



HAL
open science

Comparaison de méthodes d'évaluation statistiques de la vulnérabilité sociale à la hausse de la chaleur en milieu urbain : application aux métropoles de Toulouse, Grenoble, Lyon et Paris

Thomas Lagelouze

► To cite this version:

Thomas Lagelouze. Comparaison de méthodes d'évaluation statistiques de la vulnérabilité sociale à la hausse de la chaleur en milieu urbain : application aux métropoles de Toulouse, Grenoble, Lyon et Paris. Géographie. 2022. dumas-03774994

HAL Id: dumas-03774994

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03774994v1>

Submitted on 12 Sep 2022

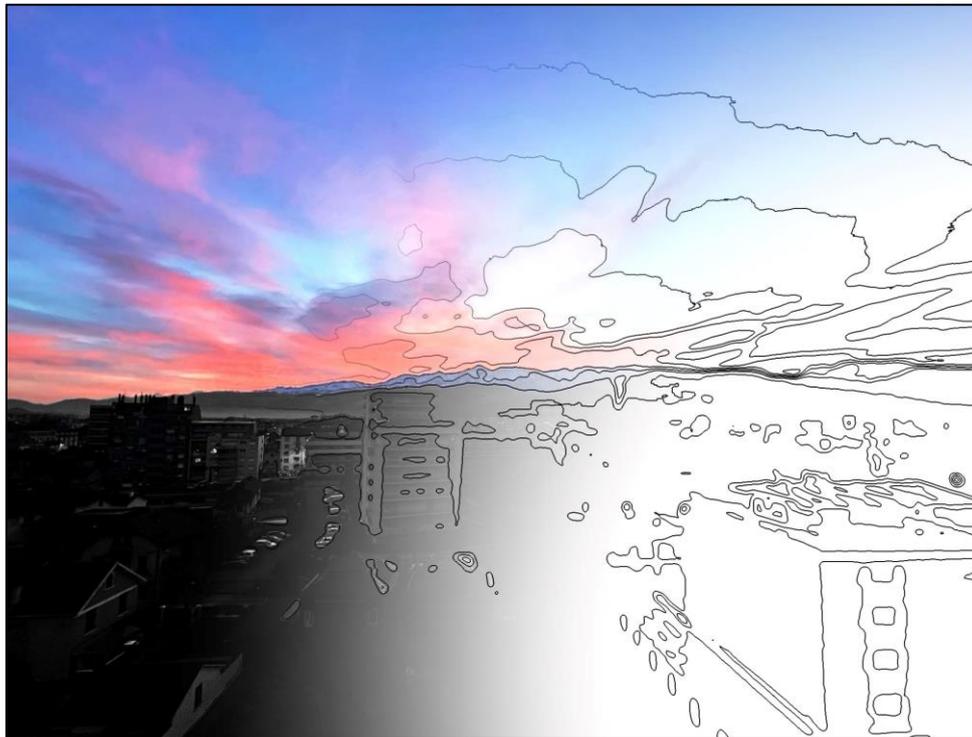
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Master 2 Mention « Géographie, Aménagement, Environnement, Développement »
Parcours : GEOgraphie Information Interface Durabilité EnvironnementS

Comparaison de méthodes d'évaluation statistiques de la vulnérabilité sociale à la hausse de la chaleur en milieu urbain : application aux métropoles de Toulouse, Grenoble, Lyon et Paris

Vue de la chaîne de Belledonne depuis l'Est grenoblois.
© Thomas LAGELOUZE, Février 2022



Réalisé au Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST) à Toulouse,
sous la direction de Madame **Julia Hidalgo**, chargée de recherches en climatologie urbaine.

Mémoire soutenu le 29 juin 2022

Par : **Thomas LAGELOUZE**

Devant un jury constitué de :

Madame **Sandra Rome**, Maître de conférences en Géographie à l'UGA, IGE

Monsieur **Sylvain Bigot**, Professeur des Universités en Géographie à l'UGA, IGE,
tuteur pédagogique

Année 2021-2022



« A town has a nervous system and a head and shoulders and feet. A town is a thing separate from all other towns, so that there are no two towns alike. And a town has a whole emotion. »

- The Pearl of **John Steinbeck**, 1947.

Sommaire

Remerciements	5
Présentation de la structure d'accueil et des missions	7
Glossaire.....	8
Nomenclature	9
Introduction	10
1. Etat de l'art sur la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain.....	13
2. Présentation des sites d'étude.....	20
3. Données utilisées	22
4. Méthodologie des évaluations de vulnérabilité à la chaleur	26
5. Résultats.....	36
Discussions et Conclusions	46
Bibliographie	49
Annexes	62

Remerciements

Voici venir l'heure des remerciements de ce mémoire qui clôturera la fin d'une aventure universitaire riche en émotion et en travail ; et qui, je l'espère, signe ou signera le début d'une nouvelle ! Beaucoup de personnes sont intervenues de près comme de loin dans ma petite expérience à Toulouse, je tiens à toutes les remercier, si jamais certaines d'entre elles venaient à manquer à l'appel.

En premier lieu, je tiens à adresser toute ma gratitude à mon encadrante de stage Madame Julia Hidalgo. Je la remercie d'abord d'avoir su directement comprendre, au détour d'un mail envoyé à brûle-pourpoint, mon projet et mes envies avant ma venue à Toulouse. Pour m'adresser directement à toi, je te remercie beaucoup, justement, pour tout ton engagement autour de mon projet, même si celui-ci n'a pu se construire et se conclure avec toi. Merci pour tes conseils, tes relectures, pour avoir voulu et su correctement m'(ré)orienter, pour mon intégration au sein du laboratoire, pour toutes ces discussions si enrichissantes tant scientifiquement qu'humainement. Finalement, merci d'avoir dès le début (et encore aujourd'hui) fait confiance à un jeune étudiant que tu ne connaissais pas ; merci de faire que ce stage puisse se prolonger.

Je remercie Monsieur Guillaume Dumas d'être pleinement intervenu dans ce stage et d'avoir suivi tout au long le travail réalisé. Je le remercie pour tous ses conseils et ses expertises ; mais également pour m'avoir fait découvrir et présenter le réseau urbain de stations météorologiques de Toulouse dont il assure le *monitoring*. Merci pour cette journée intéressante !

Je remercie également mon enseignant référent, Monsieur Sylvain Bigot, de m'avoir tout d'abord encouragé et guidé vers ce stage. Je le remercie pour ses critiques, toujours constructives, sur ce mémoire et sur mes travaux en général.

Je tiens bien entendu à communiquer mes sincères remerciements à Madame Sandra Rome pour avoir bien voulu, une nouvelle fois, se porter jury pour mon travail. Au-delà du simple cadre de ce mémoire, je la remercie pour toute son aide apportée depuis ma rentrée en Master 1. Merci à elle de m'avoir mis « le pied à l'étrier » dans ce petit monde de la recherche en climatologie urbaine. Je trouve que ce travail est un bon trait d'union avec mon stage précédent réalisé à l'IGE, sous son encadrement ; en espérant qu'elle pourra l'apprécier. Merci Sandra !

Bien sûr, merci à mon camarade de stage Mitia (ou *abuelito*... 🤔) d'avoir partagé avec moi les joies et les peines de ces évaluations statistiques. Merci pour ta bonne humeur et pour avoir enjoué nos sessions de travail collectives. J'ai beaucoup appris à tes côtés, en espérant pouvoir retravailler un jour avec toi !

Un grand merci également à Madame Najla Touati, Ingénieur de recherche en géomatique, et à Madame Wilda Jean-Baptiste, Ingénieur d'étude en statistique, pour m'avoir aidé et guidé sur de nombreux traitements et représentations cartographiques.

Merci à mes petits camarades de bureau du LISST pour tous ces bons moments partagés en dedans et en dehors ! Merci à Leia, Rita, Emilia, Méhéret, Élian et Paul pour leur aide et tous leurs conseils. Je vous souhaite à tous bonne chance dans vos projets respectifs.

Je n'oublie pas Hadrien Di Costanzo, doctorant en climatologie, pour avoir pris le temps de m'aiguiller sur certains traitements. Merci pour ces discussions statistiques.

Enfin, je porte forcément une pensée pour la personne qui accompagne mon quotidien depuis deux ans maintenant : toi, « (...) *avec qui je peux parler de l'ombre d'un nuage ou de la mélodie d'une pensée* » ...

Présentation de la structure d'accueil et des missions

Le stage de fin d'étude en géographie physique se déroule du 1^{er} mars au 26 août 2022 (suite à un prolongement, ce dernier devait initialement se terminer le 10 juin 2022) au Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST, Unité Mixte de Recherche 5193), au sein de l'équipe de recherche du Centre Interdisciplinaire d'Etudes Urbaines (CIEU) à Toulouse. Le LISST est un laboratoire de recherche regroupant des membres permanents, des post-doctorants, des doctorants et des stagiaires réguliers, autour d'expertises scientifiques variées en Sciences Humaines et Sociales. Pour sa part, le CIEU travaille sur un ensemble de thématiques touchant les divers processus de transformation des villes, tel que l'habitat, les rapports entre économie et espaces urbains, la ville durable et le climat urbain (<https://lisst.univ-tlse2.fr>).

Ce stage se concentre quant à lui sur la thématique du climat urbain, sous l'encadrement de Julia Hidalgo, chargée de recherches en climatologie urbaine sur les questions d'adaptation des villes au changement climatique, appliquées à l'urbanisme opérationnel. Il a été réalisé en collaboration avec Toulouse Métropole, par l'intermédiaire de Guillaume Dumas, Ingénieur de recherche pour le compte du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et de la collectivité territoriale.

Finalement, ce stage s'inscrit dans une étude plus globale à la frontière du scientifique pour les projets d'études du LISST-CIEU, et de l'opérationnel pour les besoins et demandes actuels de Toulouse Métropole à ce sujet. De fait, une première partie, sur laquelle repose ce mémoire, portait uniquement sur la comparaison, d'un point de vue statistique, des méthodes pour mesurer et évaluer la vulnérabilité à la chaleur dans un milieu urbain. Une seconde partie/stage, connexe et complémentaire à la première, a été réalisé en parallèle, par Mitia Aranda Faieta, étudiant en Master 2 International Erasmus, Mention : « *Urban Climate and Sustainability* » (MUrCS). Elle avait pour objectif d'analyser territorialement et opérationnellement les résultats statistiques obtenus précédemment.

Glossaire

Changement climatique : Le changement climatique peut se définir comme la variation de l'état du climat, identifiée par la modification de ses propriétés sur une longue période. Dans le cas du réchauffement climatique actuel, ces dites modifications ne sont pas le fruit de variabilités climatiques de causes « naturelles » (comme celles survenues par exemple lors du *Petit âge glaciaire*) mais « anthropiques » (IPCC, 2021).

Classification de Köppen-Geiger : La classification de Köppen-Geiger est une classification des types de climats mondiaux, inventée en 1900 et fondée sur les précipitations et les températures (Dubreuil, 2022).

Cfa : Selon la classification de Köppen-Geiger, le type de climat *Cfa* est un climat tempéré chaud sans saison sèche et à été chaud (Veltz, 2014).

Cfb : Selon la classification de Köppen-Geiger, le type de climat *Cfb* est un climat tempéré chaud sans saison sèche et à été tempéré (Veltz, 2014).

Csa : Selon la classification de Köppen-Geiger, le type de climat *Csa* est un climat tempéré chaud à été chaud et sec (Veltz, 2014).

Csb : Selon la classification de Köppen-Geiger, le type de climat *Csb* est un climat tempéré chaud avec été sec (Veltz, 2014).

Cwa : Selon la classification de Köppen-Geiger, le type de climat *Cwa* est un climat tempéré chaud à hiver sec et été chaud (Veltz, 2014).

Échelle synoptique : Échelle climatique servant à couvrir les événements climatiques survenant au niveau planétaire (Leconte, 2014).

Méso échelle : Échelle climatique servant à couvrir les événements climatiques survenant au niveau d'un pays, d'une région (Leconte, 2014).

Échelle locale : Échelle climatique servant à couvrir les événements climatiques survenant au niveau intra-urbain, au niveau d'une agglomération (Leconte, 2014).

Échelle micro-locale : Échelle climatique servant à couvrir les événements climatiques survenant au niveau d'un quartier, d'une rue (Leconte, 2014).

ArcGIS PRO : Logiciel cartographique de Systèmes D'information Géographique.

BD TOPO : Base de données vectorielle produite par l'Institut national de l'information géographique et forestière.

BD ALTI : Base de données vectorielle produite par l'Institut national de l'information géographique et forestière.

CES OSO : Carte d'occupation des sols au format *raster* (résolution 25 mètres), réalisée annuellement avec des produits satellitaires *Sentinel-2*, à l'échelle nationale française. Cette donnée est produite par l'expertise d'un panel d'équipes de recherche, dont certaines du Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère.

Nomenclature

Acronyme :

INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques. L'INSEE est un organisme chargé de la production, de l'analyse et de la publication des statistiques officielles en France depuis 1946.
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière. L'IGN est un établissement public qui assure la production et la diffusion de l'information géographique de référence en France.
CNRM	Le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) est une unité mixte de recherche ayant pour tutelle Météo-France. Il s'attache à l'étude scientifique de phénomènes climatiques et météorologiques.
LISST	Voir Partie <i>Présentation de la structure d'accueil et des missions</i> .
CESBIO	Centre d'Etudes Spatiales de la BIOSphère. Le CESBIO est un laboratoire de recherche dont l'objectif est de développer des connaissances sur le fonctionnement de la biosphère en faisant un usage important de la télédétection spatiale.
MApUCE	Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie. MApUCE est un projet de recherche élaboré en 2019 et dirigé par un <i>consortium</i> de laboratoires de recherche français dont le CNRM et le LISST. Son objectif était d'intégrer des données quantitatives de microclimat urbain, de climat et d'énergie, dans les politiques urbaines et les documents juridiques les plus pertinents ; le tout dans une démarche applicable à toutes les villes de France.
SIG	Système d'Information Géographique.

Symbole grec :

ΔT	Différence de températures entre deux points de mesure.
λ	Valeur du <i>Lambda</i> .
μ	Moyenne arithmétique.
σ	Écart-type.

Symbole romain :

Y	Valeur d'une variable.
\overline{Xg}	Moyenne géométrique.
Log	Exposant logarithmique.

Σ	Somme.
r^2	Coefficient de corrélation brute.
Diag	Matrice de corrélation diagonale.
a^2	Coefficient de corrélation partielle.
N	Nombre de variables.
\bar{v}	Covariance moyenne.
\bar{c}	Covariance moyenne inter-variables.

Introduction

Un réchauffement climatique planétaire est observé depuis les années 1990 (IPCC and WMO, 1992) et est scientifiquement attribué aux activités anthropiques (IPCC, 2022). Depuis lors, à l’instar des nombreux autres pays et continents du monde (Hansen *et al.* 2012), le territoire français métropolitain, régi par des climats tempérés (de type *Cfb*, *Csb*, *Cfa*, *Csa* et *Cwa* selon la classification de Köppen-Geiger ; Beck *et al.* 2018), dénombre les divers signes de ce réchauffement (Figure 1). A raison, ce dernier tend et tendra à l’avenir (Nazarenko *et al.* 2015) vers l’occurrence de vagues de chaleur plus fréquentes et prononcées, vers des amplitudes de températures saisonnières moyennes moins marquées, vers une augmentation du nombre d’étés secs et chauds, et vers finalement une « méditerranéisation » climatique (Dubreuil, 2022).

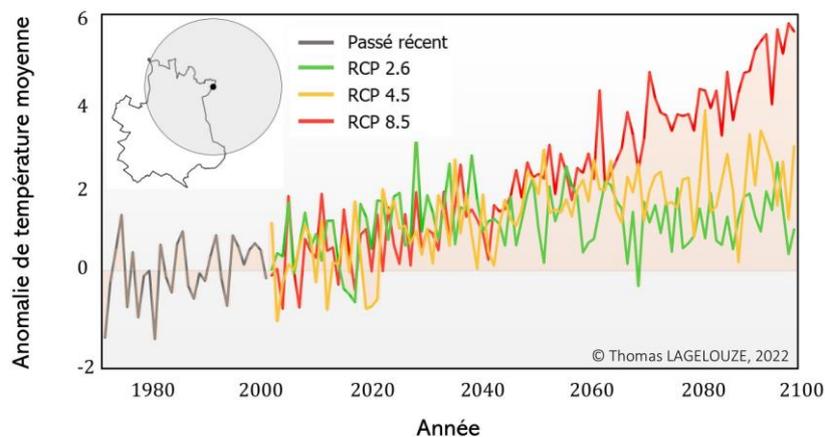


Figure 1 : Exemple du réchauffement climatique attendu aux abords de la commune de Toulouse à l’Horizon 2100 pour 3 scénarios d’émission RCP 2.6, 4.5, et 8.5, projeté par le Modèle Régional Aladin (v6) du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Les anomalies des températures moyennes ont été calculées en faisant la différence entre les moyennes des températures annuelles et la moyenne des températures sur la période du Passé Récent (30 ans). La carte en haut à gauche du graphique représente la localisation du point de modèle de la grille SAFRAN sur la commune de Toulouse, sélectionné pour réaliser l’analyse. Le cercle grisé qui l’entoure correspond à la résolution de ses données : 8 kilomètres. Source des données : DRIAS (2021).

Au-delà de tous les impacts environnementaux que peut entraîner l’extrême de chaleur (IPCC, 2022), une de ses premières conséquences sociales est de largement augmenter la vulnérabilité de la population. En effet, ses dommages sur l’individu – tant ceux directs renvoyant à la santé et à l’état physiologique, que ceux indirects renvoyant aux systèmes politico-économiques (Ebi *et al.* 2021b) – ont déjà pu être significativement prouvés par l’étude de nombreux événements caniculaires, et notamment celui de 2003 en Europe (Douset *et al.* 2011 ; Hemon *et al.* 2004 ; Valleron and Boumendil, 2004 ; Institut de Veille Sanitaire, 2003 ; Observatoire régional de santé d’Ile-de-France, 2003). À ce titre, les villes font l’objet d’une attention toute particulière en raison de leurs propriétés physiques, structurelles, morphologiques et aussi de leur métabolisme urbain (Leconte, 2014 ; Pigeon, 2007). Ces dernières amplifient à l’échelle locale et micro-locale les épisodes de surchauffe qui surviennent à méso échelle, au prisme de divers

phénomènes dont l'Îlot de Chaleur Urbain (UHI), « *l'expression la plus remarquable de la ville sur le climat [local]* » (Foissard, 2015). Ces concordances font alors des milieux urbains le creuset d'une vulnérabilité sociale plus importante par comparaison aux milieux ruraux.

Face à ce constat, de nombreux travaux de Géosciences et de Sciences Humaines et Sociales (SHS) dans le monde ont tenté de quantifier cette vulnérabilité sociale et urbaine (Alonso and Renard, 2020 ; Conlon *et al.* 2020 ; Mallen *et al.* 2019 ; Inostroza *et al.* 2016 ; Bao *et al.* 2015). Seulement, bien qu'un panel de territoires urbains eût déjà été traité, aucune des évaluations ne convergent vers un même procédé qui puisse laisser place à une discussion et une comparaison tant sur la qualité des résultats, sur leur capacité à retranscrire une réalité *in situ*, ainsi que sur les mesures préventives et adaptatives qui s'en suivent. Cette affirmation tient à trois limites majeures dans la littérature scientifique existante : (1) la pluralité des définitions de la vulnérabilité, (2) la pluralité des types de variables utilisées pour caractériser la vulnérabilité, et surtout, (3) la pluralité des méthodes d'évaluations engagées pour la retranscrire et la pondérer.

Ainsi, par le concours du Centre Interdisciplinaire d'Etudes Urbaines (CIEU) du Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST) et de Toulouse Métropole, par l'intermédiaire de Guillaume Dumas (Ingénieur de recherche), ce mémoire se concentre sur les deux dernières limites énoncées. Il apporte un regard croisé sur les éléments qui sont ou doivent être utilisés pour représenter la vulnérabilité à la hausse de la chaleur en milieu urbain et sur les traitements qui leur sont appliqués pour l'évaluer, en inter- et intra-comparant deux méthodes statistiques fréquemment employées pour ce type d'étude. Ces dernières seront appliquées à quatre métropoles françaises : Grenoble, Lyon, Paris et Toulouse. Elles ont été sélectionnées pour être représentatives des dynamiques sociales urbaines générales et à la fois d'une typologie d'UHI particulier (Suher-Carthy, 2021).

Par l'apport de critiques méthodologiques analytiques, l'objectif sous-jacent est alors d'aboutir à un consensus d'utilisation sur une procédure qui soit efficace et commune ; ou du moins d'impulser une réflexion autour de ce sujet qui est préalablement primordiale à chaque étude de vulnérabilité, mais qui ne semble pas avoir été discutée pour l'instant. Finalement, par le prisme de territoires français métropolitains, quatre problématiques imbriquées guideront les avancées : comment caractériser, mesurer, analyser et représenter la vulnérabilité sociale à la chaleur en milieu urbain (qu'importe sa localisation) ?

Aussi, le mémoire est construit en six parties. Un état critique des connaissances de la vulnérabilité face à la chaleur est réalisé (1). Une fois les terrains d'étude présentés (2), l'ensemble des données (3) et des méthodes (4) sont traitées, avant d'introduire les résultats (5) et les discussions-conclusions (6).

1. Etat de l'art sur la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain

Avant-Propos : Cette première partie critique l'état des connaissances sur la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain. Elle présente quatre de ses aspects complémentaires et expose les partis pris à leur sujet. L'ensemble oriente ce mémoire, justifie de son intérêt et permet de poser les bases de compréhension sur lesquelles repose sa problématique. Seront donc abordés successivement la pluralité des définitions de la vulnérabilité, la définition choisie pour traiter de la vulnérabilité à la hausse de la chaleur, les dimensions qui sont mobilisées pour la retranscrire, et pour finir, les différentes méthodes d'évaluation.

1.1. Le cadre théorique de la vulnérabilité

1.1.1. La multiplicité des définitions de la vulnérabilité

La vulnérabilité est une notion largement étudiée tant par les sciences sociales que par les géosciences (Becerra, 2012). Pour autant, comme abordé en introduction, aucune définition n'est à ce jour partagée et établie pour la concevoir et la conceptualiser de manière générale. Ce constat s'explique par les visions antagonistes qu'ont les différents courants, disciplines sur la manière de concevoir, positionner la vulnérabilité (*ibid.*) dans un contexte d'étude et sur un objet d'étude. En effet, tandis que les courants physiques/ingénieuriaux ne la perçoivent qu'en terme d'impact (Metzger, 2017), les courants des SHS se focalisent en réponse sur la capacité d'adaptation des individus, sans compter les courants dits « systémiques » qui essayent de faire la synthèse entre ces deux derniers (Quenault, 2015). En dépit de trouver alors un point commun vers lequel converger, de nombreuses études proposent leur propre définition en retravaillant les structures générales qui ont été établies par des travaux précurseurs (D'Ercole, 1998 ; Cutter, 1996 ; Blaikie *et al.* 1994 ; Theys and Fabiani, 1987 ; Beck, 1986) et en les orientant à leur discipline, ou à leur sujet. Ces dynamiques ont abouti à ce que la vulnérabilité soit une notion devenue polysémique (Quenault, 2015) par son « *trop-plein de sémantique* » (Metzger, 2017 ; Becerra, 2012) et sa « *profusion de définitions* » (Pigeon, 2005) qui empêchent toute nouvelle étude de se saisir facilement de ce qu'elle peut être et représenter.

Finalement, cette absence de cadre théorique constitue un des premiers freins qui empêche l'inter-comparabilité des évaluations de la vulnérabilité : chaque définition différente engage des facteurs et des apports (analytiques, statistiques, etc.) différents pour la traiter. Bien que celui-ci soit sans doute la limite première et unique, par laquelle découlent toutes les autres (Metzger, 2017), ce mémoire n'a pour vocation de faire l'épistémologie de la vulnérabilité. Il se concentre seulement sur la caractérisation, l'évaluation de la vulnérabilité. Les choix analytiques pour l'appréhender se (re)discuteront ultérieurement au sein du CIEU, en s'appuyant sur les résultats de cette étude.

1.1.2. Choix d'une définition de la vulnérabilité

Au regard des propos qui ont été avancés jusqu'ici, il est alors question de s'appuyer sur une définition qui soit avant tout pratique et applicable, sans prendre en compte son courant (ou

celui de ses auteurs) et les règles qu'il peut implicitement infléchir. L'objectif derrière cela est de décomplexifier la notion, pour ne retenir que les facteurs qui permettent de la caractériser.

1.1.2.1. Le système risque de la vulnérabilité

Pour commencer, la vulnérabilité ne se définit pas par elle-même mais par ses interactions avec les notions qui lui sont associées. C'est en ce sens que toute définition, prise sans son analyse, peut paraître générique d'un travail à l'autre. Les distinctions s'opèrent sur les relations qui sont exercées dans le grand système auquel elle est incluse : le système du risque (Pigeon, 2005).

1.1.2.1.1. Choix d'une conception du système risque

Ce système risque peut être perçu comme un ensemble organisé, fait d'éléments interdépendants se comprenant et se définissant uniquement les uns par rapport aux autres en fonction de leur position dans ce-dit ensemble (Saussure, 1931 in Fillol, 2004). Plus particulièrement, il est « *la probabilité d'occurrence de dommage compte-tenu des interactions entre processus physiques d'endommagement [(aléas)] et facteurs de peuplement [(vulnérabilité)].* » (Pigeon, 2002). Pour tenter d'en décrire les facteurs, cette étude s'appuie sur les travaux de Patrick Pigeon (géographe du risque), et notamment son article de 2002 (*ibid.*). Bien que ce choix puisse être discutable, notamment au regard de l'ancienneté de la publication, cette dernière a l'avantage de décomposer et d'analyser simplement les éléments du système risque, tout en allant au-delà des conceptions classiques ($Risque = Aléa \times Vulnérabilité$) qui firent que la vulnérabilité soit située dans un cadre si discuté.

