

PAENDORA_2

Pour la gestion du confort estival : Données, Outils et Recherche-Action

Rapport final
T0+36 mois
Partie 2 : Résultats du projet



EXPERTISES

**Déc.
2024**

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble des membres du consortium du projet PÆNDORA_2 dont les membres suivants font partie du comité scientifique : Julia Hidalgo (LISST – CNRS), Erwan Bocher (LabSTICC), Marion Bonhomme (LMDC – INSA), Guillaume Dumas (Toulouse Métropole), Serge Faraut (LRA – ENSA), Valéry Masson (CNRM – CNRS/METEO FRANCE), Léah Theisiger (FNAU)

CITATION DE CE RAPPORT

Julia Hidalgo, Mitia Aranda, Jérémy Bernard, Erwan Bocher, Marion Bonhomme, Anne Brunet, Julien Bouyer, Lorena Carvalho, Guillaume Dumas, Serge Faraut, Matthieu Gousseff, Martin Hendel, Mathilde Herault, Guillaume Huteau, Emmanuelle Kerjouan, Thomas Lagelouze, Sandra Marques, Valéry Masson, Elisabeth Le Saux, Megghan lequesne, Yves Richard, Florencia Rodriguez, Léah Theiseger, Nathalie Tornay. 2024. Rapport final à T0+36 mois du projet de recherche PÆNDORA_2. Partie 1. 49 pg.

Cet ouvrage est disponible en ligne sur le site de l'ADEME www.ademe.fr/mediatheque

Cet ouvrage est disponible en ligne sur le site du LISST <https://blogs.univ-tlse2.fr/julia-hidalgo/les-projets-de-recherche-2/paendora-2-2022-2025/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 21DAD0080

Étude réalisée par **Julia Hidalgo, Mitia Aranda, Jérémy Bernard, Erwan Bocher, Marion Bonhomme, Anne Brunet, Julien Bouyer, Lorena Carvalho, Guillaume Dumas, Serge Faraut, Matthieu Gousseff, Martin Hendel, Mathilde Herault, Guillaume Huteau, Emmanuelle Kerjouan, Thomas Lagelouze, Sandra Marques, Valéry Masson, Elisabeth Le Saux, Megghan lequesne, Yves Richard, Florencia Rodriguez, Léah Theiseger, Nathalie Tornay pour ce projet financé par l'ADEME**

Projet de recherche coordonné par : **Julia Hidalgo**

Appel à projet de recherche : APR PACT2e

Coordination technique - ADEME : **ROZO Ariane**

Direction/Service : Coordinatrice urbanisme en lien avec la santé et l'environnement
Pôle Aménagement des Villes et des Territoires (PAVT)

Direction Adaptation Aménagement et Trajectoires bas carbone (DAAT)

SOMMAIRE

RÉSUMÉ pg 4

ABSTRACT pg 5

1. Le contexte en 2022 et la genèse du projet pg 6

2. Objectifs du projet pg 8

3. Développements et Résultats

3.1 LOT 1. Mettre à jour et enrichir les outils

**3.1.1 Tâche 1.1 Intégration de la BDTopo 3.0 dans GeoClimate..
.....pg 8**

**3.1.2 Tâche 1.2 Intégration des données sur la rénovation des
bâtiments pour la Bdd Architecturale DANUBE.pg 11**

**3.1.3 Tâche 1.3 Développement d'une version interoperable de
la Bdd Architecturale DANUBE compatible avec la production
de documents géo-référencés..... Pg 15**

3.2 LOT 2. Confronter les données produites et existantes avec la réalité terrain

3.2.1 Tâche 2.1 validation et contrôle des algorithmes pg 23

3.2.2 Tâche 2.2 validation sur un retour « expert » pg 26

3.3 LOT 3. Application opérationnelle sur Toulouse pg 44

3.4 LOT 4. Valorisation et médiation scientifique ... pg 45

Index des tableaux et figures pg 46

RÉSUMÉ

Le présent projet a été porté par sept laboratoires de recherche publique situés à Toulouse (LISST, CNRM, LMDC, LRA), Vannes (Lab-STICC), Paris (LIED) et Dijon (Laboratoire Biogéosciences), un établissement public d'expertise (Cerema), un Bureau d'Études (Société Intermezzo) et deux acteurs institutionnels (la FNAU et Toulouse Métropole). Il s'est positionné sur l'Axe 1. de l'appel à projets ADEME-PACT2e de 2021 concernant les objectifs de réduction des impacts des aléas climatiques extrêmes aux échelles urbaines. En particulier les objectifs en lien avec la gestion du stress thermique en milieu urbain pour lesquels, sur la base de projets de recherche antérieurs (ANR-MapUCE, ADEME-PÆNDORA), plusieurs ensembles de données (urbaines et climatiques) sont disponibles pour une cinquantaine de villes en France.

Ce projet apporte des éléments méthodologiques et des données d'une part pour contribuer au sous axe *1.b Concevoir des formes urbaines durables* et d'une autre part, de contribuer au sous axe *1.a Rafraîchir la ville de manière pérenne avec les solutions d'adaptation fondées sur la nature*. Plusieurs actions ont été entreprises : La mise à jour et à disposition en Open Access des outils GeoClimate (pour produire des données de morphologie urbaine et d'occupation du sol) et Danube (qui est une base de données sur la matérialité et les techniques constructives) ; la confrontation terrain de données urbaines, architecturales et climatiques à l'échelle de l'îlot pour un ensemble de 5 cas d'étude (Dijon, Nancy, Paris, Lorient et Toulouse) ; l'accompagnement de Toulouse Métropole sur son projet 100 000 arbres en particulier sur la phase de diagnostic et priorisation d'actions de verdissement et désimperméabilisation des cours d'école de la commune de Toulouse.

Le projet s'est également donné pour ambition de travailler sur le volet valorisation sur toute sa durée. En plus des actions de communication et valorisation classiques d'un projet de recherche, des séances de formation à destination des agences d'urbanisme autour de l'outil GeoClimate ont été effectuées au printemps 2024. D'une autre part, une série de balades microclimatiques urbaines ont été mises en place en collaboration avec les équipes locales des cas d'étude. Ces balades sont conçues comme un dispositif pédagogique à destination des chefs de projet des collectivités concernées, mais elles pourront être mobilisées plus largement dans d'autres cadres, comme la formation universitaire ou sur des événements grand public.

ABSTRACT

The current project has been led by seven public research laboratories located in Toulouse (LISST, CNRM, LMDC, LRA), Vannes (Lab-STICC), Paris (LIED), and Dijon (Laboratoire Biogéosciences), a public expertise establishment (Cerema), a consulting firm (Société Intermezzo), and two institutional actors (FNAU and Toulouse Métropole). It has been positioned under Axis 1 of the ADEME-PACT2e call for projects in 2021, concerning the objectives of reducing the impacts of extreme climate hazards at urban scales. In particular, the objectives related to managing thermal stress in urban environments for which, based on previous research projects (ANR-MapUCE, ADEME-PÆNDORA), several datasets (urban and climatic) are available for around fifty cities in France. This project provides methodological elements and data, on the one hand, to contribute to sub-axis 1.b: Designing sustainable urban forms, and on the other hand, to contribute to sub-axis 1.a: Permanently cooling the city with nature-based adaptation solutions.

Several actions have been undertaken: Updating and making available in Open Access the GeoClimate tools (to produce data on urban morphology and land use) and Danube (which is a database on materiality and construction techniques); the field confrontation of urban, architectural, and climatic data at the scale of the block for a set of 5 case studies (Dijon, Nancy, Paris, Lorient, and Toulouse); and supporting Toulouse Métropole in its project of planting 100,000 trees, particularly during the diagnostic phase and prioritizing greening and de-paving actions for schoolyards in the city of Toulouse. The project has also set out to work on the scientific diffusion aspect throughout its duration. In addition to the classic communication and knowledge transfer actions of a research project, training sessions for urban planning agencies on the GeoClimate tool were conducted in the spring of 2024. Furthermore, a series of urban microclimatic walks have been organized in collaboration with local teams from the case studies. These walks are designed as a pedagogical tool for project managers of the concerned municipalities, but they can also be mobilized more broadly in other contexts, such as university training or public events.

1. Le contexte en 2022 et la genèse du projet

Les projets ANR-MApUCE (2014-2019) et ADEME-PÆNDORA (2018-2020) ont proposé des outils et des méthodologies pour avancer dans une meilleure intégration des enjeux climatiques dans les pratiques de planification urbaine, en particulier sur la gestion du confort d'été et la surchauffe urbaine. Dans ces projets, les volets en lien avec la production des données avaient pour ambition de développer une approche applicable partout en France de production de données urbaines (morphologiques et architecturales) à l'échelle des îlots urbains (les pâtés de maisons) à des fins de modélisation climatique avec une résolution spatiale horizontale de 250x250 m.

La production d'indicateurs morphologiques était assurée par une chaîne de calcul d'indicateurs géographiques appelée GeoClimate développée par le Lab-STICC (Figure 1). Elle permettait d'utiliser à la fois la BDTopo V2.2 de l'IGN, et la base de données OpenStreetMap. De nombreux indicateurs décrivant la morphologie urbaine, la typologie des bâtiments, l'occupation du sol ou encore des typologies typiquement utilisées dans les études de climat urbain (comme les Local Climate Zones) sont intégrés. Son utilisation est facilitée car GeoClimate repose sur Java, ne requiert aucune installation et enregistre les résultats dans des formats standards qui sont consultables dans n'importe quel SIG. GeoClimate est disponible en open source pour tout type d'utilisateur (collectivités, entreprises, scientifiques) <https://github.com/orbisgis/GeoClimate/>

En 2021, l'IGN a publié la BDTopo V3, qui présentait des différences structurelles importantes par rapport à la version précédente. Il était donc nécessaire d'effectuer une mise à jour approfondie de GeoClimate afin de prendre en compte ce nouveau jeu de données.

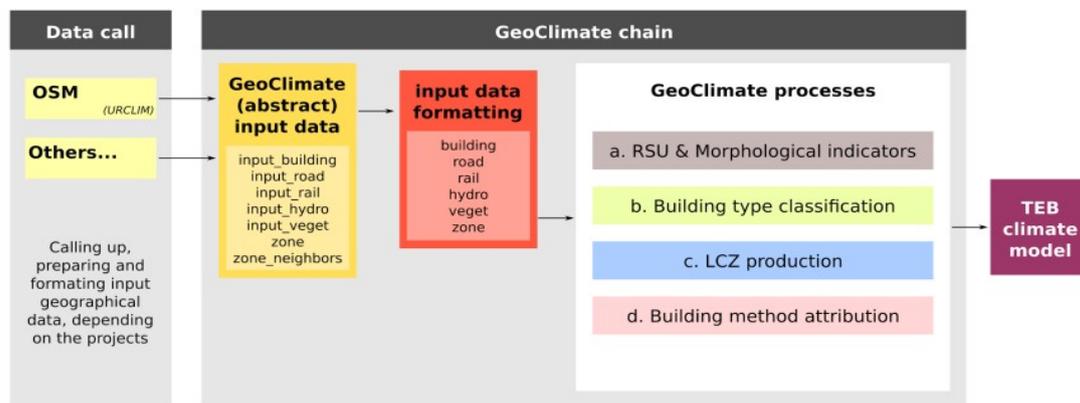


Figure 1 : Principales étapes de la chaîne algorithmique de GeoClimate en 2022

La description de la matérialité et les techniques constructives fait l'objet de la Base de Données Architecturales DANUBE développée par le LRA et le LMDC (Figure 2). Cet outil, bien que disponible en licence Open Access, n'était pas, au début du projet, directement utilisable pour un usage autonome ou le couplage avec d'autres outils d'analyses spatiales ou de simulations. La spatialisation étant réalisée sur les projets passés seulement à l'étape de paramétrage du modèle de simulation atmosphérique. Il était ainsi nécessaire de développer une interface homme-machine qui facilite la représentation spatiale et cartographique aux différentes échelles urbaines. La publication de la BDNB (Base de données nationale des bâtiments) par le CSTB en 2023 a également ouvert de nouvelles perspectives de travail pour intégrer la rénovation dans la BD DANUBE dans le cadre du projet.

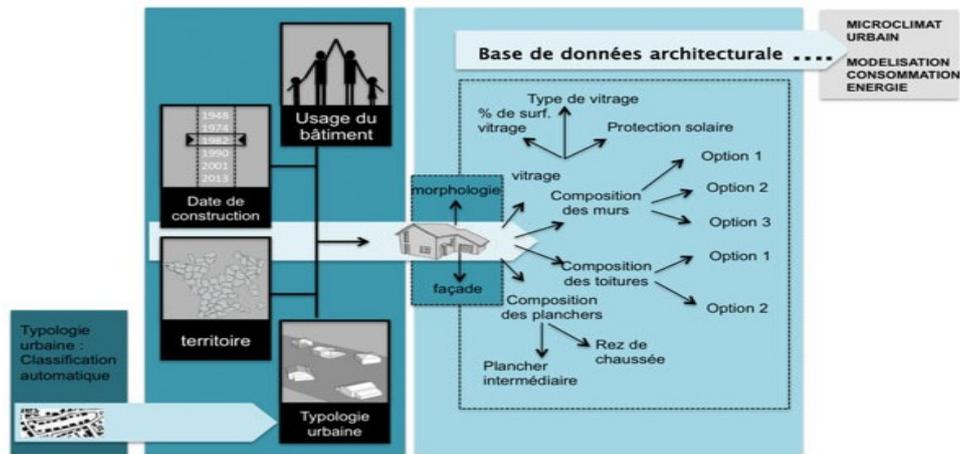
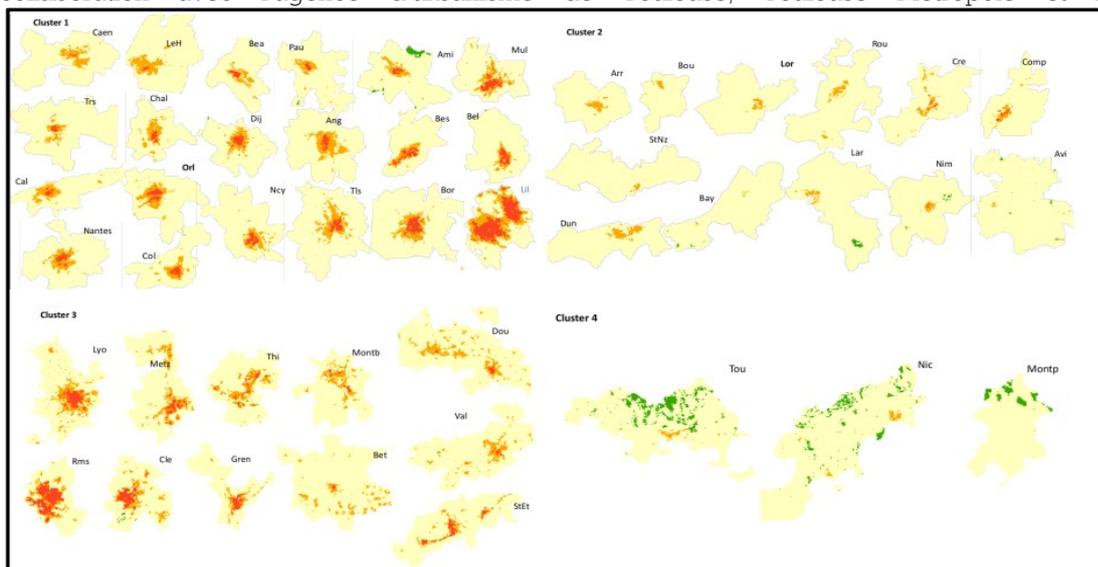


Figure 2. Principales étapes de la base de données architecturale (DANUBE) en 2022

En s'appuyant sur les données morphologiques et architecturales, le CNRM avait produit des simulations micro-climatiques avec la chaîne de modélisation Meso-NH/SURFEX pour 50 villes en France (Figure 3). Ces simulations en situation estivale pour des situations météorologiques propices au développement de l'îlot de chaleur urbain nocturne sont disponibles en Open Access à l'adresse <https://github.com/orbisgis/mapuce.orbisgis.org/tree/gh-pages/>

Des fiches décrivant les situations météorologiques typiques influençant la ville (types de temps sensibles) et en particulier celles simulées ont été éditées pour ces mêmes villes par le LISST (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340923005371?via%3Dihub>). Enfin, une réflexion sur la représentation cartographique des informations pertinentes à l'intégration des informations climatiques dans les outils de planification urbaine (PLU, PLUi, PCAET) a été menée par le LISST en collaboration avec l'agence d'urbanisme de Toulouse, Toulouse Métropole et la FNAU



(<https://journals.openedition.org/cybergeog/40319>).

Figure 3. Îlot de chaleur urbain maximal pour le panel de villes MAPUCE (légende vert: < 0°C, jaune : 0°C à 2°C; orange: 2°C à 3°C; rouge > 3°C)

Le projet PÆNDORA_2 a confronté les données précédentes (GeoClimate, DANUBE, données atmosphériques et climatiques) sur le terrain de trois manières. D'abord, trois équipes de recherche en climat urbain (le LEID à Paris, le CRC à Dijon et le CEREMA à Nancy) ont effectué une expertise et une analyse de ces données, en tirant profit de celles-ci dans un cadre de recherche. Ensuite, une expertise et une analyse de ces données ont été réalisées dans un cadre opérationnel, lors du projet "Cours Oasis" et "100 000 arbres" de Toulouse Métropole, en collaboration avec les équipes du LIED à Paris et du LISST à Toulouse. Pour finir, Lorient Métropole en collaboration avec la Société Intermezzo et du Lab-STICC ont mobilisé leur diagnostic microclimatique dans le cadre de leur mise en place d'une Balade microclimatique.

2. Objectifs du projet

Ont participé au projet PÆNDORA_2 sept laboratoires de recherche publique situés à Toulouse (LISST, CNRM, LMDC, LRA), Vannes (Lab-STICC), Paris (LIED) et Dijon (Laboratoire Biogéosciences), une structure d'expertise technique (CEREMA-Nancy), un Bureau d'Études (Société Intermezzo) et deux acteurs institutionnels (la FNAU et Toulouse Métropole).

La durée du projet a été de 36 mois pendant la période janvier 2022 à décembre 2024. L'objectif général du projet était de mettre à disposition des informations urbaines et climatiques pour guider l'action des collectivités territoriales dans le cadre de la gestion du confort estival et la surchauffe urbaine à l'échelle de aménagement.

Trois objectifs principaux ont été poursuivis :

1. Mettre à jour et enrichir les outils GeoClimate et Danube permettant de produire des données urbaines et architecturales en licence libre à l'échelle des îlots urbains pour n'importe quelle ville en France (LOT1, "Développement d'Outils et Données").

2. Confronter les données produites et existantes avec la réalité terrain (LOT2, "Validation et analyse scientifique des données" et LOT3, "Application opérationnelle sur Toulouse").

3. Développer des dispositifs de médiation et transfert de l'information climatique vers les acteurs de l'urbanisme (LOT4, "Médiation scientifique et valorisation").

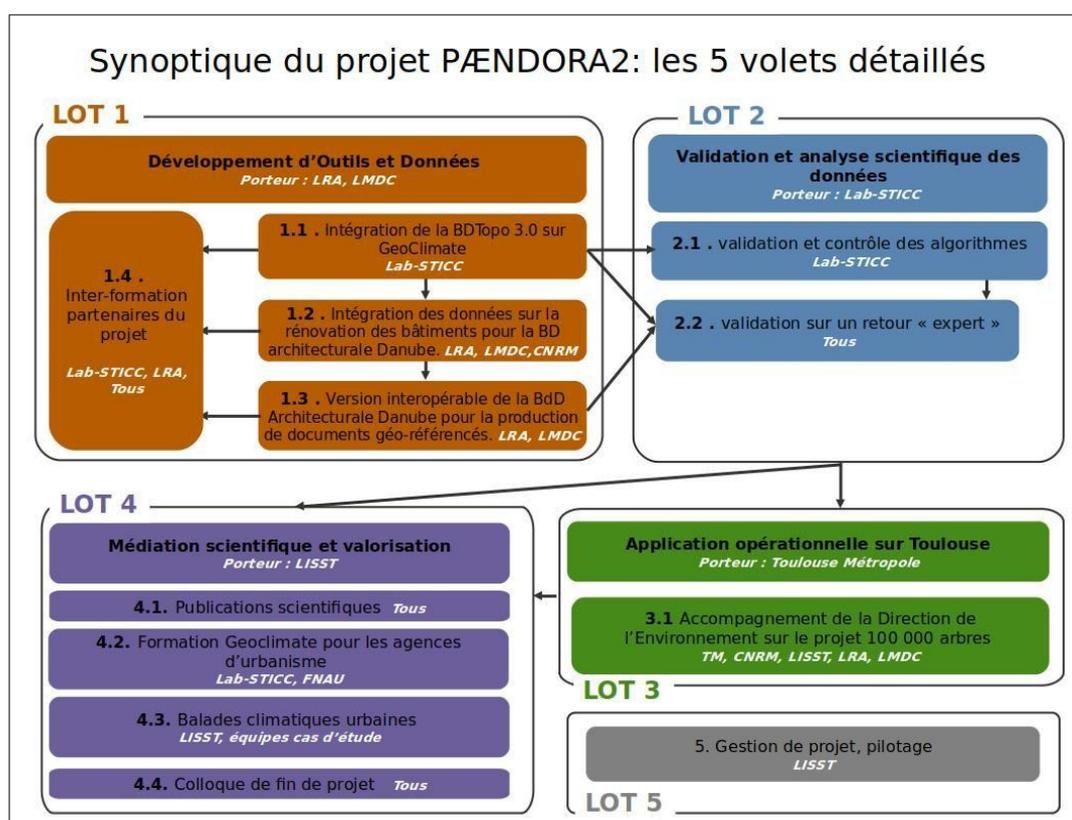


Figure 4. Synoptique du projet

3. Développements et Résultats

3.1 LOT 1. Mettre à jour et enrichir les outils

3.1.1 Tâche 1.1 Intégration de la BDTopo 3.0 dans GeoClimate

GeoClimate est un logiciel développé par le Lab-STICC pour produire des indicateurs géographiques afin de caractériser les spécificités d'un territoire (densité de végétation, de bâtiments, orientation et forme des bâtiments...). Ces indicateurs sont utilisés pour produire des classifications spatiales comme par exemple la classification en Zones Climatiques Locales. GeoClimate fonctionne à

partir de deux sources de données : OpenStreetMap et la BDTopo dans sa version 2.2 produite par l'IGN. Ces sources de données alimentent un modèle de données interne qui est utilisé par les algorithmes pour produire les indicateurs. En 2019, une nouvelle version de la BDTopo est publiée. Cette version qui porte le code 3.0 introduit de multiples changements dans le modèle de données :

- ① regroupement de certaines couches. Les bâtiments auparavant représentés dans 3 instances sont maintenant décrits dans une seule couche.
- ① apparition de nouvelles couches de données produites par traitement (ZONE_D_HABITATION) ou provenant d'opérateurs extérieurs à l'IGN (HAIE, FORET_PUBLIQUE).
- ① ajout de nouveaux descripteurs et de nouvelles valeurs pour qualifier certains objets géographiques (USAGE1, USAGE2, NB_ETAGES par exemple pour la couche bâtiments).

