

Représenter les données climatiques urbaines : sémiologie et géovisualisation

How to represent urban climate data: graphic semiology and geovisualization

Najla Touati¹, Jacques Gautier², Sidonie Christophe², Jean-François Girres³, Laurent Jegou¹

¹ UMR LISST, Université de Toulouse II, France, najla.touati@univ-tlse2.fr

² LASTIG, Univ Gustave Eiffel, ENSG, IGN, F-94160 Saint-Mande, France, prenom.nom@ign.fr

³ UPVM, Université Paul-Valéry Montpellier 3, France, jean-francois.girres@univ-montp3.fr

ABSTRACT. Cartographic representation approaches and standards of usual GIS tools may be very different from the tools used by different types of users studying or having to take into account urban climate phenomena (urban planners, meteorologists, climatologists, etc.). They may be insufficient to represent the complexity of the phenomena, characterized by three-dimensional spatial and temporal variability. Through the results of different research projects, this chapter focuses on new approaches to represent and explore climate data at the urban scale. The first part addresses the question of the uses and standards for representing climate and meteorological data in densely populated urban and intra-urban areas, addressing both operational needs and public communication. The second part focuses on visualization approaches for the analysis of simulated data in a scientific context, and addresses approaches to represent the different components of this complex data, notably through 3D environments. Finally, the chapter discusses the value of including users in the design of graphical representations of climate and meteorological data.

RÉSUMÉ. Les approches et normes de représentation cartographique des outils SIG standards peuvent être éloignées des usages des différents types d'utilisateurs étudiant ou devant prendre en compte les phénomènes climatiques urbains (urbanistes, météorologues, climatologues, etc.). Elles peuvent s'avérer insuffisantes pour représenter la complexité des phénomènes, caractérisés par une variabilité spatiale tridimensionnelle et temporelle. A travers les résultats de différents projets de recherche, ce chapitre s'intéresse aux nouvelles approches pour représenter et explorer les données climatiques à l'échelle urbaine. La première partie aborde la question des utilisations et des normes de représentation des données climatiques et météorologiques dans les zones urbaines et intra-urbaines densément peuplées, en tenant compte à la fois des besoins opérationnels et de la communication avec le public. Une seconde partie porte sur les approches de visualisation pour l'analyse de données simulées dans un contexte scientifique, et aborde les approches pour représenter ces données dans leur complexité, par l'usage d'outils 3D. Enfin, le chapitre aborde l'intérêt d'associer les utilisateurs à la conception des représentations graphiques des données climatiques.

MOTS-CLÉS. Cartographie, planification urbaine, carte climatique urbaine, géovisualisation, environnement 3D, visualisation exploratoire, visualisation spatio-temporel, chorématique, modélisation graphique, sémiologie graphique.

KEYWORDS. Cartography, territorial planning, urban climatic map, geovisualisation, 3D environment, exploratory visualisation, spatio-temporal visualisation, chorematic method, graphical modeling, graphic semiology.

1. Introduction

Plusieurs modèles sont aujourd'hui utilisés pour simuler différentes composantes du climat urbain telles que la température de l'air, la direction et l'intensité du vent ou l'humidité au sein des villes, à partir d'indicateurs sur la morphologie urbaine (taux de végétation, albédo de la surface des bâtiments, ...) [STE 09, STE 12, PLU 15, ROD 19, BOC 18, BER 25]. Certains de ces modèles ont notamment été présentés dans les chapitres 1 [RUA 25] et 6 [BER 25]. Les données simulées à partir de ces modèles ont plusieurs applications, dans des contextes de recherche ou opérationnels. Analyser les sorties de ces modèles dans leur contexte spatial permet aux experts (météorologues, climatologues, urbanistes...) de mieux comprendre les relations entre formes urbaines et phénomènes climatiques, d'explorer les conséquences de différents scénarios d'aménagement sur le climat urbain, ou encore

d'identifier d'éventuelles incohérences dans les modèles de simulation [PIN 16]. En urbanisme opérationnel, les acteurs du territoire (collectivités territoriales, agences d'urbanisme) mobilisent ces données dans une logique d'action concrète, et dans les cas exposés, pour adapter les villes aux températures extrêmes en milieu urbain [HID 23]. Ces données servent d'outil de diagnostic du climat urbain, leur permettant d'analyser l'organisation spatiale du territoire et d'orienter les décisions en matière d'aménagement et de planification urbaine. Les modèles de prévisions de conditions météorologiques urbaines pouvant devenir plus précis et descendre à l'échelle du bloc urbain dans les prochaines années, le développement de méthodes et outils permettant d'analyser les données climatiques et météorologiques à de multiples échelles, jusqu'à de très grandes échelles intra-urbaines, devient un besoin majeur.

L'élaboration de méthodes d'analyse visuelle de telles données, tant pour les chercheurs que les acteurs du territoire, soulève de nombreuses questions : quelles sont les approches de visualisation et les styles à utiliser, quels sont les niveaux de généralisation à utiliser selon l'échelle de représentation, comment représenter la dimension temporelle, comment interagir avec les données, comment prendre en compte la notion d'incertitude autour des données, comment intégrer des données hétérogènes dans un même environnement d'analyse, en considérant la tridimensionnalité de l'espace urbain, de l'échelle de la ville jusqu'à l'échelle du bloc urbain ? Les visualisations existantes de données climatiques regroupent des représentations très diverses dans leur format et leur objectif : diagrammes temporels en spirales [HAW 18] ou diagrammes warming stripes [HAW 21] représentant l'évolution globale du climat sur une large période temporelle, cartes animées représentant l'évolution de la distribution de données météorologiques au cours du temps [MER 16], représentations cartographiques utilisant des approches de sémiologie dynamique pour la représentation de l'intensité et de direction du vent [WIN 14], environnements interactifs permettant d'explorer des données météorologiques spatio-temporelles [NOA 18, WIN 14], utilisation de différentes approches pour représenter l'évolution des données météorologiques dans le temps (animation [MER 16, WIN 14], juxtaposition de cartes "small multiples" représentant différents "snapshots" temporels [HAW 23]). Les progrès effectués dans la simulation des phénomènes climatiques [PER 20] rendent ces visualisations toujours plus importantes pour l'analyse des phénomènes représentés à une échelle globale. À une échelle plus locale, les cartes climatiques développées par des équipes de chercheurs asiatiques ou européens [NG 15, TAN 09, HID 23] ont largement contribué à l'internationalisation de ces représentations. Pourtant, malgré la richesse des travaux académiques existants, leur traduction en outils opérationnels pour les acteurs de la planification urbaine reste un champ de recherche encore peu exploré [HID 22]. En posant les fondements scientifiques et techniques de leur élaboration, ces travaux ont permis de démontrer que des visualisations climatiques locales peuvent être aussi robustes et utiles qu'à l'échelle globale, en articulant données météorologiques, planification urbaine et caractéristiques du sol à travers un langage cartographique adapté [HID 23].

La représentation (carto)graphique joue donc un rôle essentiel dans l'analyse et la communication de l'information spatiale et temporelle [TVE 05, PAD 18, LOB 19, MER 22]. Elle évolue sans cesse pour transmettre l'information de manière fidèle et efficace. Elle repose ainsi sur les résultats de travaux de recherches successifs sur la sémiologie graphique, et la représentation graphique de l'information en général [BER 67, TUF 83, MAC 04, MUN 14, GRA 22]. Depuis plusieurs décennies, elle s'appuie également sur des technologies et des usages émergents, comme le rendu 3D, l'animation, l'interaction ou la sémiologie dynamique. Ces cartographies 2D et 3D permettent de produire des visualisations plus efficaces, impactantes, capables de susciter l'intérêt et l'adhésion des utilisateurs. Mais, au-delà de leur esthétique ou de leur caractère innovant, ces représentations doivent surtout rester compréhensibles et adaptées aux pratiques des utilisateurs [MAC 94, GRI 12, ROT 12].

Dans ce contexte, deux champs de recherche se développent. Le premier concerne la visualisation orientée vers l'analyse exploratoire de données par les climatologues et météorologues. Celle-ci permet une meilleure compréhension des interactions entre climat et morphologie urbaine dans un contexte de recherche, au moyen d'environnements interactifs, pouvant notamment intégrer les possibilités de la

visualisation 3D. Le second s'intéresse à la représentation des données dans des contextes plus opérationnels, à l'échelle urbaine et infra-urbaine, notamment au moyen de cartographies 2D. Ces approches répondent à des objectifs distincts mais complémentaires, et soulèvent une question centrale sur l'apport des méthodes de visualisation. Comment concevoir de nouvelles approches de visualisation des données climatiques, capable à la fois d'améliorer la lecture de ces phénomènes complexes et de faciliter leur utilisation dans la planification urbaine et la prise de décision collective, via des utilisateurs experts ou des collaborations interdisciplinaires ? Ce chapitre présente de nouvelles représentations des données climatiques en milieu urbain, à partir des apports récents des travaux de recherche en sémiologie graphique et en géovisualisation. Il s'appuie sur plusieurs projets mobilisant des visualisations 2D et 3D (cartes climatiques, chorotypes, scènes immersives), pour interroger le rôle de ces outils dans les dynamiques d'adaptation urbaine au changement climatique. Une première partie s'attachera à analyser les usages, les normes et les innovations liés à la représentation cartographique du climat urbain, en s'intéressant aux pratiques actuelles de l'urbanisme opérationnel ainsi qu'aux tentatives émergentes de cartographie climatique (carte d'analyse, carte à enjeux). Nous verrons également comment la construction graphique des cartes climatiques via une approche pluridisciplinaire et par des modèles utilisant l'approche chorématique, peut favoriser le transfert de connaissance vers un public de non-spécialistes en climatologie urbaine. Puis, dans une seconde partie, nous aborderons l'utilisation de la visualisation pour l'analyse de données climatiques et météorologiques simulées dans un contexte scientifique. Nous nous intéresserons d'abord aux différentes approches développées pour explorer différentes composantes de données climatiques et météorologiques complexes, avant de se pencher plus attentivement sur différentes approches d'exploration visuelle de telles données à l'échelle de la ville ou du quartier, faisant appel à des environnements de visualisation interactifs 3D dont la conception fait intervenir les utilisateurs scientifiques visés.

2. Usages, normes et innovations dans la représentation cartographique du climat urbain pour la planification urbaine et la communication

2.1. Explorer et représenter les phénomènes climatiques urbains : vers de nouveaux usages cartographiques

L'efficacité des représentations cartographiques des phénomènes climatiques urbains constitue un levier essentiel pour l'adaptation des territoires au changement climatique, tout en jouant un rôle clé dans la médiation auprès de publics variés. Longtemps cantonnée à la recherche exploratoire et à la communication scientifique, cette cartographie évolue aujourd'hui vers un usage plus opérationnel, devenant un véritable outil d'aide à la décision pour les urbanistes, les collectivités et le grand public.

Historiquement, les cartes représentant des données de température ont souvent recours aux palettes dites « arc-en-ciel » ou « rainbow » (figure 1), caractérisées par un dégradé continu des valeurs à travers le spectre chromatique, généralement du bleu au rouge, en passant par le vert et le jaune, voire du violet au rouge dans certaines variantes. Couramment utilisées dans le domaine scientifique, ces palettes visent à représenter des variables quantitatives en maximisant les contrastes visuels, notamment à travers la palette HSV (Hue, Saturation, and Value), qui couvre l'ensemble du spectre, y compris l'extrémité magenta.

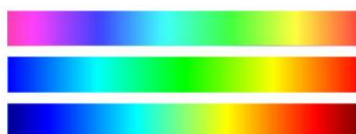


Figure 1. Les trois palettes “arc-en-ciel” populaires : en haut : l’arc-en-ciel HSV classique. Au milieu : L’arc-en-ciel bleu-rouge de Paraview sans magenta. En bas : Jet ajoute des extrémités sombres (tiré de [WAR 23])

En dépit de sa popularité, ce type de représentation a fait l'objet de nombreuses critiques en visualisation scientifique [BOR 07]. Ne tenant pas compte des modalités de la perception humaine, elle tend à induire une segmentation artificielle des données, à masquer certains dégradés subtils et à altérer la perception des formes continues. Ces effets sont particulièrement problématiques pour les personnes atteintes de déficiences visuelles, mais aussi dans les contextes d'interprétation fine des données spatiales.

Un exemple concret de ces limites apparaît dans un document de communication publié à Montpellier, à l'occasion du projet de rénovation de l'Esplanade Charles-de-Gaulle, un lieu central très fréquenté de la ville.

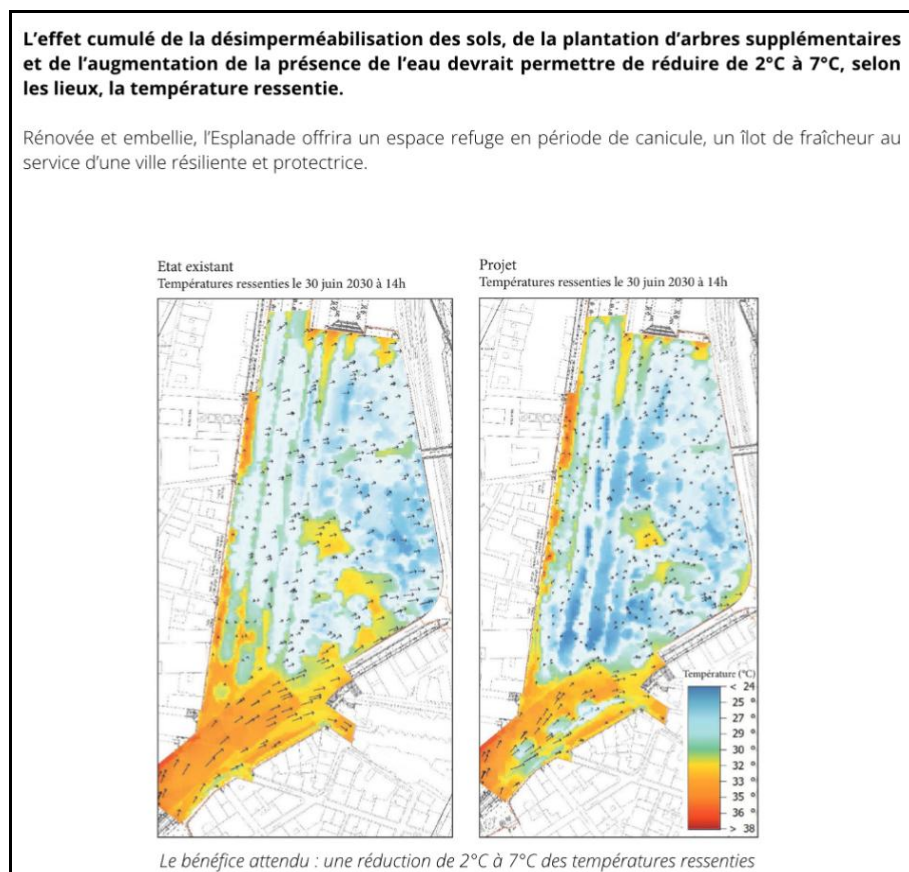


Figure 2. Exemple de représentation à destination du grand public : les bénéfices thermiques de l'aménagement de l'esplanade Charles de Gaulle à Montpellier (Source : *Projet d'embellissement Comédie-Esplanade*, Fiche de presse, 9 janvier 2023, Montpellier Méditerranée Métropole)

Les deux cartes présentées (Figure 2) visent à illustrer les bénéfices thermiques attendus de l'aménagement. Celles-ci mettent en évidence une réduction de la température ressentie, variant de 2 °C à 7 °C selon les secteurs, grâce à la désimperméabilisation des sols, l'introduction de végétation, et une meilleure circulation de l'eau et du vent. Pour visualiser ce gain thermique, l'auteur utilise la palette « arc-en-ciel » en dégradé continu. Bien que cette palette soit visuellement expressive et assez familière pour le grand public, son usage soulève ici des problèmes d'interprétation. Le passage du vert au jaune, en particulier, génère un contraste visuel important lié à la variation de luminance. Ce contraste peut suggérer à tort une rupture nette dans la distribution des données, comme une médiane ou un seuil critique, alors qu'il ne s'agit en réalité que d'un changement progressif et continu. Pour un public non expert, cette forme de représentation n'est généralement pas problématique, car la carte est interprétée de manière globale et intuitive. En revanche, dans un contexte opérationnel ou de recherche-action impliquant des prises de décision autour de la donnée par un public plus averti ou par des élus, elle présente des limites importantes : elle peut induire en erreur sur la nature et l'intensité réelle des phénomènes, nuisant ainsi à une analyse fine des données. Ces biais perceptuels soulignent l'importance d'adapter les choix graphiques aux objectifs de la carte ainsi qu'aux profils des

utilisateurs finaux. En réponse à ces limites, certaines palettes dites « améliorées » ont été développées afin de mieux répondre aux exigences perceptives et analytiques des différents publics. Loin d'abandonner totalement l'esthétique « arc-en-ciel », ces variantes cherchent à corriger ses défauts tout en conservant sa capacité à produire des cartes visuellement expressives.

Certaines palettes arc-en-ciel sont donc devenues populaires (Figure 1) car elles réduisent les distorsions perceptuelles tout en conservant une expressivité visuelle suffisante. Par exemple, la palette « Paraview Rainbow » conserve la logique bleu-rouge tout en éliminant le magenta final, ce qui diminue les distorsions visuelles. La palette « Jet », que l'on retrouve dans l'exemple de Montpellier, et qui est également largement utilisée, renforce les contrastes en ajoutant des extrémités sombres aux bords du spectre, tout en supprimant le magenta. Ces palettes facilitent une meilleure lisibilité des cartes grâce à une meilleure adaptation aux capacités perceptives humaines [WAR 23]. Malgré leurs défauts, ces palettes arc-en-ciel conservent certains avantages, notamment leur capacité à faire ressortir visuellement des structures saillantes ou des écarts majeurs dans les données. Leur usage persistant dans de nombreux domaines, y compris la climatologie et la climatologie urbaine, s'explique par leur efficacité à capter l'attention et à mettre en évidence les zones critiques dans une représentation cartographique. L'exemple de Montpellier illustre bien les biais que peuvent induire certaines palettes auprès d'utilisateurs avertis, en particulier lorsqu'une lecture précise des données est attendue.

Toutefois, leurs insuffisances perceptuelles ont conduit à de nouvelles pratiques cartographiques pour les données climatiques. Cette évolution a été facilitée par la montée en précision des données à l'échelle intra-urbaine et par les besoins croissants des acteurs urbains en matière de visualisation adaptée à l'analyse spatiale fine.

C'est dans ce contexte que des projets de recherche appliquée comme MApUCE (projet ANR-13-VBDU-0004) et PAENDORA (projets ADEME) ont contribué à faire émerger de nouvelles approches de visualisation plus robustes et interprétables. Ces démarches interdisciplinaires reposent sur l'intégration de données de morphologie urbaine et architecturale à haute résolution, comme les Local Climate Zones (LCZ) [BEC 15] ou les indicateurs issus de l'outil Geoclimate [BOC 21, BER 25]. Pour structurer visuellement cette information complexe, les représentations cartographiques produites dans ces projets s'appuient sur les principes de la sémiologie graphique, formalisés par Jacques Bertin [BER 67] dans son traité fondateur. Cet ouvrage fournit un ensemble de règles permettant d'adapter les modes de représentation aux caractéristiques des données, tout en tenant compte des capacités perceptives humaines, des conventions culturelles et des objectifs de communication. Cette évolution a contribué à la production de cartes combinant données urbaines et climatiques, favorisant leur intégration dans les démarches de planification.

Un exemple concret de cette évolution se trouve dans l'Atlas climatique de Toulouse Métropole, publié en 2020 par l'AuaT (Agence d'urbanisme et d'aménagement de Toulouse aire métropolitaine). Ce document s'inscrit dans une logique d'accompagnement des politiques locales d'aménagement et d'adaptation climatique en lien avec l'élaboration du Plan Local d'Urbanisme intercommunal et Habitat (PLUi-H) (Figure 3).

