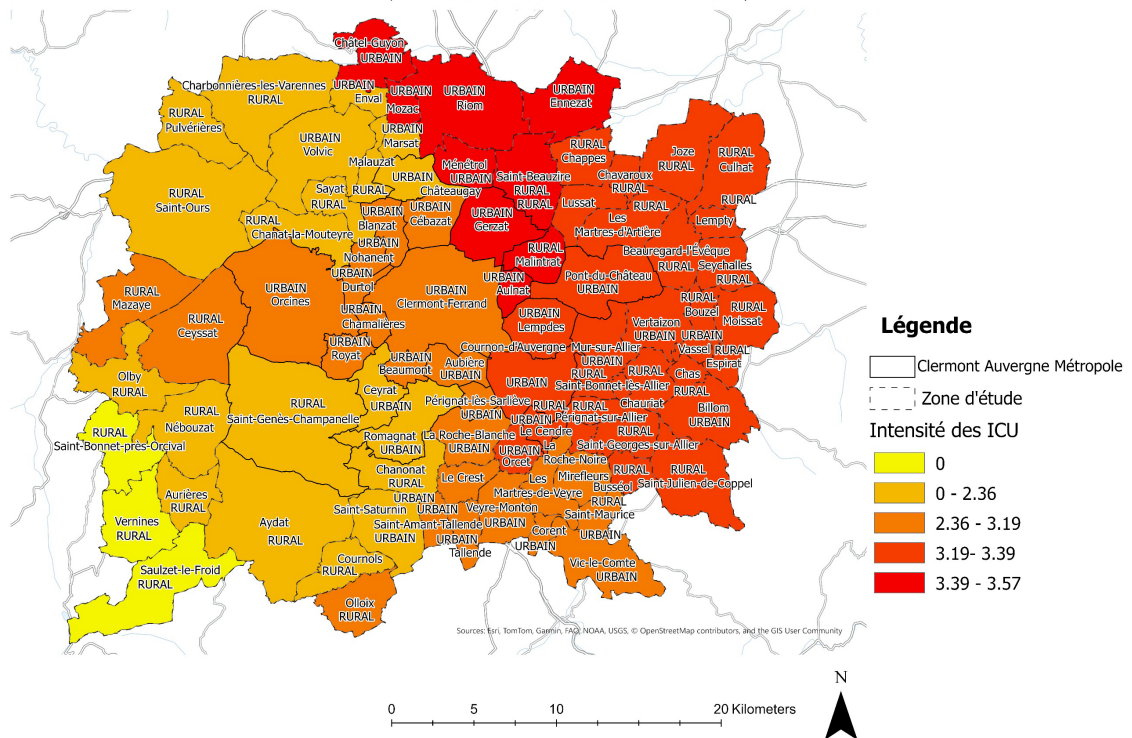


FIGURE 3. Intensité de l'ICU

La Figure 3 illustre les variations de température entre les zones urbaines et rurales de la Métropole Clermont Auvergne à partir des données météorologiques historiques. Les résultats confirment un effet ICU clair, avec des zones urbaines, en particulier Clermont-Ferrand, Riom et Gerzat, enregistrant des augmentations de température allant de 2,36°C à 3,57°C par rapport aux zones rurales environnantes. En revanche, les régions rurales présentent des températures plus basses. Ces résultats mettent en évidence l'impact de l'urbanisation sur les modèles de température locaux et l'accumulation de chaleur.

3.4. Traitement des données

Cette section décrit les étapes de traitement pour le calcul de la température de surface terrestre (LST) et la cartographie des données démographiques afin d'évaluer la vulnérabilité sociale à l'effet des îlots de chaleur urbains.

- Calcul de la LST

L'image Landsat 8 du 11 août 2024 a été sélectionnée pour le calcul de la LST, car elle correspond à la température la plus élevée enregistrée pour l'année. L'image, avec une résolution de 30 mètres, couvre l'ensemble de la zone d'étude. L'estimation de la LST a été réalisée selon un processus systématique basé sur les données thermiques de Landsat 8. Les bandes principales utilisées pour le calcul incluent la Bande 10 pour les mesures thermiques, et les Bandes 4 et 5 pour les indices de végétation.

Les principaux calculs pour la LST incluent la radiance, la température de brillance, la proportion de végétation et l'émissivité. Ces calculs permettent les risques de chaleur urbaine (Avdan & Jovanovska, 2016). La LST finale a été calculée à l'aide de la formule :

$$LST = \frac{BT}{1 + (w * BT)/14380 * \ln(E)}$$

Où :

- LST = Température de Surface Terrestre (°C)
- w = longueur d'onde de la radiance émise
- BT = Température de Brillance au sommet de l'atmosphère
- E = Émissivité de la Surface Terrestre

La LST obtenue est cartographiée pour mettre en évidence les gradients de température dans la zone d'étude. La Figure 4 montre la distribution spatiale, avec des températures plus élevées dans les centres urbains à surfaces imperméables denses, tandis que les zones végétalisées sont plus fraîches, soulignant le rôle des espaces verts dans l'atténuation de la chaleur urbaine.