Le système du risque proposé par Pigeon se décompose en plusieurs niveaux de lecture et scinde de manière dichotomique ses deux notions invariables : l'aléa et la vulnérabilité. L'aléa est compris comme un événement particulier pouvant déboucher sur des perturbations (Traore, 2019 ; Metzger and D'Ercole, 2011). Il est influencé par le contexte global du territoire d'étude (« l'héritage »), située dans *l'environnement naturel*. Ce contexte est le produit d'un complexe physique environnemental qui prédétermine le type, l'occurrence et l'intensité même de l'aléa. Ce dernier est ensuite assimilé, modifié puis répercuté par et dans *l'environnement anthropisé* où il peut être aggravé selon des *processus physiques* divers, avant de provoquer *l'endommagement*. La vulnérabilité découle alors des *modalités de peuplement* dues à des critères sociaux, économiques, culturels, matériels ou encore institutionnels (Figure 2 et Figure 3).

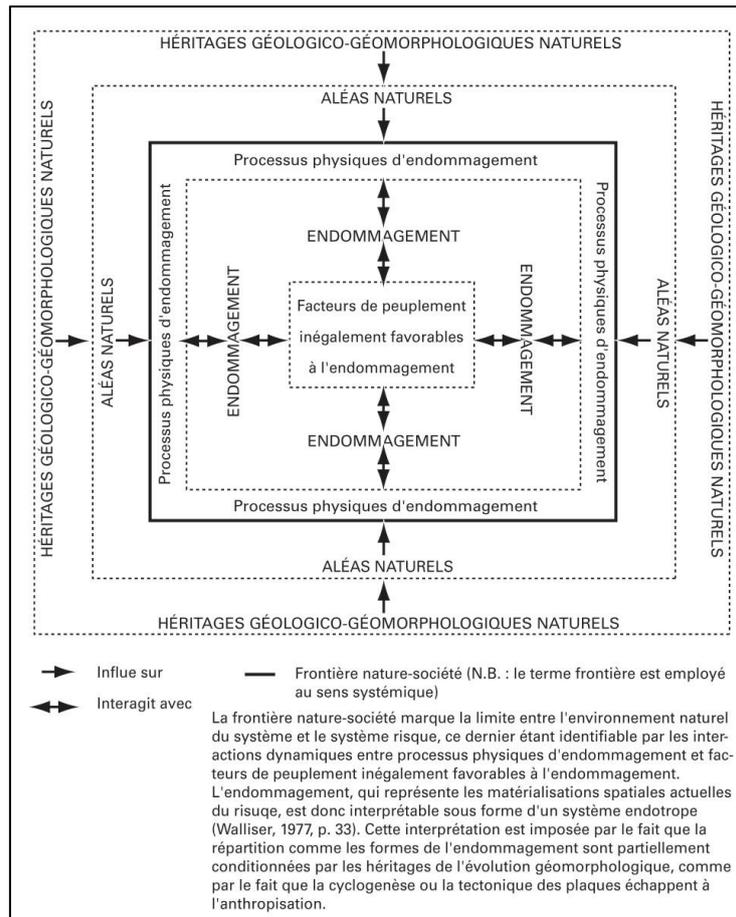


Figure 2 : Le système risque et son environnement naturel. Extrait de Pigeon (2002).

1.1.2.1.2. Actualisation et enrichissement de la conception du système risque

La première mission a été de s'approprier la conception de Patrick Pigeon, de la réactualiser, de l'enrichir et de l'orienter sur la thématique de la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain. Contrairement à lui – en plus des *modalités de peuplement* qui placent l'individu uniquement dans une position passive face à l'endommagement – la population fait preuve de *réponses*. Ces dernières sont apparentées à des procédures sociétales d'adaptation qui peuvent avoir des *effets directs* sur l'*anthropisé* et ses *processus physiques* (par exemple, pour l'adaptation à la chaleur, des Ilots de Fraicheur peuvent être mis en place) ; mais également des *effets différés* qui peuvent influencer le contexte climatique changeant à moyen-long terme et donc lors de l'événement, venir augmenter ou diminuer les dommages. Cet ensemble fait que la vulnérabilité est une composante qui évolue constamment dans un système qui s'auto-entretient. Ses facteurs retracent alors tant des actions statiques comme dynamiques qui ocurrent dans un espace, faisant de la vulnérabilité une notion spatio-temporelle (Figure 3).

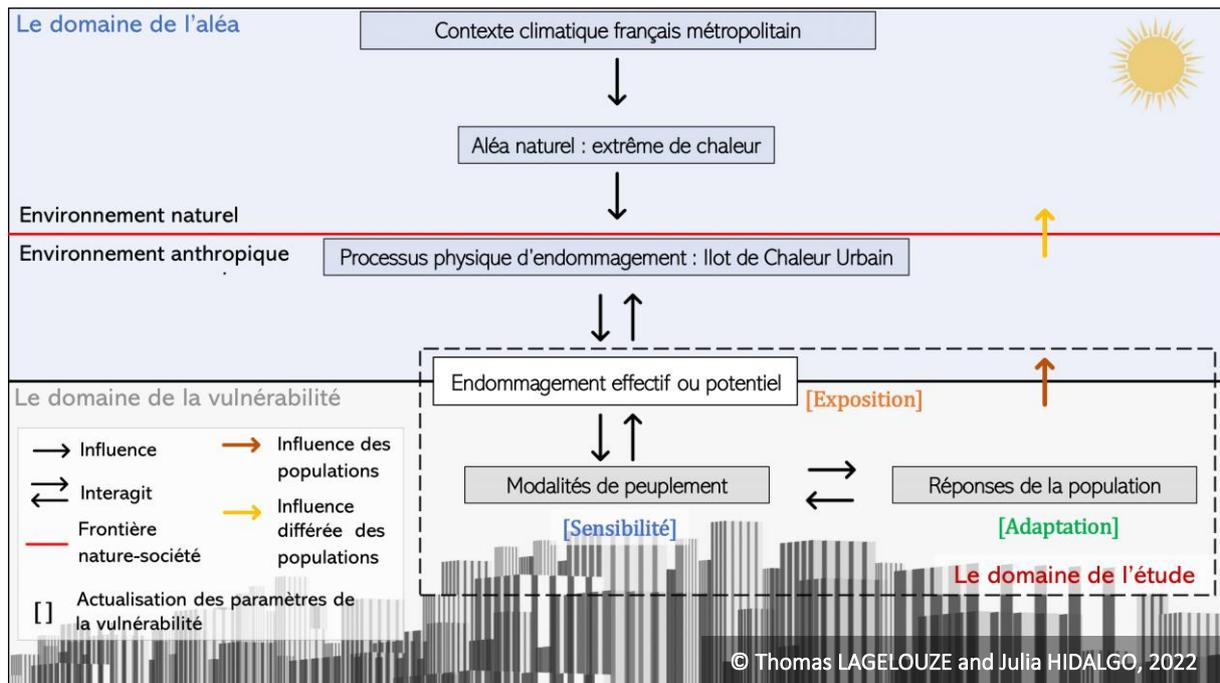


Figure 3 : Le système risque de la vulnérabilité à la chaleur.

En actualisant le vocabulaire spécifique employé par Pigeon, la vulnérabilité tient compte des interactions de trois facteurs clés : l'**exposition**, la **sensibilité** et la **capacité d'adaptation** (aussi appelée résilience ; Cutter *et al.* 2008, 2003). L'exposition contextualise la sensibilité et témoigne de l'organisation socio-spatiale d'une société. Elle peut être comprise comme les valeurs présentes dans les zones potentiellement menacées par un événement (Balica *et al.* 2009). La sensibilité fait directement suite à l'exposition puisqu'elle étudie la manière dont ces dites valeurs sont disposées à l'endommagement à l'échelle collective ou individuelle (Becerra, 2012). L'adaptation est en cooccurrence avec la capacité à faire face. Elle analyse la capacité des valeurs à subir, à se maintenir (Pigeon, 2012 ; Balica *et al.* 2009), à se rétablir puis à s'adapter à l'endommagement (Karmaoui and Balica, 2021). Elle fait état des modes de régulations mis en place pour tenter de régler les problèmes liés aux dommages en gérant les processus physiques qui y contribuent (Pigeon, 2012).

Les évaluations porteront sur les variables qui seront ressortissantes de ces trois facteurs, qui les représenteront. Ils constituent **le domaine de l'étude**.

1.1.2.2. La définition de la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain

Une simple définition ne peut réellement rendre compte de ce qu'implique la notion de vulnérabilité. Néanmoins, au regard de la conception proposée en Figure 3 – cette dernière peut s'appréhender comme le degré auquel la sphère sociale d'un milieu urbain est perturbée (Karmaoui and Balica, 2021) en raison de son exposition, de sa sensibilité, de sa capacité à encaisser, à se rétablir et à s'adapter (Balica *et al.* 2009), suite à la venue d'un extrême de chaleur.

Bien que celle-ci est jusqu'ici été implicitement indiquée, la vulnérabilité est ici comprise comme l'exposition sociale à la vulnérabilité. Tous les éléments de définition et de caractérisation qui sont intervenus et qui interviendront sont réfléchis et analysés selon leur dommage potentiel sur la vulnérabilité, d'un point de vue d'un individu. Pour la suite, par simplification, ce raccourci sémantique sera maintenu.

1.2. Corpus bibliographique

Comme introduit en fin de **Partie 1** (Cf. **Partie 1.1.2.1**), les facteurs de la vulnérabilité peuvent être caractérisés quantitativement par plusieurs variables/données. Ces variables, de par les informations qu'elles contiennent, permettent aux facteurs de prendre en compte certaines dimensions ; et à terme, selon leur teneur, de représenter exhaustivement tous les tenants et les aboutissants qu'infèrent la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain.

Pour identifier ces dimensions et les manques potentiellement existants à leur sujet, la deuxième mission a été de constituer un corpus bibliographique d'une trentaine d'études générales qui évaluent directement ou indirectement la vulnérabilité à la chaleur. Parmi elles, sept ont été retenues selon trois critères principaux. En premier lieu, les travaux portent sur le territoire français pour avoir connaissance des sources de données spécifiques employées à cette latitude, tout en relevant les (sous-)types de données utilisées, qui eux sont communs à de nombreux autres territoires mondiaux. Deuxièmement, dans la continuité du point précédent, ce corpus se compose seulement d'études publiées à partir de 2003 ; date après laquelle la vulnérabilité fut vraiment abordée et conscientisée en France en raison des nombreux décès qu'entraîna la canicule de cette année (Caseau, 2003). Troisièmement, une fois les deux conditions précédentes remplies, les publications ont été jugées intéressantes soit parce que celles-ci étaient pionnières en la matière, soit parce que leur organisme de rattachement avait en charge d'étudier la vulnérabilité à la chaleur (exemple : l'Institut de Veille Sanitaire), ou soit pour le large public qu'elles visaient (Tableau 1).

Titre	Auteur	Date	Abréviation
[1] <i>Surmortalité des étés caniculaires et surmortalité hivernale en France.</i>	Rousseau D	2006	Rousseau, 2006
[2] <i>Evolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l'anticipation et à la gestion de l'impact sanitaire.</i>	Dousset B, Gourmelon F, Giraudet E, Laaidi K, Zeghnoun A, Bretin P et Vandendorren S	2011	Dousset <i>et al.</i> , 2011
[3] <i>Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France).</i>	Lemonsu A, Viguié V, Daniel M and Masson V	2015	Lemonsu <i>et al.</i> , 2015
[4] <i>Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris: A cluster analysis approach.</i>	Benmarhnia T, Kihal-Talantikite W, Ragettli M et Deguen S	2017	Benmarhnia <i>et al.</i> , 2017
[5] <i>A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context</i>	Alonso L, Renard F	2020	Alonso and Renard, 2020
[6] <i>Bulletin de santé publique - Été 2021.</i>	Santé Publique France	2021	Santé Publique France, 2021
[7] <i>INFOGRAPHIES. Canicule : comment l'îlot de chaleur urbain transforme nos métropoles en fournaïses</i>	France Info	2021	FranceInfo, 2021

Tableau 1 : Références du corpus bibliographique de la vulnérabilité à la chaleur en France.

À partir de ces publications, trois dimensions principales peuvent couvrir la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain : (1) *La dimension sociale* permet aux études qui la mobilise de présupposer la vulnérabilité à la chaleur en prenant en compte des critères sociaux. Cette dimension s'appuie sur des éléments qui ont pu être significativement prouvés par différentes études d'impact observé de la vulnérabilité, pour construire un ensemble de variables effectives pouvant la prédire. (2) *La dimension spatiale* permet à la fois de calculer ou de rendre compte de phénomènes spatiaux qui influencent la vulnérabilité. Elle retranscrit des résultats géographiques qui rendent possible de situer et de comparer la vulnérabilité. (3) *La dimension climatique* contextualise largement la vulnérabilité parce qu'elle permet de faire le lien entre l'endommagement et son exposition ; sans quoi les études traiteraient de la vulnérabilité face à un événement climatique, sans prendre en compte les modalités de cet événement.

Au regard de ces dimensions, il ressort que certaines études ont analysé la vulnérabilité uniquement comme un endommagement en lien avec la mortalité observée, sans prendre en compte des variables explicatives sociales permettant de la contextualiser (Franceinfo, 2021 ; Lemonsu *et al.* 2015 ; Dousset *et al.* 2011). Celles-ci débouchent dans leur majorité sur des résultats non-géographiques (Santé Publique France, 2021 ; Rousseau, 2006), ne pouvant être analysés dans le temps et dans l'espace. Pour celles qui ont pu tenir compte de ces deux aspects, la dimension climatique était absente ou insuffisante (Franceinfo, 2021 ; Alonso and Renard, 2020 ; Benmarhnia *et al.* 2017) pour pouvoir relater et analyser la vulnérabilité en fonction des processus physiques qui l'amplifient dans un milieu urbain (Figure 4).

Finalement, les trois dimensions n'ont pas été traitées simultanément par les études de ce corpus. Surtout, aucune d'elles n'aborde à la fois la dimension climatique et la dimension sociale, représentant pourtant les deux pôles majeurs de la vulnérabilité à la chaleur qui font le lien entre le naturel et l'anthropique. Ce mémoire s'axe alors sur ce manque existant en analysant conjointement des données sociales et climatiques dans un espace. Également, il essaye de démontrer que ces trois dimensions de variables sont les plus à même d'évaluer exhaustivement la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain, en produisant des résultats transversaux tant dans leur construction que dans leurs débouchés.

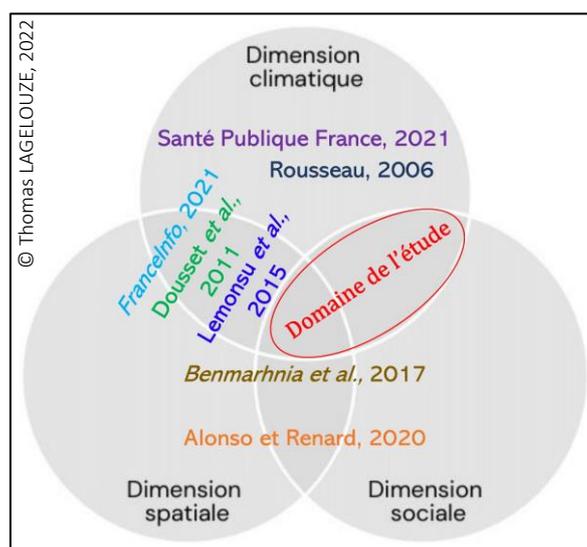


Figure 4 : Les dimensions abordées par les études du corpus bibliographique.

1.3. Les méthodes statistiques d'évaluation de la vulnérabilité à la chaleur

Les évaluations vont s'opérer sur les variables représentant quantitativement les facteurs de la vulnérabilité à la chaleur. En analysant et observant le corpus bibliographique précédent, ces évaluations peuvent suivre plusieurs méthodes statistiques (Bao *et al.* 2015), appartenant à différentes approches, qui ont chacune des façons de décomposer et d'analyser les variables de vulnérabilité, leurs relations et leur distribution. Pour autant, toutes ont pour résultat des scores ou des indices (OECD *et al.* 2008) pour retranscrire l'intensité de la vulnérabilité.

Les approches « inductives » (Alonso and Renard, 2020) orientent et analysent les variables de vulnérabilité à l'aide de divers tests statistiques. Les résultats sont alors inhérents à des relations entre des données et non à une réflexion subjective autour d'elles. Les approches « ascendantes » ou « descendantes » (Faye *et al.* 2021 ; Benmarhnia *et al.* 2017) construisent des modèles de prédiction statistique en testant la significativité des relations entre des données observées. Ces données sont majoritairement de l'ordre de la santé, de la mortalité et du climat. Les approches « additives » (Bao *et al.* 2015) appréhendent plus simplement la vulnérabilité à la chaleur, en additionnant les variables y contribuant selon un jugement expert. Ces approches sont fréquemment employées par des services à visées plus « professionnelles » (Bat-ADAPT, 2020). Les approches « déductives » analysent théoriquement des variables pour en dégager des facteurs. Elles ne sont que très rarement utilisées en raison des limites du cadre analytique (Wolf *et al.* 2015) de la vulnérabilité, abordées précédemment.

Pour ce travail, deux méthodes de traitement ressortissantes des approches « inductives » et « additives » seront utilisées. Elles ont été choisies pour leur conception opposée sur la loi de probabilité de la vulnérabilité, tout en ayant une ligne directrice commune sur la manière fondamentale de la calculer. Elles sont à ce jour les méthodes les plus utilisées (Alonso and Renard, 2020 ; Bat-ADAPT, 2020 ; Inostroza *et al.* 2016) dans le cadre de divers organismes.

1.4. Conclusion de partie

Les fonctions des différentes composantes servant à décrire et mesurer la vulnérabilité à la chaleur sont retranscrites dans la Figure 5 ci-dessous. Elle résume l'ensemble de leur articulation pour tenter de s'appropriier le sujet général et de répondre à sa problématique.

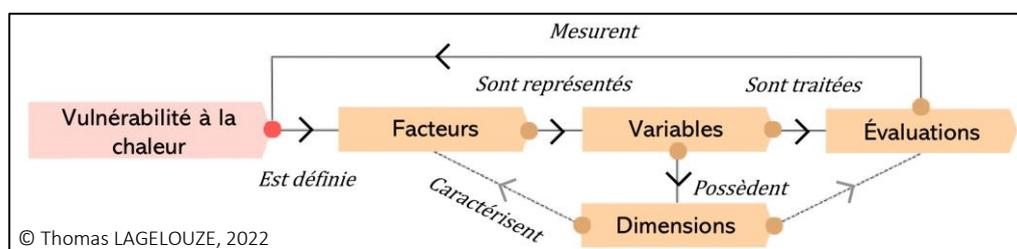


Figure 5 : Réflexion autour de la vulnérabilité à la chaleur, ou comment méthodologiquement l'appréhender.

Somme toute, deux corpus bibliographiques distincts ont été réalisés. Un premier pose les bases analytiques de la vulnérabilité et identifie ses éléments. Un second inventorie les méthodologies de mesure en vigueur pour évaluer ces derniers. Les parties à venir consisteront alors à appliquer les considérations théoriques soulevées jusqu'alors, en tentant de les traduire quantitativement pour une évaluation.

2. Présentation des sites d'étude

Les évaluations de la vulnérabilité à la chaleur vont s'opérer sur quatre métropoles françaises : Grand Paris, Grand Lyon, Grenoble Métropole et Toulouse Métropole (Figure 6). Grand Paris est situé en région Île-de-France et est composé de cent-trente-et-une commune pour environ sept millions d'habitants. Grand Lyon et Grenoble Métropole se localisent en Auvergne Rhône-Alpes et comptent respectivement cinquante-neuf communes pour environ un million quatre cent mille habitants (Grand Lyon), quarante-neuf communes pour environ quatre cent cinquante mille habitants (Grenoble Métropole). Toulouse Métropole est constituée de trente-sept communes dans la région Occitanie, et recense environ huit cent mille habitants ("Intercommunalité | Insee," 2022).

L'échelle de circonscription administrative choisie comme territoire d'étude est celle des Établissements Public de Coopération Intercommunale (EPCI) en raison qu'elle est aujourd'hui celle sur lesquelles les politiques territoriales s'actent et se décident (Anelle, 2019 ; République française - Vie publique, 2019).

De fait, les quatre EPCI cités sont représentatifs de dynamiques sociales et climatiques, générales à d'autres métropoles françaises, européennes ou mondiales ; mais possèdent également des spécificités dont le comportement et l'influence sont intéressantes à analyser dans le cadre d'une critique d'évaluation. Parmi toutes les caractéristiques qui peuvent être amenées à converger comme à diverger entre les milieux, un regard prioritaire a été porté sur le phénomène d'UHI pour convenir des sites. Ainsi, bien que Paris, Lyon, Grenoble et Toulouse aient toutes des *deltas* de températures positives (ΔT) entre leur centre-ville et leur campagne environnante (Figure 7), la morphologie de leur UHI respectif ont des schémas spatiaux généraux différents (Suher-Carthy, 2021). En effet, Lyon et Grenoble sont situés dans le même *cluster* de schéma en raison de leurs fortes intensités d'UHI dispersées et fragmentées, *a contrario* de Toulouse aux fortes intensités concentrées principalement dans les noyaux urbains, tout comme peut l'être Paris mais avec des valeurs plus élevées (*ibid.*). Ces distinctions supposent alors des impacts distincts sur la vulnérabilité au regard de l'importance de la dimension climatique sur le domaine de cette dernière (Figure 3).

Pour finir, ces milieux urbains sont ici discrétisés spatialement par les Ilots Regroupés pour l'Information Statistique (IRIS), la plus petite unité démographique de recensement en France ("Définition - IRIS | Insee," 2022). Celle-ci découpe en plusieurs quartiers administratifs les communes de cinq à dix mille habitants. Elle constitue l'échelle de référence sur laquelle l'ensemble des données seront situées, évaluées et comparées.

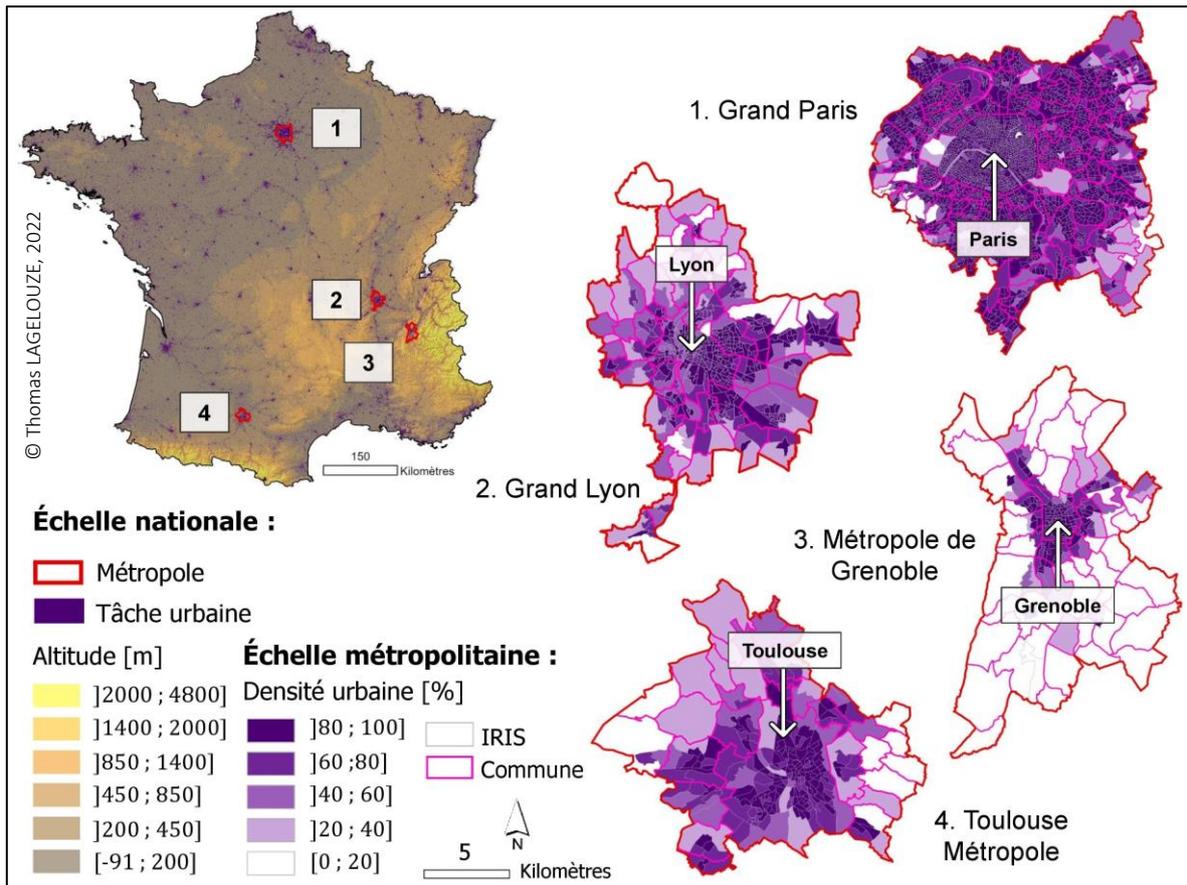


Figure 6 : Présentation des sites d'étude. Le détail de l'ensemble des communes est consultable en [Partie Annexe 1](#). Sources des données : BD TOPO – IGN (2022), BD ALTI 25 mètres – IGN (2021), OSO – CESBIO (2021).

