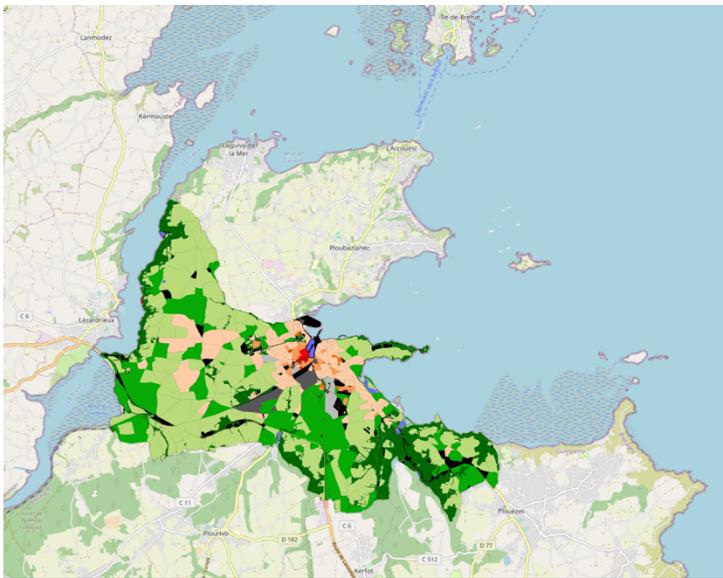


PAENDORA

Planification, Adaptation et Énergie :

Données territoriales et accompagnement



Rapport scientifique

Auteurs et contributeurs au projet :

Valéry Masson, Julia Hidalgo, Erwan Bocher, Geneviève Bretagne, Ophélie Touchard, Sinda Haouès-Jouve, Jérémy Bernard, Laurène Pilot, Thomas Gardes, Marine Goret, Tiago Machado, Zohra Mhedhbi, Gwendall Petit, Robert Schoetter, Najla Touati



Sommaire

Résumé	3
A. Le projet PÆNDORA	4
A.1. Objectifs du projet de recherche	4
A.2. Méthodologie	5
B. Automatisation des calculs des données urbaines à l'échelle des pâtés de maisons	8
B.1. Rendre générique la procédure de mise à jour des données	8
B.2. Nouvelle approche de définition des îlots urbains	10
B.3. Construction des indicateurs et des typologies	13
B.4. Documentation et contrôle qualité	16
C. Développement d'outil libres de visualisation et mise à disposition des données	17
C.1. Représentation cartographique des données et mise à disposition et visualisation des données sous système d'information géographique	17
C.2. Application métier : îlot de chaleur urbain	23
D. Méthodologies et outils pour l'adaptation climatique des villes	27
D.1. Outils cartographiques spécifiques d'analyse et d'opérationnalisation des enjeux climat-énergie dans la planification urbaine	27
D.2. Accompagner l'intégration des enjeux adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme	33
E. Pratiques et veilles dans les agences d'urbanisme	41
E.1. Quelles pratiques aujourd'hui dans les agences ? Quelles limites identifiées ? Quelles attentes ?	41
E.2. Veille juridique des aspects « énergie-climat » en urbanisme	46
F. Conclusion	50
G. Annexes	52
G.1. Références des articles scientifiques publiés par le projet	52
G.2. Actions de valorisation grand public et acteurs	52



Résumé

Le projet PÆNDORA avait pour ambition de développer et appliquer une approche générique de production de données urbaine à l'échelle des îlots urbains (les pâtés de maisons), de les appliquer pour un domaine métier (l'îlot de chaleur urbain), et, le cas échéant en s'appuyant sur ces données, poursuivre le travail sur des méthodologies d'accompagnement des acteurs de l'urbanisme vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique.

Afin d'atteindre ces objectifs, il était nécessaire d'avoir un partenariat regroupant à la fois l'ensemble des compétences nécessaires et l'expérience des projets radicalement transdisciplinaires. Ce partenariat était composé de 3 laboratoires de recherche en météorologie, géomatique et urbanisme : du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM - UMR3589), le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance (LabSTICC - UMR 6285), le Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST – UMR 5193). Le quatrième partenaire, acteur de la ville était l'agence d'urbanisme et d'Aménagement Toulouse Aire Urbaine (AUAT), représentant la Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme (FNAU).

Afin de calculer de très nombreux d'indicateurs morphologiques et micro-climatiques (comme les Local Climate Zones), une chaîne de calcul d'indicateurs urbains, GeoClimate, a été élaborée. Elle permet d'utiliser à la fois la BDTopo V2.2 de l'IGN, et OpenStreetMap. Son utilisation par les acteurs, que ce soit par exemple en agence d'urbanisme ou bureau d'études, est facilitée par l'intégration des aspects géospatiaux dans le logiciel libre Dbeaver, qui permet la visualisation et l'exploitation de la chaîne. Sur un cas d'application métier sur l'îlot de chaleur sur l'EuroMétropole de Strasbourg des retours d'expérience de bureaux d'études et de la collectivité ont permis d'améliorer GeoClimate.

Afin d'accompagner les collectivités, nous avons approfondi le transfert d'informations climatologiques. Aux échelles locales, au sens description des phénomènes météorologiques typiques influençant la ville, des fiches décrivant les types de temps sensible ont été éditées pour 50 villes différentes. À l'échelle urbaine, un indicateur d'îlot de chaleur d'été facilement exploitable en agence d'urbanisme a été conçu, utilisant des données déjà connues ainsi que des cartes de LCZ issues du projet, mobilisables quand l'on dispose des données de la Bdtopo. Enfin, une réflexion sur la représentation graphique des informations pertinentes a été menée.

Un kit sur les données clés de l'adaptation a été publié sous le format d'un guide ADEME, qui offre une vision des pratiques de planification actuelles et des méthodologies d'accompagnement. Ce guide présente les questions repères et un regard critique (cohérence et marge de manœuvre) des données mobilisées, en faveur d'une vision compréhensible et proactive de l'adaptation. Les enseignements de ce kit ont été mis en œuvre dans un exercice de "PLUi augmenté" sur l'agglomération de Toulouse Métropole.

Enfin, un exercice de suivi des pratiques des agences d'urbanisme a été mené, et a montré une amélioration depuis 2015 de la prise en compte de l'adaptation dans la planification urbaine. Une veille juridique est pérennisée sur ces questions, via la mise en place d'une collaboration pérenne au niveau de la FNAU avec le bulletin juridique de l'a'urba de Bordeaux.



A. Le projet PÆNDORA

A.1. Objectifs du projet de recherche

De nombreux projets de recherche se sont penchés ces dernières années sur le développement d'outils d'aide à la décision à destination des collectivités pour la prise en compte des thématiques énergie et climat dans les pratiques de l'urbanisme (notamment suite à la LTECV, les collectivités de plus de 20 000 habitants devant élaborer des PCAET).

Si le volet atténuation de ces stratégies est aujourd'hui bien encadré d'un point de vue méthodologique, celui relatif à l'adaptation – du fait sans doute de son caractère plus transversal – peine encore à s'affirmer comme un champ pertinent et autonome de l'action publique locale.

Parmi ces projets de recherche, le projet MApUCE (2014-2019), financé par l'Agence Nationale de la Recherche, a été le cadre d'une enquête lancée auprès des agences d'urbanisme du réseau FNAU, partenaire du projet depuis ses débuts. Cette enquête a permis de poser un état des lieux (2015) de la prise en main des enjeux énergétiques et climatiques (volets atténuation et adaptation) par les agences d'urbanisme dans le cadre de leurs missions. Ce premier bilan, auquel 25 agences ont participé, a révélé des pratiques riches et plurielles, mais souvent partielles et/ou fragmentaires. Il a permis aussi d'identifier des verrous scientifiques, en lien avec le manque de données et d'outils adaptés aux pratiques en urbanisme et le besoin d'une montée en compétence des acteurs sur les thématiques énergie-climat, et en particulier sur le sujet de l'adaptation au changement climatique.

Forts de ce constat, l'ADEME, le CNRS et l'agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine (AUAT) ont ainsi impulsé le programme de recherche appliquée **PÆNDORA** (Planification, Adaptation, Énergie : Données Territoriales et Accompagnement, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), qui vise le transfert vers l'opérationnel d'un certain nombre de résultats du projet MApUCE, notamment :

- L'amélioration et la mise à disposition d'outils libres de visualisation, d'extraction et d'exploitation des données urbaines et climatiques produites par le projet MApUCE et généralisées dans le présent projet, à l'échelle des îlots urbains.
- La poursuite du travail sur des méthodologies d'accompagnement des acteurs de l'urbanisme vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique (quels que soient les territoires, des grandes agglomérations aux villages et collectivités du monde rural), à travers notamment un protocole de suivi auprès des acteurs de l'urbanisme. La pérennisation du questionnaire est aussi une manière d'améliorer l'appropriation et la déclinaison des problématiques Énergie et Climat dans les démarches de planification et d'aménagement en France pour cette période charnière du réchauffement climatique (Figure 1).

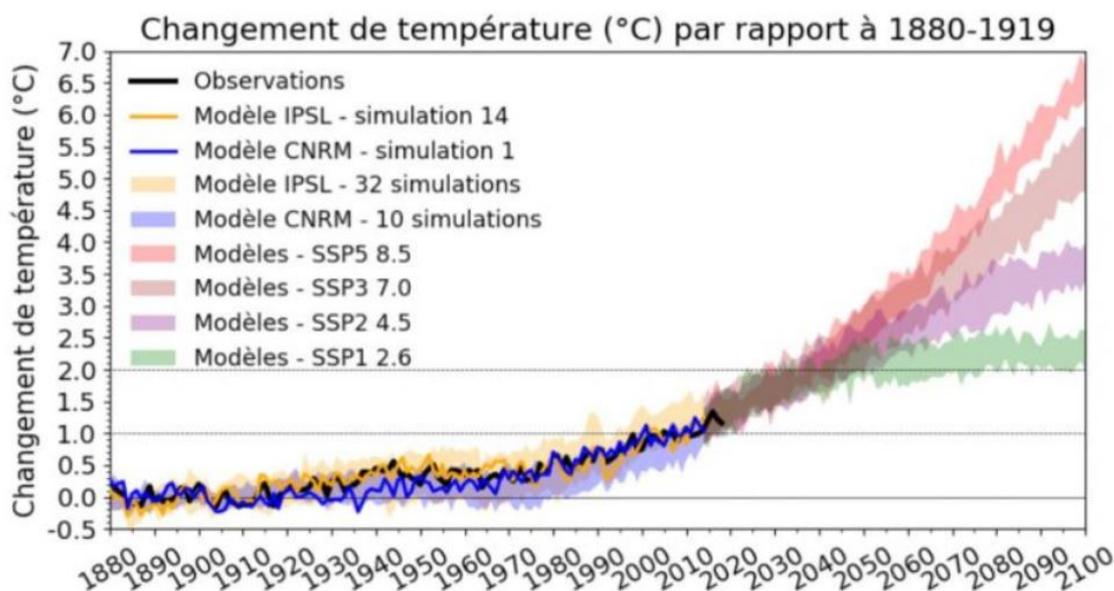


Figure 1 : Changement de température moyenne de l'air de la planète - Source : http://www.cnrs.fr/sites/default/files/press_info/2019-09/DP_confpresse_CMIP6_OK.pdf

Afin d'atteindre ces objectifs, il était nécessaire d'avoir un partenariat regroupant à la fois l'ensemble des compétences nécessaires et l'expérience des projets radicalement transdisciplinaires. Ce partenariat était composé de 3 laboratoires de recherche en météorologie, géomatique et urbanisme : du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM - UMR3589), le Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Information, de la Communication et de la Connaissance (LabSTICC - UMR 6285), le Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST – UMR 5193). Le quatrième partenaire, acteur de la ville était l'agence d'urbanisme et d'Aménagement Toulouse Aire Urbaine (AUAT), représentant la Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme (FNAU).

A.2. Méthodologie

Les travaux menés au cours du projet vont contribuer à lever deux types de verrous scientifiques. Le premier est lié aux méconnaissances des acteurs des thématiques liées à l'énergie, la mitigation et l'adaptation du changement climatique :

1. Des **difficultés à mobiliser** dans l'action les élus et praticiens de l'aménagement face à des évolutions aux effets à moyen et long termes, en distinguant / décloisonnant les notions d'atténuation et d'adaptation ; cela se traduit par des notions peu appropriées et un **défaut de commande publique claire**,
2. Le **défaut de lisibilité et de compréhension des sujets** induit un manque de compétences (limite des connaissances de la thématique en interne, des leviers et des possibilités des documents cadres dans la réglementation actuelle du code de l'urbanisme), des partenariats qui commencent tout juste à se construire : nécessité de pédagogie, de transversalité (complexe à mettre en place), **d'acculturation**

respective entre acteurs du climat et de l'énergie (univers encore très technique) et de l'urbanisme

3. Difficultés sur l'**insertion réglementaire**, de savoir jusqu'où la règle, la disposition normative peut aller, difficile traduction de l'orientation en règle : beaucoup de mesures semblent plus relever de la gestion et non pas du document d'urbanisme.
4. Des attentes en termes de **retours d'expériences**, de références concrètes

D'autres verrous identifiés sont associés au manque de données et d'outils :

5. **Manque / difficultés d'accès aux données** (données partielles sur les territoires, échelles des données, confidentialité de certaines d'entre elles, mises à jour, validité des données...) et difficultés sur l'établissement des diagnostics, échelle parfois inadaptée
6. **Difficultés sur la maîtrise d'outils adaptés** en termes de méthodes de traitement et d'interprétation, de diagnostic, de prospective, d'animation de démarches prospectives partagées appropriables (coefficients et ratios, modélisation, croisement de politiques publiques complexes, hypothèses sectorielles, complexité du système urbain, inadaptation aux documents cadres,...)
7. Des besoins de modélisation peu manifestés, qui concernent principalement : les vulnérabilités futures aux effets du changement climatique, la précarité énergétique,...
8. Des **besoins futurs de SIG, cartographie ou données** peu appréhendés, qui concernent aujourd'hui prioritairement : la consommation énergétique, les émissions GES du bâti, le potentiel en énergies renouvelables, la vulnérabilité,...

Afin de lever ces verrous, le projet se découpe en 4 tâches (Figure 2) :

- Des méthodes pour calculer les indicateurs urbains morphologiques, typologiques novateurs (comme la typologie de bâtiments ou les zones climatiques locales), d'architecture ont été mises au point. La tâche 1 a consisté à revoir, rationaliser et **opérationnaliser** le calcul de ces indicateurs automatiquement pour n'importe quelle commune française, à partir de données de la Bdtopo. Un contrôle qualité associé est effectué automatiquement.

- La tâche 2 a permis de développer des outils de **visualisation** cartographique et d'**extraction des données**. Plutôt que de reconstruire des outils neufs, ces développements ont été réalisés, et ont contribué, au sein d'un logiciel libre, Dbeaver, choisi en cours de projet, qui ne disposait pas de ces fonctionnalités. Une application métier sur l'îlot de chaleur urbain a été menée, non pas sur Toulouse comme prévu initialement, mais sur Strasbourg, en collaboration avec l'EuroMétropole. Ceci permet de montrer la généricité de l'approche.

- La tâche 3 vise à développer des méthodologies d'accompagnement des collectivités dans leur élaboration de documents de planification vis-à-vis de l'adaptation. Des outils de transfert comme les cartes climatiques urbaines ont été améliorés, et une étude menée sur le PLUi d'une grande agglomération (Toulouse). Un guide ADEME a été produit comme un kit sur les outils d'adaptation.

- La tâche 4, pilotée par l'agence d'urbanisme de Toulouse, a pour permis de pérenniser un **dispositif de veille** juridique et d'analyse des pratiques des agences d'urbanisme, et de réaliser un premier exercice de suivi.

Ce rapport scientifique final va décrire les résultats de ces différentes actions, ainsi que les articulations entre ceux-ci.