TEMPÉRATURE DE LA SURFACE TERRESTRE (LST)

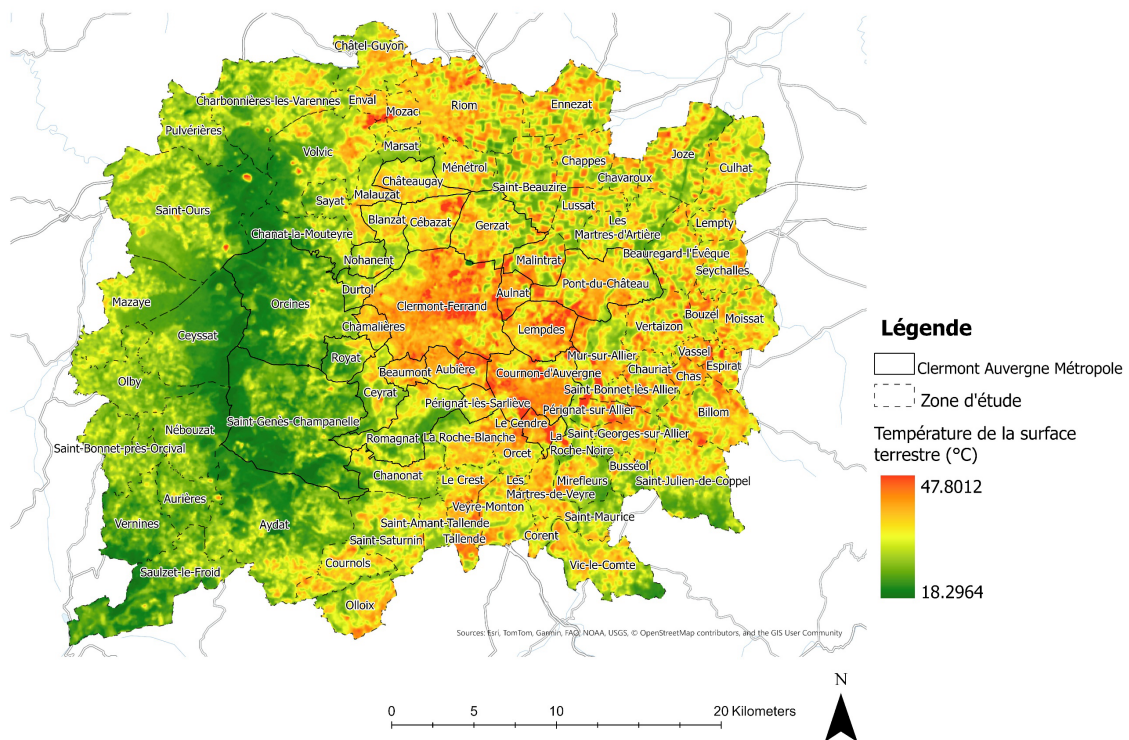


FIGURE 4. Température de Surface Terrestre (LST)

- Cartographie démographique

Les paramètres démographiques ont été intégrés pour évaluer la vulnérabilité aux ICU, avec un accent particulier sur les personnes âgées (≥ 65 ans), plus vulnérables aux problèmes de santé liés à la chaleur lors des vagues de chaleur en raison de facteurs tels que la réduction de la thermorégulation, les comorbidités et l'utilisation de certains médicaments. La littérature souligne

que les personnes âgées sont plus exposées au stress thermique, ce qui en fait un groupe clé pour évaluer les impacts des ICU (Nayak et al., 2018). De plus, les populations de moins de 14 ans ont également été considérées comme vulnérables, les enfants étant exposés à des risques de santé tels que la déshydratation et l'épuisement par la chaleur lors des vagues de chaleur (Inostroza et al., 2016 ; Wandl & van der Hoeven, 2014).

La densité de population et la distribution de ces groupes vulnérables ont été calculées à l'aide du jeu de données "carreaux" de l'INSEE, qui fournit des données à une résolution de 1 km². Ces couches démographiques ont été alignées spatialement avec les polygones des zones urbanisées et soumises à une interpolation détaillée pour améliorer la précision et la résolution des données. Cela a permis la cartographie de la densité démographique (Figure 5), facilitant l'évaluation de la sensibilité des groupes vulnérables à la chaleur en tant qu'indicateur de vulnérabilité aux ICU.