La Figure 5 schématise la démarche qui a été suivie pour intégrer la BDTopo 3.0 dans le logiciel GeoClimate. Cette démarche repose sur des analyses manuelles et automatiques afin d'identifier les correspondances et les différences avec le modèle de données interne de GeoClimate. Ces étapes itératives ont conduit à ajuster dans un premier temps le modèle de données de GeoClimate puis dans un second temps à développer les algorithmes pour lire et transformer les données de la BDTopo 3.0 vers celui-ci. Pour contrôler les résultats obtenus et s'assurer par exemple que la classification en zones climatiques est reproduite correctement avec la BDTopo 3.0, un jeu de données test a été mis en place. Ce jeu de données est utilisé dans le code informatique de GeoClimate pour valider l'ensemble des indicateurs (voir <https://github.com/orbisgis/geoclimate/tree/master/bdtopo/src/test/groovy/org/orbisgis/geoclimate/bdtopo>).

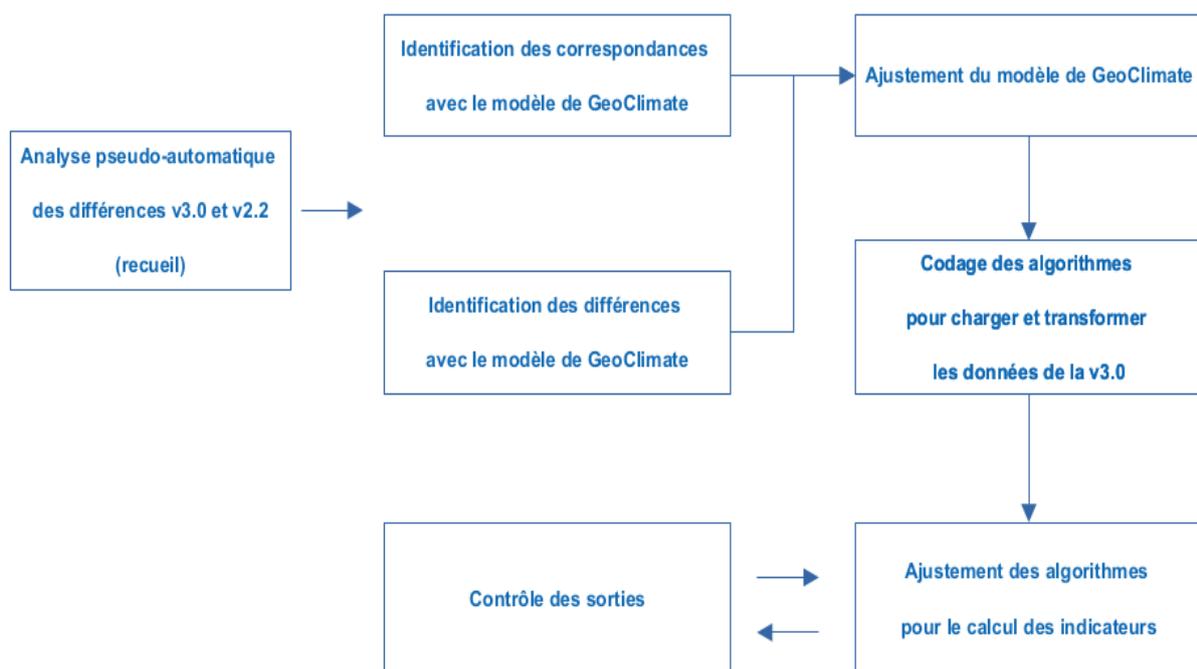
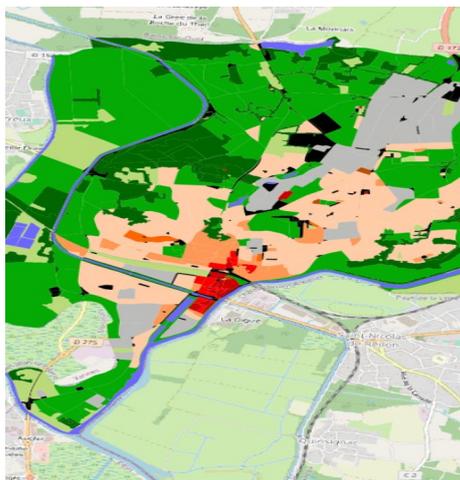


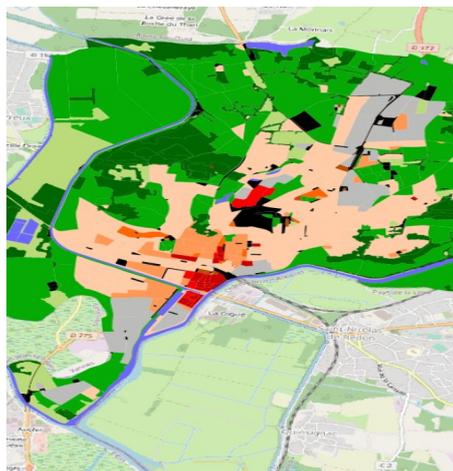
Figure 5. Principales étapes pour l'intégration de la BDTopo 3.0

Le module de traitement des données de la BDTopo pour GeoClimate a été entièrement rédéveloppé afin de le rendre plus générique et évolutif. En effet, le nouveau module BDTopo fonctionne maintenant avec la V3 mais également avec toutes les anciennes versions depuis 2011. Les trois représentations des zones climatiques locales de la figure suivante illustrent ces nouvelles possibilités de GeoClimate qui outre l'utilisation d'une donnée plus « fraîche » va permettre de construire des analyses temporelles.

BDTopo 2.2



BDTopo 3.0



BDTopo 2010



- ZCL 1: Ensemble de tours compact
- ZCL 2: Ensemble d'immeubles compact
- ZCL 3: Ensemble de maisons compact
- ZCL 4: Ensemble de tours espacées
- ZCL 5: Ensemble d'immeubles espacés
- ZCL 6: Ensemble de maisons espacées
- ZCL 7: Constructions légères
- ZCL 8: Grandes emprises tertiaires bâti bas
- ZCL 9: Maisons éparées, constructions isolées
- ZCL 10: Industrie lourde
- LCZ A: Densé trees
- ZCL B: Arbres épars
- ZCL C: Buissons, broussaille
- ZCL D: Pelouses, prairies, cultures
- ZCL E: Roche nue, pavés, macadam
- ZCL F: Terrain nu ou sable
- ZCL G: Eau
- Inconnu

Figure 6. Cartographie des zones climatiques locales avec différentes versions de la BDTopo

- 🕒 Le code source de GeoClimate, correspondant au livrable L1.2, est disponible sur le dépôt public GitHub : <https://github.com/orbisgis/geoclimate>
- 🕒 Le code qui a été modifié dans GeoClimate dans le cadre du projet est visible ici <https://github.com/orbisgis/geoclimate/pull/801>
- 🕒 La mise à jour de GeoClimate a été accompagnée de tests avec des jeux de données d'exemples qui sont tous disponibles avec le code de l'application (<https://github.com/orbisgis/geoclimate/tree/master/bdtopo/src/test/groovy/org/orbisgis/geoclimate/bdtopo>).
- 🕒 La documentation sur le Wiki est également à jour, Livrable 1.2, (<https://github.com/orbisgis/geoclimate/wiki>).

3.1.2 Tâche 1.2 Intégration des données sur la rénovation des bâtiments pour la BdD Architecturale DANUBE.

La base de données DANUBE a été construite lors du projet MApUCE, finalisé en 2019, à des fins de simulation de microclimat urbain. DANUBE décrit le parc de bâtiments de manière archétypale, ce qui signifie que des groupes des bâtiments avec des caractéristiques similaires (les archétypes) sont caractérisés par les dispositifs constructifs les plus fréquents dans ce groupe. Quatre variables ont été considérées pour distinguer les archétypes : la période de construction du bâtiment, le territoire où il se trouve, l'usage à auquel il est destinée, et la typologie morphologique du bâtiment.

En 2022, la base de données DANUBE décrivait les caractéristiques constructives des bâtiments (murs, toitures, vitrage, etc.), sans prendre en compte les rénovations successives qui ont pu avoir lieu. Or, la rénovation des bâtiments peut avoir un impact significatif sur les caractéristiques de l'enveloppe, notamment en ce qui concerne l'isolation des parois et le type de vitrage employé.

Méthodologie suivie

La méthode mise en œuvre, a principalement consisté à utiliser la base de données DPE (Diagnostic de Performance Énergétique) pour estimer l'écart entre les niveaux d'isolation obtenus à partir de DANUBE et les niveaux d'isolation évalués lors de ces DPE. La réalisation d'un DPE est obligatoire pour tous les bâtiments neufs, mais également lors de la vente d'un bâtiment existant ou la location d'un logement. La base de données DPE est mise à disposition du public par l'ADEME et a été mise en forme par le CSTB dans le cadre du projet Go Réno². Ainsi, la BDNB nous a permis de collecter des données géolocalisées sur le parc de bâtiments Français, notamment l'usage et la date de construction des bâtiments et, pour environ 6% des bâtiments, des informations issues des DPE.

Notre méthode s'est décomposé en 4 étapes :

1. Consolidation de la Base de Données DANUBE
Avant toute chose, il nous a fallu opérer un certain nombre de vérifications et de corrections sur la base de données DANUBE elle-même, afin de nous assurer de sa fiabilité pour la suite des travaux.
2. Détermination des coefficients de déperdition thermique des murs et des toits de la BD DANUBE
Dans cette étape nous avons calculé - avec une méthode identique aux DPE - les U des murs et des toits des dispositifs constructifs présents dans DANUBE. Cette étape était indispensable afin de pouvoir comparer les coefficients de déperdition issus des deux bases de données.
3. Correspondance entre les bâtiments de la BDNB et les archétypes DANUBE
Dans cette étape, nous avons associé un archétype DANUBE à chaque bâtiment géolocalisé dans la BDNB.
4. Comparaison des deux Bases de Données et analyse des résultats
La performance thermique des dispositifs DANUBE est comparée avec des données DPE disponibles pour les différents archétypes.

Résultats

L'analyse du taux de rénovation a été réalisée pour chaque dispositif constructif (mur et toit) et par groupe d'archétypes présentant des comportements thermiques similaires. La distribution de données DPE disponible pour ces ensembles a été comparée avec les limites de la plage de valeur U définie pour le dispositif constructif dans l'étape 2 de la méthode. Les cas avec une valeur U inférieure au minimum de la plage sont considérés comme possiblement rénovés. La figure ci-après (Figure 7) est un exemple de résultat pour un ensemble de bâtiments. Les bâtiments dans la zone verte sont considérés comme rénovés. La zone jeune représente les valeurs attendues pour la valeur U des dispositifs s'ils n'étaient pas rénovés. La zone rouge comprend aussi les bâtiments supposés non rénovés, mais avec une performance thermique des dispositifs moins bonne que celle attendue sans rénovation (la présence de ces valeurs supérieures à la plage prédéfinie peut être expliquée par la variabilité initiale de la composition des dispositifs constructifs à la construction et également par la présence de valeurs aberrantes déclarées lors de la réalisation du DPE). En haut de ces graphiques, il est possible de voir le pourcentage de bâtiments situés dans chaque zone.

² République Française (10 janvier 2022). Site particuliers Gorenove.fr CSTB. <https://www.data.gouv.fr/en/reuses/site-particuliers-gorenove-fr-cstb/>

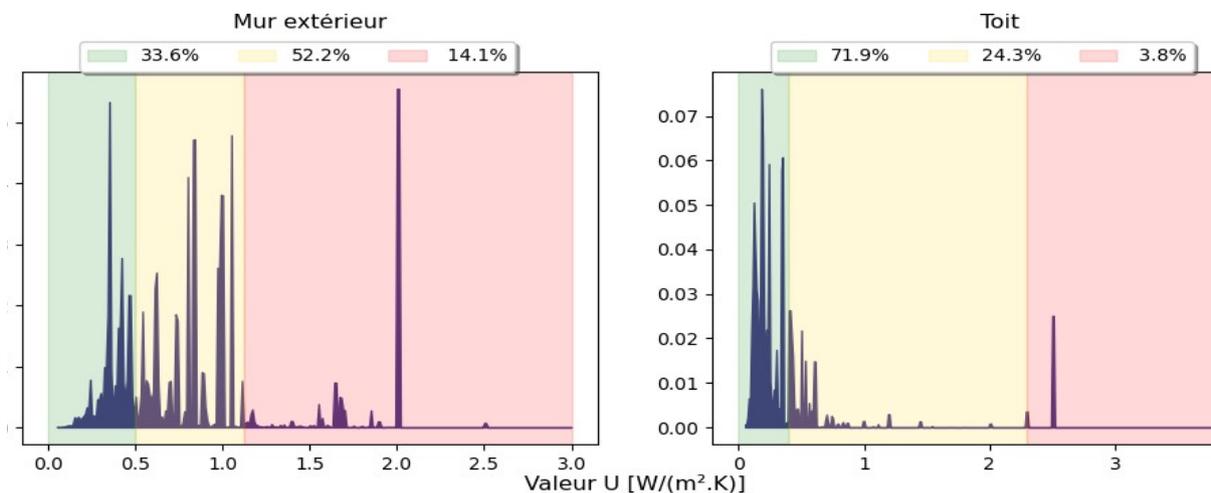
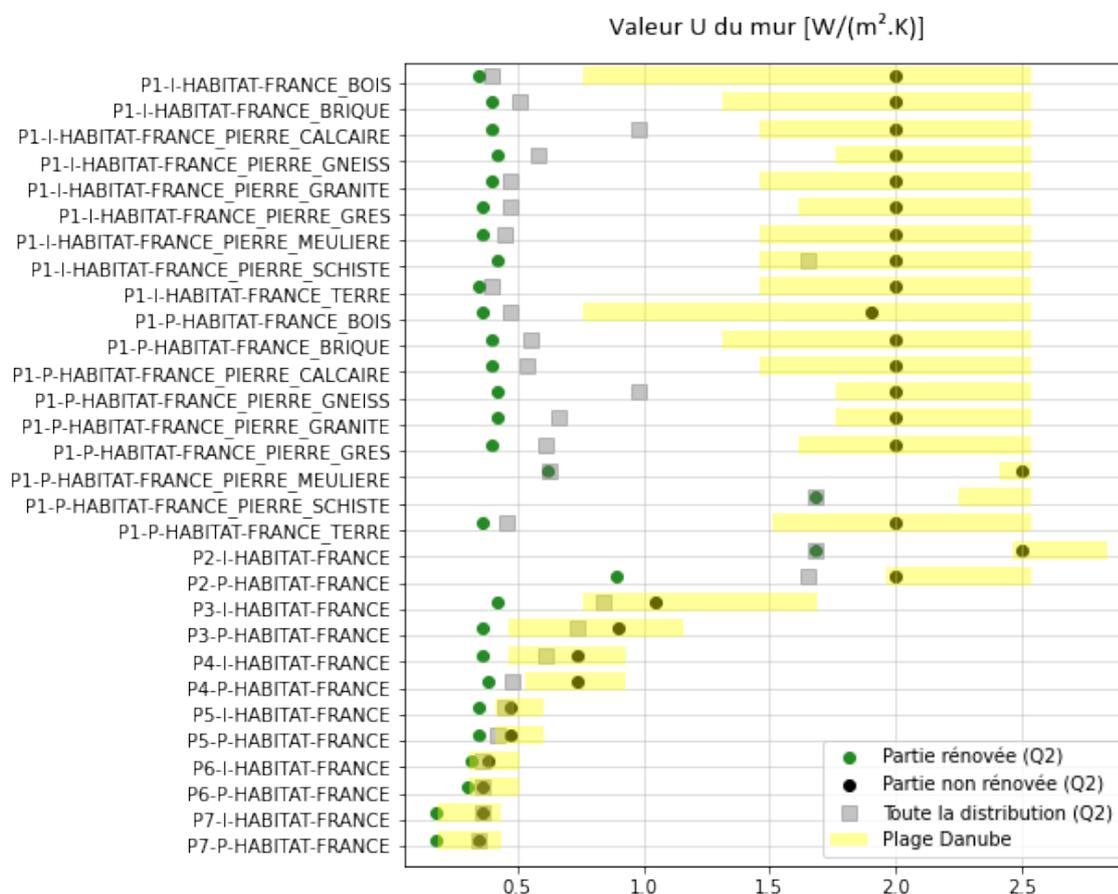


Figure 7. Densité de probabilité de la valeur U de l'archétype groupé P3-P-HABITAT-FRANCE

Les figures ci-après montrent les tendances centrales des résultats et les plages utilisées pour définir la rénovation dans chaque échantillon étudié.



Valeur U du toit [W/(m².K)]

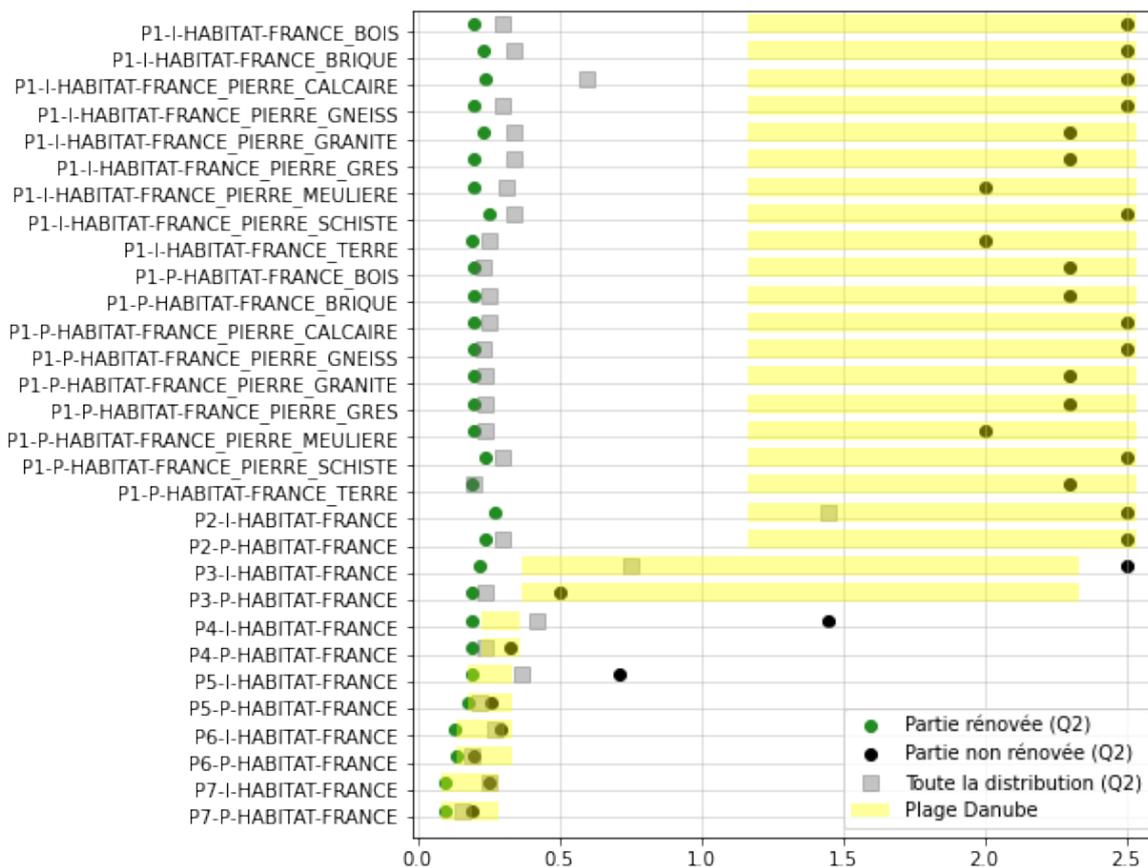


Figure 8. Médianes et plages de Valeur U du toit pour les échantillons étudiés

Type de vitrage

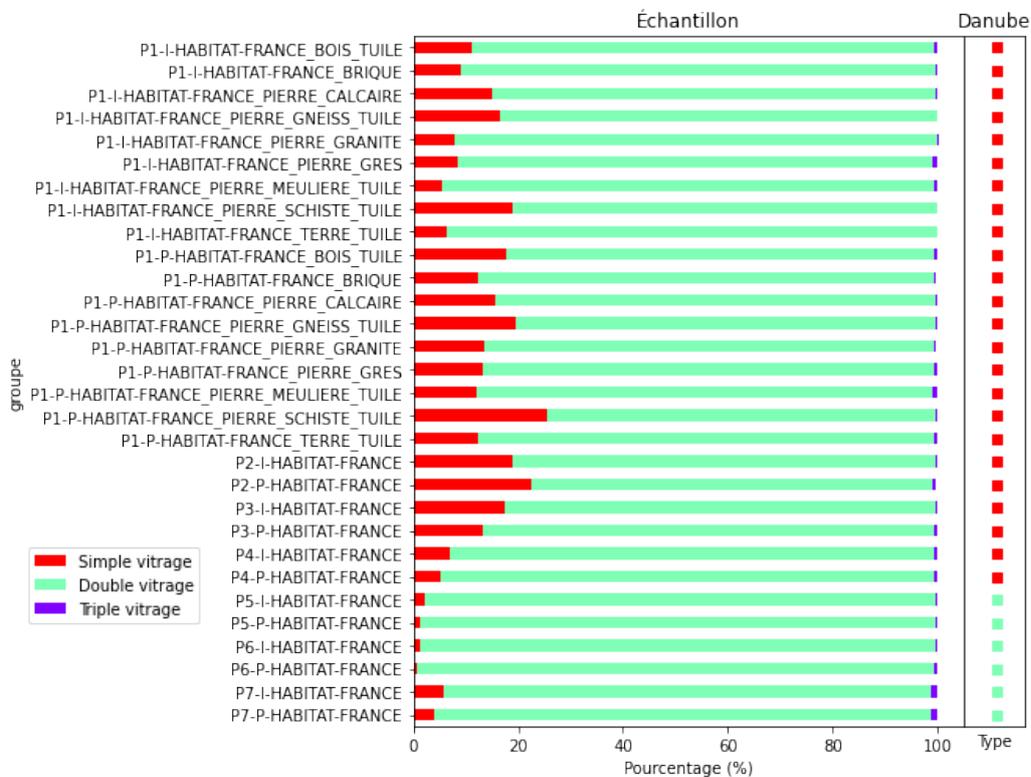


Figure 9. Type de vitrage pour les échantillons étudiés et DANUBE

Discussion

Les tableaux ci-après résument les taux de rénovation du parc de bâtiments étudiés par usage et par date. De manière générale, on remarque que l'habitat individuel est plus rénové que l'habitat collectif. Cela est concordant avec la littérature qui met en avant que les logements individuels sont plus facilement rénovés que les logements collectifs : en effet, les procédures sont plus simples (pas de copropriété) et il y a moins de locations (les logements en location sont moins fréquemment rénovés que les logements occupés par leurs propriétaires).