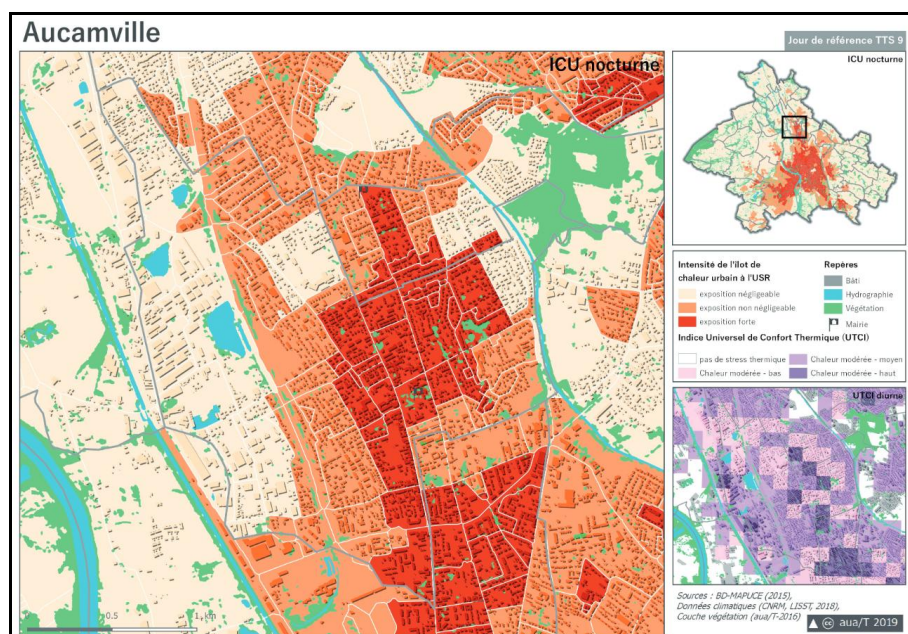


Figure 3. Extrait de l'Atlas climatique de Toulouse Métropole (AuaT, 2020) : carte de l'îlot de chaleur urbain (ICU) simplifiée en classes d'intensité et du stress thermique simplifié en classes de confort UTCI. (sources : <https://www.aua-toulouse.org/atlas-climatique/>)

À partir d'une situation météorologique typique, marquée par un fort ensoleillement estival, deux phénomènes sont représentés : 1. l'intensité des îlots de chaleur urbains classée en trois niveaux : négligeable, non négligeable, forte ; 2. le stress thermique, évalué par l'Universal Thermal Comfort Index (UTCI) reposant sur une échelle continue et détaillée comprenant 10 niveaux de stress thermique (Figure 4).

UTCI(°C)-range ^a	Stress-Category ^a
above +46 ^a	extreme heat stress ^a
+38 to +46 ^a	very strong heat stress ^a
+32 to +38 ^a	strong heat stress ^a
+26 to +32 ^a	moderate heat stress ^a
+9 to +26 ^a	no thermal stress ^a
+9 to 0 ^a	slight cold stress ^a
0 to -13 ^a	moderate cold stress ^a
-13 to -27 ^a	strong cold stress ^a
-27 to -40 ^a	very strong cold stress ^a
below -40 ^a	extreme cold stress ^a

Figure 4. Échelle d'intervalles pour l'indice de confort thermique (UTCI) proposée par l'action COST 730 (a) [BRO 13]

À partir d'une situation météorologique typique, marquée par un fort ensoleillement estival, deux phénomènes sont représentés : 1. l'intensité des îlots de chaleur urbains classée en trois niveaux : négligeable, non négligeable, forte ; 2. le stress thermique, évalué par l'Universal Thermal Comfort Index (UTCI) reposant sur une échelle continue et détaillée comprenant 10 niveaux de stress thermique (Figure 4).

La légende de la figure 3 illustre ainsi une structuration cartographique reposant sur deux niveaux complémentaires :

Premièrement, elle ne repose pas sur une classification en classes de température absolue, mais sur une catégorisation des îlots de chaleur selon leur intensité relative. Cette approche permet de mieux rendre compte des contrastes thermiques intra-urbains, en soulignant les zones particulièrement exposées. Cette information est représentée à l'aide d'une graduation harmonique, c'est-à-dire une variable visuelle d'ordre, qui facilite la lecture hiérarchique des niveaux d'exposition.

Deuxièmement, le stress thermique est visualisé à l'aide d'un gradient continu tiré de l'UTCI mais remanié, fondé sur une variation de valeur au sein d'une même teinte violette. La classification standard de l'UTCI, élaborée dans le cadre de l'action COST 730 (Figure 4), repose sur de larges intervalles allant de « froid extrême » à « chaleur extrême ». Or, dans l'Atlas climatique de Toulouse, cette échelle a été adaptée pour mieux rendre compte de la variabilité spatiale observée à l'échelle locale. Comme le stress thermique est majoritairement classé comme « modéré » (Figure 3), cette catégorie a été subdivisée en trois sous-niveaux (bas, moyen et haut) afin d'affiner la lecture des différences intra-urbaines. Dans ce contexte, la palette chromatique, fondée sur une progression catégorielle multi teinte, se révèle peu adaptée, en raison de l'écart réduit entre les sous-catégories. Le choix d'un gradient continu, appliqué à une teinte unique (violet), permet ainsi d'améliorer la lisibilité cartographique et de mieux restituer les variations thermiques. Elle mobilise plusieurs dimensions perceptives (notamment, la valeur et la saturation) pour favoriser une interprétation intuitive des niveaux de confort ou de stress thermique.

Cette double progression colorée, graduation d'intensité pour la couleur des îlots de chaleur et pour le stress thermique, illustre une articulation entre perception visuelle et indicateurs climatiques. Ce type de représentation, tel qu'illustré dans l'Atlas climatique de Toulouse, ne repose pas seulement sur des choix esthétiques ou pratiques : il traduit une mobilisation raisonnée de principes graphiques qui permettent de structurer visuellement des données complexes. Ce type de représentation ne résulte donc pas de choix arbitraires, mais s'appuie sur un ensemble de principes et fondements théoriques issus de la sémiologie graphique.

Ainsi, explorer et représenter les phénomènes climatiques urbains ne relève plus uniquement d'un enjeu de communication scientifique, mais devient un levier stratégique pour comprendre et anticiper les effets du changement climatique à l'échelle des territoires. L'adaptation des méthodes historiques de représentation de la température et la simplification des indices thermiques permettent de rendre visibles des phénomènes jusqu'ici difficilement appréhendables à l'échelle locale. Ainsi, ces besoins de visualisation cartographique peuvent participer à l'intégration des enjeux climatiques dans la planification urbaine, en croisant approches interdisciplinaires et innovations en visualisation de données. Elles sont directement liées à la formalisation des cartes comme cartes climatiques en tant qu'outils d'aide à la planification urbaine.

2.2. Opérationnaliser la cartographie climatique : un outil de transfert à destination de la planification urbaine

Le développement de cartes issues d'analyses microclimatiques et morphologiques urbaines marque une étape dans l'opérationnalisation de la cartographie climatique comme outil de planification. L'approche fondée sur les cartes climatiques trouve son origine avec la publication des lignes directrices VDI 3787 (Verein Deutscher Ingenieure) dès 1997, émises par l'Association des ingénieurs allemands (Figure 5). Ces directives, devenues une référence internationale, ont posé les bases méthodologiques pour analyser et représenter le climat urbain à des échelles adaptées à l'aménagement urbain. Dans cette approche, l'information est organisée autour de zones aux caractéristiques climatiques homogènes, appelées "Klimatopes". Ces zones sont définies en fonction de la morphologie urbaine, de sa typologie (centre-ville, tissu urbain, zones commerciales) et de la restitution des principales variables climatiques, telles que la température et les flux d'air.

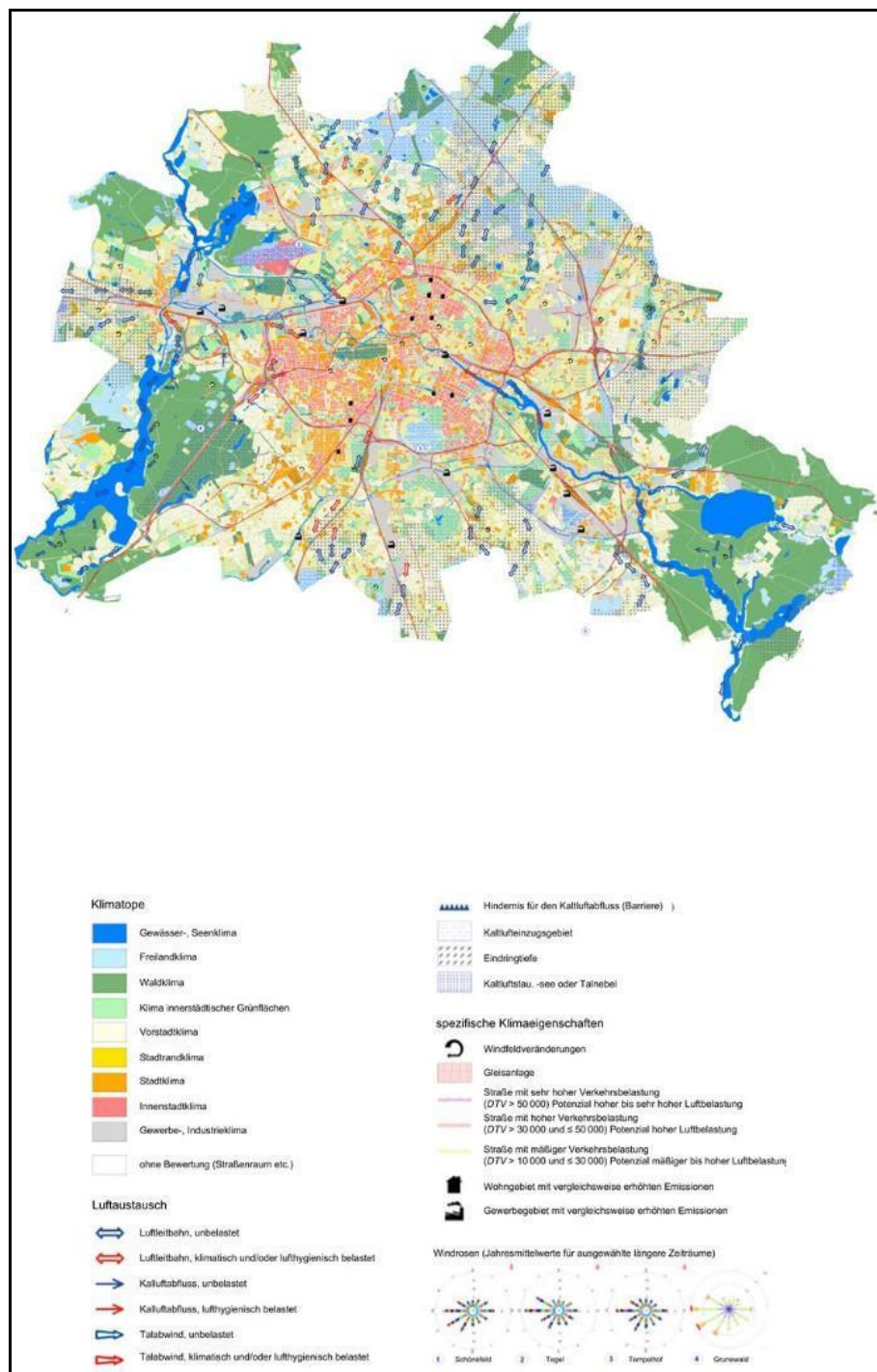


Figure 5. Carte climatique de la ville de Berlin (Vue générale, échelle originale 1:265,000, lien de la carte à haute résolution. source: Senate Department for Urban Development and the Environment, *Environmental Atlas*).

S'appuyant sur ce modèle allemand, plusieurs travaux en Asie ont poursuivi cette approche de la cartographie climatique pour la planification urbaine, donnant naissance à deux niveaux d'analyse : la carte d'analyse climatique urbaine (UC-Map) et la carte de recommandations pour la planification climatique urbaine (UC-AnMap). La terminologie associée à ces cartes tend à converger sous le terme générique de carte climatique urbaine [NG 15].

Des villes comme Singapour, Hong Kong [NG 12], Kobe, Osaka [ASH 09] ou Tokyo [REN 11] ont produit des cartes climatiques opérationnelles. À Tokyo, par exemple, la Thermal Environmental Map (Figure 6) propose, à travers sa légende organisée et commentée, des pistes d'amélioration de la planification urbaine pour atténuer l'effet des ICU. La conception de la légende et l'organisation de l'information dans ces cartes suivent une approche plus architecturale, en tenant compte de la typologie des bâtiments, de la densité urbaine et des caractéristiques thermiques des matériaux. La légende est

structurée en cinq catégories autour de zones urbaines, dont deux sont subdivisées selon l'intensité du confort thermique. Ces zones, marquées par des contours jaunes, permettent d'identifier les secteurs urbains prioritaires pour réduire l'inconfort thermique. Ainsi, ces cartes, fondées sur des modélisations climatiques et des données à grande échelle, permettent d'analyser des phénomènes tels que les îlots de chaleur urbains, la température, l'humidité et la gestion des risques de chaleur extrême. Elles sont utilisées pour comprendre les tendances climatiques à grande échelle et adapter les infrastructures urbaines aux spécificités locales.

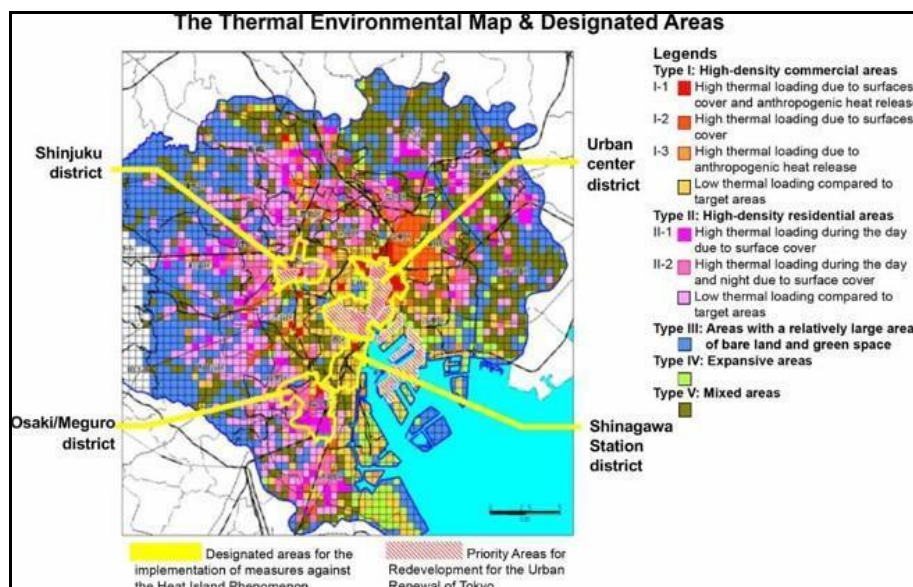


Figure 6. Ren, C., Ng, E.Y.-y. and Katzschner, L. [REN 11], *Urban climatic map studies: a review. Int. J. Climatol.*, 31: 2213-2233. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>

En France, la (géo)visualisation du climat urbain se situe au croisement des questionnements scientifiques en climatologie et en géomatique, ainsi que des problématiques opérationnelles en urbanisme. La mise à l'agenda des enjeux climatiques en milieu urbain accompagne l'évolution du cadre réglementaire. Elle est marquée par une territorialisation progressive des politiques climatiques et énergétiques, amorcée avec les lois Grenelle de 2009 et 2010 [LEB 07]. Cette dynamique est renforcée par la loi de 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), qui rend obligatoire la compatibilité (et non plus une simple prise en compte) entre les Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) et les documents d'urbanisme (ADEME ; [HID 22]).

Avec le PCAET, les collectivités doivent désormais définir des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Pour les intercommunalités de plus de 20 000 habitants, ces plans doivent s'articuler avec les outils de planification existants : ainsi, le Plan Local d'Urbanisme (PLU) ou le Plan Local d'Urbanisme intercommunal (PLUi) doit être compatible avec les orientations du PCAET, notamment en matière de gestion de l'eau, de préservation de la biodiversité et, plus récemment, du confort thermique. Pourtant, à la différence des Plans de Prévention des Risques (PPR), il n'existe pas de normes spécifiques pour représenter les phénomènes climatiques dans les documents d'urbanisme. L'absence de standards cartographiques se traduit par une grande hétérogénéité dans les représentations climatiques mobilisées : elles varient selon les types de données (capteurs, images satellites, simulations), les méthodes de traitement et les choix graphiques.

Face à cette absence de cadre homogène, les recherches actuelles ont développé des outils et des méthodes permettant une meilleure intégration des phénomènes climatiques dans la planification urbaine. En produisant des diagnostics microclimatiques exploitables à l'échelle intra-urbaine, ces travaux ont nourri les réflexions autour des PCAET. Certaines métropoles ont ainsi élaboré des représentations climatiques dans le cadre de leurs PCAET, selon des approches cartographiques différenciées, tant par la nature des données que par les modèles de visualisation mobilisés.

La carte intégrée au PCAET de Grand Paris Métropole (Figure 7a) illustre une approche fondée sur la modélisation de la morphologie urbaine. Elle représente l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) nocturne à l'échelle métropolitaine, ainsi que les limites de température associées aux nuits tropicales durant la canicule de 2003 (température nocturne > 20°C). La légende distingue plusieurs niveaux d'intensité de l'aléa thermique : effet rafraîchissant, faible, moyen et fort. Une ligne jaune marque la limite de l'indicateur de nuit tropicale, au-delà de laquelle les températures sont restées supérieures à 20°C au cours de la nuit, caractérisant ainsi des conditions particulièrement inconfortables. Les zones à potentiel d'ICU, représentées en orange et rouge, se trouvent à l'intérieur de cette limite et signalent des secteurs particulièrement exposés. La carte repose sur une analyse spatiale à partir des îlots morphologiques, permettant de rendre compte de l'intensification locale de la chaleur en contexte de canicule. Ce document cartographique permet ainsi d'identifier les zones les plus vulnérables de la métropole, là où le confort thermique nocturne est le plus compromis. Il met également en évidence les seuils de basculement entre un ICU latent et un ICU avéré, contribuant à une lecture fine des risques climatiques à l'échelle urbaine. Outil d'aide à la décision, cette carte constitue un élément central du diagnostic de vulnérabilité et alimente la réflexion sur les stratégies d'adaptation du territoire face aux vagues de chaleur.

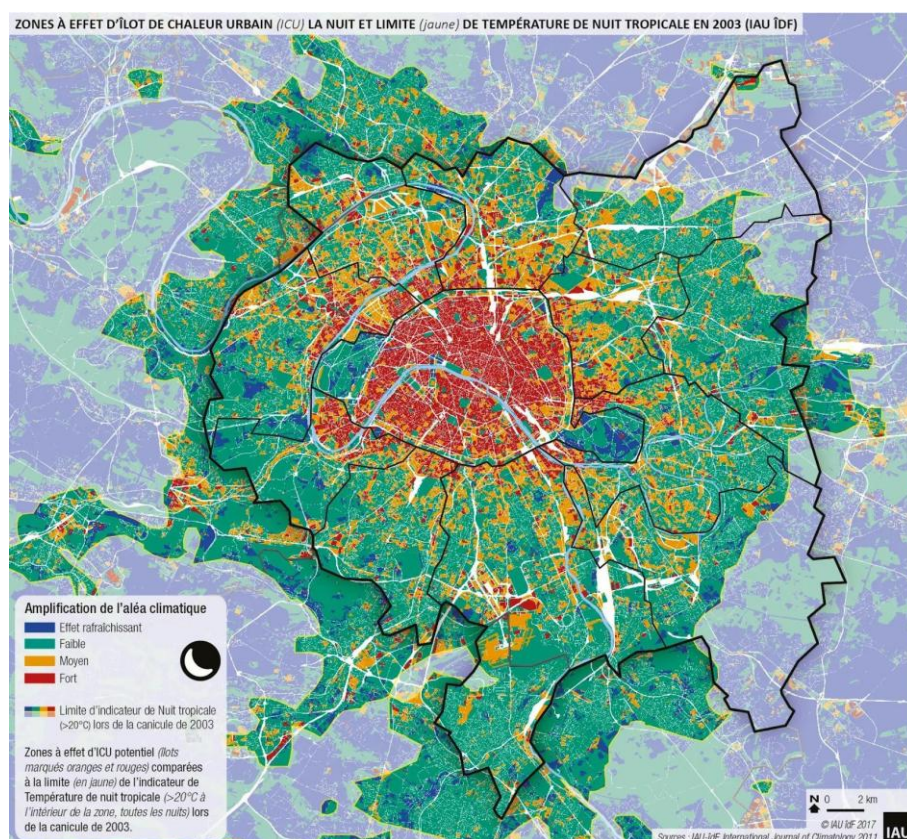


Figure 7a. Carte de l'effet de l'îlot de chaleur urbain extraite du PCAET de Grand Paris Métropole ; Sources : [IAU îdF 2017](http://iau-idf.fr)

À Toulouse (Figure 7b), les cartes intégrées au PCAET adoptent une autre démarche : elles reposent sur des simulations numériques de température de l'air produites à partir de données météorologiques et urbaines, pour une journée estivale type [HID 18]. La carte modélise le stress thermique à l'échelle de Toulouse Métropole. Elle est divisée en deux représentations distinctes, illustrant les conditions thermiques pour une journée typique d'été (13h-16h) et une nuit (3h-6h). Ici, la représentation du climat urbain s'ancre dans une logique modélisante du système urbain, qui combine données mesurées et modélisation statistiques. Ce type de représentation contribue pleinement aux diagnostics de vulnérabilité climatique intégrés au PCAET.