POURCENTAGE DE DENSITÉ DES GROUPES VULNÉRABLES

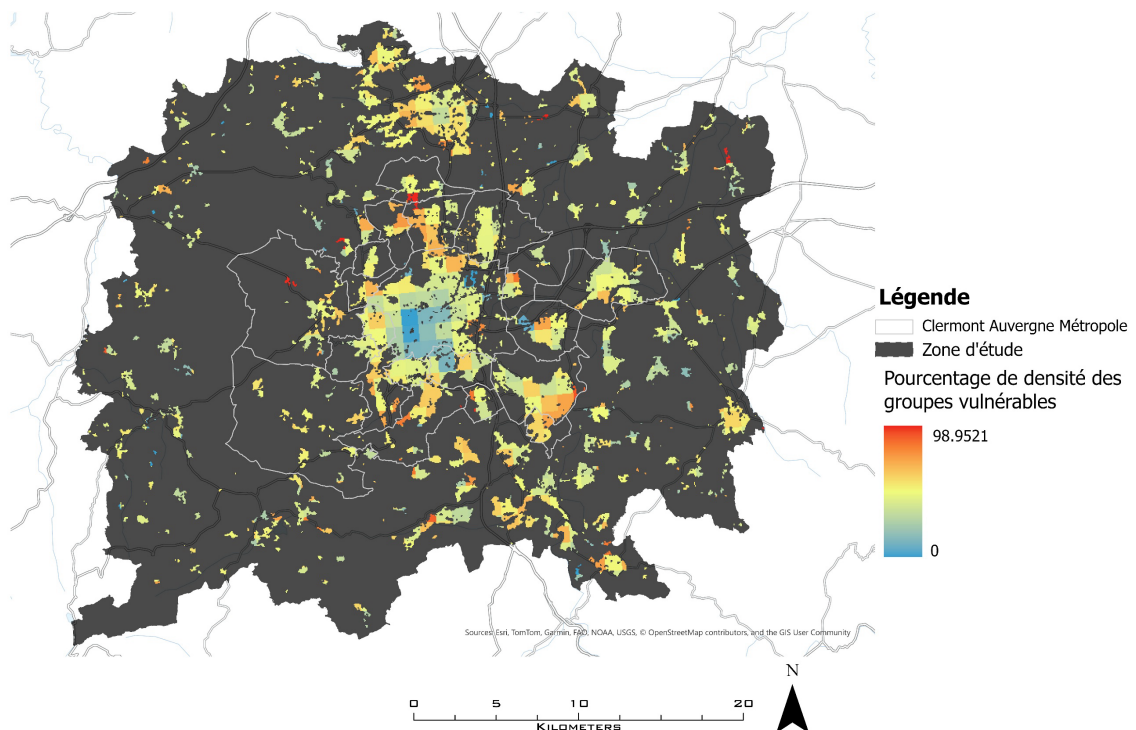


FIGURE 5. Pourcentage de la Densité des Groupes Vulnérables

3.5. Analyse des données

Le calcul de l'indice de vulnérabilité sociale aux ICU dans cette étude suit une méthode de superposition pondérée, qui intègre plusieurs paramètres de vulnérabilité. Ces paramètres ont été identifiés à travers une revue de littérature exhaustive et sont classés en trois dimensions clés : Exposition, Sensibilité et Capacité d'adaptation.

- Exposition

L'exposition fait référence à la mesure dans laquelle les personnes, les biens et les écosystèmes se trouvent dans des zones sujettes aux risques de chaleur (Birkmann et al., 2013). Les indicateurs

d'exposition mesurent les facteurs physiques et environnementaux qui amplifient les effets des ICU, tels que la température, la LST, la topographie et la densité de population. Ces éléments déterminent l'intensité et la propagation de la chaleur urbaine (Inostroza et al., 2016; Wandl & van der Hoeven, 2014).

TABLEAU 1. Indicateurs d'exposition

Indicateur	Description	Unité	Impact	Référence
Densité de population	Le nombre moyen de personnes vivant par unité de surface	Personnes/km ²	Positif	(Alonso and Renard 2020).
Température de Surface Terrestre (LST)	Reflète le rayonnement thermique provenant du sol et d'autres surfaces	Celsius (°C)		(Avdan & Jovanovska, 2016)
Intensité des ICU	Mesure la différence de température entre les zones urbaines et rurales	Celsius (°C)		(Oke & Fuggle, 1972)
Topographie	Altitude	Mètre (m)	Négatif	(Técher et al., 2023)

- Sensibilité

La sensibilité est le degré de réaction des populations ou des écosystèmes au stress thermique (Leal Filho et al., 2018). Les indicateurs de sensibilité reflètent les traits sociaux et démographiques qui augmentent la vulnérabilité, y compris les personnes âgées (> 65), les individus atteints de maladies chroniques, les populations à faible revenu, les personnes socialement isolées, les enfants, les personnes handicapées, les minorités raciales et celles ayant un faible niveau d'éducation. Ces groupes sont plus susceptibles aux impacts de la chaleur en raison de facteurs de santé et socio-économiques (Wolf & McGregor, 2013).

TABLEAU 2. Indicateurs de sensibilité

Indicateur	Description	Unit	Impact	Référence
NDBI	NDBI détecte les zones urbaines ou construites	N/A	Positif	(Abrar et al., 2022)
Hauteur des bâtiments	La mesure verticale d'une structure	Mètre (m)		(Sabrin et al., 2020)
Densité des Groupes Vulnérables	Enfants de moins de 14 ans et adultes de plus de 65 ans	Personnes vulnérables/km ²		(Leal Filho et al., 2018)

- Capacité d'adaptation

La capacité d'adaptation fait référence à la capacité d'un système et d'une population à réagir efficacement aux variations climatiques et aux changements, par des ajustements comportementaux ainsi que par des changements dans les ressources et les technologies (IPCC, 2007). Les indicateurs de capacité d'adaptation évaluent les ressources et les infrastructures qui aident à atténuer les effets des ICU, telles que la mobilité, l'accès à l'information et au soutien social, la disponibilité des soins de santé, et les équipements publics comme les centres communautaires,

les abris et les cliniques. Ces facteurs mettent en évidence la résilience d'une communauté face au stress thermique (Wolf & McGregor, 2013).