On observe également que le taux de rénovation diminue lorsque la période de construction augmente. D'une part, il s'agit de l'effet de rénovations successives (plus un bâtiment existe depuis longtemps, plus il est probable qu'il ait été rénové). D'autre part, les logements ayant été construits récemment ont de meilleures performances thermiques et acoustiques, ils nécessitent donc moins de rénovation.

Table 1. Parts de bâtiments rénovés au niveau des murs et au niveau des toits selon les usages

	Murs	Toits
Habitat	49%	57%
Bâtiment tertiaire	62%	32%
Commerce	85%	66%

Table 2. Part de logements rénovés au niveau des murs et au niveau des toits selon les dates de construction et les types de logement

Période		Habitat		Habitat pavillonnaire		Habitat collectif		
Code période	Limites		Murs	Toits	Murs	Toits	Murs	Toits
P1	-	1948	68%	73%	71%	81%	62%	58%
P2	1949	1973	69%	78%	64%	82%	100%	46%
P3	1974	1981	34%	69%	34%	72%	43%	31%
P4	1982	1989	55%	56%	56%	59%	44%	23%
P5	1990	2000	49%	45%	51%	50%	39%	15%
P6	2001	2012	24%	28%	25%	31%	14%	7%
P7	2013	-	11%	14%	11%	15%	9%	5%

Conclusion

Ce travail a permis de constater que plusieurs archétypes ont un niveau de rénovation significatif par rapport aux dispositifs constructifs considérés initialement. Cependant, l'analyse du taux de rénovation est basée sur le croisement de DANUBE avec la base de données DPE, elle est par conséquent limitée par la qualité et la disponibilité de ces données.

DANUBE étant basé sur une approche typologique, n'a pas été conçu pour décrire toute la variabilité constructive du parc de bâtiments français, mais pour montrer les principales tendances des pratiques architecturales de ce parc. Au sein d'un même archétype, les bâtiments sont hétérogènes et présentent des valeurs de U différentes de DANUBE. Il est donc possible qu'une partie des bâtiments ayant une valeur U inférieure à la plage définie pour l'archétype DANUBE ne soient pas réellement rénovés, mais que cette différence puisse être expliquée par la variabilité des matériaux utilisés pour la

construction du bâtiment. Par ailleurs, il serait intéressant de vérifier la représentativité des dispositifs majoritaires au sein des archétypes DANUBE. Les bases de données comme la BD TOPO v3 et la BDNB contiennent des informations sur la matérialité de l'enveloppe à l'échelle du bâtiment. Une perspective pour ce travail pourrait être de vérifier les hypothèses de matérialité de l'enveloppe en s'appuyant sur ces bases de données. Les résultats de cette étude dépendent également de la qualité intrinsèque des DPE disponibles : informations disponibles sur le bâtiment, hypothèses prises lors de la réalisation du DPE, professionnalisme des enquêteurs, ... Cela reste cependant la base de données la plus précise à ce jour. D'un point de vue statistique, l'analyse des DPE est un échantillonnage de convenance et pas un échantillon aléatoire car les ressources du projet et le calendrier associé à la tâche 1.2 ne permettaient pas l'utilisation d'une méthode d'échantillonnage statistique. Ces travaux donnent donc une vision inédite de l'état de rénovation du parc de bâtiments français. Dans la suite du travail, nous souhaitons pousser plus loin la validation de ces résultats, éventuellement par comparaison à des imageries thermiques aériennes.

Ce travail fait l'objet d'un article scientifique en cours de soumission :

Araujo, L., Bonhomme, M., Faraut, S., Tordnay, N., Unveiling Renovation Patterns in the French Building Stock Using Archetype Classification and Energy Performance Certificates Data. *To be submitted to Building Environment.*

3.1.3 Tâche 1.3 Développement d'une version interopérable de la Bdd Architecturale DANUBE compatible avec la production de documents géo-référencés.

Ce développement a été décomposé en deux parties distinctes. D'une part le développement d'un « outil DANUBE » spécifique s'appuyant sur la base de données architecturales et permettant la production de données sur les bâtiments ainsi que leur géo-référencement et, d'autre part, la réalisation d'une phase de validation et de confrontation terrain experte sous la forme d'un atelier participatif impliquant des utilisateurs potentiels de l'outil, experts des domaines de l'architecture, de l'urbain, ou acteurs des collectivités locales. Cette confrontation terrain est présentée en section 3.2.

Introduction

Afin de pouvoir effectuer des évaluations et simulations environnementales, qu'elles soient énergétiques ou concernant le (micro-)climat urbain, il est important de pouvoir disposer d'informations morphologiques, mais également d'autres informations spécifiques sur les bâtiments, notamment leurs matérialités, leurs dispositifs constructifs, ou leurs potentiels de rénovation. Dans le cadre du projet PAENDORA_2 (tâche 1.3 du Lot 1 "Développement d'Outils et Données"), l'objectif est ici de proposer les moyens pour rendre facilement disponibles ces informations sur les bâtiments sous la forme d'un outil le plus accessible possible, intégré au sein d'une chaîne complète de traitement de données autonome.

L'outil "DANUBE_tool" propose ainsi de générer et de procéder à la spatialisation de ces informations en s'appuyant principalement sur l'utilisation de la "Base de Données Architecturales DANUBE" (Données Archétypales aux Niveaux Urbain et Bâtiment pour des Évaluations environnementales) développée à partir des résultats du projet de recherche antérieur MApUCE (Base de données architecturales MApUCE développée au LRA - <https://lra.toulouse.archi.fr/lra/activites/projets/mapuce>), et enrichie de nouvelles fonctionnalités et de données concernant la rénovation. L'outil s'intègre dans une chaîne de traitement de données urbaines basée sur les informations spatialisées, indicateurs et classifications typo-morphologiques générés essentiellement par l'outil "Geoclimate", sur l'utilisation directe (ou de traitements) d'informations issues de bases de données nationales géolocalisées existantes, notamment la base de données BDTOPO de l'IGN (si celles-ci ne sont pas prise en compte par l'outil Geoclimate) ainsi que des données socio-économiques FILOSOFI de l'INSEE (essentiellement sur la population résidente) décrites par la suite.

Approche méthodologique

La première étape du travail a consisté à trouver les sources de données qui puissent apporter de la manière la plus complète possible les informations nécessaires pour définir les quatre variables qui définissent un archétype (Période, Usage, Typologie, Territoire.), et de procéder à leur spatialisation. Comme l'outil a vocation à être utilisé le plus largement possible (diversité potentielle des utilisateurs et domaines d'application) en minimisant les contraintes sur l'obtention des sources de données nécessaires, des jeux de données en "Open Data" (en accès et usage libre) ont été privilégiés.

Les jeux de données suivants ont initialement été considérés:

- BDTOPO V2 et V3 (diffusés par l'IGN - <https://geoservices.ign.fr/>)
- BDNB (Base de Données Nationale des Bâtiments, développée et diffusée par le CSTB - <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnees-nationale-des-batiment>)
- Geoclimate
- Filosofi (Dispositif Fichier localisé social et fiscal, diffusé par l'INSEE - <https://www.insee.fr/fr/information/5349629>).

La BDTOPO et la BDNB ont été considérées pour contenir des informations sur la période et sur l'usage. Les données Filosofi peuvent également fournir des informations sur la période de construction, mais de manière moins détaillée. Geoclimate fournit des informations sur la typologie des bâtiments (à partir de la classification typo-morphologique issue du projet MApUCE et reprise dans le projet PAENDORA).

Afin de procéder à la spatialisation complète des données DANUBE, il est important que les quatre variables d'entrée soient décrites pour un maximum des bâtiments possibles. Entre les jeux de données ci-dessus, la BDTOPO V3 est celle qui représente la plus grande quantité de bâtiments et sera donc la référence pour les autres bases de données. La BDTOPO V2 a environ 70% des bâtiments de la V3. De plus, la V2 n'a pas d'informations sur la période de construction des bâtiments. Pour obtenir la meilleure couverture possible du parc immobilier, nous choisissons d'utiliser la dernière version de la

BDTOPO. Les informations détaillées sur l'usage dans la BDNB sont par ailleurs soumises à conditions de droits, et ne sont donc pas "Open Data". La quantité de bâtiments pour laquelle la BDNB décrit la période est très proche de celle de la BDTPOPO. Après avoir comparé et évalué quantitativement et qualitativement le contenu de la BDNB, nous avons décidé que cette base de données n'apportait pas plus d'informations supplémentaires significatives par rapport aux autres jeux de données (en particulier la BDTPOPO V3, par couplage avec les données Filosofi) et n'a donc pas été conservée comme donnée source par la suite. Pour les cas où la date de construction n'est pas définie par la BDTPOPO V3, nous utilisons Filosofi pour imputer cette valeur. Ces données ne sont pas disponibles au niveau du bâtiment, mais au niveau d'une date de construction majoritaire à l'échelle d'une maille (données carroyées de l'INSEE). Les données de Filosofi peuvent être également utilisées pour l'étude de la densité populationnelle à l'échelle d'une maille, ce qui peut aider à distinguer entre l'usage "habitat" et "tertiaire".

La variable territoire est définie par les cartes de territoire propres à DANUBE. Deux cartes existent en fonction des périodes de construction: pour les bâtiments construits avant et après 1948 (Période P1 ou P2 à P7). Pour cette raison, tous les bâtiments disposant de l'information sur la période pourront être associés à un territoire DANUBE. A l'issue de l'analyse des taux de rénovation des bâtiments (tâche 1.2 du projet), de nouvelles versions des cartes de territoire ont été élaborées: une amélioration des territoires à l'échelle des départements et une nouvelle carte des territoires à l'échelle des communes pour la période P1 a été créée.

Au niveau de l'implémentation, nous proposons une internalisation des traitements géospatiaux au travers d'extractions, de jointures spatiales, de désagrégation de données aux différentes échelles et de calcul de densité entre autres, pour la production finale des variables d'entrée à la base de données architecturales DANUBE. Mais également l'intégration d'approches de génération d'informations manquantes ou potentiellement erronées à l'échelle de chaque bâtiment (en particulier sur leur usage ou leur date de construction).

Caractéristiques de l'outil DANUBE_tool

L'outil "DANUBE_tool" est développé pour pouvoir intégrer la définition des données d'entrée et de sortie de la chaîne de traitements, la formalisation des processus de traitement nécessaires, et un certain nombre de "boîtes à outils" correspondant à des phases de traitement successives. Il est matérialisé sous la forme d'une extension (plugin) du logiciel Système d'Information Géographique (SIG) Open Source QGIS (qgis.org)(voir Figure 10). Les caractéristiques principales de l'outil DANUBE_tool sont essentiellement:

- Intégration complète des données de la Base de Données Architecturales DANUBE par l'intermédiaire d'un module Python (PyDANUBE) définissant un objet "Base de Données Architecturale DANUBE" et proposant une API utilisateur (ensemble de fonctions prédéfinies mais pouvant être enrichies par d'autres fonctionnalités par le biais d'un développement spécifique complémentaire).
- Définition des données sources par des paramètres d'entrée de l'outil au niveau de la Toolbox : Geoclimate, BDTPOPO V3, et FILOSOFI (pouvant être incluses directement dans l'outil "DANUBE_tool" car couvrant tout le territoire national).
- Phase de pré-traitement des données pour chacune des entités à l'échelle des bâtiments : intégration des outils de génération et de traitement des données numériques et géospatiales nécessaires à la détermination des données d'entrées
- Phase de génération des données DANUBE : spatialisation des informations par interrogation/extraction de la base de données architecturales et enrichissement des données géolocalisées à l'échelle des bâtiments sur l'étendue d'une commune.

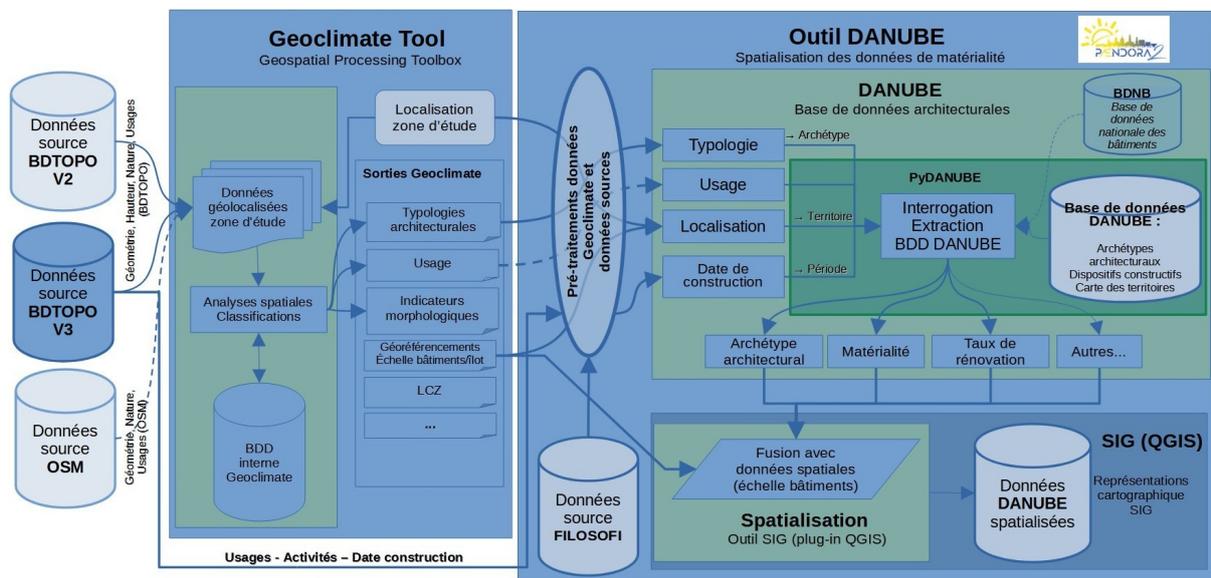


Figure 10. Schéma synoptique de l'outil DANUBE

L'approche utilisée pour les différentes phases proposées pour l'outil DANUBE permettent de dissocier autant que possible la production des informations nécessaires à partir des données sources seulement, de la phase de pré-traitement des données, et de la dernière phase basée essentiellement sur la génération à partir des informations de la base de données DANUBE (incorporée comme brique logicielle à l'outil). Par exemple, le pré-traitement des données permettra de déterminer (ou d'estimer) la date de construction de chacun des bâtiments. La transformation de cette date en "période de construction" sera par contre assurée au niveau de la base de données DANUBE (de manière intégrée à la base elle-même).

Intégration de la Base de Données Architecturales DANUBE: module PyDANUBE

Afin d'assurer l'autonomie et l'interopérabilité de la Base de Données Architecture DANUBE, une implémentation informatique originale est proposée dans le cadre du développement de l'outil "DANUBE_tool" utilisant un formalisme de programmation "orientée objet" (sous la forme d'une classe objet "DANUBE_database"), d'une librairie et d'une API intégrées dans un module Python intitulé "PyDANUBE".

Le module python "PyDANUBE" incorpore et gère de manière transparente le contenu de la Base de Données Architecturales DANUBE sous différentes formes et niveaux descriptifs: la **forme tabulée (DANUBE-core)** issue directement de l'export des différentes tables gérées nativement (et à l'origine de la forme de base de données relationnelle des premières versions de DANUBE), la **forme étendue (DANUBE_extended)** qui est la forme entièrement développée depuis la table "CATALOGUE" à partir des jointures avec toutes les autres tables individuelles sous la forme d'une table unique, et la **forme généralisée (DANUBE_generalized)** qui est issue d'un processus de généralisation des archétypes architecturaux représentatifs pour permettre de les attribuer, de manière cohérente et significative, à toutes les combinaisons possibles des 4 variables d'entrée de la base de données DANUBE (typologie, période de construction, usage et territoire), en utilisant des règles de généralisation sur les valeurs de ces variables basées sur une approche "experte".

Un ensemble de méthodes d'accès ou de traitement des données permettent de créer, de contrôler le fonctionnement et d'interroger une instance de la base de données DANUBE. La base de données DANUBE intègre désormais la gestion de la carte des territoires à deux niveaux d'échelles territoriales, généralement par l'ajout à la valeur de la variable indiquant le territoire ("Location") de l'indication d'un paramètre supplémentaire intitulé "scale". Ce paramètre permet de caractériser soit l'échelle départementale (mode de fonctionnement originel par défaut de la base de données architecturale MApUCE, s'il n'est pas indiqué, ou en utilisant la valeur "DEPARTEMENT"), mais également celui de la nouvelle échelle des communes (en utilisant la valeur 'COMMUNE'). La fonction principale permet l'interrogation directe de données archétypales à partir des quatre variables d'entrée (notamment les dates de construction et des usages issus des pré-traitements des données sources).

L'outil de génération de données "DANUBE_Tool"

Principes de DANUBE_tool

Les principes de fonctionnement de l'outil DANUBE_tool sont essentiellement:

- l'utilisation privilégiée des données brutes nécessaires identifiées précédemment.
- la définition des variables d'entrées : définition des couches de données sources (Geoclimate, BDTOPO, FILOSOFI) au niveau de l'interface de la Toolbox.
- l'interaction avec les fonctions de traitements géospatiaux et de génération de données et création de couches de données géolocalisées intermédiaires de la phase des pré-traitements.
- l'étape finale de génération et de spatialisation des données de la base de données DANUBE : affectation des données à l'échelle des bâtiments à partir des informations de base propres aux bâtiments, générées par le workflow, utilisant directement les valeurs générées comme variables d'entrée à DANUBE (via la librairie et l'API de PyDANUBE).
- la décomposition en phases de traitements successives: définition des variables d'entrée, pré-traitement des données (workflow), étape finale.
- optionnellement, des phases de représentations cartographiques ou symboliques).

Phase de pré-traitement des données sources

L'objectif de la phase de pré-traitement est multiple. Cela concerne essentiellement :

- l'amélioration des performances : limitation de l'étendue des données sources à l'emprise de l'étendue des sorties Geoclimate (échelle commune), création d'un index spatial (avec éventuelle conversion des sources de données incompatibles avec l'utilisation des index spatiaux)
- le calcul densité de population utilisé pour discerner certains usages des bâtiments (par exemple les immeubles d'habitation des bâtiments à usage tertiaire)
- le croisement de données (source couche de données "bâtiments" et "activités" de la BDTOPO V3) pour la détermination des informations sur l'usage des bâtiments extraits (cas particulier des bâtiments indifférenciés).
- la détermination des informations sur la date de construction. Plusieurs approches méthodologiques sont employées pour induire une date de construction la plus cohérente dans le cas où cette information est manquante dans les données sources.

Phase de génération des données DANUBE

La phase de génération des données DANUBE est réalisée à l'aide d'un script permettant l'affectation des informations attributaires (sur la matérialité, le potentiel de rénovation,...) pour chaque bâtiment par interrogation/extraction depuis la base de données DANUBE (via l'utilisation de l'API DANUBE_Database) en fonction des variables d'entrée extraites (ou déduites) des données issues des données sources ou de la phase de pré-traitement.

Les résultats de cette génération pourront être regroupés dans une ou plusieurs couches distinctes d'informations géolocalisées pour réaliser la spatialisation directe, ou sous forme de tables attributaires seulement (par l'intermédiaire de l'usage d'identifiants des bâtiments), en fonction des besoins.