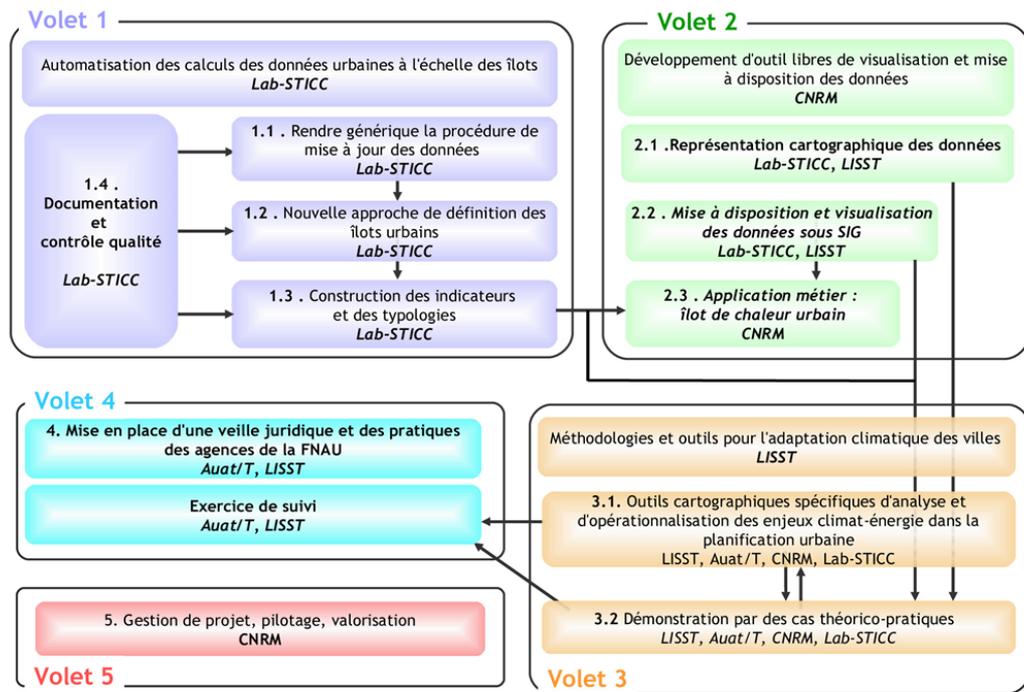


Figure 2 : Organigramme des tâches du projet PÆNDORA

B. Automatisation des calculs des données urbaines à l'échelle des pâtés de maisons

B.1. Rendre générique la procédure de mise à jour des données

Le but est ici de permettre la production d'indicateurs urbains et micro-climatiques à l'échelle pertinente (l'îlot urbain, ou plus prosaïquement le pâté de maisons), à partir d'un outil utilisable par des acteurs urbains (ayant une connaissance en système d'information géographique).

Les indicateurs géographiques du projet PÆNDORA sont produits à partir de la Base de Données Topographiques de l'IGN dans sa version 2.2. Durant l'exercice du projet, la BDTopo de l'IGN est livrée dans 2 formats de données : un fichier SQL pour une base PostGIS ou un ensemble de fichiers Shapefile¹. Ces données sont accessibles en licence d'utilisation à titre gratuit pour les usages suivants : enseignement, recherche publiable, démonstration ou évaluation, mission de service public².

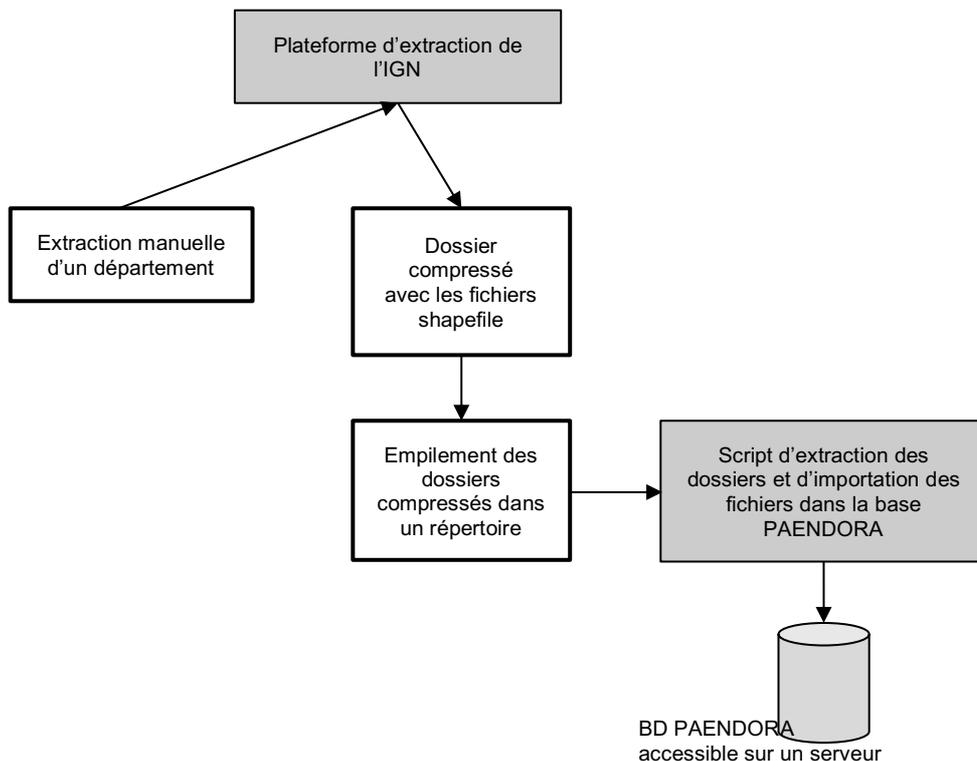


Figure 3 : Synopsis de la procédure de récupération des données de la BDTopo

Dans le cadre du projet PÆNDORA, les données ont été téléchargées par département au format shapefile via le site <https://geoservices.ign.fr>. Le format shapefile et

¹

https://geoservices.ign.fr/ressources_documentaires/Espace_documentaire/BASES_VECTORIELLES/DL_Commune/DL_vecteur.pdf consulté le 02/12/2020

² https://geoservices.ign.fr/ressources_documentaires/Espace_documentaire/licence_gratuite.pdf consulté le 02/12/2020

l'unité géographique départementale sont alors les seules options disponibles pour un accès gratuit aux données, l'extraction dans un fichier SQL PostGIS nécessitant de passer une commande.

En conséquence après avoir validé une licence d'utilisation à titre gratuit des données IGN pour le compte du laboratoire LAB-STICC, une procédure mixant intervention manuelle et automatisation d'import des données a été développée pour alimenter une base de données PostGIS pour l'ensemble du territoire métropolitain (Figure 3 : Synopsis de la procédure de récupération des données de la BDTopo).

Cette base de données appelée PÆNDORA contient l'ensemble des thèmes de la BDTopo regroupés dans des tables uniques (Figure 4). Elle fournit un **assemblage des 96 départements métropolitains** (Figure 5). Les tables sont isolées dans un schéma qui porte comme identifiant l'année de production des données.

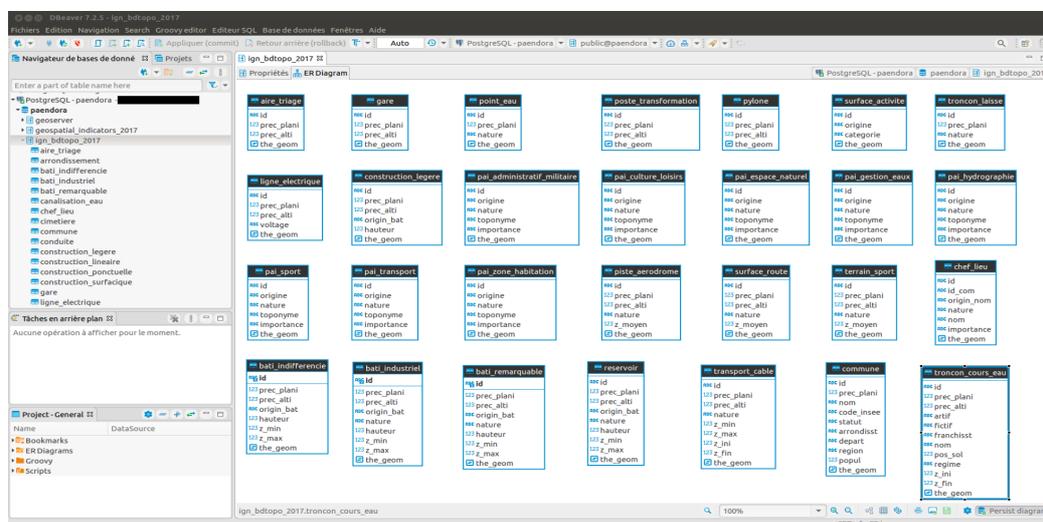
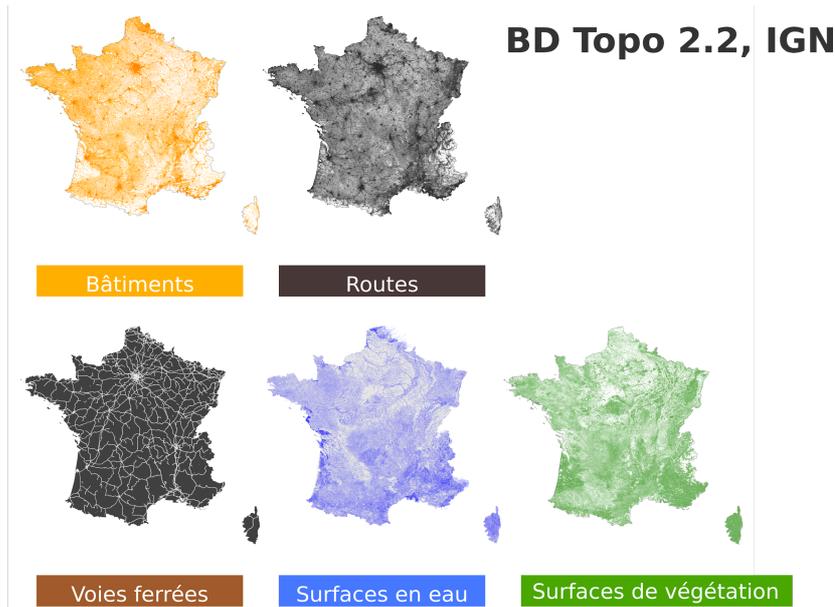


Figure 4 : Visuel de l'ensemble des tables de la BD PÆNDORA



Auteur: G. Petit -
Lab-STICC 06/2018

Figure 5 : Représentation des principales tables de données géographiques de la BD PÆNDORA

La BD PÆNDORA contient au final 46 tables géographiques auxquelles s'ajoutent les contours IRIS GE de l'IGN, version 2.0 de 2016³. Projetées dans le système de coordonnées RF93 (EPSG:2154), elles représentent 50 Go de données.

B.2. Nouvelle approche de définition des îlots urbains

Une nouvelle méthode pour construire les îlots urbains, appelée **Unités Spatiales de Référence (USR)**, a été développée. Cette méthode utilise une technique de fusion verticale de géométries en 4 étapes qui permet un partitionnement d'une zone donnée (Figure 6):

1. Sélection d'un ensemble de géométries linéaires et surfaciques correspondant à la zone à partitionner,
1. Construction d'un graphe topologique spatial. Cette étape convertit les géométries en segments et calcule toutes les intersections possibles entre les segments en alimentant une structure relationnelle. Chaque segment connaît ses voisins.
2. Utilisation de la structure relationnelle pour reconstituer des polygones (USR) et ajout d'un identifiant unique pour chaque polygone.
3. Stockage des polygones dans une structure de données spatiales.

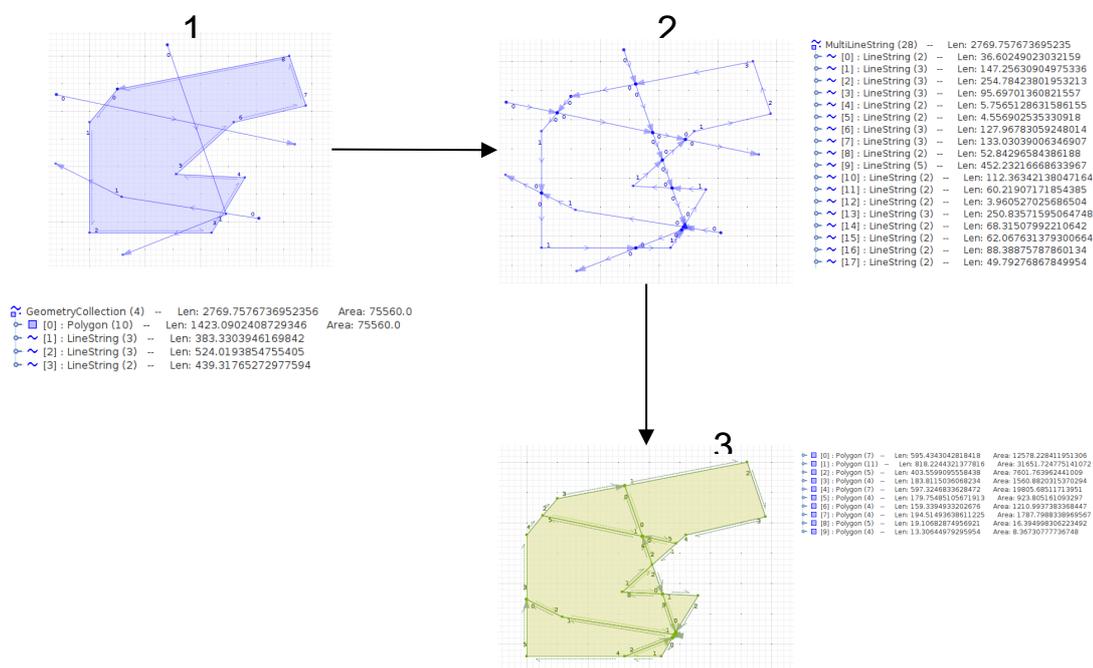


Figure 6 : Étapes de production des unités spatiales de référence

Afin de rendre générique la construction des USR mais également la production des indicateurs géoclimatiques et les typologies, un **modèle de données abstrait** a été formalisé. Ce modèle de données décrit la structure, les valeurs des données d'entrée qui sont utilisées par les algorithmes. L'utilisation d'un modèle abstrait permet de découpler la phase de préparation des données, des phases de production des indicateurs.

Le modèle de données abstrait est concrétisé sous la forme de 7 tables (structure lignes/colonnes) qui représentent les principaux éléments du territoire (Figure 7).

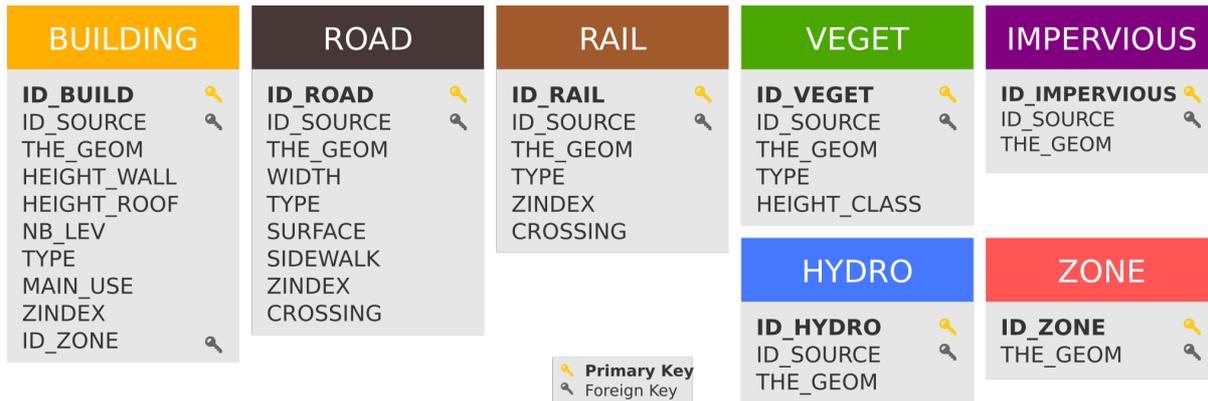


Figure 7 : Les 7 tables du modèle d'entrée et leur descripteurs

Ces tables sont alimentées à l'issue d'une phase de prétraitement qui consiste en :

- La récupération des données de la BDTopo,
- Le regroupement des données en fonction des thèmes couverts par les tables. C'est le cas par exemple pour les classes de données bâtiments de la BDTopo, indifférenciés, industriels, remarquables.
- Un nettoyage des géométries (réparation des géométries invalides par exemple).
- Une validation sémantique des données d'entrée (vérification de la présence de certaines valeurs comme la hauteur des bâtiments),
- Une transformation des attributs de la BDTopo pour être conforme aux dictionnaires de valeurs du modèle abstrait. C'est le cas par exemple des valeurs autorisées pour décrire les types de bâtiments. Ces règles sont documentées en ligne https://github.com/orbisgis/geoclimate/blob/master/docs/chain_documentation/input_data_model.md#1--Buildings.

La construction du modèle de données d'entrée est la première étape de la chaîne algorithmique que nous avons appelée **GeoClimate** (Figure 8). Cette étape accomplie, il est possible ensuite de déclencher une séquence de traitements dont le premier concerne le calcul des USR.