TABLEAU 3. Indicateurs de Capacité d'Adaptation

Indicateur	Description	Unit	Impact	Référence
Espaces verts (NDVI)	Le NDVI mesure et évalue la présence, la santé et la densité de la végétation.	N/A	Positif	(Avdan & Jovanovska, 2016; Wandl & van der Hoeven, 2014)
Proximité des zones naturelles	Distance aux zones naturelles	Mètre (m)		(Marando et al., 2022)
Capacité des infrastructures	La proximité des infrastructures telles que les centres de santé et les espaces récréatifs offre des abris de refroidissement.	Mètre (m)		(Abrar et al., 2022; Técher et al., 2023; Wolf & McGregor, 2013)

Plusieurs études ont utilisé différentes méthodes pour déterminer les poids dans les évaluations de vulnérabilité aux ICU, en fonction du contexte local et des données disponibles. Par exemple, **Abrar et al. (2022)** à Dhaka ont utilisé l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour identifier les paramètres les plus influents, avec la LST et la densité de population recevant les poids les plus élevés. À Amiens (**Qureshi & Rachid, 2022**), le jugement d'experts et les modèles hiérarchiques ont été utilisés, en privilégiant des facteurs socio-économiques comme l'âge de la population. **Técher et al. (2023)** à Montpellier ont intégré les considérations d'urbanisme, attribuant le poids le plus élevé aux infrastructures vertes pour leur rôle dans l'atténuation des effets des ICU.

Dans cette étude, le modèle de pondération dynamique dans l'outil Model Builder d'ArcGIS Pro a été utilisé pour attribuer des poids à chaque paramètre en fonction de leur influence perçue sur la vulnérabilité aux ICU. Ce modèle permet des ajustements flexibles des poids pour toute modification future des pondérations.

L'indice de vulnérabilité aux ICU a été calculé selon deux scénarios. Ces scénarios ont appliqué des pondérations spécifiques aux indicateurs d'exposition, de sensibilité et de capacité d'adaptation afin de simuler différentes conditions et d'évaluer leur influence sur les résultats de vulnérabilité (Tableau 4). Ces pondérations ont été attribuées en s'inspirant de la littérature, mais seront finalisées ultérieurement après consultation des experts de Clermont Auvergne Métropole.

TABLEAU 4. Pondérations des Scénarios

		Scénario 1	Scénario 2
	Indicateur	Poids attribués	Poids attribués
Exposition	LST	10%	20%
	Intensité des ICU	10%	20%
	Densité de population	6%	5%
	Topographie	4%	5%
Sensibilité	Densité des Groupes Vulnérables	30%	15%
	NDBI	12%	8%
	Hauteur des bâtiments	8%	7%
Capacité d'adaptation	NDVI	7%	7%
	Proximité des zones naturelles	5%	7%
	Capacité des infrastructures	8%	6%

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans le premier scénario, les indicateurs de sensibilité ont reçu le poids le plus élevé (50%), reflétant l'importance cruciale des groupes vulnérables dans la détermination du risque global. Parmi ces indicateurs, la densité des groupes vulnérables a reçu la plus grande part (30%) pour souligner son rôle central dans la sensibilité. Les indicateurs d'exposition ont un poids modéré (30%) pour prendre en compte les facteurs environnementaux contribuant aux risques liés à la chaleur, tandis que la capacité d'adaptation a été réduite à 20%, mettant en évidence la résilience limitée des zones urbaines.

La composition démographique de la région d'étude révèle que 20,8% de la population a plus de 65 ans et 16,4% ont moins de 14 ans, soit 37,2% de la population totale appartenant à des groupes vulnérables, ce qui souligne la nécessité de prioriser ces groupes dans l'évaluation de la sensibilité à la chaleur urbaine.

Les populations vulnérables, en particulier les personnes âgées et les enfants, sont exposées à un risque accru lors des vagues de chaleur extrêmes, comme l'a souligné la canicule de 2003 en France, qui a causé environ 15 000 décès, principalement parmi les personnes âgées (**The International Disaster Database, 2022**).

Les enfants, également très vulnérables en raison de leurs systèmes de thermorégulation en développement et de leur mode de vie actif en extérieur, ont suscité une attention accrue dans les stratégies liées aux vagues de chaleur. Des programmes tels que le Programme Paris Oasis Schoolyard (**Paris Oasis Schoolyard Programme, France, 2022**) se concentrent sur la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbaine en transformant les cours d'écoles en espaces plus frais et plus verts, offrant ainsi des environnements plus sûrs pour les enfants.

Les résultats du Scénario 1 (Figure 6) soulignent le rôle crucial de la densité des groupes vulnérables dans la détermination de l'indice de vulnérabilité aux ICU. Des communes telles que

Chamalières et Beaumont, qui comptent une forte proportion de personnes âgées et d'enfants, présentent les indices de vulnérabilité les plus élevés.