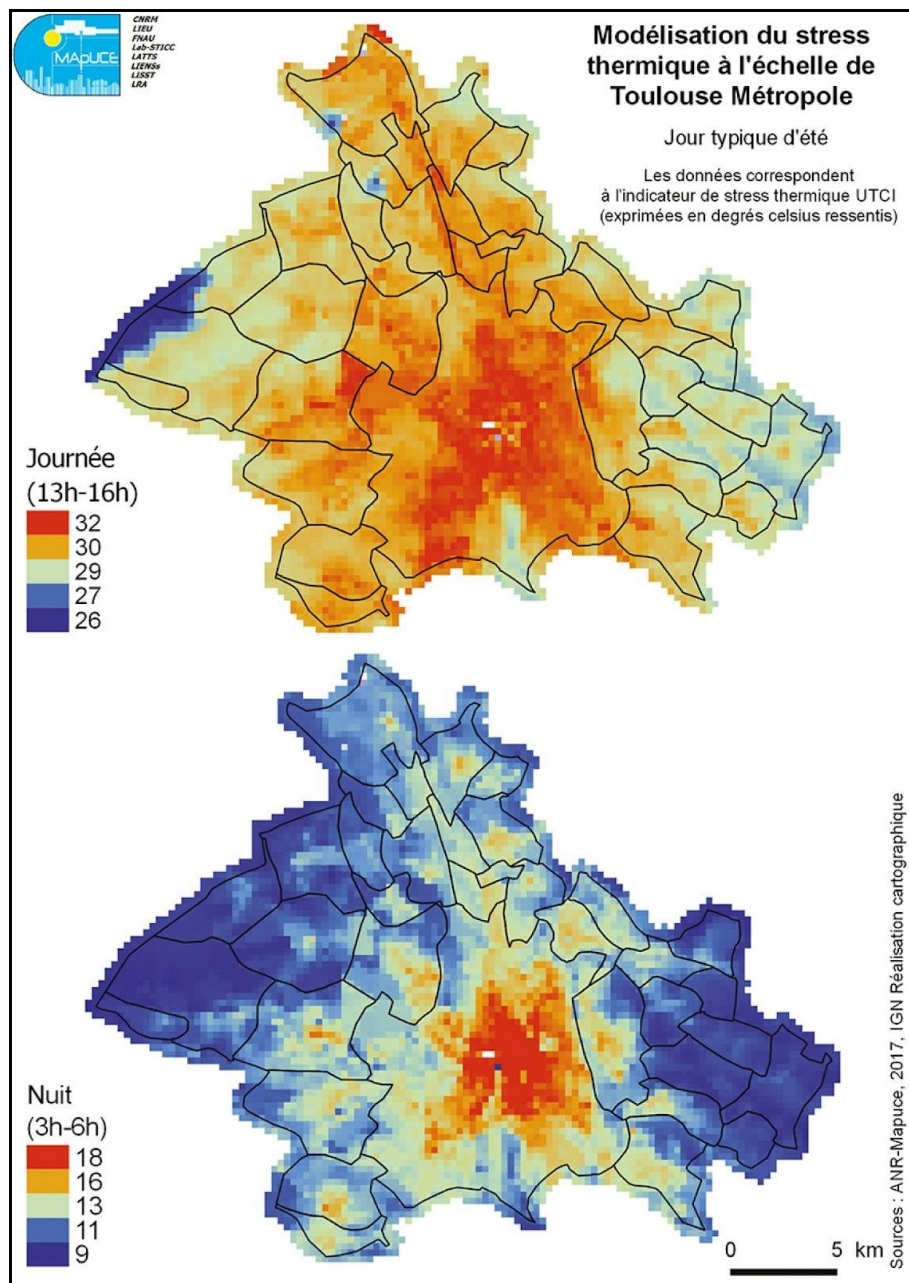


Figure 7b. Représentations cartographiques issues des diagnostics de vulnérabilité des PCAET : Toulouse Métropole (jour typique d'été) ; Sources : ANR MAPUCE 2017

Enfin, à Strasbourg Métropole (Figure 7c), la cartographie des ICU se base sur des données satellitaires issues des capteurs MODIS de la NASA. Ces images thermographiques, plus facilement accessibles que les simulations, sont utilisées pour construire des cartes de température de surface sous forme de heatmaps. La carte couvre une plage thermique allant de 21°C à 25°C, et met en évidence les zones les plus chaudes du tissu urbain. Cette approche illustre une autre modalité de représentation mobilisée pour appuyer les diagnostics territoriaux dans le cadre des PCAET.

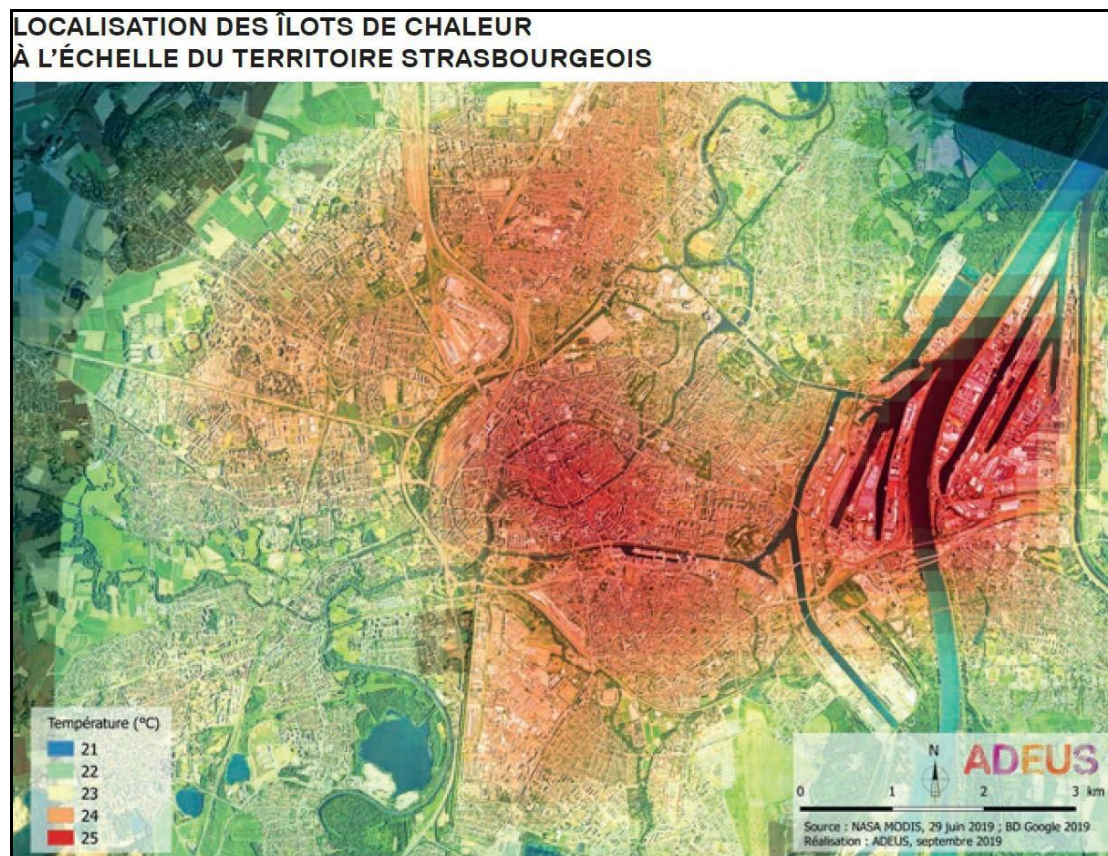


Figure 7c. Représentations cartographiques issues des diagnostics de vulnérabilité des PCAET : Strasbourg Metropole ; Sources : ADULM, ADEUS 2022

Ces cartes adoptent des formes de représentation variées, allant du regroupement en classes de valeurs à la hiérarchisation par catégories. Malgré la diversité des sources de données mobilisées (simulations, capteurs, données satellitaires), elles partagent une symbolique relativement homogène, recourant fréquemment à des représentations sous forme de “cartes de chaleur”. Ces représentations utilisent des palettes “multi-teintes” comme la palette “arc-en-ciel”, généralement limitées à deux ou trois teintes pour visualiser l’intensité du phénomène thermique.

Ces trois exemples, Grand Paris, Toulouse et Strasbourg, visent tous à fournir un diagnostic de vulnérabilité climatique à l’échelle territoriale, mais selon des choix méthodologiques distincts. La carte du Grand Paris repose sur une modélisation fondée sur la morphologie urbaine, celle de Toulouse sur une modélisation statistique combinant données mesurées, données urbaines et topographiques, et celle de Strasbourg sur l’exploitation de données satellitaires accessibles (capteurs MODIS). Ces différences soulignent la diversité des régimes de production de la donnée climatique, mais aussi la façon dont l’espace urbain est mobilisé en tant que support : tantôt comme référentiel morphologique, tantôt comme système dynamique à simuler ou comme contexte d’observation.

Bien que ces cartes demeurent encore peu présentes dans les documents de planification en France, leur intégration croissante dans les PCAET marque une volonté d’opérationnaliser la cartographie climatique. L’objectif est de transformer ces représentations en outils d’aide à la décision pour les collectivités, dans un contexte de territorialisation des politiques climatiques. Toutefois, l’absence de standards méthodologiques ou de géostandards spécifiques en matière de représentation des phénomènes climatiques rend difficile la comparaison entre les démarches et limite leur reproductibilité.

2.3. Toulouse Métropole : un exemple de construction d'un protocole cartographique comme outil de transfert des connaissances climatiques

Comme évoqué dans la section 1.1, l'intégration de données climatiques dans les documents de planification territoriale en France est encore récente. Toutefois, l'exemple de Toulouse Métropole témoigne d'une avancée significative dans l'opérationnalisation de ces données, à travers un protocole cartographique structuré, conçu pour transférer les connaissances scientifiques vers les praticiens de l'urbanisme, les décideurs publics et le grand public.

Ce protocole est le fruit d'une collaboration pluriannuelle entre la collectivité, l'agence d'urbanisme et les équipes de recherche [HID 22, 23]. Il s'appuie sur la modélisation numérique du climat urbain, combinant données météorologiques locales et paramètres urbains (morphologie bâtie, occupation du sol, perméabilité, trame verte et bleue) pour simuler les effets des conditions estivales typiques à l'échelle de la métropole.

La démarche s'articule autour de deux niveaux de représentations cartographiques complémentaires. 1. Les cartes thématiques (ou thematic maps) restituent les résultats des simulations numériques de variables climatiques, croisées avec d'autres données urbaines. Leur objectif est d'identifier les zones les plus sensibles face aux phénomènes de chaleur urbaine, comme le stress thermique ou les îlots de chaleur urbains. 2. Les cartes à enjeux (ou strategic maps), conçues en aval, condensent l'information issue des cartes thématiques pour ne retenir que les zones présentant un risque élevé. Elles permettent de guider les politiques d'aménagement en synthétisant l'information pour ne garder que les zones qui requièrent une attention particulière en termes de planification urbaine.

Les cartes thématiques, ou thematic maps, constituent le premier niveau de représentation dans le protocole cartographique développé pour Toulouse Métropole. Elles restituent les résultats de simulations numériques de variables climatiques, en particulier le stress thermique diurne (UTCI) et les îlots de chaleur urbains (ICU), croisés avec des données urbaines et environnementales jugées essentielles à l'analyse spatiale, telles que la densité bâtie ou les éléments structurants de la Trame Verte et Bleue (TVB). À l'instar des démarches mises en œuvre en Allemagne (cf. 1.2), ces cartes visent à localiser les zones selon leur niveau de sensibilité face aux phénomènes de chaleur urbaine et à les situer dans leur contexte morphologique et écologique.

À Toulouse, les cartes sont organisées selon une structuration en vignettes, chacune correspondant à une variable ou à une composante particulière du territoire. Ce principe de composition progressive permet de rendre lisible une information complexe, souvent illisible lorsqu'elle est intégrée dans une seule carte synthétique. Par exemple, dans le cas de la carte du stress thermique diurne (Figure 8a), les vignettes permettent de distinguer et d'analyser séparément la répartition de la densité bâtie, l'intensité du stress thermique, et la présence de continuités écologiques avec la TVB. L'assemblage final, résultant de la superposition de ces trois couches d'information, mobilise une sémiologie adaptée à la représentation de la densité bâtie et de la trame verte et bleue (TVB), tout en préservant la lisibilité de l'information principale, le stress thermique, afin d'assurer une lecture claire et cohérente de l'ensemble.

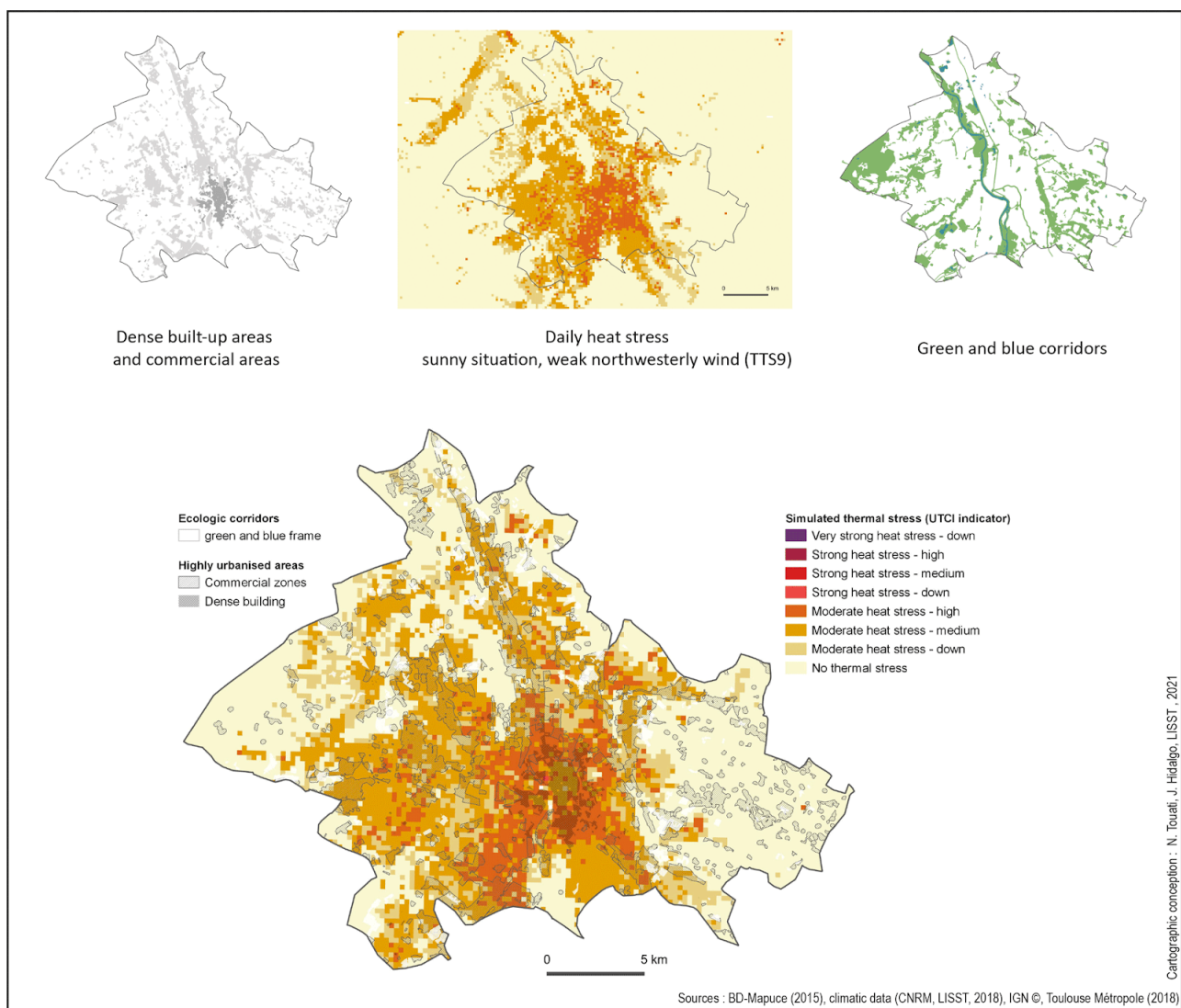


Figure 8a. Carte d'analyse de l'indicateur de stress thermique pour Toulouse Métropole , UTCI, au cours de la journée à partir de simulations numériques pour la situation météorologique typique, LWT 9, la plus favorable à la formation d'un fort îlot de chaleur urbain (ICU) en été. [HID 23]

Nous retrouvons la même approche pour la carte de l'ICU nocturne (Figure 8b), qui représente les intensités d'îlot de chaleur urbain entre 3h et 6h du matin. Les zones très urbanisées sont classées en deux catégories : les zones commerciales en gris clair et le bâti dense en gris foncé. L'ICU est divisé en trois classes de températures : de 0 à 2 °C (jaune-ocre), de 2 à 3 °C (orange), et de 3 à 6 °C (rouge). La palette repose sur un dégradé continu au sein d'une même gamme harmonique, afin d'assurer une lecture progressive des variations. Un jaune pâle a été choisi pour préserver un gradient de saturation correspondant à l'intensité du phénomène.

Comme pour la carte d'analyse de l'UTCI diurne, la carte finale de l'ICU nocturne intègre ces dimensions en harmonisant la sémiologie graphique, afin de conserver la lisibilité et la pertinence des phénomènes identifiés.

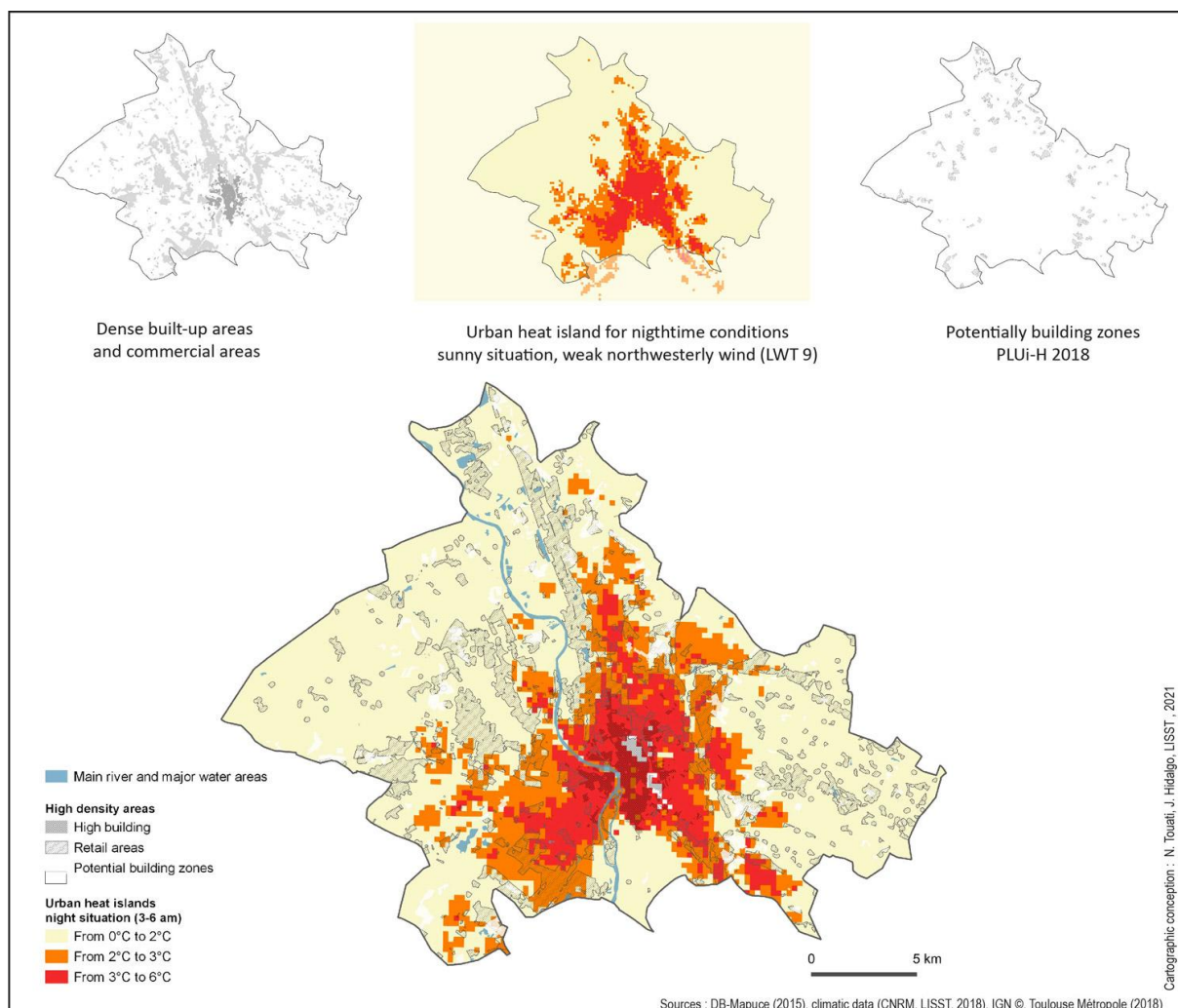


Figure 8b. Carte d'analyse de l'indicateur ICU pour Toulouse Métropole à l'aide de simulations numériques de la situation météorologique typique la plus favorable à la formation de ce phénomène en été (LWT 9). [HID 23]

Ainsi, l'originalité des cartes climatiques de Toulouse Métropole ne réside pas seulement dans leur structuration en vignettes, mais dans une véritable démarche de clarification du processus cartographique. Chaque vignette ne se limite pas à présenter un indicateur isolé : elle explicite également l'origine des données utilisées (simulations numériques, données urbaines ou environnementales) et leur contribution à la lecture du phénomène climatique. Cette organisation progressive permet de déconstruire la complexité de l'information spatiale, en guidant l'utilisateur, qu'il soit expert ou décideur, dans la compréhension de chaque composante du diagnostic. La carte finale n'est donc pas une simple superposition des vignettes, mais une synthèse raisonnée, construite à partir d'une compilation cohérente de données, dont la sémiologie graphique a été ajustée pour préserver la lisibilité et la pertinence des phénomènes représentés.