Utilisation de l'outil DANUBE_tool

Installation de l'outil DANUBE_tool

L'outil "DANUBE_tool" est intégré au sein du Système d'Informations Géographiques QGIS, matérialisé sous la forme d'une extension (plugin) du logiciel. L'installation de l'extension est actuellement réalisée par l'import manuel d'un fichier "DANUBE_Tool-version.zip" (archive au format ZIP) via le menu "Plugins"/"Install from ZIP". A l'issue de la phase de développement, l'outil "DANUBE_tool" sera mis à disposition pour un téléchargement et une installation automatique depuis le référentiel officiel d'extensions en ligne de QGIS.org (<https://plugins.qgis.org/plugins/>).

Une fois installé, l'accès à l'outil est ensuite proposé au niveau de la "Boîte à outil" (Toolbox) de QGIS (accessible via le menu "Processing/Toolbox") par une entrée intitulée "DANUBE Database" et d'un outil "DANUBE tool" (Figure 12).

Le workflow simplifié du pré-traitement des données est présenté ci-dessous :

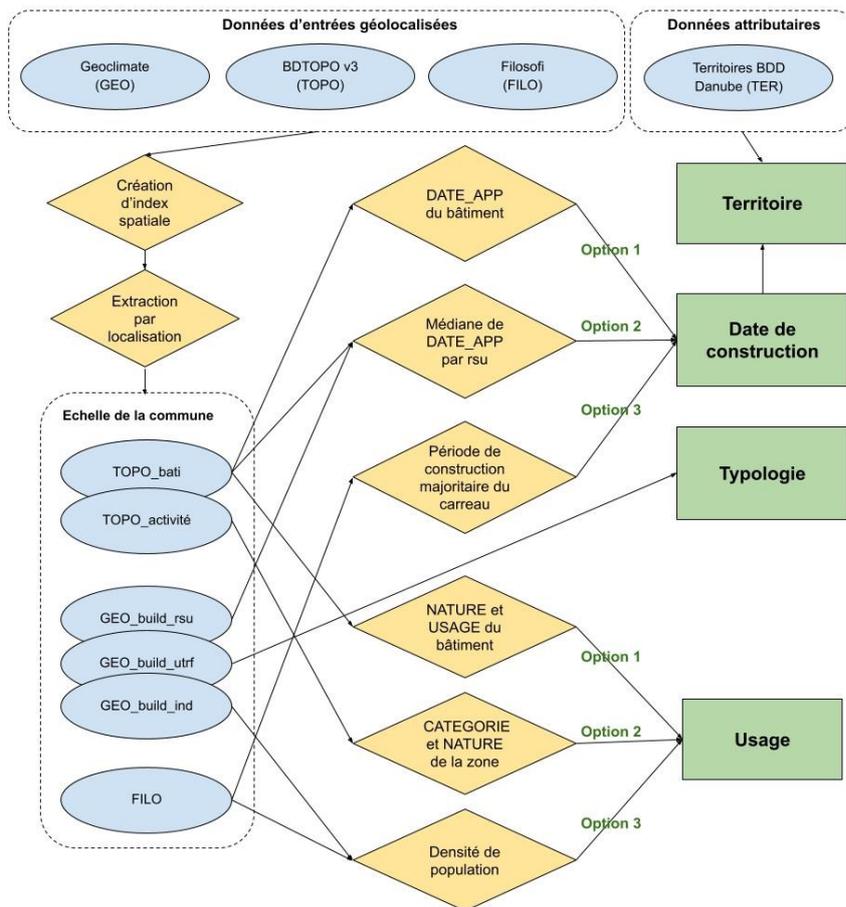


Figure 11. Workflow simplifié du pré-traitement des données de l'outil DANUBE

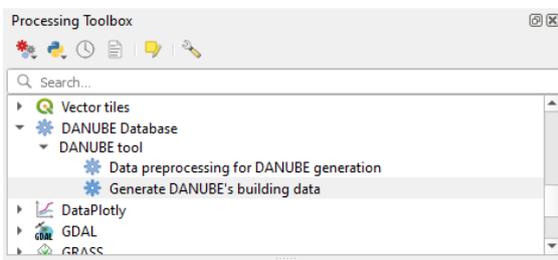


Figure 12. Accès aux fonctions de traitement de l'outil DANUBE

Fonctionnement de l'outil DANUBE (extension QGIS)

Pour son fonctionnement (Figure 13), l'outil DANUBE_tool reprend un principe de décomposition en fonctions de traitement reprenant le principe des phases de traitement successives:

- phase de pré-traitement des données sources : cette phase est réalisée par l'exécution de la boîte à outil "Data preprocessing" de l'Outil DANUBE, et l'indication des sources de données nécessaires (voir figure suivante).
- phase de génération et de spatialisations des données DANUBE : cette phase est réalisée par l'exécution de la boîte à outil "Data preprocessing" de l'Outil DANUBE (voir figure suivante)

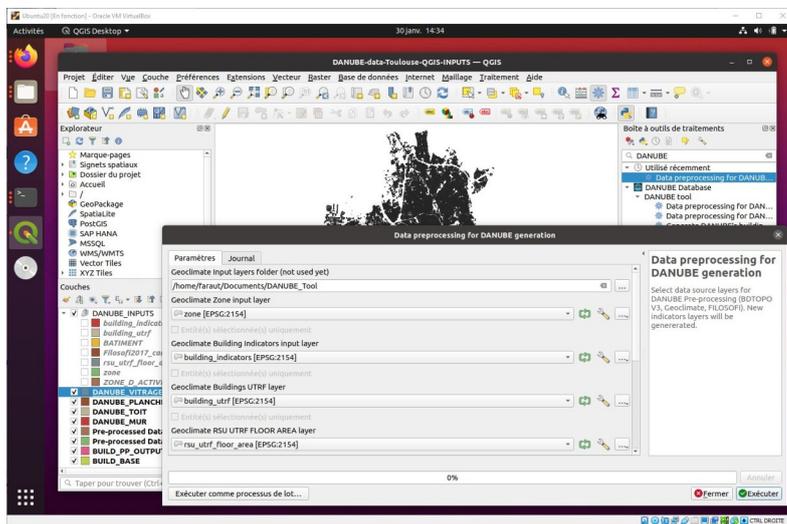


Figure 13. Illustration de l'interface de l'outil DANUBE au sein du logiciel QGIS

Le fonctionnement de l'outil est décrit plus précisément dans un document présentant un « Tutoriel de prise en main de l'outil « DANUBE_Tool » (fichier « **BDD-DANUBE-Tutoriel-DANUBE_Tool-12-2024.pdf** ») et sur le site Web de présentation de « DANUBE » (voir chapitre « Développement et diffusion de l'outil DANUBE-tool »). Dans le cadre d'une des réunions semestrielles du projet PAENDORA2 (le 06 février 2024 au LIED), une session de formation interne a été organisée à l'intention membres de l'équipe de recherche (voir le support de la présentation « Outil de spatialisation de la base de données DANUBE : DANUBE_Tool » intitulé « **Présentation générale DANUBE_Tool-Formation-06-02-2024.pdf** »)

Développement et diffusion de l'outil DANUBE_tool

- Dans le cadre de la tâche 1.3 du projet, la consolidation de la base de données DANUBE (initiée lors de la tâche 1.2) a été finalisée permettant d'assurer la cohérence et la validation des données, en particulier pour assurer l'adéquation avec les informations concernant la rénovation des bâtiments. La phase d'analyse des données disponibles réalisée en début de tâche, a permis de valider les sources de données et les traitements nécessaires. L'architecture de l'outil DANUBE_tool est actuellement entièrement finalisée ainsi que les principes de l'intégration sous la forme d'une extension au SIG QGIS.
- La formalisation de la base de données DANUBE sous une forme interopérable (module Python PyDANUBE), ainsi que les développements nécessaires à la génération sont finalisés. L'étape de génération de la version "généralisée" de la base de données DANUBE, nécessite encore cependant une réécriture du code utilisé dans la version MApUCE (en langage R) en langage Python pour pouvoir être réintégrée et utilisée dans le module PyDANUBE.
- Suite aux retours de l'atelier de confrontation terrain et du retour d'expérience, des développements complémentaires sont envisagés au niveau de traitements nécessaires pour une utilisation dans un contexte opérationnel (non purement SIG ou de développement informatique). D'autres fonctionnalités (ainsi que leur implémentation sous forme de boîtes à outil QGIS) seront envisagés à court terme, en particulier pour ce qui concerne les représentations symboliques et cartographiques des informations générées, selon des thématiques spécifiques (en particulier la matérialité et la rénovation).
- Des post-traitements seront également envisagés pour générer des informations à d'autres échelles spatiales que celles du bâtiment (par exemple celle de l'îlot) dans le cas où celles-ci peuvent être pertinentes.
- Pour faciliter la dernière phase de développement actuelle, et dans l'attente d'une publication scientifique sur l'outil DANUBE, les codes source sont actuellement toujours seulement mis en partage sur la plateforme de dépôt de référentiels de code Github (<https://github.com/>) dans un espace privé à destination des seuls développeurs de l'outil. L'ensemble des codes sources seront diffusés publiquement à terme également sur GitHub, en licence libre (sur le modèle utilisé par Geoclimate).
- Les informations sur la base de données architecturales DANUBE, ainsi que sur l'outil DANUBE (développement et téléchargement) sont toujours par ailleurs disponibles sur la page de

présentation du projet « DANUBE » sur le site du LRA: Projet DANUBE - <https://lra.toulouse.archi.fr/lra/activites/projets/DANUBE>

3.2 LOT 2. Confronter les données produites et existantes avec la réalité terrain

Le LOT 2 correspond aux activités de validation en termes de précision des données de morphologie urbaine, d'occupation du sol et architecturales. Deux stratégies complémentaires avaient été envisagées : D'abord, une validation automatique de GeoClimate avec des jeux de données tests. Cette phase de validation est néanmoins intégrée dans la chaîne de compilation qui permet de construire le "package" logiciel GeoClimate. Elle permet de contrôler la qualité des sorties de GeoClimate et de prévenir d'éventuelles erreurs lorsque les algorithmes sont modifiés, c'est l'objet de la tâche 2.1 présentée en section 3.2.1. Ensuite, confronter ces données à la réalité terrain à travers l'expertise de ces données par des acteurs opérationnels, les professionnels et les chercheurs, c'est l'objet de la tâche 2.2 présentée en section 3.2.2.

3.2.1 Tâche 2.1 validation et contrôle des algorithmes

Un article dédié à la classification en *Local Climate Zone*³ a été déposé le 27 mars 2023, livrable 2.1. Il présente de manière détaillée l'algorithme implémenté dans GeoClimate et les différences obtenues lorsque les données d'OpenStreetMap sont utilisées plutôt que celles de la BD Topo V2.2.

Bernard, J., Bocher, E., Gousseff, M., Leconte, F., and Le Saux Wiederhold, E.: *A generic algorithm to automatically classify urban fabric according to the Local Climate Zone system: implementation in GeoClimate 0.0.1 and application to French cities, EGUsphere [preprint]*, <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-371>, 2023.
<https://egusphere.copernicus.org/preprints/2023/egusphere-2023-371/#discussion>

Un autre article qui présente l'outil de comparaison utilisé dans l'analyse comparative de la classification des zones climatiques locales de l'article été publié chez JOSS : Gousseff et al., (2023). *lcxexplore: an R package to explore Local Climate Zone classifications. Journal of Open Source Software*, 8(91), 5445, <https://doi.org/10.21105/joss.05445>

Méthodologie

La méthodologie est synthétisée dans la Figure 17. À chaque RSU (îlot) est attribuée un type de LCZ. La première étape est de distinguer les RSU de type urbain de celles de type rural. Une RSU est considérée comme rurale lorsque la fraction de bâtiments et le rapport d'aspect sont inférieurs à 0.1. La distinction en 5 différents *Land cover type* est réalisée à partir des valeurs de fraction de surfaces imperméables, de végétation, de végétation haute et d'eau. La distinction des LCZ pour les RSU "urbaines" (sauf LCZ 8 et 10) est effectuée en fonction des 7 principaux indicateurs proposés par Stewart et Oke (2012) pour classer un territoire en LCZ : facteur de vue du ciel, rapport d'aspect, fraction de surface de bâtiment, fraction de surface imperméable, fraction de surface perméable, hauteur des éléments de rugosité et classe de rugosité du terrain. Chaque type de LCZ a une plage donnée pour chacun des 7 indicateurs. La méthode pour trouver le type de LCZ le plus approprié pour une RSU donnée est basée sur la distance minimale dans un espace vectoriel à 7 dimensions (les 7 indicateurs). Pour calculer cette distance, chaque indicateur est normalisée en fonction de la moyenne et de l'écart-type des valeurs de l'intervalle du référentiel de Stewart et Oke (2012). La méthode et les données utilisés pour le calcul de certains indicateurs peuvent être plus fiables que d'autres pour l'identification des LCZ. Afin de prendre en compte cette différence, des pondérations du calcul de distance sont réalisées. Les deux types de LCZ les plus proches des indicateurs de la RSU (LCZ_PRIMARY et LCZ_SECONDARY) sont associés à cette RSU. Pour les LCZ 8 et 10, des indicateurs complémentaires sont utilisés, dont des indicateurs caractérisant l'usage des bâtiments.

³ Article en open access, le preprint est d'ores et déjà disponible sur le site de la revue *Geoscientific Model Development*

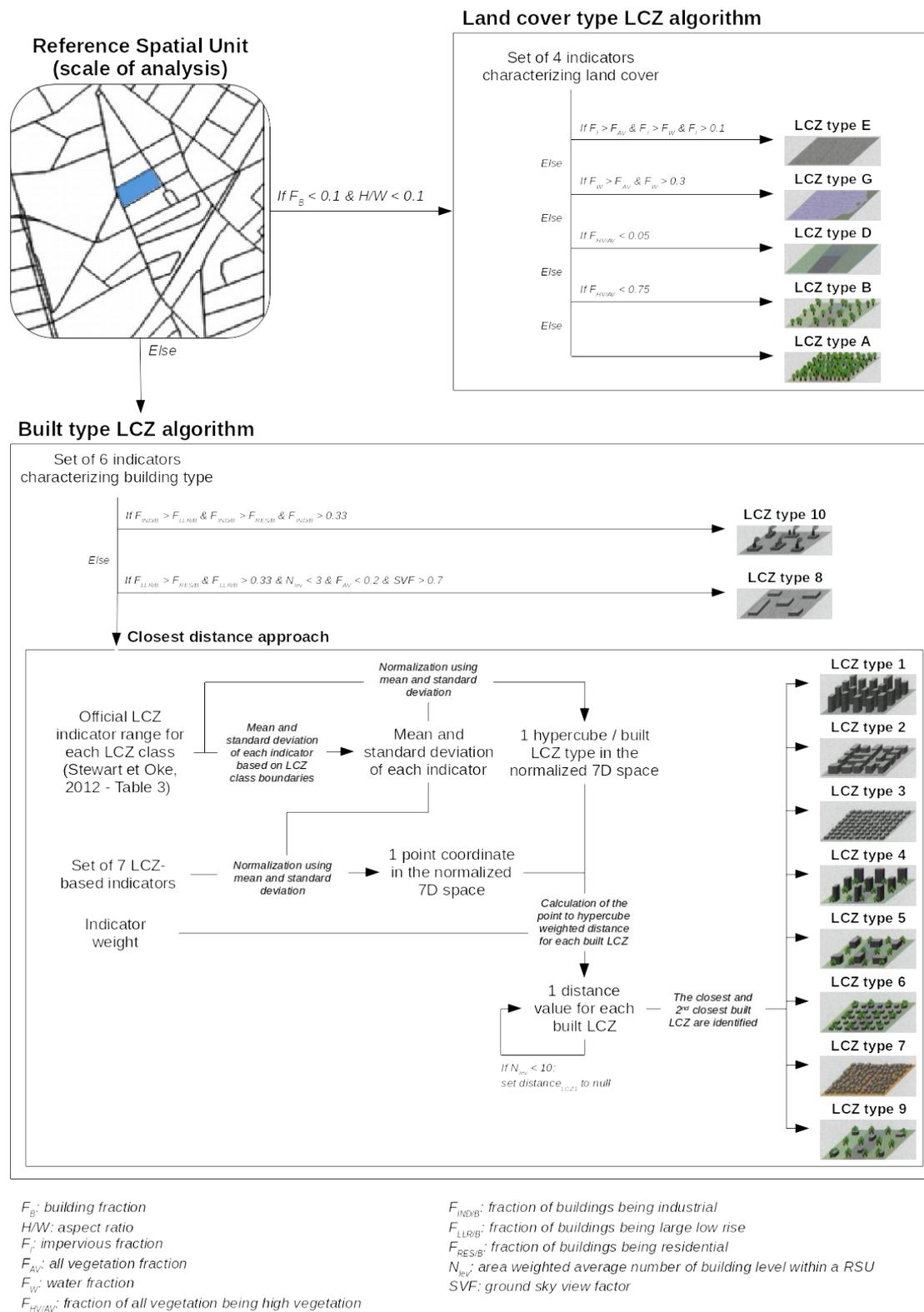


Figure 17. Méthodologie de la validation et contrôle des algorithmes pour la classification LCZ

Résultats de la comparaison entre OpenStreetMap et la BD Topo V2.2

Un logiciel libre distribué sous la forme d'un package R (*LczExplore*) dédié à la comparaison de cartes LCZ a été développé par le Lab-STICC. Il a permis de comparer les LCZ produits avec GeoClimate et obtenus en utilisant les données OpenStreetMap et BD Topo V2.2 pour 22 territoires de France métropolitaine. Un exemple de comparaison est illustré Figure 18. L'outil est disponible avec une documentation sur le site <https://github.com/orbisgis/lczexplore>

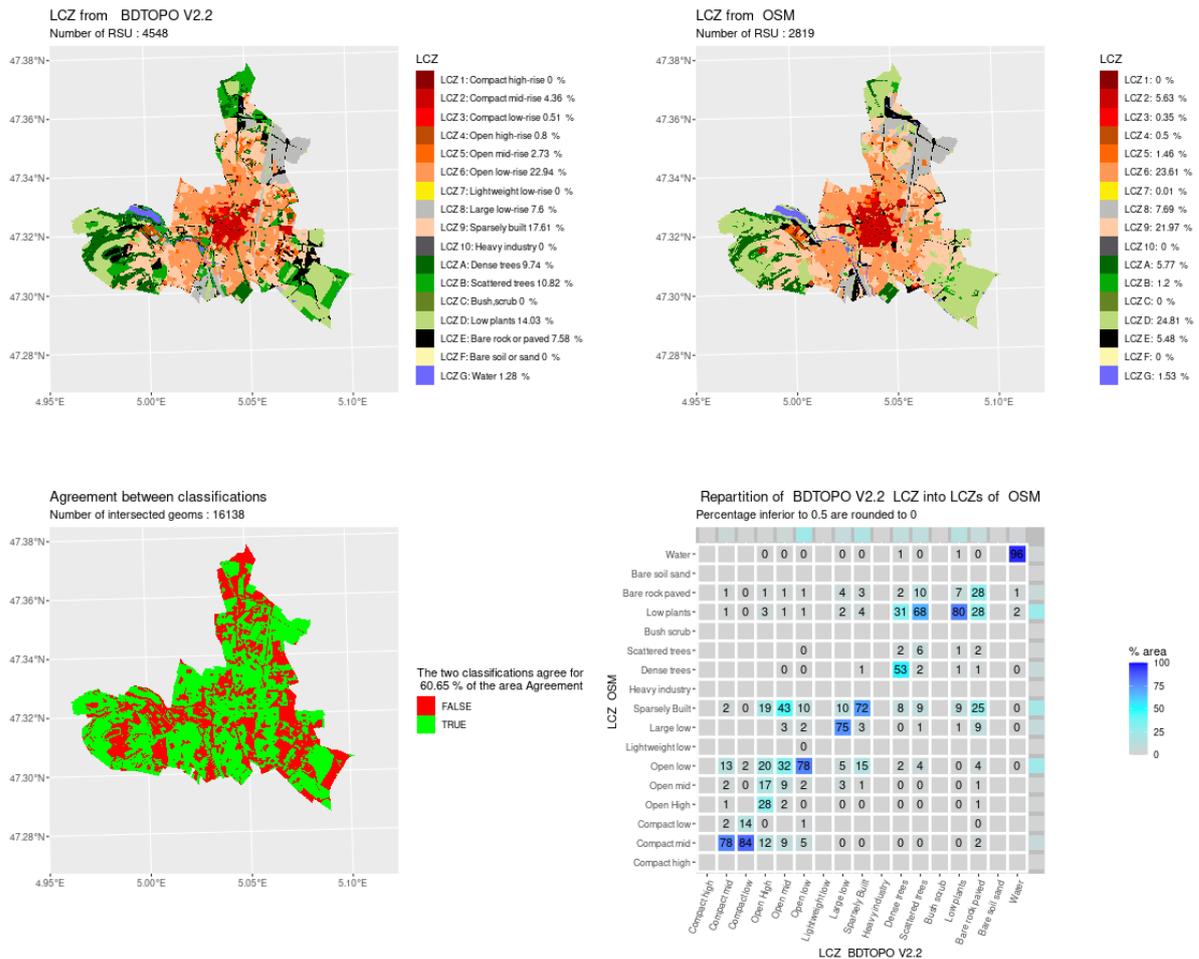


Figure 18. Comparaison de LCZ générées pour la ville de Dijon par la méthode GeoClimate en utilisant la BD Topo V2.2 et OpenStreetMap

À l'échelle des 22 territoires étudiés, environ 55% de la surface a obtenu le même type de LCZ. Ce taux de concordance entre les classifications OSM et BDT varie fortement d'une commune à l'autre (de 30 à 82%). Les grandes parcelles de forêt et d'eau sont bien répertoriées dans les deux sources de données, ce qui conduit à une bonne concordance pour les territoires contenant une grande part de ces parcelles. En ce qui concerne les types de LCZ construites, la concordance est élevée pour les immeubles compacts de moyenne hauteur et les immeubles ouverts de faible hauteur (83 % et 78 % respectivement), qui sont les principaux types de LCZ construites. Cependant, une grande partie des RSU classées dans les catégories "open mid-rise" et "open high-rise" par la BDT sont classées dans la catégorie "open low-rise" par OSM. Cette différence est à la sous-estimation de la hauteur des bâtiments OSM situés dans des zones ouvertes (cf. Bernard et al., 2022).

