

Projet Recherche Innovation 2024-2025

Caractérisation des îlots de chaleur urbains

Sous la direction de :
Francis ISSELIN
Kamal SERRHINI

Maxime ANDRIEU
Maëlys MAILLARD

Caractérisation des îlots de chaleur urbains : Une approche par la vulnérabilité

Directeurs de recherche :

**Francis ISSELIN
Kamal SERRHINI**

Auteur.es :

**Maxime ANDRIEU
Maëlys MAILLARD**

2024-2025

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnels, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les auteur.es de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet recherche innovation en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'École Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet recherche innovation (PRI) situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui nous ont accompagnés et soutenus tout au long de la réalisation de ce projet de recherche et d'innovation.

Tout d'abord, nous adressons nos sincères remerciements à M. Kamal SERRHINI et M. Francis ISSELIN, nos encadrants, pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et leur précieuse expertise. Leur accompagnement constant a été essentiel à l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs du département Aménagement de Polytech Tours pour leur engagement et leur transmission de savoir, qui ont joué un rôle clé dans la réalisation de ce projet.

Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers nos proches, amis et familles pour leur soutien constant, leurs encouragements et leur patience tout au long de cette période.

GLOSSAIRE

Certains vocables, les plus importants pour ce PFE, sont expliqués ci-dessous, afin de faciliter la lecture du document et d'éviter toute confusion éventuelle. Ce lexique thématique n'est pas dans l'ordre alphabétique, certains termes découlant des précédents.

Aléa : Événement ou phénomène plus ou moins prévisible, hors de contrôle. On décrit un aléa par sa nature, sa localisation, sa fréquence (d'occurrence de l'événement) et également par son intensité. Cet événement peut être naturel ou bien technologique

Enjeu: Entité (individu, biens, environnement) susceptible d'être affectée par un phénomène d'origine naturelle et/ou anthropique et de subir des préjudices ou des dommages. (Ministère de la Transition écologique, s. d.).

Vulnérabilité : Fragilité (effets néfastes prévisibles) d'un enjeu (population, activité et/ou construction humaine) face à un aléa. La vulnérabilité peut être économique, exprimant le degré de perte ou d'endommagement d'un bien (École normale supérieure de Lyon, s. d.). Elle peut également être humaine lorsque l'individu est soumis à un préjudice.

Exposition : Degré d'exposition d'une population, d'un bien ou d'un environnement à un aléa naturel, déterminé par sa localisation et sa vulnérabilité face à l'événement en question. L'exposition est un des facteurs clés du risque, aux côtés de l'aléa et de la vulnérabilité.

Risque : L'éventualité d'occurrence d'un événement à provoquer des dommages lié à l'exposition d'enjeux vulnérables à un aléa. On peut définir le risque par la formule suivante : « risque = aléa × vulnérabilité » (École normale supérieure de Lyon, s. d.).

SOMMAIRE

AVERTISSEMENT.....	2
REMERCIEMENTS.....	4
GLOSSAIRE.....	5
SOMMAIRE.....	6
TABLE DES FIGURES.....	7
TABLE DES TABLEAUX.....	7
PROPOS INTRODUCTIF.....	8
1. ÉTAT DE L'ART : L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN FACE AUX ENJEUX HUMAINS.....	8
1.1. L'îlot de chaleur urbain : un phénomène multifactoriel.....	8
1.1.1. Le concept d'îlot de chaleur.....	8
1.1.2. Morphologie urbaine.....	10
1.1.3. Méthodes de classification de l'îlot de chaleur urbain.....	11
1.2. Les îlots de chaleur urbains : un enjeu humain majeur.....	12
1.3. La vulnérabilité.....	13
1.3.1. Traiter le risque par la vulnérabilité.....	13
1.3.2. La vulnérabilité à la chaleur dans la littérature.....	14
2. MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE : LA VULNÉRABILITÉ COMME CADRE D'ACTION.....	15
2.1. Présentation du site de l'étude.....	16
2.2. Évaluer la vulnérabilité structurelle.....	16
2.3. Évaluer la vulnérabilité sociale.....	19
2.4. Évaluer la vulnérabilité globale.....	25
3. DISCUSSION ET PERSPECTIVES.....	28
CONCLUSION.....	32
BIBLIOGRAPHIE.....	33
ANNEXES.....	37
ANNEXE 1 - MATRICES DE CORRÉLATION.....	37
ANNEXE 2 - ANALYSE HIÉRARCHIQUE DES PROCÉDÉS (AHP).....	39
ANNEXE 3 - INDICE DE VULNÉRABILITÉ SOCIALE PAR IRIS.....	42

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1. Schéma de l'élévation de température entre l'aire urbaine et l'espace rural.....	8
FIGURE 2. Illustration des phénomènes physique à l'origine du phénomène d'ICUs.....	9
FIGURE 3. Stratification de la ville (ESRI).....	10
FIGURE 4. Différents rapports d'aspect H/W de rues canyon.....	11
FIGURE 5. Cartographie LCZ de Rodez Agglomération (Cerema, 2023).....	12
FIGURE 6. Construction du risque thermique.....	13
FIGURE 7. Méthodologie suivie pour évaluer la vulnérabilité structurelle.....	17
FIGURE 8. Cartographie de la vulnérabilité structurelle de Tours face aux ICUs.....	18
FIGURE 9. Méthodologie suivie pour construire l'indice composite de vulnérabilité sociale.....	19
FIGURE 10. Distribution de l'indice composite de vulnérabilité sociale.....	22
FIGURE 11. Matrice de corrélation entre les proxys et l'indice de vulnérabilité sociale.....	23
FIGURE 12. Cartographie de la vulnérabilité sociale face aux ICUs, par IRIS, à Tours.....	24
FIGURE 13. Méthodologie pour évaluer la vulnérabilité globale.....	25
FIGURE 14. Cartographie de la vulnérabilité globale face aux ICUs sur Tours.....	26
FIGURE 15. Distribution de la vulnérabilité globale.....	27
FIGURE 16. Simulation d'ombrage sur la zone très fortement vulnérable aux ICUs du quartier Europe...	28
FIGURE 17. Simulation de rayonnements solaires, direct et diffus, sur la zone très fortement vulnérable aux ICUs du quartier de l'Europe le 30 juillet 2024.....	29
FIGURE 18. Classification en zones climatiques locales (LCZ) de la ville de Tours.....	31

TABLE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. Proxys sélectionnés pour la construction de l'indice de vulnérabilité sociale.....	22
--	----

PROPOS INTRODUCTIF

Historiquement, les villes n'ont eu de cesse de s'étendre et de se densifier. Néanmoins, cette densification a fait émerger un phénomène thermique : il s'agit de l'**îlot de chaleur urbain (ICU)**, mettant en évidence les défis liés au climat et à la qualité de vie, déjà nombreux en raison du **réchauffement climatique**. Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont aujourd'hui reconnus comme l'une des principales manifestations des transformations climatiques induites par l'urbanisation (Cantat, 2004).

Ces îlots de chaleur, de plus en plus récurrents en raison de l'augmentation des vagues de chaleur, sont à l'origine de l'amplification des températures nocturnes. Ils mettent en évidence un **enjeu humain majeur** dans un contexte de réchauffement climatique, comme l'illustrent les épisodes de canicule meurtriers déjà survenus. Ces enjeux humains, confrontés aux risques thermiques que représente l'îlot de chaleur, ouvrent des opportunités de recherche pour mieux caractériser ce phénomène en s'appuyant sur l'étude des risques naturels, notamment en prenant en compte la vulnérabilité des populations, qui est liée à différents facteurs.

1. ÉTAT DE L'ART : L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN FACE AUX ENJEUX HUMAINS

1.1. L'îlot de chaleur urbain : un phénomène multifactoriel

1.1.1. Le concept d'îlot de chaleur

L'existence des îlots de chaleur urbains (ICU) est aujourd'hui bien documentée (Oke, 1982 ; Santamouris, 2007). Ce phénomène, à la fois naturel et anthropique, résulte de l'absorption et de l'accumulation d'énergie solaire par les différentes surfaces constituant le tissu urbain. Il est considéré comme la « manifestation climatique la plus concrète de la présence et des activités de la ville » (Cantat, 2004) et se traduit par une élévation localisée des températures en milieu urbain par rapport aux zones rurales environnantes (**Figure 1**).

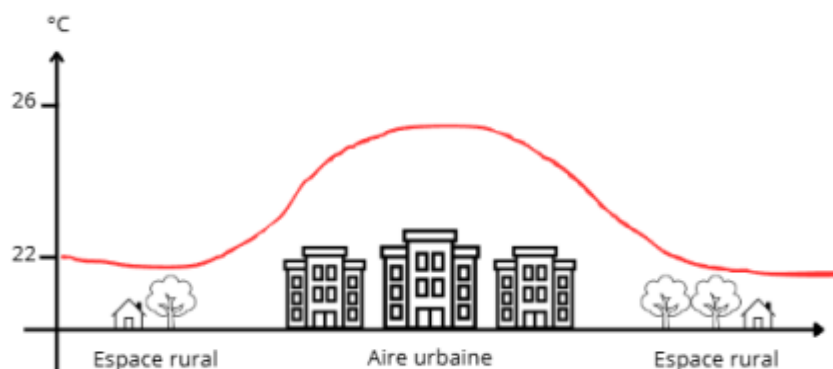


FIGURE 1. Schéma de l'élévation de température entre l'aire urbaine et l'espace rural
(Auteur : Maxime ANDRIEU, 2025)

Cependant, au sein d'une même aire urbaine, des disparités thermiques peuvent être observées. La variabilité des surfaces, de la morphologie urbaine, mais également de l'activité anthropique engendre des zones plus ou moins sujettes à l'ICU. Cette hétérogénéité résulte d'interactions complexes entre l'urbanisme, les caractéristiques des matériaux et l'environnement (Oke, 1982).

Les surfaces urbaines sont exposées au rayonnement solaire, principale source de chaleur. Une partie de ce rayonnement solaire incident est absorbée par conduction dans les matériaux urbains, qui stockent l'énergie et la restituent progressivement. Une autre partie du rayonnement solaire, réfléchi par les surfaces urbaines, est réabsorbée après plusieurs interactions (**Figure 2**). Toutefois, cette absorption n'est pas homogène dans l'ensemble d'une aire urbaine, car elle dépend des propriétés des surfaces.

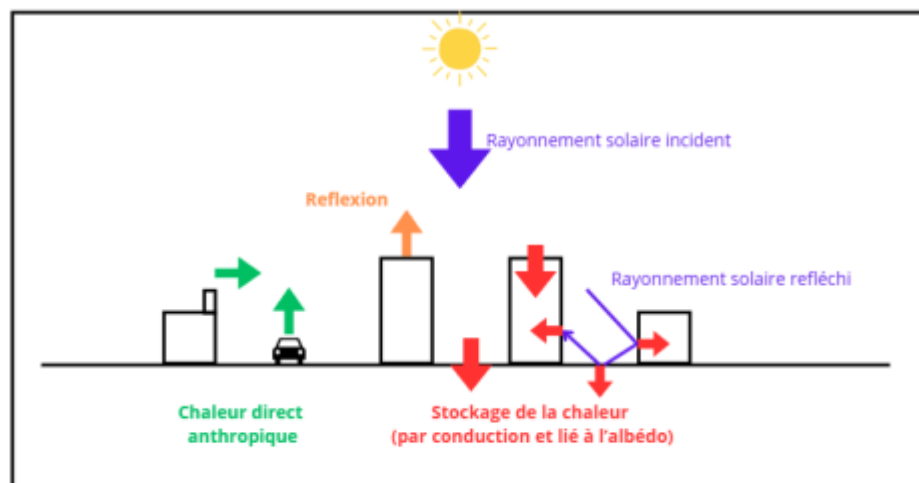


FIGURE 2. Illustration des phénomènes physique à l'origine du phénomène d'ICUs
(Auteur : Maxime ANDRIEU, 2025)

Deux caractéristiques fondamentales influencent l'absorption et la dissipation de la chaleur. L'albédo correspond à la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. Les surfaces sombres et à faible albédo absorbent davantage de chaleur, tandis que celles claires et à albédo élevées réfléchissent une plus grande part du rayonnement, limitant ainsi l'accumulation thermique.

L'inertie thermique désigne la capacité d'un matériau à emmagasiner la chaleur et à la restituer progressivement. Les matériaux denses et épais, comme le béton et l'asphalte, stockent la chaleur en journée et la libèrent lentement la nuit, prolongeant ainsi l'effet ICU.

Selon Aït Ameur, l'effet de l'inertie thermique est particulièrement marqué dans les espaces confinés présentant une faible ouverture au ciel, comme les rues étroites ou les cours intérieures, où la chaleur a tendance à être piégée (Aït Ameur, 2002). La diversité des matériaux et des surfaces au sein d'une aire urbaine contribue ainsi à des variations locales de température.

Cependant, la structure même de la ville, en particulier sa morphologie urbaine, joue un rôle clé dans ces disparités thermiques en modulant la répartition du rayonnement solaire et les échanges thermiques entre les surfaces (effet de masque).

1.1.2. Morphologie urbaine

La morphologie urbaine peut être perçue comme une superposition de six strates interconnectées, selon Serge Salat dans son ouvrage, *Les villes et les formes* (2011). La ville se compose ainsi de six couches :

1. Les personnes et les activités,
2. Le réseau des rues,
3. L'organisation des parcelles,
4. La topographie,
5. L'utilisation des sols,
6. La dimension tridimensionnelle de la ville.

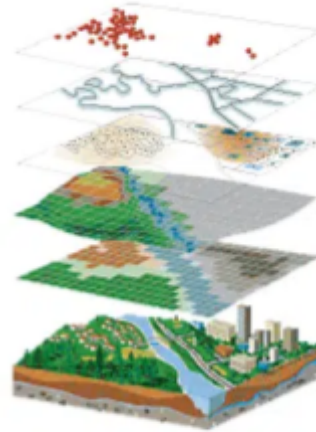


FIGURE 3. Stratification de la ville (ESRI)

L'occupation des sols est étroitement liée à la structure urbaine, notamment à travers la densité surfacique urbaine. Celle-ci reflète l'occupation des structures bâties et se définit comme le rapport entre la surface construite et la surface totale de la ville.