Afin d'en renforcer l'opérationnalité, cette carte doit être accompagnée d'un croquis-schéma jouant le rôle de « carte à enjeux » ou strategic map [JEG 22], conçu pour extraire et mettre en évidence les zones stratégiques nécessitant une attention particulière (Figure 9). Sa composition doit permettre une lecture rapide du diagnostic climatique, grâce à une légende explicite. L'ajout d'un commentaire écrit vient compléter ce dispositif, en facilitant la compréhension des choix de représentation et de son interprétation.

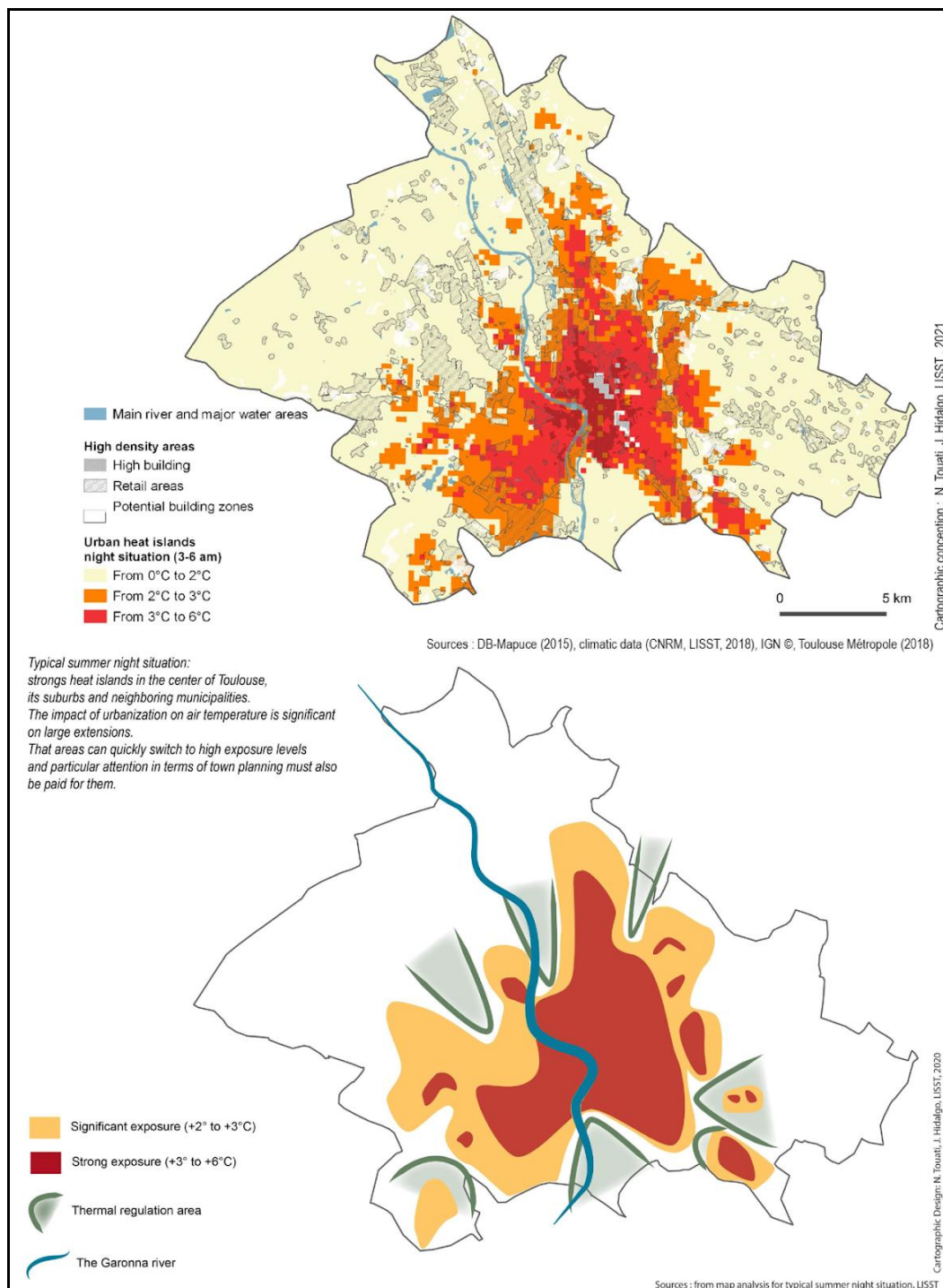


Figure 9. Exemple de cartes d'analyse (en haut) et de cartes à enjeux (en bas) pour les conditions thermiques nocturnes (source : [HID 23])

Ainsi, le protocole cartographique mis en œuvre à Toulouse Métropole illustre une avancée méthodologique dans l'intégration des données climatiques aux outils d'aménagement. En articulant cartes thématiques et cartes à enjeux, cette démarche permet non seulement de restituer la complexité des phénomènes climatiques urbains, mais aussi de la traduire en supports lisibles et exploitables pour l'action publique. En explicitant les données sources, en structurant les représentations selon un principe progressif de lecture et en adaptant la sémiologie graphique aux besoins d'interprétation, ce dispositif renforce le potentiel opérationnel des cartes climatiques. Il constitue un modèle reproductible pour d'autres territoires souhaitant inscrire les enjeux de confort thermique et de résilience urbaine au cœur de leurs stratégies de planification.

2.4. Le chorotype climatique : autre mode de représentation pour les données climatique

Dans la continuité de cette réflexion sur les modes de représentation, l'approche chorématique propose une alternative intéressante pour formaliser l'information climatique en mobilisant des modèles graphiques abstraits destinés à représenter les structures et dynamiques spatiales.

La méthode chorématique, élaborée par Roger Brunet au début des années 1980 en France, repose sur l'usage de « structures élémentaires d'organisation de l'espace » appelées chorèmes. En proposant une formalisation visuelle des configurations spatiales, elle a profondément renouvelé les approches en géographie et en cartographie. Malgré les débats et critiques qu'elle a suscités, cette méthode est largement reconnue pour sa valeur scientifique. De nombreuses recherches récentes en témoignent, notamment celles de Lardon et Houdart [LAR 17], Casanova-Enault et Châtel [CAS 2017], ou encore Garbolino et Voiron-Canicio [GAR 2020].

La chorématique s'inscrit dans le champ de l'analyse spatiale, en s'intéressant aux formes, structures et dynamiques de l'espace. Selon la définition de Lévy et Lussault [LEV 2013] dans *Le Dictionnaire de la géographie*, elle permet d'identifier des configurations récurrentes (ou patterns) intégrées à des modèles explicatifs du fonctionnement et de l'évolution des systèmes spatiaux.

Initialement développée pour la géographie régionale et la modélisation territoriale, la méthode chorématique a depuis été étendue à d'autres domaines connexes : aménagement du territoire, urbanisme, prospective territoriale, et même géopolitique. Les chorèmes fonctionnent comme un véritable alphabet graphique, synthétisant des réalités complexes à travers des figures élémentaires. Ils permettent ainsi de construire pas à pas des modèles territoriaux lisibles, partageables et interprétables.

Par leur simplicité formelle, les chorèmes facilitent la compréhension des dynamiques de phénomènes complexes et le dialogue entre différents publics (académique ou d'ingénierie territoriale, voir [LAR 17]). Leur valeur pédagogique est importante : en rendant visibles les logiques spatiales souvent implicites grâce à leur forme graphique et leur légende schématique, ils permettent une compréhension partagée des enjeux territoriaux, même par un public non spécialiste. Comme le soulignent E. Garbolino et Ch. Canicio-Voiron [GAR 2020], ces modèles graphiques ne sont pas seulement des vecteurs de communication de connaissances expertes, mais sont surtout des supports de réflexion collective en amont.

A Toulouse (Figure 10), ce modèle s'intègre à la suite des cartes d'analyse et des cartes à enjeux précédemment développées. Ces cartes présentent des idées concrètes traduites en actions, en instructions : des zones à préserver ou à améliorer. Dans ce cas, un processus cartographique chorématique peut jouer le rôle d'une introduction, d'une explication des phénomènes climatiques, pour mettre à l'agenda des actions à l'échelle de la ville. Dans cette approche, les chorèmes ont cette capacité à représenter simplement les schémas et les dynamiques présents dans l'ensemble de la ville, ainsi que leurs combinaisons, permettant ainsi aux urbanistes de sortir des détails et des directives. Les modèles ont été sélectionnés, à partir des tables de chorèmes [BRU 86, CAS 17] et enrichis de couleurs et de trames généralement associées à la thématique climatique pour exprimer la dynamique.

La construction du modèle de base, première étape de la construction du modèle graphique, est une combinaison de chorèmes les plus appropriés pour modéliser un territoire. Les chorèmes choisis s'appuient sur le retour des experts travaillant sur ce territoire (climatologues, urbanistes) et sur les éléments de la carte à enjeux (Figure 9). Au modèle de base, d'autres chorèmes sont ajoutés pour indiquer les éléments modificateurs du territoire, ici les données climatiques et environnementales, et conduisent à la construction d'un modèle dérivé (Figure 10a). Enfin, à partir de ce modèle de base et du modèle dérivé, un modèle graphique plus détaillé peut être proposé, en prenant en compte la configuration concrète du territoire étudié et ses particularités.

L'ensemble de ces étapes permet de constituer un chorotype climatique (une configuration récurrente, figure 10b), présenté ici de manière déterritorialisée afin de se concentrer exclusivement sur

les dynamiques spatiales. La Figure 10a illustre ainsi les différentes étapes de la construction d'un chorotype climatique, en proposant deux types de situations climatiques, diurne et nocturne, accompagnées d'une légende explicative détaillant les éléments graphiques et symboliques employés.

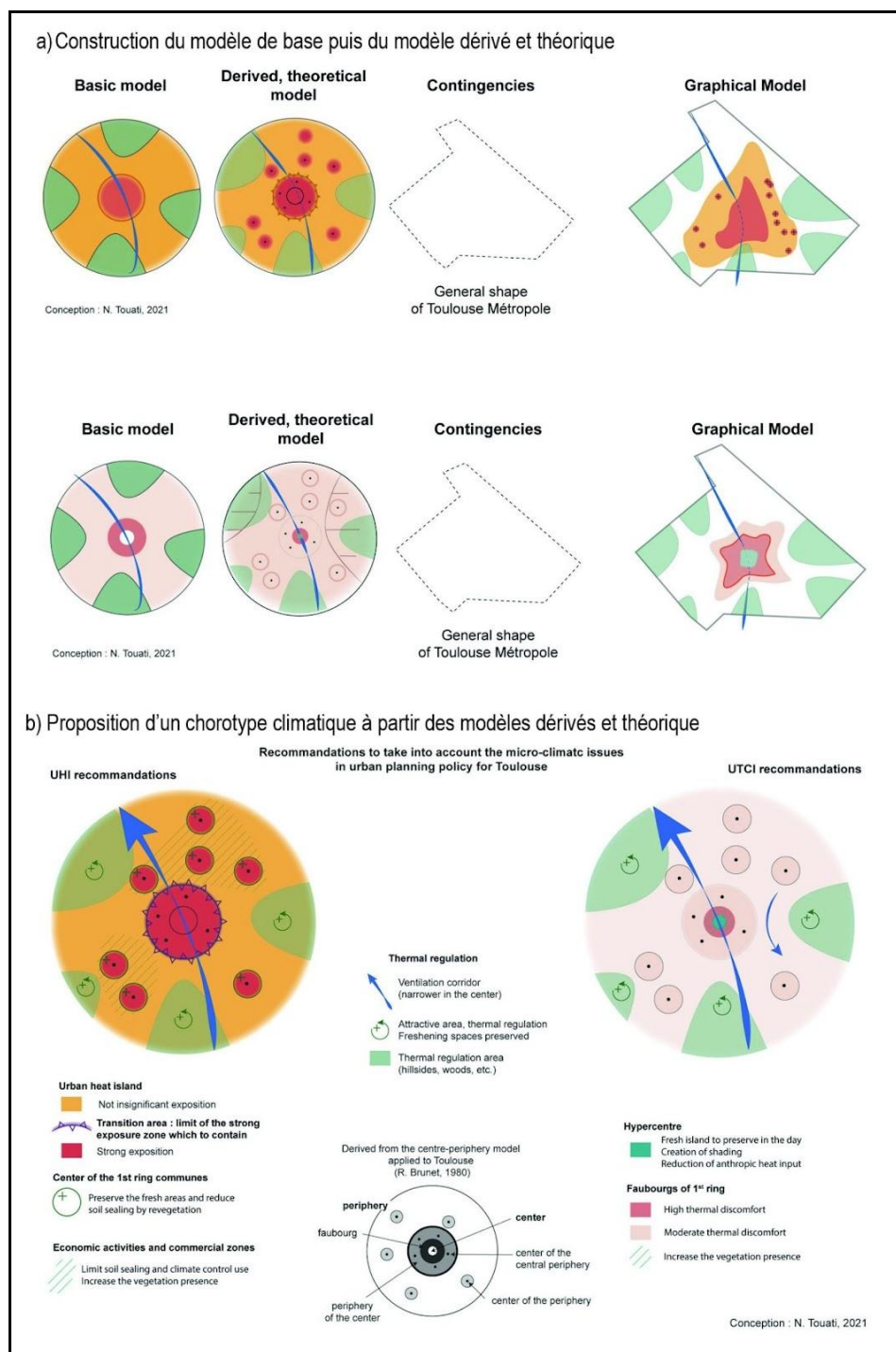


Figure 10. Construction d'un chorotype climatique à partir de modèles de bases et de modèle dérivés (tiré de [JEG 22])

Le modèle issu de ce processus constitue une base structurante pour le dialogue avec les acteurs locaux impliqués dans les politiques d'urbanisme à l'échelle de l'agglomération. Il synthétise spatialement les principaux enjeux liés à l'îlot de chaleur urbain à Toulouse, et se positionne comme un support de discussion partagé entre chercheurs, urbanistes, ingénieurs et élus. En facilitant la compréhension des dynamiques climatiques urbaines sous une forme schématique et accessible, il renforce le potentiel de médiation entre expertise scientifique et action publique. Des projets de recherche à venir prévoient d'explorer et d'évaluer son appropriation par les différents acteurs du territoire, afin de tester sa pertinence comme outil d'aide à la décision, de sensibilisation ou de concertation dans les démarches de planification urbaine.

3. Visualisation interactive 3D/2D+1 pour l'analyse visuelle multi-échelle de données climatiques urbaines

Parallèlement aux propositions pour améliorer les représentations cartographiques de données climatiques et météorologiques, à des fins opérationnelles ou de communication autour des phénomènes climatiques urbains, différents travaux de recherche [HEL 14, LI 17, RAU 17, ROB 21, VUC 21] proposent de nouvelles approches de visualisation interactive plus orientées sur l'analyse exploratoire, et utilisant, entre autres, les possibilités offertes par la visualisation 3D.

3.1. Visualisation 3D de données météorologiques urbaines.

3.1.1. Quels éléments visualiser pour l'analyse de données météorologiques simulées

Comme abordé au début de ce chapitre, différents modèles permettent une simulation des données météorologiques et climatiques urbaines [PLU 15, ROD 19, STE 09, STE 12]. Visualiser les sorties de ces modèles dans leur environnement urbain présente différents intérêts pour des utilisateurs experts (météorologues, urbanistes, ...) [PIN 16]. La contextualisation spatiale des données simulées améliore la compréhension des phénomènes climatiques urbains et facilite l'analyse des relations entre données météorologiques simulées et morphologie urbaine; la visualisation de plusieurs scénarios simulés permet d'estimer l'impact de modifications urbanistiques; la co-visualisation des données simulées avec leurs conditions de forçage permet l'identification de possibles incohérences, permettant une amélioration et une validation des modèles. L'élaboration de telles visualisations soulève cependant des questions sur les approches, styles, modalités d'interaction et niveaux de généralisation à proposer pour répondre aux différents besoins de ces utilisateurs experts : représentation de données météorologiques simulées multivariées, dans l'espace (2D ou 3D), dans le temps, à plusieurs échelles, tout en prenant en compte la représentation de l'incertitude autour des données simulées, et leur co-visualisation avec d'autres données hétérogènes dans leurs dimensions et leur granularité.

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, et comme le montre l'exemple du chapitre 4 [DUC 25] les données météorologiques ou climatiques spatialisées sont souvent représentées au moyen de cartes 2D. Les propositions de visualisation de données météorologiques simulées ou mesurées se présentent ainsi souvent sous la forme de représentations cartographiques 2D de valeurs au sol, ou de données correspondant à un niveau spécifique de hauteur au dessus du sol : température de l'air proche du sol [SCH 20]; couloirs de vent au niveau du sol [BEL 18]. Certaines de ces représentations 2D peuvent proposer des options d'interaction permettant de choisir le niveau de hauteur correspondant aux données météorologiques représentées [WIN 14]. Certaines de ces représentations utilisent parfois des glyphes animés pour la représentation de données vecteur comme la direction et l'intensité du vent [WAR 16, LOB 19, LOB 20]. L'utilisation de glyphes dans ces représentations 2D permet aussi de représenter le caractère multivarié des données météorologiques, notamment dans le cas de la visualisation de données issues de prévisions d'ensemble [JAR 15, FRI 18, WAN 18]. Ces représentations 2D sont parfois accompagnées de diagrammes pour représenter la composante temporelle des données mesurées en un point particulier [LER 19, SCH 20]. L'analyse visuelle de données météorologiques par des experts du domaines implique d'ailleurs la combinaison de plusieurs approches de visualisation interactives, synchronisées entre elles [RAU 17].