A noter que l'outil LczExplore a fait l'objet de plusieurs communications scientifiques (voir **section publications**) mais également d'une présentation auprès des agences d'urbanisme lors des 4 sessions formations sur GeoClimate (voir **livrable L4.2 Compte rendu des formations Geoclimat**). LczExplore offre une solution simple pour comparer et évaluer les différences ou similarités entre deux cartographies des ZCL.

3.2.2 Tâche 2.2 validation sur un retour « expert »

Dans cette tâche du projet, nous souhaitons proposer un « retour expert », sur l'utilisation des données produites par DANUBE, les données de morphologie urbaine et d'occupation du sol (i.e. classifications en LCZ, dont celles issues de l'outil Geoclimate) et leur confrontation avec des données microclimatiques sur une sélection de territoires démonstrateurs. Trois actions ont été entreprises à l'aide de plusieurs stages M2 :

- La première, menée au LISST en 2022 dans le cadre des stages de Thomas Lagelouze et Mitia Aranda ont servi à mettre à l'épreuve la qualité des données géographiques issues de GeoClimate produites lors du projet PÆNDORA_2 et d'îlot de chaleur urbain produites lors du projet MApUCE sur **Toulouse, Paris, Grenoble et Lyon** pour un croisement avec les données sociodémographiques de l'INSEE à l'échelle des l'IRIS.
- La deuxième, menée en 2024 dans le cadre du stage de Guillaume Huteau a sélectionné les Métropoles de **Dijon et Nancy**, qui bénéficient de travaux des équipes de recherche CRC (Université de Bourgogne) et TEAM (Cerema) et développent des partenariats avec les acteurs territoriaux locaux. Les données climatiques disponibles à Dijon et Nancy (réseaux de mesures fixes in-situ, simulation, mesures mobiles) en font des cas propices à l'application de cette méthode. D'autre part le contexte topographique encaissé et les conditions climatiques proches de ces deux villes permettent la comparaison des résultats produits avec cette méthode.
- La troisième, menée en 2024 dans le cadre du stage M2 d'Anne Brunet au LRA qui a permis d'organiser une série d'ateliers de formation à l'outil et de retour d'expérience sur l'outil en soit même et sur la qualité des résultats.

A. Validation sur un retour expert dans le cadre des stages de Thomas Lagelouze et Mitia Aranda

Thomas Lagelouze « *Comparaison de méthodes d'évaluation statistiques de la vulnérabilité sociale à la hausse de la chaleur en milieu urbain : application aux métropoles de Toulouse, Grenoble, Lyon et Paris* », Master 2 Mention « Géographie, Aménagement, Environnement, Développement » Parcours : GEOgraphie Information Interface Durabilité EnvironnementS. Grenoble. Stage au LISST fev. - sept 2022.

Mitia Aranda « *Multicriteria heat vulnerability assessment for the Metropolitan region of Toulouse (FR)* », European Joint programme of Master in Urban Climate & Sustainability. Stage au LISST mars - août 2022

L'objectif de ce travail était de :

- Mieux comprendre le cadre théorique d'évaluation de la vulnérabilité sociale à la chaleur.
- Comparer plusieurs approches statistiques pour construire les indicateurs de vulnérabilité à la chaleur.
- Éprouver les données produites par GéoClimate et d'îlot de chaleur urbain pour calculer ces indicateurs.

Les résultats de ce travail a été un cadre théorique adapté aux questions de vulnérabilité sociale à la chaleur qui prenne en compte les évolutions climatiques à grande échelle (de type vague de chaleur) et microclimatiques (îlot de chaleur urbain) qui a été synthétisé dans le schéma suivant (Figure 19) :

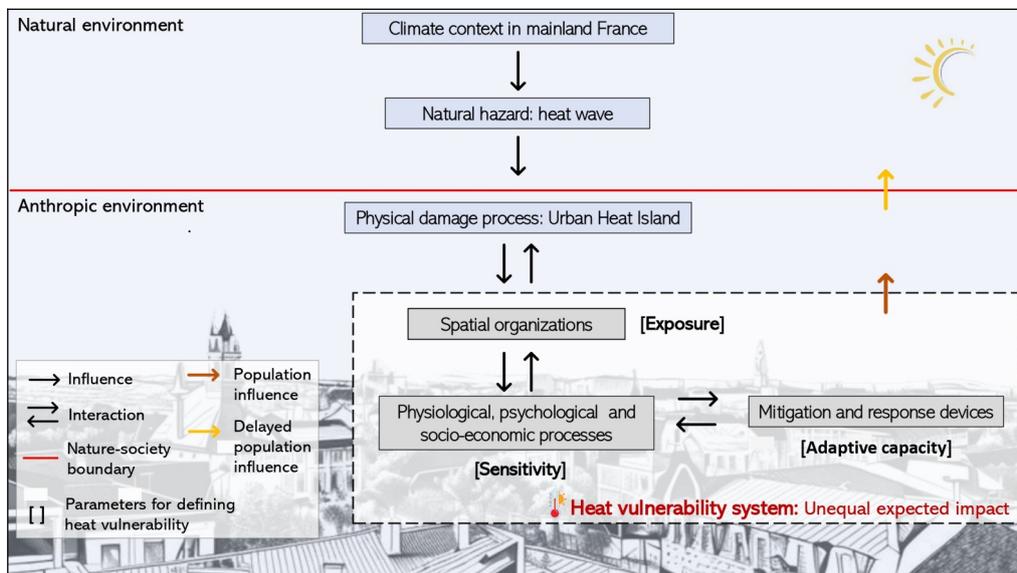


Figure 19. Cadre théorique proposé pour l'évaluation du système de vulnérabilité à la chaleur

De même, différentes approches statistiques (ACP, Clustering, HAC, CVA) ont été testées sur le même jeu de données pour Toulouse (ACP, Clustering, HAC, CVA) ou pour Grenoble, Lyon et Paris (ACP, HAC). L'impact de la méthode statistique sur les résultats est fort comme le montre la Figure 20 :

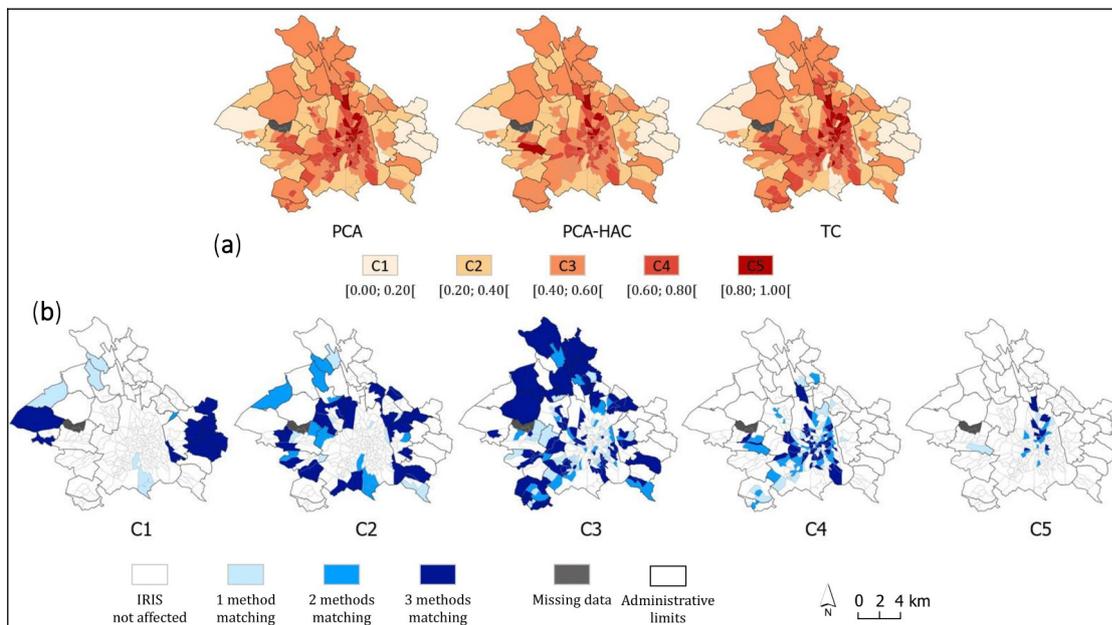


Figure 20. Correspondance des classes de l'Indicateur de Vulnérabilité à la chaleur (HVI en anglais) selon la méthode utilisée. (a) HVI final communément discrétisé en intervalles égaux ; et (b) nombre de fois que les méthodes classifient la même unité IRIS dans la même classe affichée dans le panneau (a). (Depuis, T. Lagelouze et al. 2024)

Pour finir des moyens originaux de présentation des résultats ont été explorés en collaboration avec Toulouse Métropole dans le cadre du stage de M. Aranda (Figure 21) et de la thèse en cours de Thomas Lagelouze.

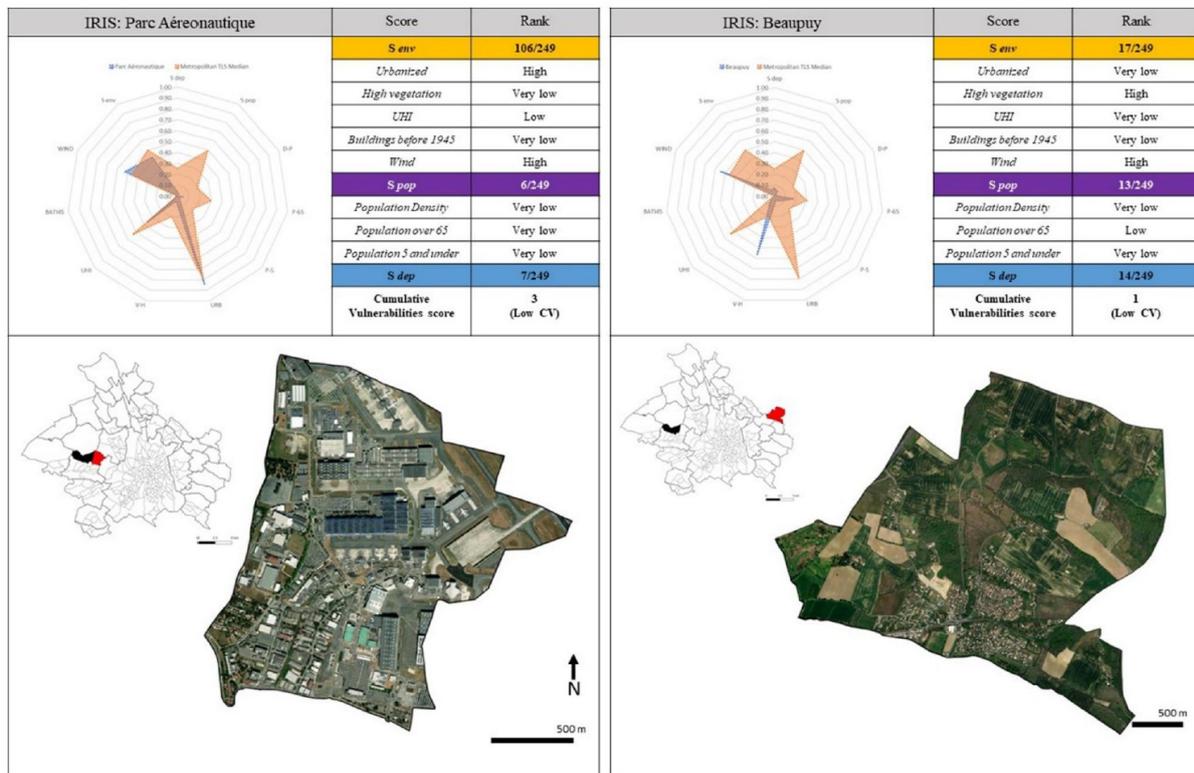


Figure 21. Analyse comparative à l'échelle de deux IRIS INSEE (en rouge dans la carte).

Ce travail fait l'objet d'un article scientifique publié :

Lagelouze, Thomas, Julia Hidalgo, Mitia Aranda, and Guillaume Dumas. (2024). "Comparison and Theoretical Conceptualization Analysis of Statistical Methods Used to Develop Heat Vulnerability Indices in Urban Areas". *European Journal of Geography* 15 (3):154-76.
<https://doi.org/10.48088/ejg.t.lag.15.3.154.176>. (fichier 2024_TLagelouze_Vulnerability .pdf)

B. Validation sur un retour expert dans le cadre du stage de Guillaume Huteau

Guillaume HUTEAU. « Analyse croisée de données climatiques et morphologiques en milieu urbain pour l'adaptatio, à la surchauffe estivale : Application à Dijon et Nancy ». Mémoire de Master 2 GAED parcours CclimaAT, Université de Bourgogne , 2024

L'objectif de ce travail était de :

- Mieux comprendre les liens de cause à effet entre typo-morphologie urbaine (classe LCZ) et ambiance thermique (température d'air) ;
- Fournir des clés méthodologiques d'exploitation et d'analyse des données géographiques et climatiques accessibles suite à la succession de projets MapUCE/PAENDORA/PAENDORA2 ;
- Faire un retour critique sur ces bases de données à disposition et leur capacité à rendre compte des variations de température à l'échelle des quartiers et à alimenter un diagnostic climatique urbain et/ou préfigurer des stratégies d'adaptation à la surchauffe.

Pour y répondre, une méthodologie (cf. figure suivante) en trois étapes a été développée :

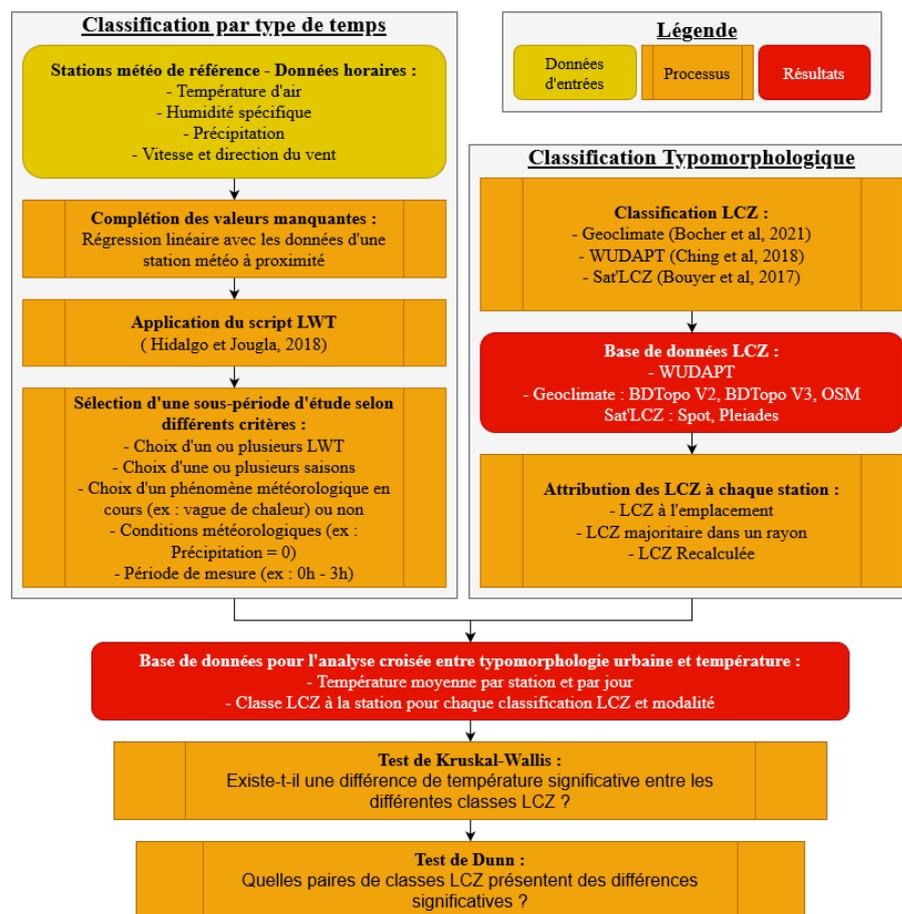


Figure 22. Méthodologie de travail dans le cadre du stage de Guillaume Huteau

La **première étape** visait à déterminer une période temporelle pertinente sur laquelle baser notre étude, et de préférence simultanée entre les deux localités. Nous avons choisi de nous concentrer sur une fenêtre temporelle où nous disposions de données de mesures météorologiques urbaine sur les deux sites, soit entre 2010 et 2023 inclus. Nous avons appliqué sur cette période et sur les deux sites, l'analyse en type de temps sensibles [Jougl, R. et al. 2019 ; Suher-Carthy, M. et al. 2023], permettant d'identifier les grandes catégories de situations météorologiques (i.e. LWT pour « Local Weather Type ») qui apparaissent les plus fréquemment pendant une année, et se distinguant par une combinaison de marqueurs météorologiques caractéristiques. Nous avons utilisé les données de stations de référence MétéoFrance. Nous avons par la suite déployé un algorithme pour attribuer à chacun des jours de la période sa classe TTS.

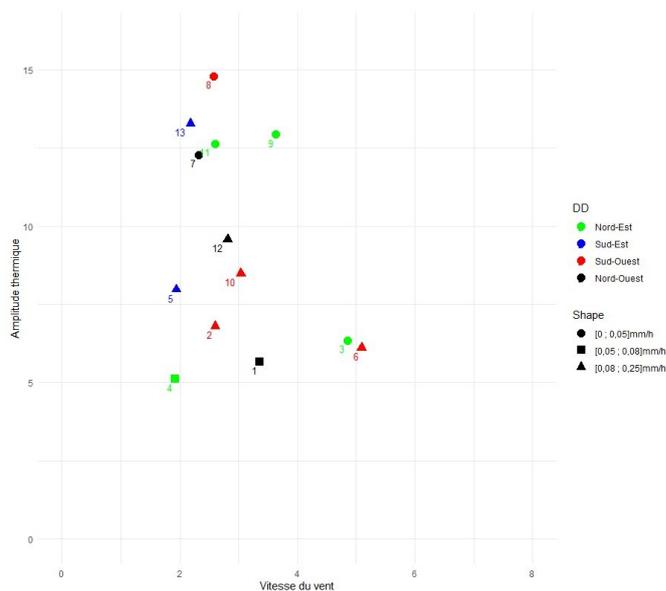


Figure 23. Les 13 type de TTS pour Dijon

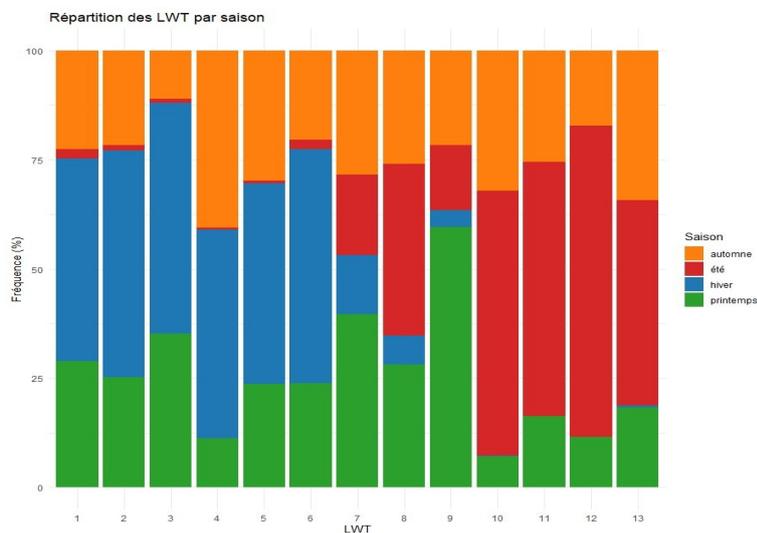


Figure 24. Fréquence saisonnière par TTS à Dijon

Pour filtrer les jours d'intérêt, nous avons établi une liste de critères à respecter :

- Période estivale de **vague de chaleur** (sur la base des données ClimatHD) simultanée à Dijon et Nancy
- Deux jours consécutifs de catégorie LWT 11 (forte amplitude thermique, faible vent, forte occurrence estivale) **favorable au développement d'un ICU**
- **Pas de précipitation** le jour même et la veille

Une période de 16 jours présentant l'ensemble de ces critères a été isolée et réutilisée pour l'étape 3.

La **deuxième étape**, en complément du travail du labSTICC réalisé dans le cadre du stage de Emmanuelle Kerjouan, visait à confronter un ensemble de base de données LCZ accessibles au niveau de la France, dont celles issues de Geoclimate et calculées selon les différentes modalités, mais aussi celle de issues de l'initiative internationale WUDAPT (<https://www.wudapt.org/>) et celle du Cerema, issues de la production nationale et produites dans le cadre de projets R&D [Cerema, 2024].