Morphologiquement, cette densité varie selon le mode d'occupation de l'espace. À l'échelle urbaine, l'organisation des formes bâties suit généralement une transition progressive, allant d'un tissu dense et compact en centre-ville vers un habitat individuel plus aéré en périphérie.

D'un point de vue climatique, la densité surfacique urbaine joue un rôle majeur dans le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Une étude menée par Boukhezer sur trois types de tissus urbains aux densités d'occupation différentes dans la ville d'Oran, en Algérie, a mis en évidence son impact sur l'absorption énergétique des bâtiments (Boukhezer, 2002). Le centre historique, caractérisé par un tissu organique dense, une forte minéralisation et une densité élevée, absorbe davantage d'énergie solaire que les quartiers en damier ou les zones d'urbanisation plus dispersée. Ces résultats démontrent ainsi l'influence de la densité surfacique urbaine sur l'accumulation thermique des villes.

Parmi les formes urbaines influencées par la densité surfacique, la rue canyon est particulièrement significative. Elle désigne une rue dont la hauteur des bâtiments est supérieure à sa largeur (Izard, 1999). Un canyon urbain est défini par trois paramètres morphologiques : la hauteur des bâtiments (H), la largeur de la rue (W) et sa longueur (L). Ces paramètres influencent fortement la réception du rayonnement solaire, notamment à travers le rapport H/W (Figure 4).

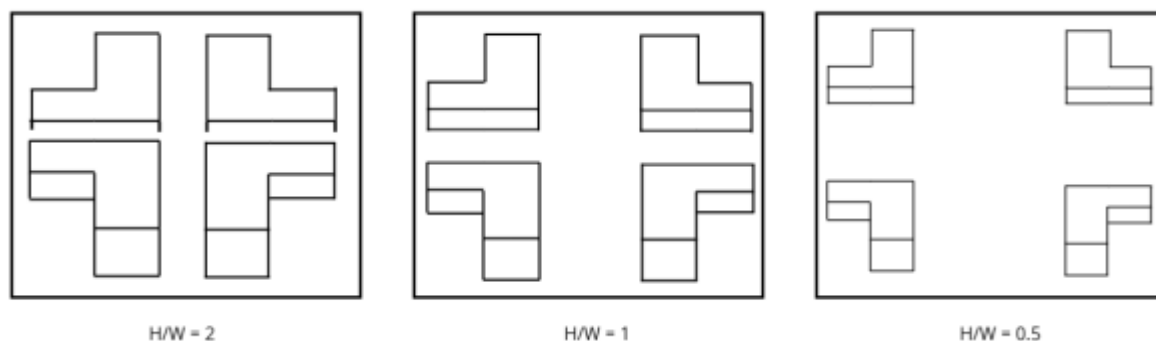


FIGURE 4. Différents rapports d'aspect H/W de rues canyon
(Auteur : Maxime ANDRIEU, 2025)

Des études menées par Bourbia et Awbi ont montré que plus le rapport H/W est faible, plus la rue reçoit une importante quantité d'énergie solaire. À l'inverse, un rapport H/W élevé limite l'exposition directe au rayonnement solaire, mais favorise le piégeage de la chaleur, notamment en raison d'une ventilation réduite (Bourbia & Awbi, 2004).

Ainsi, la diversité des surfaces urbaines et la variation de la morphologie du tissu urbain montrent qu'une aire urbaine n'est pas exposée de manière uniforme au phénomène d'îlot de chaleur. Une caractérisation de l'ICU permettrait donc de mettre en valeur des paramètres rendant identifiables des zones propices à la formation d'îlots de chaleur urbains.

1.1.3. Méthodes de classification de l'îlot de chaleur urbain

Dans la littérature, plusieurs méthodes de classification des environnements urbains et ruraux ont été développées en fonction de leurs caractéristiques thermiques, physiques et morphologiques. Parmi elles, la méthode basée sur le concept des Zones Climatiques Locales dites LCZ, introduite par Stewart et Oke, permet d'analyser les variations de température entre différentes zones d'une ville et leur impact sur les îlots de chaleur urbains (ICU) (Stewart & Oke, 2012).

L'objectif de cette méthode est de cartographier les secteurs potentiellement propices à l'effet d'îlot de chaleur urbain en identifiant les types de zones urbaines selon leurs propriétés thermiques et morphologiques. Le Cerema a appliqué cette méthode sur l'agglomération de Rodez à partir d'images satellites haute définition (SPOT-7, 1.5 m) et d'un algorithme spécifique (LCZ Cerema) (Cerema et al, 2023). La cartographie obtenue repose sur un paramètre morphologique (hauteur moyenne des bâtiments) ainsi que six indicateurs d'occupation du sol (taux de bâti, taux de sol nu perméable, taux de surface en eau, etc.), permettant ainsi d'identifier les zones les plus sensibles aux ICU.

En croisant cette cartographie (**Figure 5**) avec des données de l'INSEE (notamment démographiques), il est possible d'identifier les populations vulnérables. Toutefois, cette approche repose principalement sur l'exposition à l'aléa et ne prend pas en compte la sensibilité réelle des individus en fonction de leurs caractéristiques. En effet, comme le souligne Karine Laaidi, tous les individus d'une population ne sont pas sensibles au même degré à la chaleur en raison de différents facteurs (âge, revenu, etc.) (Laaidi,

2014). De plus, selon M. Techer, H. Ait Haddou et R. Aguejda, ce phénomène est voué à s'intensifier, mettant donc en évidence les enjeux humains (Techer et al, 2023).

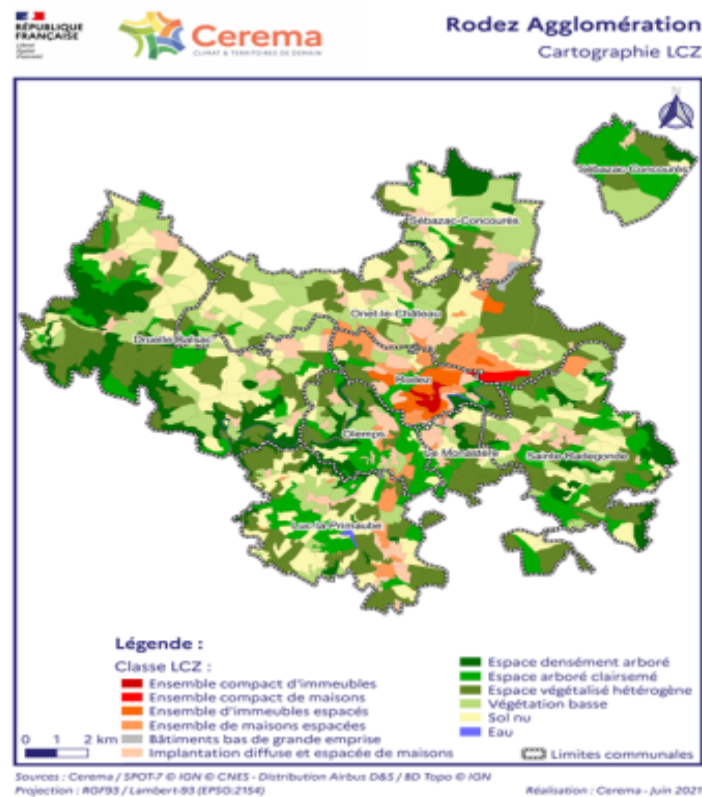


FIGURE 5. Cartographie LCZ de Rodez Agglomération (Cerema, 2023)

1.2. Les îlots de chaleur urbains : un enjeu humain majeur

Dans le contexte du changement climatique, les villes sont confrontées à une double menace. D'une part, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur estivales (Mehl et Tebaldi, 2004) expose les populations urbaines à des conditions de plus en plus extrêmes. D'autre part, ces espaces artificialisés favorisent la formation des îlots de chaleur urbains, amplifiant les températures nocturnes et augmentant le nombre de nuits tropicales, où la température reste supérieure à 20 °C (Oke et al, 2017).

Selon Météo France (Météo-France, n.d.-a), le nombre de nuits tropicales devrait être multiplié par 5 d'ici à 2050, renforçant ainsi les effets du réchauffement climatique sur les populations urbaines.

Le GIEC souligne que l'intensification des îlots de chaleur a des conséquences directes sur la santé. En amplifiant les vagues de chaleur, ces phénomènes augmentent le stress thermique, un danger majeur résultant d'une accumulation excessive de chaleur par le corps humain. Ce stress peut entraîner des malaises, une déshydratation sévère et, dans les cas les plus graves, la mort.

Les épisodes de chaleur extrême ont déjà démontré leur impact dramatique. En 2003, la France a connu une canicule exceptionnelle ayant causé près de 15 000 décès supplémentaires en quelques semaines,

touchant particulièrement les personnes âgées. À titre d'exemple, en Indre-et-Loire, la surmortalité a atteint 96 %, durant cette période. Un phénomène similaire s'est reproduit en 2006, confirmant la vulnérabilité des populations face aux températures extrêmes.

Outre l'impact sanitaire, les ICU accentuent les inégalités sociales. Les populations les plus modestes, souvent contraintes de vivre dans des logements insalubres et mal isolés, subissent davantage les effets des vagues de chaleur, faute d'accès à des moyens de rafraîchissement adaptés.

Enfin, le vieillissement de la population française constitue un enjeu majeur. Selon les projections de l'INSEE, d'ici à 2060, le nombre de personnes âgées de 60 ans et plus devrait augmenter de 80 % (INSEE, s. d). Cette évolution, couplée à l'intensification des îlots de chaleur et à la multiplication des nuits tropicales, accentuera la vulnérabilité d'une part croissante de la population face aux risques climatiques.

1.3. La vulnérabilité

1.3.1. Traiter le risque par la vulnérabilité

Dans la littérature, il est désormais admis que le risque naît de la conjonction d'un aléa avec des enjeux plus ou moins vulnérables (Leone et al, 2005). Cependant, la prise en compte des vulnérabilités comme composante fondamentale du risque, au même titre que l'aléa, tarde à être mise en avant. En effet, le risque a longtemps été étudié sous l'angle de l'aléa, notamment dans une large gamme de risques naturels. Pourtant, la vulnérabilité des territoires et des sociétés exposés aux menaces d'origine naturelle constitue une dimension essentielle de l'évaluation du risque.

Cette prise en compte est particulièrement pertinente dans l'étude de l'exposition à la chaleur. Comme l'affirme Kastendeuch, la vulnérabilité commence à être intégrée dans l'analyse du risque thermique dans certaines grandes métropoles, comme Londres ou Moscou. Toutefois, en France, peu de travaux y font encore référence (Kastendeuch et al, 2023).

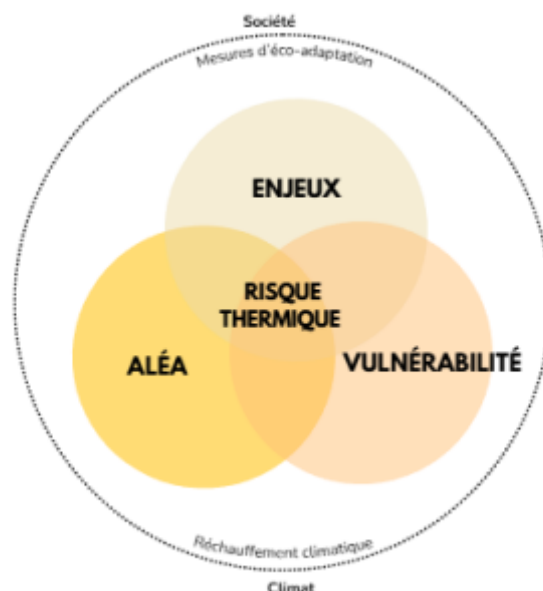


FIGURE 6. Construction du risque thermique
(Auteur : Maxime ANDRIEU, 2025)

Comme mentionné précédemment, l'aléa des îlots de chaleur est voué à s'intensifier dans un futur proche, notamment avec l'augmentation des nuits tropicales (Météo-France, n.d.-a). Ce constat souligne la nécessité d'intégrer la vulnérabilité pour mieux appréhender le risque thermique.

1.3.2. La vulnérabilité à la chaleur dans la littérature

La vulnérabilité est un concept complexe, mais fondamental en matière de gestion des risques. Par définition, plus elle est faible, plus elle atténue les effets de l'aléa et réduit le risque. Une bonne connaissance de la vulnérabilité permet ainsi de mettre en place des stratégies visant à renforcer la résilience des populations et leur capacité d'adaptation face aux aléas (Lévy et Lussault, 2013).

Selon Wilhelmi et Hayden, la vulnérabilité d'une population face à la chaleur repose sur trois facteurs interdépendants : l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation (Wilhelmi & Hayden, 2010). L'exposition traduit les conditions locales susceptibles d'accentuer la chaleur, tandis que la sensibilité représente le degré auquel la population subit des effets sanitaires liés aux températures élevées. Enfin, la capacité d'adaptation désigne le potentiel d'une population à ajuster son comportement pour mieux faire face au stress thermique. Ces dimensions, qui structurent la vulnérabilité, sont étroitement liées à des facteurs sociaux, tels que Cutter désignent sous le concept de « composante sociale de la vulnérabilité » (Cutter et al, 2000).

L'évaluation de la vulnérabilité demeure complexe en raison de la diversité des variables à mobiliser. Cependant, des approches existent pour la quantifier, notamment par l'utilisation de variables de substitution issues de données statistiques facilement accessibles (Wong-Parodi et al, 2015).

Afin d'exprimer la vulnérabilité, certaines études, comme celle de Kastendeuch menée à Strasbourg, proposent l'élaboration d'un indice de vulnérabilité. Celui-ci vise à traduire la vulnérabilité d'une population sous une forme numérique en s'appuyant sur des variables de substitution, appelées proxies, permettant d'évaluer indirectement les trois composantes fondamentales de la vulnérabilité. Par exemple, la densité de population est utilisée pour caractériser l'exposition, tandis que l'âge des individus reflète leur sensibilité et que le revenu médian est mobilisé pour estimer leur capacité d'adaptation (Kastendeuch et al, 2023).

L'indice de vulnérabilité repose sur la combinaison de ces facteurs, qui doivent d'abord être normalisés pour pouvoir être comparés. À cette fin, la méthode « Min-Max » est souvent employée, avant que les données ne soient agrégées en attribuant un poids spécifique à chaque variable proxy. Cette pondération, bien qu'elle implique des choix méthodologiques, constitue une approche couramment utilisée dans les études sur la vulnérabilité à la chaleur (Rathi et al, 2022).