La composante temporelle représente un élément important de l'analyse de données météorologiques: dans le cadre de l'étude des îlots de chaleur urbains, l'analyse peut par exemple porter sur la variabilité temporelle du phénomène selon le cycle des journées ou des saisons [PHI 20], ou sur l'identification de zones urbaines où la température reste élevée durant une certaine période (notamment la nuit) entraînant un phénomène de stress thermique [OLE 15], et de zones où peut être observé un phénomène de rafraîchissement (notamment nocturne) plus efficace. Différents types de diagrammes permettent une visualisation de la distribution temporelle des données météorologiques à travers différentes échelles, tandis que des représentations cartographiques peuvent être utilisées pour visualiser la distribution spatiale de données temporellement agrégées (e.g. moyenne journalière) [PHI

20]. L'analyse des disparités dans la distribution temporelle des données selon différentes zones de l'environnement urbain implique cependant l'intégration de la composante temporelle dans la représentation cartographique. La représentation de la distribution spatiale des données pour différentes modalités temporelles (e.g. distribution spatiale des données de température de l'air à différents moments de la journée; distribution spatiale des températures moyennes à différentes saisons), peut être effectuée en multipliant les représentations cartographiques présentes dans une même vue (selon l'approche des small multiples de Tufte [TUF 83, 90]), ou en utilisant l'interaction pour permettre à l'utilisateur de modifier la modalité temporelle représentée (interaction parfois couplée à des possibilités d'animation pour permettre la représentation de la dynamique du phénomène visualisé) [ANT 04, KAD 14]. Ces dispositifs sont généralement intégrés dans des interfaces multi-vues intégrant des diagrammes temporels synchronisés à la carte [DAV 01, DAV 04, KRA 11] permettant une meilleure vue d'ensemble des composantes spatiale et temporelle de la donnée. La visualisation peut également passer par la représentation de différentes temporalités de la donnée [HEW 83, ALL 83, DIB 92, MAC 94], comme la durée de dépassement d'un seuil de température, ou la période de retour du phénomène d'ICU. L'efficacité de différentes variables visuelles, dynamiques ou non, pour encoder ces différentes temporalités dans une représentation spatiale 2D a fait l'objet de plusieurs travaux [KOB 96, DUK 05, KAD 14].

Les données météorologiques sont également connues pour être entachées d'incertitude, pouvant être liées à l'imprécision et à l'hétérogénéité des données produites par les appareils de mesures, ou à l'imperfection des modèles de simulation utilisés [GHI 89, BUI 19, ZHA 14]. La visualisation de données météorologiques soulève donc la question de la visualisation de l'incertitude liée aux données. Plusieurs travaux ont été réalisés sur la visualisation de l'incertitude [MAC 92, MAC 05, ARN 09, BRO 12, BON 14, TOM 23], et ont abouti à différentes approches, permettant d'intégrer dans la représentation la notion même d'incertitude autour de la donnée (la donnée retranscrite est-elle fiable? oui/non) [WOO 2012, KOR 20, KUB 20], ou de co-visualiser la donnée avec un indicateur quantitatif de confiance autour de cette donnée [HLA 11, COR 18, KEß 18, COU 24]. Ces différentes approches peuvent être appliquées aux données météorologiques [RUG 16, JOH 18], par exemple dans des contextes d'aide à la prise de décision. Dans le cadre de l'utilisation de données météorologiques issues d'une simulation d'ensemble (basée sur la création et l'analyse d'un ensemble de scénarios, générés au moyen de différentes conditions d'entrée ou de différents modèles) [BUI 19, LEC 21], la visualisation de l'incertitude autour des données est notamment centrale. La multiplicité des scénarios à représenter pose la question de l'agrégation des différents scénarios en indicateurs synthétiques, et l'utilisation de vues composées pour co-visualiser différents scénarios ou différents indicateurs issus de ces scénarios [WAN 18]. Plusieurs travaux ont proposé différentes approches de visualisation de données météorologiques issues de prévisions d'ensemble, que ce soit pour visualiser des tendances majeures en sortie de modèles et la variabilité de ces derniers, analyser la distribution des valeurs possibles parmi les différents scénarios selon l'espace et le temps, ou identifier des cas extrêmes [SAN 10, WU 13, MIR 14, FER 15, JAR 15, RAU 17, LIU 18, DUT 21].

3.1.2. Apports de la visualisation 3D

L'efficacité dans la perception des symboles graphiques, selon différents canaux visuels, présente des différences selon que l'on soit en 2D et en 3D, avec, globalement, de meilleurs résultats pour la 2D [MUN 14]. Ceci soulève la question de l'applicabilité et/ou de l'efficacité d'approches développées pour la représentation des données en 2D dans des environnements 3D (e.g. pour la représentation de différentes temporalités dans des jeux de données spatio-temporels, ou pour la représentation de l'incertitude). L'utilisation d'environnements 3D offre cependant la possibilité d'appréhender les dynamiques de phénomènes météorologiques dans les trois dimensions de l'espace [LI 17, XIE 19]. Plusieurs travaux proposent différentes approches pour visualiser cette distribution tridimensionnelle des données météorologiques: représentation d'iso-volumes ou d'iso-surfaces 3D (Figure 11) [RAU 13, RAU 14, RAU 15], intégration dans une scène 3D de différents plans représentant des « coupes » 2D du champ de données 3D (Figure 11) [RAU 15], intégration d'iso-lignes dans une vue 3D [RAU

14], utilisation de glyphes 3D animés pour représenter la direction et la vitesse du vent à différents niveaux de profondeur dans une scène 3D [LI 17]. Dans des domaines connexes, nous pouvons citer par exemple : 1. la co-visualisation de différentes données océanographiques 3D au moyen de différentes coupes transversales et iso-surfaces intégrées dans la même scène 3D [STE 00, XIE 19]; 2. l'encodage de variables océanographiques au moyen du volume de symboles ponctuels intégrés dans la scène 3D [GRO 08, XIE 19]; ou 3. dans le cadre de l'analyse d'un typhon, la co-visualisation dans une scène 3D de données de vents à différents niveaux de hauteur au dessus de la surface de la mer (représentées par différentes grilles 2D de glyphes prenant la forme de flèches), de données sur la fluctuation du niveau de la mer (représentées par une surface 2D), et d'une iso-surface permettant de distinguer la forme du typhon [XIE 19]. D'autres travaux, en apparence plus éloignés, s'intéressent à l'utilisation de glyphes dans des vues 3D pour représenter la distribution spatiale de données médicales multivariées [ROP 11], et peuvent faire écho à des besoins de représentation de données météorologiques 3D multivariées. L'utilisation de visualisations 3D interactives de données météorologiques est cependant plus utilisée dans des contextes de recherche, que dans des contextes opérationnels, tel que pour l'établissement de prévisions météorologiques à partir de l'analyse de données simulées [RAU 17, YU 20]. Des travaux de recherche portent cependant sur l'intérêt de ces représentations 3D et des approches de visualisation immersives (réalité virtuelle et augmentée) dans ces contextes opérationnels [RAU 17], ainsi que dans des domaines connexes à la visualisation de données météorologiques [OYS 22].

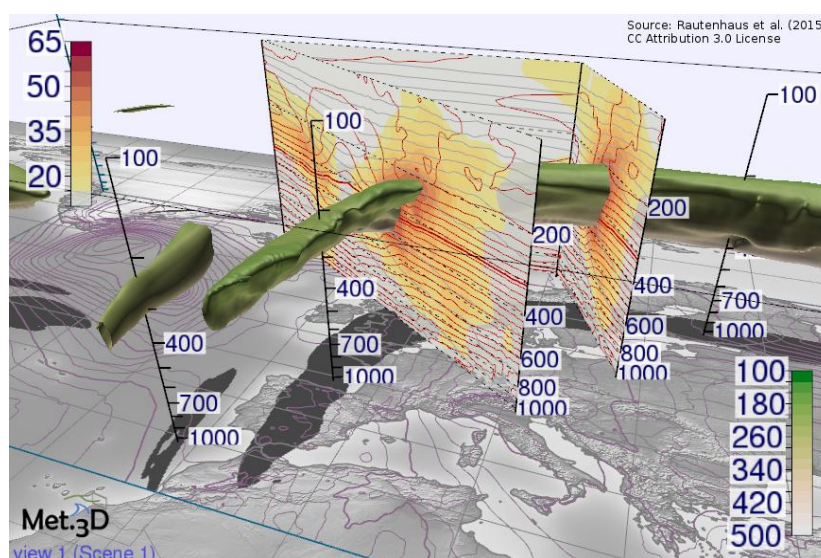


Figure 11. Sections verticales de la vitesse du vent horizontal (couleur) et de la température potentielle (courbes de niveau), isosurface correspondant à une vitesse de vent de 50m/s (échelle de couleur représentant la pression atmosphérique) [RAU 15].

Dans le cadre de la visualisation de données météorologiques en milieu urbain, l'utilisation d'environnements 3D offre également la possibilité d'intégrer ces données au sein de représentations 3D de la ville, permettant de co-visualiser les données météorologiques avec les formes du bâti urbain pour analyser l'influence de celles-ci sur le climat urbain. L'intégration du caractère tridimensionnel des données météorologiques pose la question des styles à proposer pour permettre de visualiser leur distribution dans les trois dimensions de l'espace, en évitant les possibles problèmes d'occlusion visuelle pouvant dissimuler une partie des données ou le bâti 3D [ELM 08], et en permettant à l'utilisateur de correctement interpréter les valeurs et leur distribution malgré les problèmes de perception inhérents à la visualisation 3D [MUN 14]. L'utilisation d'interfaces interactives, autorisant la modification de la position et de l'orientation du point de vue dans une scène 3D, permet également de répondre aux problèmes d'occlusion visuelle, en laissant la possibilité à l'utilisateur de contourner certains objets en masquant d'autres, même si cela s'effectue au prix d'un temps d'analyse plus long et d'une charge cognitive plus importante [MUN 14].

L'utilisation de vues 3D ouvre également la possibilité d'utiliser la troisième dimension de l'espace graphique comme canal visuel supplémentaire pour la représentation d'une variable additionnelle dans des données 2D [THA 10, LAN 21], augmentant le nombre d'indicateurs pouvant être co-visualisés au sein de la même représentation. On parle alors de visualisations 2.5D ou 2D+1, les deux termes se retrouvant dans la littérature, pour désigner ces représentations où l'espace géographique 2D est représenté par les axes horizontaux de la scène 3D et où une variable non-spatiale (thématique ou temporelle) est représentée par l'axe vertical (le terme de modélisation 2.5D est parfois utilisé pour désigner une modélisation de données 3D où une seule coordonnée verticale est considérée pour chaque coordonnée géographique [DEC 93]). L'axe vertical étant utilisé pour la représentation d'une donnée non-spatiale, cette approche ne permet pas une représentation de la distribution spatiale des données météorologiques dans les trois dimensions de l'espace. Dans cette optique, l'utilisation de vues 3D représente d'ailleurs une approche pour visualiser la distribution spatio-temporelle de données météorologiques, au travers de la perspective du cube spatio-temporel [HAG 70, AND 10]. La représentation de données spatiales 2D au moyen de la 3D reste cependant controversée, du fait de la difficulté de comparer la hauteur relative de deux symboles situés à différents niveaux de profondeur dans la scène 3D [MUN 14].

3.1.3. Comment co-visualiser données météorologiques et urbaines dans une vue 3D?

Plusieurs travaux proposent d'utiliser la texture des objets de la scène 3D pour représenter des données climatiques/météorologiques 2D ou 3D, au travers d'une échelle de couleur projetée sur ces objets: utilisation de la couleur du sol pour représenter la qualité de l'air au sol chez [KUR 20], utilisation de la couleur du bâti 3D pour représenter la température de l'air au sol chez [PIN 16], utilisation de la couleur du bâti 3D pour représenter la différence entre température de l'air et température de surface des bâtiments, toutes deux tridimensionnelles [BOU 09, 11]. Si ces approches permettent de co-visualiser à la fois les formes du bâti urbain et des données météorologiques 3D, représenter ces dernières au moyen d'échelles de couleur projetées sur des objets graphiques représentant des bâtiments réels rend la représentation de la distribution des données météorologiques (et notamment leur distribution selon l'axe vertical) dépendante de la distribution des bâtiments dans l'environnement urbain. La représentation de l'évolution des variables météorologiques selon la hauteur au-dessus du sol n'est pas uniforme et fait défaut pour toute zone faiblement construite comme les parcs urbains (du fait de l'absence d'objets graphiques sur lesquels projeter une échelle de couleur), alors que l'impact de tels éléments d'urbanisme sur l'évolution de la température (notamment selon l'axe vertical) est un exemple d'élément d'intérêt fort pour les météorologues.

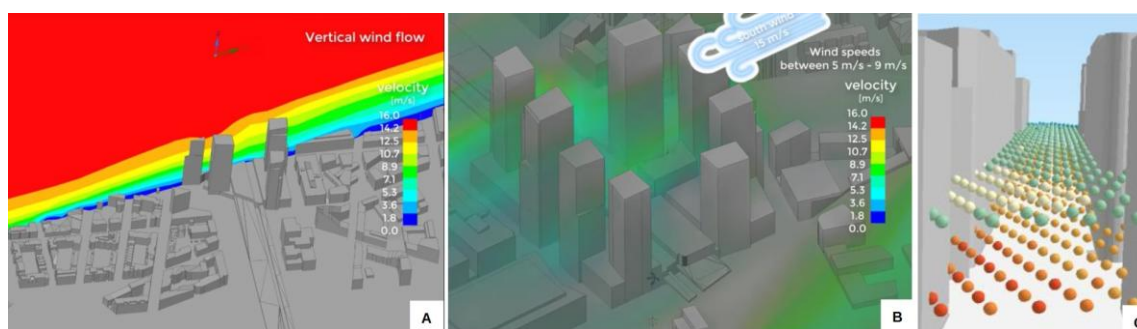


Figure 12. A et B) Champ 3D de valeurs de vitesse du vent représentées par une échelle de couleur, projetée sur une coupe verticale 2D (A); utilisant la transparence pour masquer certaines valeurs (B) (Kalasatama Digital Twin Project, www.hel.fi/helsinki/en/administration/information/general/3d/3d, ANSYS Discovery Live). C) Champ 3D de valeurs de température représentées par une échelle de couleur projetée sur des objets géométriques sphériques [RUA 19]

Plusieurs environnements issus de la visualisation scientifique comme Paraview [AHR 05], ANSYS Discovery Live [KRI 18] et VTK-m (Visualization ToolKit) [MOR 16], MET.3D [RAU 15], proposent différentes représentations de champs de données scalaires tridimensionnelles dans une scène 3D,

basées sur la représentation de coupes transversales de la donnée représentées sur un plan 2D (Figure 12.A), la représentation d'iso-volumes opaques représentant les espaces 3D correspondant à un intervalle de valeurs spécifiques, ou l'utilisation de la transparence combinée à une échelle de couleur pour représenter la donnée de manière à créer une sorte de brouillard dans la scène 3D (Figure 12.B) (la transparence étant utilisée pour masquer les valeurs au-delà d'un certain seuil). Ces environnements sont interactifs, permettant une exploration visuelle des données partant d'une vue d'ensemble jusqu'à une vue plus détaillée (selon le principe du Visual Information-Seeking Mantra de Shneiderman [SHN 03]: overview first, zoom and filter, then details on demand) : l'utilisateur peut choisir de focaliser son analyse sur une zone spatiale (en déplaçant les plans 2D représentant des coupes transversales du jeu de données 3D), ou sur un intervalle de valeurs (en modifiant les valeurs seuils déterminant la création d'iso-volumes ou d'iso-surfaces 3D ou le niveau de transparence). Cependant, ces solutions ne permettent pas une vue d'ensemble de la distribution des données météorologiques, que ce soit en termes de distribution spatiale (représentation en coupe transversale) ou en termes de distribution de valeurs (iso-volumes, iso-surfaces 3D et transparence). Certaines approches de visualisation venant du champ des topological data analysis, telles que les merge trees ou les contour trees [WU 13, YAN 21, LI 23], proposent des représentations synthétiques de l'évolution de la distribution d'iso-polygones ou d'iso-volumes, et de leur possibles fusions ou scissions, selon l'évolution de la valeur représentée par la frontière de ces objets géométriques. Ces représentations offrent ainsi une vision d'ensemble de la distribution des valeurs dans des champs de données 3D. Ces représentations peuvent cependant être difficiles à interpréter seules, et ne permettent pas de replacer les données 3D dans leur contexte spatial urbain, d'où l'importance de combiner celles-ci avec des représentations cartographiques.

Une autre approche consiste à représenter la donnée météorologique par une échelle de couleur projetée sur des objets graphiques additionnels, ne représentant pas des objets géographiques réels mais servant uniquement de support à l'échelle de couleur, qui seraient dispersés dans l'espace de la scène 3D couvert par la donnée météorologique. [RUA 20] propose ainsi d'utiliser une série de points remplissant l'espace des canyons urbains pour représenter l'évolution de la température dans cet espace libre de bâtiment (Figure 12.C). Un autre exemple [LI 17] propose de représenter à l'échelle du globe des données tridimensionnelles de vents par une série de couche de glyphes animés, sur lesquels est projetée une échelle de couleur représentant l'intensité du vent. Ces solutions proposent une vue d'ensemble de la distribution des données météorologiques en laissant visible la donnée à différents niveaux de profondeur de la scène 3D. L'encombrement de la scène nécessite cependant de se pencher sur les éventuels problèmes d'occlusion visuelle générés (trop forte densité d'objets 3D se superposant les uns aux autres, objets 3D masqués par un autre objet au premier plan).

Dans ces différentes approches, les valeurs des données météorologiques sont représentées par une échelle de couleur. Ce type de données est principalement représenté par des échelles utilisant des palettes arc-en-ciel (cf. 2.1), dont l'efficacité pour la représentation de valeurs quantitatives est critiquée, notamment pour le fait que l'évolution de la luminance dans ces échelles n'est pas graduelle et ne correspond pas à l'évolution des valeurs représentées [BRE 97, BOR 07, STA 15, DAS 18]. Des tests utilisateurs ont montré que l'utilisation d'échelles de couleur présentant une évolution graduelle de luminance était plus efficace pour interpréter les différences de valeurs dans les données climatiques que la multiple évolution de teinte des échelles arc-en-ciel (Dasgupta et al., 2018). D'autres tests utilisateurs ont montré que l'usage d'échelles de couleurs divergentes, présentant une double évolution graduelle de la luminance pour deux teintes opposées (exemple: transition bleu sombre à bleu clair, couleur blanche neutre, transition rouge clair à rouge sombre) permettait une meilleure interprétation que les échelles de couleurs arc-en-ciel pour l'analyse des magnitudes et de la répartition spatiale des données climatiques [STA 15], le choix des teintes devant cependant respecter certaines conventions pour éviter toute mauvaise interprétation (exemple: bleu et rouge pour représenter respectivement froid et chaud dans les valeurs de température) [SCH 18]. Cependant, malgré une meilleure efficacité des échelles respectant des évolutions graduelles de luminance, une meilleure efficacité de telles échelles sur l'analyse des données climatiques, beaucoup de climatologues estiment préférer les échelles arc-en-ciel pour la visualisation de données climatiques/météorologiques [DAS 18], d'où l'importance de

laisser la possibilité d'utiliser de telles échelles dans des environnements de visualisation de données climatiques/météorologiques.

3.1.4. *Visualisations 3D et 2.5D pour la co-visualisation de données météorologiques et urbaines: l'exemple du projet URCLIM.*

Nous présentons dans la suite de cette section deux exemples d'utilisation de visualisations 3D, pour l'analyse visuelle de données météorologiques simulées et de leurs relations avec la morphologie urbaine, par des utilisateurs experts dans un contexte de recherche. Ces deux approches [CHR 22, GAU 20, GAU 20b] ont été développées dans le cadre du projet ERA4CS URCLIM [MAS 20], intégrant des météorologues de différents instituts européens (France, Belgique, Pays-Bas, Finlande, Roumanie). Ces travaux présentent des exemples d'utilisation de vues 3D pour co-visualiser la distribution de données météorologiques simulées (ici, des valeurs de températures de l'air) avec différentes données urbaines (modèle urbain 3D, indicateurs morphologiques urbains), mais ne tirent pas de conclusions quant à la meilleure efficacité des vues 3D par rapport aux vues 2D pour l'analyse visuelle des phénomènes météorologiques urbains par des experts de la donnée (ici, des météorologues). Afin de rester au plus près du besoin des météorologues, ces environnements de visualisation furent développés à travers une approche de co-design telle que décrite par [LLO 11], intégrant les météorologues dans la conception de ces environnements. La visualisation d'une scène 3D sert ici deux objectifs.

Dans la première approche, l'espace graphique de la scène 3D représente les trois dimensions de l'espace géographique urbain. Le but est de visualiser l'évolution des valeurs de températures dans les trois dimensions de l'espace, et de co-visualiser ces données avec les formes et la densité du bâti urbain afin d'identifier de potentielles relations avec la distribution 3D de la température. Le second exemple présente une approche 2.5D/2D+1: l'espace géographique est réduit à un plan 2D, n'étant considérées que les températures de l'air au niveau du sol, et la dimension graphique verticale de la scène 3D est utilisée comme canal visuel additionnel pour représenter les valeurs d'un indicateur morphologique supplémentaire, le but étant d'analyser les relations entre une combinaison d'indicateurs avec la distribution des valeurs de températures. Dans les deux approches, la possibilité de naviguer dans la scène 3D occupe un rôle central dans l'analyse visuelle. Les données météorologiques considérées sont issues du modèle TEB (Town Energy Balance) de Météo-France [MAS 00] (extension du modèle Meso-NH, Mesoscale Non-Hydrostatic model [LAC 18], pour le milieu urbain), et se présentent sous la forme d'une grille de points 3D, localisés à différents niveaux de hauteur au dessus du sol pour une série de positions géographiques.