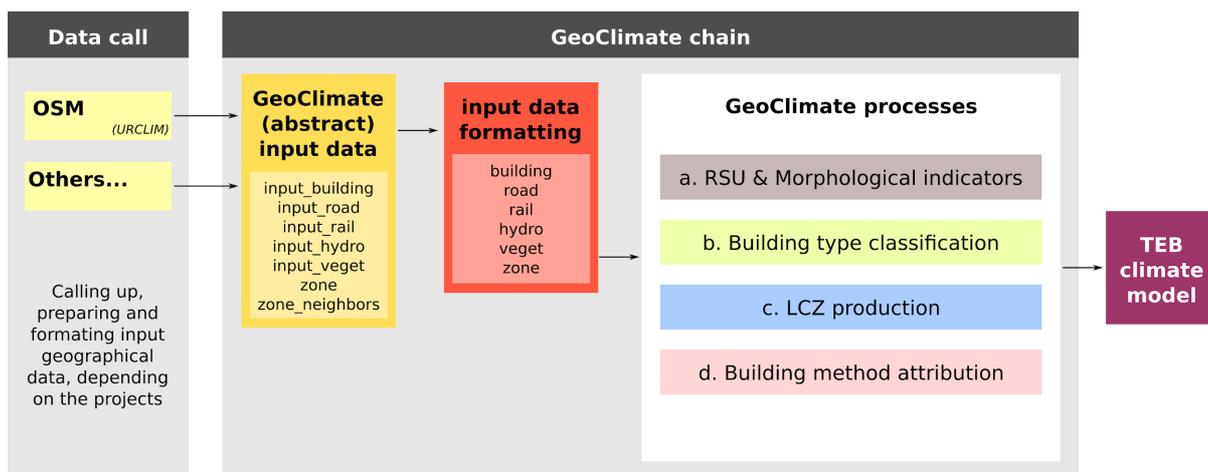


Figure 8 : Principales étapes de la chaîne algorithmique GeoClimate

Le calcul des USR met en œuvre la technique de fusion verticale des données évoquée précédemment sur la base d'une sélection des géométries stockées dans les 4 tables suivantes : road, rail, hydro, veget et zone. La Figure 9 illustre un exemple d'USR calculées sur le territoire de l'agglomération de Redon.

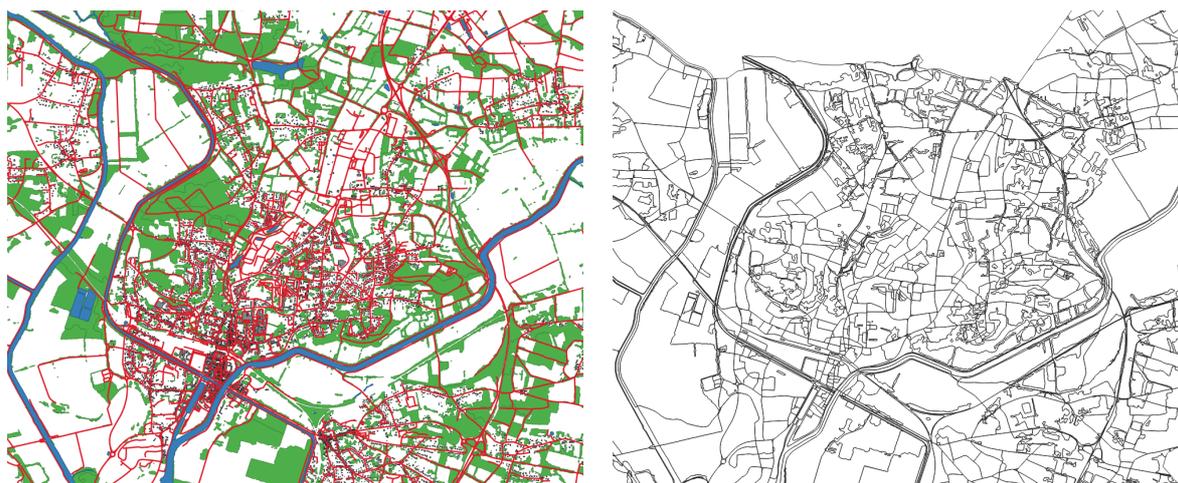


Figure 9 : A gauche représentation des données d'entrée du modèle, à droite USR calculées pour la commune de Redon

A l'issue de la construction des USR, une structure relationnelle est construite pour établir une relation spatiale entre un bâtiment et son unité de référence. Cette information va permettre par la suite d'agréger les indicateurs calculés à l'échelle du bâtiment par USR. Ce système de relation est également mis en œuvre pour les groupes de bâtiments, les blocs, qui constituent la 3eme unité spatiale d'analyse et de production des indicateurs (Figure 10).

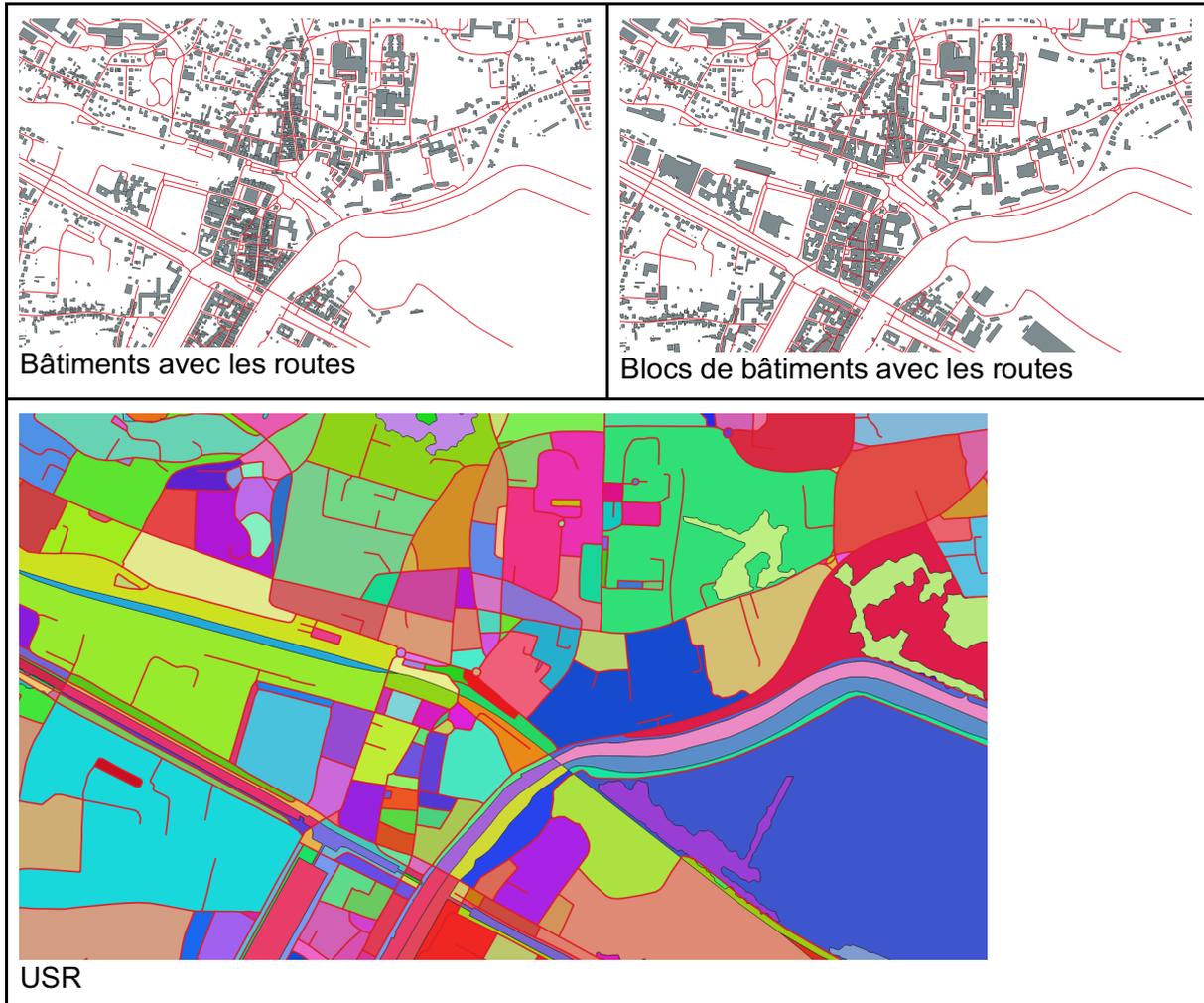


Figure 10 : Représentation des 3 unités spatiales utilisées par GeoClimate pour produire des indicateurs

B.3. Construction des indicateurs et des typologies

Les indicateurs sont calculés aux 3 échelles spatiales. Il s'agit d'indicateurs de distance comme par exemple le nombre de bâtiments à une distance de moins de 100 mètres d'un bâtiment, d'indicateurs morphologiques comme le rapport de forme ou d'indicateurs plus complexes comme le facteur de vue du ciel (Sky View Factor), la surface de mur libre... Ces indicateurs sont pour l'essentiel estimés à l'échelle des bâtiments et sont ensuite agrégés par blocs de bâtiments et par une unité spatiale de référence. Tous les indicateurs font l'objet d'une définition détaillée accessible en ligne :

https://github.com/orbisgis/GeoClimate/blob/master/docs/chain_documentation/indicators/indicators.md

Ces indicateurs sont exploités pour construire deux classifications. La première concerne l'identification des **Local Climate Zone (LCZ)** et la seconde une typologie du tissu urbain, celle qui avait été définie dans le cadre de l'ANR MAPUCE.

L'identification des LCZ est réalisée par USR. Elle mobilise les 7 indicateurs décrits dans Stewart et Oke 2012⁴: sky view factor, aspect ratio, building surface fraction, impervious surface fraction, pervious surface fraction, height of roughness elements et terrain roughness class. La méthode de classification pour trouver le type de LCZ qui est le plus approprié pour une USR est basée sur la distance minimale à chaque LCZ (dans un espace de 7 dimensions correspondant aux indicateurs). Afin de calculer cette distance, chaque dimension est normalisée en fonction de la moyenne et de l'écart type des valeurs de l'intervalle. Certains des indicateurs peuvent être plus importants (ou plus fiables) que d'autres pour l'identification des LCZ, en conséquence une table de pondération peut être utilisée. La pondération est utilisée pour multiplier la distance pour un indicateur donné.

Les deux types de LCZ étant les plus proches des indicateurs de l'USR (LCZ1 et LCZ2) sont associés à ce RSU. Un indicateur d'incertitude basé sur la méthode du Perkin Skill Score (PSS) est également associé lors de cette affectation. La Figure 11 représente une distribution des LCZ calculées pour la ville de Toulouse.

La classification du tissu urbain repose sur l'utilisation d'un algorithme d'apprentissage par arbre de décision, le RandomForest. Il utilise un fichier d'apprentissage qui liste la catégorie de tissu urbain dans lequel se trouve un bâtiment. Ce fichier est composé de 18 000 bâtiments qui ont été identifiés manuellement pendant le projet MAPUCE. Ce fichier a été contrôlé et mis à jour avec les nouveaux indicateurs de GeoClimate. Il permet de produire un modèle de classification qui est ensuite appliqué sur les bâtiments du territoire étudié. Une agrégation est ensuite effectuée à l'échelle des unités spatiales de référence en utilisant soit la surface au sol des bâtiments, soit la surface plancher de ceux-ci. Les Figure 12 et Figure 13 illustrent ces deux classifications pour la ville de Toulouse.

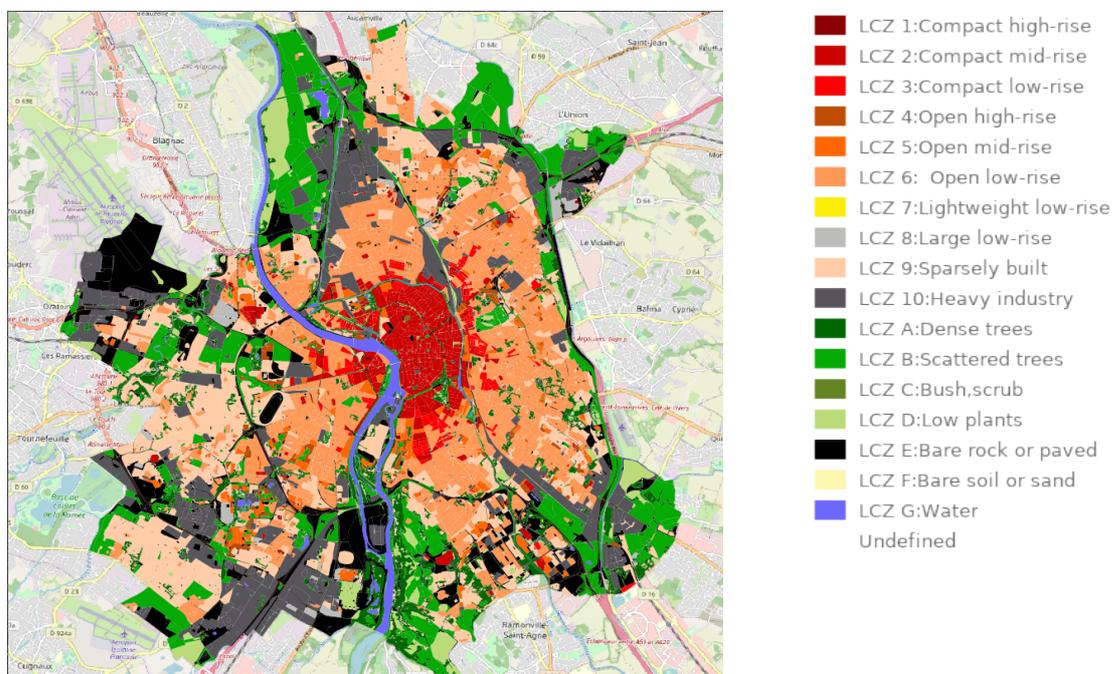


Figure 11 : Représentation des types de LCZ majoritaire pour la ville de Toulouse

⁴ Stewart, I.D.; Oke, T.R. Local climate zones for urban temperature studies. Bull. Am. Meteorol. Soc. 2012, 93, 1879–1900.

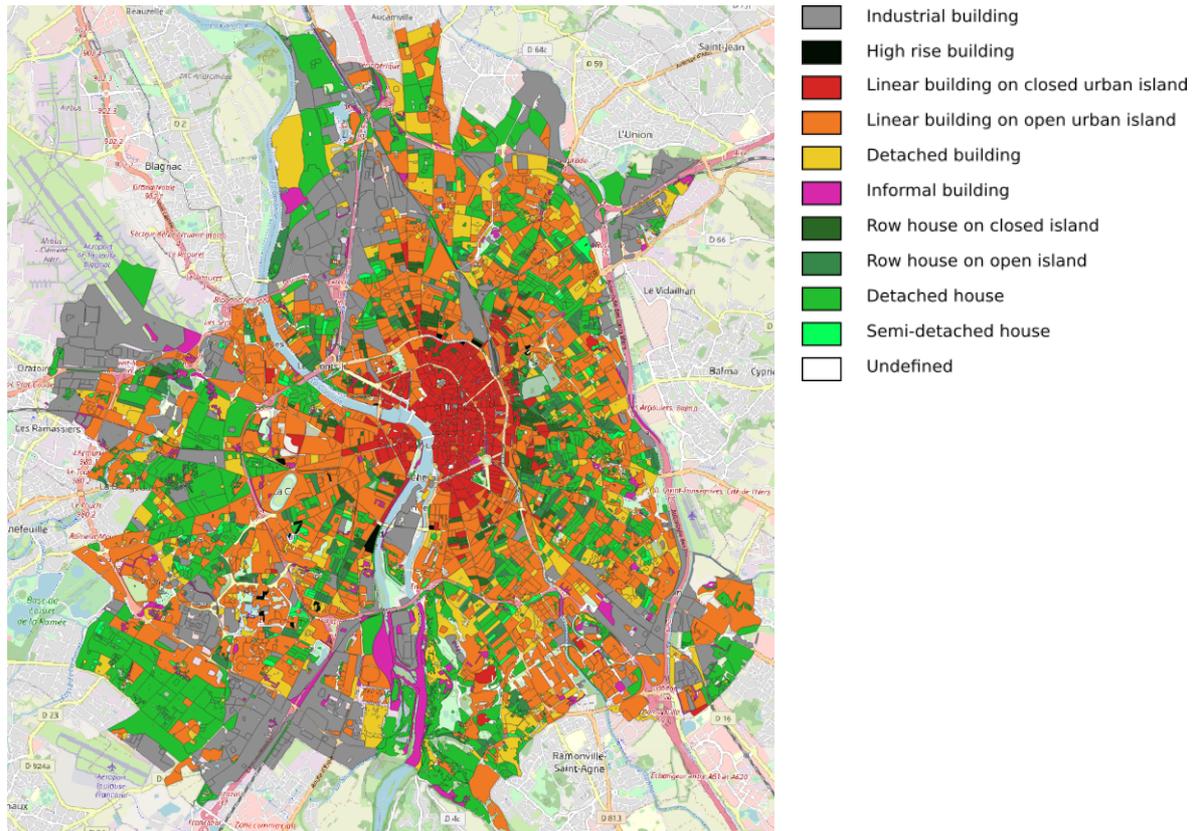


Figure 12: Représentation des types de tissu urbain en fonction de la surface plancher des bâtiments pour la ville de Toulouse