Méthode	Geoclimate			WUDAPT	SatLCZ	
Données mobilisées	BDTopo V2	BDTopo V3	Open Street Map	Landsat	Spot Urban atlas BDTopoV3 BD Alti	Pleiades Urban atlas BDTopoV3 BD Alti
Résolution	RSU			Maillage 250m	RSU	
Avantage	Application facile pour toutes les communes françaises		Application facile et possible pour l'ensemble du monde	Disponible pour l'ensemble de l'Europe	Production nationale pour les agglomérations de plus de 50 000hab	Image satellitaire haute résolution
Inconvénient	France uniquement Ancienne version de BD Topo	France uniquement	Hauteur de bâti incomplète Données de qualité variable	Faible résolution		Couteux

Figure 25. Les différentes bases de données LCZ confrontées

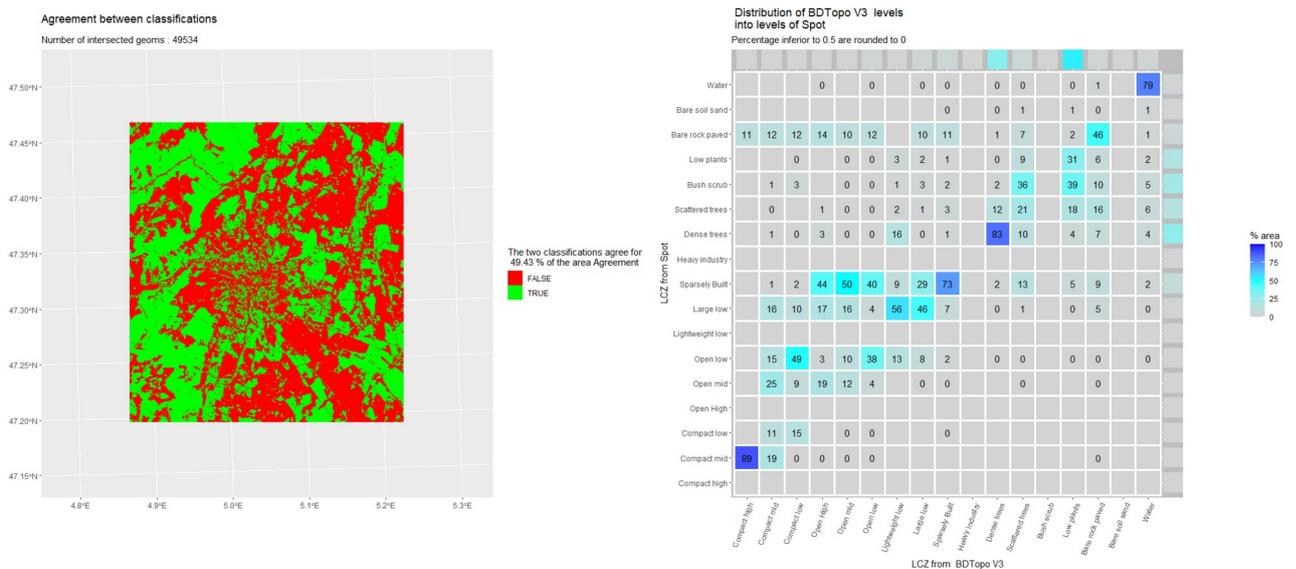


Figure 26. Comparaison de 2 BD LCZ avec l'outil LCZ explore [Goussef et al., 2024]

Quelques résultats intéressants ont pu être mis en valeur : un taux d'accord variant de 42,5% à 73% entre les différentes BD et déclinaisons, des différences récurrentes entre LCZ végétalisées (A à D), des différences moindres entre les différentes LCZ urbaines, capacité intéressante de la BD Cerema (SPOT) à décrire un environnement moins densément bâti, et surreprésentation des LCZ6 avec la BD WUDAPT moins résolue, etc.

Mais au-delà d'une comparaison pure des BD et leur capacité à nous fournir un bon niveau de résolution des LCZ et un accord subjectif avec la « réalité terrain » - ce qui devrait être approfondi dans un travail ultérieur -, cette étape nous a donné des clés sur la pertinence d'utilisation d'une BD ou d'une autre quand il s'agit de décrire l'implantation d'une station météo via un « buffer » englobant. Cette technique a été utilisée dans le cadre de l'étape 3 suivante.

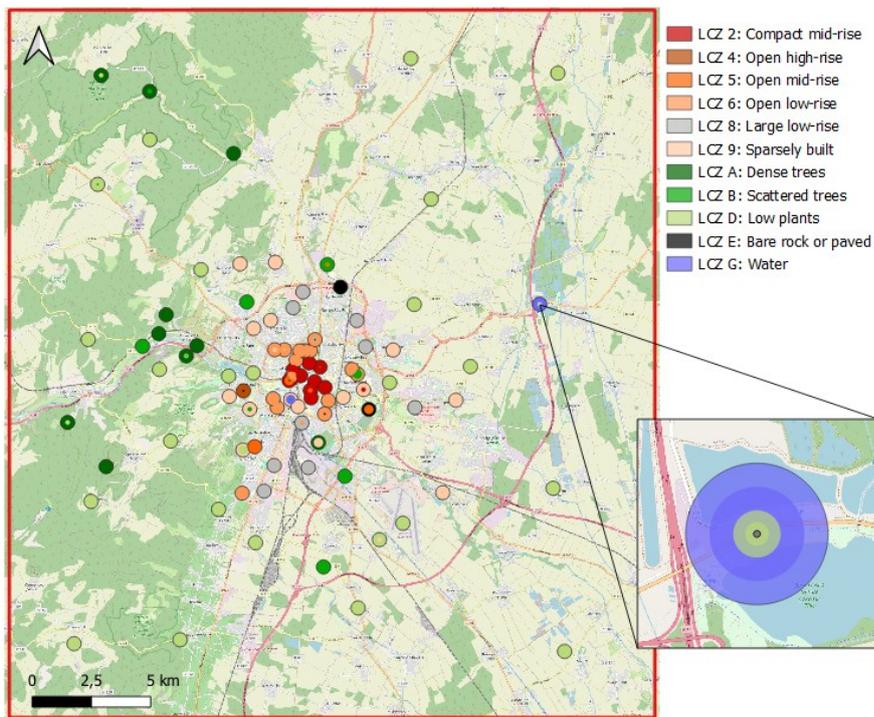


Figure 27. Attribution d'une classe LCZ à chaque station météo du réseau de Mesure Dijonnais (MUSTARD) suivant différentes taille de buffer (50, 100, 200 et 300m)

Enfin dans la **dernière étape**, nous avons mis en place une approche statistique pour évaluer les capacités de chaque classification LCZ retenue à discriminer la température d'air en milieu urbain. Le travail n'a été réalisé complètement que sur Dijon du fait du nombre plus important de points de mesures, et l'applicabilité des méthodes statistiques à un échantillon minimum de données.

Six classifications LCZ issues des méthodes WUDAPT, Sat'LCZ et Geoclimate ont été associées à des mesures in-situ et à une simulation MapUCE. Deux test successifs ont été utilisés :

- Le test de Kruskal-Wallis [1952], pour évaluer la capacité d'une méthode de classification LCZ à rendre compte « globalement » des variations des températures entre les différentes classes ;
- Le test de Dunn [1964] pour identifier quelles paires de LCZ présentent des différences significatives de température entre elles.

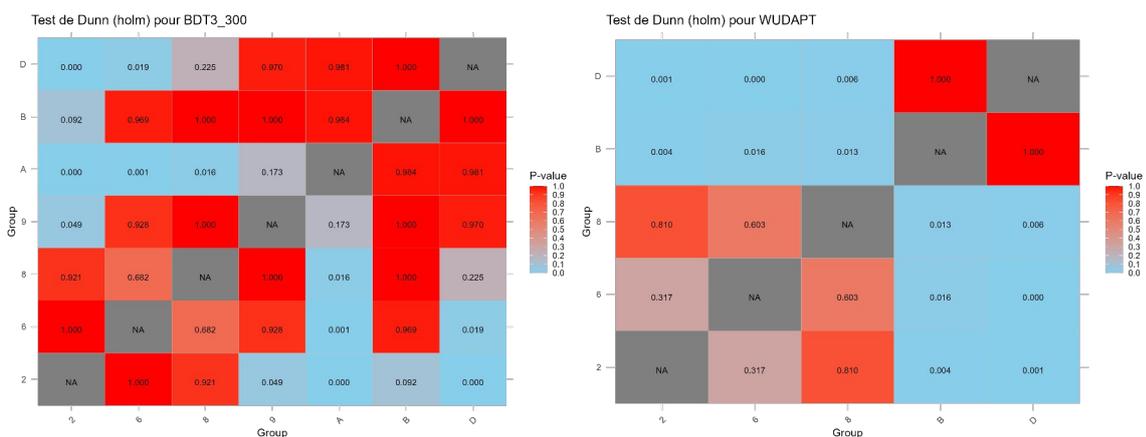


Figure 33. Matrice de confusion résultantes du test de Dunn pour la classification LCZ via Geoclimate/BD Topo3/ Buffer 300m (à gauche) et via Wudapt (à droite)

Les classifications LCZ distinguent efficacement l'ambiance thermique des zones urbaines et rurales, bien que les différences au sein d'une même catégorie (urbaine ou rurale) soient moins prononcées. Ces variations sont plus évidentes entre des LCZ contrastées, telles que la LCZ 2 (Compact mid-rise) et la LCZ 9 (Sparsely Built). L'analyse à différentes échelles montre que la prise en compte de l'environnement immédiat et à l'échelle du quartier est essentielle pour étudier les variations du climat urbain. En utilisant la simulation MapUCE, les produits BDT2, BDT3 et SPOT discriminent avec succès les températures entre LCZ urbaines.

Pour conclure, bien que l'étude menée mériterait d'être approfondie, elle a tout de même permis d'identifier les classifications Geoclimate et Sat'LCZ étaient plus à même de rendre compte de la variabilité de la température entre LCZ urbaines d'une part, et entre LCZ rurales d'autre part, par rapport à la classification WUDAPT. Les analyses réalisées avec différentes modalités d'attribution des LCZ aux stations MUSTARDijon ont permis d'évaluer l'influence de l'environnement à différentes échelles. Les prises en compte de l'environnement immédiat (rayon de 50m) et du quartier (rayon de 300m) ont tous deux permis d'identifier des différences de température significatives entre les classes LCZ.

Mais avant tout, ce travail a permis d'établir une chaîne méthodologique (analyse météorologique + géomatique + statistique) permettant d'établir un diagnostic climatique à partir des données LCZ, avec ou sans croisement avec données climatiques mesurées, ou simulées disponibles via le projet MAPUCE/PAENDORA [Suher-Carthy, M. et al. 2023]. Cette chaîne pourra être réappliquée pour approfondir les résultats dans le cadre d'une publication en cours de réalisation, mais aussi on peut supposer étendre l'analyse à d'autres situations météorologiques que les vagues de chaleur.

Références bibliographiques :

Cerema, Cartographie nationale des zones climatiques locales (LCZ), (2024=). <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cerema-publie-nouvelles-donnees-surchauffe-urbaine>

Dunn, O.J., 1964. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics* 6, 241–252. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181>

Matthieu Gousseff, Erwan Bocher, Jérémy Bernard, and Elisabeth Le Saux Wiederhold. (2023). lczexplore: an R package to explore Local Climate Zone classifications. *Journal of Open Source Software*, 8(91), 5445. <https://doi.org/10.21105/joss.05445>

Jougla, R.; Hidalgo, J. & Pouponneau, B. (2019). Identification des situations météorologiques locales pour une cinquantaine de villes françaises, *La Météorologie* 106, 59-68.

Kruskal, W.H., Wallis, W.A., 1952. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association* 47, 583–621. <https://doi.org/10.2307/2280779>

Suher-Carthy, M., Lagelouze, T., Hidalgo, J., Schoetter, R., Touati, N., Jougla, R., Masson, V., 2023. Urban heat island intensity maps and local weather types description for a 45 French urban agglomerations dataset obtained from atmospheric numerical simulations. *Data in Brief* 50, 109437. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109437>

C. Confrontation experte de l'outil DANUBE

L'objectif de cette phase de confrontation experte de l'outil Danube a été de permettre la validation et la « confrontation de terrain » sur les données produites par l'outil Danube, ainsi que sur son usage effectif auprès d'utilisateurs experts des domaines de l'architecture, de l'urbain, ou acteurs des collectivités locales. En particulier ceux pouvant être concernés par la caractérisation de la matérialité ou des dispositifs constructifs des bâtiments, ou sensibilisés aux problématiques de modélisations/simulations environnementales urbaines (morphologiques, énergétiques, climatiques urbaines,...).

Le protocole de confrontation terrain des données produites s'est concrétisé par l'organisation d'ateliers participatif, permettant de répondre notamment aux objectifs initiaux suivants :

- Identification et contact des usagers potentiels de l'outil, directement ou par l'intermédiaire des réseaux scientifiques, acteurs institutionnels ou professionnels, locaux ou nationaux (CAUE, FNAU, AUA/T, TM, CREBA,...).
- Préparation et organisation de l'atelier participatif en relation avec les partenaires du projet et les usagers identifiés : approches thématiques, méthodologie de recueil des besoins/attentes, choix des études de cas, préparation des supports / aide à la représentation des données.
- Validation de la qualité des données générées - Évaluation des représentations spatiales/cartographiques - Analyse des réponses produites lors des échanges
- Évaluation du potentiel de l'outil Danube : proposition de pistes d'améliorations pour mieux générer/représenter/exploiter les données mises en œuvre, pour un outil utilisable directement par des utilisateurs experts et/ou acteurs non spécialistes des outils numériques de modélisation urbaines (niveau minimal seulement requis en outils SIG).

L'organisation de l'atelier de confrontation terrain experte s'est appuyé sur le recrutement pour un stage de Master 2 d'une durée de 6 mois (Anne Brunet – Stagiaire Master M2 TRENT - UT2J)

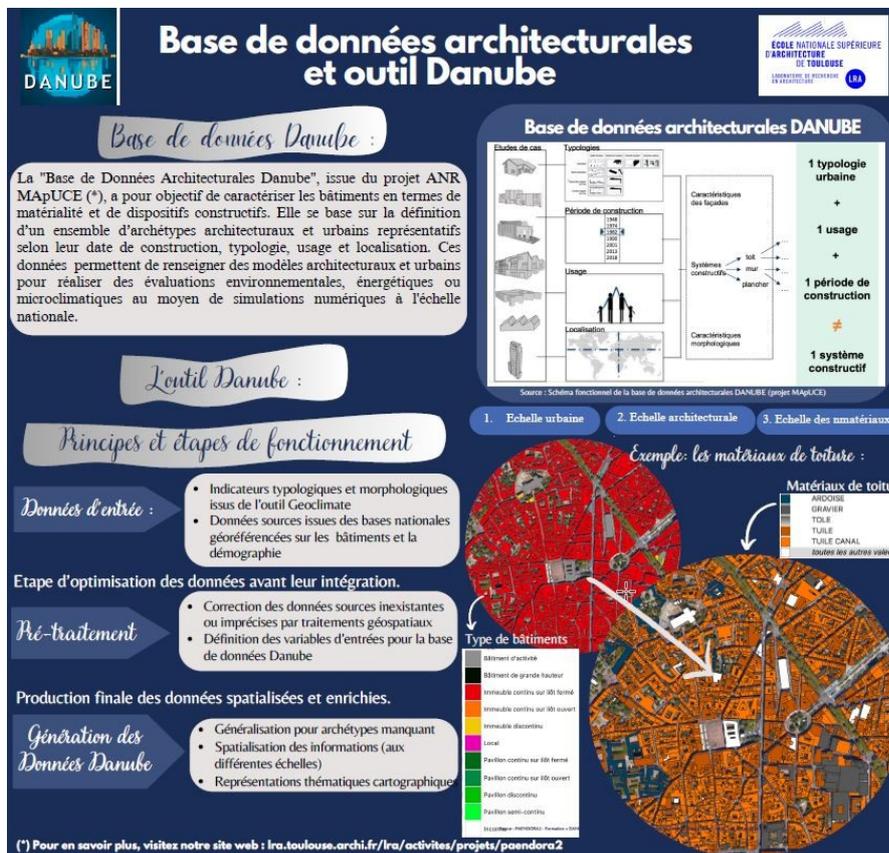
Organisation de l'atelier de confrontation terrain experte

L'organisation de l'atelier a tenu compte de plusieurs objectifs et méthodes, s'inspirant des principes du « Design thinking » dont :

- la forme d'un atelier participatif, incluant une partie sensibilisation/découverte et une partie de formation et de prise en main concrète et pratique de l'outil DANUBE
- la mobilisation des potentiels utilisateurs experts issus de différents domaines
- l'identification préalable des profils, des niveaux de connaissance des utilisateurs potentiels et des cas d'usage
- la présentation du projet PAENDORA2 et de son contexte d'études, de recherches et de développements
- l'engagement des participants dans des réflexions sur les problématiques et les possibilités d'utilisation et de représentation des données générées par l'outil DANUBE

L'appel à proposition de participation à l'atelier a été envoyé à une soixantaine de personnes identifiées, participants potentiels ou responsables de structures. Lors de l'inscription, le renseignement d'un questionnaire a été proposé, permettant de déterminer les niveaux de connaissances/compétences, les différents cas d'études, ainsi que les domaines déjà identifiés ou pour permettre d'en déterminer d'autres.

Un flyer de présentation du projet PAENDORA2, de la BdB DANUBE ainsi que de l'outil DANUBE a été élaboré et envoyé aux participants :



Projet PAENDORA2

POUR LA GESTION DU CONFORT ESTIVAL : DONNÉES, OUTILS ET RECHERCHE-ACTION 2

C'est quoi ?

Le projet PAENDORA2 vise à fournir des données urbaines et climatiques pour guider les collectivités territoriales, les urbanistes, les chercheurs et les acteurs impliqués dans la gestion urbaine durable, le confort estival et la surchauffe urbaine.

Objectifs

- L'identification des leviers d'action
- Mettre à disposition d'outils de production d'informations urbaines et climatiques
- Confronter les données avec la réalité terrain
- Développer des dispositifs de médiation et transfert de l'information climatique

Actions

- Evolution de l'outil de calcul d'indicateurs géographiques et climatiques GeoClimate
- Evolution de la base de données architecturales Danube
- Développement d'un outil de génération et de spatialisation de données issues de la base de données architecturales: l'outil Danube.
- Actions de valorisation - Mise en place de balades climatiques urbaines

Projet financé par l'ADEME
AAP PACT'e 2021 - contrat n°21DAD0080

Figure 34. Flyer de présentation du projet PAENDORA, de la BdD et de l'outil DANUBE

L'atelier a été réalisé au moyen de deux sessions indépendantes d'1/2 journée (11 et 12 juillet 2024) chacune afin de pouvoir accueillir le maximum de participants possibles.

CONFRONTATION DE TERRAIN EXPERTE

ATELIER DE DÉCOUVERTE ET DE FORMATION

DANUBE

Autour de la caractérisation et de la matérialité des bâtiments

JEUDI 11 JUILLET 2024
9:00 À 12:30

UNIVERSITÉ TOULOUSE JEAN JAURÈS 2, AMPHI 3 OLYMPE DE GOUGES

PAENDORA2@TOULOUSE.ARCHI.FR

Pour plus d'informations : ira.toulouse.archi.fr/ira/activites/projets/paendora2/atelier-DANUBE

Figure 35. Invitation à l'atelier DANUBE

Éléments préparés et produits

De nombreux supports cartographiques (dont certains imprimés servant de support aux échanges avant la prise en main de l'outil), ainsi que différents types de représentations (symbolologies sous le logiciel SGI QGIS) ont été produits en amont de l'atelier en utilisant les données brutes (ou de croisement de

données) produites par l'outil DANUBE, spécifiquement sur la zone urbaine de Toulouse (ayant servi de cadre de référence commun).

Ces supports cartographiques et représentations symboliques ont été utilisés comme base d'élaboration de représentations plus personnalisées ou adaptées aux différents cas d'étude par les participants lors de la prise en main de l'outil DANUBE au cours de l'atelier à partir des données brutes :

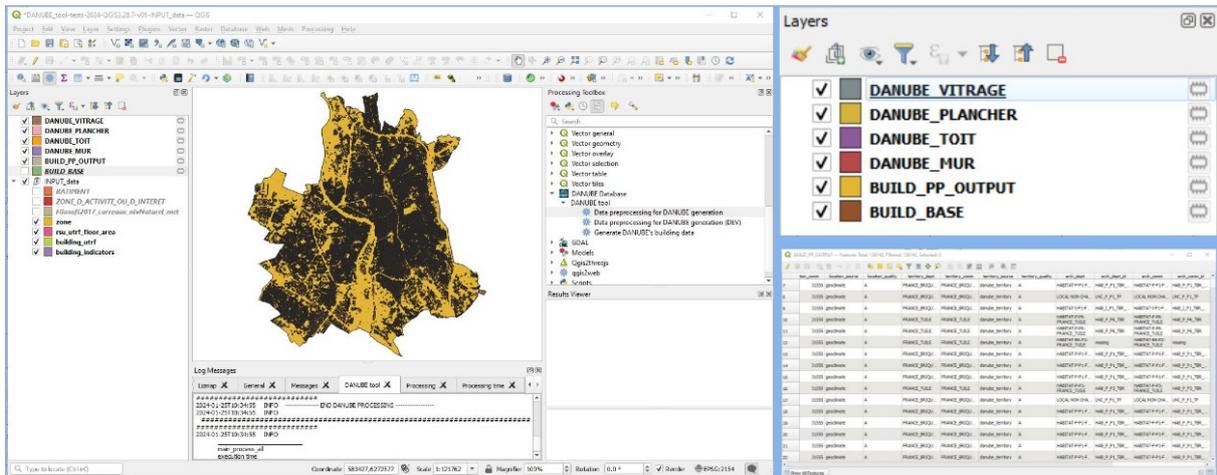


Figure 36. Illustration des données brutes générées par l'outil DANUBE sur la commune de Toulouse

Des symbologies associées aux différentes données produites par l'outil DANUBE, que ce soient les données brutes prises individuellement ou les croisements de données, sont proposées afin d'évaluer leurs potentiels et d'éventuelles propositions d'amélioration.