Projetés sur un espace 2D horizontal, ces points forment une grille carrée, d'une résolution d'environ 650 mètres au niveau du sol. Projetés sur un plan vertical, les points du premier niveau de la grille sont situés à 0.5 mètres au dessus du sol (la position absolue des points dépendant donc de l'altitude au niveau du sol), et la résolution de la grille est irrégulière: l'espacement entre les points selon l'axe vertical augmente avec l'éloignement par rapport au sol, allant d'un espacement d'un mètre entre les points des deux premiers niveaux de hauteur (proches du sol), à un espacement d'environ 20 mètres entre les points des deux derniers niveaux de hauteurs (proches du niveau des toits). Si l'espacement entre les points des niveaux proches du sol peut être considéré comme constant, il évolue pour les points des niveaux supérieurs. Plus l'on s'éloigne du sol, plus l'espacement vertical entre les points varie selon leur position géographique. Ce modèle est décrit de manière plus extensive dans le chapitre 1 [RUA 25]. Pour caractériser la morphologie urbaine, différents indicateurs sont considérés, dont ceux identifiés par [ROD 19] et fournis dans les résultats du projet MApUCE [BOC 18], à travers un découpage en «Unités de Surface de Référence» (Reference Surface Unit, RSU), légèrement plus grandes qu'un îlot urbain. Ces données sont également décrites de manière plus détaillée dans le chapitre 1 [RUA 25]. Les approches présentées ici sont appliquées à la visualisation de données météorologiques scalaires telles que la température de l'air ou la pression atmosphérique. La question de la visualisation de données vecteur comme le vent, combinant information sur l'intensité et la direction du vent, n'est pas traitée au moyen de ces approches. Enfin, ces travaux n'abordent pas les

problématiques de la représentation de l'incertitude autour des données météorologiques urbaines, ni de la représentation de la composante temporelle de ces données.

3.2. Co-visualisation de données météorologiques 3D simulées et d'indicateurs morphologiques 2D dans leur contexte spatial urbain.

L'objectif est ici de permettre d'analyser visuellement la distribution spatiale tridimensionnelle de données de température de l'air simulées, notamment en comparant la baisse de la température avec l'éloignement du sol selon différentes zones spatiales, et d'analyser les relations entre la température de l'air et la morphologie du tissu urbain, représentée ici par les formes du bâti urbain et différents indicateurs morphologiques utilisés en entrée des modèles de simulation. L'analyse visuelle repose à la fois 1) sur la représentation des données météorologiques et urbaines dans une même scène 3D, 2) sur les possibilités de navigation dans la scène 3D permettant de modifier l'échelle et le point de vue de la représentation, et 3) sur la possibilité pour l'utilisateur de modifier le contenu et le style de la représentation selon l'échelle et le point de vue, ou pour mettre en avant certaines données ou intervalles de valeurs.

3.2.1. Proxys géométriques et navigation dans une scène 3D

L'exemple pris par ces travaux concerne le centre de la ville de Paris. Les données de températures de l'air sont ici considérées comme homogènes dans un polyèdre formé autour des points de la grille 3D produite par le modèle TEB. La scène 3D présente une représentation simplifiée du bâti urbain, permettant de distinguer les zones peu ou très bâties, et les canyons urbains. Les valeurs de température sont représentées par une échelle de couleur selon une palette HCL (Hue, Chroma, Luminance) respectant un gradient continu de luminance selon les recommandations de [STA 15], pour éviter le problème posé par les échelles de couleur arc-en-ciel RGB. L'enjeu est de pouvoir représenter l'évolution des valeurs de températures dans les trois dimensions spatiales, tout en gardant visible la représentation du bâti urbain. L'échelle de couleur est ainsi projetée sur une série de structures géométriques, nommées proxys géométriques. Trois types de structures géométriques sont définies (Figure 13) : 1. Une série de plans horizontaux placés les uns au-dessus des autres, chaque plan correspondant à un niveau de hauteur au-dessus du sol. L'objectif est de pouvoir co-visualiser la distribution horizontale des valeurs de températures, à différents niveaux selon l'axe vertical. 2. Un nuage de points 3D. L'objectif est de permettre une visualisation de la distribution 3D de température en laissant visibles, à travers le nuage de points, des valeurs situées à différents niveaux de profondeur dans la scène 3D, ainsi que le bâti urbain. 3. Une série de plans verticaux, extrudés à partir du réseau routier urbain. L'objectif est d'utiliser l'espace graphique formé par les canyons urbains dans la représentation 3D du bâti pour représenter la distribution verticale des données de température dans différentes zones de la ville.

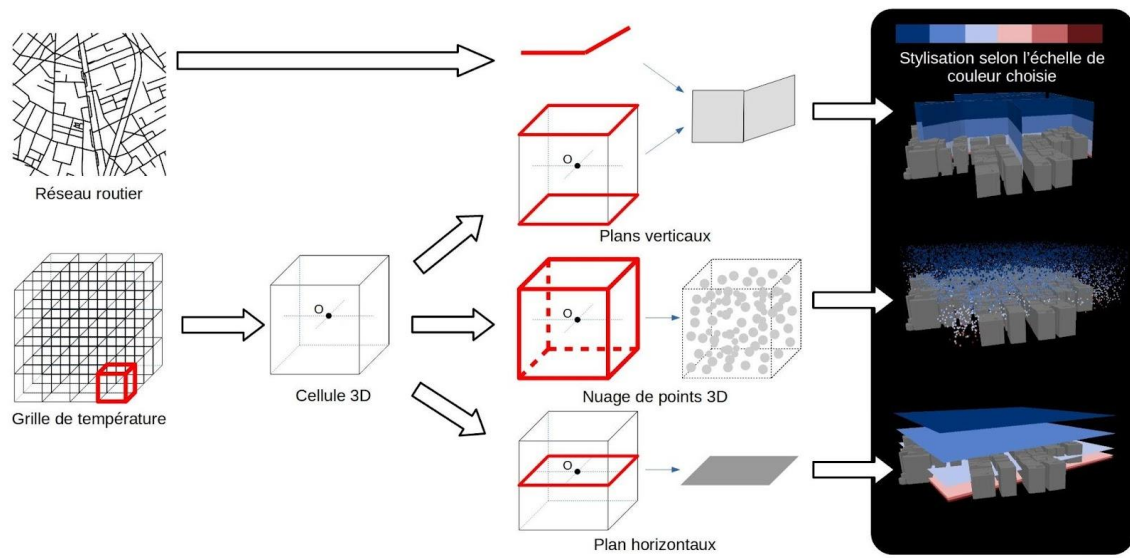


Figure 13. Représentation des valeurs de températures de l'air par une échelle de couleur projetée sur un proxy géométrique (D'après les résultats du projet URCLIM, avec l'autorisation de J. GAUTIER, 2024)

Ces différents proxys géométriques, interchangeables dynamiquement, peuvent être utilisés seuls ou conjointement selon l'échelle et le point de vue de la représentation, et sont complémentaires aux possibilités de navigation dans la scène 3D (déplacement, zoom et changement d'orientation de la caméra), permettant d'aller d'une analyse globale de la distribution de température à l'échelle de la ville jusqu'à l'analyse d'une zone spatiale spécifique pour observer de possibles corrélations locales entre température et morphologie urbaine. Comme le montre la Figure 14, l'utilisateur peut 1) analyser la distribution de la température au sol à l'échelle de la ville, depuis un point de vue orthogonal, au moyen d'une projection des valeurs de température sur un plan horizontal, puis 2) effectuer, sur un quartier identifié, une analyse de la distribution 3D des valeurs de température selon l'agencement des bâtiments avec un point de vue oblique au moyen de plans verticaux, et enfin 3) analyser une rue en détail en utilisant une combinaison de plans horizontaux pour représenter la température près du sol, et de nuages de points 3D pour représenter la température jusqu'au niveau des toits.

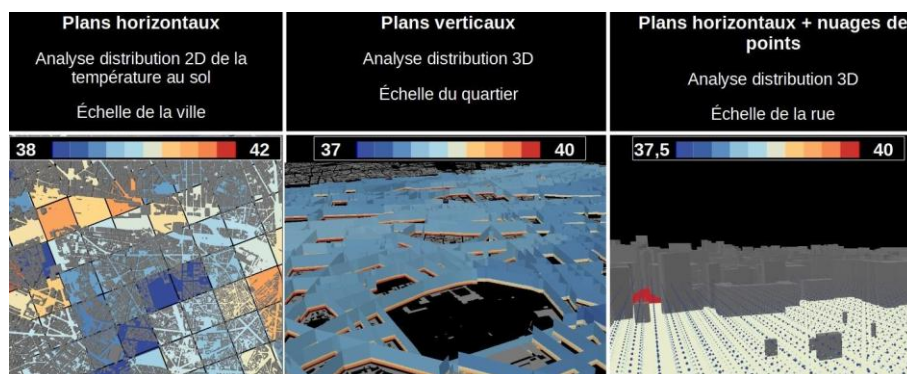


Figure 14. Utilisation de différents proxys géométriques pour l'analyse visuelle des données de température en fonction de l'échelle et du point de vue utilisés (D'après les résultats du projet URCLIM, avec l'autorisation de J. GAUTIER, 2024).

3.2.2. Modification dynamique du style de la représentation

De manière à améliorer l'analyse des relations entre température et morphologie urbaine, les valeurs d'un indicateur morphologique urbain 2D sont co-visualisées dans la scène 3D avec les données de température. A cette fin, les valeurs de l'indicateur sont représentées par une seconde échelle de couleur projetée, elle, sur le modèle 3D urbain. L'échelle de couleur utilisée est propre au jeu de données représenté : dégradés de vert pour le taux de végétation, échelle de couleur mise au point lors

du projet Mapuce pour la représentation des LCZ, etc. Cet indicateur peut être choisi et modifié dynamiquement au travers de l'interface de visualisation en fonction du besoin, par exemple : 1. recherche d'une corrélation entre la présence de faibles valeurs de températures, représentées par des couleurs froides projetées sur des plans verticaux, avec la présence de zones peu construites, ou fortement végétalisées représentées par des couleurs vertes sombres projetées sur le modèle urbain 3D ; 2. observation des différences d'évolution de la température de l'air en fonction de l'éloignement du sol selon plusieurs zones spatiales correspondant à différentes valeurs dans la classification LCZ représentées sur le modèle urbain 3D. L'ajout d'informations augmentant l'encombrement visuel de la scène 3D, il est possible de modifier dynamiquement le style de représentation des proxys et bâtiments (Figure 15) de manière à limiter les effets d'occlusion et d'encombrement en fonction de l'échelle et du point de vue choisis. L'utilisateur peut jouer sur différents paramètres graphiques tels que le niveau de transparence des plans horizontaux et verticaux, la taille/densité et l'agencement des points, et le niveau de transparence des façades et des toits des bâtiments du modèle 3D urbain. L'interaction permet de modifier le style de la représentation afin de focaliser l'analyse visuelle sur certains intervalles de températures, identifier des valeurs extrêmes, des seuils localisés, ou des gradients dans la distribution spatiale. La densité et/ou la taille des points d'un nuage de points peuvent être corrélées aux valeurs de températures représentées, pour focaliser l'attention de l'utilisateur sur des valeurs extrêmes de températures, représentées par des nuages denses de gros points. Il est aussi possible de modifier la plage de valeur de températures représentée par l'échelle de couleur au moyen d'un histogramme interactif, pour mettre en évidence certains intervalles de température. La palette de couleur peut également être modifiée : si une échelle de couleur divergente bleue-rouge permet de maximiser la perception des écarts de valeurs, il est possible de passer à une échelle séquentielle de niveaux de rouge pour éviter les biais d'interprétation si la valeur minimum des données de températures reste une valeur élevée, ou utiliser une échelle de couleur arc-en-ciel si les utilisateurs experts sont plus à l'aise avec ce type d'échelle de couleur [DAS 18].

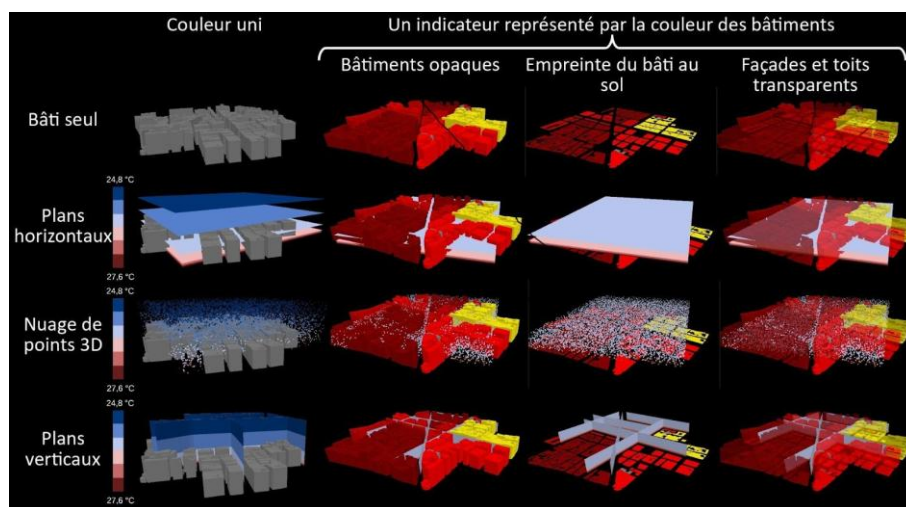


Figure 15 Options de styles pour la représentation des données de températures et des données urbaines (Classification LCZ) [CHR 22].

3.3. Visualisation 2.5/2D+1 pour l'analyse visuelle de données météorologiques 2D simulées et d'une combinaison d'indicateurs morphologiques 2D.

L'objectif est ici de permettre d'analyser visuellement les relations entre la combinaison de deux indicateurs morphologiques et la distribution de valeurs de températures de l'air simulées. L'utilisation de vues 3D permet ici d'intégrer une variable visuelle additionnelle à la représentation (l'axe vertical), pour représenter une variable supplémentaire dans les données (un second indicateur morphologique). La représentation des données de températures est simplifiée, en ne considérant qu'une grille 2D de températures correspondant au premier niveau de hauteur au-dessus du sol du modèle TEB (0.5 mètres au-dessus du sol).

Dans l'hypothèse où les données sont modélisées selon un même découpage spatial, les trois variables considérées sont représentées de la manière suivante : 1. Un premier indicateur A est représenté par la hauteur de polyèdres extrudés depuis les entités du découpage spatial utilisé, selon une échelle linéaire, une hauteur nulle correspondant à la valeur minimale dans la zone d'étude. 2. Les valeurs d'un second indicateur B sont groupées en 5 classes et représentées par un dégradé de vert projeté sur les polyèdres extrudés. 3. La température est représentée au travers d'isolignes 3D de différentes couleurs selon une échelle divergente bleu-rouge représentant des valeurs seuils. Ces isolignes 3D prennent la forme d'une série de « murs » verticaux placés dans la scène 3D au-dessus des polyèdres extrudés.

Les deux indicateurs morphologiques sont choisis parmi ceux mis en avant dans [ROD 19] et fournis par le projet MAppUCE [BOC 18] à travers un découpage de l'espace urbain en RSU : 1) l'indicateur A est la « portion de surface bâtie » (Building Surface Fraction, BSF), rapport entre la surface bâtie et la superficie totale des RSU ; 2) l'indicateur B est la « hauteur des éléments de rugosité » (Height of Roughness Element, HRE), qui correspond à la BSF des RSU, pondérée par la hauteur moyenne des bâtiments au sein de cette RSU. La Figure 16 montre une visualisation basée sur une division de l'espace selon une grille hexagonale régulière d'une résolution de 20 mètres. Pour la construction de cette visualisation, les valeurs de BSF, HRE et de températures sont ré-échantillonnées selon la grille hexagonale utilisée. Les frontières des arrondissements de Paris sont superposées aux hexagones pour permettre à l'utilisateur de se repérer géographiquement.

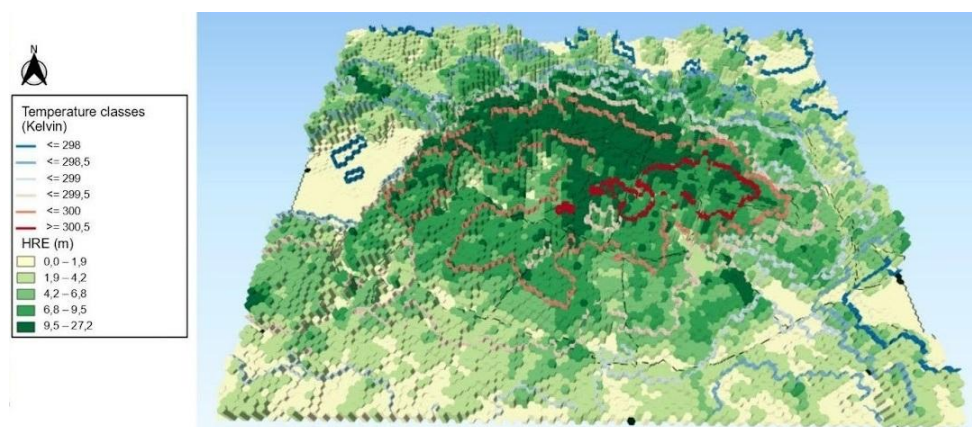


Figure 16. Options de styles pour la représentation des données de températures et des données urbaines (Classification LCZ) (Christophe et al., 2022).

L'analyse croisée de ces différentes données, de l'échelle de la ville jusqu'à l'analyse d'une zone en particulier, s'appuie sur les possibilités de navigation dans la scène 3D (déplacement, zoom et changement d'orientation de la caméra) permettant de modifier l'échelle et le point de vue de la représentation comme le montre la Figure 17. A partir d'une vue d'ensemble de la zone d'étude selon un point de vue orthogonal au plan géographique, l'utilisateur peut repérer des îlots de fraîcheur et de chaleur par l'observation d'isolignes bleues ou rouges (hyper-centre de Paris) (Figure 17 à gauche). Par une succession de zooms, de déplacements et de rotations de la caméra, l'utilisateur peut analyser conjointement les valeurs de BSF et d'HRE dans ces zones : l'observation de cellules de faible hauteur et de couleur claire près des isolignes bleues montre une zone peu construite là où les valeurs de températures sont plus basses (jardin du Luxembourg) ; l'observation de cellules de hauteur élevées mais de couleur peu sombre près des isolignes rouges montre un taux de construction important dans cette zone de fortes chaleurs (quartier du Marais) mais qui ne présentent pas les valeurs de HRE les plus élevées (Figure 16 à droite). Ces observations peuvent conduire à l'identification d'indicateurs plus déterminants dans l'apparition des îlots de chaleur, tels que la densité de population.

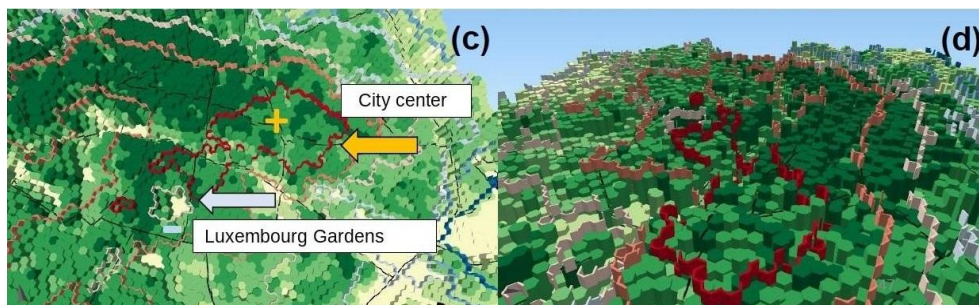


Figure 17. Analyse visuelle des relations entre température de l'air à 0.5 mètres au-dessus du sol, et les indicateurs BSF et HRE [CHR 22].

3.4. Retours des utilisateurs experts sur les visualisations proposées

Comme précisé plus tôt, les approches de visualisation présentées furent conçues selon une démarche collaborative et itérative incluant les utilisateurs experts impliqués dans le projet URCLIM, conformément aux approches de co-design décrites par [LLO 11]. Les visualisations proposées furent présentées et discutées avec les scientifiques des différents instituts météorologiques impliqués, en particulier les chercheurs du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo France, lors de différentes réunions et ateliers. Les propositions de visualisations ne furent pas soumises à une évaluation quantitative au travers d'expérimentations contrôlées, difficiles à exploiter dans le cadre du projet au vu du faible nombre d'utilisateurs experts disponibles (moins d'une douzaine lors de chacun des événements). Les discussions avec les acteurs du projet URCLIM ont cependant permis d'obtenir des retours qualitatifs à chaque itération sur les données représentées, la pertinence des représentations utilisées, les modalités d'interaction proposées, et la capacité des visualisations à soutenir l'analyse visuelle.