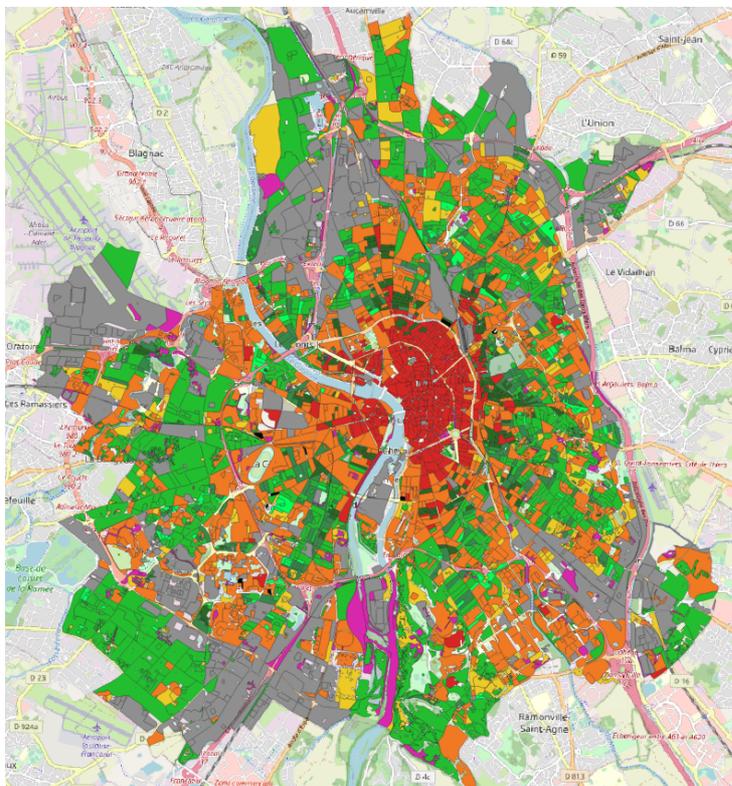


Figure 13 : Représentation des types de tissu urbain en fonction de la surface au sol des bâtiments pour la ville de Toulouse



Les algorithmes de GeoClimate (préparation des données, indicateurs, classifications) sont packagés dans un outil open source développé en langage Groovy. Ils ont été organisés pour pouvoir être utilisés indépendamment. Néanmoins pour faciliter leur prise en main, ils sont intégrés sous la forme d'une chaîne de traitements appelée workflow. Ce workflow se pilote à l'aide d'un fichier de configuration qui permet à l'utilisateur de spécifier les données d'entrée, d'ajuster les paramètres des modèles (voir section C).

B.4. Documentation et contrôle qualité

La méthodologie mise en œuvre pour développer l'outil GeoClimate a été détaillée dans une documentation pour les utilisateurs et pour les personnes qui souhaiteraient contribuer à l'améliorer. Cette documentation ainsi que le code source de GeoClimate sont accessibles publiquement et gratuitement à l'adresse <https://github.com/orbisgis/GeoClimate>. Tous les algorithmes intégrés à GeoClimate font l'objet de tests individuels de validation. Les résultats de l'ensemble de la chaîne de traitements, c'est-à-dire le séquençage des algorithmes, sont également testés sur la base d'un échantillon de la BDTopo pour la commune de Olems, fournit gracieusement par l'IGN.

Le logiciel GeoClimate est diffusé sous la licence GPL. Il est distribué sous la forme d'une version packagée à l'adresse <https://jenkins.orbisgis.org/job/GeoClimate-with-dependencies/>. Cette version est mise à jour dès qu'une modification est réalisée sur le code source de l'application.

La documentation de GeoClimate est pour l'instant uniquement en anglais. Néanmoins, un travail est engagé pour fournir une documentation en plusieurs langues et qui sera dépendante de la version du logiciel. Cette documentation sera disponible à l'adresse suivante <https://GeoClimate.readthedocs.io/en/latest/>

Livrable	Forme	Accès
Protocole de construction de la base de données unique par millésime.	Intégré à la documentation en ligne	https://github.com/orbisgis/GeoClimate
Méthodes et outils de chaînage des traitements (intégration, lots urbains, indicateurs et typologies)	Intégré à la documentation en ligne	https://github.com/orbisgis/GeoClimate
Codes sources en ligne via le portail https://github.com/orbisgis	Codes sources Code binaire	https://github.com/orbisgis/GeoClimate https://jenkins.orbisgis.org/job/GeoClimate-with-dependencies/

C. Développement d'outils libres de visualisation et mise à disposition des données

C.1. Représentation cartographique des données et mise à disposition et visualisation des données sous système d'information géographique

Basé sur l'expérience du projet MApUCE, un système d'information spécifique a été mis en œuvre. Ce système d'information est organisé autour de 3 composants (Figure 14) :

- 1) Une base de données PostGIS qui stocke les données d'entrée (BDTopo, IRIS-GE) ainsi que les indicateurs et classifications produits aux 3 échelles : bâtiments, blocs et USR ;
- 2) GeoClimate
- 3) l'application DBever

Contrairement au Projet MApUCE, le Système d'Information de PÆNDORA ne propose pas de navigateur cartographique en ligne pour visualiser les territoires où les indicateurs et les classifications ont été calculées. Ce choix s'explique du fait que les retours sur les usages des résultats de MApUCE montrent que ceux-ci ne concernaient pour l'essentiel que des demandes d'accès aux données, retravaillées ensuite dans des SIG. En conséquence nous avons décidé de nous concentrer sur la construction d'une **base de données commune** dont l'une des particularités est qu'elle n'est pas produite pour l'ensemble du territoire national mais alimentée au fil des communes analysées. En effet, si pour des questions de sobriété énergétique, il nous paraissait inutile de faire fonctionner un serveur cartographique en sous-utilisation, il en va de même concernant l'exécution de la chaîne GeoClimate qui mobilise du temps de calcul et des capacités de stockage. Par conséquent, la base de données PÆNDORA est une base de données "vivante" qui évolue au gré des territoires traités. **Cette approche permet entre autres de faciliter les échanges et interactions avec des collectivités, agences d'urbanisme ou les services de l'État qui souhaiteraient obtenir des données sur leurs territoires.** Actuellement plus de 2 000 communes ont été traitées et stockées. Elles couvrent des espaces comme la Métropole de Lille, de Strasbourg, les villes de Saint-Nazaire, Toulouse, Rennes, Marseille, Paris, La Rochelle, Grenoble.

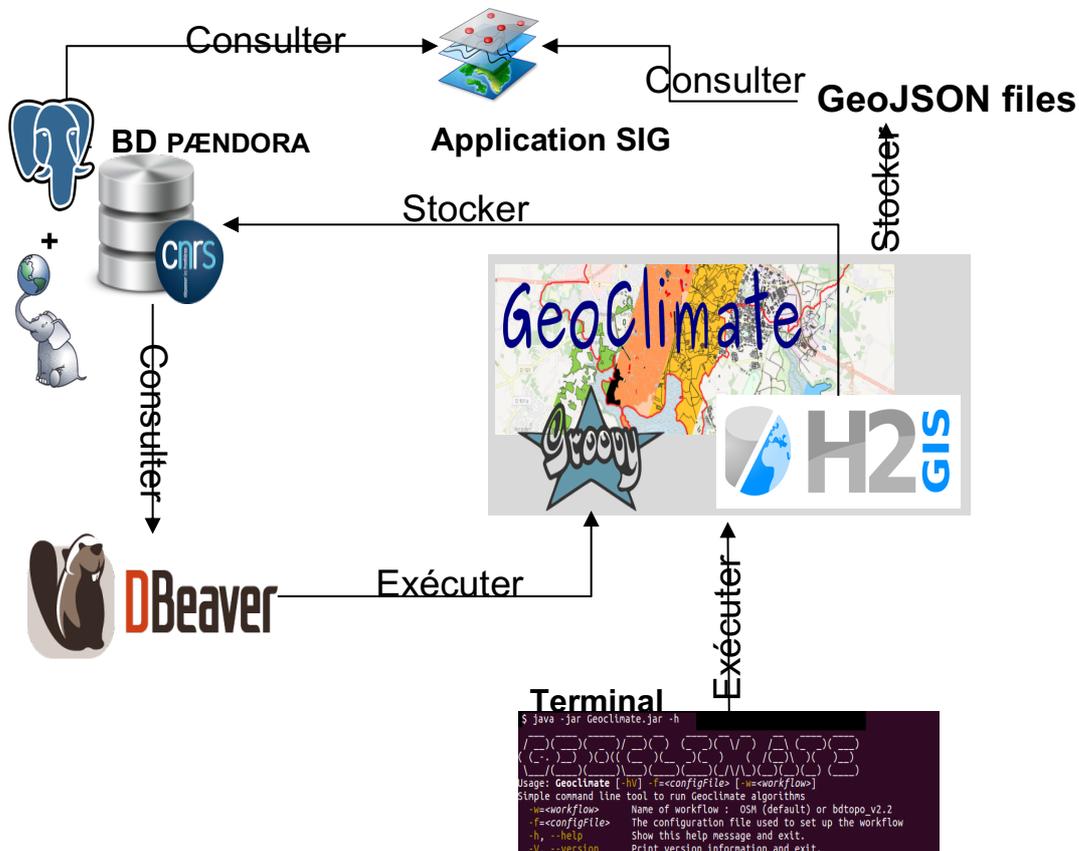


Figure 14 : Architecture du Système d'Information PAENDORA

L'application GeoClimate

GeoClimate est le cœur du Système d'Information. Il s'agit d'un logiciel développé en langage de script Groovy. Pour fonctionner le système d'exploitation doit disposer d'une machine virtuelle JAVA (> 8) ainsi que de l'environnement Groovy. GeoClimate utilise la base de données spatiales H2GIS pour stocker les données qui seront utilisées par ses algorithmes mais également pour réaliser les analyses spatiales nécessaires à la construction des unités spatiales et aux calculs des indicateurs. GeoClimate exploite également la bibliothèque open source de machine learning SMILE⁵ pour construire les modèles d'apprentissage et les appliquer. Les algorithmes de GeoClimate sont décomposés en traitements, objet IProcess de l'API. En conséquence, tous les algorithmes peuvent être utilisés indépendamment.

⁵ <https://haifengl.github.io/> consulté le 02/12/2020



Néanmoins pour faciliter leurs mises en œuvre, ces derniers sont regroupés dans un workflow. Ce workflow est piloté à partir d'un fichier de configuration qui permet en outre :

- De spécifier la source des données d'entrée : fichiers shapefile ou tables dans une base de données PostGIS,
- De préciser via leur code INSEE, la liste des communes qui seront calculés,
- De déclencher une séquence d'opérations propre aux indicateurs que l'utilisateur souhaite calculer,
- De spécifier la destination de stockage des résultats : un dossier avec des fichiers GeoJSON ou des tables dans une base de données PostGIS.

Des exemples de fichiers de configuration sont fournis avec les ressources du logiciel. Pour faciliter la réutilisation des données géographiques produites par GeoClimate, des **fichiers de style cartographique** décrit en suivant le standard international Style Layer Descriptor⁶ sont mis à disposition de l'utilisateur. Ils permettent entre autres de partager les mêmes symboles pour la représentation des LCZ ou encore des classes de typologie urbaine⁷.

Pour déclencher l'exécution du logiciel GeoClimate, l'utilisateur peut :

- Utiliser la console de script de l'application DBEaver,
- Utiliser la console de script de l'environnement Groovy,
- Utiliser l'environnement de commande intégré à GeoClimate.

L'application DBEaver

DBEaver⁸ est un logiciel de bureautique multi-plateformes et open source qui permet de visualiser et de naviguer dans des bases de données. Il supporte les moteurs de bases de données les plus populaires comme MySQL, Access, SQL Server, Oracle, Db2, Firebird, Postgres, Informix, SQLite, MongoDB, Cassandra, Redis, Sybase. Outre la visualisation, DBEaver fournit une console SQL permettant d'interagir avec les données. Les scripts SQL peuvent ensuite être conservés et planifiés en tâches de traitement. Néanmoins DBEaver ne disposant pas de fonctionnalités pour manipuler et surtout représenter les données géographiques, nous avons fait évoluer le logiciel pour **y ajouter un outil de visualisation** basé sur la librairie Leaflet et la bibliothèque de gestion des projections géographiques CTS⁹ que nous développons. La Figure 15 illustre un exemple de visualisation des limites communales pour le département du Morbihan.

⁶ <https://www.ogc.org/standards/sld> consulté le 02/12/2020

⁷ <https://github.com/orbisgis/GeoClimate/tree/master/processingchain/src/main/resources/styles> : styles cartographiques, consulté le 02/12/2020

⁸ <https://dbeaver.io/> consulté le 02/12/2020

⁹ <https://github.com/orbisgis/CTS> consulté le 02/12/2020

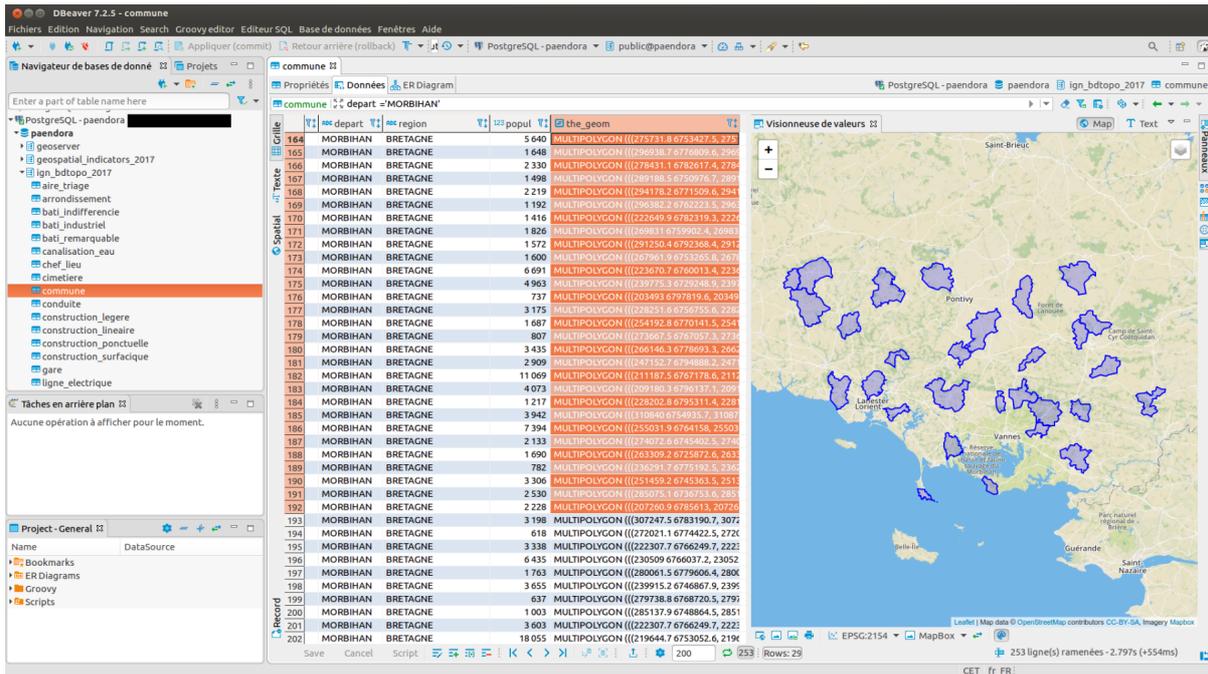


Figure 15 : Visualisation géographique des données de la BD PAENDORA. Sélection de communes dans le département du Morbihan

Une console Groovy (Figure 16) pour piloter l'utilisation des traitements GeoClimate a également été intégrée. Cette console permet d'ajuster dynamiquement les paramètres utilisés par le workflow GeoClimate et ainsi d'élaborer différents scénarios d'extraction et de transformation des données. Grâce au composant spatial, les données produites peuvent être visualisées mais également analysées pour être par exemple croisées avec des données tierces. A noter qu'un environnement de ligne commande permet aussi d'exécuter le workflow de GeoClimate à partir d'un Terminal DOS ou Unix.