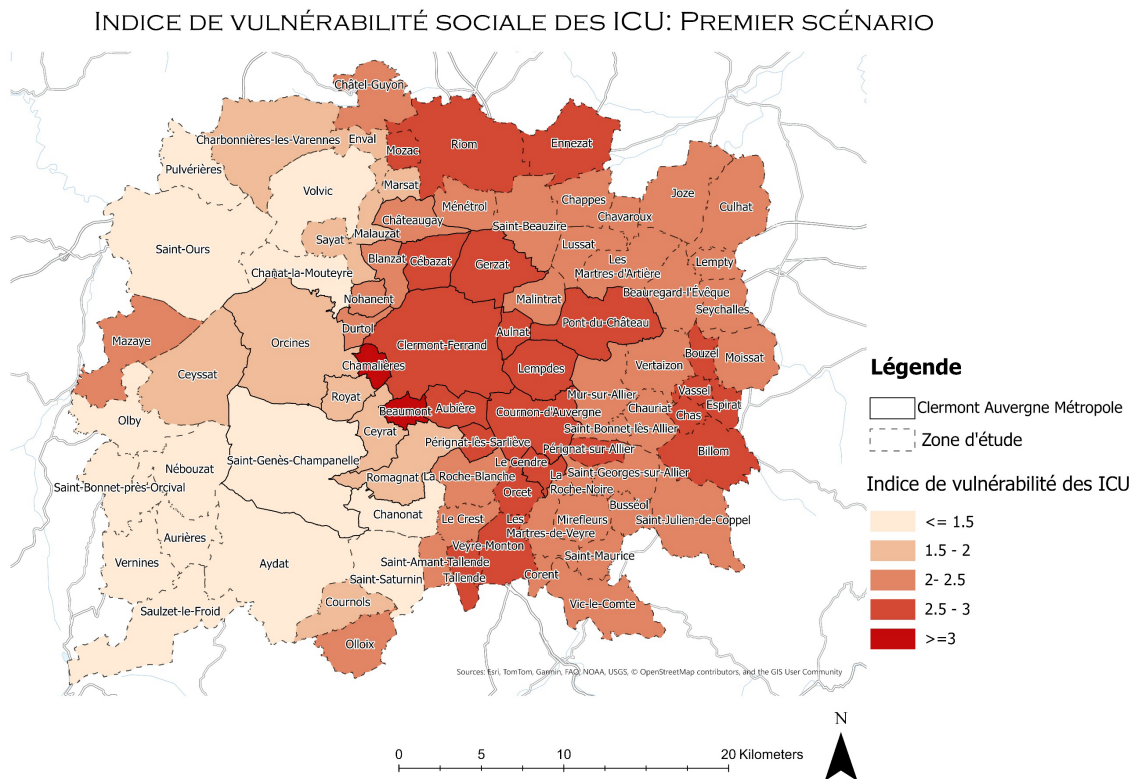


FIGURE 6. Indice de Vulnérabilité Sociale de l'ICU : premier Scénario

De plus, les 22 communes avec des indices de vulnérabilité supérieurs à 2,5 montrent également une vulnérabilité importante, alimentée non seulement par la présence de groupes vulnérables mais aussi par l'exposition aux effets des ICU. Bien que ces communes n'aient pas la plus forte concentration de populations vulnérables, leurs risques sont amplifiés par des facteurs socio-économiques qui limitent leur capacité d'adaptation. Cela souligne l'importance d'une approche globale qui intègre à la fois la composition démographique et les facteurs environnementaux pour évaluer efficacement la vulnérabilité à la chaleur.

Étant donné la fréquence et l'intensité croissantes des vagues de chaleur dues au changement climatique, évaluer la vulnérabilité dans ces conditions est crucial, car l'exposition devient le facteur principal influençant les risques sanitaires. Le deuxième scénario met l'accent sur les indicateurs d'exposition, leur attribuant le poids le plus élevé (50%), avec la température de surface terrestre (20%), l'intensité des ICU (20%), la densité de la population (5%) et la topographie (5%) comme contributeurs clés. Les indicateurs de sensibilité ont un poids modéré (30%), tandis que la capacité d'adaptation a un poids inférieur (20%). Cette configuration a été conçue pour simuler la vulnérabilité lors de conditions extrêmes de vagues de chaleur.

En priorisant les indicateurs d'exposition, ce scénario met en évidence comment des facteurs tels que la température de surface terrestre élevée et l'intensité des ICU exacerbent les risques pendant

les vagues de chaleur, en particulier dans les zones fortement urbanisées avec peu d'espaces verts et des topographies variées.

Les résultats de l'analyse spatiale pour ce deuxième scénario ont révélé des schémas critiques de vulnérabilité (Figure 7). Un total de 17 communes a été identifié avec un indice de vulnérabilité supérieur à 3, ces zones montrant une forte corrélation avec des températures de surface terrestre (LST) et une intensité de l'îlot de chaleur urbaine (ICU) élevées. Il est à noter que ces communes vulnérables étaient principalement situées dans la partie Est de la zone d'étude, où l'urbanisation et la faible présence d'espaces verts aggravent l'exposition aux conditions de chaleur extrême.