3.4.1. Visualisation de la distribution 3D des données de température

La co-visualisation des données de température avec un modèle 3D urbain a été très appréciée pour les contextualiser et les situer géographiquement, en identifiant des zones spécifiques pouvant être corrélées à des valeurs de température plus basses (rivières, zones boisées), ou de grandes avenues qui pourraient présenter une distribution particulière sur l'axe vertical. La co-visualisation avec un indicateur morphologique projeté sur les bâtiments a été considérée comme intéressante pour la validation des modèles mais également pour évaluer la pertinence d'intégrer d'autres indicateurs en entrée de modèle. L'utilisation de plans horizontaux et verticaux comme supports aux données de températures a été très appréciée, malgré les possibles problèmes d'occlusion visuelle et de perception de la couleur avec la transparence. Les plans horizontaux ont été appréciés pour l'analyse comparée de la distribution 2D des données à différents niveaux au-dessus du sol, tandis que les plans verticaux semblaient avoir la préférence des météorologues pour l'analyse de la distribution 3D des données, en permettant de comparer l'évolution verticale de la température dans plusieurs zones spatiales, et d'identifier à partir de quelle hauteur au-dessus du sol une homogénéité horizontale de la température était observée. En revanche, l'utilisation de nuages de points 3D a reçu un accueil mitigé, en raison de la difficulté d'interpréter la position des points relativement aux autres, limitant l'interprétation de la distribution des valeurs. Les météorologues ont apprécié la possibilité de pouvoir naviguer dans la scène 3D à travers plusieurs échelles jusqu'au bloc urbain, en étant capables de modifier le proxy utilisé en fonction de l'échelle et du point de vue. Les possibilités de modifier le style de représentation des données à travers différents paramètres graphiques sont apparues très importantes pour eux, l'histogramme interactif permettant de modifier l'échelle de couleur étant considérée comme un élément très innovant. Cet outil permet également un questionnement sur les échelles de couleur à proposer en fonction de la forme prise par la distribution des données. Enfin, même si les modèles de prévisions sont amenés à bénéficier d'une meilleure résolution (notamment horizontale) à l'avenir, les visualisations proposées doivent faire en sorte que l'utilisateur garde à l'esprit les différences de dimension et de résolution entre le modèle 3D urbain (3D, métrique), les données de températures (3D,

650 mètres en horizontal, entre 1 et 20 mètre en vertical), et l'indicateur représenté (2D, bloc urbain), afin de ne pas induire des erreurs d'interprétation des données représentées.

3.4.2. 2.5D/2D+1 pour la co-visualisation avec une combinaison d'indicateurs

L'utilisation d'une division de l'espace irrégulière, comme la division en RSU, est apparue comme rendant la scène 3D difficilement interprétable, l'hétérogénéité des formes et des tailles des RSU ajoutant une complexité supplémentaire à la scène 3D, notamment au regard des échelles spatiales représentées. Le volume des éléments extrudés dépendant de leur aire au sol, deux éléments représentant une même valeur de BSF étaient également plus ou moins discernables en fonction de ce facteur, provoquant des biais d'interprétation. A l'inverse, l'utilisation d'une grille régulière, rendant les cellules plus facilement comparables entre elles et les isolignes plus lisibles, a été considérée comme facilitant l'analyse visuelle. En revanche, la perte des formes géographiques avec l'utilisation de grilles hexagonales régulières implique d'intégrer des éléments de repères à la représentation pour ne pas perdre l'utilisateur (bordures d'arrondissements superposées en noir et étiquettes des quartiers parisiens). Malgré les problèmes soulevés par l'utilisation de la 3D pour la représentation de valeurs quantitatives (difficulté de comparer la hauteur ou la taille des éléments selon leur profondeur de champ) (Munzner, 2014), l'utilisation d'une approche en 2.5D/2D+1 est apparue intéressante pour intégrer un indicateur additionnel à la représentation graphique. La représentation combinée des valeurs de HRE et de BSF rendait possible de localiser les zones de faible construction et de forte construction, tout en distinguant les zones de grands ensembles des autres zones bâties. Les isolignes 3D ont été considérées comme suffisamment lisibles et interprétables pour discerner des zones de températures similaires, et les comparer avec la représentation combinée HRE-BSF. La possibilité de se déplacer librement dans la scène 3D, selon plusieurs échelles et points de vue, est apparue comme particulièrement utile pour passer d'une analyse de la distribution des données à l'échelle de la ville, à une analyse plus fine permettant d'identifier des écarts et des gradients locaux dans les données représentées.

Les travaux effectués dans le cadre d'URCLIM représentent un exemple des possibilités offertes par la visualisation 3D pour l'analyse visuelle multi-échelles de données climatiques urbaines par des utilisateurs experts. Les retours des météorologues ont confirmé l'intérêt de l'utilisation d'environnements 3D, que ce soit pour l'analyse visuelle de la distribution de données météorologiques dans les trois dimensions de l'espace urbain, ou pour la co-visualisation de données 2D avec une combinaison d'indicateurs au moyen de la 2.5D/2D+1. Les possibilités de navigation entre différentes échelles et points de vue et la possibilité de modifier dynamiquement les données représentées et les styles utilisés en fonction du besoin, sont apparues comme centrales pour les météorologues. Les retours des météorologues impliqués dans le projet URCLIM montrent également leur enthousiasme pour des approches de co-visualisation de données météorologiques simulées avec les indicateurs utilisés en entrée des modèles de prévision, dans le cadre de la validation de ces derniers. Les propositions en ce sens (projection des températures et des indicateurs sur des proxy géométriques et un modèle urbain, utilisation de la 2.5D/2D+1 pour représenter une combinaison d'indicateurs couplée à l'utilisation d'isolignes), sont considérées comme extensibles à l'analyse des relations entre d'autres données météorologiques et différents types d'indicateurs morphologiques. Aussi, elles offrent un outil pour évaluer la pertinence de la prise en compte d'autres indicateurs ou données contextuelles pour l'analyse des phénomènes climatiques urbains : données climatiques contextuelles (précipitations), autres données urbaines (pertes thermiques, caractéristiques des bâtiments), indicateurs socio-économiques (Sepena et al. 2021). Une telle approche multimodale dans la représentation des données météorologiques dans un environnement 3D offre un cadre pour l'élaboration de nouvelles modalités de représentation, que ce soit pour d'autres données 3D scalaires comme la température de l'air, pour des données 3D vecteur comme le vent [BEL 18], ou pour l'intégration de la dimension temporelle des données météorologiques (données 3D+T ou 4D). Enfin, les retours de météorologues valident l'utilisation d'une approche de co-conception avec les utilisateurs experts pour l'élaboration

d'approches de visualisation innovantes pour l'analyse de données et pertinentes au regard de leurs besoins.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé de nouvelles approches de visualisation, proposant d'améliorer l'analyse, la prise de décision, ou la communication autour des données complexes permettant de décrire le climat urbain.

La proposition de nouvelles normes de représentation cartographique pour les données météorologiques et climatiques, proposées par différents collectifs de recherche internationaux, ouvre de nouvelles perspectives pour la représentation visuelle des données climatiques de plus en plus nombreuses, à même de répondre aux enjeux climatiques urbains et aux nouveaux besoins liés à la planification urbaine. L'exemple de la conception de cartes climatiques à visée opérationnelle pour Toulouse Métropole montre l'importance de la mise en place de ces nouvelles normes de représentation, telle que la structuration des informations en différentes vignettes dans une planche cartographique, qui permet une représentation progressive et accessible de données complexes, facilitant leur compréhension et leur utilisation par différents types de publics dans la planification urbaine. L'application, dans l'édification de telles normes, des principes issus de la sémiologie graphique [BER 67, 77] et d'autres travaux de recherche postérieurs sur la visualisation de données [TUF 83, MAC 04, MUN 14, GRA 22] (définition et hiérarchisation de variables pertinentes à représenter, choix entre différents canaux visuels en fonction de la nature des variables et de leur importance) contribue à améliorer la lisibilité et la pertinence des cartes pour différents publics.

L'exemple du projet ERA4CS URCLIM montre, quant à lui, que l'utilisation d'environnements de visualisation 3D représente un outil intéressant pour l'analyse des données météorologiques simulées, à des fins scientifiques. En représentant la distribution des données dans les trois dimensions de l'espace, elle permet une compréhension plus intuitive des phénomènes climatiques et de détecter des tendances et des relations avec la morphologie urbaine qui pourraient échapper à une analyse visuelle à l'aide de représentations cartographiques 2D. Ces travaux montrent aussi l'intérêt pour les chercheurs travaillant sur le climat urbain pour des environnements de visualisation à même de permettre une co-visualisation, dans leur contexte spatial urbain, de données météorologiques simulées avec d'autres variables, utilisées notamment en entrée des modèles de simulation. L'utilisation d'un environnement 3D présente alors un autre intérêt en permettant d'augmenter le nombre d'informations visibles à l'écran, en utilisant la troisième dimension comme canal visuel additionnel, afin d'offrir une analyse visuelle croisée de différents paramètres influant le climat urbain.

Les retours de ces différents travaux montrent enfin l'importance croissante de la collaboration pluridisciplinaire entre experts en cartographie, géomatique et climatologie urbaine, et l'intérêt d'inclure les utilisateurs visés dans la conception d'environnements de visualisation. En ce sens, l'application de la méthode chorématique dans les travaux liés à la métropole de Toulouse présente un exemple d'utilisation de représentations simplifiées des phénomènes climatiques urbains permettant de renforcer les échanges entre publics de divers horizons. Ces approches de visualisation servent en effet de base pour le dialogue et la discussion entre chercheurs, urbanistes, décideurs et élus locaux. Elles offrent un espace de discussion et d'échanges collaboratif et informé pour aborder les enjeux climatiques et urbains, soulignant ainsi l'importance de la visualisation dans la prise de décision et l'action collective.

Bibliographie

[AND 10] ANDRIENKO, G., ANDRIENKO, N., DEMSAR, U., DRANSCH, D., DYKES, J., FABRIKANT, S. I., ... & TOMINSKI, C., « Space, time and visual analytics. », *International journal of geographical information science*, 24(10), 1577-1600, 2010.

- [AGU 21] AGUILERA T., ARTIOLI F., BARRAULT-STELLA L., HELLIER E., PASQUIER R., « Les cartes de l'action publique ». *Pouvoirs, territoires, résistances, Presses universitaires du Septentrion*, 378 p, 2021.
- [AHR 05] AHRENS J., GEVECI B., LAW C., « Paraview: An end-user tool for large data visualization », *The visualization handbook*, 717, 2005.
- [ALL 83] ALLEN J. F., « Maintaining knowledge about temporal intervals ». *Communications of the ACM*, vol. 26, no 11, p. 832-843, 1983.
- [ANT 04] ANTONI J.-P., KLEIN O., AND MOISY S., « Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique. » *Cybergeo : European Journal of Geography*, 2004.
- [ARN 09] ARNAUD A., DAVOINE P.-A., « Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude. » *SAGEO 2009*, Nov, 2009. Paris, France, 12–32, 2009.
- [ASH 15] ASHIE Y., TANAKA T., SADOHARA S., INACHI S., « Urban climatic map studies in Japan: Tokyo and Yokohama », *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*, Routledge, 2015.
- [BEC 15] BECHTEL B., ALEXANDER P.J., BÖHNER J.; CHING J., CONRAD O., FEDDEMA J., MILLS G., SEE L., STEWART I., « Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. », *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 4, 199-219. <https://doi.org/10.3390/ijgi4010199>, 2015
- [BEL 18] BELGACEM H., LEDUC T., MUSY M., « Towards a QGIS-based Graph Carrier of Urban Information and Spotting Wind Behavior at the Pedestrian Level », *10th International Conference on Urban Climate/14th Symposium on the Urban Environment*, 2018.
- [BER 25] BERNARD J., LEDUC T., RODLER A., MERVILLA A., HAMDI H., « Geoclimatic modeling: tools, limits and outlooks », *Risques Urbains*, 2025.
- [BER 67] BERTIN J., « Sémiologie graphique. Les diagrammes. Les réseaux. Les cartes », Paris/La Haye, Mouton ; Paris, Gauthier-Villars, 1967.
- [BOC 18] BOCHER E., PETIT G., BERNARD J., PALOMINOS S., « A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MAPUCE tools chain », *Urban climate*, Vol. 24, 153-174. DOI : 10.1016/j.uclim.2018.01.008, 2018
- [BOC 21] BOCHER E., BERNARD J., LE SAUX WIEDERHOLD E., LECONTE F., PETIT G., PALOMINOS S., NOÛS C., « GeoClimate: a Geospatial processing toolbox for environmental and climate studies. », *Journal of Open Source Software*, 6 (65), pp.3541. [10.21105/joss.03541](https://doi.org/10.21105/joss.03541). halshs-03359757, 2021.
- [BON 14] BONNEAU, G. P., HEGE, H. C., JOHNSON, C. R., OLIVEIRA, M. M., POTTER, K., RHEINGANS, P., & SCHULTZ, T., « Overview and state-of-the-art of uncertainty visualization. », *Scientific visualization: Uncertainty, multifield, biomedical, and scalable visualization*, 3-27, 2014.
- [BOU 09] BOUYER J., « Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. », *PhD thesis*, 2009.
- [BOU 11] BOUYER J., MUSY M., HUANG Y., ATHAMENA K., « Mitigating Urban Heat Island Effect by Urban Design: Forms and Materials. », *Cities and Climate Change: Responding to an Urgent Agenda*, 164-181, 2011.
- [BOR 07] BORLAND D., TAYLOR, R., « Rainbow color map (still) considered harmful. », *IEEE computer graphics and applications*, 27(2), 14–17, 2007.
- [BRE 97] BREWER C. A., « Spectral schemes: Controversial color use on maps. », *Cartography and Geographic Information Systems*, 24(4), 203–220, 1997.
- [BRO 12] BRODLIE, K., ALLENDES OSORIO, R., & LOPES, A., « A review of uncertainty in data visualization. », *Expanding the frontiers of visual analytics and visualization*, 81-109, 2012.
- [BRU 86] BRUNET R., « La carte-modèle et les chorèmes. », *Mappemonde*. 86 (4):2-6, 1986.
- [BUI 19] BUIZZA, R., « Introduction to the special issue on “25 years of ensemble forecasting”. », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145, 1-11, 2019.
- [DEC 93] DE CAMBRAY B., « Three-dimensional (3D) modelling in a geographical database. », *AUTOCARTO-CONFERENCE* (pp. 338-338). *Asprs American Society For Photogrammetry And Remote Sensing*, 1993.
- [DUC 25] DUCHE S., DUBREUIL V., MADELIN M., DUPUIS V., FOISSARD X., GRIPAY Y., ROME S., SERVIGNE S., « Mesures et spatialisation de données climatiques et de qualité de l'air en milieu urbain en France. », *Risques Urbains*, 2025.
- [CAS 17] CASANOVA ENAULT L., CHATEL C., « La modélisation graphique de phénomènes émergents pour répondre aux besoins de la prospective », *Mappemonde* (119), 2017.

- [CHR 22] CHRISTOPHE S., GAUTIER J., CHAPRON P., RILEY L., MASSON V., « 3D geovisualization for visual analysis of urban climate. », *Cybergeo: European Journal of Geography*, 2022.
- [COR 18] CORRELL M., MORITZ D., HEER J., « Value-suppressing uncertainty palettes. », *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-11), 2018.
- [COU 24] COURTEILLE, L., LAGACHERIE, P., BOUKHELIFA, N., LUTTON, E., & TARDIEU, L., « Using spatial aggregation of soil multifunctionality maps to support uncertainty-aware planning decisions. », *European Journal of Soil Science*, 75(4), e13523, 2024.
- [DAS 18] DASGUPTA A., POCO J., ROGOWITZ B., HAN K., BERTINI E., SILVA C. T., « The effect of color scales on climate scientists' objective and subjective performance in spatial data analysis tasks. », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, PP, 1-1, 2018
- [DUT 21] DUTTA S., FEIGE K., RINK K., ZECKZER D., « Uncertainty-aware Detection and Visualization of Ocean Eddies in Ensemble Flow Fields-A Case Study of the Red Sea. », *Workshop on visualisation in environmental sciences (EnvirVis). The Eurographics Association*, 2021.
- [DAS 18] DASGUPTA A., POCO J., ROGOWITZ B., HAN K., BERTINI E., SILVA C.T., « The effect of color scales on climate scientists' objective and subjective performance in spatial data analysis tasks », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, DOI : 10.1109/TVCG.2018.2876539, 2018.
- [DAV 01] DAVOINE P.-A., BRUNET R., CLAVANDIER G., CHARRIER P., FAVIER R., AND MARTIN H., « Le projet sidira : une approche pluri-disciplinaire pour une meilleure appropriation des risques naturels via les nouvelles technologies de l'information. », *Actes du colloque-SIRNAT 2001*, 2001
- [DAV 04] DAVOINE P., GENSEL J., AND MARTIN H., « A web-based multimedia framework for discussing spatio-temporal information : Application to natural hazards. », *12th International Conference on Geoinformatics*, pages 149-156, 2004.
- [DIB 92] DIBIASE D., MACEACHREN A. M., KRYGIER J. B., AND REEVES C., « Animation and the role of map design in scientific visualization. », *Cartography and geographic information systems*, 19(4) :201-214, 1992.
- [DUK 05] DUKACZEWSKI D., « Entities-cartotopic method of selection of static and dynamic variables for temporal cartographic animations. », *Proceedings of the XXII rd ACI/ICA International Cartographic Conference*, 2005.
- [ELM 08] ELMQVIST N., & TSIGAS P., « A taxonomy of 3d occlusion management for visualization. », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 14(5), 1095-1109, 2008.
- [FER 15] FERSTL F., BÜRGER, K., & WESTERMANN, R., « Streamline variability plots for characterizing the uncertainty in vector field ensembles. », *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(1), 767-776, 2015.
- [FRI 18] FRÍAS DOMÍNGUEZ, M. D., ITURBIDE MARTÍNEZ DE ALBÉNIZ, M., GARCÍA MANZANAS, R., BEDIA JIMÉNEZ, J., HERRERA GARCÍA, S., COFIÑO GONZÁLEZ, A. S., & GUTIÉRREZ LLORENTE, J. M., « An R package to visualize and communicate uncertainty in seasonal climate prediction. », *Environmental modelling & software*, 99, 101-110, 2018.
- [GAR 20] GARBOLINO, E. AND VOIRON-CANICIO, C., « Ecosystem and territorial resilience: a geopropective approach », *Amsterdam, Elsevier*, 2020.
- [GAU 20a] GAUTIER J., BRÉDIF M., CHRISTOPHE S., « Co-visualization of air temperature and urban data for visual exploration. », *2020 IEEE Visualization Conference (VIS)* (pp. 71-75), 2020.
- [GAU 20b] GAUTIER J., CHRISTOPHE S., BRÉDIF M., « Visualizing 3D climate data in urban 3D models. », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 43, pp. 781-789, 2020.
- [GHI 89] GHIL, M., « Meteorological data assimilation for oceanographers. Part I: Description and theoretical framework. », *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 13(3-4), 171-218, 1989.
- [GRA 22] GRANDJEAN, M., « La visualisation de données, entre usages démonstratifs et heuristiques. », *B. Baptiste & P. Virginie (Éds.), Les devenirs numériques des patrimoines (p. 199-217). Editions de la Maison des Sciences de l'Homme*. <https://shs.hal.science/halshs-03845625>, 2022.
- [GRI 12] GRIFFIN A.L., FABRIKANT S.I., « More Maps, More Users, More Devices Means More Cartographic Challenges », *The Cartographic Journal*, Vol.49, 298–301, 2012.
- [GRO 08] GROCHOW, K., STOERMER, M., KELLEY, D., DELANEY, J., & LAZOWSKA, E., « Cove: A visual environment for ocean observatory design. », *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 125, No. 1, p. 012092, 2008.