Figure 37. Illustration de résultat : représentation de la matérialité des murs porteurs (PORTEUR_M1) sur la commune de Toulouse

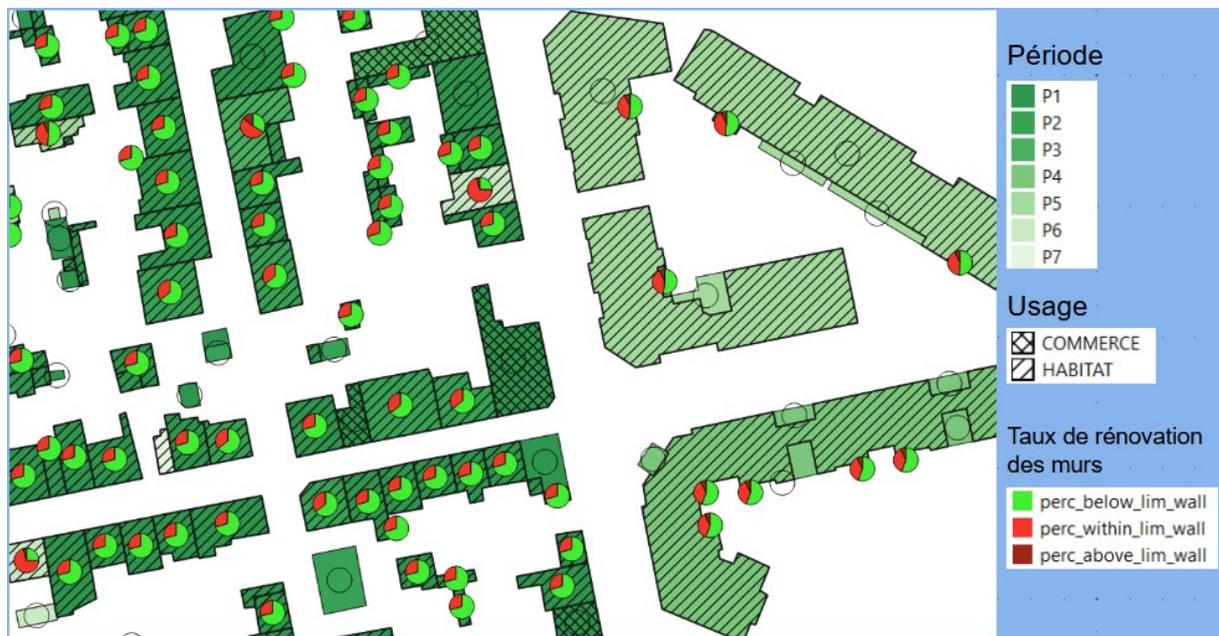


Figure 38. Croisement et spatialisation des données de rénovation avec l'usage et la période de construction

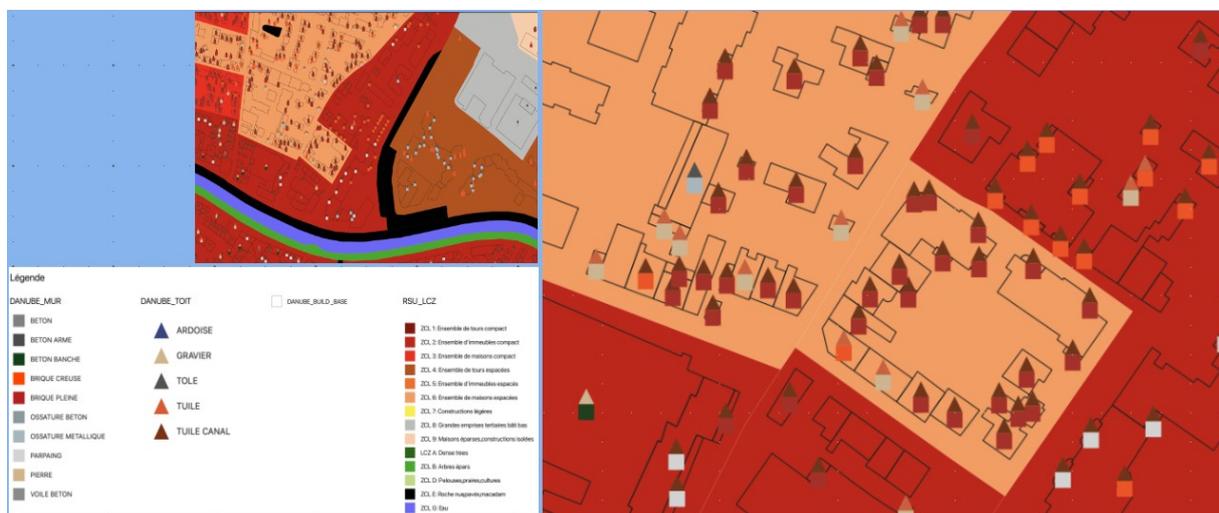


Figure 39. Exemple de croisement des LCZ couplées avec des données de matérialité des murs et des toits des bâtiments à Toulouse

Programme de l'atelier DANUBE

Le programme de l'atelier a été conçu pour inclure à la fois des présentations générales, une partie exploratoire basée sur les documents cartographiques imprimés pré-produits, une partie pratique et exploratoire, ainsi que des temps dédiés au retour d'expérience et aux propositions de perspectives :

- Présentation du contexte d'études, de recherches et de développements dans le cadre du projet PAENDORA 2
- Présentation de l'outil DANUBE (et de GeoClimate)
- Exploration des résultats à travers des cartes imprimées
- Prise en main de l'outil DANUBE :
 - Préparation des données sources
 - Installation de DANUBE_tool sur QGIS
 - Configuration et lancement de DANUBE_tool
 - Affichage des données BDTOPO, FILOSOFI et Geoclimate
 - Consultation des données produites : affichage des couches et chargement les styles prédéfinies pour : DANUBE_MUR, DANUBE_PLANCHER, DANUBE_TOIT, DANUBE_VITRAGE, ...
- Temps libre de réalisation et manipulation des données
- Production de cartes pour répondre aux objectifs initiaux
- Présentation d'études de cas concrets

- Séance de feedback et suggestions
- Conclusion et perspectives

Un questionnaire en ligne à remplir à la suite de l'atelier a été proposé aux participants pour recueillir les impressions et suggestions.

Résultats de l'atelier et retours

Quelques éléments chiffrés sur les participants :

- 60 personnes contactées
- 20 inscrits
- 13 participants effectifs sur les 2 sessions (65%)



Figure 40. Illustrations de l'atelier DANUBE

Formulaire de retour d'expérience

Afin de répondre à l'une des missions du stage, à savoir l'analyse des réponses produites lors des échanges à l'atelier pour l'évaluation du potentiel de l'outil DANUBE, un formulaire de retour sur expérience en ligne a été envoyé aux participants à la fin de l'atelier. Le formulaire proposé a été structuré de manière à couvrir exhaustivement les différentes étapes de l'évaluation de l'outil DANUBE. Il combine des questions quantitatives et qualitatives, facilitant à la fois une analyse statistique et une interprétation plus nuancée des réponses. Les questions regroupent tous les aspects essentiels, de l'expérience des participants à l'atelier à leur capacité à utiliser l'outil de manière autonome, tout en évaluant la pertinence et la qualité des données générées.

Le but de ce questionnaire était de répondre à la phase de validation et de confrontation de terrain experte de l'Outil Danube. De manière plus précise, il visait dans un premier temps à obtenir des retours d'expérience sur la prise en main de l'Outil Danube lors de l'atelier de découverte et de formation participative. Dans un second temps, il permettait d'évaluer la compréhension globale de l'outil par les participants et à recueillir des avis sur la pertinence, la complétude et l'interprétabilité des données que génère l'outil grâce à la base de données architecturale DANUBE, des données de la BD TOPO V3 du service de l'IGN et des données de l'outil Geoclimate. Enfin, les questions choisies permettaient d'identifier les difficultés rencontrées lors de la prise en main de l'outil, évaluaient le potentiel d'utilisation autonome de l'outil par les participants dans leurs projets et collectaient des suggestions d'amélioration.

Section 1 : Informations générales

Nom & prénom

Adresse-mail

Expérience avec les SIG (Systèmes d'Information Géographique)

Section 2 : Expérience de l'Atelier

4. Aviez-vous des attentes particulières ?

4.1 Si oui, quelles étaient les principales ?

5. Le contenu de l'atelier a-t-il répondu à vos attentes ?

Section 3 : Compréhension de l'Outil Danube

6. Sur une échelle de 1 à 5, comment évalueriez-vous votre niveau de compréhension global de l'outil Danube après cet atelier de découverte ?

7. Quelles fonctionnalités de l'outil avez-vous trouvé les plus faciles à comprendre et à utiliser ?

8. Comment évaluez-vous la pertinence des données que génère l'outil par rapport à vos besoins ?

9. Trouvez-vous que les données sont complètes ?

10. Les données générées par Danube sont-elles simples à interpréter et à comprendre ?

11. La résolution spatiale des données générées est-elle adaptée à vos besoins ?

12. Quels sont selon vous les aspects encore "difficiles" à maîtriser ?

13. Avez-vous rencontré des difficultés particulières pendant la prise en main de l'outil ? 13.1 Si oui, lesquelles ?

14. Vous sentez-vous capable d'utiliser l'outil Danube de manière autonome pour vos projets ?

15. Les données générées par Danube vont-elles vous aider dans la prise de décisions concernant vos projets ?

16. Les données générées seront-elles facilement intégrables dans vos workflows existants ou à venir ?

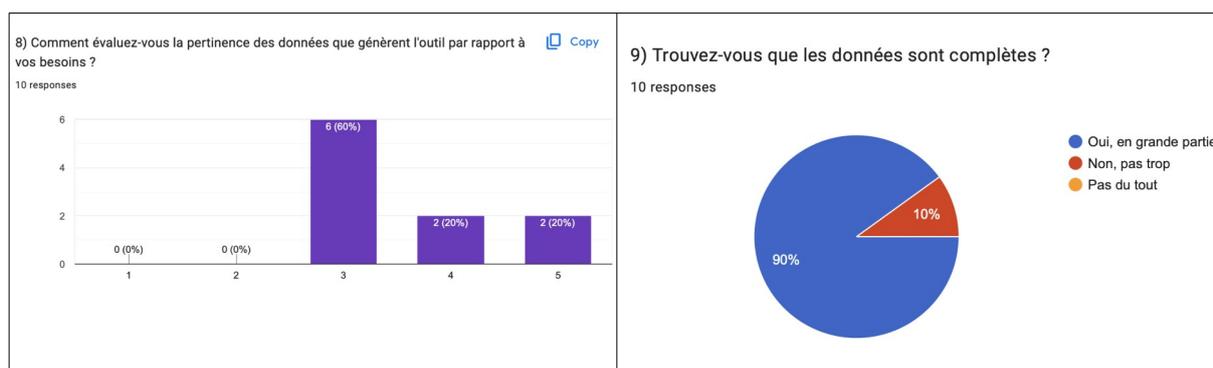
17. Quels aspects de l'outil Danube mériteraient d'être approfondis davantage ?

18. Voulez-vous recevoir des informations sur la mise à jour de l'outil, des avancées concernant l'outil ?

Figure 41. Questions du formulaire en ligne du retour d'expérience de l'atelier DANUBE à destination des PARTICIPANTS. (A. BRUNET, 2024)

Pour plus de détails, sur la méthodologie et la description précises des analyses réalisées, se reporter au mémoire de Master 2 « GESTION DU CONFORT ESTIVAL URBAIN : INTÉGRATION DES OUTILS DE SPATIALISATION DES DONNÉES ARCHITECTURALES ET CLIMATIQUES » _ Anne Brunet (20024)

L'analyse quantitative des réponses Une analyse quantitative a été réalisée permettant d'évaluer les réponses dites « fermées » sur certains points particuliers :



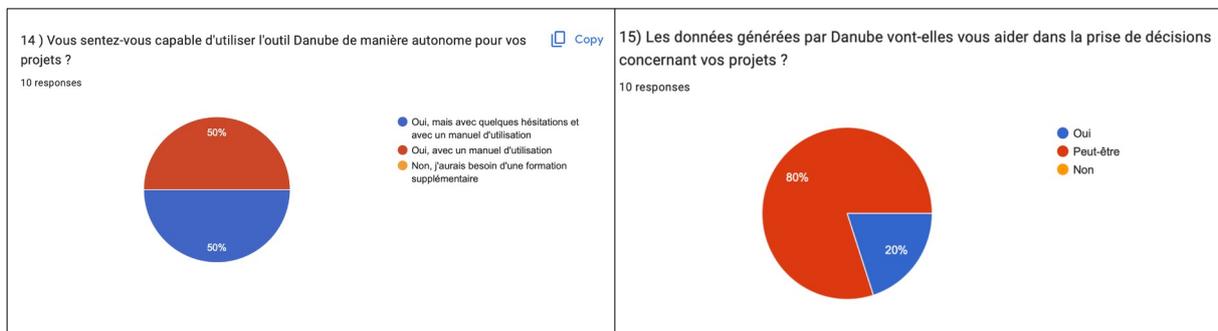


Figure 42. Illustration graphique des réponses à certaines questions fermées.

- Niveau de compréhension de l'outil Danube (Question 6) : « Sur une échelle de 1 à 5, comment évalueriez-vous votre niveau de compréhension global de l'outil Danube après cet atelier de découverte ? » Les réponses varient de 3 à 5, avec une majorité de positions au niveau ou 5. Cela suggère donc une bonne compréhension générale de l'outil après l'atelier.

- Pertinence des données générées par l'outil. (Question 8) : « Comment évaluez-vous la pertinence des données que génère l'outil par rapport à vos besoins ? »

La majorité des participants ont évalué cette question à 3 ou à 4, avec une moyenne d'environ 3,5 indiquant ainsi que les données sont perçues comme étant pertinentes, mais il reste une marge d'amélioration. Une évaluation de 3, bien que l'outil soit globalement perçu comme utile, il pourrait ne pas répondre pleinement aux attentes de tous les utilisateurs, notamment en termes de précision et d'adéquation aux cas spécifiques.

- Fiabilité des données (Question 9) : « Trouvez-vous que les données sont complètes ? »

La perception de la fiabilité des données montre que les points de vue divergent.

Par exemple DS11 - Chargée de mission foncier et analyse urbaine a noté que la fiabilité était bonne mais qu'elle était limitée par la compréhension des variables disponibles, ce qui met en évidence un besoin de clarification et de documentation plus approfondie. En revanche, RC07, architecte chercheur a trouvé les données suffisamment fiables pour ses besoins, soulignant ainsi peut-être une dépendance à l'usage spécifique que chaque participant en fait.

- Capacité à utiliser l'outil de manière autonome (Question 14) : « Vous sentez-vous capable d'utiliser l'outil Danube de manière autonome pour vos projets ? »

Un bon nombre de répondants se sentent capables d'utiliser l'outil de manière autonome, à condition de disposer d'un manuel d'utilisation détaillé. RS02, climatologue et chercheur a mentionné qu'il pourrait l'utiliser avec « quelques hésitations », ce qui reflète une certaine incertitude quant à la pleine maîtrise de toutes les fonctionnalités de l'outil.

- L'intégration des données générées dans les workflows des participants :

La question 15 « Les données générées par Danube vont-elles vous aider dans la prise de décisions concernant vos projets ? »

Cette question vise à évaluer l'utilité pratique des données générées par l'outil Danube dans le contexte des projets professionnels des participants. Les réponses à cette question (Figure 58 ci-dessous) sont diverses sur la pertinence des données dans la prise de décision. 20 % ont répondu « Oui », ce qui indique qu'ils perçoivent les données comme utiles pour leurs projets. Toutefois, la majorité ont répondu « peut-être », ce qui indique une certaine hésitation quant à l'application directe des données dans leur travail quotidien. Nous pouvons supposer que cette hésitation pourrait être liée à des limitations perçues dans la précision ou la pertinence des données pour des études de cas spécifiques.

De plus, les réponses à la question 16 : « Les données générées seront-elles facilement intégrables dans vos workflows existants ou à venir ? », montrent une variation intéressante dans la perception des utilisateurs quant à l'intégrabilité des données générées par l'outil Danube dans leurs workflows actuels ou futurs. 50 % de « oui » de la part des participants pensent pouvoir intégrer les données générées par Danube dans leurs processus existants, montrant ainsi une bonne compatibilité de l'outil avec les méthodes de travail courantes chez les participants. Toutefois, 50 % ont répondu « Peut-être », cela montre une certaine hésitation et des incertitudes liées à des aspects spécifiques, comme les formats de

données ou la compatibilité avec d'autres logiciels utilisés dans leur workflow. Par exemple, HD09 a mentionné dans les commentaires : « des difficultés liées à la compréhension des variables et leur adaptation à une échelle plus fine, ce qui peut poser des défis pour une intégration directe dans des projets précis. Cependant, il n'y eu aucune réponse négative enregistrée, ce qui montre une adaptabilité de l'outil Danube.

L'analyse qualitative des réponses

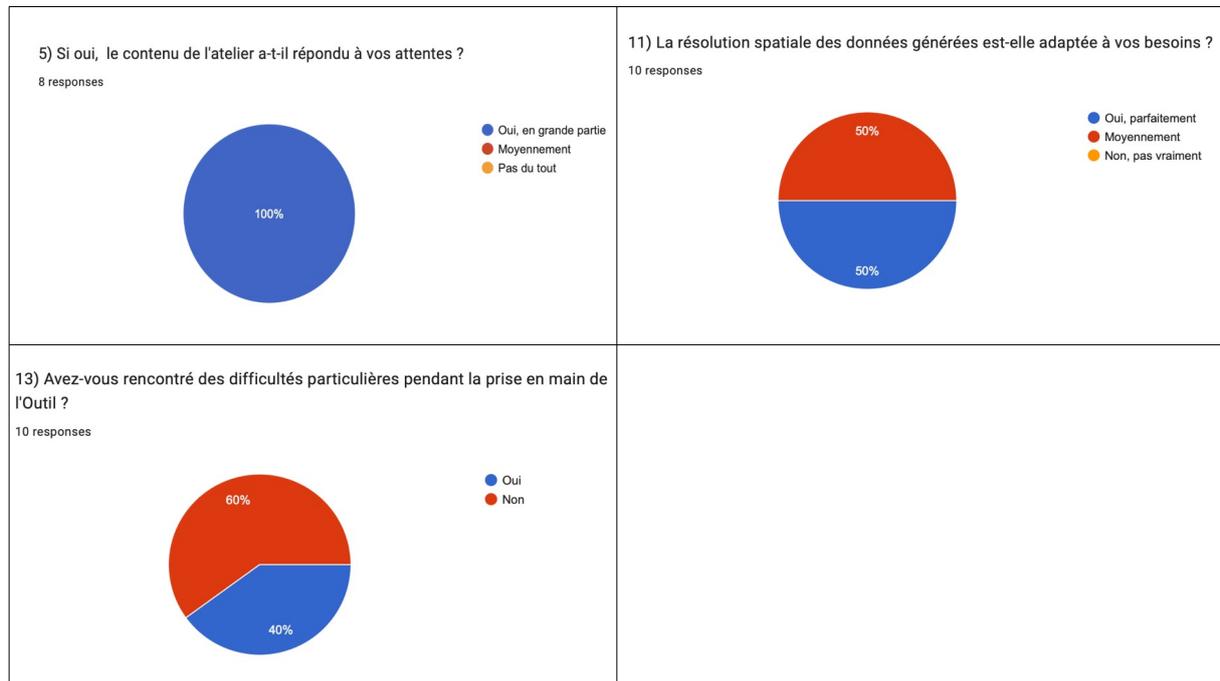


Figure 43. Illustration graphique des réponses à certaines questions d'analyse qualitative.

- Attentes spécifiques et réalisation des objectifs.

Plusieurs participants avaient des attentes précises avant l'atelier, notamment DS11-, chargée de mission foncier et analyse urbaine, souhaitait (Question 4 : Avez-vous des attentes particulières ?)

« Prendre en main le potentiel de l'outil DANUBE", indiquant ainsi une volonté d'approfondir sa maîtrise technique de l'outil et qui est révélateur de l'intérêt porté à la capacité de l'outil à répondre à des besoins spécifiques en urbanisme et en planification (question 4.1).

Cette attente a été en grande partie satisfaite, bien que l'évaluation de son expérience (Question 5 : Si oui, le contenu de l'atelier a-t-il répondu à vos attentes ?) montre une reconnaissance des limites, notamment dans la compréhension des variables disponibles, comme mentionné dans la réponse de HD09- Urbaniste et chargée de missions projets urbains et transitions qui a trouvé plus ou moins complexe la diversité des données proposées.

De plus, RC07- architecte chercheur a montré son intérêt pour "apprendre à utiliser QGIS avec les plugins DANUBE", un objectif lié à ses besoins de recherche doctorale (Question 4.1) : « Si oui, qu'elles étaient les principales ? ».L'atelier a répondu en partie à ses attentes, mais il a exprimé des réserves quant à l'insertion de données dans QGIS.

- Facilité d'utilisation des fonctionnalités :

La fonctionnalité de création de couches thématiques dans QGIS a été reconnue comme intuitive et facile à utiliser. Par exemple, LG08- architecte chercheur a noté (Question 7 : Quelles fonctionnalités de l'outil avez-vous trouvé les plus faciles à comprendre et à utiliser ?) qu'elle avait trouvé particulièrement simple la génération de cartes avec une seule thématique. Toutefois, l'évaluation montre que d'autres aspects, comme la compréhension des variables, restent un défi. HD09- Urbaniste et chargée de missions projets urbains et transitions a exprimé des difficultés spécifiques à ce sujet, ce qui souligne la nécessité de mieux accompagner les utilisateurs dans la manipulation des données complexes.

De plus, la question 11 : « La résolution spatiale des données générées est-elle adaptée à vos besoins ? » avec une possibilité de réponse par (oui, non, moyennement).