La mise au point d'un indice de vulnérabilité permet, d'une part, d'évaluer le risque thermique, défini comme le produit de l'aléa (îlot de chaleur) et de la vulnérabilité (Kastendeuch et al, 2023). D'autre part, il permet d'identifier les populations les plus vulnérables à cet aléa. Cette identification spatiale de la population vulnérable met logiquement en avant l'environnement urbain ainsi que ses caractéristiques.

2. MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE : LA VULNÉRABILITÉ COMME CADRE D'ACTION

Les **îlots de chaleur urbains** (ICUs) sont catalyseurs de nombreux enjeux, particulièrement sur le plan humain. Il convient donc de déterminer sur quoi et comment agir pour limiter les conséquences de ce phénomène. Comme nous venons de le voir dans l'état de l'art, le phénomène d'îlot de chaleur urbain peut être considéré comme un **risque environnemental urbain** que l'on nommera risque thermique dans la suite de ce rapport. Cette analogie soulève alors la question de recherche suivante :

De quelle manière l'étude des risques naturels peut-elle être transposée à la caractérisation des ICUs ?

En matière de risques, deux concepts complexes, mais absolument fondamentaux, sont à considérer : l'**aléa** et la **vulnérabilité** qui sont tous deux intrinsèquement liés à la notion d'**enjeux**, précédemment explicitée dans ce rapport. Bien qu'il soit indissociable de ces notions, le risque a longtemps été étudié au travers de la focale de l'aléa (*Leone & Vinet, 2006*). Cependant, dans le contexte actuel de réchauffement climatique, l'aléa relatif aux ICUs est voué à s'amplifier. Faute de pouvoir contenir significativement les phénomènes climatiques en jeu et donc d'agir sur l'aléa, la réduction du risque thermique s'impose alors comme une question d'adaptation via la réduction des facteurs contribuant à la **vulnérabilité**. Ainsi, l'estimation de la vulnérabilité aux ICUs devient un véritable outil pour la gestion du risque thermique et de ce fait pour la lutte contre les îlots de chaleurs urbains dans le cadre de politiques d'éco-adaptation des villes. On émet alors l'hypothèse suivante :

Caractériser la vulnérabilité des personnes face aux ICUs, en s'appuyant sur les méthodologies des risques naturels, permet d'identifier des leviers pour réduire leurs impacts.

L'objectif de cette étude est ainsi de déplacer les préoccupations des espaces les plus exposés aux ICUs aux espaces exposés les plus vulnérables aux ICUs afin d'avoir une meilleure prise en compte des enjeux, notamment humains, dans une **perspective d'aménagement**. Pour cela, il s'agit d'identifier les secteurs sensibles au phénomène d'ICU ainsi que les populations vulnérables grâce à une **spectroscopie de la vulnérabilité intra-urbaine aux ICUs**. Cette vulnérabilité sera donc appréhendée de manière analytique en étudiant conjointement deux de ses dimensions (*Reghezza, 2006*) :

- la vulnérabilité dite "**structurelle**" qui renvoie au degré d'exposition à l'ICU ;
- la vulnérabilité dite "**sociale**" qui renvoie à la fragilité des individus face à l'ICU.

La vulnérabilité ne pouvant s'envisager en dehors d'un territoire et des personnes y habitant, cette étude sera donc illustrée au travers d'une **étude de cas sur la ville de Tours**.

2.1. Présentation du site de l'étude

La ville de Tours se situe dans le département de l'Indre-et-Loire en région Centre-Val de Loire. Traversée par la Loire et le Cher, elle compte 138 668 habitants en 2022 (*INSEE, 2022*) pour une superficie de 34.7 km² (*INSEE, 2021*). Identifiée comme sensible au phénomène d'îlot de chaleur urbain par Météo-France, la commune de Tours a expérimenté plusieurs épisodes de fortes chaleurs ces dernières années, mettant en exergue ce phénomène d'ICU. On peut notamment citer l'été 2019 où le mercure a atteint les 40,8 °C le 25 juillet (*Climatologie Globale En Juillet À Tours - Parcay-Meslay, s. d.*) ou encore l'été 2022 marqués par trois épisodes de fortes chaleurs successifs à la mi-juin, en juillet puis à la mi-août (« *Bulletin de Santé Publique - Centre-Val de Loire - Été 2022* », 2022).

De plus, les outils développés par Météo France permettant d'appréhender les conséquences futures du réchauffement climatique sur les territoires, à l'image de Climadiag Communes, révèlent que Tours devra faire face à une exposition accrue au risque thermique d'ici à 2050. En effet, le nombre annuel de jours en vague de chaleur¹ pourrait passer de 1 (valeur de référence 1976-2005) à 15 à l'horizon 2050 dans un scénario de réchauffement à + 2,7 °C (*Météo-France, n.d.-a*). De même, le nombre de nuits tropicales (> 20 °C) pourrait être multiplié par 5, passant de 4 (valeur de référence 1976-2005) à 20 en 2050, exacerbant alors de manière significative les problèmes sanitaires (*Météo-France, n.d.-a*).

Ces constats couplés à la forte présence d'enjeux humains sur le territoire viennent justifier la pertinence d'une caractérisation de la vulnérabilité face aux ICUs sur Tours.

2.2. Évaluer la vulnérabilité structurelle

La première phase de notre spectroscopie de la vulnérabilité intra-urbaine aux ICUs consiste à évaluer la **vulnérabilité structurelle** qui s'exprime en **degré d'exposition d'un enjeu** à l'aléa thermique que représente les ICUs. Pour cela, on s'intéresse dans un premier temps à caractériser les espaces urbains grâce à leur température de surface lors de la journée la plus chaude de l'année 2024, le 30 juillet (*Météo-France, n.d.-b*), afin de refléter une situation extrême au cours de laquelle les effets amplificateurs des îlots de chaleur et les risques associés sont maximaux, permettant d'identifier les zones les plus critiques. Dans cette phase, la **température de surface** est préférée à la température de l'air, car elle reflète les phénomènes d'absorption et de stockage de chaleur, notamment par les matériaux urbains qui impactent grandement la formation d'un ICU.

Ce sont ainsi les images des satellites Landsat 8 et 9 et particulièrement leurs bandes thermiques (TIRS 1&2) situées dans l'infrarouge thermique qui ont été exploitées pour l'étude de la température de surface tourangelles (*Landsat NASA, 2021*). Ces données issues du programme Landsat de la NASA sont disponibles à une résolution spatiale de 30 mètres (*Esri, n.d.*). Chaque satellite couvre la Terre tous les 16 jours, mais les orbites des deux satellites étant décalées, l'utilisation combinée des images Landsat 8 et 9 permet d'obtenir une couverture totale du globe tous les 8 jours (*What Are The Acquisition Schedules For The Landsat Satellites ?*, 2017). Par ailleurs, les prises de vues de la dalle à laquelle appartient la ville

¹ "Un jour est considéré en vague de chaleur s'il s'inscrit dans un épisode, se produisant l'été, d'au moins cinq jours consécutifs pour lesquels la température maximale quotidienne excède la normale de plus de cinq degrés" (*Météo-France, n.d.-a*)

de Tours sont effectuées à 10 h 40 (*LandsAT Acquisition / LandsAT Missions, s. d.*). Les données initiales de notre étude correspondent donc aux températures de surface de Tours à 10 h 40 au cours d'une période de plus ou moins 8 jours autour de 30 juillet 2024.

Les températures de surface en fin d'après-midi, lorsque le rayonnement solaire est maximal et que le sol a accumulé la chaleur de la journée, auraient été préférables afin d'apprécier pleinement le phénomène d'ICU dans ses instants les plus critiques. Les modalités d'acquisition des données satellites nous limitent cependant sur ce point : elles reflètent tout de même les dynamiques thermiques en place. Ainsi, elles nous permettent d'effectuer une première caractérisation des espaces urbains en déterminant les zones les plus exposées à l'aléa thermique. Des mesures de terrain additionnelles seraient nécessaires afin d'estimer précisément les valeurs de température.

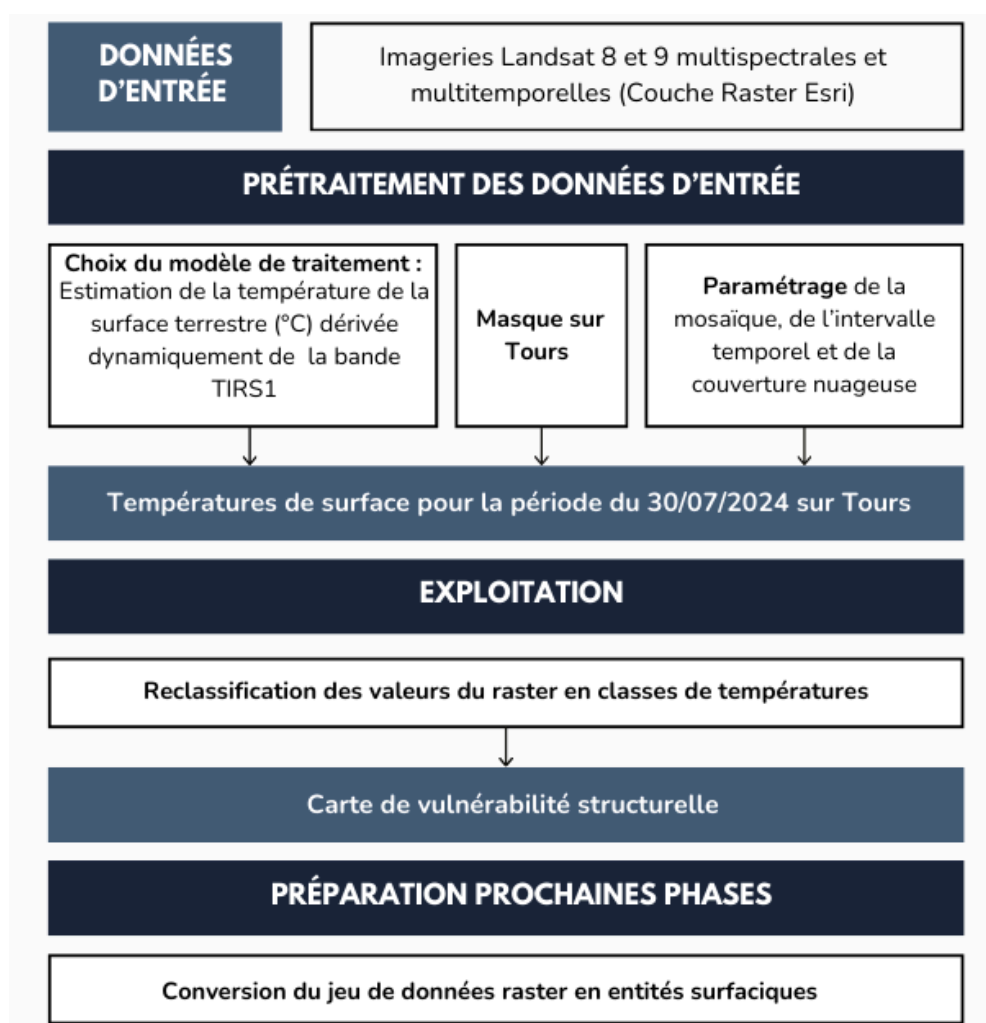


FIGURE 7. Méthodologie suivie pour évaluer la vulnérabilité structurelle
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Après traitement des données (**Figure 7**), on obtient donc une carte de la vulnérabilité structurelle de la ville de Tours face aux ICUs (**Figure 8**). Les températures de surface ont volontairement été agrégées

dans des classes de très faible amplitude (1 °C) afin de conserver un niveau de représentativité suffisant pour la suite de l'étude.

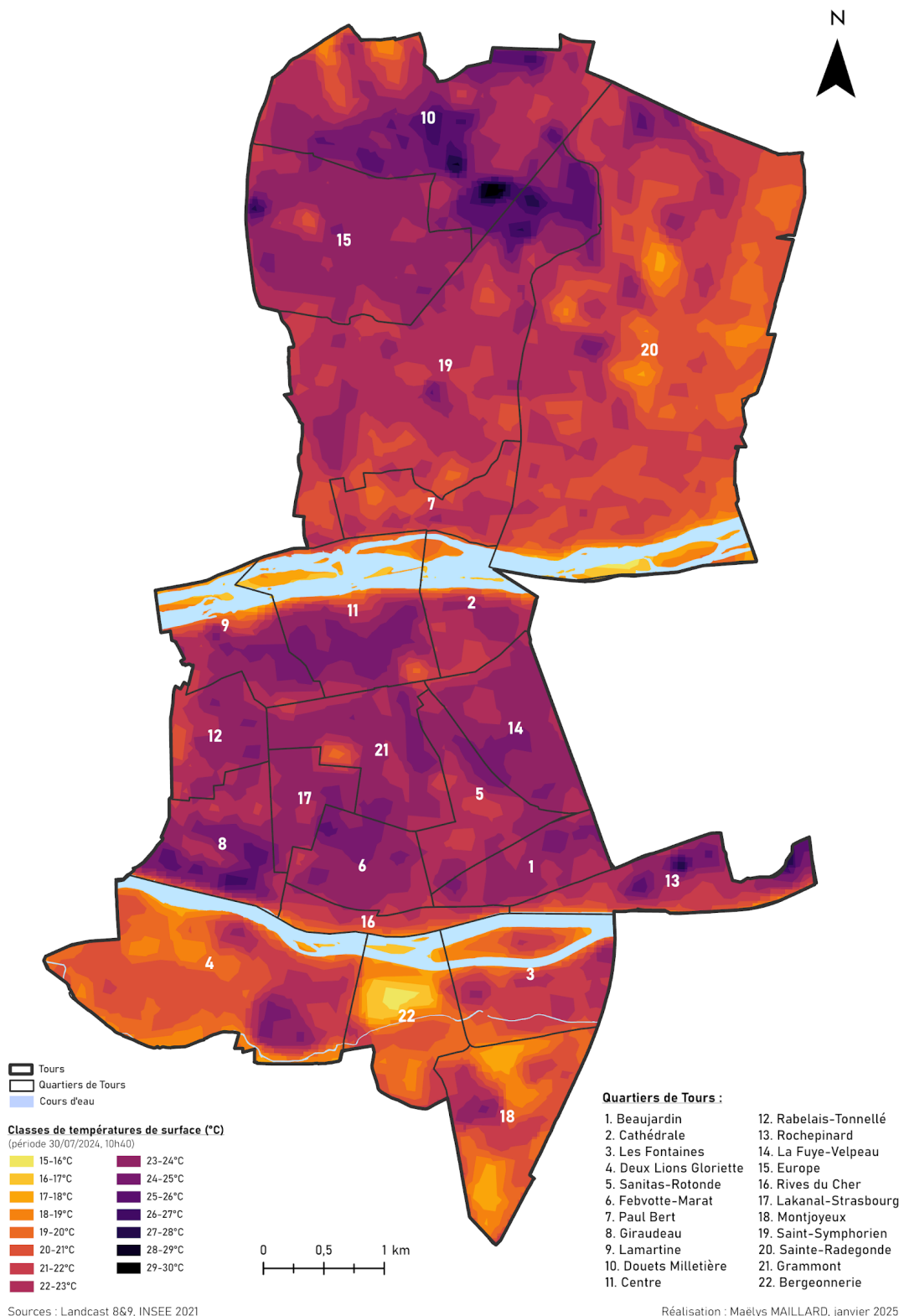


FIGURE 8. Cartographie de la vulnérabilité structurelle de Tours face aux ICUs
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Cette carte de **vulnérabilité structurelle** révèle des **contrastes thermiques intra-urbains conséquents**, mettant ainsi en évidence les dynamiques spatiales des îlots de chaleur urbains. En effet, on peut aisément identifier les îlots de fraîcheur, moins exposés, que constituent les zones de végétation et différents parcs de la ville (Prébendes, Gloriette, Bergeonnerie). Des zones particulièrement sujettes à la surchauffe urbaine ressortent notamment au nord de la ville. Cette zone fortement exposée concentre essentiellement des activités commerciales et industrielles : les enjeux humains y sont donc moindres. Il apparaît alors que la vulnérabilité structurelle n'est pas suffisante pour capturer pleinement la vulnérabilité des populations face aux ICUs.