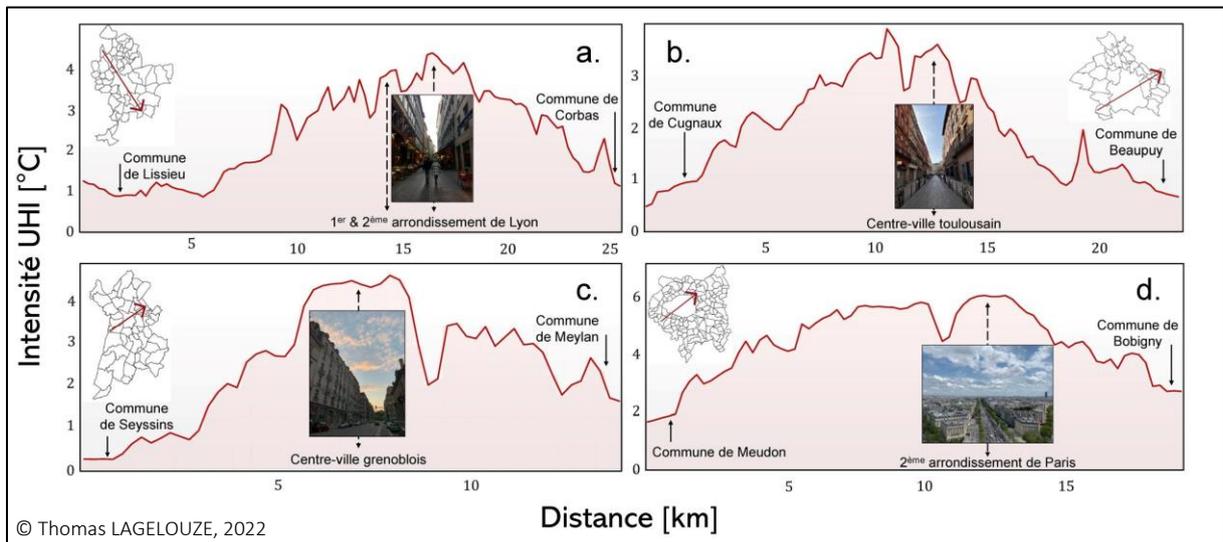


Figure 7 : Transects des intensités d'îlot de Chaleur Urbain pour la Métropole de Lyon (a.), de Toulouse (b.), de Grenoble (c.) et de Paris (d.). La direction et la taille des transects sont représentées en haut de chaque graphique, à l'aide de la carte de leur découpage communal respectif. Source des données : MApUCE – CNRM and LISST (2019). Crédit des photographies : Thomas LAGÉLOUZE (2021 & 2022). La photographie de a. représente la Rue Mercière, b. la Rue des Marchands, c. le Boulevard Edouard Rey, d. propose une vue lointaine du 2^{ème} arrondissement depuis les Champs Elysées.

3. Données utilisées

3.1. Sélection et provenances des variables

Un ensemble de vingt-sept variables est utilisé pour caractériser quantitativement la vulnérabilité – telle qu'elle a été entendue précédemment (Cf. **Partie 1**) – sur les Quatre Métropoles. Elles sont présentées dans le **Tableau 2** ci-dessous. Elles représentent et contextualisent les trois facteurs qui définissent la vulnérabilité. Pour les situer au sein de ces derniers, le même code couleur que celui de la **Figure 3** a été utilisé.

	Variable	Abréviation	Impact sur la vulnérabilité	Traitement post-acquisition	Source	Référence bibliographique
[1]	Nombre personnes au chômage de 15 à 64 ans en 2017	[CHOM]	(+)	/	Insee	Ebi <i>et al.</i> (2021a, 2021b) ; Alonso and Renard (2020) ; Hayes <i>et al.</i> (2019) ; Hayes and Poland (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017)
[2]	Nombre de personnes inactives de 15 à 64 ans en 2017	[INACT]	(+)	/	Insee	Ebi <i>et al.</i> (2021a, 2021b) ; Alonso and Renard (2020) ; Hayes <i>et al.</i> (2019) ; Hayes and Poland (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ;
[3]	Nombre de personnes bénéficiaires de la CNAM en 2020	[CNAM]	(-)	/	Insee	Alonso and Renard (2020) ; Hayes <i>et al.</i> (2019) ; Déry (2018) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; Inostroza <i>et al.</i> (2016) ; McGregor <i>et al.</i> (2015)
[4]	Nombre de personnes qui vivent dans un HLM comme résidence principale en 2017	[HLM]	(+)	/	Insee	Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Hayes <i>et al.</i> (2019) ; Déry (2018) ; Hayes and Poland (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[5]	Taux de pauvreté en 2017	[T-P]	(+)	/	Insee	Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; Bao <i>et al.</i> (2015) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[6]	Nombre de résidences principales (hors studio de 1 personne) en suroccupation en 2017	[SUROC]	(+)	/	Insee	Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Hayes <i>et al.</i> (2019) ; Déry (2018) ; Hayes and Poland (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[7]	Nombre de personnes hors ménage en 2017	[P-HM]	(+)	/	Insee	Hayes and Poland (2018) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[8]	Nombre de personnes de 15 ans ou plus non-scolarisées en 2017	[P-NS]	(+)	/	Insee	Ebi <i>et al.</i> (2021a, 2021b) ; Alonso and Renard (2020) ; Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; McGregor <i>et al.</i> (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[9]	Nombre de personnes de 15 ans ou plus non scol. Sans diplôme ou CEP en 2017	[P-NS2]	(+)	/	Insee	Ebi <i>et al.</i> (2021a, 2021b) ; Alonso and Renard (2020) ; Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; McGregor <i>et al.</i> (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[10]	Nombre de personnes étrangères en 2017	[ETR]	(+)	/	Insee	Déry (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Wolf <i>et al.</i> (2013) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[11]	Nombre de personnes immigrées en 2017	[IMM]	(+)	/	Insee	Déry (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Wolf <i>et al.</i> (2013) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[12]	Nombre de personnes âgées de 65 ans ou plus en 2017	[P-65]	(+)	/	Insee	Faye <i>et al.</i> (2021) ; Alonso and Renard (2020) ; Hayes and Poland (2018) ; Inostroza <i>et al.</i> (2016) ; Johnson <i>et al.</i> (2012) ; Renard and Chapon (2010)
[13]	Nombre de personnes âgées de 5 ans ou moins en 2017	[P-5]	(+)	/	Insee	Faye <i>et al.</i> (2021) ; Alonso and Renard (2020) ; Hayes and Poland (2018) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; Bao <i>et al.</i> (2015) ; McGregor <i>et al.</i> (2015)
[14]	Nombre de personnes de sexe féminin en 2017	[FEM]	(+)	/	Insee	Ebi <i>et al.</i> (2021b) ; Faye <i>et al.</i> (2021) ; Alonso and Renard (2020) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; Holand and Lujala (2013)
[15]	Nombre de personnes retraitées en 2017 (CSP)	[RETR]	(+)	/	Insee	Faye <i>et al.</i> (2021) ; Alonso and Renard (2020) ; Hayes and Poland (2018) ; Inostroza <i>et al.</i> (2016) ; Johnson <i>et al.</i> (2012) ; Renard and Chapon (2010)
[16]	Nombre de personnes de 15 ans ou plus ayant un travail physique d'extérieur (CSPs Ouvrier et Agriculteur) en 2017	[T-E]	(+)	Agrégation de variables	Insee	Ebi <i>et al.</i> (2021a, 2021b) ; Hayes and Poland (2018) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016)
[17]	Nombre d'établissements de vulnérabilité en 2020	[E-V]	(+)	SIG	Insee	Faye <i>et al.</i> (2021) ; Sakhy (2016) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Renard and Chapon (2010)
[18]	Densité de population (en Ha) en 2017	[D-P]	(+)	SIG	Insee, BD TOPO – IGN	Mitchell and Chakraborty (2018) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Lemonsu <i>et al.</i> (2015) ; Wolf <i>et al.</i> (2013)
[19]	Nombre de personnes qui vivent seules en 2017	[P-VS]	(+)	/	Insee	Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Déry (2018) ; Sakhy (2016) ; Bao <i>et al.</i> (2015) ; McGregor <i>et al.</i> (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[20]	Nombre d'établissements de soin en 2020	[E-S]	(-)	SIG	Insee	Alonso and Renard (2020) ; Hayes <i>et al.</i> (2019) ; Déry (2018) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; Inostroza <i>et al.</i> (2016) ; McGregor <i>et al.</i> (2015)
[21]	Nombre d'établissements /lieux climatisés ou au potentiel rafraîchissant en 2020	[E-C]	(-)	SIG	Insee	Mallen <i>et al.</i> (2019) ; Hayes and Poland (2018) ; Eisenman <i>et al.</i> (2016) ; Bao <i>et al.</i> (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010) ; Reid <i>et al.</i> (2009)
[22]	Nombre de personnes locataires en résidences principales en 2017	[LOCA]	(+)	/	Insee	Déry (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Wolf <i>et al.</i> (2013) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[23]	% Végétation haute en 2021	[V-H]	(-)	SIG	CES OSO – CESBIO	Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Viguié <i>et al.</i> (2020) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; Bao <i>et al.</i> (2015) ; Lemonsu <i>et al.</i> (2015)
[24]	Nombre de résidences principales construites avant 1990 en 2017	[RP-90]	(+)	Agrégation de variables	Insee	Déry (2018) ; Hayes and Poland (2018) ; Inostroza <i>et al.</i> (2016) ; Sakhy (2016) ; Lemonsu <i>et al.</i> (2015) ; McGregor <i>et al.</i> (2015) ; Rinner <i>et al.</i> (2010)
[25]	% Urbain en 2021	[URB]	(+)	SIG	OSO – CESBIO	Conlon <i>et al.</i> (2020) ; Mitchell and Chakraborty (2018) ; Benmarhnia <i>et al.</i> (2017) ; El-Zein and Tonmoy (2015) ; Lemonsu <i>et al.</i> (2015)
[26]	Intensité d'Ilot de Chaleur Urbain en 2014	[UHI]	(+)	SIG	MApUCE - CNRM	Aucune des études consultées n'utilisent directement des données d'UHI, seulement des variables le contextualisant à l'instar de la végétation et de la densité urbaine.
[27]	Topographie en 2021	[TOPO]	(-)	SIG	IGN BD ALTI 25m	/

Tableau 2 : Présentation des variables utilisées pour représenter les paramètres de la vulnérabilité dans le cadre de l'évaluation.

Ces variables ont été sélectionnées en (ré)exploitant les corpus bibliographiques réalisés et abordés précédemment (Cf. **Partie 1**). À ce titre, en se référant alors à de nombreuses études, un panel de types de données susceptibles d'avoir des liens de cause à effet sur la vulnérabilité, ont été distingués. Alors – tout en veillant à travailler avec des données issues de bases de données publiques à l'échelle nationale pour que les évaluations puissent être reproductibles et comparables au plus grand nombre de milieu urbain français – certaines variables dont faisaient mention les corpus ont pu être directement réutilisées ; d'autres ont été employés pour représenter des situations théoriques de la vulnérabilité, exprimées dans la littérature

scientifique. Une grande partie des données provient de l'INSEE. Les variables restantes sont issues de l'IGN, du CESBIO, et du projet de recherche MApUCE du CNRM (se référer à la partie *acronyme* du **Glossaire** pour plus d'information sur ces organismes et projets). Pour chacune d'elles, les éditions les plus récentes ont été requises.

3.2. Post-traitements des variables

Une majorité de variables a été directement livrée à l'échelle de travail infra-communale par l'INSEE. Parmi elles, certaines ont été regroupées par addition (dans le **Tableau 2** : les variables [16] et [24]) pour en « créer » de nouvelles s'axant sur celles de la littérature scientifique. Pour celles acquises à une échelle différente, leurs informations ont été dégradées à l'échelle de l'IRIS à l'aide d'outils géostatistiques mis à disposition par les applications de logiciels SIG.

De sorte, les variables vecteurs ponctuelles ont préalablement été constituées en sélectionnant par requête attributaire les bâtiments susceptibles, d'accueillir des personnes vulnérables ([17]), de dispenser des soins ([20]), ou d'être un espace/lieu climatisé ou potentiellement rafraîchissant ([21]) dans lequel un individu peut se réfugier (sans forcément consommer ou moyennant une consommation non-onéreuse) en cas de forte chaleur (se référer à la **Partie Annexe 2** pour savoir exactement quelles fonctions de bâtiments sont prises en compte dans les trois variables). Une fois cette étape terminée, chacune des entités ponctuelles ont été comptées sur l'IRIS à l'aide de l'outil *Tabuler l'Intersection* d'ArcGIS PRO (AG-P).

Les variables zonales de densité ([23] et [25]) ont été extraites à l'aide de la *calculatrice raster* d'AG-P en sélectionnant les strates qui pouvaient représenter l'urbain et la végétation haute (voir également **Partie Annexe 2** pour prendre connaissance de ces strates). Leur surface a par la suite été estimée avec le même outil utilisé précédemment pour les variables ponctuelles. Finalement, le pourcentage a été calculé en faisant le rapport avec la surface des IRIS.

Les variables rasters ([26] et [27]) ont quant à elles été simplement dégradées par l'outil « *statistiques zonales* » d'AG-P, en tenant compte de la majorité des valeurs présentes sur l'IRIS. (**Figure 8**). Pour ce travail, la méthode des majorités a été utilisée, et non celle des moyennes, en raison que cette dernière lisse les extrêmes et les spécificités. En ce sens, ici, seul le « pire » scénario de vulnérabilité pour chacune de ces deux variables a été retenu. Il a alors été préféré de recourir à un procédé qui tendance à surestimer (et non sous-estimer) la vulnérabilité plus qu'elle ne l'est. Pour cause, en cas de débouchés opérationnels aux évaluations, mieux vaut-il de cibler par erreur un IRIS qui ne serait pas autant vulnérable que les mesures ont bien voulu l'édicter, plutôt que d'omettre de renseigner un IRIS qui le serait réellement.

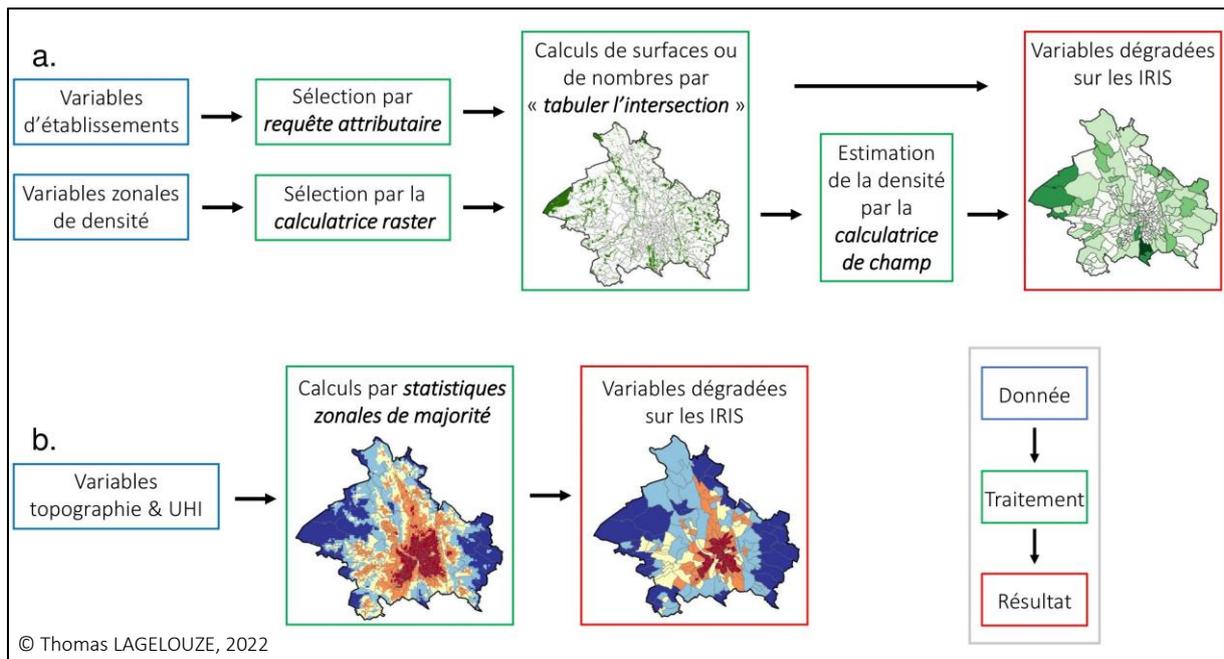


Figure 8 : Schémas méthodologiques d'explication des pré-traitements d'agrégation de variables à l'échelle de référence des IRIS. **a.** explique comment sont comptés les nombres et les surfaces sur l'IRIS. L'exemple choisi pour illustrer ce traitement est la *Végétation Haute*. **b.** résume le processus de statistiques zonales pour attribuer une valeur d'UHI ou d'altitude, qui correspond à la majorité des valeurs trouvées sur l'IRIS en question. L'exemple illustratif choisi est celui de l'*UHI*.

3.3. Impact des variables sur la vulnérabilité

Jusqu'ici, les parties précédentes (Cf. **Partie 3.1 et 3.2**) se sont attachées à justifier comment et par quel moyen les variables avaient été sélectionnées/prétraitées. Dans cette partie qui se place en continuité, il est question de comprendre conceptuellement pourquoi ces dernières – de par leur type, leur dimension et leur facteur de rattachement – sont enclins à subir ou impacter la vulnérabilité.

3.3.1. Impact des variables du facteur sensibilité sur la vulnérabilité

Les variables de la catégorie sensibilité ont une dimension sociale et spatiale. Elles sont de plusieurs types.

Une partie fait référence à la pauvreté ([1] à [7]). La pauvreté renseigne des possibilités d'un individu à se prémunir, à se protéger des extrêmes de chaleur en mobilisant un capital économique (par exemple : achat d'une maison mieux isolée, d'un système climatisant, etc.). Il est alors estimé que plus ce capital est faible, et moins la population concernée est susceptible d'atténuer les dommages de la chaleur par le fait de posséder (Ebi *et al.* 2021a, 2021b).

Une deuxième partie ([8] à [11]) fait état des capacités à se saisir, à comprendre, à s'instruire sur les dangers de la chaleur (Alonso and Renard, 2020 ; Conlon *et al.* 2020 ; Benmarhnia *et al.*

2017). À ce titre, une personne avec un niveau d'étude bas est jugée moins prédisposée à faire cette démarche, tout comme une personne immigrée et étrangère de par des potentielles barrières de la langue (celle-ci aura par exemple plus de difficultés à comprendre les messages d'alerte à la canicule).

Une troisième partie concerne la physiologie ([12] à [17]). Il est médicalement admis que la population infantile ou âgée sont plus sensibles en raison que leur organisme a plus de difficulté à réguler la chaleur par sudation ou vasodilatation, pouvant entraîner de multiples conséquences grave sur la santé, dont la principale est l'arythmie cardiaque (Ebi *et al.* 2021a, 2021b ; voir [Partie Annexe 3](#) pour plus de précisions). Ces constats sont d'autant plus renforcés par les cycles hormonaux de la population de sexe féminin, mais aussi par la difficulté physique et l'exposition constante à la chaleur des métiers des travailleurs extérieurs (*ibid.*)

Pour finir, la variable [18] entend qu'une plus forte densité de population à une probabilité plus élevée de représenter des individus vulnérables. La variable [19] suppose qu'en cas d'événements graves, les personnes vivant seules auront une plus faible tendance à être aidées/secourues par un réseau familial ou amical (Conlon *et al.* 2020).

3.3.2. Impact des variables du facteur adaptation sur la vulnérabilité

Les variables qui expriment la capacité d'adaptation ont également une dimension sociale et spatiale. Trois d'entre elles ([20], [21] et [23]) permettent d'estimer le nombre de lieux dans lesquels se retourner, se réfugier, pour bénéficier d'une température clémente ou pour se soigner lors ou après une vague de chaleur. L'hypothèse est faite que plus leur nombre est important dans un IRIS et plus la capacité des habitants à s'adapter l'est aussi (Alonso and Renard, 2020). La variable [22] aborde les opportunités pour une personne de pouvoir accommoder son logement face à la chaleur. Un locataire dispose de ressources limitées pour le faire ; ce dernier devant se plier aux conditions et aux vœux de son propriétaire pour en avoir légalement le la possibilité (Benmarhnia *et al.* 2017).

3.3.3. Impact des variables du facteur exposition sur la vulnérabilité

Les variables d'exposition ont une dimension climatique et spatiale. Elles tentent de représenter les éléments qui retracent, influencent ou subissent le processus physique d'endommagement qu'est l'UHI (Conlon *et al.* 2020). Ainsi, l'emploi de la variable [25] est justifiée par le fait que les intensités d'UHI maximales sont liées à de fortes densités urbaines (Leconte, 2014). Les bâtiments anciens ([24]) – à l'isolation souvent inappropriée aux conditions climatiques d'aujourd'hui – sont généralement les plus exposés ; d'autant plus qu'ils sont fréquemment situés dans les centres-villes historiques (patrimoines) des grandes-villes (Masson *et al.* 2020 ; Foissard, 2015). La variable topographique [27] accompagne les précédentes de par la corrélation négative établie des températures sur le gradient altitudinale (Douguédroit and De Saintignon, 1984). À travers elle, il est également question d'indirectement matérialiser l'écoulement des vents régionaux (vents catabatiques et

anabatiques ; [Tabeaud, 2012](#)) qui participent à rafraîchir les plaines et les vallées sur/dans lesquelles sont communément installées les milieux urbains.

Les valeurs d'intensité d'UHI sont délivrées par la variable [26]. Leur apport permet de traiter la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain, en exploitant directement des données microclimatiques qui retracent avec précision le processus physique d'aggravement d'UHI (se tourner vers la [Partie Annexe 4](#) pour connaître la brève méthodologie d'obtention des données UHI).

4. Méthodologie des évaluations de vulnérabilité à la chaleur

Avant-Propos : Au regard des limites conventionnelles de taille du mémoire, l'ensemble des résultats sur les quatre métropoles ne peuvent être présentés. Un choix a alors été fait de prendre la Métropole de Toulouse comme élément central de comparaison méthodologique pour aborder l'ensemble des points principaux et constants à retenir. Pour cela, trois procédures seront engagées. La méthodologie de l'approche inductive sera appliquée d'une part sur la Métropole de Toulouse (T-M) et d'une autre sur les Quatre Métropoles (Q-M) simultanément. La méthodologie de l'approche additive sera quant à elle exécutée seulement sur la Métropole de Toulouse.

Les deux méthodologies d'évaluation sont toutes deux employées pour remplir une même fonction : regrouper les variables (Cf. **Partie 3**) en facteurs, à l'instar de ceux déjà énoncés pour conceptualiser la vulnérabilité. Ce procédé est engagé pour mesurer la vulnérabilité à l'aide d'indices composites qui résument les informations d'un phénomène, tout en tenant compte de cette complexité. L'objectif final est alors d'aboutir à l'expression de vulnérabilités générales pour avoir des résultats exhaustifs et facilement saisissables, en ayant décomposées et recomposées en amont ses particularités. Il est alors question d'engager le processus inverse de la **Partie 1**, à savoir de reformer quantitativement les éléments anatomiser jusqu'alors par souci de compréhension ; sans quoi la vulnérabilité resterait la succession de paramètres éparses qui ne seraient jamais assez homogènes pour être discutés.

Justement, tout l'enjeu problématique se concentre sur la manière de « faire facteur ». À ce titre, les deux approches divergent et utilisent deux méthodes statistiques distinctes : l'Analyse en Composantes Principale (ACP) pour l'approche inductive et l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) pour l'approche additive.

4.1. Méthodologie de l'Analyse en Composantes Principales

4.1.1. Définition de l'Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales est une méthode d'analyse statistique multivariée et multidimensionnelle (Pearson, 1901). Elle permet d'explorer un jeu de données, de résumer son information et de réduire sa dimensionnalité, en regroupant des variables liées, corrélées entre elles (Sakhy, 2016). Ainsi, elle focalise son analyse à l'étude des relations entre des éléments, qu'elle identifie par leur distribution statistique respective (Bro and Smilde, 2014 ; DUBY and Robin, 2006). Les variables sont alors jugées assez similaires pour former un même facteur si une majeure partie de leurs données fluctuent réciproquement. Lors de leur formation, certaines variables les composant peuvent être priorisées, peuvent se voir attribuer un poids plus élevé que d'autres, en fonction de la « qualité » de ces relations.

En résumé, cette méthode vise à objectiver l'évaluation de la vulnérabilité en se référant uniquement à la donnée et non à son contexte, à la pertinence de ce qu'elle peut représenter ou renseigner. Son utilisateur est strictement dépendant des résultats des divers traitements automatisés ; seul le choix des variables en entrée lui revient. Elle est l'analyse la plus couramment utilisée dans la littérature scientifique pour évaluer la vulnérabilité à la chaleur (Bao *et al.* 2015).

4.1.2. Conditions préalables des variables

L'ACP nécessite avant son lancement définitif de s'assurer d'un certain nombre de prérequis sur les données utilisées. En effet, deux conditions principales sont à respecter. Une première en amont a pour but de vérifier si la structure interne de chaque variable est conforme pour être comparée. La validation de cette étape permet aux résultats finaux de l'ACP d'être statistiquement justes. Une seconde qui intervient une fois s'être acquittée de la précédente. Celle-ci examine la cohérence du groupe de variables dont les informations cherchent à être résumées. En somme, elle vise à s'assurer que les données soient suffisamment adaptées, en termes de redondance statistique, à la méthodologie de l'Analyse pour justifier de son utilisation. Cette partie est primordiale pour maximiser les résultats, tout en veillant à éviter des confusions statistiques.