Les avis divergent concernant l'appréciation de la résolution spatiale des données que génère l'outil Danube. Les utilisateurs ayant un niveau avancé en SIG, comme DS11 et HD09, semblent plus critiques

quant à la résolution, exprimant que celle-ci est "moyennement" adaptée. En revanche, les utilisateurs avec moins d'expérience en SIG, trouvent généralement la résolution adéquate, probablement parce que leurs attentes sont alignées avec ce que l'outil propose par défaut.

Suggestions d'amélioration, synthèse et recommandations

Les suggestions d'amélioration soulignent la nécessité d'une meilleure documentation et d'une agrégation des données pour éviter des erreurs d'interprétation. Par exemple, RS02, avec la question 17 : « Quels aspects de l'outil Danube mériteraient d'être approfondis davantage ? », un participant avec une bonne expérience des modèles météorologiques, a suggéré dans la partie « autres commentaires ou suggestions » que les données devraient être présentées de manière plus « lissée », en utilisant des mailles plus larges, comme 250m x 250m, pour une meilleure précision dans certains types d'analyses.

« La représentation des données à l'échelle du bâtiment peut induire en erreur car beaucoup des informations ne sont que valable pour la majorité des bâtiments d'un archétype, mais pas pour chaque bâtiment individuel. Il faudrait donc penser à des représentations plus lissées/agrégées des données, comme sous forme de mailles de 1 km x 1 km voir 250 m x 250 m. RS02, 2024

Conclusions sur l'atelier

Les résultats montrent que l'atelier Danube a bien répondu aux attentes de la majorité des participants, en particulier ceux avec un niveau élevé de connaissances en SIG et en urbanisme. Bien que les utilisateurs avancés aient trouvé l'atelier pertinent, ils ont identifié des besoins spécifiques en termes de support technique et de documentation pour une utilisation plus autonome de l'outil, notamment un dictionnaire des variables.

En termes de recommandations pratiques : il est noté le besoin d'une documentation améliorée : Un manuel d'utilisation détaillé, couvrant non seulement les fonctionnalités de base mais aussi les aspects complexes, semble important. Par exemple, un manuel incluant des exemples d'application pratiques, spécifiquement pour des analyses urbaines poussées et complexes.

Concernant l'optimisation des données et formation continue :

Des sessions de formation supplémentaires devraient être proposées, en particulier pour les fonctionnalités avancées et la compréhension des variables. Les attentes et les compétences des participants étaient assez alignées avec les résultats obtenus, ce qui montre que l'atelier a bien ciblé son audience, mais qu'il doit encore s'ajuster pour offrir une plus grande valeur ajoutée à des experts.

Cela étant dit, le questionnaire de retour sur l'atelier Danube révèle un accueil positif global de l'outil, tout en mettant en lumière des besoins spécifiques en termes d'amélioration de la documentation, de précision des données et de support technique. Ce sont de précieux retours pour un premier test d'expertise pour affiner l'outil Danube et son déploiement futur auprès d'un public diversifié d'experts en urbanisme et en gestion des territoires.

En termes de résolution spatiale des données, question 11 (Erreur ! Source du renvoi introuvable.) : « La résolution spatiale des données générées est-elle adaptée à vos besoins ? », il pourrait être bénéfique d'introduire des options afin d'ajuster la résolution spatiale dans l'outil Danube, ce qui permettrait aux utilisateurs de sélectionner le niveau de détail qui correspond le mieux à leurs besoins professionnels.

L'analyse de la question 15 : « Les données générées par Danube vont-elles vous aider dans la prise de décisions concernant vos projets ? », ainsi que des commentaires supplémentaires fournis dans d'autres questions du questionnaire. Amène comme suggestion le développement de modules spécifiques qui permettent aux utilisateurs une meilleure adaptation des données générées par Danube à leurs besoins spécifiques en matière de décision. Par exemple, des participants comme DS11et LG08, qui ont un niveau avancé en SIG, ont exprimé des besoins pour des données plus précises et adaptées à des contextes locaux spécifiques. Par exemple, DS11 a mentionné la nécessité de "données plus précises localement », ce qui indique qu'actuellement, l'outil ne répond pas pleinement à ses attentes pour des projets spécifiques.

De plus, la majorité des participants ont trouvé que les données générées par Danube étaient relativement simples à interpréter, ce qui est un indicateur positif pour l'accessibilité de l'outil. Toutefois, quelques utilisateurs, même ceux ayant un niveau avancé en SIG, ont rencontré des difficultés liées à la complexité des variables ou à leur représentation. Ce qui souligne un besoin au niveau de la représentation des données pour leur interprétation.

En réponse des réserves exprimées sur la question 10 (Figure 63) « Les données générées par Danube sont-elles simples à interpréter et à comprendre ? », qui a pour objectif d'évaluer la facilité d'interprétation et de compréhension des données produites par l'outil Danube.

Il serait probablement utile de :

- De développer une documentation plus détaillée sur les variables utilisées par Danube, expliquant leur signification et leur application pratique.
- D'améliorer l'interface utilisateur afin de faciliter l'accès à l'information sur les données générées.
- De proposer des formations ou des modules interactifs pour aider les utilisateurs à mieux comprendre et interpréter les données complexes et à les coupler avec d'autres données.

Les résultats de l'analyse ci-dessous confirment d'une manière globale les hypothèses de départ qui sont pour rappel :

- Faciliter la compréhension de l'outil « DANUBE Tool » par les différents acteurs.
- Permettre l'échange d'expériences et de connaissances entre participants.
- Identifier les obstacles potentiels à l'utilisation de l'outil et trouver des solutions collectives.
- Produire des cartes thématiques intéressantes

Les ateliers ont effectivement aidé à mieux comprendre l'outil DANUBE. Concernant l'échange d'expériences et de connaissances, l'hypothèse est validée, mais avec quelques réserves, car il n'y a pas eu beaucoup de temps pour un vrai échange, à part une tentative de restitution orale à la fin. Pour ce qui est de l'identification des obstacles et de la recherche de solutions, les ateliers ont bien permis de repérer les difficultés pratiques. En revanche, l'objectif de produire des cartes thématiques intéressantes a été moins atteint, principalement par manque de temps de production.

Pour conclure cette partie des résultats et d'introduire la discussion, les réponses à la question 10 et la partie de synthèse et de recommandation ont révélé des points d'amélioration essentiels qui permettront d'optimiser au mieux l'outil en fonction des retours des utilisateurs.

3.3 LOT 3. Application opérationnelle sur Toulouse

Les cours d'écoles, en tant qu'espaces urbanistiques significatifs, sont devenues l'un des chantiers d'actualité dans les initiatives d'aménagement urbain. Ce LOT3 porté par Toulouse Métropole en collaboration avec l'équipe projet, s'est concentré sur l'évaluation systématique du confort thermique des cours d'écoles, particulièrement face aux fortes chaleurs, en se concentrant sur les plus de 200 écoles maternelles et primaires de la ville de Toulouse. Il s'interroge sur la manière de comprendre le contexte climatique, d'utiliser des données pertinentes et de prioriser les actions à mener pour optimiser ces espaces.

Le livrable intitulé **L3.2 « Note méthodologiques pour la caractérisation des cours d'école à partir des données PAENDORA_2 »** décrit en détail le contexte opérationnel, la méthode employée et les résultats obtenus. Voici une synthèse des points saillants :

- Toulouse compte 221 établissements scolaires, chacun avec sa cour, mais la transformation en espaces "OASIS" ne peut se faire simultanément. Les autorités scolaires doivent donc établir des priorités pour leurs investissements.
- Le projet PAENDORA_2 a permis de classer ces établissements selon leur vulnérabilité climatique, permettant ainsi d'identifier ceux nécessitant des interventions prioritaires pour devenir des cours "OASIS".
- La méthodologie de diagnostic a reposé sur l'évaluation de la vulnérabilité climatique à différentes échelles, en prenant en compte divers facteurs tels que l'environnement thermique de la cour d'école, l'occupation du sol environnant et le tissu socio-économique. Cette analyse s'étend sur un rayon de 250 mètres autour de chaque cour pour intégrer l'impact de l'espace environnant.
- L'étude s'est déroulée en trois phases : la première consiste à collecter des données pertinentes, tant quantitatives que qualitatives, pour alimenter le diagnostic à toutes les échelles. La deuxième phase implique le tri et l'évaluation de la qualité des données recueillies. Enfin, la troisième phase se concentre sur la construction et l'évaluation de méthodes de calcul afin de créer un classement des cour d'écoles en fonction de leur vulnérabilité climatique.

Un travail original de calcul de l'Indicateur de potentiel de rafraîchissement développé par le LIED à Paris a été appliqué à l'ensemble des cours de Toulouse (Figure 44).

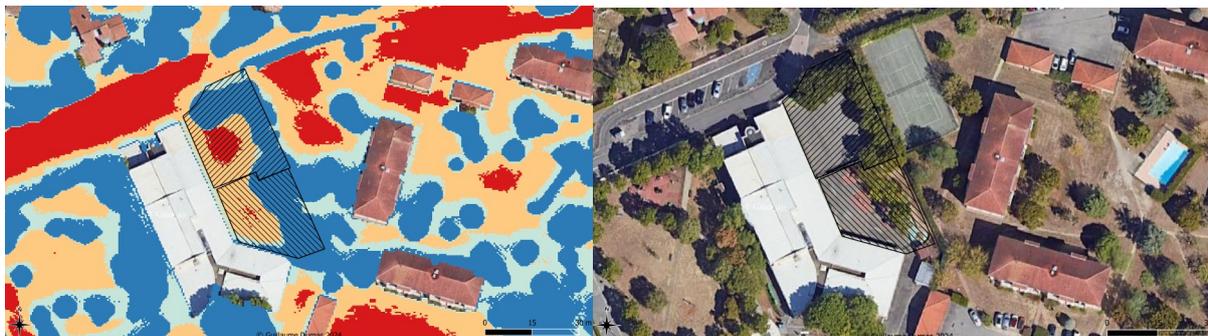


Figure 44. IPR-Indicateur du potentiel de rafraîchissement de Gaston Dupouy (maternelle au sud, primaire au nord). On remarque que la cour du primaire présente un cœur rouge (au cumulé du matin au soir), montrant une zone à travailler en priorité. (extrait du rapport spécifique de ce LOT3)

3.4 LOT 4. Valorisation et médiation scientifique

Les actions de valorisation et de médiation scientifique ont été portées par les participants tout le long du projet. Une action originale autour du développement de balades microclimatiques a été développée et est présentée dans un livrable spécifique, L4.3, intitulé « Scripts balades » qui peut être trouvé dans le fichier nommé « **Restitution_stage_Balades_20240702.pdf** ». Voici un tableau avec les **rapports et articles** mis à disposition en ce fin de projet :

Table 3. Liste des livrables scientifiques et opérationnels contractuels

Catégorie	Livrables
Développement de logiciels	L.1.1 Nouvelle version du logiciel GeoClimate avec intégration de la BDTopo v3.0 → GeoClimate
	L.1.2 Mise à jour de la documentation utilisateur GeoClimate → Documentation GeoClimate
	L.1.3 Nouvelle version intégrée de la Base de Données Architecturales Danube → Base de Données Danube
Articles scientifiques	Bernard, J. et al. (2024). A generic algorithm to automatically classify urban fabric according to the local climate zone system: implementation in GeoClimate 0.01 and application to French cities. <i>Geosci. Model Dev.</i> 17, 2077–2116. DOI
	Gousseff, M. et al. (2023). Iczexplore: an R package to explore Local Climate Zone classifications. <i>Journal of Open Source Software</i> , 8(91), 5445. DOI
	Lagelouze, T. et al. (2024). Comparison and Theoretical Conceptualization Analysis of Statistical Methods Used to Develop Heat Vulnerability Indices in Urban Areas. <i>European Journal of Geography</i> 15 (3):154-76. DOI
	Touati, N. et al. Statistical reliability of the modified areal weighted by control zones method for downscaling individual social data. <i>Journal of spatial statistics</i> . Submitted.
	Araujo, L. et al. Unveiling Renovation Patterns in the French Building Stock Using Archetype Classification and Energy Performance Certificates Data. To be submitted to <i>Building Environment</i> .
	Huteau G. et al. A methodological toolbox for assessing LCZ classifications capabilities to undertake urban thermal diagnostic: Application to Dijon Conurbation. To be submitted to <i>Urban Climate</i> .
	Chomard, K. et al. Chaleur en ville : des zones climatiques locales aux balades urbaines et climatiques. 14e Rencontres Nationales TEPOS, Loos-en-Gohelle, Octobre 2024.
	Gousseff, M. et al. Explorer et comparer des cartes de zones climatiques locales avec le paquet R Iczexplore, Rencontres R, Vannes 2024.
Conférences	Chomard, K. et al. Concevez votre balade urbaine et climatique ! Assises Européennes de la Transition Énergétique, Septembre 2024.
	Hidalgo, J. Les enjeux de la température en ville. Toulouse 50°, Archipel Citoyen.
	Huteau G. et al. SNO –OBSERVIL : Mesures participatives des températures de l'air en milieu urbain à Dijon. 4e journées scientifiques du SNO Observil, Lyon, France, 15-14 juin 2024.
	Lagelouze, T. et al. Comparaison de méthodes d'évaluation statistiques de la vulnérabilité sociale à la hausse de la chaleur en milieu urbain. Groupe de travail « Applications opérationnelles » RT Climat Urbain, Oct 2023, Paris.
	Lagelouze, T. et al. Analyse des approches d'indexation pour l'évaluation spatiale de la vulnérabilité sociale à la chaleur en milieu urbain. Journée de recherche Labex SMS, 13 Mai 2024, Toulouse.
Application opérationnelle	L3.1-L3.2 Notes méthodologiques pour la caractérisation des cours d'école à partir des données P/ENDORA_2.
Médiation scientifique et valorisation	L4.1 Colloque de fin de projet : Prévu les 6-7 mars 2024 à Toulouse.
	L4.2 Compte rendu des formations Geoclimate.
	L4.3 Scripts balades : fichier <i>Restitution_stage_Balades_20240702.pdf</i> .

Table 4. Liste des livrables complémentaires

Catégorie	Livrables
Rapports des stages effectués au cours du projet	<i>Rapport_CRC-Cerema_stage_Ghuteau.pdf</i>
	<i>Rapport_LABSTICC_Stage_EKerjouan.pdf</i>
	<i>Rapport_LUED_TM_Stage_FRodriguez.pdf</i>
	<i>Rapport_LISST_Stage_Balades.pdf</i>
	<i>Rapport_LISST_Stage_MAranda.pdf</i>
	<i>Rapport_LISST_Stage_TLagelouze.pdf</i>
	<i>Rapport_LRA_stage_Outil_DANUBE_Anne_Brunet.pdf</i>
Documents techniques concernant DANUBE_tool	<i>BDD-DANUBE-Tutoriel-DANUBE_Tool-12-2024.pdf</i>
	<i>Présentation générale DANUBE_Tool-Formation-06-02-2024.pdf</i>
Compte Rendus des réunions semestrielles (disponibles à la demande)	<i>CR_20220408_Paris.pdf</i>
	<i>CR_20221108_Paris_complet_V2.pdf</i>
	<i>CR_20230608_Vannes.pdf</i>
	<i>CR_20240206_Paris_VF</i>

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Table 1. Parts de bâtiments rénovés au niveau des murs et au niveau des toits selon les usages	pg 14
Table 2. Part de logements rénovés au niveau des murs et au niveau des toits selon les dates de construction et les types de logement	pg 14
Table 3. Liste des livrables scientifiques et opérationnels contractuels	pg 45
Table 4. Liste des livrables complémentaires.....	pg 45

FIGURES

Figure 1. Principales étapes de la chaîne algorithmique de GeoClimate en 2022	pg 6
Figure 2. Principales étapes de la base de données architecturale (DANUBE) en 2022	pg 7
Figure 3. Îlot de chaleur urbain maximal pour le panel de villes MAPUCE (légende vert: < 0°C, jaune : 0°C à 2°C; orange: 2°C à 3°C; rouge > 3°C)	pg 7
Figure 4. Synoptique du projet	pg 8
Figure 5. Principales étapes pour l'intégration de la BDTopo 3.0	pg 9
Figure 6. Cartographie des zones climatiques locales avec différentes versions de la BDTopo	pg 10
Figure 7. Densité de probabilité de la valeur U de l'archétype groupé P3-P-HABITAT-FRANCE	pg 12
Figure 8. Médianes et plages de Valeur U du toit pour les échantillons étudiés	pg 13
Figure 9. Type de vitrage pour les échantillons étudiés et DANUBE	pg 13
Figure 10. Schéma synoptique de l'outil DANUBE	pg 18
Figure 11. Workflow simplifié du pré-traitement des données de l'outil DANUBE	pg 20
Figure 12. Accès aux fonctions de traitement de l'outil DANUBE	pg 20
Figure 13. Illustration de l'interface de l'outil DANUBE au sein du logiciel QGIS	pg 21
Figure 17. Méthodologie de la validation et contrôle des algorithmes pour la classification LCZ	pg 24
Figure 18. Comparaison de LCZ générées pour la ville de Dijon par la méthode GeoClimate en utilisant la BD Topo V2.2 et OpenStreetMap	pg 25
Figure 19. Cadre théorique proposé pour l'évaluation du système de vulnérabilité à la chaleur	pg 27
Figure 20. Correspondance des classes de l'Indicateur de Vulnérabilité à la chaleur (HVI en anglais) selon la méthode utilisée. (a) HVI final communément discrétisé en intervalles égaux ; et (b) nombre de fois que les méthodes classifient la même unité IRIS dans la même classe affichée dans le panneau (a). (Depuis, T. Lagelouze et al. 2024)	pg 27
Figure 21. Analyse comparative à l'échelle de deux IRIS INSEE (en rouge dans la carte).....	pg 28
Figure 22. Méthodologie de travail dans le cadre du stage de Guillaume Huteau	pg 29
Figure 23. Les 13 type de TTS pour Dijon	pg 30
Figure 24. Fréquence saisonnière par TTS à Dijon	pg 30
Figure 25. Les différentes bases de données LCZ confrontées	pg 31
Figure 26. Comparaison de 2 BD LCZ avec l'outil LCZ explore [Goussef et. al., 2024]	pg 31
Figure 27. Attribution d'une classe LCZ à chaque station météo du réseau de Mesure Dijonnais (MUSTARD) suivant différentes taille de buffer (50, 100, 200 et 300m)	pg 32
Figure 33. Matrice de confusion resultantes du test de Dunn pour la classification LCZ via Geoclimate/BD Topo3/ Buffer 300m (à gauche) et via Wudapt (à droite).....	pg 32
Figure 34. Flyer de présentation du projet PAENDORA, de la BdD et de l'outils DANUBE	pg 35
Figure 35. Invitation à l'atelier DANUBE	pg 35
Figure 36. Illustration des données brutes générées par l'outil DANUBE sur le commune de Toulouse	pg 36
Figure 37. Illustration de résultat : représentation de la matérialité des murs porteurs (PORTEUR_M1) sur la commune de Toulouse	pg 36
Figure 38. Croisement et spatialisation des données de rénovation avec l'usage et la période de construction ...	pg 37
Figure 39. Exemple de croisement des LCZ couplées avec des données de matérialité des murs et des toits des bâtiments à Toulouse	pg 37
Figure 40. Illustrations de l'atelier DANUBE	pg 39
Figure 41. Questions du formulaire en ligne du retour d'expérience de l'atelier DANUBE à destination des PARTICIPANTS. (A. BRUNET, 2024)	pg 39
Figure 42. Illustration graphique des réponses à certaines questions fermées	pg 40
Figure 43. Illustration graphique des réponses à certaines questions d'analyse qualitative.	pg 41
Figure 44. IPR-Indicateur du potentiel de rafraîchissement de Gaston Dupouy (maternelle au sud, primaire au nord). On remarque que la cour du primaire présente un cœur rouge (au cumulé du matin au soir), montrant une zone à travailler en priorité. (extrait du rapport spécifique de ce LOT3)	pg 44

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Légende image / tableau.....	8
------------------------------	---

FIGURES

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

PÆNDORA_2

Pour la gestion du confort estival : Données, Outils et Recherche-Action

Rapport final
TO+36 mois
Partie 1 : Suivi du projet

Le projet a été porté par sept laboratoires de recherche publique situés à Toulouse (LISST, CNRM, LMDC, LRA), Vannes (Lab-STICC), Paris (LIED) et Dijon (Laboratoire Biogéosciences), un établissement public d'expertise (Cerema), un Bureau d'Études (Société Intermezzo) et deux acteurs institutionnels (la FNAU et Toulouse Métropole). Il s'est positionné sur les objectifs de réduction des impacts des aléas climatiques extrêmes aux échelles urbaines. Plusieurs actions ont été entreprises : La mise à jour et à disposition en Open Access des outils GeoClimate (pour produire des données de morphologie urbaine et d'occupation du sol) et Danube (qui est une base de données sur la matérialité et les techniques constructives) ; la confrontation terrain de données urbaines, architecturales et climatiques à l'échelle de l'îlot pour un ensemble de 5 cas d'étude (Dijon, Nancy, Paris, Lorient et Toulouse) ; l'accompagnement de Toulouse Métropole sur son projet 100 000 arbres en particulier sur la phase de diagnostic et priorisation d'actions de verdissement et désimperméabilisation des cours d'école de la commune de Toulouse. En plus des actions de communication et valorisation classiques d'un projet de recherche, des séances de formation à destination des agences d'urbanisme autour de l'outil GeoClimate ont été effectuées au printemps 2024. D'une autre part, une série de balades microclimatiques urbaines ont été mises en place en collaboration avec les équipes locales des cas d'étude. Ces balades sont conçues comme un dispositif pédagogique à destination des chefs de projet des collectivités concernées, mais elles pourront être mobilisées plus largement dans d'autres cadres, comme



EXPERTISES