2.3. Évaluer la vulnérabilité sociale

Dans une seconde phase, il s'agit donc d'enrichir notre spectroscopie de la vulnérabilité intra-urbaine aux ICUs en évaluant la **vulnérabilité sociale**, soit la **fragilité des individus** face aux ICUs. Pour cela, un **indice composite** de vulnérabilité sociale a été construit (**Figure 9**).



FIGURE 9. Méthodologie suivie pour construire l'indice composite de vulnérabilité sociale
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

La vulnérabilité sociale (V_{so}) d'une population face à la chaleur est fonction de l'interaction de trois composantes (Wilhelmi & Hayden, 2010). On a donc $V_{so} = E + S - A$ avec :

- l'**exposition** (E) qui renvoie aux conditions locales susceptibles d'accentuer la chaleur ;
- la **sensibilité** (S) qui renvoie au degré avec lequel la population souffre de la chaleur sur le plan sanitaire ;
- la **capacité d'adaptation** (A) qui renvoie au potentiel d'une population à modifier son comportement afin de mieux faire face à l'aléa thermique (Kastendeuch et al., 2023).

Chacune de ces composantes est elle-même constituée d'un ensemble d'indicateurs dynamiques qui dépendent fortement d'aspects sociaux pouvant rendre difficile l'accès aux données. Afin de concilier disponibilité de ce type de données et analyse intra-urbaine fine, notre indice de vulnérabilité sociale (V_{so}) a été développé à l'**échelle de l'IRIS** (Îlot Regroupé pour l'Information Statistique). D'après ce découpage, la ville de Tours se compose de 57 IRIS.

Les trois facteurs composant la vulnérabilité sociale n'étant pas mesurables directement, il est nécessaire de passer par des variables de substitution dites **proxys** pour les estimer. Le choix de ces proxys s'est basé sur les enseignements tirés de notre état de l'art et de l'ensemble de notre travail bibliographique, mais également sur les données collectées par l'INSEE à l'échelle des IRIS : c'est ainsi 9 proxys qui ont été retenus (**Tableau 1**).

Facteurs et proxys	Signification	Unité	Sources
EXPOSITION			
D_POP	Densité de population	Habitants/km ²	BD Population, INSEE (2021) Géoservices (contours IRIS)
SENSIBILITÉ			
T_65+	Taux de personnes de plus de 65 ans	Pourcentage	BD Population, INSEE (2021)
T_0005	Taux de personnes de moins de 5 ans	Pourcentage	BD Population, INSEE (2021)
T_LOG_1971	Taux de logements construits avant 1971	Pourcentage	BD Logement, INSEE (2021)
ADAPTATION			
REV_MED	Revenu disponible médian par IRIS	Euros	BD Revenus, INSEE (2021)
T_CHOM_RSA	Taux de chômeurs touchant le RSA dans la population active (15-64 ans)	Pourcentage	BD Demandeurs d'emploi, INSEE (2021)
T_CHOM_LONG	Taux de chômeurs de longue durée (+ de 2 ans) dans la population active (15-64 ans)	Pourcentage	BD Demandeurs d'emploi, INSEE (2021)
T_OUVR	Taux d'ouvriers dans les actifs (15-64 ans) occupés	Pourcentage	BD Population, INSEE (2021)
T_SDIPL	Taux de personnes de 15 ans ou plus non scolarisées titulaires au plus d'un brevet des collèges	Pourcentage	BD Diplômes et formations, INSEE (2021)

TABLEAU 1. Proxys sélectionnés pour la construction de l'indice de vulnérabilité sociale (Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Le **facteur d'exposition** repose sur la **densité de population par IRIS** qui est en relation directe avec l'environnement bâti. En effet, les zones densément peuplées présentent généralement des caractéristiques propices à la formation et l'intensification d'ICUs : concentration élevée de surfaces imperméables, morphologie urbaine dense et verticale, etc.

Les proxys qui définissent le **facteur de sensibilité** se basent sur les **capacités physiologiques** des individus (*Les Populations Concernées Par les Vagues de Chaleur et Leur Recensement – Ministère du Travail, de la Santé, des Solidarités et des Familles, 2024*) :

- la **population de plus de 65 ans** est plus sensible à la chaleur du fait de l'existence potentielle de comorbidités ;
- la **population de moins de 5 ans** possède un système de régulation thermique moins efficace ;
- les **logements construits avant 1971** sont considérés comme moins bien isolés que les récents, ce qui entrave le maintien d'une température intérieure confortable, notamment la nuit.

La **capacité d'adaptation**, quant à elle, est représentée par 5 proxys :

- le **revenu médian disponible** qui permet de s'adapter en achetant des services ou des biens, à l'image d'un climatiseur, pour lutter contre la chaleur ;
- le **niveau d'études** qui influe sur les connaissances et la capacité à s'adapter à la chaleur ;
- la **population au chômage de longue durée, au chômage touchant le RSA** ainsi que la **population ouvrière** qui représente des groupes particulièrement touchés par des inégalités socio-économiques impactant alors leur capacité d'adaptation.

Ces variables d'adaptation permettent également d'appréhender les **inégalités spatiales de santé**, proxy pour laquelle très peu de données sont accessibles malgré sa pertinence pour caractériser la sensibilité des populations. En effet, l'indice de défavorisation 'FDep99' développé par Rey & al à partir du revenu médian, du taux de bacheliers, du taux d'ouvriers et du taux de chômeurs est fortement corrélé positivement avec la mortalité (*Rey et al., 2009*).

Bien que ces proxys possèdent une certaine représentativité de la réalité, il est rappelé qu'elles ne peuvent être interprétées comme l'intégralité de cette réalité (*ADEME, 2013*). Il s'agit d'une simplification de la réalité pour mettre en lumière des phénomènes et dynamiques complexes qui sont difficilement directement abordables.

Par la suite, la **corrélation** entre les différents proxys a été étudiée (**Matrices de corrélation en annexe 1**) afin d'écartier les variables redondantes, i.e. avec un taux de corrélation supérieur à 0.6 (*Rufat, 2007*). Ainsi, le taux de chômeurs longue durée et le taux d'ouvriers ont été exclus pour la suite de la construction de notre indice de vulnérabilité sociale.

Étant donné que les sept proxys retenus s'expriment dans des unités différentes : une étape supplémentaire de préparation des données s'impose afin de pouvoir les manipuler conjointement. Ainsi, une **normalisation z score**, consistant à soustraire la moyenne et à la diviser par l'écart type, a été appliquée à l'ensemble des données. De plus, le proxy concernant le revenu disponible médian, initialement positivement corrélé à la capacité d'adaptation, a été inversé : en effet, les deux autres

proxys caractérisant la capacité d'adaptation sont inversement corrélés à l'adaptation. Suite à cette manipulation, pour chacun des trois proxys relatifs à l'adaptation, une valeur élevée symbolisera une faible capacité d'adaptation entraînant une vulnérabilité sociale plus conséquente. On remarque ainsi que désormais l'ensemble des proxys sont dans le "même sens" c'est-à-dire plus leur valeur est élevée, plus la vulnérabilité sociale des populations face aux ICUs augmente.

À présent que nos proxys sont prêts à être exploités, il s'agit de déterminer le poids spécifique qui leur sera accordé lors de leur pondération pour construire l'indice de vulnérabilité sociale. Pour cela, une **analyse hiérarchique des procédés (AHP)**, détaillée en **annexe 2**, est réalisée. Grâce aux pondérations obtenues avec l'AHP, on agrège nos différents proxys :

$$v_{so} = (0.350 * D_POP) + (0.237 * T_65+) + (0.159 * T_0005) + (0.106 * T_LOG_1971) + (0.070 * REV_MED) + (0.046 * T_CHOM_RSA) + (0.032 * T_SDIPL)$$

On obtient alors un **indice de vulnérabilité sociale** face aux ICUs par IRIS : cet indice est proportionnel à la fragilité de la population face à la chaleur, de sorte que les valeurs élevées d'indice expriment une forte vulnérabilité. Ce résultat est par la suite normalisé pour être contenu entre 0 et 1 (normalisation min-max) afin de faciliter son interprétation et la suite de cette étude : les valeurs de l'indice de vulnérabilité sociale pour chaque IRIS de Tours sont disponibles en **annexe 3**.

Dans un premier temps, il s'agit ainsi d'explorer la distribution de l'indice (**Figure 10**). On remarque alors une légère **asymétrie positive**, ce qui signifie qu'il y a une plus grande concentration d'IRIS ayant un indice de vulnérabilité sociale inférieur à la moyenne. La dispersion des valeurs est cependant assez importante, indiquant alors une hétérogénéité et donc des **disparités significatives** dans les niveaux de vulnérabilité sociales. Les valeurs supérieures extrêmes de l'indice représentent ainsi des IRIS particulièrement vulnérables sur le plan social.

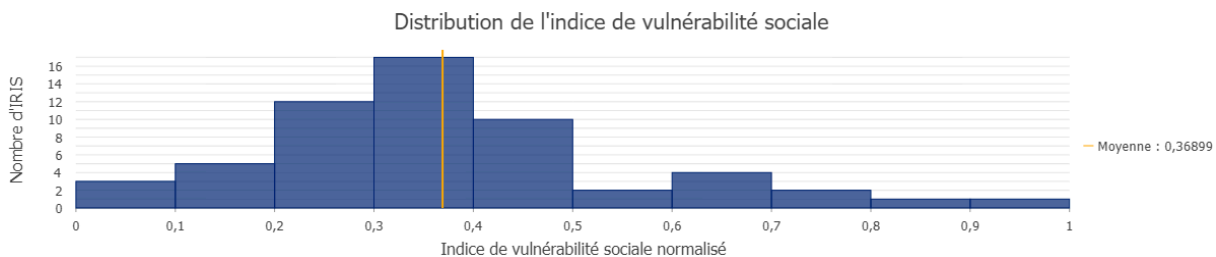


FIGURE 10. Distribution de l'indice composite de vulnérabilité sociale
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Une étude plus approfondie des résultats au travers d'une matrice de corrélation (**Figure 11**) permet d'identifier les proxys qui ont le plus d'impact sur l'indice de vulnérabilité sociale. On constate ainsi que les résultats de l'indice ont principalement été déterminés par la densité de population (forte corrélation de 75 %) alors que la population de plus de 65 ans n'a qu'un impact très limité sur l'indice (faible corrélation de 16 %). En effet, l'indice est une mesure de la variance : les valeurs de l'indice varient donc en fonction des variables. Par conséquent, les variables à faible variance contribuent moins à l'indice (Buie et al., 2024).

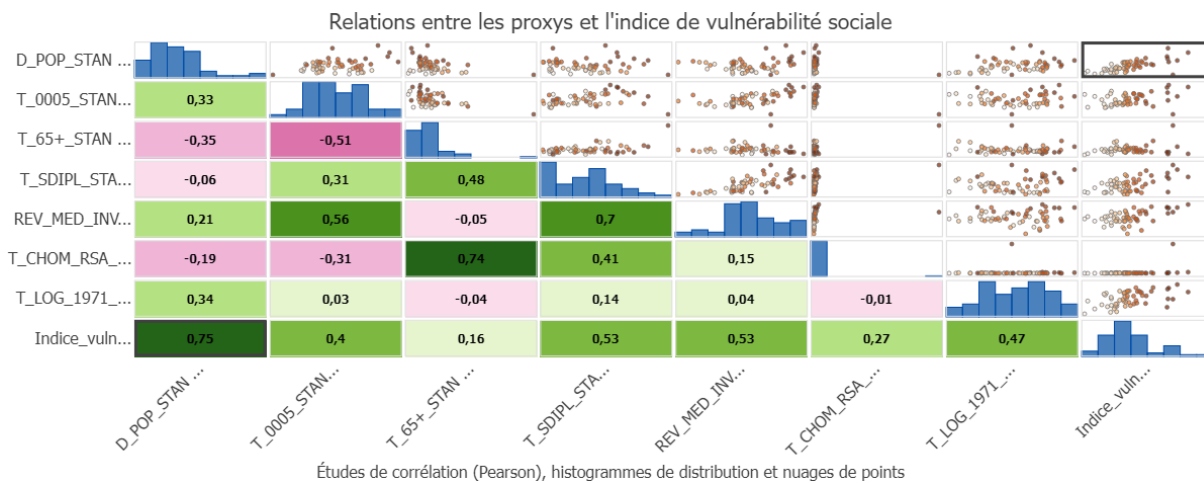


FIGURE 11. Matrice de corrélation entre les proxys et l'indice de vulnérabilité sociale
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Par ailleurs, toujours dans cette démarche de lisibilité des résultats, une cartographie de la vulnérabilité sociale face aux ICUs par IRIS est réalisée (**Figure 12**). Cette carte nous permet donc de spatialiser les **8 IRIS particulièrement vulnérables** au vu de notre indice de vulnérabilité, i.e. les zones occupées par des individus particulièrement fragiles face au phénomène d'îlot de chaleur urbain. Il est intéressant de croiser cette information avec les Quartiers Prioritaires de la politique de la Ville (QPV) en rouge sur la carte. Pour rappel, ces quartiers sont des territoires caractérisés par un écart significatif de développement économique et social par rapport aux autres territoires environnants justifiant et qui nécessitent donc des interventions ciblées, notamment en rénovation urbaine, des pouvoirs publics (1-*Qu'est-ce Que la Politique de la Ville ?*, s. d.). On constate ainsi qu'une majorité des IRIS particulièrement vulnérables en termes de vulnérabilité sociale se situent dans un périmètre concerné par le dispositif QPV.