4.1.2.1. Conformité des structures internes statistiques des variables

4.1.2.1.1. Gestion des données manquantes

Premièrement, les variables qui cherchent à être comparées doivent posséder le même nombre d'observations sur un même espace, sans aucune donnée manquante. Pour ce faire, celles dont un taux de données manquantes était supérieur ou égal à 5% ont été supprimées. Par la suite, les IRIS avec au moins une absence de données ont été enlevés. Alors, les variables du taux de

pauvreté et du nombre de bénéficiaires de la CNAM ont été retirées sur les deux jeux de données (T-M et Q-M). Plus encore, 2 IRIS ont été supprimés sur T-M (passage de 251 à 249 IRIS), 11 IRIS sur Q-M (3808 IRIS à 3797 IRIS).

4.1.2.1.2. Distribution normale des données

Deuxièmement, dans la continuité, l'ACP se focalise sur les relations linéaires entre des variables. Pour faciliter leur étude, la méthode suggère alors que ces dernières suivent une loi de distribution normale (Lebart *et al.* 2006). Cependant, un test de *Shapiro-Wilk* (Shapiro and Wilk, 1965), supportant jusqu'à 5000 observations, a révélé qu'aucune des variables sur les T-M et Q-M étaient aléatoirement distribuées (*p-value* inférieure à 0,05).

Pour pallier aux résultats de ce test, la transformation de *Box et Cox* (Sakia, 1992) a été utilisée pour rapprocher d'une distribution normale les données requises pour l'ACP. Ce traitement recherche une valeur de puissance *lambda* – indexée sur l'asymétrie des distributions – par laquelle les observations d'une variable en question doivent être multipliées ou divisées. Si la valeur du *lambda* est différente de 0, la première fonction ([Équation 1 (1)]) est appliquée. Inversement, si le *lambda* est égal à 0, la seconde fonction ([Équation 1 (2)]) est requise. La méthode de *Box et Cox* ne s'opérant pas sur des valeurs négatives ou égales à 0, la constante 0,01 a été ajoutée aux valeurs de chaque variable pour que ces dernières soient strictement positives, sans altérer leur profil de distribution. Ces valeurs sont finalement « mises à l'échelle » en les divisant par la moyenne géométrique de leur variable (Lobry, 2022) pour augmenter la précision du calcul.

À titre d'exemple, pour Toulouse Métropole, l'asymétrie générale autour de la médiane est passée de 1,77 à 0,17 ; pour T-M (Figure 9), de 2,12 à 0,26 pour Q-M.

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \\ \frac{(y/\overline{xg})^\lambda - 1}{\lambda} \quad \text{if } (\lambda \neq 0) \\ (2) \\ \log(y) - \log(\overline{xg}) \quad \text{if } (\lambda = 0) \end{array} \right. \quad [\text{Équation 1}]$$

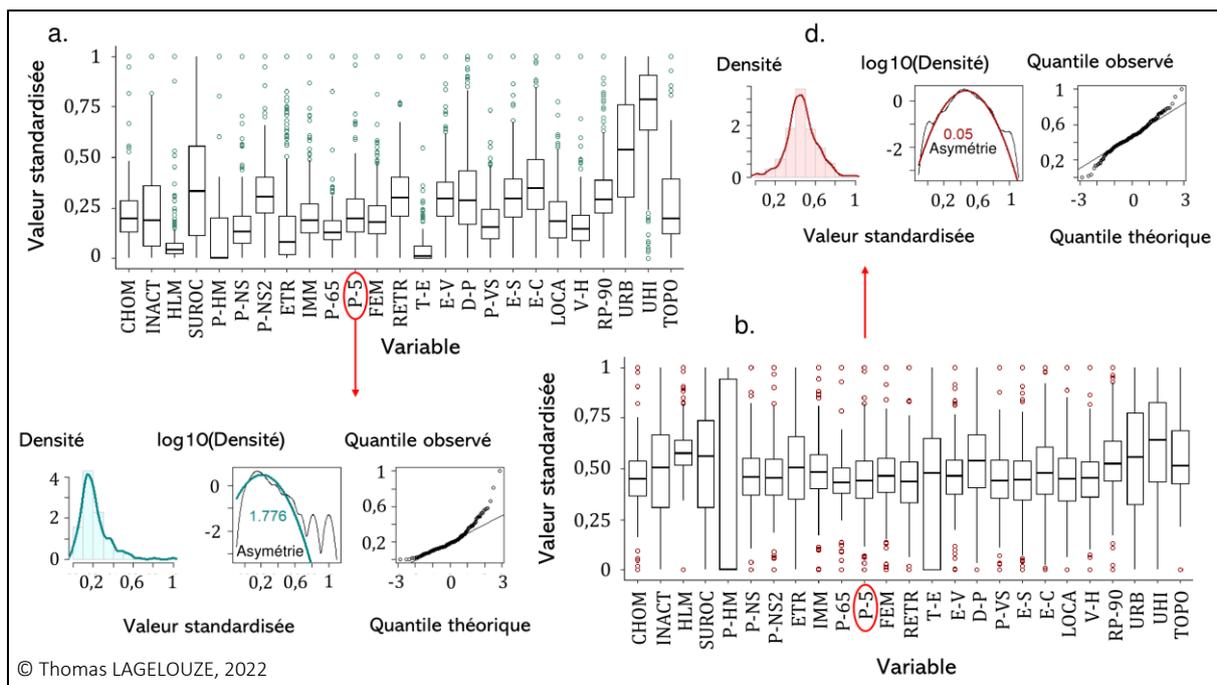


Figure 9 : Résultats de la transformation *Box et Cox* pour le jeu de données de Toulouse Métropole. **a.** et **b.** représentent les distributions statistiques sous forme de *Boxplots*. **a.** est le résultat avant transformation ; **b.** après transformation. **c.** et **d.** sont des graphiques qui permettent d’appréhender les résultats de manière spécifique ; ils représentent la distribution statistique de la variable « *Nombre de personnes âgées de 5 ans ou moins* ». Ces derniers illustrent de gauche à droite un histogramme de densité, une courbe de coordonnées logarithmiques et une droite de *Henry*. Plus la courbe logarithmique à une forme de parabole et plus la distribution tend vers une symétrie. Plus le nuage de points s’axe sur la droite de *Henry*, plus la distribution tend vers la normalité. Pour faciliter les comparaisons entre les variables, ces dernières ont été standardisées sur 1 ([Équation 5]).

4.1.2.2. Cohérence collective des variables

Les données sont désormais uniformisées et transformées : Il est alors possible de déterminer « l’adaptabilité » de la totalité des variables à l’ACP, par la mesure de leurs colinéarités et de leurs redondances statistiques.

4.1.2.2.1. La non-colinéarité

La colinéarité se définit comme la propension de deux ou plusieurs variables à informer du même phénomène, de la même façon et dans la même direction (Hair *et al.* 2019). Dans ce cas d’étude, celle-ci doit être conséquemment supprimée : regrouper deux variables colinéaires reviendrait à possiblement prendre en compte deux mêmes informations et, en définitive, venir surreprésenter, surévaluer certains facteurs de vulnérabilité.

Ainsi, la colinéarité est décelée par le calcul de corrélations brutes de *Pearson* (Pearson, 1895). À ce titre, les variables dont la corrélation est supérieure ou égale à 0,8, ou inférieure ou égale à -0,8, ont été jugées comme colinéaires (Rakotomalala, 2012a ; OECD *et al.* 2008). Par

la suite, une des deux variables composant la paire de corrélation est supprimée sous plusieurs réserves. Prioritairement, la variable la moins importante pour l'étude de la vulnérabilité, au regard de la littérature scientifique, est enlevée. Si les variables ne peuvent être départagées par ce référentiel, celle dont la moyenne de corrélation avec l'ensemble des autres variables est plus faible est supprimée pour des raisons qui seront comprises dans la partie suivante. Selon la nature intrinsèque des variables, il est également primordial de noter que toute corrélation élevée ne traduit pas forcément un problème de colinéarité (exemple : la population ≤ 5 ans et les inactifs de 15 à 64 ans ne peuvent foncièrement relier d'une même information).

Préalablement aux calculs de corrélation (et donc, à ceux qui suivront également), les distributions statistiques des variables normalisées ont été standardisées par le **Zscore** ([Équation 2]). Il a pour but d'augmenter l'efficacité des comparaisons en supprimant le poids potentiellement excessif des valeurs extrêmes sur la variable considérée, en générant des données sans unité et sans échelle, de même moyenne et de même dispersion (Alonso and Renard, 2020).

$$Z_{score} = \frac{y - \mu}{\sigma} \quad [\text{Équation 2}]$$

La Figure 10 illustre l'ensemble des valeurs de corrélations pour les deux jeux de données. Les variables coloriées en vert ou en violet ont été supprimées pour leur colinéarité. Les paires de corrélations dépassant le seuil fixé précédemment ont été indiquées par un encadré bleu ciel.

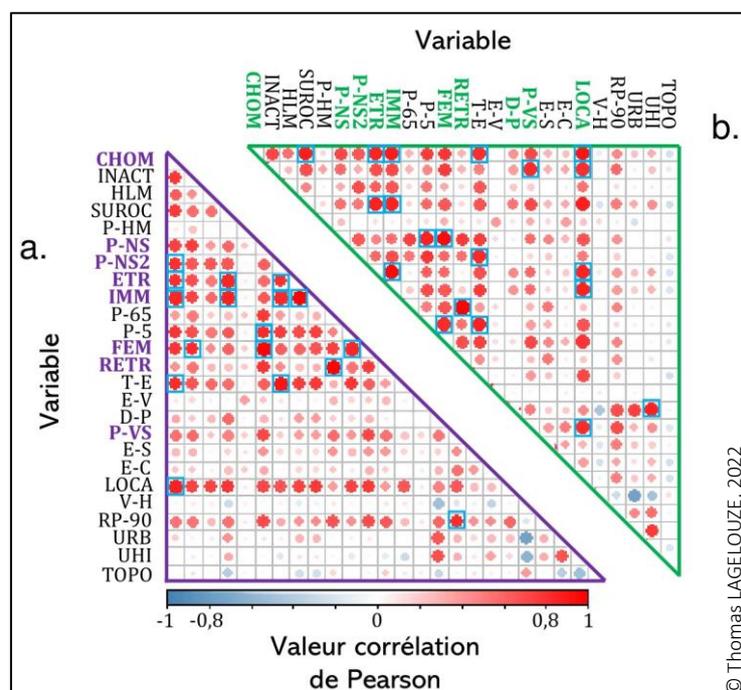


Figure 10 : Matrices de corrélations de *Pearson* pour les variables des Quatre Métropoles et de Toulouse Métropole. **a.** représente la matrice du jeu de données des Quatre Métropoles ; **b.** représente la matrice de du jeu de données de Toulouse Métropole.

4.1.2.2. Redondance des données

Les colinéarités étant désormais écartées, les variables restantes doivent tout de même converger vers une même intensité (Rakotomalala, 2014) pour être regroupées en facteur par l'ACP. Pour vérifier cette redondance, deux indices sont calculés : l'indice Kaiser-Mayer-Olkin (KMO) et l'Alpha de Cronbach (AC).

L'**Indice KMO** (Kaiser, 1974) mesure la « compressibilité des données » ([Équation 3]) du point de vue de la corrélation. Il confronte la corrélation brute (calculée précédemment) et la corrélation partielle qui sert à mesurer la relation nette entre deux variables, sans prendre en compte l'influence des autres relations d'un jeu de données.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{KMO. numérateur} = \sum r^2 - \sum \text{diag}(r^2) \\ \text{KMO. dénominateur} = \text{KMO. numérateur} + (\sum a^2 - \sum \text{diag}(a^2)) \\ \text{KMO. final} = \frac{\text{KMO. numérateur}}{\text{KMO. dénominateur}} \end{array} \right. \quad [\text{Équation 3}]$$

L'indice varie entre 0 et 1. S'il est proche de 0, les corrélations partielles sont supérieures aux corrélations brutes, signifiant que les variables sont orthogonales, opposées. Inversement, s'il est proche de 1, les variables peuvent être résumées. Celui-ci doit être supérieur ou égal à 0,6 pour que l'ACP puisse efficacement opérer (Alonso and Renard, 2020 ; OECD *et al.* 2008). Il est d'environ 0,7 pour T-M et d'environ 0,81 pour les Q-M.

Le dernier test de pré-traitement pour s'assurer de la recevabilité des variables est l'**Alpha de Cronbach** (Cronbach, 1951). Il contrôle l'homogénéité des valeurs, au prisme cette fois-ci de la covariance. Celui-ci vient s'ajouter au précédent dans l'objectif d'être affirmatif – par l'appui de plusieurs méthodes – quant à la fiabilité des variables ([Équation 4]).

$$\alpha = \frac{N \times \bar{c}}{\bar{v} + (N-1)\bar{c}} \quad [\text{Équation 4}]$$

Dans la littérature scientifique, un *alpha* supérieur ou égal à 0,7 est seulement retenu pour exprimer un jeu de données satisfaisant. (Alonso and Renard, 2020 ; OECD *et al.* 2008 ; Cronbach, 1951). T-M et les Q-M ont respectivement un *alpha* de 0,722 et de 0,8.

4.1.3. Exécution de l'Analyse en Composantes Principales

Toutes les conditions préalables ont été remplies pour lancer l'ACP. Cette dernière est exécutée avec l'option de rotation orthogonale **Varimax** pour maximiser les corrélations sur ses axes factoriels (Alonso and Renard, 2020).

4.1.3.1. Choix du nombre de facteurs

Pour connaître en combien de facteurs les variables peuvent être regroupées, la valeur propre des dimensions (axes) de l'ACP est observée (Figure 11). Selon la *règle de Kaiser* (Rakotomalala, 2012b), si cette dernière est supérieure ou égale à 1, le facteur constitué à une bonne capacité de synthèse sur les informations de ses variables. Alors, cinq facteurs ont été retenus pour T-M, quatre pour Q-M.

4.1.3.2. Constitution des facteurs

La Figure 11 rapporte les deux grandes étapes permettant de savoir dans quelle facteur les variables sont à regrouper en fonction de leurs corrélations sur les dimensions. Ainsi, les variables dont le poids factoriel est maximum sur la même dimension sont additionnées ou soustraites (selon leur impact sur la vulnérabilité, voir Tableau 2) ; les variables impactant négativement la vulnérabilité et dont le poids factoriel est également négatif, sont quant à elles additionnées. Pour finir, (préalablement) les valeurs brutes des variables et (ultérieurement) les valeurs finales des facteurs ont été standardisées par la méthode *Min-Max* ([Équation 5]), pour que chaque résultat soit *a minima* comparable. La vulnérabilité générale est simplement l'addition de tous les facteurs.

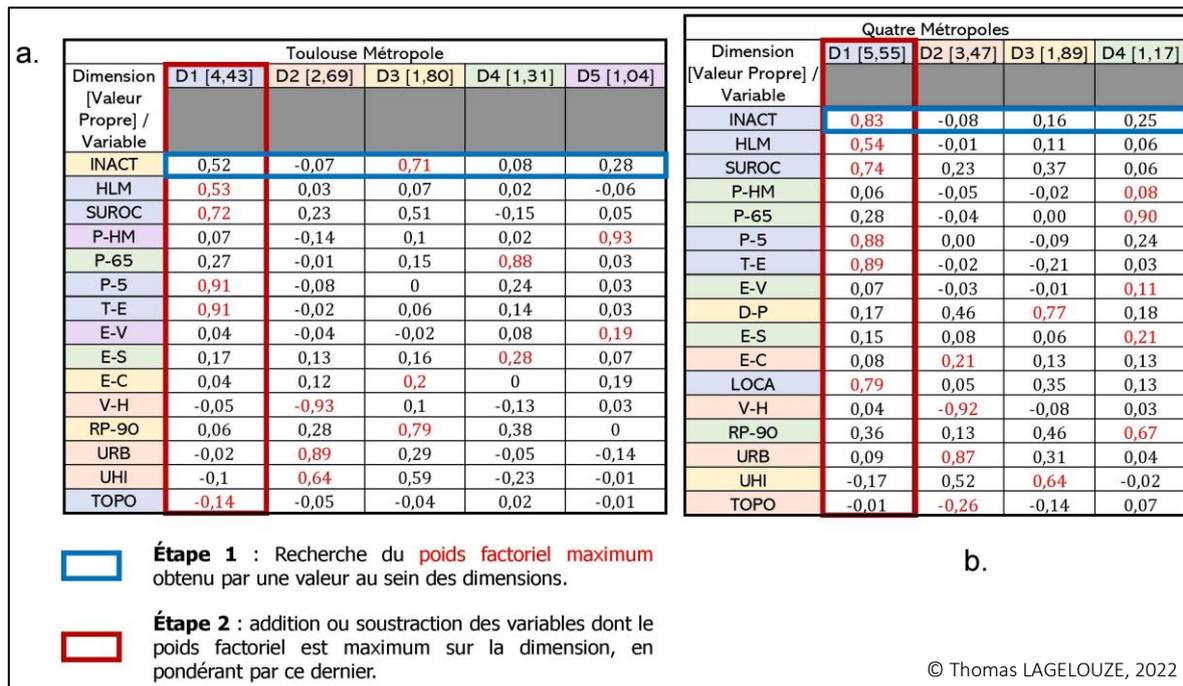


Figure 11 : Poids factoriels des variables sur chaque dimension de l'Analyse en Composantes Principales. Les poids factoriels maximums par variable ont été indiqués en rouge. a. correspond à Toulouse Métropole et b. aux Quatre Métropoles.

$$\text{Min} - \text{Max} = \frac{y - \min(y)}{\max(y) - \min(y)} \quad [\text{Équation 5}]$$

4.2. Méthodologie de l'Analyse Hiérarchique des Procédés

4.2.1. Définition de l'Analyse Hiérarchique des Procédés

L'Analyse Hiérarchique des Procédés est une méthode d'expertise qui se préoccupe d'accompagner les prises de décisions face à une situation complexe (Saaty, 1988). Elle guide librement son utilisateur, en mettant à disposition une échelle cohérente de pondération qui permet de traduire quantitativement un jugement subjectif d'un phénomène par rapport à un autre. Elle n'est rattachée à aucune approche en particulier mais est ici orientée selon les instructions de l'approche additive.

4.2.2. Différences fondamentales entre l'Analyse en Composantes Principales et l'Analyse Hiérarchique des Procédés

Contrairement à l'approche inductive, l'AHP part du principe que si des relations existent entre des variables de vulnérabilité à la chaleur, il est aujourd'hui impossible de pouvoir réellement les saisir tant théoriquement que statistiquement. En ce cas, elle évalue la vulnérabilité en considérant chaque variable comme égale à une autre dans l'information qu'elle recèle. Il en est de même pour leur distribution, en dépit de connaître des seuils critiques pour lesquels la vulnérabilité viendrait à croître ou décroître de manière exponentielle, elle estime une situation de parfaite équité où chaque classe de distribution suit une croissance d'impact linéaire et proportionnelle.

Plus encore, précédemment, l'ACP discriminait algorithmiquement et objectivement les variables, en analysant leur distribution, pour se voir en finalité indiquer quelles étaient celles à rassembler. Dans cette méthode et selon son orientation, l'AHP commence par regrouper subjectivement sous forme d'expertise les variables en facteurs, pour ensuite orienter équitablement leur distribution. Alors, là où la méthode inductive usée de la statistique pour dégager une expertise, la méthode additive se réfère à l'expertise pour la traduire statistiquement avec des pondérations. De sorte, l'une tient alors compte des particularités pour pondérer entre les variables et faire ressortir des résultats spécifiques, l'autre simplifie les particularités en pondérant à l'intérieur des variables, dans leur distribution, pour faire ressortir des résultats généraux.

4.2.3. Principes de gestion des données

Pour cette méthode, les facteurs dégagés en **Partie 1** sont réexploités, pour les arguments subjectifs et théoriques qui ont déjà été apportés. Les variables y sont ordonnées comme dans le **Tableau 2** ; chacune sera à regrouper sans pondération. Avant de procéder à l'agrégation, deux étapes de la méthode ACP (la gestion des données manquantes et la colinéarité) sont réemployées au regard de leur importance statistique pour avoir un résultat quantitatif cohérent.

De fait, pour Toulouse Métropole, le même nombre de variables et de données sont supprimées, comme précédemment (Cf. **Partie 4.1.2.1.1** et **Figure 10.b**).

4.2.4. Simplification des distributions des variables par pondération

L’AHP, dans le cadre de l’approche additive, a pour instruction de simplifier généralement l’évaluation de la vulnérabilité. De fait – une fois les variables préalablement standardisées par la méthode **Min-Max** ([Équation 5]) pour que leur amplitude soit équivalente – leur distribution est discrétisée en 5 classes égales (**Figure 12.a**). Sur cette base, il est alors considéré que chaque passage croissant d’une classe de valeurs à une autre, augmente (ou diminue, selon l’impact de la variable en question sur la vulnérabilité) proportionnellement un peu plus la vulnérabilité. Ce jugement subjectif est traduit quantitativement grâce aux degrés fournis par l’AHP (voir la **Partie Annexe 5**). Les pondérations finales entre les classes découlent d’une succession de calculs, dont chaque étape est détaillée dans la **Figure 12**. Dans la finalité chaque poids remplace l’ensemble des autres valeurs initiales de la classe pour laquelle il est effectif. Ce processus a pour effet de lisser la distribution des variables en supprimant les potentiels effets de bord provoqués par les valeurs initiales extrêmes.

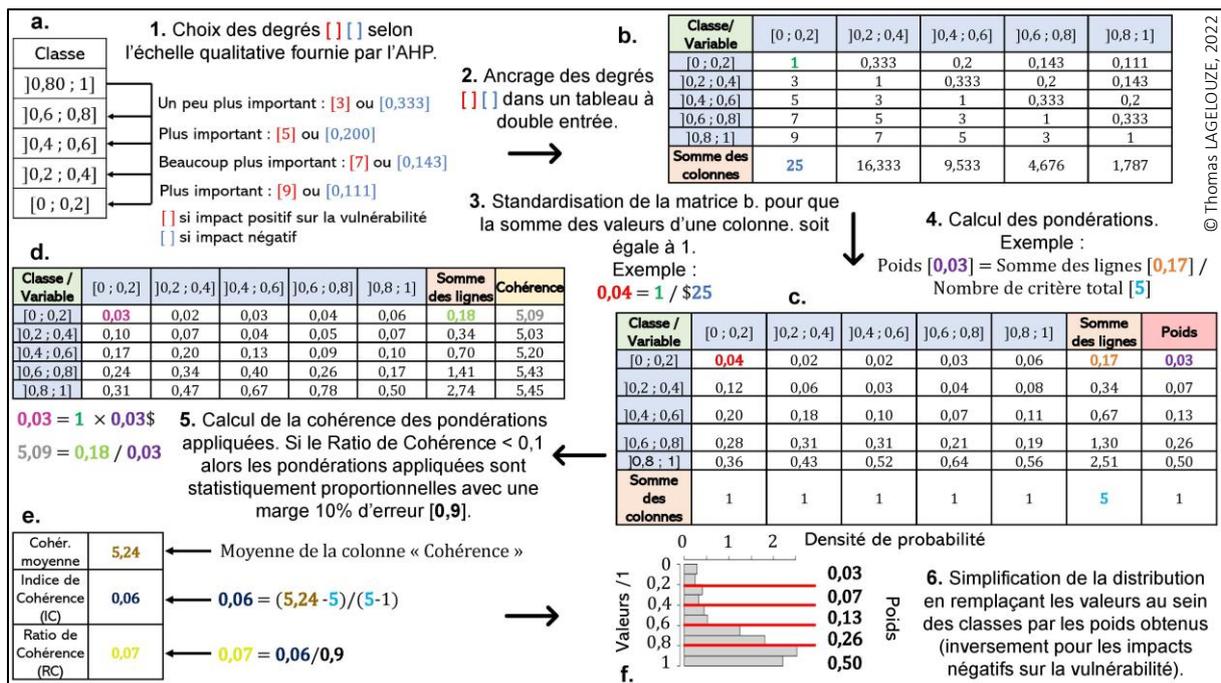


Figure 12 : Méthodologie d’application des degrés de l’Analyse Hiérarchique des Procédés et d’obtention des poids de remplacement. Les étapes de calcul et le sens de lecture de la figure suivent les chiffres allant de 1 à 6. Pour faciliter la compréhension, les calculs utilisent des symboles propres au logiciel Excel (§). a. représente la façon dont ont été discrétisées les distributions standardisées des variables ; elle présente également les degrés choisis pour proportionnellement les comparer. b. représente la matrice de comparaison, c. la matrice de pondération, d. la matrice de cohérence des pondérations, e. les résultats de cohérence. f. permet de visualiser par quelle pondération ont été remplacées les valeurs de chaque classe. L’exemple pris pour le graphique est la variable de densité de population sur Toulouse Métropole.

Finalement, les facteurs de vulnérabilité sont constitués par addition ou soustraction des variables. Leur score est par la suite standardisé une nouvelle fois sur 1. La vulnérabilité générale est le résultat de la fonction ([Équation 6]) requise et issue de la littérature qui a permis d'identifier et conceptualiser les facteurs (Mallen *et al.* 2019 ; Inostroza *et al.* 2016). Dans cette étude et lors de l'application de cette méthode, les variables impactant négativement la vulnérabilité ont été pondérées de manière inverse. Ainsi, les facteurs de vulnérabilité sont seulement additionnés (+).

$$\text{Vulnérabilité} = (\text{Sensibilité} + \text{Exposition}) - (+) \text{Adaptation}$$

[Équation 6]

4.3. Synthèse de la méthodologie générale

L'ensemble de la démarche employée dans ce mémoire est illustré par la Figure 12. Elle se décompose en sept parties faisant état du sujet, de la conception sur la vulnérabilité, des terrains d'étude requis, des données, des traitements appliqués, et pour finir des résultats et des discussions.