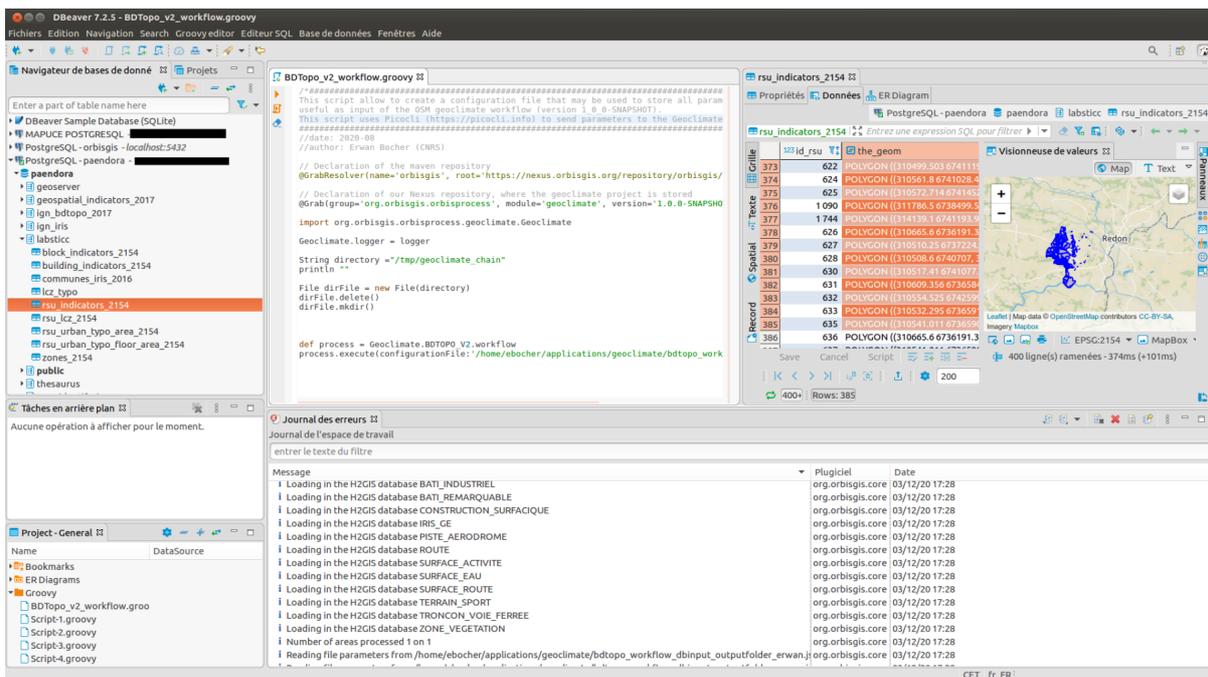


Figure 16 : Console pour exécuter un workflow GeoClimate dans DBeaver

La base de données PÆNDORA

La base de données PÆNDORA collecte l'ensemble des données qui sont produites sur les territoires étudiés. Ainsi, les données sont rassemblées dans des tables uniques (Figure 17) :

- zones : liste des identifiants de communes traitées
- building_indicators : ensemble des indicateurs pour les bâtiments
- block_indicators : ensemble des indicateurs pour les blocs
- rsu_indicators : ensemble des indicateurs pour les USR
- rsu_lcz : types de LCZ par USR
- rsu_urban_typo_area : types de la classification urbaine selon la surface des bâtiments
- rsu_urban_typo_floor_area : types de la classification urbaine selon la surface de plancher des bâtiments

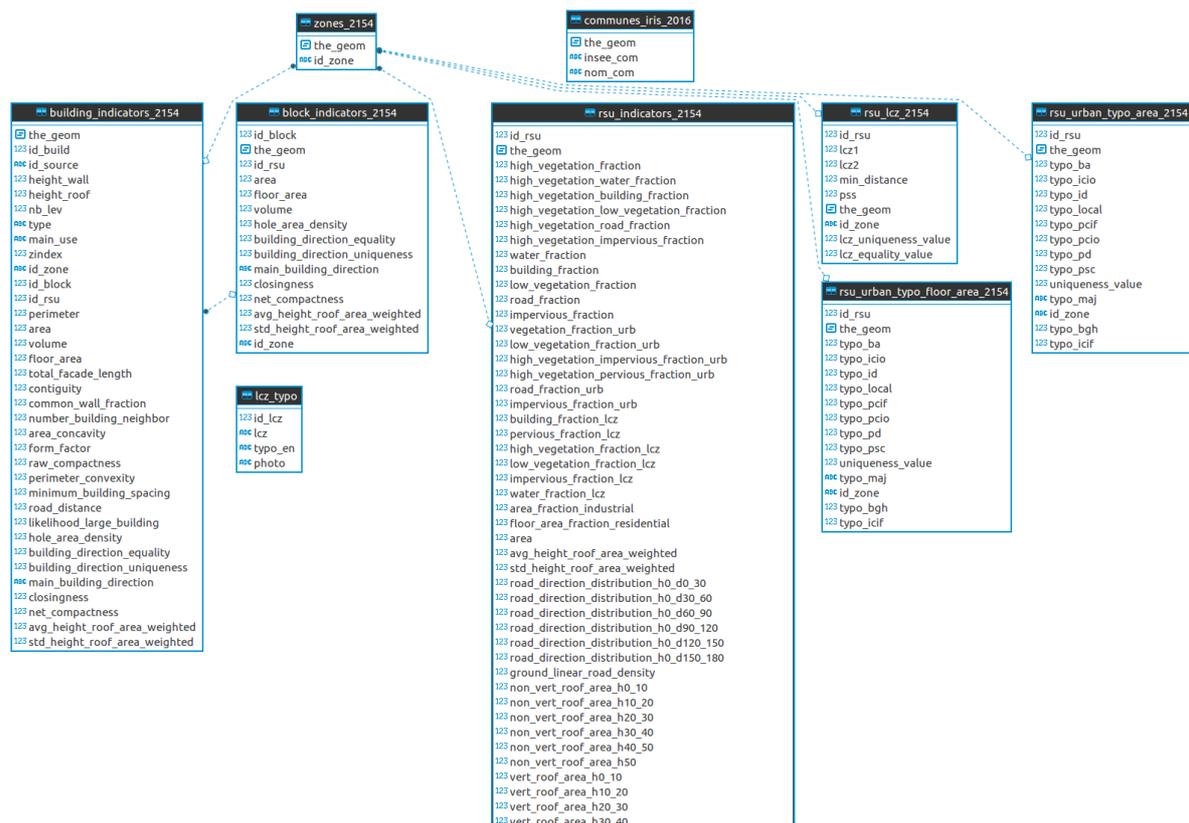


Figure 17 : Schéma d'organisation des tables contenant les résultats des traitements GeoClimate. Le suffixe 2154 fait référence au système de projection utilisé pour la Métropole.

Accès aux données et résultats GeoClimate

Pour des questions de licence, l'accès aux données PAENDORA est réservé aux partenaires du projet qui ont signé l'accord de licence d'utilisation à titre gratuit délivré par l'IGN. Néanmoins, une discussion qui n'a pas encore pu aboutir, a été engagée pour diffuser sous une licence open data les indicateurs et classifications à l'échelle des unités spatiales de référence.

Pour s'affranchir de ces contraintes d'accès et de partage des données, la chaîne GeoClimate a été développée afin de pouvoir fonctionner indépendamment d'une base de données centralisée. En effet, l'utilisateur peut fournir en entrée de GeoClimate un dossier contenant des fichiers shapefile de la BDTopo et configurer le logiciel pour que les résultats soient exportés en format GeoJSON dans un dossier. Ce fonctionnement permet à un service d'utiliser GeoClimate indépendamment du système d'information et facilite ainsi la diffusion des méthodes développées.

La Figure 18 illustre une visualisation de ces fichiers GeoJSON dans le SIG open source QGIS. Les représentations cartographiques exploitent les fichiers de style fournis par GeoClimate.

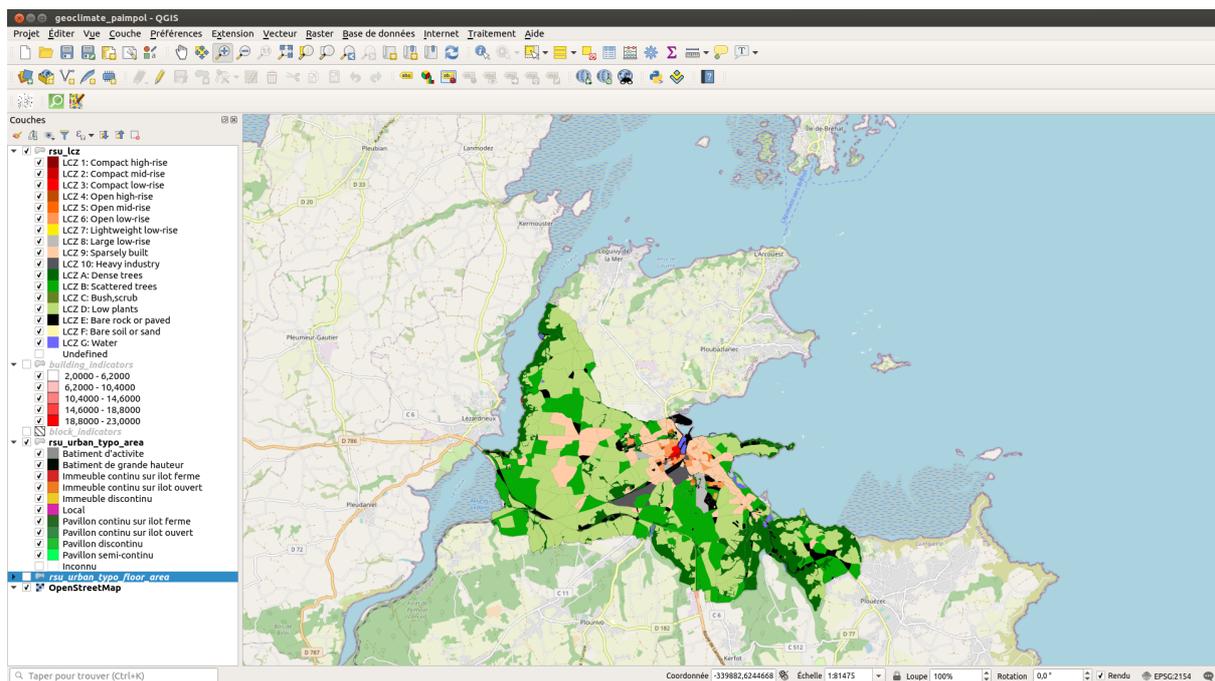


Figure 18 : Exemple de visualisation dans le SIG QGIS des fichiers GeoJSON produits par GeoClimate pour la commune de Paimpol



C.2. Application métier : îlot de chaleur urbain

Les données produites par la chaîne GeoClimate développée pendant PÆNDORA a permis une application métier : une étude de diagnostic de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Cette étude, initialement envisagée sur Toulouse lors de la soumission du projet, a en fait été menée sur un nouveau territoire : l'Eurométropole de Strasbourg.

Ceci a permis :

- De montrer l'application des données à un territoire inconnu des partenaires du projet
- De montrer que ces données sont utilisables par un acteur opérationnel extérieur au projet, cette étude ayant été réalisé par le bureau d'études de Météo-France
- D'avoir des retours critiques constructifs de la part à la fois des ingénieurs du bureau d'étude et de la collectivité sur la validité des données produites, ce qui a permis d'améliorer la chaîne GeoClimate.

Par une délibération en Conseil du 1er mars 2019, L'Eurométropole de Strasbourg (EMS) a acté l'ajout d'un avenant portant sur la santé environnementale à son Contrat Local de Santé (CLS) 2015-2020. De ce contexte ont émergé de nouvelles dynamiques de projet, parmi lesquelles le lancement d'un diagnostic des enjeux liés à la surchauffe urbaine sur l'EMS, mené par Météo-France en 2020.

Cette étude à été menée en s'appuyant sur de la modélisation numérique effectuée à l'aide du modèle de prévision numérique du temps à haute résolution. Tout au long de l'étude, les résultats de modélisation ont pu être évalués en s'appuyant sur les données d'observations récoltés par l'université de Strasbourg (UNISTRA) au cours de plusieurs campagnes de mesures.

Pour cette étude, il a été convenu de sélectionner deux épisodes météorologiques de 8 jours maximum, le premier correspondant à un été caniculaire, et le second à un été avec des valeurs de températures à deux mètres proches des températures normales (par la suite appelé été normal). Le choix des épisodes météorologiques s'est effectué non seulement en tenant compte de ces critères, mais également en s'attachant à sélectionner des périodes couvertes par les observations de l'UNISTRA (Figure 19).

Au vu de ces éléments, les dates retenues sont :

- du **30 juin au 7 juillet 2015** pour l'été caniculaire
- du **25 juin au 2 juillet 2016** pour l'été normal

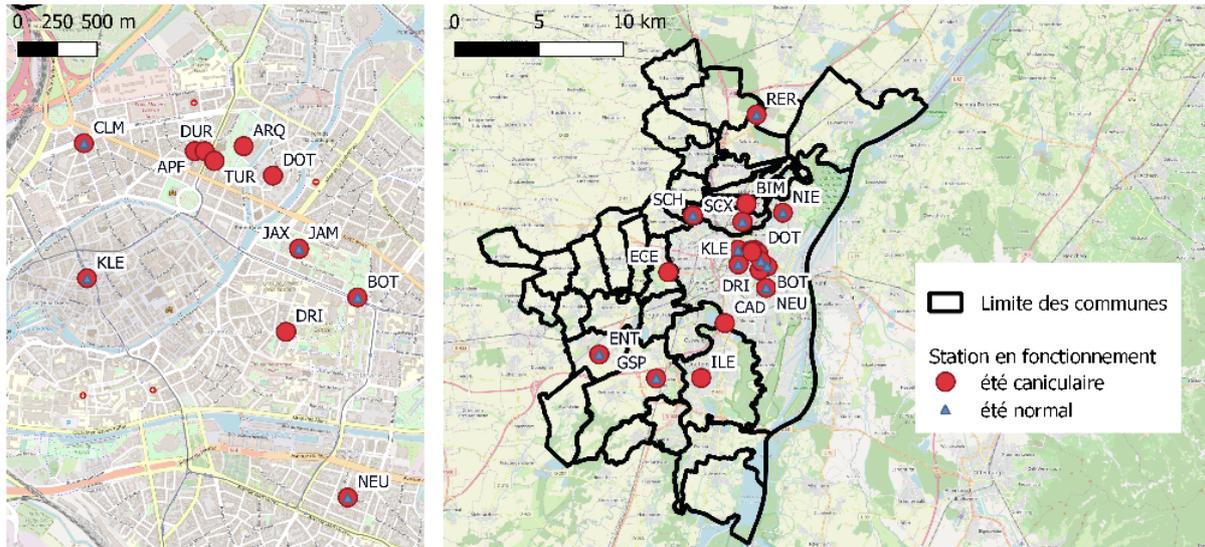


Figure 19 : Emplacement des stations en fonctionnement lors de chaque épisode. Les limites des communes de l'EMS sont affichées en noires. Un zoom sur le centre-ville est proposé sur la figure de gauche.

Les données d'observations utilisées dans cette étude ont été en grande partie récoltées par l'université de Strasbourg au cours de différentes campagnes de mesures visant à mieux documenter le micro-climat urbain. Seule la station de l'aéroport de Strasbourg-Entzheim est opérée par Météo-France. Pour cette étude, on a utilisé principalement les données de températures de l'air à 2m. Des données de flux de chaleur latents et sensibles ont également été exploitées pour analyser précisément les différentes simulations (non montré dans ce rapport).

Dans le cadre de cette étude, les simulations numériques ont été réalisées à l'aide de la plateforme de modélisation CLUE (Climat Urbain Etude), contenant le modèle atmosphérique MesoNH et les modèles de surface détaillés à plus haute résolution SURFEX et TEB (pour la ville). Une description détaillée de cette plateforme est donnée en annexe. Ici, la résolution du modèle de surface est de 250m pour l'étude à l'échelle de la ville et de 100m pour l'étude à l'échelle des quartiers.

Sur le territoire de l'EMS, les données d'occupation du sol ont été produites à l'aide de la chaîne GeoClimate, à partir des données de la BD-Topo v2. La chaîne GeoClimate a permis de produire plus d'une soixantaine d'indicateurs qui décrivent la morphologie urbaine et l'organisation spatiale du tissu urbain. Pour cette étude, on a utilisé les indicateurs produits à l'échelle des Unités Spatiales de Références (USR, échelle du pâté de maison).

En dehors du territoire de l'EMS les données ont été complétées avec la base de données CORINE¹⁰ Land Cover. Cette base de données a été construite à partir d'images satellite à une résolution de 20 m, converties par interprétation humaine en une base vectorielle de polygones de 25 hectares minimum.

¹⁰ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/corine-land-cover-occupation-des-sols-en-france/>



Les résultats de simulations sont encore en cours d'analyse entre Météo-France et l'EuroMétropole de Strasbourg, ce qui fait qu'il n'est pas possible de les décrire dans ce rapport.

Cependant, cette expérience a permis d'avoir de **nombreux retours d'expérience** sur les données elles-mêmes. D'une part, l'ingénieure en charge de la modélisation atmosphérique a pu faire de nombreux retours sur les indicateurs produits et donné des pistes d'adaptation métier vis-à-vis des outils de modélisation utilisés. Par exemple, des indicateurs supplémentaires indiquant les recouvrements entre divers types d'occupation du sol (par exemple la végétation au-dessus des routes) ont été ajoutés.