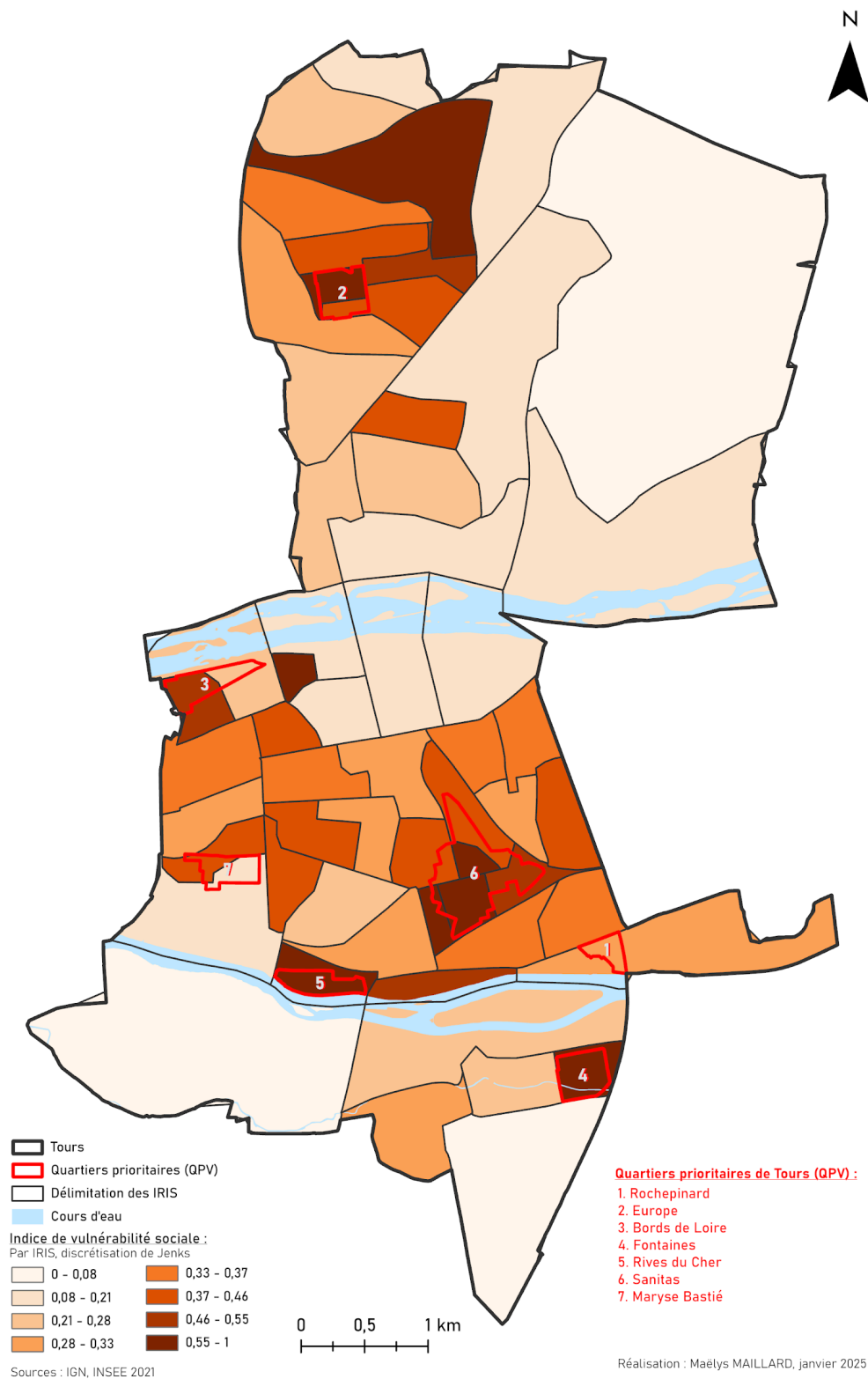


FIGURE 12. Cartographie de la vulnérabilité sociale face aux ICUs, par IRIS, à Tours
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

2.4. Évaluer la vulnérabilité globale

Les phases précédentes d'évaluation de la vulnérabilité structurelle et sociale ont permis de mettre en avant des espaces urbains et des populations fortement vulnérables aux ICUs. Il s'agit donc désormais de croiser ces deux vulnérabilités afin d'obtenir une unique valeur de vulnérabilité globale, on a donc :

$$\text{vulnérabilité globale} = \text{vulnérabilité structurelle} + \text{vulnérabilité sociale}$$

Pour éviter de fausser les résultats, un poids équivalent est donné à la vulnérabilité structurelle et à la vulnérabilité sociale. On vient ainsi normaliser entre 0 et 1 (normalisation min-max) la vulnérabilité structurelle précédemment calculée, les valeurs de vulnérabilité sociale ayant déjà subi ce traitement au préalable. Une fois nos vulnérabilités adimensionnelles établies, il est possible de les additionner (**Figure 13**) pour obtenir une carte de la vulnérabilité globale sur Tours (**Figure 14**).

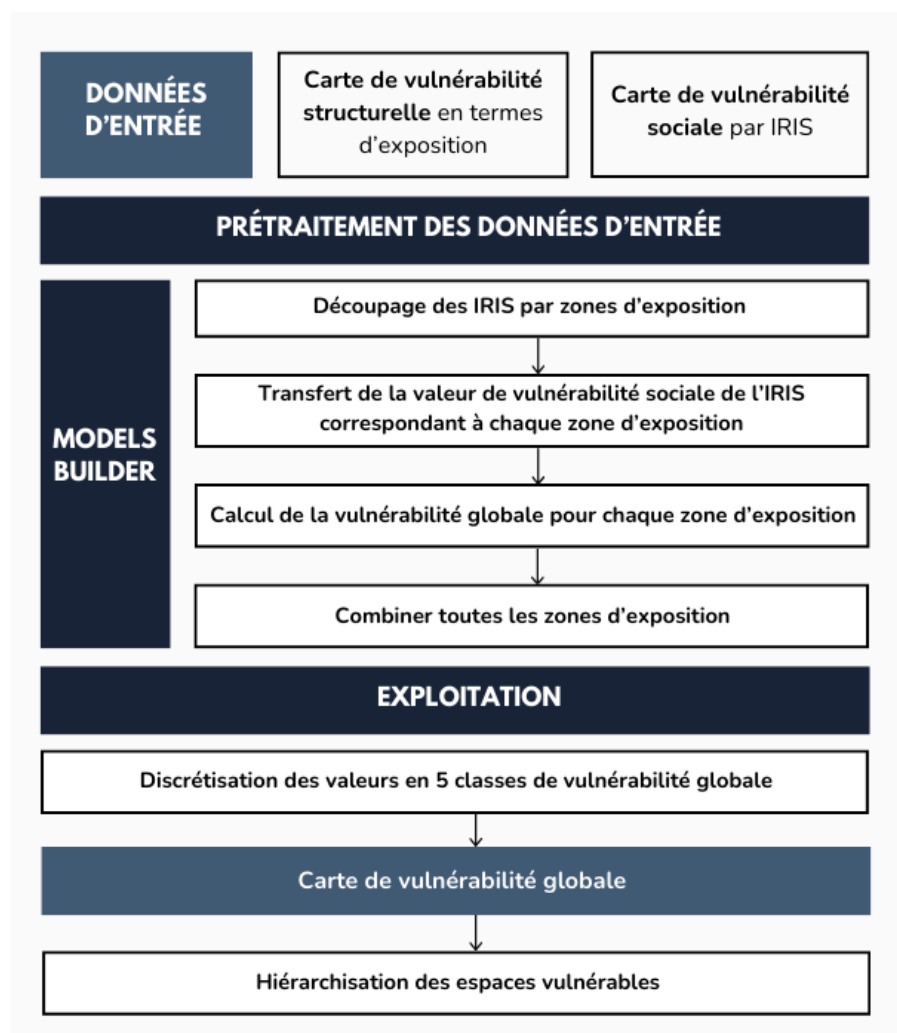


FIGURE 13. Méthodologie pour évaluer la vulnérabilité globale
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

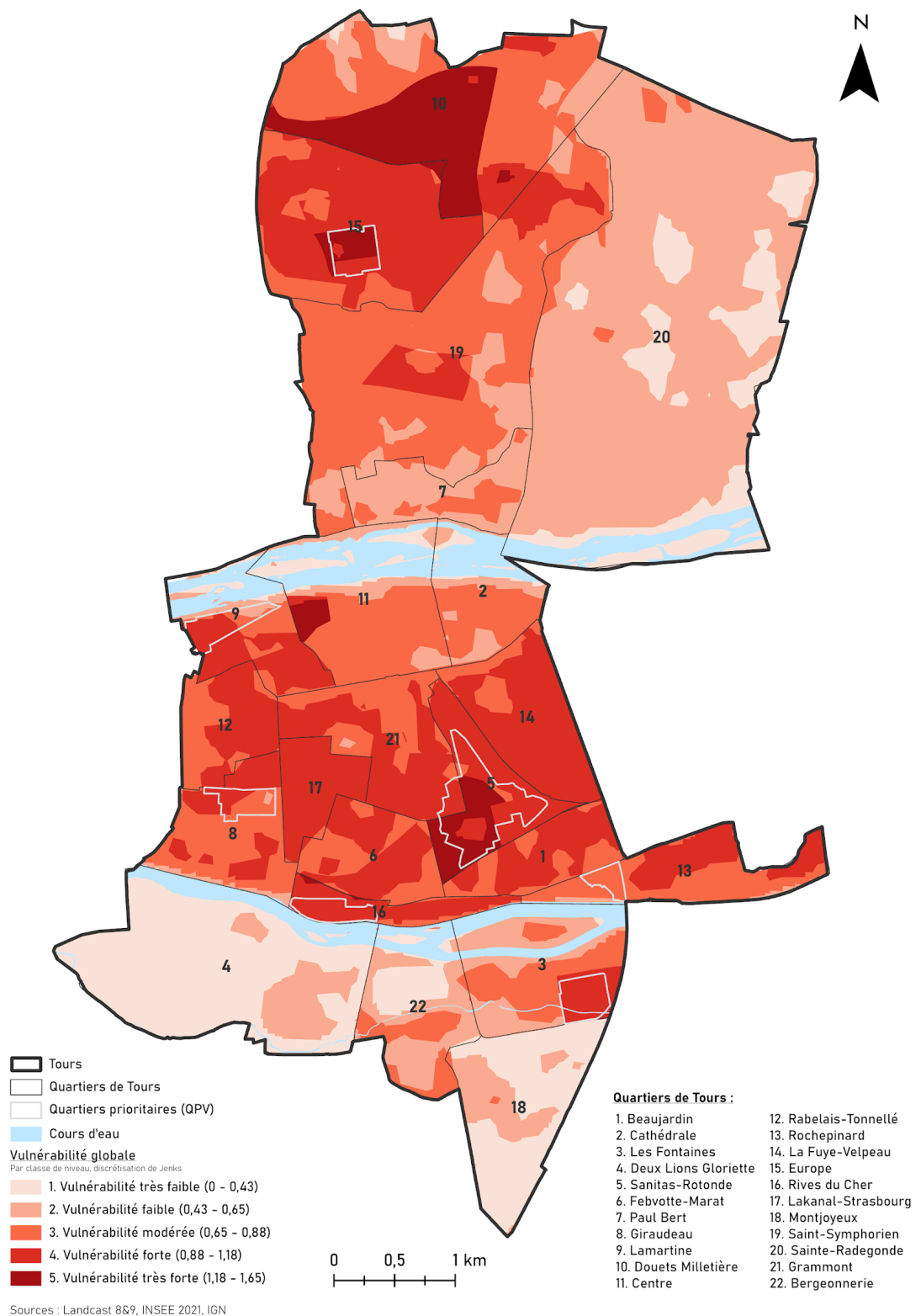


FIGURE 14. Cartographie de la vulnérabilité globale face aux ICUs sur la commune de Tours
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Cette carte nous apprend donc que la vulnérabilité globale de Tours est loin d'être uniforme sur l'ensemble du territoire. Ce constat est confirmé par la distribution de cette vulnérabilité globale (**Figure 15**) qui révèle une distribution asymétrique à droite. Ainsi, la majorité du territoire présente une vulnérabilité globale modérée voire plutôt faible (inférieure à 0,7) mais on observe une longue "traîne" vers les valeurs plus élevées, indiquant la présence de certaines zones particulièrement vulnérables. Il s'agit donc de se concentrer sur ces espaces.