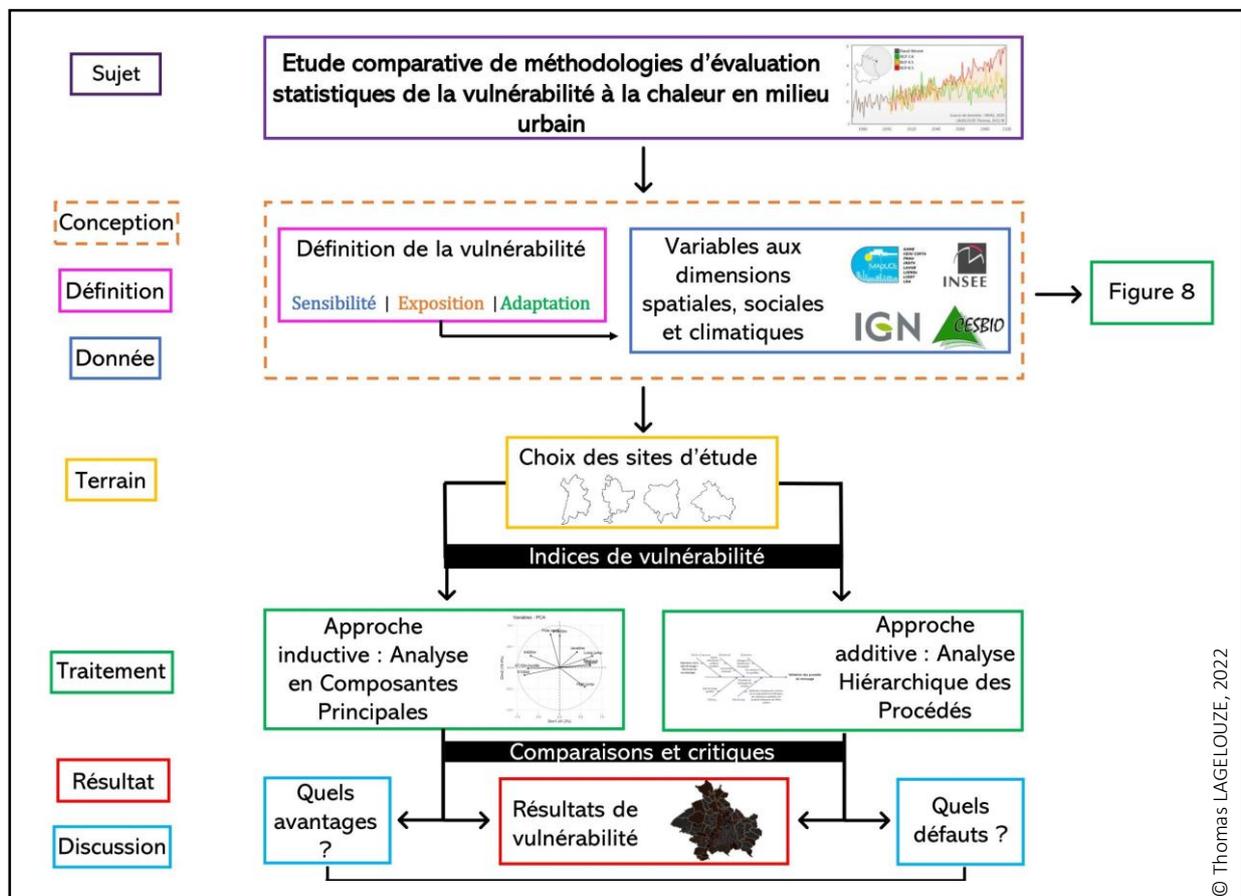


Figure 13 : Méthodologie générale de l'étude.

5. Résultats

Avant-propos : Ce mémoire, et en particulier la Partie **Résultats**, se concentre uniquement sur la comparaison des indices de vulnérabilité d'un point de vue statistique. Comme énoncé lors de la Partie **Présentation de la structure d'accueil et des missions**, un autre stage est en cours de réalisation et a pour objectif de se saisir des résultats qui seront présentés, pour en faire une analyse territoriale et opérationnelle. Ainsi, ici, des IRIS pourront être ciblés pour leur vulnérabilité, mais ces derniers seront analysés qu'en référence aux modalités des traitements engagés précédemment en **Partie 4**. Somme toute, ce document permet de faciliter les compréhensions des méthodes, pour mieux par la suite les employer en état de cause.

L'objectif de cette partie est d'analyser et de comparer d'un point de vue statistique les effets des traitements appliqués en **Partie 4** méthodologique. Pour ce faire, deux points seront abordés pour les deux méthodes : un premier relatant des comparaisons entre les résultats intermédiaires des processus statistiques, et un second évoquant les comparaisons entre les résultats finaux.

5.1. Résultats de l'Analyse en Composantes Principales

L'Analyse en Composantes Principales fut exécutée sur deux territoires/deux jeux de données : une première sur Toulouse Métropole (T-M) et une seconde sur les Quatre Métropoles (Q-M) simultanément. Au prisme de ces deux lancements, il était question d'évaluer l'applicabilité de la méthode sur des sites d'étude aux échelles et au nombre d'IRIS distincts.

Premièrement, une différence se constate entre les variables sélectionnées pour faire facteur à l'issu des traitements préalables (Cf. **Partie 4.1.2.1 – 4.1.2.2**). En effet, moins d'éléments ont été supprimés pour Q-M (10 éléments supprimés) aux 3797 IRIS, par rapport à M-T (12 éléments supprimés), au nombre d'IRIS bien moins conséquents (249). Ici, les pré-traitements mobilisés (principalement ceux de la **Partie 4.1.2.1.2** et sur la transformation normale et de la **Partie 4.1.2.2.1** sur la corrélation) dans le cadre de l'analyse, ont une moindre efficacité sur les variables avec beaucoup d'observations. En effet, plus de données confèrent une probabilité accrue d'avoir une amplitude de distribution plus grande, contenant plus de variabilité. De fait, deux variables supplémentaires sont à noter pour Q-M (la densité de population et le nombre de locataire), les dix autres variables restantes sont communes aux deux territoires. Par inférence, les constats précédents se répercutent et prévalent également sur la manière qu'a l'Analyses en Composantes Principales de créer les facteurs. Les différences indexées sur le nombre de facteurs retenus, sur les variables les composant et sur les poids de ces variables lors de l'agrégation, sont à rapporter à la corrélation de chacune d'elle sur les différents axes de l'ACP. À ce titre, ces différences notables sur les résultats intermédiaires constituent une des premières limites de la méthode, qu'elle-même considère puisque cette dernière assure une performance efficace sur un jeu n'excédant pas cinq mille données (Hair *et al.* 2019).

Les considérations techniques qui sont avancées démontrent les principaux avantages et défauts analytiques de l'ACP. Pour cause, son utilisation permet d'expliquer statistiquement comment certaines variables composent un facteur, mais rend impossible d'apporter une

justification théorique sur cette composition. C'est à ce titre que des variables considérées de prime abord comme subjectivement opposées de par leur type, leur sujet et niveau d'information, se retrouvent résumées sur une même dimension (par exemple la variable *Topographie* dans le **Facteur 1** de T-M) ; de même que certaines pourtant de même teneur conceptuelle sont séparées (par exemple l'*UHI* avec la *Végétation Haute* et l'*Urbain* pour Q-M).

Les résultats finaux suivent les mêmes logiques que celles dégagées jusqu'alors. La comparaison des indices des facteurs, et surtout de la vulnérabilité générale sur les deux sites d'étude, admet des nuances de valeurs assez prononcées pour être notées. En effet, les **Figures 14, 15 et 16** illustrent des intensités de vulnérabilité forts majoritairement plus bas pour la Métropole de Toulouse du jeu de données des Q-M, vis-à-vis de celles du jeu de données T-M. Pour l'ACP sur les Quatre Métropoles, cet écart est à constater en raison des dynamiques sociales et climatiques de la Métropole de Paris, considérées (négativement comme positivement) exponentielles par rapport aux caractéristiques des trois autres métropoles de Province. Les fortes valeurs recensées dans les quartiers de la capitale (l'exemple le plus parlant est l'*UHI*) participent à augmenter l'amplitude de la distribution statistique de Q-M, impactant tous les territoires (Paris, Grenoble, Lyon et Toulouse) qu'il comprend (**Figure 15.f**). Cette augmentation a pour effet de facilement venir fausser l'interprétation dégagée sur la vulnérabilité. De fait, en étirant les valeurs des derniers centiles d'une plage de données par la présence seule de Grand Paris, la métropole de Toulouse (dont les valeurs extrêmes ne sont que des centiles moyens dans le jeu de données des Q-M) ne paraît que peu généralement vulnérable ; sans pour autant pouvoir affirmer qu'elle ne l'est pas, en l'absence de cadre analytique et de seuils critiques qui permettraient de la positionner face à un référentiel.

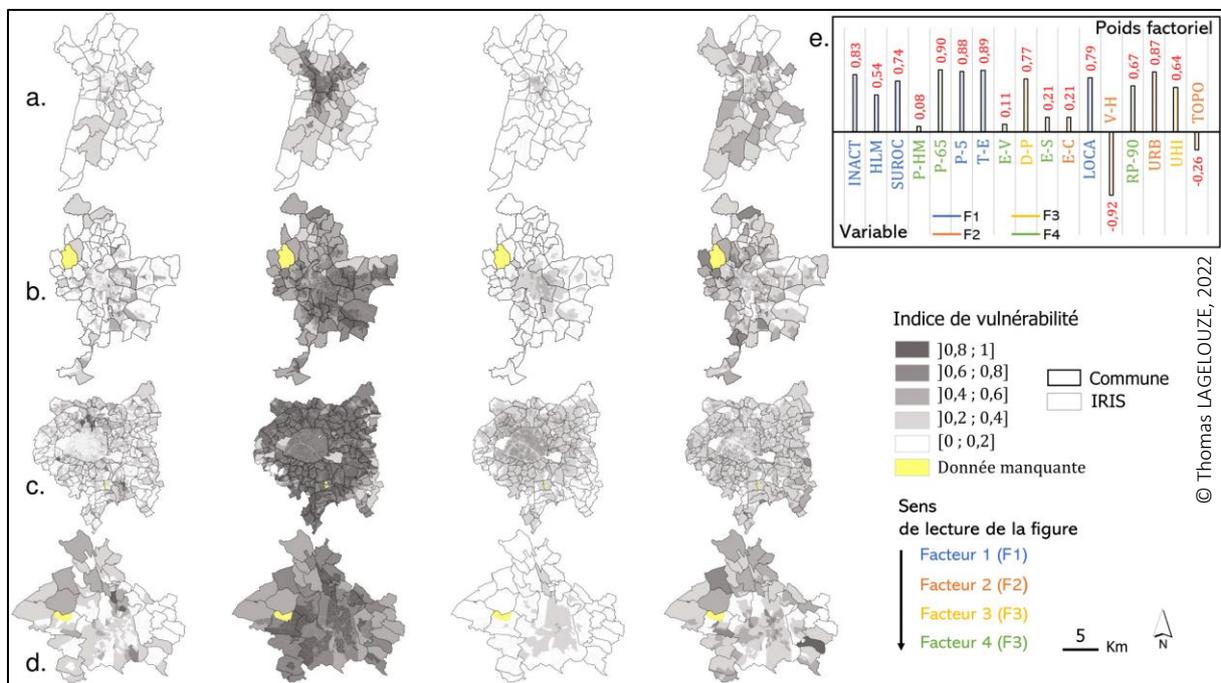


Figure 14 : Présentation des facteurs de vulnérabilité, constitués par l'Analyse en Composantes Principales pour le jeu de données des Quatre Métropoles. Horizontalement, **a.** représente le territoire de Grenoble Métropole, **b.** Grand Lyon, **c.** Grand Paris et **d.** Toulouse Métropole. **e.** permet quant à lui de rappeler par un code de couleur commun avec la légende « *sens de lecture de la figure* », quelles variables composent chaque facteur et quel poids ces dernières ont eu dans l'agrégation.

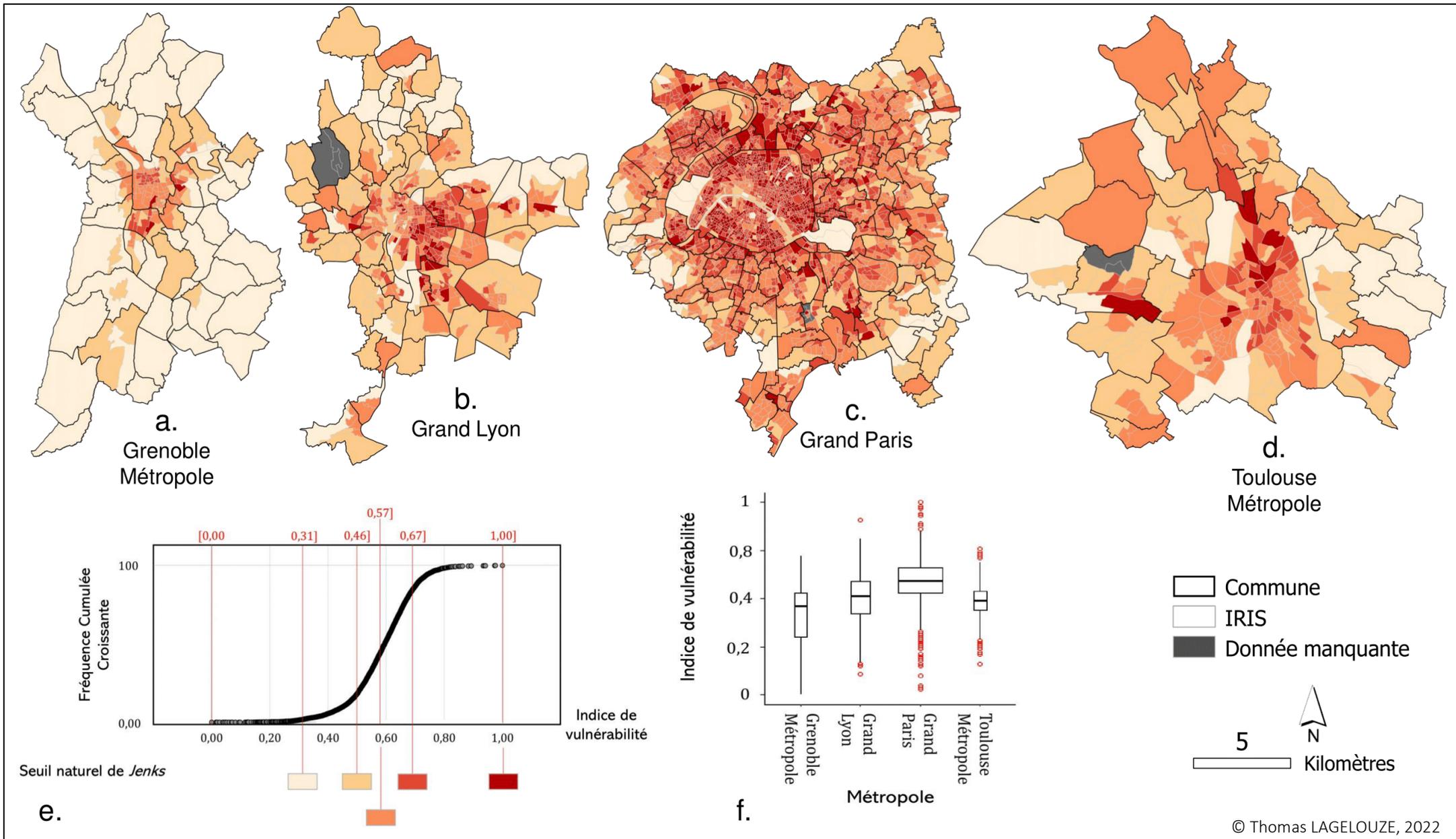


Figure 15 : Vulnérabilité générale évaluée par l'Analyse en Composantes Principales pour les Quatre Métropoles. **a.** correspond au territoire de Grenoble Métropole, **b.** Grand Lyon, **c.** Grand Paris et **d.** Toulouse Métropole. **e.** représente la légende des indices de vulnérabilité de ces quatre territoires. La discrétisation par la méthode des seuils naturels de *Jenks* permet de visualiser les différents seuils de rupture au sein de la distribution de leurs indices de vulnérabilité. Pour finir, **f.** appréhende la distribution des valeurs des IRIS à l'échelle de leur métropole respective. Ces résultats généraux ont été générés par l'addition des facteurs présentés en Figure 13.

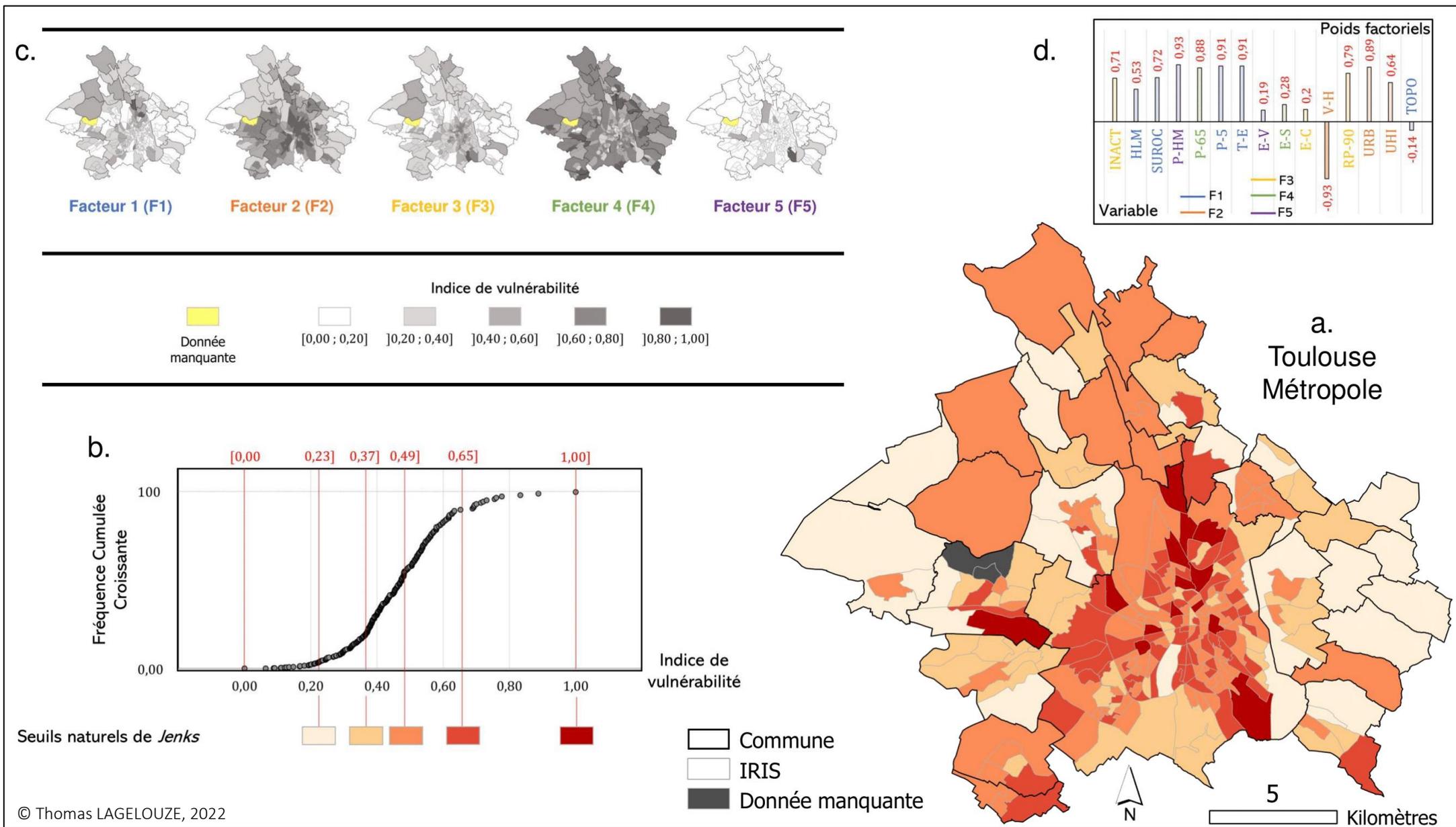


Figure 16 : Vulnérabilité générale évaluée par l'Analyse en Composantes Principales pour Toulouse Métropole. **a.** représente la distribution spatiale des indices de vulnérabilité ; **b.** représente la discrétisation géographique (la légende) de cette distribution par les seuils naturels de Jenks. **c.** témoigne à son tour de la distribution spatiale des facteurs additionnés pour générer **a.** **d.** permet quant à lui de rappeler par un code de couleur commun avec **c.**, quelles variables composent chaque facteur et quel poids ces dernières ont eu dans l'agrégation.

Des clés de lecture sont à donner pour les trois figures qui viennent d'être présentés et permettent d'expliquer quelle interprétation peut se dégager de ces résultats, en fonction des traitements qui ont été appliqués. De fait, l'ACP exécutée sur un seul territoire (Figure 16) évalue l'intégralité de ses spécificités, mais rend impossible de pouvoir le comparer en termes de valeurs propres à quelconque autre (*a fortiori* avec les standardisations exécutées en amont et aval des sorties de traitements mais aussi en raison de l'inégal nombre de variables retenues après les traitements préalables). Elle assure pour autant de rendre opérationnelles ses sorties de traitements, puisque que chacune des valeurs de quartier se réfère à un même contexte (toulousain), dont sont inhérentes les variables qui ont servi à produire les indices. Par contradiction, l'ACP appliquée sur les Quatre Métropoles simultanément permet uniquement de les situer les unes par rapport aux autres, mais non d'engager des hypothèses propres à une EPCI, sans que ces dernières ne prennent en compte l'ensemble dans lequel elles sont incluses. Ainsi, la Figure 16 permet d'examiner la vulnérabilité, la Figure 14 et 15 servent à confronter les vulnérabilités.

Ces instructions sont également valables pour la lecture des figures présentées ci-dessous. En prenant l'exemple de la Figure 16 (il en est de même pour la Figure 14 et 15), la plage de valeurs des facteurs de vulnérabilité a été hiérarchisée en cinq intervalles égaux (Figure 16.c) pour éviter toute confusion avec le résultat final (Figure 16.a). De fait, leur distribution spatiale peut se comparer à leur échelle (celle des facteurs) mais ne peut directement l'être avec d'autre, soumise à une méthode de discrétisation non-similaire. Elles ont tout de même été proposées pour permettre de décomposer et de comprendre les modalités de construction de la Figure 16.a, puisqu'elles peuvent malgré tout renseigner où sont les valeurs les plus extrêmes tant positivement que négativement. Les indices de vulnérabilité générale (Figure 15.a et 16.a) ont quant à eux été représentés par la méthode des seuils naturels de *Jenks*. Cette méthode bâtie des classes de valeurs en tenant compte des ruptures au sein d'une distribution (Zanin and Lambert, 2016). Elle propose des seuils uniques au terrain d'étude, à partir desquels l'intensité de la vulnérabilité croît ou décroît assez fortement pour être spécifiée. Malgré leurs différences les deux sites ont approximativement le même seuil pour la classe la plus intense. Si seule la statistique primait pour un sujet pluridisciplinaire tel – bien que les parties suivantes démontreront le contraire – la vulnérabilité pourrait être statuée critique à partir d'un indice de 0,67 pour les Quatre Métropoles (Figure 15.a) et à partir d'un indice de 0,65 (Figure 16.a) pour Toulouse Métropole.

5.2. Résultats de l'Analyse Hiérarchique des Procédés

La méthode de l'Analyse Hiérarchique des Procédés, débouche sur des résultats qui peuvent s'argumenter et se résonner globalement de la même manière que ceux de la précédente, bien qu'elle lui soit opposée sur la façon de faire facteur.

Ce constat est en premier lieu dû aux pré-traitements méthodologiques que les deux Analyses partagent (gestion des données et de la colinéarité ; Cf. **Partie 4.2.3**). Ainsi, les explications qui prévalaient en début de **Partie 5.1**, prévalent également dans celle-ci : avec un même ensemble de variables initiales, une AHP appliquée indépendamment sur deux territoires peut déboucher tout autant sur une évaluation ne retenant pas le même nombre d'éléments. Néanmoins, cette

fois-ci, une stabilité est maintenue sur le type, la nature, l'information des variables figurant dans les facteurs de vulnérabilité. En effet, la méthode a été orientée (selon l'approche cumulative) de sorte à ce que chaque facteur soit composé à chaque exécution, qu'importe l'échelle ou le nombre d'IRIS des territoires concernés, par les mêmes variables. Cette constance permet, *a minima*, de faciliter les comparaisons d'un point de vue statistique.

Dans la continuité, l'Analyse Hiérarchique des Procédés ne se positionne pas sur l'étude des relations. Ces dernières sont déjà établies avant de procéder aux traitements, lors de la sélection manuelle des variables pour composer les facteurs. Cette méthode se focalise sur des généralités et des proportionnalités, en supprimant les effets des valeurs extrêmes sur la distribution et en remplaçant chaque valeur située dans une classe d'intervalle par un poids proportionnel. Cette reclassification a pour conséquence de lisser les résultats et faire ressortir - non les IRIS de haute ou de basse vulnérabilité – mais ceux linéairement enclin à une forte ou faible vulnérabilité. Ce découpage à l'avantage de décomplexifier les imbrications de distributions de chaque variable de la vulnérabilité, tout en faisant ressortir des majorités, plus que des particularités.