D'autre part, nous avons pu avoir directement un retour critique sur les paramètres produits par la chaîne GeoClimate de la part de la collectivité, en particulier sur les LCZ. Ceci a permis d'améliorer les calculs, par exemple en rehaussant le seuil au-delà duquel on estime que les bâtiments sont de type grande hauteur, de 20m (utilisé dans la publication initiale de la définition des LCZ par Stewart and Oke 2012) à 30m. Ceci permet d'avoir uniquement de la LCZ2 ('compact midrise') en centre-ville de Strasbourg.

On peut citer par exemple ces commentaires venus de la collectivité de l'Eurométropole lors du processus d'échange avec eux sur la qualité de la base de données :

- « Nous avons pu constater de nettes améliorations par rapport à la version précédente. Néanmoins, quelques interrogations persistent, notamment au niveau du centre-ville. L'hypercentre strasbourgeois apparaît en effet comme étant en grande majorité classé en LCZ 1. Or ce type caractéristique du paysage urbain nord-américain n'est guère présent à Strasbourg, peu de bâtiments assez hauts composant le centre-ville.»
- « Par ailleurs, le type LCZ 7, représentant plus ou moins les "townships", est détecté, alors que notre classification ne le comporte pas. Nous étions également étonnées de la rareté ou de l'absence de certains types comme les LCZ 8 (présents dans la classification MF mais de manière minimale) ou F (absents de la classification MF), davantage présents dans la classification Icube.» (la classification Icube a été produite à partir de l'analyse subjective d'image satellite par un étudiant de l'université).
- « Enfin, certains parcs urbains ne semblent pas être reconnus comme tels et apparaissent sous des types relevant d'espaces minéralisés/bâtis (LCZ 9 ou E). »

Les résultats décrits dans ce chapitre ont été formalisés dans les livrables suivants :

Livable	Forme	Accès
un portail cartographique permettant d'accéder aux résultats du projet	Développement intégré à l'outil libre Dbeaver + base de données centralisée PostGIS	https://dbeaver.io/
un SIG open source autonome et personnalisé avec les outils de la chaîne de traitements	Développement intégré à l'outil libre Dbeaver, base de données centralisée PostGIS, outil GeoClimate autonome	https://dbeaver.io/
une documentation utilisateur	Documentation	https://github.com/orbisgis/GeoClimate
rapport d'analyse de divers scénarios urbains et climatique sur l'îlot de chaleur urbain et les consommation d'énergie de Toulouse	Rapport d'étude faite sur l'EuroMétropole de Strasbourg	Non encore public. Action de partenariat en cours avec l'EuroMétropole
Visualisation sous forme de cartes de ces résultats sous SIG.	Cartes sous format SIG	Non encore public. Action de partenariat en cours avec l'EuroMétropole

D. Méthodologies et outils pour l'adaptation climatique des villes

D.1. Outils cartographiques spécifiques d'analyse et d'opérationnalisation des enjeux climat-énergie dans la planification urbaine

a. Présentation des « types de temps sensible »

Les travaux menés dans PÆNDORA proposent une méthode de **classification des situations météorologiques locales** (nommées ici **types de temps sensibles** car ils font référence à ce qu'on appelle en météorologie *le temps sensible*, c'est à dire qu'il est possible d'en faire l'expérience) pour faciliter l'analyse et la communication d'informations climatiques. Le potentiel de cette approche a été démontré dans le domaine de la climatologie urbaine, mais elle peut également être utilisée dans d'autres domaines d'étude de la climatologie pour lesquels une description fine des conditions climatiques locales est nécessaire (comme dans les études d'impact du changement climatique ou l'hydrologie par exemple). Cette approche est décrite dans un article de référence que nous avons publié dans la revue PLOS One (Hidalgo and Jouglu 2018), qui a été désignée par les éditeurs de la revue « article du mois » de la section de Sciences du Climat en janvier 2019. Un résumé a été relayé dans la Newsletter n°72¹¹ de l'International Association for Urban Climate et sur le site de l'INSHS¹².

Dans l'article cité, les types de temps sensibles qui expliquent la pluralité des situations météorologiques auxquelles font face les Toulousains sont présentés en profondeur. Cette information est ensuite utilisée sur trois types d'applications :

- Pour montrer le bénéfice de baser les analyses climatiques sur des approches par types de temps sensibles individuels et non uniquement sur des indicateurs climatiques classiques comme les moyennes mensuelles, saisonnières ou annuelles qui gommant les spécificités des situations individuelles ;
- Pour explorer l'impact des projections climatiques futures en termes de fréquence et d'intensité de ces situations météorologiques ;
- Comme support à la communication visant à faciliter la prise en compte des enjeux climatiques locaux dans les pratiques de planification urbaine.

La méthode de classification proposée a été développée dans un script en langage R et mise à disposition en Open Source dans la section d'information complémentaire de l'article. La méthodologie prend appui sur la méthode de classification que nous avons préalablement proposée en 2014. L'objectif à l'époque était de contourner des limites de puissance de calcul informatique lors d'études de modélisation d'impact du changement climatique à des échelles spatiales fines (Hidalgo et al. 2014).

¹¹ <http://www.urban-climate.org/wp-content/uploads/IAUC072.pdf>

¹² <https://inshs.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/mieux-comprendre-le-climat-urbain-par-une-analyse-fine-des-situations-meteorologiques>

En termes d'innovation, la méthode est ici **remobilisée** pour montrer son potentiel d'utilisation dans les études climatiques à l'échelle locale et en particulier dans la communication envers les acteurs territoriaux. À l'heure où l'appropriation par ces acteurs des enjeux climatiques sur leur territoire présente un vrai enjeu vis-à-vis de la mise en œuvre de politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, ce type d'approche permet de produire une information climatique plus facilement appropriable et intuitive. Ceci permet d'identifier les types de situations météorologiques à enjeu (par exemple celles favorisant la formation d'un îlot de chaleur urbain nocturne) et de les suivre sur les projections climatiques futures afin de mettre en place les mesures d'adaptation adéquates.

En termes d'applicabilité, cette méthode de classification a été appliquée et documentée à travers des **fiches de synthèse**, sur une **cinquantaine de villes** du territoire métropolitain français dans le cadre du projet PÆNDORA (Figure 20).



Figure 20 : à gauche : article descriptif de la méthode ; à droite : exemple de fiche climatique locale en types de temps sensibles pour la ville de Tours.

b. Construction d'un indicateur spatialisé d'ICU d'été utilisable en collectivité

Cette méthodologie en type de temps a été exploitée pour déterminer, indépendamment pour 42 villes (Figure 21), des journées passées correspondant à un type de temps sensible d'été avec vent faible et fort ensoleillement. Ces conditions météorologiques sont en effet favorables à l'établissement d'un fort îlot de chaleur. Il est à noter que ces journées sont différentes pour chacune des villes, puisque les conditions météorologiques varient d'un endroit à l'autre sur le territoire français. La méthode en type de temps sensible permet donc de se focaliser sur les conditions localement pertinentes.

Pour chaque ville, 6 journées ont été identifiées, et pour chacune, une simulation météorologique a été réalisée avec le modèle météorologique MesoNH (aussi utilisé dans l'étude sur l'Eurométropole de Strasbourg, cf ci-dessus), couplé au modèle TEB. Dus à des contraintes de calendrier et de disponibilité des données en début de projet, ce sont les données urbaines issues du projet MAPUCE qui ont été utilisées pour décrire le tissu urbain de chacune des villes.

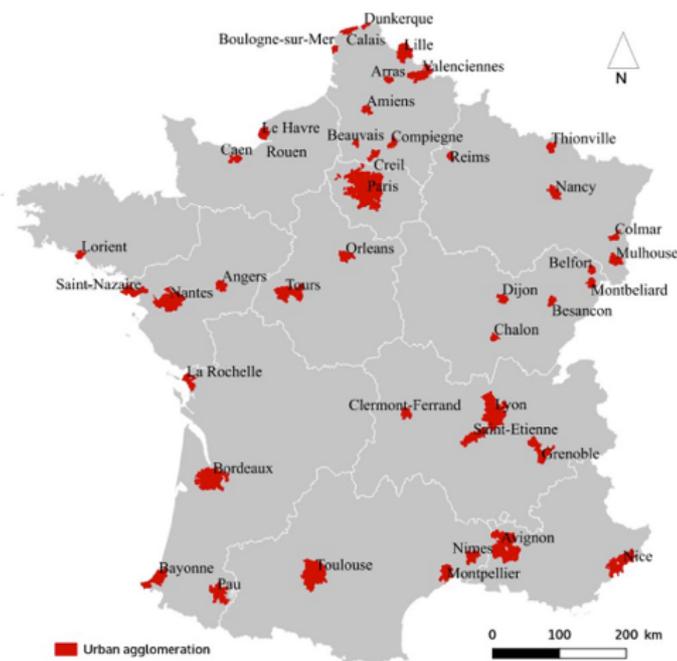


Figure 21: les 42 villes sur lesquelles a été simulé l'îlot de chaleur urbain pour la construction d'un modèle statistique spatialisé.

A partir des simulations, a été construit un modèle statistique simple permettant d'estimer un **îlot de chaleur typique de nuit d'été chaude sur l'ensemble de chaque agglomération**. Une relation explicite permet de calculer l'ICU en tout point de l'agglomération, en prenant en compte en entrée 5 indicateurs :

- des indicateurs régionaux (*type de climat, distance à la côte*),
- liés à l'agglomération dans son ensemble (*population*),
- et spatialisés sur l'agglomération (*distance au centre, carte des LCZ*)

La méthodologie pour obtenir cette relation explicite n'utilise que des indicateurs facilement connus des agences (*type de climat, distance à la côte population, centre de l'agglomération*)

ou produits par le projet et recalculables en agence (carte des LCZ). La formule de calcul est donnée ci-après (Figure 22, cf Gardes et al 2020 pour le détail de chaque terme).

$$UHII(RSU) = [-4.1 + 0.58 \ln(\text{Pop}(UA(RSU)))]$$

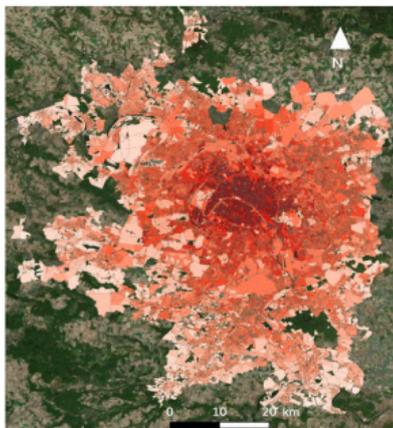
$$\frac{[1.2 + 0.92 \ln(\text{DIST}_{Coast}(UA(RSU)))]}{1.2 + 0.92 \ln(10)} [\Delta UHII C_{max}^{CR}(UA(RSU))]$$

$$\left[C_{1,LCZ(RSU)}^{centre} \exp\left(-C_{2,LCZ(RSU)}^{centre} \text{DISTN}^2(RSU)\right) \right] + \Delta UHII^{LCZ}(RSU)$$

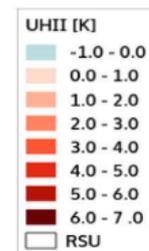
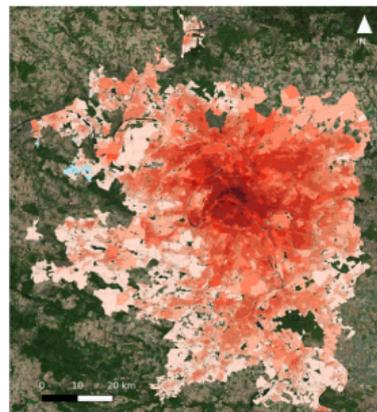
Figure 22 : formule de calcul de l'indicateur ICU d'été (cf Gardes et al 2020)

Les cartes d'ICU de nuit d'été chaude produites en utilisant cette formule très simple donnent des résultats tout à fait acceptables (Figure 23). Évidemment, elles ne permettent que d'avoir une première estimation de l'ICU et de son étendue spatiale, celle-ci pouvant être modulée selon la journée, par exemple à cause de la direction du vent ou de la couverture nuageuse, même faible.

(a) Regression-based model



(b) Meso-NH-TEB



(c) Error of the regression-based model

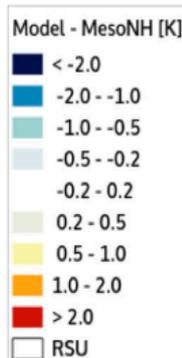
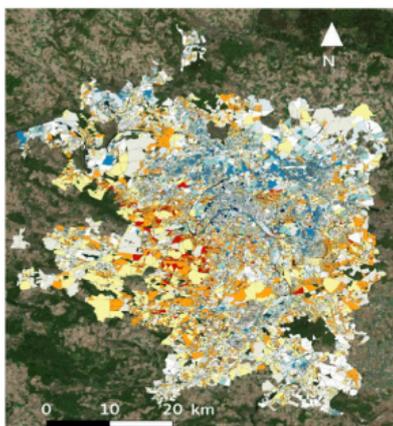


Figure 23 : ICU sur Paris estimé par : a) : modèle statistique simple, b) simulation atmosphérique à 250 m de résolution. C) : erreur du modèle statistique par rapport à la simulation atmosphérique (Gardes et al 2020).



c. Cartes climatiques urbaines

Depuis près de trois décennies, des chercheurs en climatologie urbaine se sont lancés – souvent en partenariat avec les acteurs de l'urbanisme- dans l'élaboration de cartographies climatiques permettant d'enrichir le volet environnemental du diagnostic territorial et de guider, aux côtés d'autres éléments bien sûr, le processus de planification. Bien que d'appellations hétérogènes en fonction des pays et des échelles mobilisées, ces initiatives tendent aujourd'hui à converger autour de la dénomination générique *Urban Climatic Map (UC-Map)*, laquelle est composée d'une *Urban Climatic Analysis Map (UC-AnMap)* et d'une *Urban Climatic Planning Recommendation Map (UC-ReMap)* (Ng and Chao, 2015). Les travaux développés s'inspirent de cette lignée de travaux internationaux, avec un souci d'adaptation au cadre juridique et praxéologique français.

Les cartes climatiques représentent donc à la fois un **outil de diagnostic microclimatique du territoire urbain** et un **levier potentiel de traduction réglementaire** ultérieure des enjeux identifiés. Cet outil est ainsi composé de deux niveaux d'information :

- le premier est celui du diagnostic microclimatique qui rassemble des informations sur la météorologie, l'occupation des sols, la topographie et la végétation, dont les interrelations et les effets sur les vents et le confort thermique sont analysés et évalués spatialement. Ce diagnostic est basé sur un ensemble de cartes, appelées couramment « **cartes d'analyse** », et croisé avec d'autres éléments de la planification (TVB, zonage, etc.).

Les cartes d'analyse doivent permettre d'identifier un certain nombre de zones à enjeu d'un point de vue :

- Thermique (typologies des zones urbaines en fonction de leur densité ou structure urbanistique, espaces thermorégulateurs comme les masses d'eau et de végétation, zones commerciales et ou d'activité souvent très minéralisées et avec un fort recours à la climatisation, et zones de transition)
- Aéraulique (les couloirs de vent prédominants, les zones génératrices de brises de pente, les zones de production d'air frais - végétation, eau par exemple - ou chaud - très minéralisées ou avec recours à la climatisation par exemple - et les zones qui font obstacle au vent).

- le deuxième niveau d'information, normalement retranscrit via une « **carte de recommandations** », doit permettre une traduction des orientations stratégiques générales et pratiques en matière d'urbanisme pour améliorer l'environnement thermique et éolien sur la base des cartes d'analyse et des contraintes urbanistiques et socio-culturelles.

La volonté du projet PÆNDORA de proposer des données et des outils qui permettent d'améliorer la mise en œuvre de politiques locales d'économies d'énergie et de gestion du climat urbain dans une démarche méthodologique générique applicable à l'échelle nationale doit être ici nuancée. Les programmes et mesures de gestion et d'adaptation climatiques qui seront à mettre en place dans les années à venir doivent être évidemment adaptés à la réalité de chaque terrain et co-produits avec les acteurs locaux. Une certaine **généricité** est ici donc recherchée principalement à travers les aspects techniques concernant les méthodes, les outils de traduction et de visualisation des données climatiques de la sphère des producteurs de données (chercheurs et bureaux d'études) vers la sphère opérationnelle.

Le projet a donc visé à proposer **une méthode de calcul et d'une sémiologie graphique des informations climatiques et urbanistiques** pour les cartes climatiques pour la planification urbaine.