- [HAG 70] HÄGERSTRAND, T., « What about people in regional science. », *Transport Sociology: Social aspects of transport planning*, 143-158, 1970.
- [HAW 18] HAWKINS E., « Warming stripes for 1850-2018 using the wmo annual global temperature dataset », *Climate Lab Book*, online: <http://www.climate-labbook.ac.uk/2018/2018-visualisation-update/> 2018.
- [HAW 21] HAWKINS E., « Show your stripes », online: <https://showyourstripes.info/>, 2021.
- [HAW 23] HAWKINS E., « Climate Visuals », online: <https://ed-hawkins.github.io/climate-visuals/maps.html>, 2023.
- [HEL 14] HELBIG, C., BAUER, H. S., RINK, K., WULFMEYER, V., FRANK, M., & KOLDITZ, O., « Concept and workflow for 3D visualization of atmospheric data in a virtual reality environment for analytical approaches. », *Environmental earth sciences*, 72(10), 3767-3780, 2014.
- [HEW 83] HEWITT K., « Interpretations of calamity from the viewpoint of human ecology. », *Routledge*, 1983.
- [HID 18] HIDALGO, J., JOUGLA, R., « On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. », *PLoS ONE*, 13(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208138>, 2018.
- [HID 22] HIDALGO, J., « Climat et Urbanisme : Apports de la dimension cartographique de la climatologie urbaine à la mise en place des plans d'adaptation », *PhD Thesis*. <https://hal.science/tel-03867034>, 2022.
- [HID 23] HIDALGO J., TOUATI N., HAOUËS-JOUE S., JEGOU L., BRETAGNE G., BOCHER E., MASSON V., MAYIS A., JOUGLA R., PETIT G. ET SCHOETTER R., « Mapping the urban climate to address summer comfort management in French urban planning documents », *Cybergeog: European Journal of Geography*, 2023.
- [HLA 11] HLAWATSCH, M., LEUBE, P., NOWAK, W., & WEISKOPF, D., « Flow radar glyphs—static visualization of unsteady flow with uncertainty. », *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(12), 1949-1958, 2011.
- [JAR 15] JAREMA M., DEMIR I., KEHRER J., & WESTERMANN R., « Comparative visual analysis of vector field ensembles. », *IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST)* (pp. 81-88), 2015.
- [JEG 22] JÉGOU L., TOUATI N., HIDALGO J., « Proposals for the use of graphical models in urban climatic maps », *Cybergeog : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, [10.4000/cybergeog.39354](https://doi.org/10.4000/cybergeog.39354), 2022.
- [JOH 18] JOHANNSEN I. M., FABRIKANT S. I., EVERS M., « How do texture and color communicate uncertainty in climate change map displays? », *10th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2018)*, 2018.
- [KAD 14] KADDOURI L., BLAISE J.-Y., DAVOINE P.-A., MATHIAN H., AND SAINT-MARC C., « État des lieux des représentations dynamiques des temporalités des territoires. », *Research report, UMR 7300 ESPACE; UMR 3495 MAP - GAMSAU; Laboratoire d'Informatique de Grenoble*. <https://hal.inria.fr/hal-01383450>, 2014.
- [KEB 18] KEBLER, C., & LOTSTEIN, E., « Animation as a visual indicator of positional uncertainty in geographic information. », *Geospatial Technologies for All: Selected Papers of the 21st AGILE Conference on Geographic Information Science 21* (pp. 365-382), 2018.
- [KOB 96] KÖBBEN B. AND YAMAN M., « Evaluating dynamic visual variables. », *Proceedings of the seminar on teaching animated cartography, ACI/ICA*, p45-51, 1996.
- [KOR 20] KORPORAAL M., RUGINSKI I. T., FABRIKANT S. I., « Effects of uncertainty visualization on map-based decision making under time pressure. », *Frontiers in Computer Science*, 2, 32, 2020.
- [KRA 11] KRAAK M.-J. AND ORMELING F., « Cartography: visualization of spatial data. », *Guilford Press*, 2011.
- [AND 10] KRISTOF G., PAPP B., « Application of gpu-based large eddy simulation in urban dispersion studies », *Atmosphere*, Vol.9, No.11, 442, 2018.
- [KUB 20] KÜBLER, I., RICHTER, K. F., & FABRIKANT, S. I., « Against all odds: Multicriteria decision making with hazard prediction maps depicting uncertainty. », *Annals of the American Association of Geographers*, 110(3), 661-683, 2020.
- [KUR 20] KURPPA M., KARTTUNEN S., HELLSTEN A., JÄRVI L., « Including aerosol dynamic processes in les: evaluation and application. », *100th American Meteorological Society Annual Meeting*, 2020.
- [LAC 18] LAC C., CHABOUREAU J.P., MASSON V., PINTY J.P., TULET P., ESCOBAR J., LERICHE M., BARTHE C., AOUIZERATS B., AUGROS C., ET AL., « Overview of the meso-nh model version 5.4 and its applications », *Geoscientific Model Development*, Vol.11, No.5, 1929–1969, 2018.

- [LAN 21] LAN Y., DESJARDINS M. R., HOHL A., & DELMELLE E., « Geovisualization of COVID-19: State of the Art and Opportunities. », *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 56(1), 2-13, 2021.
- [LAR 17] LARDON S., HOUDART M., « Les Chorèmes face à l'évolution des thématiques et pratiques de recherche, en agronomie et aménagement des territoires. », *Mappemonde*. (122), 2017.
- [LEB 07] LE BOURHIS, J.-P., « Du savoir cartographique au pouvoir bureaucratique. », *Les cartes des zones inondables dans la politique des risques (1970-2000)* Genèses, 68(3), 75-96. <https://doi.org/10.3917/gen.068.0075>, 2007.
- [LEC 21] LE CARRER, N., & FERSON, S., « Beyond probabilities: A possibilistic framework to interpret ensemble predictions and fuse imperfect sources of information. », *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(739), 3410-3433, 2021.
- [LER 20] LE ROY B., LEMONSU A., KOUNKOU-ARNAUD R., BRION D., AND MASSON, V., « Long time series spatialized data for urban climatological studies: A case study of Paris, France. », *International Journal of Climatology*, 40(7):3567–3584. DOI: 10.1002/joc.6414, 2020.
- [LEV 13] LEVY, J., LUSSAULT, M., « Dictionnaire de la géographie », *Paris, Belin*, 2013.
- [LI 17] LI W., WANG S., « PolarGlobe: A web-wide virtual globe system for visualizing multidimensional, time-varying, big climate data. », *International Journal of Geographical Information Science*, 31(8), 1562–1582, 2017.
- [LI 23] LI, M., PALANDE, S., YAN, L., & WANG, B., « Sketching merge trees for scientific visualization. », *Topological Data Analysis and Visualization (TopoInVis)* (pp. 61-71), 2023.
- [LIU 18] LIU L., PADILLA L., CREEM-REGEHR S. H., HOUSE D. H., « Visualizing uncertain tropical cyclone predictions using representative samples from ensembles of forecast tracks. », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 25(1), 882-891, 2018.
- [LLO 11] LLOYD D., DYKES J., « Human-Centered Approaches in Geovisualization Design: Investigating Multiple Methods Through a Long-Term Case Study », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 17, no 12, p. 2498-2507, 2011.
- [LOB 19] LOBBEN A., MEGAN L., LIMPISATHIAN P., « Representations of Place in the Human Brain », *International Cartographic Conference*, 2019.
- [LOB 19] LOBO M.-J., HURTER C., « Data multiplexing through animated texture orientation and color. », *VISIGRAPP 2019 – Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*, 289–296, 2019.
- [LOB 20] LOBO, M. J., TELEA, A. C., & HURTER, C., « Feature Driven Combination of Animated Vector Field Visualizations. », *Computer Graphics Forum*, Vol. 39, No. 3, pp. 429-441, 2020.
- [MAC 92] MACEACHREN, A. M., « Visualizing uncertain information. », *Cartographic Perspectives*, 13, 10–19. <https://doi.org/10.14714/CP13.1000>, 1992.
- [MAC 94] MACEACHREN A. M., « Time as a cartographic variable. », *Visualization in geographical information systems*, 1994.
- [MAC 94] MACEACHREN A.M., « Visualization in Modern Cartography: Setting the Agenda », *Modern Cartography Series, MacEachren, A.M., Fraser Taylor, D.R. (dir.). Oxford, UK: Pergamon Press*, Vol.2, 1–12, 1994.
- [MAC 04] MACEACHREN, A. M., « How maps work: representation, visualization, and design. », *Guilford Press*, 2004.
- [MAC 05] MACEACHREN, A., ROBINSON, A., HOPPER, S., GARDNER, S., MURRAY, R., GAHEGAN, M., & HETZLER, E., « Visualizing geospatial information uncertainty: What we know and what we need to know. », *Cartography and Geographic Information Science*, 32(3), 139–160, 2005.
- [MAS 00] MASSON V., « A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models », *Boundary-layer meteorology*, Vol.94, No.3, 357–397. DOI : 10.1023/A:1002463829265, 2000
- [MAS 20] MASSON, V., BOCHER, E., BUCHER, B., CHITU, Z., CHRISTOPHE, S., FORTELIUS, C., HAMDI, R., VOTSIS, A., « The urban climate services URCLIM project. », *Climate services*, 20, 100194, 2020.
- [MER 22] MERICKSAY B., « Communication cartographique : sémiologie graphique, sémiotique et géovisualisation », *ISTE Editions*, p. 41-71, 2022.
- [MER 16] MERSMANN K., MATTHEW R., SHIRAH G., MITCHELL H., OTT L., PAWSON S., WEIR B., LEPSCH A., « Following Carbon Dioxide Through the Atmosphere », *online: <https://svs.gsfc.nasa.gov/12445>*, 2016.

- [MIR 14] MIRZARGAR M., WHITAKER R. T., & KIRBY R. M., « Curve boxplot: Generalization of boxplot for ensembles of curves. », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 20(12), 2654-2663, 2014.
- [MOR 16] MORELAND K., SEWELL C., USHER W., LO L., MEREDITH J., PUGMIRE D., KRESS J., SCHROOTS H., MA K., CHILDS H., LARSEN M., CHEN C., MAYNARD R., GEVECI B., « Vtk-m: Accelerating the visualization toolkit for massively threaded architectures », *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.36, No.3, 48–58, 2016.
- [MUN 14] MUNZNER T., « Visualization analysis and design. », *CRC press*, 2014.
- [AND 10] NG E., REN C., « The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning », *Ed. Routledge*, 2015.
- [NG 12] NG E., YAU, R., WONG K., REN, C. AND KATSZCHNER, L., « Final Report of Hong Kong Urban Climatic Map and Standards for Wind Environment », *Feasibility Study*, 2012.
- [NOA 21] NOAA’S CLIMATE PROGRAM OFFICE, « The Climate Explorer », online: <https://crt-climate-explorer.nemac.org>, 2018.
- [OLE 15] OLESON, K. W., MONAGHAN, A., WILHELMI, O., BARLAGE, M., BRUNSELL, N., FEDDEMA, J., HU L., STEINHOFF, D. F., « Interactions between urbanization, heat stress, and climate change. », *Climatic Change*, 129, 525-541, 2015.
- [OYS 22] OYSHI, M. T., MALESKA, V., SCHANZE, J., BORMANN, F., DACHSELT, R., & GUMHOLD, S., « FloodVis: Visualization of Climate Ensemble Flood Projections in Virtual Reality. », *EnvirVis@ EuroVis* (pp. 1-9), 2022.
- [PAD 18] PADILLA L., CREEM-REGEHR S., HEGARTY M., STEFANUCCI J., « Decision making with visualizations: a cognitive framework across disciplines », *Cognitive Research: Principles and Implications*, 3, 2018.
- [PER 20] PERRIN O., CHRISTOPHE S., JACQUINOD F., PAYRASTRE O., « Visual analysis of inconsistencies in hydraulic simulation data », *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXIV International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress*, 795-801, 2020.
- [PHI 20] PHILIPPS, N., KASTENDEUCH, P. P., & NAJJAR, G., « Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l’îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). », *Climatologie*, 17, 10, 2020.
- [PIN 16] PINSON L., MASSON V., « Heat stress in urban area: data fusion of observations, modeling and geospatial information. », *First International Conference on Urban Physics (FICUP 2016)*, 2016.
- [PLU 15] PLUMEJEAUD-PERREAU C., POITEVIN C., PIGNON-MUSSAUD C., LONG N., « Building local climate zones by using socioeconomic and topographic vectorial databases. », *9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, 2015.
- [PUM 04] PUMAIN D., « Analyse spatiale. Dictionnaire Hypergéô, », online, <http://www.hypergeo.eu/spip.php?Article38>, 2004.
- [RAU 13] RAUTENHAUS, M., GRAMS, C. M., SCHÄFLER, A., & WESTERMANN, R., « Interactive 3D visualisation of ECMWF ensemble weather forecasts. », *EGU General Assembly Conference Abstracts*, pp. EGU2013-8441, 2013.
- [RAU 14] RAUTENHAUS, M., GRAMS, C. M., SCHÄFLER, A., & WESTERMANN, R., « GPU based interactive 3D visualization of ECMWF ensemble forecasts. », *ECMWF Newsletter*, 138, 34-38, 2014.
- [RAU 15] RAUTENHAUS, M., KERN, M., SCHÄFLER, A., & WESTERMANN, R., « 3-D visualization of ensemble weather forecasts-Part 1: The visualization tool Met. 3D (version 1.0). », *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(2), 2015.
- [RAU 17] RAUTENHAUS M., BOTTINGER M., SIEMEN S., HOFFMAN R., KIRBY R. M., MIRZARGAR M., RÖBER N., WESTERMANN R., « Visualization in meteorology—a survey of techniques and tools for data analysis tasks. », *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 24(12), 3268–3296, 2017.
- [ROD 19] RODLER A., LEDUC T., « Local climate zone approach on local and micro scales: Dividing the urban open space », *Urban Climate*, 28, No.100457. DOI: 10.1016/j.uclim.2019.100457, 2019.
- [ROT 12] ROTH R., « Cartographic Interaction Primitives: Framework and synthesis », *The Cartographic Journal*, Vol.49, No.4, 376-395, 2012.
- [ROB 21] RÖBER, N., BÖTTINGER, M., & STEVENS, B., « Visualization of climate science simulation data. », *IEEE Computer Graphics and Applications*, 41(1), 42-48, 2021.
- [ROP 11] ROPINSKI, T., OELTZE, S., & PREIM, B., « Survey of glyph-based visualization techniques for spatial multivariate medical data. », *Computers & Graphics*, 35(2), 392-401, 2011.

- [RUA 19] RUAS A., PHAM H., PINSON L., « Champs et objets pour mieux représenter les phénomènes dans leur contexte géographique. », *Revue Internationale de Géomatique*, 29(2), 185-205, 2019.
- [RUA 25] RUAS A., JACQUINOD D., MHEDHBI Z., BETOU F., « Les données topographiques actuelles sont-elles adaptées à l'étude du climat urbain ? », *Risques Urbains*, 2025.
- [REN 11] REN, C., NG, E.Y.-Y. AND KATZSCHNER, L., « Urban climatic map studies: a review. », *International journal of climatology*, vol. 31, no 15, p. 2213-2233, 2011.
- [RUG 16] RUGINSKI, I. T., BOONE, A. P., PADILLA, L. M., LIU, L., HEYDARI, N., KRAMER, H. S., ... & CREEM-REGEHR, S. H., « Non-expert interpretations of hurricane forecast uncertainty visualizations. Spatial », *Cognition & Computation*, 16(2), 154-172, 2016.
- [SAN 10] SANYAL J., ZHANG S., DYER J., MERCER A., AMBURN P., MOORHEAD R.J., « Noodles: A Tool for Visualization of Numerical Weather Model Ensemble Uncertainty. », *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 16, no. 6, pp. 1421 – 1430, 2010.
- [SCH 20] SCHOETTER R., HIDALGO J., JOUGLA R., MASSON V., GORET M., REGA M., PERGAUD J., « A statistical-dynamical downscaling for the urban heat island and building energy consumption: Analysis of its uncertainties. », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59:859–883, 2020.
- [SCH 18] SCHNEIDER B., NOCKE T., « The feeling of red and blue—a constructive critique of color mapping in visual climate change communication », *Handbook of Climate Change Communication*, Vol. 2, Springer, 289–303, 2018.
- [SHN 03] SHNEIDERMAN, B., « The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations. », *The craft of information visualization*, Morgan Kaufmann (pp. 364-371), 2003.
- [SEP 21] SEPENA M., WURM M., TAUBENBÖCK H., TUIA D., RUIZ L.A., « Estimating quality of life dimensions from urban spatial pattern metrics », *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.85, article 101549, 2021.
- [STA 15] STAUFFER R., MAYR G.J., DABERNIG M., ZEILEIS A., « Somewhere over the rainbow: How to make effective use of colors in meteorological visualizations », *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.96, No.2, 203–216. DOI : 10.1175/BAMS-D-13-00155.1, 2015.
- [STE 00] STEIN, R., SHIH, A. M., BAKER, M. P., CERCO, C. F., & NOEL, M. R., « Scientific visualization of water quality in the Chesapeake Bay. », *Proceedings Visualization 2000. VIS 2000* (Cat. No. 00CH37145) (pp. 509-512), 2000.
- [STE 88] STEINBERG J., HUSSER J., « Cartographie dynamique applicable à l'aménagement », *SEDES, Paris*, 1988.
- [STE 09] STEWART I.D., OKE T.R., « Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: The case of nagano, japan. », *7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7)*, vol. (29), 2009.
- [STE 12] STEWART I.D., OKE T.R., « Local climate zones for urban temperature studies », *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol.93, No.12, 1879-1900, 2012.
- [THA 10] THAKUR, S., & HANSON, A. J., « A 3D visualization of multiple time series on maps. », *14th International Conference Information Visualisation* (pp. 336-343). IEEE, 2010.
- [TOM 23] TOMINSKI, C., BEHRISCH, M., BLEISCH, S., FABRIKANT, S. I., MAYR, E., MIKSCH, S., & PURCHASE, H., « Visualizing Uncertainty in Sets. », *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2023.
- [TUF 83] TUFTE, E. R., « The Visual Display of Quantitative Information. », *Graphics Press*. https://www.edwardtufte.com/tufte/books_vdqi, 1983.
- [TUF 90] TUFTE, E. R., « Envisioning Information. », *Graphics Press*. https://www.edwardtufte.com/tufte/books_ei, 1990.
- [TVE 05] TVERSKY B., « Visuospatial Reasoning », *Cambridge Handbook of Thinking and Reasoning*. 2005.
- [VUC 21] VUCKOVIC, M., SCHMIDT, J., ORTNER, T., & CORNEL, D., « Combining 2D and 3D visualization with visual analytics in the environmental domain. », *Information*, 13(1), 7, 2021.
- [WAN 18] WANG, J., HAZARIKA, S., LI, C., & SHEN, H. W., « Visualization and visual analysis of ensemble data: A survey. », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 25(9), 2853-2872, 2018.
- [WAR 16] WARE C., BOLAN D., MILLER R., ROGERS D. H., AHRENS, J. P., « Animated versus static views of steady flow patterns. », *ACM Symposium on Applied Perception*, 77–84, 2016.
- [WAR 23] WARE C., STONE M., SZAFIR D. A., « Rainbow Colormaps Are Not All Bad. », *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 43, no. 03, pp. 88-93, doi: 10.1109/MCG.2023.3246111, 2023.
- [WIN 14] WINDY, « Windy », online : <https://www.windy.com/>, 2014.

- [WOO 12] WOOD J., ISENBERG P., ISENBERG, T., DYKES, J., BOUKHELIFA, N., SLINGSBY, A., « Sketchy rendering for information visualization. », *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 18(12), 2749-2758, 2012.
- [WU 13] WU K., ZHANG S., « A contour tree based visualization for exploring data with uncertainty. », *International Journal for Uncertainty Quantification*, 3(3), 2013.
- [XIE 19] XIE, C., LI, M., WANG, H., & DONG, J., « A survey on visual analysis of ocean data. », *Visual Informatics*, 3(3), 113-128, 2019.
- [YAN 21] YAN, L., MASOOD, T. B., SRIDHARAMURTHY, R., RASHEED, F., NATARAJAN, V., HOTZ, I., & WANG, B., « Scalar field comparison with topological descriptors: Properties and applications for scientific visualization. », *Computer Graphics Forum*, Vol. 40, No. 3, pp. 599-633, 2021.
- [YU 20] YU, L., « MeteoExplorer: Visual data analysis software for atmospheric and geoscientists. », *Meteorological Applications*, 27(3), e1916, 2020.
- [ZHA 24] ZHAO, L., WANG, C., JIANG, Y., & XU, J., « Research on the characteristics of wind speed, wind direction, and wind profile based on ERA5 reanalysis data. », *Aerospace Traffic and Safety*, 2024.