La [Figure 17](#) illustre les propos avancés jusqu'alors. Les seuils attribués par la méthode de *Jenks* sont moins abrupts et inclus un nombre de données plus homogène. Bien que les additions et les soustractions pour composer les facteurs aient participé à légèrement déstructurer la linéarité indexée par les poids proportionnels des classes, il peut se constater sur la [Figure 16.b](#) que la courbe de distribution de la vulnérabilité générale est plus droite que pour celles de l'ACP ([Figure 15.b](#) et [16.b](#)). Elle traduit une meilleure régularité de distribution des indices, géographiquement et visuellement constatable sur la [Figure 16.a](#).

Pour finir, bien que cette méthode engage une réflexion différente que celle de l'ACP autour de la vulnérabilité et de sa conception, les processus statistiques utilisés ici influencent de la même façon l'interprétation des résultats (Cf. [Partie 5.1](#)). Une AHP lancée sur un seul territoire ([Figure 17](#)) permet d'évaluer spécifiquement les résultats mais non de les comparer strictement avec d'autres. Ce constat permet de justifier la raison pour laquelle une AHP sur les quatre territoires n'a pas été présentée : de par la structure statistique des procédés de l'AHP qui viennent d'être détaillés, les avantages et les limites à dénoter se seraient axés sur ceux énoncés en [Partie 5.1](#).

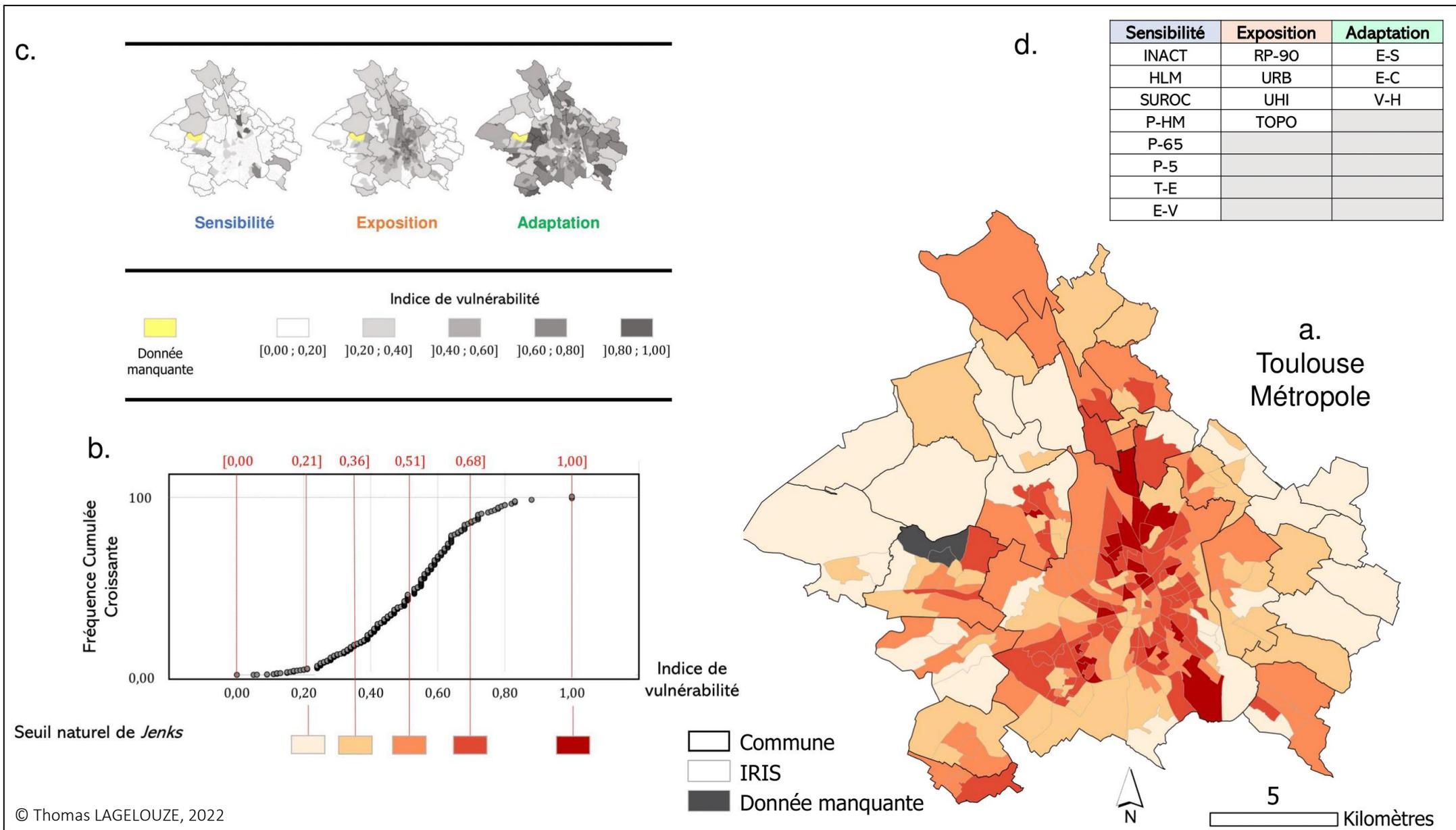


Figure 17 : Vulnérabilité générale évaluée par l'Analyse Hiérarchique des Procédés pour Toulouse Métropole. **a.** représente la distribution spatiale des indices de vulnérabilité ; **b.** représente la discrétisation géographique (la légende) de cette distribution par les seuils naturels de Jenks. **c.** témoigne à son tour de la distribution spatiale des facteurs additionnés pour générer **a.** **d.** permet quant à lui de rappeler par un code de couleur commun avec **c.**, quelles variables composent chaque facteur.

5.3. Comparaisons des résultats de l'Analyse en Composantes Principales et de l'Analyse Hiérarchique des Procédés

Les principales conclusions à faire ressortir de l'analyse des deux parties précédentes, reposent sur l'impossibilité, en termes statistique, de comparer les valeurs des indices de vulnérabilité (Figure 15, 16 et 17), de constitutions différentes.

Pour autant, en se détachant des valeurs brutes, des schémas de distribution spatiaux récurrent peuvent être dégagés sur l'ensemble des méthodes et des territoires aux dynamiques pourtant spécifiques (Cf. **Partie 2**). À cet égard, la vulnérabilité générale semble être un « phénomène » qui touche en priorité les villes-centres des métropoles étudiées et les premières couronnes urbaines de ces dernières. En prenant l'exemple de Toulouse et Grenoble Métropole, certains IRIS des centres-villes des communes de Toulouse et Grenoble ont été indiqués comme fortement vulnérables, principalement en raison que les facteurs d'exposition climatique utilisés furent assez corrélés pour être mis en relation (dans le cadre de l'ACP : **Facteur 2** et **3** pour Q-M et **Facteur 2** pour T-M) et pour exprimer un dessein général (indirectement ou directement : l'UHI). Les quartiers périphériques de ces villes suivent la même logique et recensent aussi de forts indices (à l'exemple du quartier *Borderouge Nord* pour Toulouse, ou du quartier de *Vigny-Musset* de Grenoble) en raison des fortes cohérences statistiques affichées entre les variables de capacités socio-économiques. Pour finir, les communes avoisinant ces villes-centres sont tout autant concernées par la vulnérabilité, principalement en fonction des populations vieillissantes et vulnérables physiologiquement, y résidant. Pour cause, les variables (comme le nombre de personne âgées de 65 ans ou plus, ou encore le nombre d'établissements vulnérables) en rapport avec la santé, obtiennent également de bonnes redondances statistiques avec celles du facteur sensibilité, principalement pour le large spectre de personnes qu'elles peuvent englober. Il faut alors retenir que ces trois schémas spatiaux énoncés sont identifiables pour l'homogénéité des groupes de variables les caractérisant.

Ces tendances de distributions spatiales ont essayé d'être analysées plus spécifiquement par la Figure 18, en comparant des classes de valeurs communes (et non des valeurs brutes, pour les raisons exprimées en **Partie 5.1**) des indices obtenus sur la métropole de Toulouse en Figure 15, 16 et 17. Pour que ces comparaisons soient facilitées et permises, les résultats qui viennent d'être cités, ont tous été discrétisés en en cinq classes de valeurs égales (Figure 17.d). Ainsi, chaque IRIS peut alors être positionné dans un schéma spatial et statistique général, en fonction de la position de ses indices dans chacune des classes de valeurs édictées.

A l'appui de **a.**, **b.** et **c.** de la Figure 17, les différentes méthodes semblent s'accorder pour renseigner des vulnérabilité faibles (**a.**) et moyennes (**b.**), mais sont plus clivantes et disparates quant à la classe de vulnérabilité forte (**c.**). Ces hétérogénéités sont cependant aplanies à une échelle plus petite (au sens géographique), comme en témoigne la médiane des scores des IRIS par communes (Figure 17.e) ; dont ces dernières suivent globalement les mêmes fluctuations. Elles apportent cependant une information contraire à celles avancées jusqu'à présent : les médianes des scores renseignées par les communes de Toulouse Métropole sont plus élevées pour l'ACP lancée simultanément sur les Quatre Métropoles (Q-M), par rapport à l'ACP exécutée uniquement sur Toulouse Métropole (T-M). Précisément, pour l'ACP appliquée aux quatre territoires en même temps, Grand Paris a eu pour effet de tirer les scores du territoire de Toulouse vers le bas, de réduire leur amplitude, et de fait, de les centrer progressivement autour

de la médiane du jeu de données global. Ces processus statistiques expliquent alors que plus de variabilité sont à dénoter pour les résultats sur Toulouse avec l'ACP T-M, puisque les médianes se calculent sur des indices d'amplitude min = 0 et max =1, là où elles se calculent seulement sur des indices d'amplitude min = 0,16 et max = 0,76 (les valeurs extrêmes étant localisées sur Paris). Alors, pour deux séries statistiques dont la distribution a été standardisée de la même façon, si l'amplitude d'une des séries diminue modérément, la probabilité que sa valeur centrale soit plus élevée, est renforcée.

Pour conclure, la **Partie 5** a fait état d'un nombre conséquent de différences et d'équivalences entre les méthodes statistiques. Dans l'ensemble, celle-ci a principalement démontré les conséquences, en termes d'interprétation statistique, d'exécuter une des deux Analyses (ACP et AHP) sur plusieurs territoires simultanément ou sur un seul territoire à la fois. Tandis que la première option permet uniquement de comparer et de situer les métropoles entre elles, la seconde permet d'évaluer spécifiquement une métropole en analysant, au prisme des indices, son seul contexte territorial. Néanmoins, bien que des disparités et nuances existent sur les valeurs brutes des indices de vulnérabilité, des schémas de distributions spatiaux généraux sont tout de même à dégager entre les trois résultats inhérents des deux méthodologies de traitements. Ces tendances témoignent alors de la relative capacité des méthodes à renseigner d'une même information générale sur la vulnérabilité à la chaleur (leurs indices et leurs évaluations), mais avec un « langage » et un cheminement statistique différent, voir opposé.

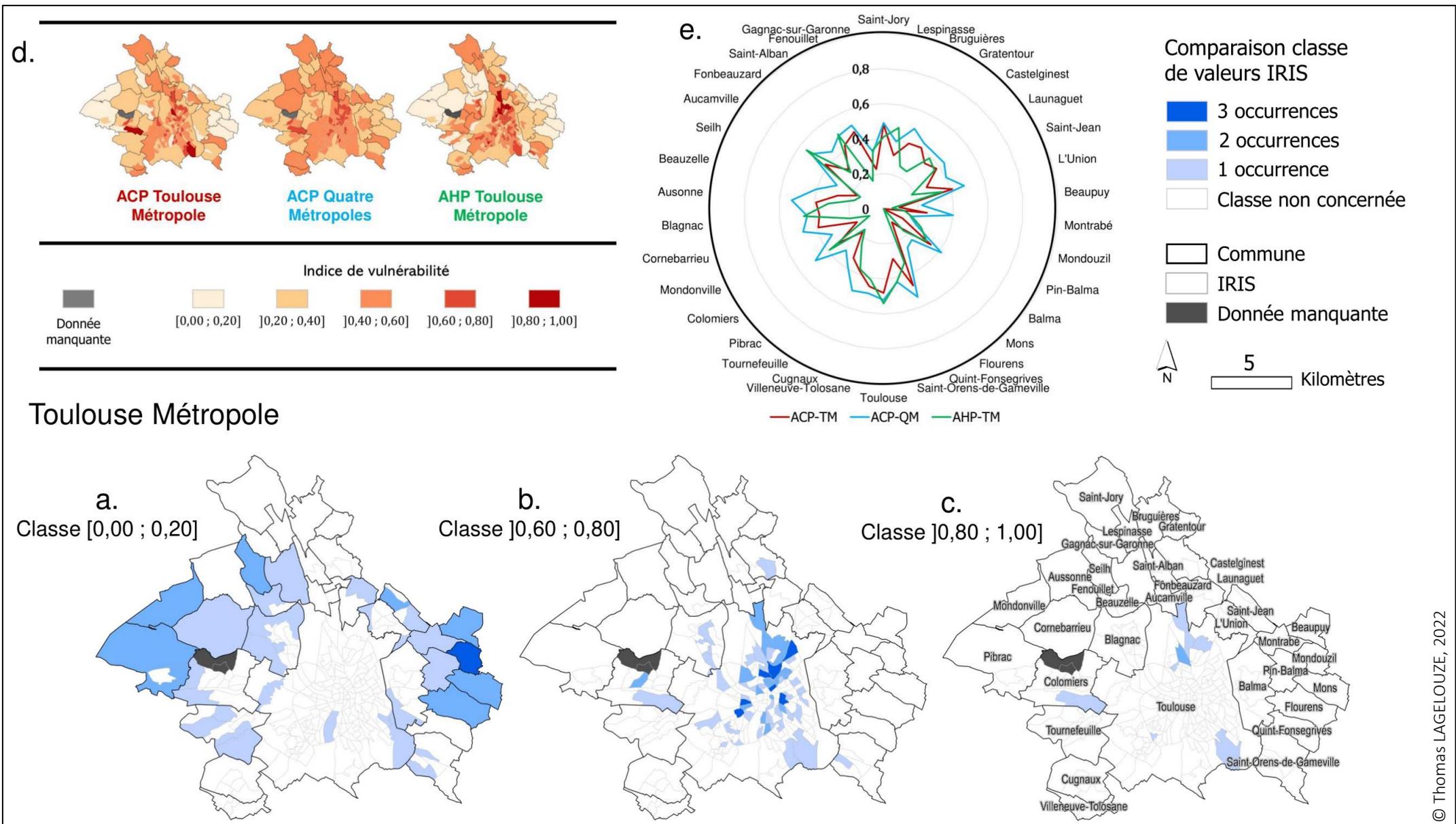


Figure 18 : Comparaison des tendances par classe de valeurs des trois résultats d'indices de vulnérabilité obtenus sur le territoire de la Métropole de Toulouse pour la méthode de l'Analyse en Composantes Principales et de l'Analyse Hiérarchique des Procédés. **a.** représente la comparaison pour la classe de valeurs [0 ; 0,2] ; **b.** la classe de valeurs [0,6 ; 0,8] ; et **c.** la classe de valeurs [0,8 ; 1]. Sur ces cartes, la couleur blanche signifie que les IRIS en question n'appartiennent tout simplement pas à la classe de valeur comparée. Une couleur bleu ciel signifie qu'un seul indice de vulnérabilité général de **d.** a identifié l'IRIS dans la classe de valeur en question. La couleur bleu foncé signifie que tous les résultats de **d.** ont identifié l'IRIS dans la classe de valeur concernée. Quant à lui, **d.** illustre certaines classes de valeurs qui sont comparées. La même discrétisation a été appliquée aux trois résultats sur Toulouse Métropole pour permettre d'appréhender visuellement les comparaisons faites sur **a.**, **b.** et **c.** Pour finir, **e.** propose un radar de distribution des scores médians des IRIS par commune. Pour faciliter la lecture, les communes ont été rangés géographiquement. Toulouse représente alors le point le plus au Sud de la Métropole, Saint-Jory le point Nord, Beaupuy le point Est et Pibrac, le point Ouest.

Discussions et Conclusions

Rappel du domaine de l'étude et des missions

Au regard de l'urgence climatique qui porte les extrêmes de chaleur à être plus intenses et fréquents, un panel d'études (Alonso and Renard, 2020 ; Conlon *et al.* 2020 ; Mallen *et al.* 2019 ; Inostroza *et al.* 2016 ; Bao *et al.* 2015) et d'organismes tentent d'évaluer la vulnérabilité ; mais aucun recul ne semble être pris sur le « pourquoi », le « sur quoi » et le « comment » l'évaluer. À ce titre, dans l'objectif d'impulser une réflexion scientifique à ce sujet, sur laquelle travaille une partie de l'équipe de recherche du CIEU au LISST, mais également dans celui de répondre aux besoins opérationnels actuels de Toulouse Métropole, ce mémoire visait à analyser deux méthodes statistiques d'évaluation. Par leur prisme, sa problématique première eut été de proposer une manière générale de caractériser, de mesurer, d'analyser et de représenter la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain. Pour cela, trois missions principales ont été réalisées. La première apporta une manière de concevoir, de réfléchir la vulnérabilité à la chaleur, dans la profusion de définition existante (Pigeon, 2005). La seconde proposa un panel de variables utilisables à l'échelle de la France pour venir caractériser et représenter quantitativement les différents facteurs de définitions de la vulnérabilité, dégagés lors de la première mission. La troisième fit l'état statistique des avantages et des défauts que pouvaient comparément avoir l'Analyse en Composantes Principales et l'Analyse Hiérarchique des Procédés pour évaluer la vulnérabilité à la chaleur.

Discussions autour des résultats intermédiaires et principaux

L'Analyse en Composantes Principales et l'Analyse Hiérarchique des Procédés sont soumises aux mêmes limites face au nombre de variable sélectionné et face aux difficultés d'interprétation des résultats quand celles-ci portent sur plusieurs territoires à la fois. En tant que livrable officiel de ce mémoire, il est aujourd'hui impossible d'être unanime sur une méthode de traitement qui puisse convenir à tout comme à tous ; seulement de renseigner sur celle qui puisse être la plus adaptée selon la réflexion que l'on peut/veut apporter sur la vulnérabilité. De fait, en vertu de la profusion de théories sur la caractérisation de la vulnérabilité, l'ACP peut se positionner pour sa manière d'objectiver son évaluation, en ne permettant pas aux considérations conceptuelles d'inférer dans les traitements qui forment les facteurs. Néanmoins, une fois les résultats obtenus, ces derniers ne peuvent se discuter, s'orienter ou se modifier sur la base d'information que les données ne pourraient relater à elles-seules. Finalement, en se voulant statistiquement irréfutable, cette méthode ancre son expertise dans une dimension statique qui ne peut évoluer ou s'adapter sans une requalification des valeurs numériques renseignées en entrée de l'ACP (et si tenté que toutes informations théoriques de vulnérabilité puissent être traduites par des variables quantitatives). Pour le monde professionnel, cette méthode semble alors très peu opérationnelle, sans prendre en compte qu'elle reste difficilement compréhensible pour toutes et tous car ses résultats se veulent déconnectés de toutes situations rationalisables sur la base d'un vécu observé. L'AHP se place sur des considérations inverses et autorise quant à elle que les résultats soient construits par des

avis et des expertises qui sortent de l'ordre de la statistique. Le risque étant que le résultat ne soit jamais définitivement stabilisé en fonction des courants de la vulnérabilité qui peuvent le réfuter, le contester. Finalement, les difficultés rencontrées échappent à la simple dimension/exécution des méthodes et renvoient alors aux premières limites abordées en début de ce travail (Cf. **Partie 1.1.1**).

Pour l'heure, en l'absence d'un réel cadre conceptuel et analytique de la vulnérabilité à la chaleur, il est seulement possible d'améliorer la précision et la qualité des évaluations en s'intéressant aux variables utilisées, outre les limites indexées par leur méthode. Dans la littérature scientifique, ces dernières ne sont que trop peu discutées alors qu'elles déterminent presque entièrement la teneur des indices de vulnérabilité annexes et finaux. Au regard des différents comportements statistiques constatés sur certaines variables du jeu de données de ce travail, des améliorations ou des « règles » peuvent être apportées pour les études qui pourront se saisir de ces conclusions.

(1) L'égalité en nombre entre les types de variables est nécessaire pour ne pas surreprésenter ou sous-représenter une catégorie plutôt qu'une autre. Les résultats finaux de ce travail valorisent plus la sensibilité à la vulnérabilité, et en particulier les conditions socio-économiques des populations. La vulnérabilité générale doit alors plus se baser sur l'étude de plusieurs petits ensembles équilibrés et (2) homogènes dans l'information qu'ils relatent. Auquel cas, si certains éléments venaient à être singulier par rapport à leur groupe, les traitements préalables des deux méthodes ne les supprimeraient pas en raison qu'elles tentent de déceler un excès de relation et non une insuffisance. Ceux-ci finiraient tout simplement par être rabaissés en termes de poids par l'ACP, ou par être seulement contre-intuitif à l'idée générale qui tente d'être exprimée (AHP). Ce constat peut être fait pour la variable *Topographie* rattachée à l'**Exposition**, finalement que trop peu corrélée aux autres variables du contexte climatique. Pour tout de même faire état de l'idée pour laquelle elle a été employée (le vent), il serait peut-être préférable de prendre directement des données modélisées de vent, ou alors un indice de rugosité urbaine. Pour finir, (3) les effets de densité de certaines variables produisent des biais significatifs sur les indices de vulnérabilité (tant dans les distributions que dans les valeurs). Ces effets peuvent être dus à la nature même des variables utilisées, à l'instar des variables caractérisant le nombre d'établissements vulnérables, climatisés et de soin. Ces dernières créent des ruptures importantes entre les IRIS dépourvus d'établissement, vis-à-vis de ceux dotés de plusieurs, sans pour autant que cet écart justifie d'un impact conséquent sur le ressenti de vulnérabilité. À ce titre, peut-être serait-il préférable de calculer à la place, la distance moyenne d'accès à ces établissements pour chaque IRIS.

Conclusions

Les principales conclusions de ce mémoire portent sur les tendances communes de distributions spatiales qui peuvent être dégagées sur les classes de valeurs basses et moyennes et renforcent la fiabilité des résultats sur la vulnérabilité modérée (et décomplexant par ailleurs le choix qui peut devenir draconien entre les méthodes qu'il faut utiliser selon les attentes, les avantages et défauts de chacune ; Cf. **Partie 5.3**). Une troisième méthode – *Cumulative*

Vulnerabilty Assessment (CVA) à la frontière entre l'approche inductive et additive (Lanier *et al.* 2019 ; Pornet *et al.* 2012) – en cours d'exécution dans le cadre d'un autre stage au LISST (Cf. **Présentation de la structure d'accueil et des missions**), complémentaire à celui-ci, permettra d'apporter de nouveaux éléments de comparaison et de venir affirmer ou infirmer les dites tendances portées jusqu'ici. Au même titre, le CIEU opèrera prochainement une technique de désagrégation spatiale de la donnée sociale de l'IRIS à une échelle de travail plus grande (géographiquement) : celle de l'Ilot Urbain. Cette opération permettra d'acquérir des informations plus précises et justes, et à terme, de conclure si les limites sur les résultats obtenus résultent intégralement de l'efficacité des méthodologies d'évaluation utilisées, ou également de la « qualité » des données requises dont les évaluations se saisissent.

Il ne faut pour autant pas écarter le bilan dressé en fin de **Partie 5.3**, sur la relative défaillance des méthodes à identifier les mêmes quartiers pour lesquels la vulnérabilité est forte, tout comme celle d'identifier les mêmes tendances d'intensités de vulnérabilité à des échelles de circonscriptions plus petites. Ces manques sont problématiques et interrogent sur le crédit à apporter aux valeurs extrêmes positives ; et derrière, au crédit à apporter aux IRIS jugés prioritaires par ces indices. Ces doutes ne pourront être répondus par le simple usage de la statistique et demandent alors aux études de prendre du recul, de se vouloir prudentes quant aux mesures effectuées. À ce titre, les résultats présentés dans ce mémoire peuvent être perçus comme une bonne introduction aux questions d'évaluation de vulnérabilité à la chaleur mais demandent d'assurer une continuité sur le travail engagé. Ainsi, les IRIS qui pourraient être quantitativement ciblés ont pour nécessité d'être plus spécifiquement étudiés avant d'envisager toutes solutions opérationnelles. L'aide des travaux des SHS, tels que des enquêtes, pourraient être à ce sujet, un intermédiaire pour approfondir les résultats abordés, en analysant avec des méthodologies tout autres que celles employées, ce que la statistique n'a pu/su démontrer.

Pour conclure, les limites sur le cadre conceptuel et analytique, initialement identifiées en début d'étude, prévalent également en fin. Bien que des conceptions/bases d'analyses aient pu se construire pour palier à cette absence, les résultats d'évaluation de la vulnérabilité ont une portée limitée à celle de leur méthodologie. Alors, ce n'est qu'en multipliant les travaux de ce type, en arrêtant de simplement évaluer la vulnérabilité sans apporter des pistes de réflexion à son sujet, et en autorisant et prônant les partages et collaborations pluridisciplinaires pour l'étudier, qu'un référentiel pourra être réellement construit. C'est avec lui que des résultats pourront à la fois spécifiquement représenter des territoires et se comparer avec d'autres. Ils permettront *in fine* aux organismes institutionnelles, publiques et territoriaux (à l'instar une nouvelle fois de Toulouse Métropole) d'opérationnaliser correctement, facilement et surtout – dans la mesure des dangers des vagues de chaleur – rapidement, des conclusions d'évaluation sur la vulnérabilité à la chaleur.

Bibliographie

La bibliographie suit la norme Geochronometria et a été générée par l'application Zotero.

Alonso L. and Renard F., 2020, *A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context*. International Journal of Environmental Research and Public Health. Multidisciplinary Digital Publishing Institute 17(3) : 1004, DOI : [10.3390/ijerph17031004](https://doi.org/10.3390/ijerph17031004).