Cette action a été menée via 3 ateliers géo-visu (Figure 24), qui ont été dédiés à la discussion sur les représentations graphiques pour les cartes climatiques urbaines. Ces ateliers ont mobilisé un groupe national de cartographes et de géomaticiens (une quinzaine d'assistants par atelier issus de 6 laboratoires, de l'agence d'urbanisme et de Toulouse Métropole) afin de produire un référentiel cartographique pour l'élaboration de ces cartes. Les réflexions ont porté à la fois sur les méthodes de visualisation et de représentation cartographique (Figure 25).



Atelier 1 : Cartographier le climat à l'échelle urbaine avec une visée opérationnelle en urbanisme, Mardi 20 nov. 2018

Atelier 2 : Croiser des données micro-climatiques et des données socio-économiques, Mardi 5 fev. 2019

Atelier 3 : Sémiotique, Mardi 12 mars 2019

Figure 24 : calendrier des 3 ateliers géo-visu organisés sur la représentation graphique des cartes climatiques urbaines.

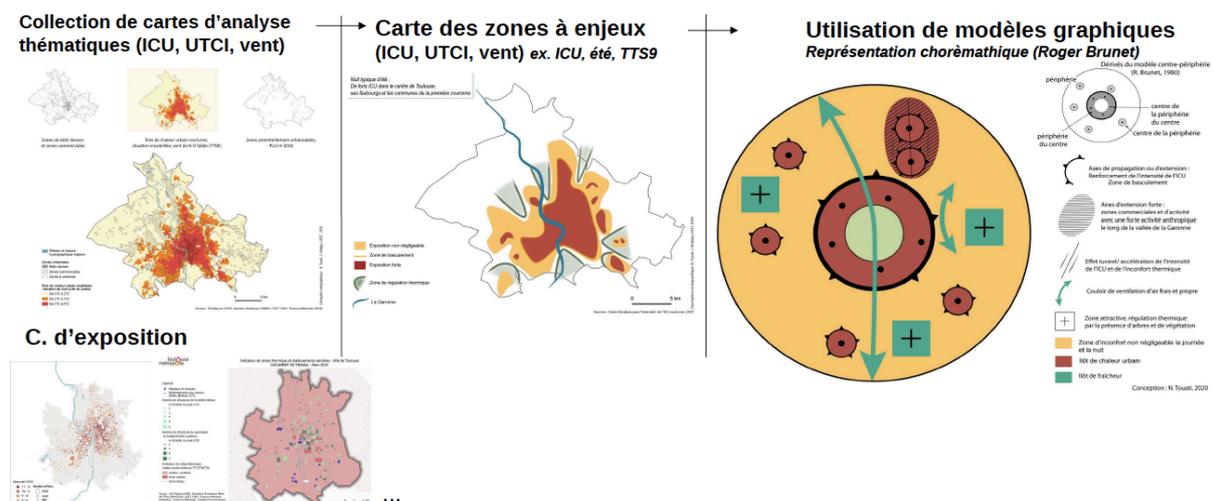


Figure 25 : méthodologie de représentation cartographique des informations Climatiques et urbanistiques : des données spatialisées micro-climatiques aux représentations chorématiques.



D.2. Accompagner l'intégration des enjeux adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme

a) Présentation de la méthodologie

« Bien que légalement consacré (Article L. 101-2 7° du code de l'urbanisme), l'adaptation revêt un caractère encore peu visible dans les documents d'urbanisme, et ce pour plusieurs raisons : transversalité et complexité du sujet, montée récente de l'ingénierie climatique chez les praticiens de l'urbain, besoin de méthodes et d'approches urbaines du climat qui s'intègrent dans les modes de faire de la planification, difficulté de transposition des démarches de PCAET (Plans Climat Air Énergie Territoriaux) dans les documents d'urbanisme... ». Ces conclusions du rapport du projet MApUCE montrent bien l'étendue de l'enjeu lié à la mise en œuvre de l'adaptation au changement climatique des villes.

Nous sommes donc partis de l'hypothèse que **donner du sens à la connaissance en matière d'adaptation, c'est avant tout utiliser les données et les outils d'analyse climatiques dans une visée de planification urbaine ou territoriale**. Ainsi, si le projet MApUCE a permis d'accompagner une montée en compétence des expertises climatiques auprès des acteurs de l'urbanisme, le projet PÆNDORA s'appuiera ici sur l'expertise urbaine des praticiens. La démarche s'inverse en quelque sorte, puisqu'il s'agira de partir des pratiques d'élaboration des documents d'urbanisme (i.e. phases et étapes d'élaboration d'un document d'urbanisme), afin de proposer une intégration optimisée des enjeux d'adaptation aux changements climatiques dans les démarches de planification. On peut alors parler de "climatiser" les pratiques de planification urbaine. En retour, approcher l'aménagement des territoires par le prisme de l'adaptation représente une véritable opportunité pour les exercices de planification locale.

Le projet PÆNDORA a ainsi reposé sur l'élaboration de méthodologies d'accompagnement, techniques et pédagogiques, qui dotent les acteurs de la planification d'une culture opérationnelle de l'adaptation. **Nous avons pour cela élaboré une démarche itérative à deux niveaux**. La démarche s'est appuyée sur une analyse des pratiques de planification actuelles (revue de littérature, entretiens, retours d'experts) aboutissant à un guide technique (le kit des données clés de l'adaptation) mais aussi à un exercice de PLUi « augmenté » de Toulouse Métropole. Ces deux démarches se répondent : le Kit offre un cadre de référence pour expérimenter le PLUi « augmenté », les résultats du PLUi « augmenté » nourrissant les modalités de montée en généralité du Kit.

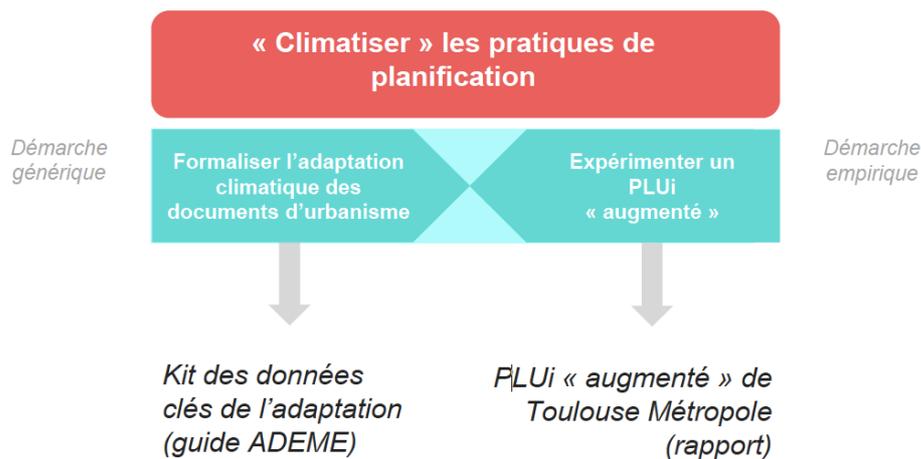


Figure 26 : Double approche d'analyse pour « climatiser » les pratiques de planification.

b) Le Kit des données clés de l'adaptation

Objectifs du guide

Le Kit des données clés de l'adaptation, publié sous le format d'un guide ADEME en octobre 2020 (Figure 27), offre une vision des pratiques de planification actuelles et des méthodologies d'accompagnement.

Une analyse des programmes de recherche sur les questions d'adaptation des territoires urbains (MApUCE, ABSTRACT, ADAPTERR...) et une analyse des documents de planification existants sur le cas d'étude de la métropole toulousaine (PLUi et PCAET de Toulouse Métropole) ont souligné la difficulté de saisir une vision globale sur le sujet adaptation (un terme peu employé, peu décrit comparé à l'atténuation notamment, une focalisation sur un aléa climatique l'ICU), en particulier dans le diagnostic.

Deux méthodologies d'accompagnement ont été développées pour répondre à cette difficulté : 1) Doter les acteurs de la planification d'une vraie culture opérationnelle de l'adaptation au-delà des chargés PCAET (aide à la collecte et interprétation des données climatiques), 2) Montrer comment la question de l'adaptation peut « bonifier » le diagnostic dans les documents d'urbanisme (aide à la formalisation et cohérence du diagnostic territorial « adapté »).

Le Kit des données clés de l'adaptation a ainsi pour but d'aider à repérer quelles sont les données majeures à retenir pour intégrer l'enjeu de l'adaptation climatique dans le cadre d'un exercice de planification. Il ne s'agit donc pas simplement d'un cahier des charges des types de données à prendre en compte, mais aussi d'une mise en récit des données climatiques, afin de traduire ce que signifie l'adaptation d'un territoire au changement climatique, dans un exercice de planification. **Le Kit des données clés de l'adaptation est donc à la fois un support technique (sources, outils, méthodes) et pédagogique (sens, récit, image).**



Figure 27 : guide méthodologique ADEME publié en octobre 2020 produit par le projet PÆNDORA

Dégager une vision locale de l'adaptation à travers deux champs de données

Le Kit des données clés de l'adaptation met l'accent sur deux champs de données (Figure 28):

- Les données qui brosent un portrait et les perspectives climatiques d'un territoire. Le but est ici de dégager une vision du changement climatique à l'échelle locale afin d'anticiper ses effets sur le territoire (« **s'adapter** ») ;
- Les données qui soulignent les impacts potentiels du changement climatique sur le territoire. Il s'agit là de signifier si le territoire est suffisamment préparé à faire face au changement climatique (« **être adapté** »).

Ces deux champs renvoient ainsi aux deux dimensions de l'adaptation au changement climatique : « s'adapter » ou « être adapté » (Simonet, 2009). En paraphrasant la définition du GIEC de 2007, l'adaptation de l'aménagement des territoires au changement climatique désigne l'ajustement et la transformation des systèmes urbains aux aléas climatiques réels

ou prévus (ou à leurs effets), afin d'en atténuer les inconvénients ou d'en exploiter les avantages. Cette définition rejoint les nouvelles approches et méthodes de planification en faveur d'un urbanisme plus intégré, évolutif et réversible.

La planification de l'adaptation incite en effet à penser la vulnérabilité des villes non pas comme un risque extérieur à elles, mais bien comme une propriété intrinsèque de l'urbain. La planification consiste alors moins à maîtriser ou prévoir les effets du changement climatique sur la ville, que de les anticiper activement en préparant la ville à « faire avec » et à innover en transformant nos modèles urbains. À rebours de la solution toute faite ou du « prêt à aménager », cette approche implique des mesures d'adaptation plurielles, interconnectées et territorialisées. Elle invite à revisiter notre vision de l'aménagement des territoires, en s'appuyant sur des principes de coexistence et de synergie des dynamiques urbaines et environnementales. Dit autrement, l'intérêt de la planification de l'adaptation au changement climatique réside notamment dans sa capacité à lier préservation des ressources (eau, air, sol, biodiversité...) et développement socio-économique (diversité des fonctions, mixité sociale, qualité urbaine...).

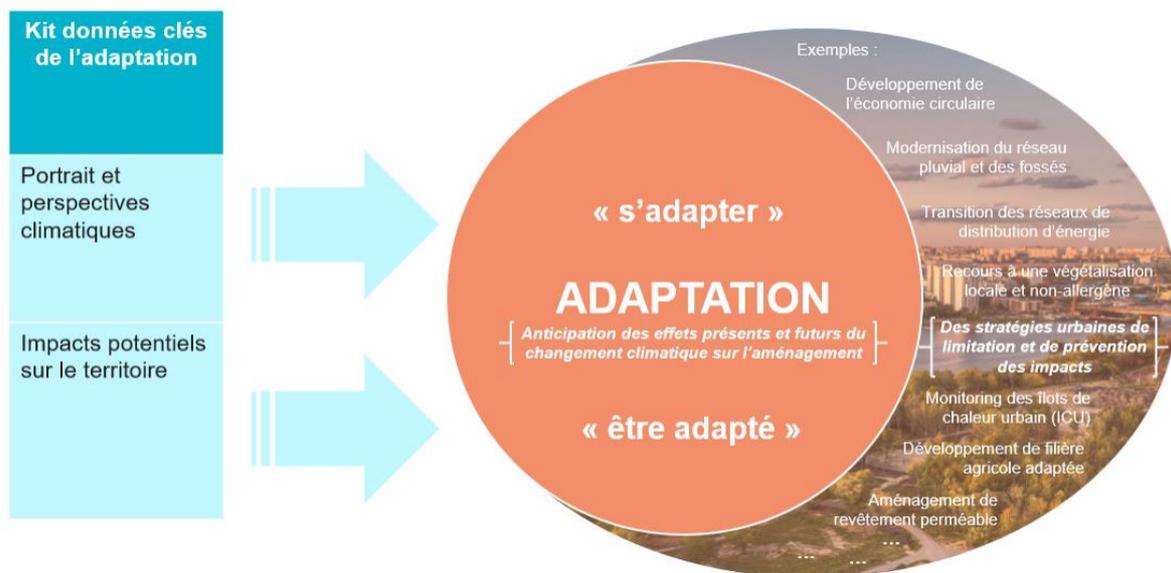


Figure 28 : Le Kit des données clés de l'adaptation : une manière de qualifier les mesures d'adaptation dans les documents d'urbanisme

Grille de lecture du guide

Au sein de ce guide, des questions repères accompagnent l'identification et la qualité de traitement des données de l'adaptation (Figure 29). Elles visent une juste précision (ni trop, ni pas assez) et un regard critique (cohérence et marge de manœuvre) des données mobilisées, en faveur d'une vision compréhensible et proactive de l'adaptation. De cette manière, les questions repères permettent d'accompagner les acteurs de la planification depuis la collecte et l'interprétation des données de l'adaptation au changement climatique jusqu'à la réalisation d'un diagnostic territorial intégré. Enfin, l'avantage des questions repères du Kit est de fournir un mode d'emploi simple et adaptable : elles peuvent guider une lecture soit complète du document, soit ciblée en fonction des besoins des praticiens de l'urbanisme.

Kit données clés de l'adaptation	Questions repères pour la planification			
	Quoi ?	Dans quel but ?	Comment ?	Pour quelle cohérence ?
Portrait et perspectives climatiques « s'adapter »	Contexte climatique local Évolution passée Évolution future Aléas climatiques	Dégager une vision dynamique du climat au niveau local Partager et débattre collectivement des effets du changement climatique	Sources Outils et méthodes employées	Cohérence externe du document (articulation des plans et programmes) Cohérence interne du document (état initial de l'environnement et diagnostic socio-économique)
Impacts potentiels sur le territoire « être adapté »	Exposition aux aléas Sensibilité aux aléas Capacité d'adaptation	Identifier les vulnérabilités majeures du territoire Articuler sol et climat		

Des données de l'adaptation au changement climatique ... au diagnostic intégré dans les documents d'urbanisme

Figure 29 : La grille de lecture du Kit des données de l'adaptation

c) L'exercice de PLUi "augmenté"

Objectifs et méthode

Le PLUi « augmenté » a consisté en un exercice fictif de planification qui permettait d'expérimenter une intégration optimale de l'adaptation au changement climatique dans les documents d'urbanisme locaux toulousains.

Cet exercice a répondu à un triple objectif :

- Tester de nouvelles méthodes d'accompagnement, qui appuient la structuration d'un diagnostic sur l'adaptation des territoires au changement climatique dans un document d'urbanisme ;
- Profiter du retour d'expérience toulousain, en valorisant les données produites sur la métropole (projets MApUCE et PÆNDORA, PLUi-H et PCAET de 2019...) à travers de nouvelles manières de les présenter ;
- Anticiper la révision du PLUi-H de 2019, en se dégageant des contraintes de concordance des calendriers de la recherche et de la planification urbaine.

Au vu de l'expertise climatique de la métropole toulousaine, l'exercice de PLUi « augmenté » n'a pas cherché la réalisation d'un document complet mais appuyait la réalisation d'un diagnostic territorial "adapté". Il ne s'agissait pas non plus d'un diagnostic de vulnérabilité, mais bien d'un appui au futur PLUi de Toulouse Métropole, en ciblant les sujets où l'accompagnement de la métropole était le plus pertinent. Cet accompagnement était à la fois technique (hiérarchisation des données climatiques, articulation et cohérence des différentes pièces des documents d'urbanisme) et pédagogique ou processuel (acculturation, portage, transversalité).

La méthode s'est basée sur une participation des acteurs toulousains à partir de propositions méthodologiques du Kit des données clés de l'adaptation :

- À travers des ateliers dématérialisés (contexte COVID oblige), en groupe resserré (réunion de travail), dont le but était de profiter de retours de techniciens de Toulouse Métropole ;
- Alimentées par des entretiens avec différents acteurs de l'urbain (agence d'urbanisme, services de l'État, climatologue de l'urbain, services métropolitains, géomaticiens...).