INDICE DE VULNÉRABILITÉ SOCIALE DES ICU: DEUXIÈME SCÉNARIO

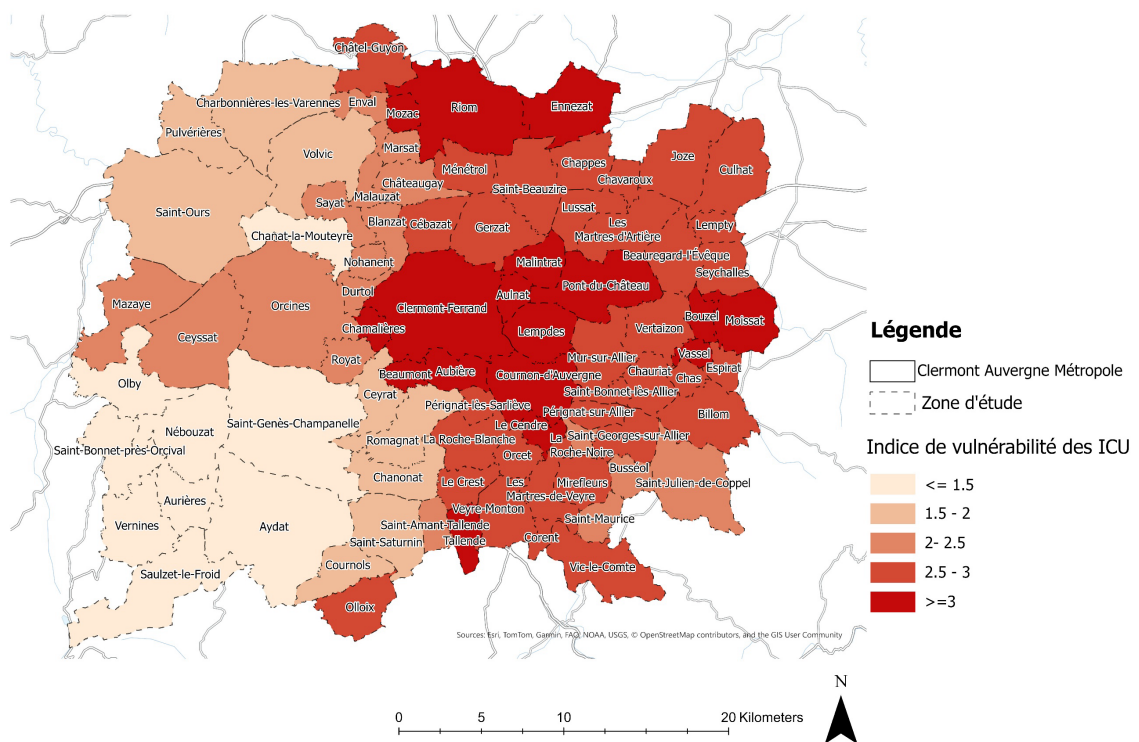


FIGURE 7. Indice de Vulnérabilité Sociale de l'ICU: deuxième Scénario

De plus, 33 communes ont montré un indice de vulnérabilité supérieur ou égal à 2,5, mettant en évidence un ensemble plus large de zones confrontées à des risques importants pendant les vagues de chaleur. En outre, 17 communes ont présenté un indice de vulnérabilité supérieur ou égal à 2, renforçant l'impact généralisé des facteurs d'exposition dans la formation des modèles de vulnérabilité. Ces résultats soulignent le rôle fondamental des indicateurs d'exposition tels que la température de surface terrestre (LST), l'intensité de l'îlot de chaleur urbaine (ICU) et la densité de population dans la détermination de la vulnérabilité lors des événements de chaleurs extrêmes.

La compréhension du phénomène de l'ICU peut également être améliorée en étudiant les comportements réels des citoyens et leurs interactions avec les événements de chaleurs extrêmes. Les approches participatives qui impliquent activement les communautés locales offrent des perspectives précieuses sur la façon dont les individus perçoivent et réagissent aux défis urbains. Ces approches peuvent aider à identifier des pratiques adaptatives spécifiques au contexte et à

orienter des politiques urbaines plus inclusives et efficaces. Par exemple, les observations et retours des citoyens peuvent compléter les données spatiales traditionnelles, permettant ainsi une compréhension plus dynamique et globale de la dynamique de l'UHI (Itair et al., 2024; Kim et al., 2024).

III. Conclusion

Cette étude a développé un indice de vulnérabilité sociale de l'îlot de chaleur urbaine (ICU-IV) basé sur un SIG pour évaluer et cartographier la vulnérabilité sociale dans la Métropole de Clermont-Ferrand. En intégrant des données météorologiques, spatiales et socio-environnementales, l'analyse met en évidence les risques disproportionnés auxquels sont confrontés les groupes vulnérables, en particulier les enfants de moins de 14 ans et les personnes âgées de plus de 65 ans, lors des événements de chaleurs extrêmes. Deux scénarios ont été examinés pour explorer différents schémas de pondération des indicateurs d'exposition, de sensibilité et de capacité d'adaptation.

Les résultats révèlent que les communes à forte densité de populations vulnérables, telles que Chamalières et Beaumont, présentent des scores de vulnérabilité nettement plus élevés. Ces résultats soulignent les effets cumulés des facteurs démographiques et de l'exposition environnementale dans la détermination des risques liés à la chaleur urbaine. De plus, la priorisation des indicateurs d'exposition dans le deuxième scénario montre comment les zones densément urbanisées avec peu d'espaces verts font face à des risques accrus lors des conditions extrêmes de vagues de chaleur.