Anaëlle H., 2019, *Droit des collectivités territoriales - EPCI (établissement public de coopération intercommunale), renforcement de la coopération intercommunale*. Publications Pimido.

Balica SF. Douben N. and Wright NG., 2009, *Flood vulnerability indices at varying spatial scales*. Water Science & Technology 60(10) : 2571.

Bao J. Li X. and Yu C., 2015, *The Construction and Validation of the Heat Vulnerability Index, a Review*. International Journal of Environmental Research and Public Health. Multidisciplinary Digital Publishing Institute 12(7) : 7220–7234, DOI : [10.3390/ijerph120707220](https://doi.org/10.3390/ijerph120707220).

Bat-ADAPT, 2020, *Adaptation des bâtiments au changement climatique*. Centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique.

Becerra S., 2012, *Vulnérabilité, risques et environnement : l'itinéraire chaotique d'un paradigme sociologique contemporain*. VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement. Les éditions en environnements VertigO (Volume 12 Numéro 1), DOI : [10.4000/vertigo.11988](https://doi.org/10.4000/vertigo.11988).

Beck HE. Zimmermann NE. McVicar TR. Vergopolan N. Berg A. and Wood EF., 2018, *Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution*. Scientific Data. Nature Publishing Group 5(1) : 180214, DOI : [10.1038/sdata.2018.214](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214).

Beck U., 1986, *La société du risque : sur la voie d'une autre modernité*. Flammarion : Paris.

Benmarhnia T. Kihal-Talantikite W. Ragetti M. and Deguen S., 2017, *Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris : A cluster analysis approach*. Science of the Total Environment 592 : 288, DOI : [10.1016/j.scitotenv.2017.03.102](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.102).

Blaikie P. Cannon T. Davis I. and Wisner B., 1994, *At risk : natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. Routledge : London.

Bro R. and Smilde A., 2014, *Principal component analysis*. Analytical Methods. Royal Society of Chemistry 6(9) : 2812–2831, DOI : [10.1039/C3AY41907J](https://doi.org/10.1039/C3AY41907J).

Caseau P., 2003, *À propos de la canicule... Aléa et vulnérabilité*. Cybergeog : European Journal of Geography. CNRS-UMR Géographie-cités 8504.

Conlon KC. Mallen E. Gronlund CJ. Berrocal VJ. Larsen L. and O'Neill Marie S., 2020, *Mapping Human Vulnerability to Extreme Heat : A Critical Assessment of Heat Vulnerability*

- Indices Created Using Principal Components Analysis*. Environmental Health Perspectives. Environmental Health Perspectives 128(9) : 14, DOI : [10.1289/EHP4030](https://doi.org/10.1289/EHP4030).
- Cronbach LJ., 1951, *Coefficient alpha and the internal structure of tests*. Psychometrika 16(3) : 297–334, DOI : [10.1007/BF02310555](https://doi.org/10.1007/BF02310555).
- Cutter S., 1996, *Societal Vulnerability to Environmental Hazards*. Progress in Human Geography - PROG HUM GEOGR 20 : 529–539, DOI : [10.1177/030913259602000407](https://doi.org/10.1177/030913259602000407).
- Cutter S. Barnes L. Berry M. Burton C. Evans E. Tate E. and Webb J., 2008, *A Place-Based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters*. Global Environmental Change 18 : 598–606, DOI : [10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013).
- Cutter S. Boruff BJ. and Shirley WL., 2003, *Social Vulnerability to Environmental Hazards*. Social Science Quarterly 84(2) : 242–261, DOI : [10.1111/1540-6237.8402002](https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002).
- D’Ercole R., 1998, *Approches de la vulnérabilité et perspectives pour une meilleure logique de réduction des risques*. Pangea infos 29/30 : 20.
- Dousset B. Gourmelon F. Giraudet E. Laaidi K. Zeghnoun A. Bretin P. and Vandentorren S., 2011, *Évolution climatique et canicule en milieu urbain : apport de la télédétection à l’anticipation et à la gestion de l’impact sanitaire*. UMR 6554 LETG CNRS, 77.
- Dubreuil V., 2022, *Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen*. La Météorologie. Météo et Climat (116) : 037, DOI : [10.37053/lameteorologie-2022-0012](https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2022-0012).
- Duby C. and Robin S., 2006, *Analyse en Composantes Principales*. Institut National Agronomique Paris - Grignon, 54.
- Ebi KL. Capon A. Berry P. Broderick C. Dear R. Havenith G. Honda Y. Kovats RS. Ma W. Malik A. Morris NB. Nybo L. Seneviratne SI. Vanos J. and Jay O., 2021a, *Hot weather and heat extremes : health risks*. The Lancet. Elsevier 398(10301) : 698–708, DOI : [10.1016/S0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01208-3).
- Ebi KL. Vanos J. Baldwin JW. Bell JE. Hondula DM. Errett NA. Hayes K. Reid CE. Saha S. Spector J. and Berry P., 2021b, *Extreme Weather and Climate Change : Population Health and Health System Implications*. Annual Review of Public Health 42(1) : 293–315, DOI : [10.1146/annurev-publhealth-012420-105026](https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-012420-105026).
- Eisenman D. Wilhalme H. Tseng CH. Chester M. English P. Pincetl S. Fraser A. Vangala S. and Dhaliwal S. 2016, *Heat Death Associations with the built environment, social vulnerability and their interactions with rising temperature*. Health & Place 41 : 89–99, DOI : [10.1016/j.healthplace.2016.08.007](https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2016.08.007).
- El-Zein A. and Tonmoy F., 2015, *Assessment of vulnerability to climate change using a multi-criteria outranking approach with application to heat stress in Sydney*. University of Sydney, 29. DOI : [10.1016/J.ECOLIND.2014.08.012](https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2014.08.012).
- Faye M. Dème A. Diongue AK. and Diouf I., 2021, *Impact of different heat wave definitions on daily mortality in Bandafassi, Senegal*. PLOS ONE. Public Library of Science 16(4) : e0249199, DOI : [10.1371/journal.pone.0249199](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249199).

Fillol C., 2004, *Apprentissage et systématique*. *Revue française de gestion* 149(2) : 33–49.

Foissard X., 2015, *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise*. Thèse de doctorat, Rennes 2.

Franceinfo, 2021, *INFOGRAPHIES. Canicule : comment l'îlot de chaleur urbain transforme nos métropoles en fournaies*. Franceinfo.

Hair JF. Black WC. Babin BJ. and Anderson RE., 2019, *Multivariate data analysis*. Cengage : Andover, Hampshire.

Hansen J. Sato M. and Ruedy R., 2012, *Perception of Climate Change*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 109 : E2415–23, DOI : 10.1073

Hayes K, Berry P and Ebi K, 2019, Factors Influencing the Mental Health Consequences of Climate Change in Canada. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 : 1583, DOI : [10.3390/ijerph16091583](https://doi.org/10.3390/ijerph16091583)./pnas.1205276109.

Hayes K. Berry P. and Ebi KL., 2019, *Factors Influencing the Mental Health Consequences of Climate Change in Canada*. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16 : 1583, DOI : [10.3390/ijerph16091583](https://doi.org/10.3390/ijerph16091583).

Hemon D. Jouglu E. Claver J. Laurent F. Bellec C. and Pavillon G., 2004, *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France*. Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), 76.

Inostroza L. Palme M. and Barrera F., 2016, *A Heat Vulnerability Index : Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile*. *PloS One* 11(9) : e0162464, DOI : [10.1371/journal.pone.0162464](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162464).

Institut de Veille Sanitaire, 2003, *Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France*, 120.

IPCC, 2022, *Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner HO. Roberts DC. Tignor M. Poloczanska ES. Mintenbeck K. Alegría A. Craig M. Langsdorf S. Lösschke S. Möller V. Okem A. Rama B.]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC, 2021, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V. Zhai P. Pirani A. Connors SL. Péan C. Berger S. Caud N. Chen Y. Goldfarb L. Gomis MI. Huang M. Leitzell K. Lonnoy E. Matthews JBR. Maycock TK. Waterfield T. Yelekçi O. Yu R. and Zhou B.]. Cambridge University Press. In Press.

IPCC and WMO, 1992, *Climate change: the 1990 and 1992 IPCC assessments, IPCC first assessment report overview and policymaker summaries and 1992 IPCC supplement*. IPCC : Geneve.

Intercommunalité | Insee, 2022. Institutionnel.

Kaiser HF., 1974, *An index of factorial simplicity*. *Psychometrika* 39(1) : 31–36, DOI : [10.1007/BF02291575](https://doi.org/10.1007/BF02291575).

- Karmaoui A. and Balica S., 2021, *A new flood vulnerability index adapted for the pre-Saharan region*. International Journal of River Basin Management. Taylor & Francis 19(1) : 93–107, DOI : [10.1080/15715124.2019.1583668](https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1583668).
- Lanier C. Deram A. Cuny MA. Cuny D. and Occelli F., 2019, *Spatial analysis of environmental inequalities caused by multiple air pollutants : A cumulative impact screening method, applied to the north of France*. Ecological Indicators 99 : 91–100, DOI : [10.1016/j.ecolind.2018.12.011](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.011).
- Lebart L. Piron M. and Morineau A., 2006, *Statistique exploratoire multidimensionnelle : Visualisation et inférences en fouille de données*. Dunod : Paris.
- Leconte F., 2014, *Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : cas de Nancy*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Lemonsu A. Viguié V. Daniel M. and Masson V., 2015, *Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France)*. Urban Climate. Elsevier 14 : 586–605, DOI : [10.1016/j.uclim.2015.10.007](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.007).
- Lobry JR., 2022, *Normalisation d'une variable quantitative : la transformation de Box et Cox*. Université Lyon 1, 36.
- Mallen E. Stone B. and Lanza K., 2019, *A methodological assessment of extreme heat mortality modeling and heat vulnerability mapping in Dallas, Texas*. Urban Climate 30 : 100528, DOI : [10.1016/j.uclim.2019.100528](https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100528).
- McGregor GR. Bessemoulin P. and WMO, 2015, *Heatwaves and health guidance on warning-system development*. World Meteorological Organization : Genf.
- Masson V. Lemonsu A. Hidalgo J. and Voogt J., 2020, *Urban Climates and Climate Change*. Annual Review of Environment and Resources 45(1) : 411–444, DOI : [10.1146/annurev-environ-012320-083623](https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623).
- Metzger P., 2017, *Connaissance et relations de pouvoir : les sciences sociales, les risques et l'environnement*. Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches. Université Grenoble Alpes.
- Metzger P. and D'Ercole R., 2011, *Les risques en milieu urbain : éléments de réflexion*. EchoGéo. Pôle de recherche pour l'organisation et la diffusion de l'information géographique (CNRS UMR 8586) (18), DOI : [10.4000/echogeo.12640](https://doi.org/10.4000/echogeo.12640).
- Mitchell BC. and Chakraborty J., 2018, *Exploring the relationship between residential segregation and thermal inequity in 20 U.S. cities*. Local Environment. Routledge 23(8) : 796–813, DOI : [10.1080/13549839.2018.1474861](https://doi.org/10.1080/13549839.2018.1474861).
- Nazarenko L. Schmidt GA. Miller RL. Tausnev N. Kelley M. Ruedy R. Russell GL. Aleinov I. Bauer M. Bauer S. Bleck R. Canuto V. Cheng Y. Clune TL. Del Genio AD. Faluvegi G. Hansen JE. Healy RJ. Kiang NY. Koch D. Lacis AA. LeGrande AN. Lerner J. Lo KK. Menon S. Oinas V. Perlwitz J. Puma MJ. Rind D. Romanou A. Sato M. Shindell DT. Sun S. Tsigaridis K. Unger N. Voulgarakis A. Yao MS. and Zhang J., 2015, *Future climate change under RCP emission scenarios with GISS ModelE2*. Journal of Advances in Modeling Earth Systems 7(1) : 244–267, DOI : [10.1002/2014MS000403](https://doi.org/10.1002/2014MS000403).
- Observatoire régional de santé d'Ile-de-France, 2003, *Conséquences sanitaires de la canicule d'août 2003 en Ile-de-France*. 8.

OECD, European Union, and Joint Research Centre - European Commission, 2008, *Handbook on Constructing Composite Indicators : Methodology and User Guide*. OECD, DOI : [10.1787/9789264043466-en](https://doi.org/10.1787/9789264043466-en).

Pearson K., 1895, *Note on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents*. Proceedings of the Royal Society of London Series I 58 : 240–242.

Pearson K., 1901, *On lines and planes of closest fit to systems of points in space*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Taylor & Francis 2(11) : 559–572, DOI : [10.1080/14786440109462720](https://doi.org/10.1080/14786440109462720).

Pigeon G., 2007, *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - Projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Pigeon P., 2012, *Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France)*. VertigO : la revue électronique en sciences de l'environnement. Université du Québec à Montréal 12(1).

Pornet C. Delpierre C. Dejardin O. Grosclaude P. Launay L. Guittet L. Lang T. and Launoy G., 2012, *Construction of an adaptable European transnational ecological deprivation index : the French version*. J Epidemiol Community Health. BMJ Publishing Group Ltd 66(11) : 982–989, DOI : [10.1136/jech-2011-200311](https://doi.org/10.1136/jech-2011-200311).

Rakotomalala R., 2012a, *Analyse de corrélation : Étude des dépendances - Variables quantitatives*. Université Lyon 2, 89.

Rakotomalala R., 2012b, *Détermination du nombre de composantes dans une Analyse en Composante Principale*. Université Lyon 2, 20.

Rakotomalala R., 2014, *ACP sous R - Indice KMO et test de Bartlett*. Université Lyon 2, 10.

Renard F. and Chapon PM., 2010, *Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise*. Espace Géographique. Éditions Belin 39(1) : 35–50, DOI : [10.3917/eg.391.0035](https://doi.org/10.3917/eg.391.0035).

République française - Vie publique, 2019, *L'intercommunalité, une constante des réformes territoriales*. Vie Publique. Institutionnel.

Rinner C. Patychuk D. Bassil K. Nasr S. Gower S. and Campbell M., 2010, *The Role of Maps in Neighborhood-level Heat Vulnerability Assessment for the City of Toronto*. Ryerson University, 16. DOI : [10.1559/152304010790588089](https://doi.org/10.1559/152304010790588089).

Rousseau D., 2006, *Surmortalité des étés caniculaires et surmortalité hivernale en France*. Climatologie. Association Internationale de Climatologie 3 : 43–54, DOI : [10.4267/climatologie.688](https://doi.org/10.4267/climatologie.688).

Saaty TL, 1988, *What is the Analytic Hierarchy Process ?* In : Mitra G. Greenberg HJ. Lootsma FA. Rijkaert MJ. and Zimmermann HJ. Mathematical Models for Decision Support. Springer : Berlin, Heidelberg, 109–121, DOI : [10.1007/978-3-642-83555-1_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-83555-1_5).

Sakia RM., 1992, *The Box-Cox Transformation Technique : A Review*. Journal of the Royal Statistical Society : Series D (The Statistician) 41(2) : 169–178, DOI : [10.2307/2348250](https://doi.org/10.2307/2348250).

Santé Publique France, 2021, *Bulletin de santé publique - Été 2021*. Santé Publique France, 9.

- Shapiro SS. and Wilk MB., 1965, *An analysis of variance test for normality*. *Biometrika* 52(3–4) : 591–611, DOI : [10.1093/biomet/52.3-4.591](https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591).
- Tabeaud M., 2012, *La climatologie générale*. Armand Colin : Paris, France.
- Theys J. and Fabiani JL., 1987, *La Société vulnérable : évaluer et maîtriser les risques*. Presses de l'École normale supérieure : Paris.
- Traore M., 2019, *Vulnérabilité : incursion d'un concept dans les études urbaines pour une géographie de gestion des crises*. *Journal des Sciences Sociales. Groupement Interdisciplinaire en Sciences Sociales* (20) : 135–145.
- Valleron AJ. and Boumendil A., 2004, *Épidémiologie et canicules : analyses de la vague de chaleur 2003 en France*. *Comptes Rendus Biologies* 327(12) : 1125–1141, DOI : [10.1016/j.crv.2004.09.009](https://doi.org/10.1016/j.crv.2004.09.009).
- Veltz I., 2014, *Les climats du globe*. Institut Français de l'Éducation.
- Viguié V. Lemonsu A. Hallegatte S. Beaulant AL. Marchadier C. Masson V. Pigeon G. and Salagnac JL., 2020, *Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris*. *Environmental Research Letters* 15, DOI : [10.1088/1748-9326/ab6a24](https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6a24).
- Wolf T. Chuang WC. and McGregor G., 2015, *On the Science-Policy Bridge : Do Spatial Heat Vulnerability Assessment Studies Influence Policy ?*. *International Journal of Environmental Research and Public Health. Multidisciplinary Digital Publishing Institute* 12(10) : 13321–13349, DOI : [10.3390/ijerph121013321](https://doi.org/10.3390/ijerph121013321).
- Wolf T. McGregor G. and Analitis A., 2013, *Performance Assessment of a Heat Wave Vulnerability Index for Greater London, United Kingdom*. *Weather, Climate, and Society. American Meteorological Society* 6(1) : 32–46, DOI : [10.1175/WCAS-D-13-00014.1](https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00014.1).
- Zanin C. and Lambert N., 2016, *Manuel de cartographie*. Armand Colin : Paris.

Table des Figures

Figure 1 : Exemple du réchauffement climatique attendu aux abords de la commune de Toulouse à l’Horizon 2100 pour 3 scénarios d’émission RCP 2.6, 4.5, et 8.5, projeté par le Modèle Régional Aladin (v6) du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). Les anomalies des températures moyennes ont été calculées en faisant la différence entre les moyennes des températures annuelles et la moyenne des températures sur la période du Passé Récent (30 ans). La carte en haut à gauche du graphique représente la localisation du point de modèle de la grille SAFRAN, sélectionné pour réaliser l’analyse. Le cercle grisé qui l’entoure correspond à la résolution de ses données : 8 kilomètres. Source de données : DRIAS (2021).	11
Figure 2 : Le système risque et son environnement naturel. Extrait de Pigeon (2002).	15
Figure 3 : Le système risque de la vulnérabilité à la chaleur.	16
Figure 4 : Les dimensions abordées par les études du corpus bibliographique.	18
Figure 5 : Réflexion autour de la vulnérabilité à la chaleur, ou comment méthodologiquement l’appréhender.	19
Figure 6 : Présentation des sites d’étude. Le détail de l’ensemble des communes est consultable en Partie Annexe 1. Sources des données : BD TOPO – IGN (2022), BD ALTI 25 mètres – IGN (2021), OSO – CESBIO (2021).	21
Figure 7 : Transects des intensités d’Ilot de Chaleur Urbain pour la Métropole de Lyon (a.), de Toulouse (b.), de Grenoble (c.) et de Paris (d.). La direction et la taille des transects sont représentées en haut de chaque graphique, à l’aide de la carte de leur découpage communal respectif. Source des données : MApUCE – CNRM and LISST (2019). Crédit des photographies : Thomas LAGELOUZE (2021 & 2022). La photographie de a. représente la Rue Mercière, b. la Rue des Marchands, c. le Boulevard Edouard Rey, d. propose une vue lointaine du 2 ^{ème} arrondissement depuis les Champs Elysées..	21
Figure 8 : Schémas méthodologiques d’explication des pré-traitements d’agrégation de variables à l’échelle de référence des IRIS. a. explique comment sont comptés les nombres et les surfaces sur l’IRIS. L’exemple choisi pour illustrer ce traitement est la <i>Végétation Haute</i> . b. résume le processus de statistiques zonales pour attribuer une valeur d’UHI ou d’altitude, qui correspond à la majorité des valeurs trouvées sur l’IRIS en question. L’exemple illustratif choisi est celui de l’ <i>UHI</i>	24

Figure 9 : Résultats de la transformation Box et Cox pour le jeu de données de Toulouse Métropole. **a.** et **b.** représentent les distributions statistiques sous forme de Boxplots. **a.** est le résultat avant transformation ; **b.** après transformation. **c.** et **d.** sont des graphiques qui permettent d’appréhender les résultats de manière spécifique ; ils représentent la distribution statistique de la variable « *Nombre de personnes âgées de 5 ans ou moins* ». Ces derniers illustrent de gauche à droite un histogramme de densité, une courbe de coordonnées logarithmiques et une droite de Henry. Plus la courbe logarithmique à une forme de parabole et plus la distribution tend vers une symétrie. Plus le nuage de points s’axe sur la droite de Henry, plus la distribution tend vers la normalité. Pour faciliter les comparaisons entre les variables, ces dernières ont été standardisées sur 1 ([Équation 5]). 29

Figure 10 : Matrices de corrélations de Pearson pour les variables des Quatre Métropoles et de Toulouse Métropole. **a.** représente la matrice du jeu de données des Quatre Métropoles ; **b.** représente la matrice du jeu de données de Toulouse Métropole.. 30

Figure 11 : Poids factoriels des variables sur chaque dimension de l’Analyse en Composantes Principales. Les poids factoriels maximums par variables ont été indiqués en rouge. **a.** correspond à Toulouse Métropole et **b.** aux Quatre Métropoles..... 32

Figure 12 : Méthodologie d’application des degrés de l’Analyse Hiérarchique des Procédés et d’obtention des poids de remplacement. Les étapes de calcul et le sens de lecture de la figure suivent les chiffres allant de **1** à **6**. Pour faciliter la compréhension, les calculs utilisent des symboles propres au logiciel Excel (\$). **a.** représente la façon dont ont été discrétisées les distributions standardisées des variables ; elle présente également les degrés choisis pour proportionnellement les comparer. **b.** représente la matrice de comparaison, **c.** la matrice de pondération, **d.** la matrice de cohérence des pondérations, **e.** les résultats de cohérence. **f.** permet de visualiser par quelle pondération ont été remplacées les valeurs de chaque classe. L’exemple pris pour le graphique est la variable de densité de population sur Toulouse Métropole..... 34

Figure 13 : Méthodologie générale de l’étude. 35

Figure 14 : Présentation des facteurs de vulnérabilité, constitués par l’Analyse en Composantes Principales pour le jeu de données des Quatre Métropoles. Horizontalement, **a.** représente le territoire de Grenoble Métropole, **b.** Grand Lyon, **c.** Grand Paris et **d.** Toulouse Métropole. **e.** permet quant à lui de rappeler par un code de couleur commun avec la légende « sens de lecture de la figure », quelles variables composent chaque facteur et quel poids ces dernières ont eu dans l’agrégation..... 37

Figure 15 : Vulnérabilité générale évaluée par l'Analyse en Composantes Principales pour les Quatre Métropoles. **a.** correspond au territoire de Grenoble Métropole, **b.** Grand Lyon, **c.** Grand Paris et **d.** Toulouse Métropole. **e.** représente la légende des indices de vulnérabilité de ces quatre territoires. La discrétisation par la méthode des seuils naturels de Jenks permet de visualiser les différents seuils de rupture au sein de la distribution de leurs indices de vulnérabilité. Pour finir, **f.** appréhende la distribution des valeurs des IRIS à l'échelle de leur métropole respective. Ces résultats généraux ont été générés par l'addition des facteurs présentés en Figure 13. 38

Figure 16 : Vulnérabilité générale évaluée par l'Analyse en Composantes Principales pour Toulouse Métropole. **a.** représente la distribution spatiale des indices de vulnérabilité ; **b.** représente la discrétisation géographique (la légende) de cette distribution par les seuils naturels de Jenks. **c.** témoigne à son tour de la distribution spatiale des facteurs additionnés pour générer **a.** **d.** permet quant à lui de rappeler par un code de couleur commun avec **c.**, quelles variables composent chaque facteur et quel poids ces dernières ont eu dans l'agrégation..... 39

Figure 17 : Vulnérabilité générale évaluée par l'Analyse Hiérarchique des Procédés pour Toulouse Métropole. **a.** représente la distribution spatiale des indices de vulnérabilité ; **b.** représente la discrétisation géographique (la légende) de cette distribution par les seuils naturels de Jenks. **c.** témoigne à son tour de la distribution spatiale des facteurs additionnés pour générer **a.** **d.** permet quant à lui de rappeler par un code de couleur commun avec **c.**, quelles variables composent chaque facteur 42

Figure 18 : Comparaison des tendances par classe de valeurs des trois résultats d'indices de vulnérabilité obtenus sur le territoire de la Métropole de Toulouse pour la méthode de l'Analyse en Composantes Principales et de l'Analyse Hiérarchique des Procédés. **a.** représente la comparaison pour la classe de valeurs]0 ; 0,2] ; **b.** la classe de valeurs]0,6 ; 0,8] ; et **c.** la classe de valeurs]0,8 ; 1]. Sur ces cartes, la couleur blanche signifie que les IRIS en question n'appartiennent tout simplement pas à la classe de valeur comparée. Une couleur bleu ciel signifie qu'un seul indice de vulnérabilité général de **d.** a identifié l'IRIS dans la classe de valeur en question. La couleur bleu foncé signifie que tous les résultats de **d.** ont identifié l'IRIS dans la classe de valeur concernée. Quant à lui, **d.** illustre certaines classes de valeurs qui sont comparées. La même discrétisation a été appliquée aux trois résultats sur Toulouse Métropole pour permettre d'appréhender visuellement les comparaisons faites sur **a.**, **b.** et **c.** Pour finir, **e.** propose un radar de distribution des scores médians des IRIS par commune. Pour faciliter la lecture, les communes ont été rangés géographiquement. Toulouse représente alors le point le plus au Sud de la Métropole, Saint-Jory le point Nord, Beaupuy le point Est et Pibrac, le point Ouest.. 45

Table des Tableaux

Tableau 1 : Références du corpus bibliographique de la vulnérabilité à la chaleur en France..17