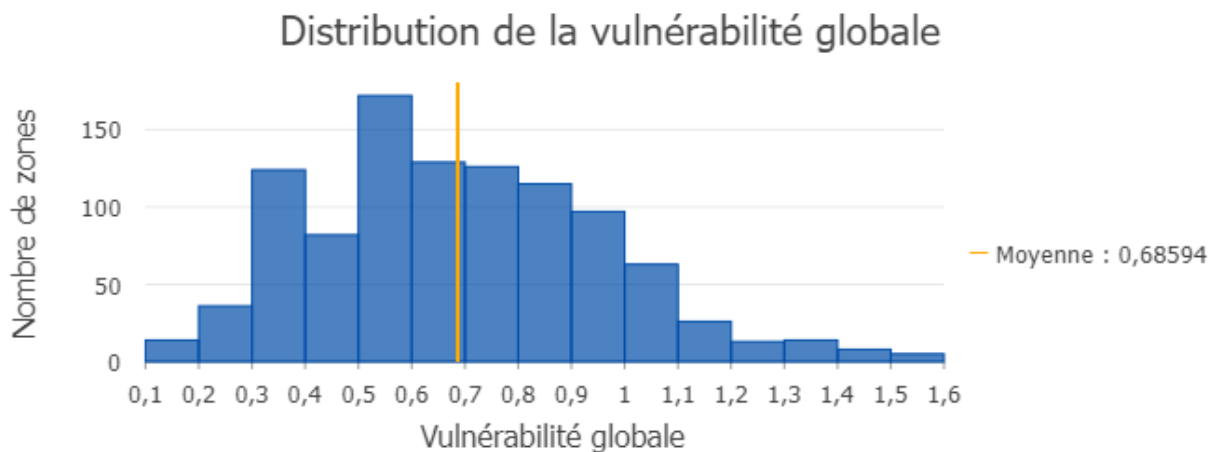


FIGURE 15. Distribution de la vulnérabilité globale
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

On identifie ainsi quatre zones très fortement vulnérables aux ICUs : deux d'entre elles sont situées dans les QPV du Sanitas et de l'Europe et les autres sont localisées respectivement dans le centre historique de Tours et le quartier Douets Milletière. Cette dernière zone, au nord de Tours, appartient à l'unique IRIS d'activités de Tours et concentre majoritairement des activités commerciales et industrielles. Bien que cette zone d'activités présente une vulnérabilité globale notable, sa très faible concentration d'enjeux humains (77 habitants) la place en dehors des priorités pour l'adaptation aux îlots de chaleur urbains. Par conséquent, elle a été exclue de la hiérarchisation finale afin de concentrer les efforts sur des zones dans lesquelles les enjeux humains sont plus marqués. On se retrouve alors avec **trois zones très fortement vulnérables aux ICUs**, classées par importance de vulnérabilité globale :

1. Sanitas
2. Centre historique
3. Europe

3. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

À travers ce projet de recherche, nous avons tenté de déterminer la vulnérabilité des populations face au phénomène d'îlots de chaleurs urbains. Cependant, ce travail de modélisation sur le sujet a révélé plusieurs limites méthodologiques.

Dans un premier temps, il s'agit de reconnaître la non-exhaustivité de notre démarche. En effet, par manque de données disponibles, notamment sur l'aspect sanitaire, il n'a pas été possible de traiter la vulnérabilité dans toute sa pluralité. Ces limites inhérentes aux types de données utilisées, à leur résolution, etc sont caractéristiques de l'exercice de modélisation en lui-même. Par définition, un modèle est une simplification de la réalité : il est donc nécessaire de prendre des hypothèses réductrices ou de ne prendre en compte qu'un nombre limité de facteurs. Faire des simplifications n'est cependant pas critiquable à condition que le modèle soit transparent. Il s'agit alors de trouver le bon équilibre entre réalité et simplification afin de répondre à l'objectif fixé.

Un verrou au niveau de la quantification numérique des températures a également été rencontré. Initialement, au vu de l'étroite dépendance entre le rayonnement solaire, les effets d'ombres et la chaleur urbaine, des essais de simulations de rayonnements solaires et d'ombrage à partir du modèle numérique de surface de la ville de Tours ont été réalisées. Les **figures 16 et 17** présentent les résultats obtenus sur le périmètre très fortement vulnérable aux ICUs du quartier de l'Europe.

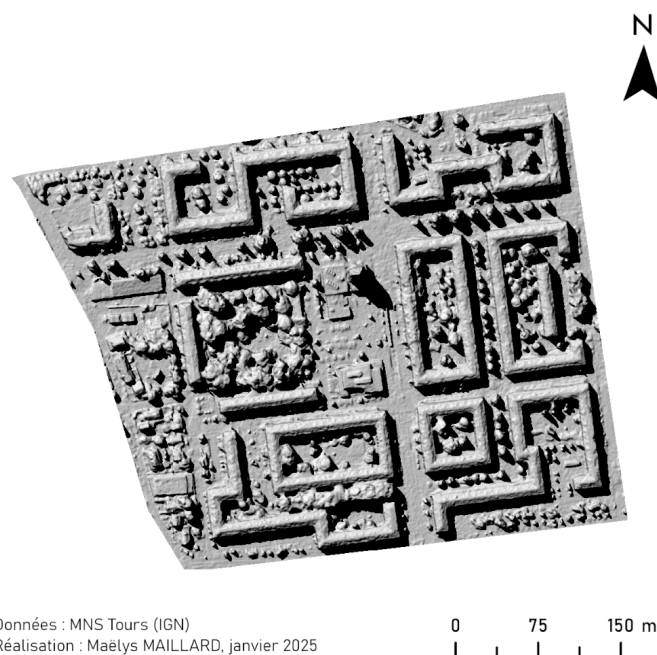


FIGURE 16. Simulation d'ombrage sur la zone très fortement vulnérable aux ICUs du quartier de l'Europe
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

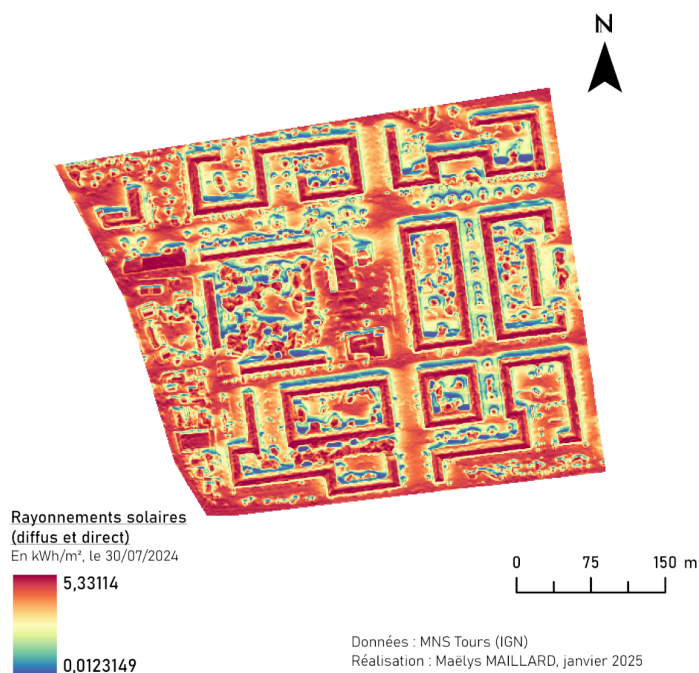


FIGURE 17. Simulation de rayonnements solaires, direct et diffus, sur la zone très fortement vulnérable aux ICUs du quartier de l'Europe le 30 juillet 2024
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Ces résultats sont particulièrement pertinents, car ils reflètent des dynamiques complexes (impacts des matériaux, etc) en jeu dans le phénomène d'îlot de chaleur urbain, et ce, à une échelle très fine. La loi de Stefan-Boltzmann, en faisant varier l'émissivité des matériaux, a ensuite été appliquée aux valeurs de rayonnements : cependant, cette approche ne permettait pas de prendre en compte l'évapotranspiration de la végétation qui a pourtant un impact considérable sur les températures. C'est pourquoi l'utilisation de données satellite de températures de surface a finalement été préférée. Une analyse fine future des zones très fortement vulnérables aux ICUs identifiées à l'aide de notre modèle pourrait toutefois permettre d'exploiter ces données.

La quantification numérique des températures aurait également pu être appréhendée via la température de l'air, nous permettant alors de calculer la température ressentie : donnée particulièrement pertinente dans le cadre d'une approche par la vulnérabilité centrée sur les populations. Néanmoins, une fois encore, la disponibilité des données était limitée.

Bien que notre spectroscopie de la vulnérabilité soit perfectible, elle constitue tout de même un outil pertinent. En effet, elle permet d'effectuer des analyses de vulnérabilité intra-urbaine et possède donc un réel potentiel d'exploitation pour l'orientation de politique d'éco-adaptation, notamment grâce aux différentes cartographies produites. Il est d'ailleurs important de se remémorer que bien que les cartes permettent de rendre visible l'invisible (*Propeck-Zimmermann et al., 2002*), elles doivent être interprétées avec prudence et attention. Même en présence de valeurs de vulnérabilité proches, voire

égales à zéro, la vulnérabilité face aux ICUs demeure dans l'absolu, car elle ne peut jamais être nulle dans un espace urbanisé : il n'existe pas de territoire ni de population invulnérable (Rufat, 2009).

Ce travail de recherche nous a donc permis d'étudier la vulnérabilité relative aux ICUs. Cependant, l'ICU étant considéré comme un risque environnemental urbain, il est donc le reflet des interactions entre les profils de vulnérabilités et l'aléa thermique. Afin de caractériser complètement les îlots de chaleur urbains, l'étude de ce phénomène doit être approfondie.

Pour cela, on pourrait envisager de convoquer la classification en zones climatiques locales (LCZ). Comme évoqué dans l'état de l'art, les LCZ permettent de découper un territoire, selon la morphologie, l'occupation du sol et les matériaux, en zones présentant un comportement climatique relativement homogène (Stewart & Oke, 2012). Cette méthode, développée en 2012, a rapidement été adoptée par la communauté scientifique internationale et est aujourd'hui facilement accessible pour les collectivités et les particuliers. En effet, en octobre 2024, le Cerema et le Ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques ont publié une cartographie nationale des LCZ de 83 aires urbaines afin d'aider les collectivités dans leur diagnostic de la surchauffe urbaine (*Le Cerema Publie de Nouvelles Données Sur la Surchauffe Urbaine | Cerema, 2024*). Ainsi, la classification en LCZ de la ville de Tours (**Figure 18**) peut être comparée à notre cartographie de la vulnérabilité globale.

D'après le Cerema, la sensibilité des typologies LCZ à l'effet d'ICU varie et ce sont les LCZ 1 et 2 qui présentent une très forte sensibilité aux ICUs (*ArcGIS Dashboards, s. d.*). Il est ainsi particulièrement intéressant de constater que parmi les trois zones identifiées comme très fortement vulnérables aux ICUs dans notre étude, seule la zone située dans le centre historique de Tours (zone 2 sur la figure 18) se compose majoritairement de LCZ 1 (Ensemble compact de tours) et 2 (Ensemble compact d'immeubles). Ce constat confirme donc que seule approche intégrée permet d'appréhender toute la complexité relative aux îlots de chaleurs urbains.

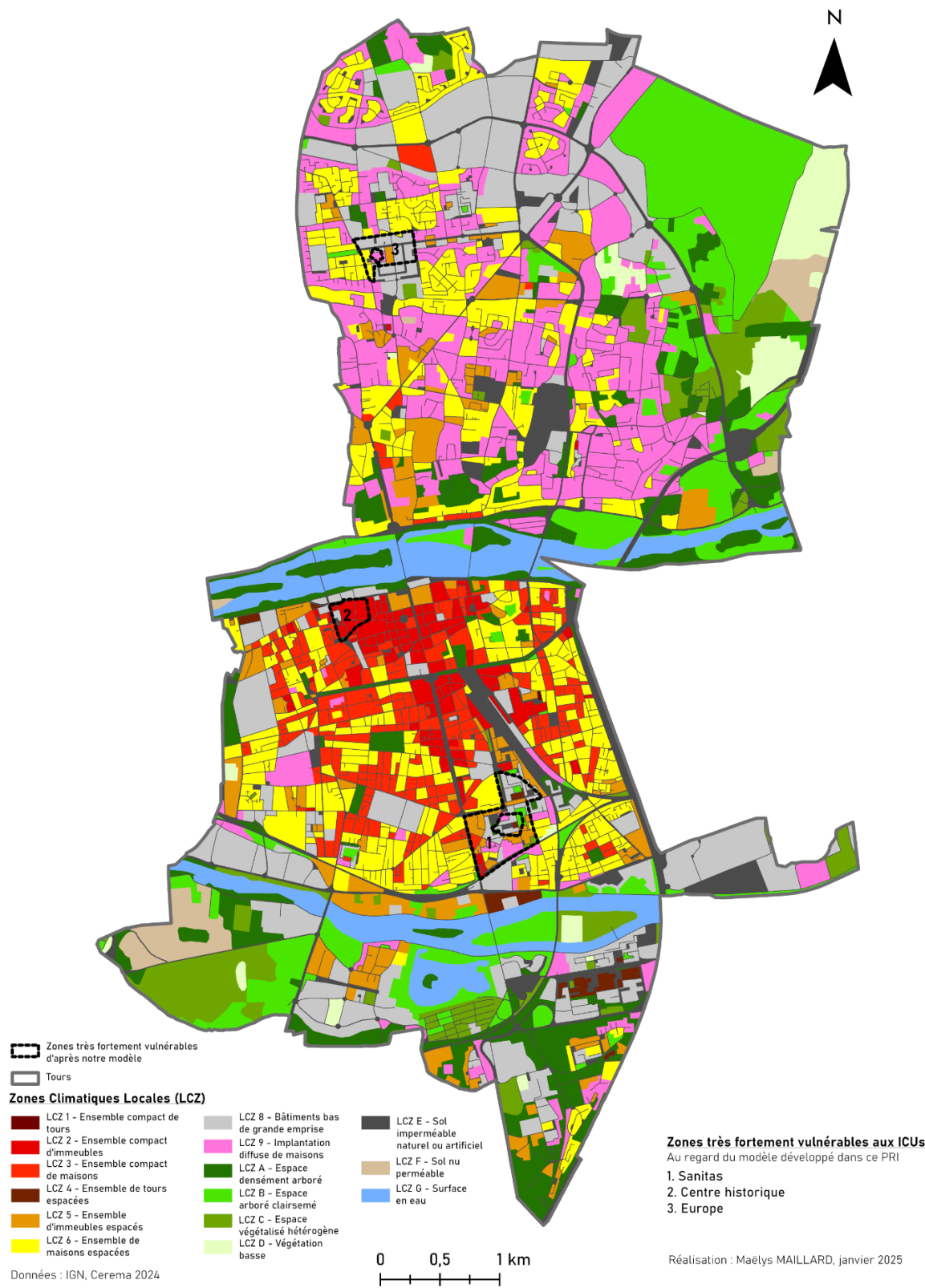


FIGURE 18. Classification en zones climatiques locales (LCZ) de la ville de Tours
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

CONCLUSION

Les actions et inactions d'aujourd'hui feront la ville de demain. Avec des scénarios de réchauffement du climat planétaire de + 1.5 °C à + 4.4 °C, les épisodes de chaleur extrême sont voués à se multiplier (*Les Scénarios SSP | Carbone 4, s. d.*) augmentant alors le nombre de personnes qui y seront exposées. Face à ce défi, les enjeux humains associés aux îlots de chaleur urbains sont tels qu'ils nécessitent de dépasser les approches centrées uniquement sur l'aléa, pour intégrer pleinement les populations qui en souffrent.