Les enseignements tirés de cette étude fournissent un outil précieux de soutien à la décision pour les urbanistes et les décideurs politiques. En identifiant les zones de chaleur urbaine (ICU) et les zones socialement vulnérables, des interventions ciblées peuvent être mises en place pour atténuer les impacts des vagues de chaleurs extrêmes. Des mesures telles que l'augmentation des espaces verts, l'amélioration de l'accès aux infrastructures de refroidissement et le renforcement des capacités d'adaptation par des stratégies de santé publique sont essentielles pour améliorer la résilience urbaine.

Les travaux futurs se concentreront sur l'analyse des vulnérabilités à une échelle plus fine, comme celle des quartiers, afin de mieux saisir les risques thermiques au niveau micro et les dynamiques spécifiques des communautés. L'exploitation des méthodologies des villes intelligentes — telles que l'analyse de la syntaxe de l'espace, la modélisation de l'information du bâtiment (BIM) et les approches participatives — améliorera la collecte de données et soutiendra une prise de décision urbaine plus inclusive et fondée sur les données.

Bien que la méthodologie intègre avec succès des données open-source et des techniques d'analyse, plusieurs limitations existent. Les études futures devraient également explorer des approches de pondération dynamique en collaboration avec des experts locaux et des citoyens pour affiner les évaluations de vulnérabilité et mieux tenir compte des conditions climatiques évolutives.

Enfin, cette étude démontre l'importance des évaluations complètes de la vulnérabilité dans la gestion des risques liés à la chaleur urbaine. Le cadre proposé pour l'Indice de Vulnérabilité à l'îlot de chaleur urbaine (ICU-VI) offre une approche reproductible pour des villes de taille moyenne

similaires, contribuant ainsi aux efforts plus larges visant à relever les défis de l'adaptation au changement climatique dans un contexte d'urbanisation croissante et de changement climatique.

Remerciements

Les auteurs expriment leur profonde gratitude à Clermont Auvergne Métropole pour son soutien et la mise à disposition des jeux de données essentiels. Ils remercient également le GAPAVE pour le financement de la thèse de doctorat du premier auteur, dans le cadre de laquelle cette recherche a été menée.

REFERENCES

- Abrar, R., Sarkar, S. K., Nishtha, K. T., Talukdar, S., Shahfahad, Rahman, A., Islam, A. R. M. T., & Mosavi, A. (2022). Assessing the Spatial Mapping of Heat Vulnerability under Urban Heat Island (UHI) Effect in the Dhaka Metropolitan Area. *Sustainability, 14*(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/su14094945>
- Aljer, A., Itair, M., & shahrour, I. (2024). *Knowledge Infrastructure Data Wizard (KIDW): A Cooperative Approach for Data Management and Knowledge Dissemination* (pp. 34–43). https://doi.org/10.1007/978-3-031-53824-7_4
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors, 2016*(1), 1480307. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Birkmann, J., Cardona, O., Tibaduiza, M., Barbat, A., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., & Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework. *Natural Hazards, 67*, 193–211. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0558-5>
- Clermont Métropole. (2024). *Chiffres clés*. <https://www.clermontmetropole.eu/ma-metropole/la-carte-et-le-territoire/chiffres-cles/>
- Data.gouv.fr. (2024). <https://www.data.gouv.fr/fr/posts/extinction-de-geo-data-gouv-fr/>
- EU Strategy on Adaptation to Climate Change (2021). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN>
- Grislain-Létrémy, C., Sixou, J., & Sotura, A. (2024). *Urban Heat Islands and Inequalities: Evidence from French Cities*.
- Health Canada. (2011, December 13). *Adapting to Extreme Heat Events: Guidelines for Assessing Health Vulnerability* [Navigation page]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/climate-change-health/adapting-extreme-heat-events-guidelines-assessing-health-vulnerability-health-canada-2011.html>
- Hondula, D. M., Davis, R. E., Saha, M. V., Wegner, C. R., & Veazey, L. M. (2015). Geographic dimensions of heat-related mortality in seven U.S. cities. *Environmental Research, 138*, 439–452. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.033>
- Inostroza, L., Palme, M., & Barrera, F. de la. (2016). A Heat Vulnerability Index: Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile. *PLOS ONE, 11*(9), e0162464. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162464>
- IPCC (Ed.). (2007). *Climate Change 2007: Synthesis report: a report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