Tableau 2 : Présentation des variables utilisées pour représenter les paramètres de la vulnérabilité dans le cadre de l'évaluation. 22

Table des Annexes

Annexe 1 : Présentation des communes de Grenoble Métropole. **a.** les situe spatialement au sein de la Métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).. 62

Annexe 2 : Présentation des communes du Grand Lyon. **a.** les situe spatialement au sein de la Métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).. 63

Annexe 3 : Présentation des communes du Grand Paris. **a.** les situe spatialement au sein de la Métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).. 63

Annexe 4 : Présentation des communes du Grand Paris. **a.** les situe spatialement au sein de la Métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).. 64

Annexe 5 : Présentation des fonctions des bâtiments qui composent la variable d'établissement vulnérable. Auteur de l'annexe : Lagelouze (2022). 64

Annexe 6 : Présentation des fonctions des bâtiments qui composent la variable d'établissement de soin.. 65

Annexe 7 : Présentation des fonctions des bâtiments qui composent la variable d'établissement/lieu climatisé ou au potentiel rafraîchissant. 66

Annexe 8 : Présentation des catégories d’occupation du sol qui composent la variable de densité de végétation haute.....	66
Annexe 9 : Présentation des catégories d’occupation du sol qui composent la variable de densité urbaine.....	66
Annexe 10 : Conséquences des extrêmes de chaleur sur la santé humaine. Extrait de Ebi <i>et al.</i> (2021a).....	67
Annexe 11 : Échelle de degrés proposée par l’Analyse Hiérarchique des Procédés. Extrait de Science Eaux & Territoires (http://www.set-revue.fr/).	68

Table des matières

Remerciements.....	5
Présentation de la structure d’accueil et des missions.....	7
Glossaire	8
Nomenclature.....	9
Introduction.....	10
1. Etat de l’art sur la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain.....	13
1.1. Le cadre théorique de la vulnérabilité	13
1.1.1. La multiplicité des définitions de la vulnérabilité	13
1.1.2. Choix d’une définition de la vulnérabilité	13
1.1.2.1. Le système risque de la vulnérabilité	14
1.1.2.1.1. Choix d’une conception du système risque	14
1.1.2.1.2. Actualisation et enchérissement de la conception du système risque	15
1.1.2.2. La définition de la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain.....	16
1.2. Corpus bibliographique.....	17
1.3. Les méthodes statistiques d’évaluation de la vulnérabilité à la chaleur	19
1.4. Conclusion de partie	19
2. Présentation des sites d’étude	20
3. Données utilisées	22

3.1.	Sélection et provenances des variables	22
3.2.	Post-traitements des variables	23
3.3.	Impact des variables sur la vulnérabilité	24
3.3.1.	Impact des variables du facteur sensibilité sur la vulnérabilité	24
3.3.2.	Impact des variables du facteur adaptation sur la vulnérabilité.....	25
4.	Méthodologie des évaluations de vulnérabilité à la chaleur	26
4.1.	Méthodologie de l'Analyse en Composantes Principales	27
4.1.1.	Définition de l'Analyse en Composantes Principales	27
4.1.2.	Conditions préalables des variables.....	27
4.1.2.1.	Conformité des structures internes statistiques des variables	27
4.1.2.1.1.	Gestion des données manquantes	27
4.1.2.1.2.	Distribution normale des données.....	28
4.1.2.2.	Cohérence collective des variables	29
4.1.2.2.1.	La non-colinéarité	29
4.1.2.2.2.	Redondance des données	31
4.1.3.	Exécution de l'Analyse en Composantes Principales	31
4.1.3.1.	Choix du nombre de facteurs	32
4.1.3.2.	Constitution des facteurs	32
4.2.	Méthodologie de l'Analyse Hiérarchique des Procédés.....	33
4.2.1.	Définition de l'Analyse Hiérarchique des Procédés	33
4.2.2.	Différences fondamentales entre l'ACP et l'AHP	33
4.2.3.	Principes de gestion des données	33
4.2.4.	Simplification des distributions des variables par pondération	34
4.3.	Synthèse de la méthodologie générale.....	35
5.	Résultats.....	36
5.1.	Résultats de l'Analyse en Composantes Principales	36
5.2.	Résultats de l'Analyse Hiérarchique des Procédés.....	40
5.3.	Comparaisons des résultats de l'Analyse en Composantes Principales et de l'Analyse Hiérarchique des Procédés	43
	Discussions et Conclusions	46
	Rappel du domaine de l'étude et des missions.....	46
	Discussions autour des résultats intermédiaires et principaux.....	46
	Conclusions	47
	Bibliographie.....	49

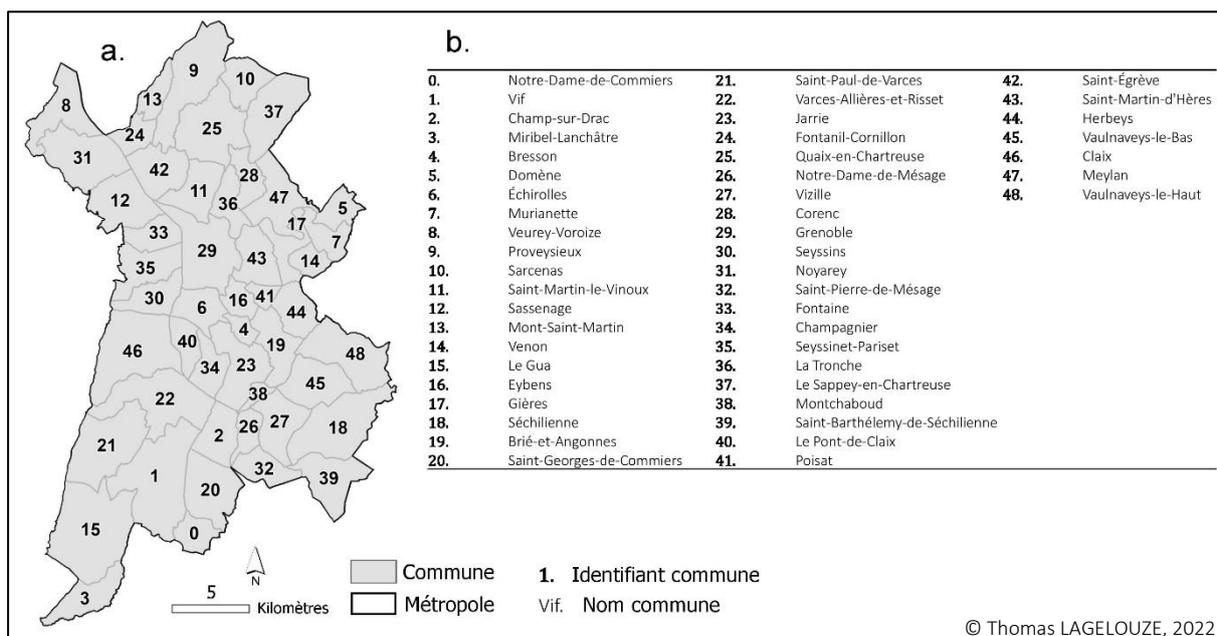
Annexes	62
Partie Annexes 1	62
1. Grenoble Métropole	62
2. Grand Lyon.....	62
3. Grand Paris.....	63
4. Toulouse Métropole	64
Partie Annexe 2.....	64
1. Établissement vulnérable [17]	64
2. Établissement de soin [20].....	65
3. Établissement/lieu climatisé ou au potentiel rafraîchissant [21].....	65
4. Variable végétation haute [23]	66
5. Variable densité urbaine [25].....	66
Partie Annexe 3.....	67
Partie Annexe 4.....	67
Partie Annexe 5.....	68

Annexes

Partie Annexes 1

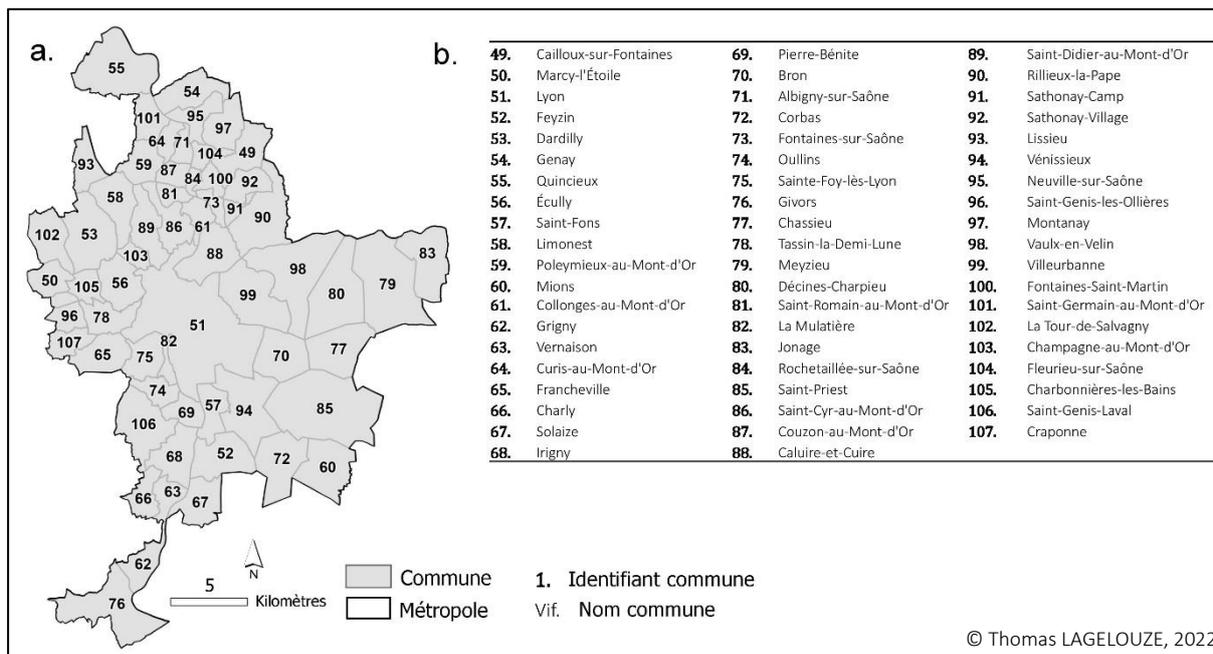
Présentation des communes des sites d'étude

1. Grenoble Métropole



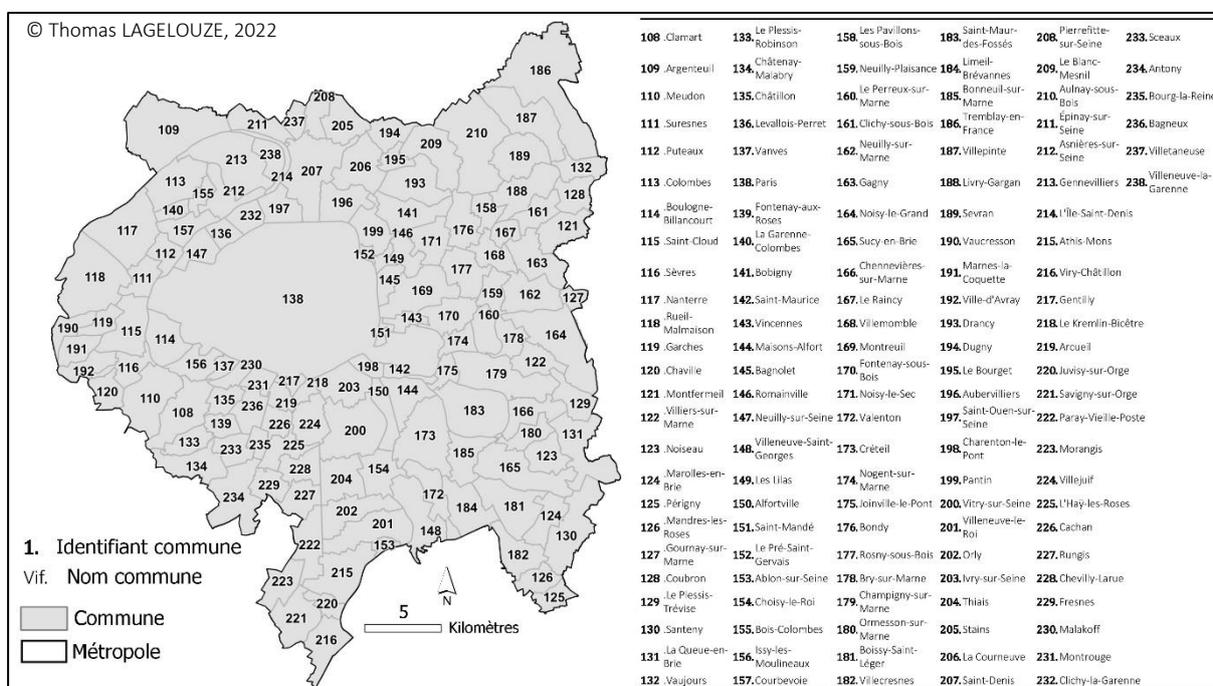
Annexe 1 : Présentation des communes de Grenoble Métropole. **a.** les situe spatialement au sein de la Métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).

2. Grand Lyon



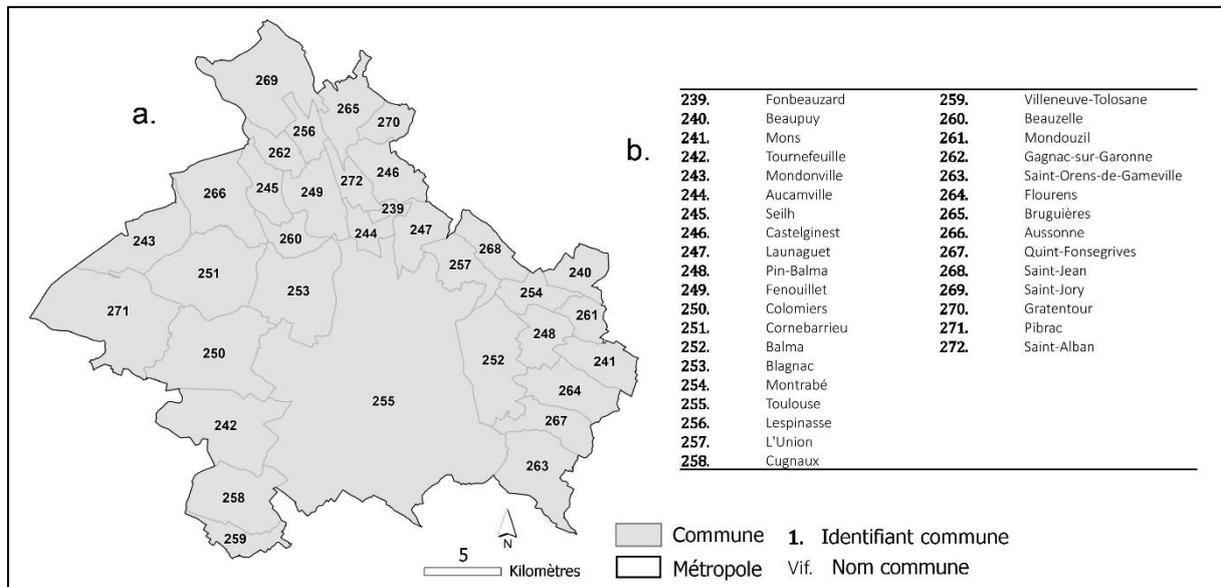
Annexe 2 : Présentation des communes du Grand Lyon. **a.** les situe spatialement au sein de la métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).

3. Grand Paris



Annexe 3 : Présentation des communes du Grand Paris. **a.** les situe spatialement au sein de la Métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).

4. Toulouse Métropole



Annexe 4 : Présentation des communes du Grand Paris. **a.** les situe spatialement au sein de la Métropole ; **b.** les identifie et les dénomme à l'aide de leur numéro d'identification. Source des données : BD TOPO – IGN (2021).

Partie Annexe 2

Détails des catégories d'établissement et d'occupation du sol sélectionnées

1. Établissement vulnérable [17]

Identifiant INSEE	Fonction de l'établissement
D102	Établissement santé moyen séjour
D103	Établissement santé long séjour
D104	Établissement psychiatrique
D401	Personnes âgées : hébergement
D603	Adultes handicapés : accueil/hébergement
D112	Hospitalisation à domicile
D402	Personnes âgées : soins à domicile
D601	Enfants handicapés : hébergement
D606	Adultes handicapés : services de soins à domicile

Annexe 5 : Présentation des fonctions des bâtiments qui composent la variable d'établissement vulnérable.

2. Établissement de soin [20]

Identifiant INSEE	Fonction de l'établissement
D108	Centre de santé
D106	Urgence
D113	Maison de santé pluridisciplinaire
D201	Médecin généraliste
D232	Infirmier
D303	Ambulance
D307	Pharmacie

Annexe 6 : Présentation des fonctions des bâtiments qui composent la variable d'établissement de soin.

3. Établissement/lieu climatisé ou au potentiel rafraîchissant [21]

Identifiant INSEE	Fonction de l'établissement
A504	Restaurant- Restauration rapide
B101	Hypermarché
B102	Supermarché
B103	Grande surface de bricolage
B201	Supérette
B202	Épicerie
B301	Librairie, papeterie, journaux
B302	Magasin de vêtements
B303	Magasin d'équipements du foyer
B304	Magasin de chaussures
B305	Magasin d'électroménager et de mat. Audio-vidéo
B306	Magasin de meubles
B307	Magasin d'articles de sports et de loisirs
B308	Magasin de revêtements murs et sols
B309	Droguerie quincaillerie bricolage
B310	Parfumerie-Cosmétique
B311	Horlogerie-Bijouterie
B312	Fleuriste-Jardinerie-Animalerie
B313	Magasin d'optique
E102	Aéroport
E107	Gare de voyageurs d'intérêt national

E108	Gare de voyageurs d'intérêt régional
E109	Gare de voyageurs d'intérêt local
F101	Bassin de natation
F119	Bowling
F303	Cinéma
F306	Théâtre–Arts de rue–Pôle cirque
F307	Bibliothèque
F309	Lieux d'exposition et patrimoine
F310	Jardins remarquables

Annexe 7 : Présentation des fonctions des bâtiments qui composent la variable d'établissement/lieu climatisé ou au potentiel rafraîchissant.

4. Variable végétation haute [23]

Identifiant CES OSO	Catégorie d'occupation du sol
14	Verger
16	Forêt de conifères
17	Forêt de feuillus

Annexe 8 : Présentation des catégories d'occupation du sol qui composent la variable de densité de végétation haute.

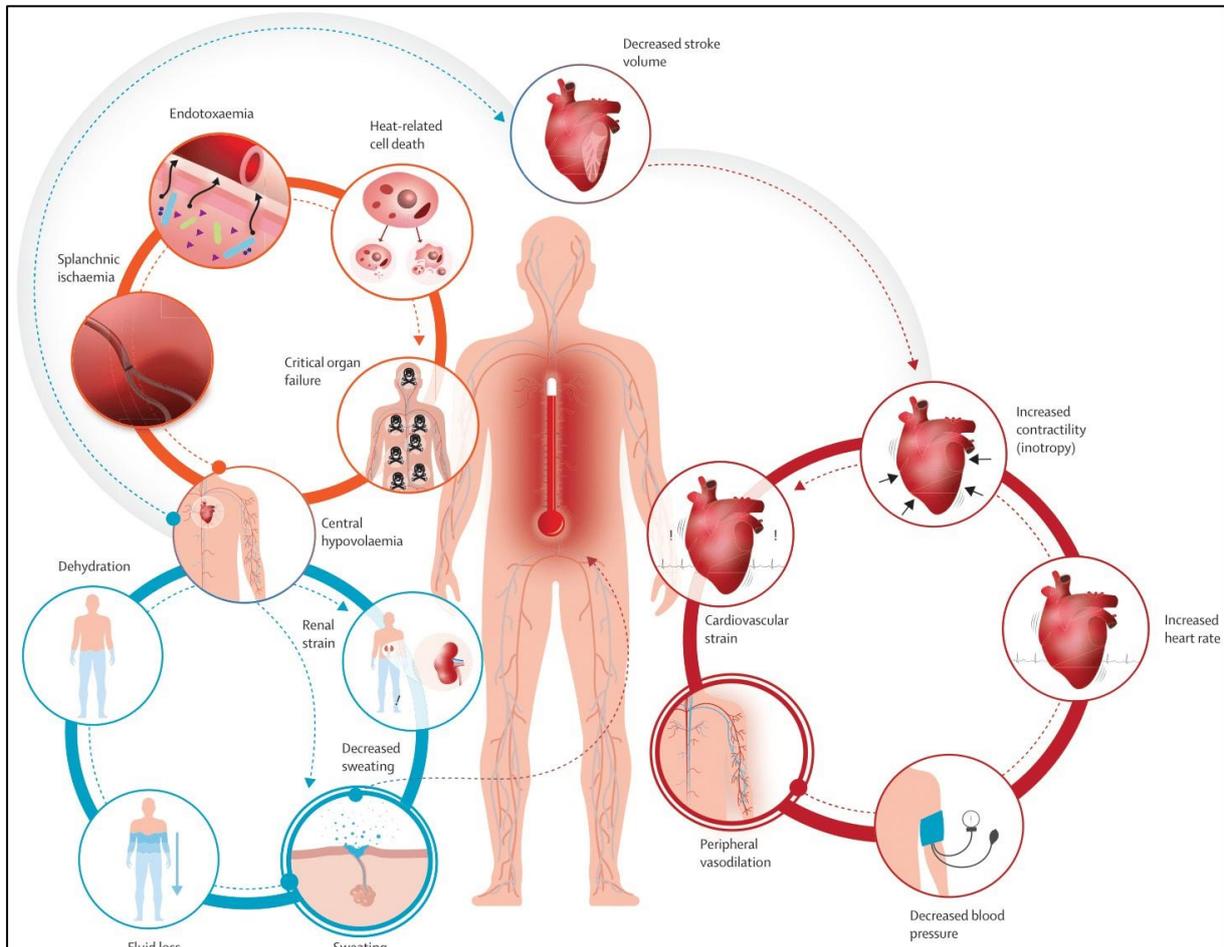
5. Variable densité urbaine [25]

Identifiant CES OSO	Catégorie d'occupation du sol
1	Urbain dense
2	Urbain diffus
3	Zone commerciale et industrielle
4	Route

Annexe 9 : Présentation des catégories d'occupation du sol qui composent la variable de densité urbaine.

Partie Annexe 3

Conséquences des extrêmes de chaleur sur la santé humaine



Annexe 10 : Conséquences des extrêmes de chaleur sur la santé humaine. Extrait de Ebi *et al.* (2021a).

Partie Annexe 4

Obtention méthodologique des données MApUCE

Le projet MApUCE eut pour principal résultat la production de données d'intensité d'îlot de Chaleur), calculées par le modèle méso échelle atmosphérique non-hydrostatique *MésoNH-SURFEX* pour 47 milieux urbains de France métropolitaine. Pour chaque aire urbaine, les intensités ont été simulées selon les valeurs de six jours estivaux répartis entre 2000 et 2009 pour deux situations météorologiques pour lesquelles les conditions étaient les plus favorables au développement d'un IUC maximal (Suher-Carthy, 2021).

Partie Annexe 5

Échelle de degrés de l'Analyse Hiérarchique des Procédés

Critère A		Critère B		Valeurs de compromis
(critère A) aussi important que (critère B)	1,000		2,000	
un peu plus important que	3,000		4,000	
plus important que	5,000		6,000	
beaucoup plus important que	7,000		8,000	
absolument plus important que	9,000			
Critère B		Critère A		Valeurs de compromis
aussi important que	1,000		0,500	
un peu moins important que	0,333		0,250	
moins important que	0,200		0,167	
beaucoup moins important que	0,143		0,125	
absolument moins important que	0,111			

Annexe 11 : Échelle de degrés proposée par l'Analyse Hiérarchique des Procédés. Extrait de Science Eaux & Territoires (<http://www.set-revue.fr/>).

Résumé :

Au regard de l'urgence climatique actuelle qui expose la population mondiale à des épisodes d'extrêmes thermiques progressivement intenses et fréquents – *a fortiori* en ville – ce mémoire se propose de faire l'étude de la vulnérabilité à la chaleur en milieu urbain. En l'absence de cadres conceptuels et analytiques généraux sur la vulnérabilité (à la chaleur), sa problématique principale est de réfléchir sur comment méthodologiquement la caractériser, la mesurer, l'analyser et la représenter. Pour ce faire, deux méthodes statistiques d'évaluation, fréquemment utilisées à ce sujet dans la littérature scientifique, sont comparées. Elles concluent de l'impossibilité actuelle de pouvoir aboutir à des résultats sur la mesure de la vulnérabilité, qui puissent être à la fois spécifiquement évalués et généralement comparés, sans que ce procédé ne soulève des contradictions d'ordre conceptuel ou statistique. Ces dernières permettent de nourrir une réflexion sur l'état des connaissances autour de la chaleur et mettent en perspectives les limites/les verrous scientifiques qui restent encore à franchir.

Mots-clés :

Vulnérabilité, Chaleur, Milieu Urbain, Statistiques, Comparaison.

Abstract :

In light of the current climate emergency that exposes the world's population to episodes of progressively intense and frequent thermal extremes – in particular in cities - this dissertation proposes to study vulnerability to heat in the urban environment. In the absence of general conceptual and analytical frameworks on (heat) vulnerability, its focus is to reflect on how to methodologically characterize, measure, analyze and represent it. To do this, two statistical methods of evaluation, frequently used in the scientific literature, are compared. The methodologies applied suggest that it is impossible to obtain results on the measurement of vulnerability that can be both specifically evaluated and generally compared without encountering conceptual or statistical contradictions. This allow us to reflect on the state of knowledge about heat and to put into perspective the scientific limits/barriers that have yet to be overcome.

Keywords :

Vulnerability, Heat, Urban environment, Statistics, Comparison.