Ce travail de recherche nous montre donc qu'une caractérisation des ICUs basée sur la vulnérabilité des populations est possible et riche d'enseignements pour la mise en place de politiques d'éco-adaptation des villes. Cependant, même si le concept de vulnérabilité permet de mieux comprendre le risque thermique que représentent les îlots de chaleur urbains, il n'apporte pas de solution miracle. Le principal problème demeure trop souvent de nature politique (*Reghezza, 2006*).

De nombreux freins exogènes à la volonté politique existent, mais l'un des rôles du politique est également de rendre possible, d'innover et de créer de nouvelles manières de faire afin d'améliorer les conditions de vie de sa population (*Lelièvre, 2023*). L'éco-adaptation des villes est donc possible, mais elle ne pourra se réaliser sans une volonté d'action forte, accompagnant et même encourageant les recherches et la mise en place d'initiatives ambitieuses.

BIBLIOGRAPHIE

1- *Qu'est-ce que la Politique de la Ville ?* (s. d.). Les Services de L'État Dans Hauts-de-Seine. Consulté le 27 janvier 2025, à l'adresse <https://www.hauts-de-seine.gouv.fr/Actions-de-l-Etat/Politique-de-la-ville-cohesion-sociale/2.Politique-de-la-ville/1-Qu'est-ce-que-la-Politique-de-la-Ville>

ADEME. (2013). Indicateurs de vulnérabilité d'un territoire au changement climatique. Dans *ADEME* (No 7406). Consulté le 16 décembre 2024, à l'adresse <https://outil-cactus.parc-golfe-morbihan.bzh/medias/2016/09/Indicateurs-de-vulnerabilite-dun-territoire-au-changement-climatique.pdf>

Ait-Ameur, K (2002). "Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains : Validation d'un système d'indicateurs "morpho climatique" et d'un indicateur de confort". Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.

Analyse hiérarchique des procédés (AHP). (s. d.). XLSTAT, Your Data Analysis Solution. Consulté le 28 janvier 2025, à l'adresse <https://www.xlstat.com/fr/solutions/fonctionnalites/analyse-hi%C3%A9rarchique-des-proc%C3%A9d%C3%A9s>

ArcGIS dashboards. (s. d.). Cerema. Consulté le 28 janvier 2025, à l'adresse <https://cartagene.cerema.fr/portal/apps/dashboards/08066acd23974111be1584a5761fd6b9>

Boukhezer h. (2002). "Caractérisation environnementale des tissus urbains en vue de leur classification". Masters thesis, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, 2002, 153p.

Bourbia F, Awbi H-B. (2004). "Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements". *Renewable Energy* 29(2), pp. 249-262.

Buie, L., McSorley, C., & Nieto, A. (2024). Creating Composite Indices Using ArcGIS : Best Practices. Dans *Esri*. Consulté le 18 janvier 2025, à l'adresse <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/media/technical-papers/creating-composite-indices-using-arcgis.pdf>

Bulletin de santé publique - Centre-Val de Loire - Été 2022 : Canicule et santé. (2022). Dans *Santé Publique France*. Consulté le 20 janvier 2025, à l'adresse https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/486472/document_file/bsp_canicule_centre_valdeloire_nov_2022.pdf

Cantat, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 75-102. <https://doi.org/10.4000/norois.1373>

Climatologie globale en juillet à Tours - Parçay-Meslay. (s. d.). Infoclimat. Consulté le 20 janvier 2025, à l'adresse <https://www.infoclimat.fr/climatologie/globale/25-juillet/tours-parcay-meslay/07240.html>

Cutter, S. L., Mitchell, J. T., & Scott, M. S. (2000). Revealing the Vulnerability of People and Places : A Case Study of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(4), 713-737. <https://doi.org/10.1111/0004-5608.00219>

DELAYE, M., LAINÉ, P., TALHA, A., Cerema. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, & SABOT, C. (2023). *Boîte à outils Îlots de chaleur urbain et santé : Sur quoi et comment agir ? Rodez Agglomération*. Cerema. Bron.
<https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/593892/boite-a-outils-ilots-de-chaleur-urbain-et-sante-su-r-quoi-et-comment-agir-rodez-agglomeration>

Esri. (n.d.). *Multispectral Landsat*. ArcGIS. Consulté le 21 janvier 2025 à l'adresse <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=d9b466d6a9e647ce8d1dd5fe12eb434b>

INSEE. (2022). *Populations de référence 2022 - Commune de Tours (37261)*. Site de l'INSEE. Consulté le 25/01/2025 à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/8288323?geo=COM-37261>

INSEE. (2021). *Compareur de territoires - Commune de Tours (37261)*. Site de l'INSEE. Consulté le 25/01/2025 à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1405599?geo=EPCI-243700754+COM-37261>

Izard, J-L. (1999). "Les indicateurs de la performance thermique du bâtiment et leurs implications en pédagogie du projet d'architecture". Comm. au 3e Colloque Franco Canadien; "Thermique des systèmes à température modérée"; Montréal; Mai 1999.

Kastendeuch, P., Massing, N., Schott, E., Philipps, N., & Lecomte, K. (2023). Vulnérabilité et îlot de chaleur urbain : les facteurs du risque thermique nocturne à Strasbourg. *Climatologie*, 20, 9. <https://doi.org/10.1051/climat/202320009>

Laaidi, M., Laaidi, K., & Besancenot, J-P. (2006). Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming. *International Journal of Biometeorology*, 51(2), 145-153. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0045-8>

LandSAT Acquisition | LandsAT Missions. (s. d.). Consulté le 22 janvier 2025, à l'adresse https://landsat.usgs.gov/landsat_acq

Landsat NASA. (2021, 4 décembre). *Landsat 8 Bands | Landsat Science*. Landsat Science | A Joint NASA/USGS Earth Observation Program. Consulté le 22 janvier 2025, à l'adresse <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/landsat-8-bands/>

Le Cerema publie de nouvelles données sur la surchauffe urbaine | Cerema. (2024, 14 octobre). Cerema. Consulté le 26 janvier 2025, à l'adresse <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-publie-nouvelles-donnees-surchauffe-urbaine>

Lelièvre, M. (2023, août 24). « Subir les effets des canicules n'est pas une fatalité, mais bien un choix politique » . *Le Monde.fr*.
https://www.lemonde.fr/idees/article/2023/08/23/subir-les-effets-des-canicules-n-est-pas-une-fatalite-mais-bien-un-choix-politique_6186332_3232.html

Leone, F., & Vinet, F. (2006). La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels [En ligne]. Dans *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles* (p. 9-25). Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3. Consulté le 10 janvier 2025, à l'adresse https://www.researchgate.net/profile/Leone-Frederic/publication/311172443_La_vulnerabilite_un_concept_fondamental_au_coeur_des_methodes_d'evaluation_des_risques_naturels/links/583ecaca08ae2d2175578991/La-vulnerabilite-un-concept-fondamental-au-coeur-des-methodes-devaluation-des-ri-sques-naturels.pdf

Les populations concernées par les vagues de chaleur et leur recensement – Ministère du Travail, de la Santé, des Solidarités et des Familles. (2024, août 6). Ministère du Travail, de la Santé, des Solidarités et des Familles. Consulté le 24 janvier 2025, à l'adresse <https://sante.gouv.fr/sante-et-environnement/risques-climatiques/article/les-populations-concernees-p-ar-les-vagues-de-chaleur-et-leur-recensement>

Les scénarios SSP / Carbone 4. (s. d.). <https://www.carbone4.com/publication-scenarios-ssp-adaptation>

Lévy J., Lussault M., 2013. Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés. Paris, Belin, 1034 p.

Magalie Técher, Hassan Ait Haddou, Rahim Aguejda. Îlot de chaleur urbain et application territoriale en France : revue des méthodes de simulation numérique. *Climatologie*, 2023, 20, pp.6.
ff10.1051/climat/202320006ff. ffhal-04368414f

Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305(5686), 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>

Météo-France. (n.d.-a). *Climadiag Commune : Tours (37261)*. Météo-France. Consulté le 28 janvier 2025 à l'adresse <https://climadiag-commune.meteofrance.com/entity/37261>

Météo-France. (n.d.-b). *Relevés climatologiques à Tours, Centre-Val de Loire*. Météo-France. Consulté le 28 janvier 2025 à l'adresse <https://meteofrance.com/climat/relevés/france/centre-val-de-loire/tours>

OKE T.R. (1982) : « The energetic basis of the urban heat island ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* ; vol. 108 : 1-24.

Projections de population à l'horizon 2060 – Projections de population 2007-2060 pour la France métropolitaine | Insee. (s. d.). Consulté 28 janvier 2025, à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1281151?sommaire=2020101>

Propeck-Zimmermann, É., Ravenel, L., & Saint-Gérand, T. (2002). Cartographie des risques technologiques majeurs : nouvelles perspectives avec les SIG. *Deleted Journal*, 65(1), 17-21. <https://doi.org/10.3406/mappe.2002.1730>

Rathi, S. K., Chakraborty, S., Mishra, S. K., Dutta, A., & Nanda, L. (2022). A Heat Vulnerability Index : Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Urbanites of Four Cities of India. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ijerph19010283>

Reghezza, M. (2006). La vulnérabilité : un concept problématique [En ligne]. Dans *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles* (p. 37-39). Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3. https://www.researchgate.net/profile/Vinet-Freddy/publication/265819321_La_vulnerabilite_des_societes_et_des_territoires_face_aux_menaces_naturelles_Sous_la_direction_de/links/55bdf2f308aed621de11167a/La-vulnerabilite-des-societes-et-des-territoires-face-aux-menaces-naturelles-Sous-la-direction-de.pdf#page=34

Rey, G., Jougl, E., Fouillet, A., & Hémon, D. (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(1). <https://doi.org/10.1186/1471-2458-9-33>

Rufat, S. (2007). Estimating urban vulnerability : a risk management tool. The case of the Lyon urban area. *Géocarrefour*, 82(1-2), 7-16. <https://doi.org/10.4000/geocarrefour.1397>

Rufat, S. (2009). Estimation relative de la vulnérabilité urbaine à Bucarest. *M@Ppemonde*, hal-02020454. <https://hal.science/hal-02020454/file/art09301.pdf>

Saaty, R. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

SANTAMOURIS M. (2007) : « Heat island research in Europe: The state of the art ». *Advances in building energy research* ; 1 : 123-150.

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/bams-d-11-00019.1>

What are the acquisition schedules for the Landsat satellites ? (2017, 31 décembre). USGS. Consulté le 22 janvier 2025, à l'adresse <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-acquisition-schedules-landsat-satellites>

Wilhelmi, O. V., & Hayden, M. H. (2010). Connecting people and place : a new framework for reducing urban vulnerability to extreme heat. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014021>

Wong-Parodi, G., Fischhoff, B., & Strauss, B. (2015). Resilience vs. Adaptation : Framing and action. *Climate Risk Management*, 10, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2015.07.002>

ANNEXE 1 - MATRICES DE CORRÉLATION

1. Coefficient de corrélation de Pearson

Matrice de proximité réalisée sur XLSTAT (Coef. de corrélation de Pearson) :									
	D_POP	T_0005	T_65+	T_SDIPL	REV_MED	T_CHOM_RSA	T_CHOM_LONG	T_OUVR	T_LOG_1971
D_POP	1.000	0.327	-0.353	-0.064	-0.212	-0.193	-0.025	0.215	0.337
T_0005	0.327	1.000	-0.508	0.308	-0.556	-0.308	0.023	0.708	0.025
T_65+	-0.353	-0.508	1.000	0.477	0.054	0.740	0.567	-0.196	-0.036
T_SDIPL	-0.064	0.308	0.477	1.000	-0.697	0.409	0.616	0.667	0.141
REV_MED	-0.212	-0.556	0.054	-0.697	1.000	-0.149	-0.392	-0.799	-0.037
T_CHOM_RSA	-0.193	-0.308	0.740	0.409	-0.149	1.000	0.621	-0.146	-0.006
T_CHOM_LONG	-0.025	0.023	0.567	0.616	-0.392	0.621	1.000	0.276	0.002
T_OUVR	0.215	0.708	-0.196	0.667	-0.799	-0.146	0.276	1.000	0.120
T_LOG_1971	0.337	0.025	-0.036	0.141	-0.037	-0.006	0.002	0.120	1.000
Liste des objets similaires (Seuil de dissimilarité = 0.6) :									
Objet 1	Objet 2	Similarité							
T_0005	T_OUVR	0.708							
T_65+	T_CHOM_RSA	0.740							
T_SDIPL	T_CHOM_LONG	0.616							
T_SDIPL	T_OUVR	0.667							
T_CHOM_RSA	T_CHOM_LONG	0.621							

FIGURE 1. Étude de la corrélation de Pearson entre les proxys
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Le proxy représentant le taux de chômeurs au RSA a été conservée malgré son taux de corrélation supérieur à 0,6 avec le taux de personnes de plus de 65 ans, car ce sont deux proxys qui ne caractérisent pas la même composante de la vulnérabilité sociale. Pour rappel, le taux de chômeurs au RSA caractérise la capacité d'adaptation tandis que la population de plus de 65 ans renvoie à la sensibilité. À noter que les deux proxys qui sont exclus suite à cette étude de corrélation sont le taux d'ouvriers et le taux de chômeurs de longue durée. Elles sont toutes deux corrélées à plus de 60 % avec le taux de personnes titulaires au plus d'un brevet des collèges et ces trois proxys caractérisent bien toutes la capacité d'adaptation des populations.

2. Coefficient de corrélation de Spearman

L'étude complémentaire de corrélation de Spearman permet d'émettre les mêmes constats en excluant les proxys représentant le taux d'ouvriers et le taux de chômeurs de longue durée.