- Itair, M., Hijazi, I., MANSOUR, S., & Isam, S. (2024). *Empowering Sustainability Advancement in Urban Public Spaces Through Low-Cost Technology and Citizen Engagement* (pp. 292–299). https://doi.org/10.1007/978-3-031-53824-7_26
- Itair, M., Shahrour, I., El Meouche, R., & Hattab, N. (2024). Enhancing Building Services in Higher Education Campuses through Participatory Science. *Buildings*, 14(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/buildings14092784>
- Jung, J., Uejio, C., Kintziger, K., Duclos, C., Reid, K., Jordan, M., & Spector, J. (2021). Heat illness data strengthens vulnerability maps. *BMC Public Health*, 21. <https://doi.org/10.1186/s12889-021-12097-6>
- Kim, E. S., Bae, C., Ko, S. Y., Won, J. E., Lee, J. H., Paio, Y., & Lee, D. K. (2024). Enhancing the effectiveness of heat adaptation strategies through citizen science-based outdoor thermal comfort. *Heliyon*, 10(21). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39413>
- Kosatsky, T. (2005). The 2003 European heat waves. *Eurosurveillance*, 10(7), 3–4. <https://doi.org/10.2807/esm.10.07.00552-en>
- Leal Filho, W., Echevarria Icaza, L., Neht, A., Klavins, M., & Morgan, E. A. (2018). Coping with the impacts of urban heat islands. A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1140–1149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.086>
- Mansour, S., Sassine, R., & Guibert, S. (2024). *Leveraging Diverse Data Sources for ESTP Campus Digital Twin Development: Methodology and Implementation* (p. 257). https://doi.org/10.1007/978-3-031-54376-0_22
- Marando, F., Heris, M. P., Zulian, G., Udías, A., Mentaschi, L., Chrysoulakis, N., Parastatidis, D., & Maes, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103564. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
- Météo Clermont-Ferrand. (2024). meteoblue. https://www.meteoblue.com/fr/meteo/semaine/clermont-ferrand_france_3024635
- Nayak, S. G., Shrestha, S., Kinney, P. L., Ross, Z., Sheridan, S. C., Pantea, C. I., Hsu, W. H., Muscatiello, N., & Hwang, S. A. (2018). Development of a heat vulnerability index for New York State. *Public Health*, 161, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.09.006>
- Oke, T. R., & Fuggle, R. F. (1972). Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology*, 2(3), 290–308. <https://doi.org/10.1007/BF02184771>
- Open Data Clermont Auvergne Métropole. (2025). <https://opendata.clermontmetropole.eu/explore/?refine.theme=Citoyennet%C3%A9+-+Institution&disjunctive.publisher&sort=modified>
- Opendatasoft. (2024). <https://public.opendatasoft.com/explore/?sort=modified>
- OpenWeatherMap. (2024). <https://openweathermap.org/>
- Paris Oasis Schoolyard Programme, France. (2022). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/case-studies/paris-oasis-schoolyard-programme-france>
- Quintana-Talvac, C., Corvacho-Ganahin, O., Smith, P., Sarricolea, P., Prieto, M., & Meseguer-Ruiz, O. (2021). Urban Heat Islands and Vulnerable Populations in a Mid-Size Coastal City in an Arid Environment. *Atmosphere*, 12, 917. <https://doi.org/10.3390/atmos12070917>
- Qureshi, A. M., & Rachid, A. (2022). Heat Vulnerability Index Mapping: A Case Study of a Medium-Sized City (Amiens). *Climate*, 10(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/cli10080113>
- Rebetez, M., Dupont, O., & Gaillard, M. (2009). An analysis of the July 2006 heatwave extent in Europe compared to the record year of 2003. *Theoretical and Applied Climatology*, 95. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0370-9>

- Recensement de la population* | Insee. (2021). <https://www.insee.fr/fr/statistiques/8272002>
- Reid, C. E., O'Neill, M. S., Gronlund, C. J., Brines, S. J., Brown, D. G., Diez-Roux, A. V., & Schwartz, J. (2009). Mapping Community Determinants of Heat Vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1730–1736. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900683>
- Sabrin, S., Karimi, M., Fahad, M. G. R., & Nazari, R. (2020). Quantifying environmental and social vulnerability: Role of urban Heat Island and air quality, a case study of Camden, NJ. *Urban Climate*, 34, 100699. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100699>
- Sidiqui, P., Roös, P. B., Herron, M., Jones, D. S., Duncan, E., Jalali, A., Allam, Z., Roberts, B. J., Schmidt, A., Tariq, M. A. U. R., Shah, A. A., Khan, N. A., & Irshad, M. (2022). Urban Heat Island vulnerability mapping using advanced GIS data and tools. *Journal of Earth System Science*, 131(4), 266. <https://doi.org/10.1007/s12040-022-02005-w>
- Técher, M., Ait Haddou, H., & Aguejdad, R. (2023). Urban Heat Island's Vulnerability Assessment by Integrating Urban Planning Policies: A Case Study of Montpellier Méditerranée Metropolitan Area, France. *Sustainability*, 15(3), 1820. <https://doi.org/10.3390/su15031820>
- The international disaster database 2022*. (n.d.). Retrieved 20 January 2025, from https://www.cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf
- United Nation. (2018). <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- USGS.gov. (2024). <https://www.usgs.gov/>
- Wandl, A., & van der Hoeven, F. (2014). Amsterwarm: Mapping the landuse, health and energy-efficiency implications of the Amsterdam urban heat island. *Building Services Engineering Research and Technology*, 36. <https://doi.org/10.1177/0143624414541451>
- Wolf, T., & McGregor, G. (2013). The development of a heat wave vulnerability index for London, United Kingdom. *Weather and Climate Extremes*, 1, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.07.004>