Matrice de proximité réalisée sur XLSTAT (Coef. de corrélation de Spearman) :									
	D_POP	T_0005	T_65+	T_SDIPL	REV_MED	T_CHOM_RSA	T_CHOM_LONG	T_OUVR	T_LOG_1971
D_POP	1.000	0.218	-0.318	-0.099	-0.115	0.113	0.113	-0.017	0.370
T_0005	0.218	1.000	-0.445	0.424	-0.591	0.399	0.392	0.617	0.010
T_65+	-0.318	-0.445	1.000	0.285	0.232	-0.055	0.064	-0.101	-0.033
T_SDIPL	-0.099	0.424	0.285	1.000	-0.701	0.556	0.650	0.747	0.124
REV_MED	-0.115	-0.591	0.232	-0.701	1.000	-0.682	-0.603	-0.825	-0.018
T_CHOM_RSA	0.113	0.399	-0.055	0.556	-0.682	1.000	0.884	0.501	0.043
T_CHOM_LONG	0.113	0.392	0.064	0.650	-0.603	0.884	1.000	0.499	0.115
T_OUVR	-0.017	0.617	-0.101	0.747	-0.825	0.501	0.499	1.000	-0.012
T_LOG_1971	0.370	0.010	-0.033	0.124	-0.018	0.043	0.115	-0.012	1.000
Liste des objets similaires (Seuil de dissimilarité = 0.6) :									
Objet 1	Objet 2	Similarité							
T_0005	T_OUVR	0.617							
T_SDIPL	T_CHOM_LONG	0.650							
T_SDIPL	T_OUVR	0.747							
T_CHOM_RSA	T_CHOM_LONG	0.884							

FIGURE 2. Étude de la corrélation de Spearman entre les proxys
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

ANNEXE 2 - ANALYSE HIÉRARCHIQUE DES PROCÉDÉS (AHP)

L'**analyse hiérarchique des procédés (AHP)** est une méthode d'aide à la décision qui permet de structurer un problème complexe grâce à une hiérarchisation des critères afin d'attribuer des poids aux critères en fonction de leur importance relative (*Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP), s. d.*). Une part de subjectivité des jugements, pouvant influencer les résultats, est donc inhérente à cette méthode. Afin de limiter au maximum cette subjectivité, la décomposition hiérarchique des 7 proxys considérés se base sur les enseignements tirés de notre état de l'art et des connaissances acquises sur les îlots de chaleur urbains au cours de nos lectures bibliographiques :

<u>Composante de la vulnérabilité sociale</u>	<u>Proxy</u>		<u>Ordre hiérarchique</u>
EXPOSITION	D_POP	Densité de population	1
SENSIBILITÉ	T_65+	Taux de personnes de plus de 65 ans	2
	T_0005	Taux de personnes de moins de 5 ans	3
	T_LOG_1971	Taux de logements construits avant 1971	4
ADAPTATION	REV_MED	Revenu disponible médian par IRIS	5
	T_CHOM_RSA	Taux de chômeurs touchant le RSA dans la population active (15-64 ans)	6
	T_SDIPL	Taux de personnes de 15 ans ou plus non scolarisées titulaires au plus d'un brevet des collèges	7

FIGURE 1. Hiérarchie établie entre les proxys

(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

Il s'agit désormais d'exposer les différentes étapes de l'AHP (Saaty, 1987) :

1. Comparaison par paires des différents proxys

Cette comparaison se fait selon l'échelle de Saaty : il est également possible d'utiliser des valeurs intermédiaires paires.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extrêmement moins important	très fortement moins important	fortement moins important	modérément moins important	équivalent	modérément plus important	fortement plus important	très fortement plus important	extrêmement plus important

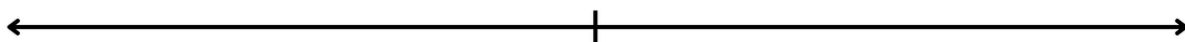


FIGURE 2. Échelle de Saaty

(Réalisation : Maëlys MAILLARD, 2025 d'après Saaty, 1987)

On compare ainsi les proxys deux à deux en déterminant quelle variable est la plus importante par rapport à l'autre. La matrice alors obtenue (**Figure 3**) se lit de l'horizontale par rapport à la verticale : la densité de population est donc modérément plus importante que le taux de personnes de moins de 5 ans.

	D_POP	T_0005	T_65+	T_SDIPL	REV_MED	T_CHOM_RSA	T_LOG_1971
D_POP	1	3	2	7	5	6	4
T_0005	0,33	1	0,5	5	3	4	2
T_65+	0,5	2	1	6	4	5	3
T_SDIPL	0,14	0,2	0,17	1	0,33	0,5	0,25
REV_MED	0,2	0,33	0,25	3	1	2	0,5
T_CHOM_RSA	0,17	0,25	0,2	2	0,5	1	0,33
T_LOG_1971	0,25	0,5	0,33	4	2	3	1
TOTAL	2,59	7,28	4,45	28	15,83	21,5	11,08

FIGURE 3. Matrice de comparaison par paires des différents proxys
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

2. Normalisation

Il s'agit ensuite d'effectuer une normalisation en divisant chaque cellule par la somme de sa colonne. On obtient alors des poids relatifs (**Figure 4**) par cellule et c'est la moyenne des poids relatifs en ligne qui va nous permettre d'obtenir le poids de chaque proxy i.e. la valeur de la pondération pour chaque proxy.

	D_POP	T_0005	T_65+	T_SDIPL	REV_MED	T_CHOM_RSA	T_LOG_1971	Poids
D_POP	0,386	0,412	0,449	0,250	0,316	0,279	0,361	0,350
T_0005	0,129	0,137	0,112	0,179	0,189	0,186	0,180	0,159
T_65+	0,193	0,275	0,225	0,214	0,253	0,233	0,271	0,237
T_SDIPL	0,055	0,027	0,037	0,036	0,021	0,023	0,023	0,032
REV_MED	0,077	0,046	0,056	0,107	0,063	0,093	0,045	0,070
T_CHOM_RSA	0,064	0,034	0,045	0,071	0,032	0,047	0,030	0,046
T_LOG_1971	0,096	0,069	0,075	0,143	0,126	0,140	0,090	0,106
TOTAL	1	1	1	1	1	1	1	1

FIGURE 4. Poids relatifs des proxys
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

3. Calcul de la cohérence des pondérations

Les pondérations des proxys sont ensuite multipliées par leur pondération brute, i.e. la somme de la colonne qui leur correspond dans la matrice initiale de comparaison.

	D_POP	T_0005	T_65+	T_SDIPL	REV_MED	T_CHOM_RSA	T_LOG_1971	Poids	Poids*somme
D_POP	0,386	0,412	0,449	0,250	0,316	0,279	0,361	0,350	0,909
T_0005	0,129	0,137	0,112	0,179	0,189	0,186	0,180	0,159	1,158
T_65+	0,193	0,275	0,225	0,214	0,253	0,233	0,271	0,237	1,057
T_SDIPL	0,055	0,027	0,037	0,036	0,021	0,023	0,023	0,032	0,890
REV_MED	0,077	0,046	0,056	0,107	0,063	0,093	0,045	0,070	1,103
T_CHOM_RSA	0,064	0,034	0,045	0,071	0,032	0,047	0,030	0,046	0,993
T_LOG_1971	0,096	0,069	0,075	0,143	0,126	0,140	0,090	0,106	1,170
TOTAL	1	1	1	1	1	1	1	1	7,279

Valeur propre

FIGURE 5. Matrice pour la vérification de la cohérence des pondérations
(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

La somme de cette colonne “Poids*Somme” nous permet d’obtenir la valeur propre notée $\lambda_{\max}$, donnée essentielle pour calculer l’indice de cohérence CI et le ratio de cohérence CR qui nous permettent de nous assurer que nos pondérations sont rationnelles et cohérentes. On a donc, avec n le nombre de proxys et RI, l’indice de cohérence aléatoire (1.32 pour n=7) :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{7.279 - 7}{6} = 0,0465$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0465}{1.32} \approx 0.035$$

Notre ratio de cohérence est inférieur à 0,10 : l’indice est donc cohérent et on peut utiliser les pondérations déterminées précédemment pour construire notre indice de vulnérabilité sociale.

Variables	Poids
D_POP	0,350
T_0005	0,159
T_65+	0,237
T_SDIPL	0,032
REV_MED	0,070
T_CHOM_RSA	0,046
T_LOG_1971	0,106

FIGURE 6. Poids retenus pour la pondération des proxys dans le cadre de la construction de l’indice composite de vulnérabilité sociale

(Auteure : Maëlys MAILLARD, 2025)

ANNEXE 3 - INDICE DE VULNÉRABILITÉ SOCIALE PAR IRIS

Nom de l'IRIS	Rang (de l'IRIS le moins au plus vulnérable)	Indice de vulnérabilité sociale (suite à la pondération des proxys)	Indice de vulnérabilité sociale normalisé	Indice converti en centiles
Deux Lions Gloriette	1	-0.848	0.000	0.0
Montjoyeux	2	-0.785	0.025	1.8
Sainte-Radegonde 1	3	-0.648	0.081	3.6
Sainte-Radegonde 2	4	-0.507	0.137	5.4
Cathédrale	5	-0.463	0.155	7.1
Centre 2	6	-0.441	0.164	8.9
Centre 1	7	-0.419	0.173	10.7
Saint-Symphorien 2	8	-0.395	0.182	12.5
Douets Milletière 2	9	-0.332	0.207	14.3
Paul Bert	10	-0.321	0.212	16.1
Giraudeau 2	11	-0.316	0.214	17.9
Centre 5	12	-0.316	0.214	19.6
Les Fontaines 1	13	-0.261	0.236	21.4
Les Fontaines 2	14	-0.241	0.244	23.2
Saint-Symphorien 5	15	-0.231	0.248	25.0
Douets Milletière 1	16	-0.213	0.255	26.8
Saint-Symphorien 4	17	-0.208	0.257	28.6
Saint-Symphorien 1	18	-0.202	0.260	30.4
Lamartine 1	19	-0.153	0.280	32.1
Febvotte-Marat 1	20	-0.152	0.280	33.9
Grammont 2	21	-0.090	0.305	35.7
Europe 5	22	-0.071	0.312	37.5
Febvotte-Marat 2	23	-0.066	0.314	39.3
Grammont 4	24	-0.062	0.316	41.1
La Fuye Velpeau 4	25	-0.048	0.322	42.9
Rochevinard	26	-0.042	0.324	44.6
Rabelais-Tonnellé 2	27	-0.031	0.329	46.4
La Bergeonnerie	28	-0.030	0.329	48.2
Europe 1	29	-0.014	0.335	50.0
Beaujardin 2	30	-0.009	0.337	51.8
Grammont 1	31	0.002	0.342	53.6
Beaujardin 1	32	0.009	0.344	55.4
Rabelais-Tonnellé 1	33	0.032	0.354	57.1
La Fuye Velpeau 2	34	0.040	0.357	58.9
La Fuye Velpeau 1	35	0.062	0.366	60.7
Europe 2	36	0.126	0.391	62.5
Sanitas-Rotonde 1	37	0.130	0.393	64.3
La Fuye Velpeau 3	38	0.171	0.409	66.1
Centre 4	39	0.174	0.411	67.9
Lakanal-Strasbourg 2	40	0.190	0.417	69.6
Grammont 3	41	0.202	0.422	71.4
Saint-Symphorien 3	42	0.233	0.434	73.2
Europe 6	43	0.255	0.443	75.0

Nom de l'IRIS	Rang (de l'IRIS le moins au plus vulnérable)	Indice de vulnérabilité sociale (suite à la pondération des proxys)	Indice de vulnérabilité sociale normalisé	Indice converti en centiles
Lakanal-Strasbourg 1	44	0.281	0.454	76.8
Giraudeau 1	45	0.301	0.462	78.6
Lamartine 2	46	0.364	0.487	80.4
Europe 3	47	0.377	0.492	82.1
Sanitas-Rotonde 5	48	0.478	0.533	83.9
Rives du Cher 1	49	0.513	0.547	85.7
Les Fontaines 3	50	0.789	0.658	87.5
Europe 4	51	0.800	0.662	89.3
Centre 3	52	0.807	0.665	91.1
Rives du Cher 2	53	0.822	0.671	92.9
Douets Milletière 3	54	0.907	0.705	94.6
Sanitas-Rotonde 4	55	0.992	0.739	96.4
Sanitas-Rotonde 2	56	1.208	0.826	98.2
Sanitas-Rotonde 3	57	1.641	1.000	100.0

Directeurs de recherche :

Francis ISSELIN
Kamal SERRHINI

Maxime ANDRIEU
Maëlys MAILLARD
PRI DAE5 UIT RESEAU
2024-2025

Caractérisation des îlots de chaleur urbains : Une approche par la vulnérabilité

Résumé :

Ce travail de recherche explore le **potentiel des méthodologies d'études des risques naturels** dans la **caractérisation des îlots de chaleur urbains**. L'objectif de cette étude est donc de proposer une caractérisation de l'îlot de chaleur urbain par la **vulnérabilité de la population** face à ce phénomène dans la ville de **Tours**.

Tout d'abord, un état de l'art présente le phénomène des îlots de chaleur ainsi que les **enjeux humains** associés. Il met en évidence l'importance d'étudier ce phénomène à travers le prisme de la vulnérabilité, qu'elle soit structurelle ou sociale.

Par la suite, la **vulnérabilité structurelle** est analysée à travers l'exposition à la chaleur, tandis que la **vulnérabilité sociale** de la population face à la chaleur est mesurée grâce à un indice composite basé sur l'exposition, la sensibilité et l'adaptation. Ces facteurs ont été évalués à partir de variables proxy issues de bases de données de l'INSEE. L'analyse conjointe des vulnérabilités sociale et structurelle permet alors de déterminer la **vulnérabilité globale** face au phénomène d'îlots de chaleur urbains. Cette identification des populations les plus exposées suggère une meilleure **gestion du risque** environnemental urbain que représente l'ICU, notamment grâce à l'orientation de politiques d'**éco-adaptation des villes**.

Mots Clés : Aléa ; Capacité d'adaptation ; Caractérisation ; Enjeux humains ; Exposition ; Îlot de Chaleur Urbain ; Morphologie urbaine ; Risques naturels ; Risque thermique ; Sensibilité ; Vulnérabilité.