Ainsi, l'exercice de PLUi « augmenté » de Toulouse Métropole a expérimenté ici les points suivants du Kit des données clés de l'adaptation (Figure 30) :

- Les aléas climatiques, i.e. cerner les aléas climatiques majeurs sur Toulouse Métropole au-delà de l'îlot de Chaleur Urbain (ICU), jusque-là abordé dans le PLUi-H de 2019 ;
- Les outils et méthodes, à travers un focus sur les cartographies des aléas climatiques à disposition sur Toulouse Métropole et un focus sur une proposition de matrice de vulnérabilité ;
- La cohérence interne du document, en proposant des manières d'améliorer l'articulation entre diagnostic et EIE au travers de la question de l'adaptation au changement climatique.

Kit données clés de l'adaptation	Questions repères			
	Quoi?	Dans quel but?	Comment?	Pour quelle cohérence?
Portrait et perspectives climatiques	Contexte climatique local Évolution passée Évolution future Aléas climatiques	Dégager une vision dynamique du climat au niveau local	Sources	Cohérence externe du document
Impacts potentiels sur le territoire	Exposition aux aléas Sensibilité aux aléas Capacité d'adaptation	Identifier les vulnérabilités majeures du territoire	Outils et méthodes employées	Cohérence interne du document

Éléments testés sur le PLUi « augmenté » de Toulouse Métropole

Figure 30 : points du kit expérimenté dans l'exercice de "PLUi augmenté"

Résultats

Les résultats principaux ont apporté un éclairage local des approches urbaines du climat : approche géographique des aléas climatiques, valorisation des cartes climatiques de l'urbain, articulation état initial de l'environnement et diagnostic socio-économique à partir du fil conducteur de l'adaptation au changement climatique.

Une vision des recommandations sur chacun de ces domaines est synthétisée sur la Figure 31, sur les données et les méthodes pour intégrer l'adaptation dans le processus de diagnostic.

SYNTHÈSE DONNÉES ET OUTILS « AUGMENTÉS »	
Apports du PLU-i « augmenté »	Recommandations pour le futur PLUi de TM
<ul style="list-style-type: none"> - Une approche géographique des aléas climatiques adaptée au diagnostic des documents de planification - Des cartographies de l'aléa ICU (de nuit) mais aussi de l'aléa stress thermique (en journée) - Un outil de dialogue systémique sur la vulnérabilité face au changement climatique : la matrice de vulnérabilité thématique 	<ul style="list-style-type: none"> - Recenser les cartographies à disposition au sein des services illustrant l'adaptation du territoire toulousain au changement climatique - Intégrer la réalisation d'une matrice de vulnérabilité globale dans le cahier des charges du plan d'adaptation de Toulouse Métropole (le diagnostic du futur PLUi se basant sur les enjeux urbanistiques liés au climat les plus saillants).
SYNTHÈSE DIAGNOSTIC « AUGMENTÉ »	
Apports du PLU-i « augmenté »	Recommandations pour le futur PLUi de TM
<p>Deux propositions d'articulation « optimisée » entre EIE et diagnostic socio-économique :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Deux mises en récits de l'adaptation du territoire toulousain au changement climatique - Une proposition de gouvernance nouvelle - Une alerte commune : l'importance des synthèses 	<ul style="list-style-type: none"> - Engager un chantier pour le renouveau d'une étape de diagnostic support de débat collectif et de projet partagé

Figure 31 : synthèse des outils et méthodes expérimentés dans l'exercice de "PLUi augmenté"



Pour plus d'information, les détails des travaux du chapitre C sont disponibles sous la forme suivante :

Livrable	Forme	Accès
Guide méthodologique pour le développement et l'usage des Cartes Climatiques de l'Environnement Urbain en fonction du contexte territorial.	50 fiches micro-climatiques des villes 3 articles (fr, en) Organisation de 3 ateliers sur la représentation cartographique	Public sur demande, mise en ligne prévue Public Non public
Exemple d'application sur d'exercices de planification théoriques et pistes méthodologiques plus générales d'utilisation dans le cadre législatif français.	Publication sous forme de Guide ADEME Rapport Toulouse Métropole Article	https://www.ademe.fr/kit-donnees-cles-ladaptation Non public En cours



E. Pratiques et veilles dans les agences d'urbanisme

E.1. Quelles pratiques aujourd'hui dans les agences ? Quelles limites identifiées ? Quelles attentes ?

a) Méthodologie de l'enquête

L'enquête réalisée en 2015, dans le cadre du projet MApUCE, a créé l'opportunité d'écouter les agences d'urbanisme françaises à deux niveaux :

- Un témoignage sur les modalités et les niveaux de prise en compte et d'intégration « pratique » des problématiques énergétiques et climatiques dans les documents d'urbanisme dont elles assurent le pilotage ou la maîtrise d'œuvre ;
- L'expression des attentes en la matière et l'identification des marges de progrès envisageables, en termes d'approches, d'outils, d'indicateurs, de compétences à acquérir, de partenariats à établir...

2005 marque ainsi un tournant dans l'engagement des agences d'urbanisme sur les problématiques énergie-climat : l'évolution du contexte législatif, le déroulement d'événements caniculaires, l'apparition d'outils ont aidé à la prise de conscience sur ces sujets et à leur nécessaire prise en considération dans les réflexions en aménagement du territoire.

L'engagement de ces acteurs de l'urbanisme résulte de différents contextes : la création de nouveaux partenariats locaux (INSEE, ADEME, DREAL, AASQA, ALEC, bureaux d'études...), l'implication dans des travaux de recherche et prospective, l'intégration de nouveaux enjeux de développement durable, et surtout l'évolution du cadre législatif et ses incidences sur les exercices de planification.

Les agences d'urbanisme s'impliquent individuellement sur ces problématiques, principalement à travers les démarches territoriales de SCoT ou PLU/PLUi qu'elles accompagnent largement, et notamment le processus d'évaluation environnementale qui leur est associé. Les réflexions sectorielles (PCAET, Bilan Carbone, Eco-Cité, démarche AEU...) sont globalement moins investies.

Le développement des axes stratégiques énergie-climat apparaît assez variable parmi les agences : vulnérabilités énergétiques et contraintes carbone, vulnérabilité aux effets des changements climatiques, politiques énergétiques, risques naturels, disponibilité des ressources, plus récemment modalités d'atténuation et d'adaptation au changement climatique... Les sujets autour de la sobriété énergétique, des énergies renouvelables et des émissions de GES sont traités de façon relativement récurrente. Les questions du microclimat urbain et des comportements énergétiques des ménages et usagers sont quant à elles très peu abordées.

Les pratiques prospectives des agences d'urbanisme dans le cadre des travaux de SCoT et de PLUi restent ciblées sur la réalisation de scénarios sociodémographiques, l'analyse de la consommation de l'espace. Quelques rares besoins de modélisation ont été repérés, pour la territorialisation des données énergétiques et climatiques, de vulnérabilité aux effets du

changement climatique. Cependant, l'approche SIG est plutôt " légère ", surtout du côté des agences d'urbanisme de petite taille.

Près de la moitié des agences est par ailleurs impliquée ou anime un observatoire qui aborde en tout ou partie les questions énergétiques et climatiques. Cette activité est prometteuse pour le suivi et l'évaluation des exercices d'urbanisme, mais on constate encore des difficultés à définir et suivre des indicateurs pertinents et récurrents sur ces sujets.

Le travail réalisé sur les dispositions normatives et non normatives, en matière d'énergie-climat, est principalement axé sur les thématiques « logement », « végétalisation » et « déplacements ». Beaucoup de mesures adaptées relèvent a priori de la gestion et non pas du document d'urbanisme. Aucun exemple (au moment de l'enquête) n'a pu être obtenu sur l'intégration de l'îlot de chaleur urbain dans les PLU/PLUi ou dans les SCoT.

Sur la base de l'enquête de 2015, l'objectif de la tâche 4 au sein du projet PÆNDORA est bien de :

- Pérenniser, en l'adaptant, le dispositif d'analyse des pratiques des agences d'urbanisme en matière d'intégration des considérations énergie – climat dans les exercices d'urbanisme ;
- Et réaliser un premier exercice de suivi, permettant d'évaluer l'évolution des pratiques et des attentes des praticiens depuis 2015, en termes d'approches, d'outils, d'indicateurs, de compétences à acquérir, de partenariats à établir...

Cette approche s'appuie uniquement sur des territoires dotés d'une agence d'urbanisme, mais le panel des 49 territoires membres de la FNAU est suffisamment large et varié pour être représentatif.

Le questionnaire a été remanié, avec un triple objectif de **simplification**, **actualisation** et **amélioration** (Figure 32, Figure 33). Il y a eu Réduction du nombre de questions (fusion) et réorganisation des parties (pour éviter notamment les redondances), en suivant le fil conducteur des pratiques professionnelles (organisation interne, domaine d'intervention, méthodes de travail, production et réalisation, réseau et partenariat).



Figure 32 : Simplification du questionnaire

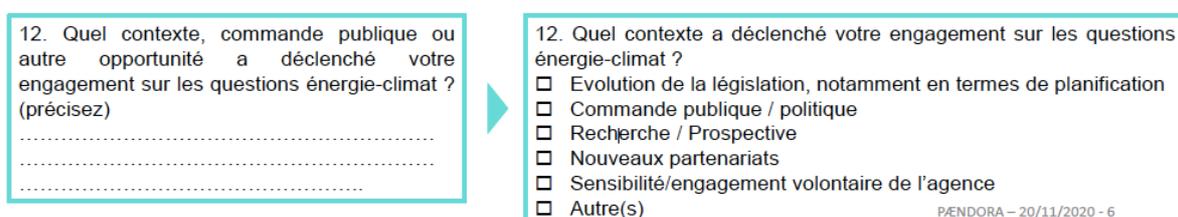


Figure 33 : exemple d'actualisation de question

b) Les agences enquêtées

26 agences d'urbanisme (AU) ont répondu sur les 49 agences du réseau FNAU (plus d'une sur deux, soit 53 %). Entre les deux enquêtes, on note une diversité similaire des agences d'urbanisme enquêtées en termes d'échelons territoriaux représentés, de taille de territoires d'intervention ou encore de poids démographiques : cette diversité est favorable à un regard élargi, plus représentatif des compétences et des pratiques des différentes agences du réseau FNAU.

Toutes les agences enquêtées sont impliquées sur les trois échelles de planification en urbanisme (communale, intercommunale, supracommunale) ; on note cependant une implication plus importante sur les SCoT en 2020 qu'en 2015. L'implication sur les PLU reste notable, notamment sur les agences de plus petite taille.

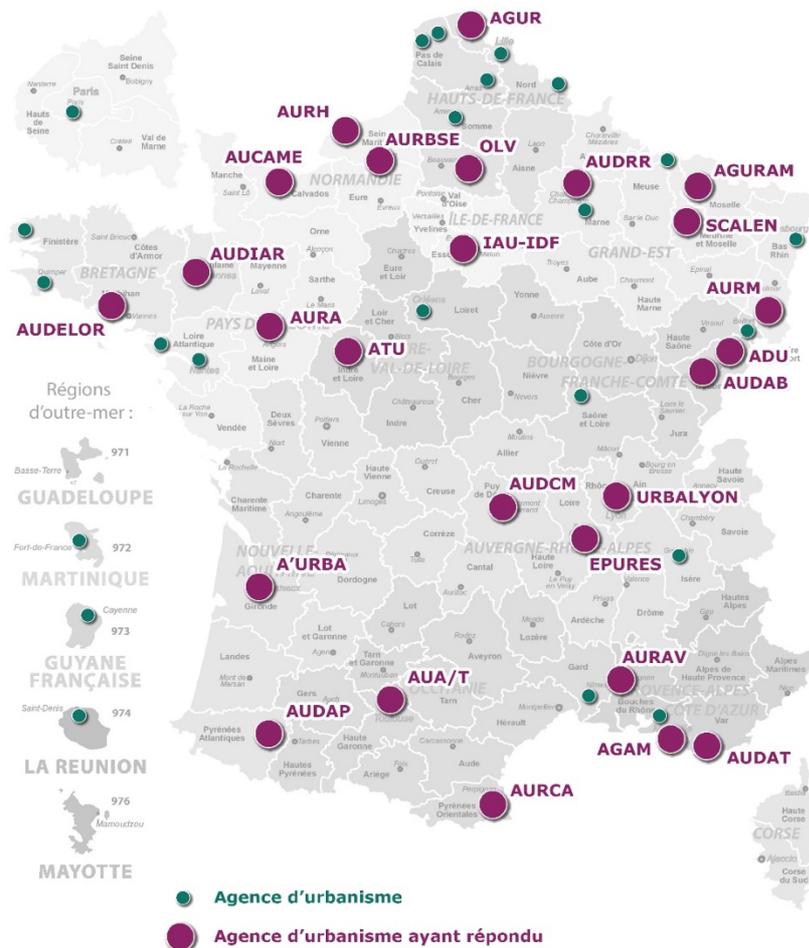


Figure 34 : Agences d'urbanisme de la FNAU qui ont répondu au questionnaire – Source : AUAT

Malgré une représentation des agences d'urbanisme plus importante dans la partie Nord de la métropole, la répartition s'est toutefois un peu équilibrée entre Nord et Sud, par rapport aux réponses obtenues en 2015 (projet MApUCE). Par contre, aucun territoire ultra-marin n'a

répondu en 2020 : cette absence est regrettable ; les spécificités climatiques et énergétiques de ces territoires auraient pu apporter un éclairage particulièrement intéressant sur des pratiques de fait distinctes de celles observables en métropole.

On constate une nette montée en compétences des agences d'urbanisme sur les sujets énergie et climat : au nombre de 17 en 2015 sur 25 agences enquêtées, les référents comptabilisés sont désormais 23 sur 26 agences enquêtées en 2020.

Cette compétence est principalement acquise par expérience professionnelle, même si on note en 2020 la présence non négligeable de référents issus de formations initiales ou continues dédiées à ce sujet (Figure 35).

Bien que l'intitulé de leur poste soit principalement lié au domaine de « l'environnement », leur position dans la structure apparaît assez diversifiée, rattachée encore préférentiellement aux équipes « environnement » mais aussi de plus en plus à des équipes multithématiques.

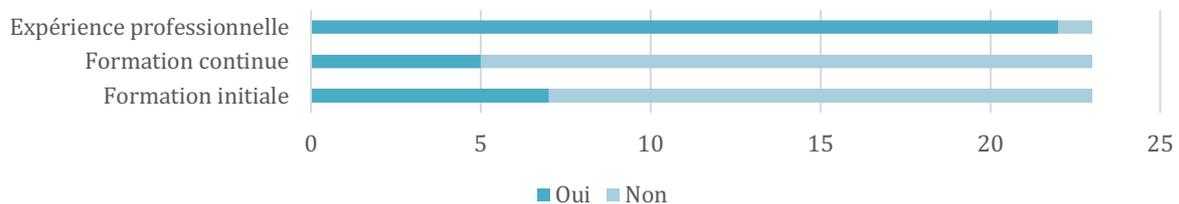


Figure 35 : Origine des compétences acquises sur les questions énergie-climat (question 2) - Source AUAT

c) L'implication des agences dans les démarches d'urbanisme et d'aménagement et énergie climat

L'implication des agences d'urbanisme dans le champ de la planification en urbanisme a évolué entre 2015 et 2020 : elles sont aujourd'hui plus nombreuses à s'impliquer dans les PLH, SRADDET, SCoT, PLUi, PLU et PDU. On note ainsi un glissement des implications des échelles communales vers des échelles inter ou supra communales.

En matière d'implication dans des démarches d'aménagement durable, la place stimulante de l'évaluation environnementale reste privilégiée (16 agences en 2015, 15 en 2020).

Mais les agences d'urbanisme continuent de rencontrer des difficultés pour traiter et intégrer les réflexions énergie-climat dans les exercices qu'elles mènent ou accompagnent. Elles étaient 15 à 2015 et sont encore 18 en 2020 à soulever ce souci.

Le manque de données, d'outils et de méthodes vient en tête, comme 2015, suivi du manque de compétences, plus mis en exergue en 2020 qu'en 2015 (et malgré plus de référents, apparemment plus formés à ces sujets- Question 2) (Figure 36).

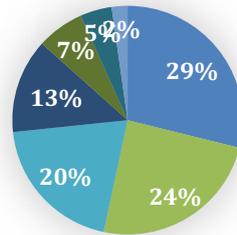


Figure 36 : Type de difficultés rencontrées dans l'articulation des démarches d'urbanisme et d'énergie-climat (question 7) - Source : AUAT

La distinction entre les enjeux d'atténuation et ceux d'adaptation a nettement progressé depuis 2015 : les notions sont désormais beaucoup mieux acquises, ainsi que l'identification des leviers en urbanisme et en aménagement du territoire.

- La maîtrise des consommations énergétiques et la production d'énergie renouvelable et de récupération constituent les deux leviers principaux investis pour participer à l'atténuation du changement climatique.
- En matière d'adaptation au changement climatique, si les agences d'urbanisme investissent principalement le champ des vulnérabilités climatiques et de la résilience du territoire (en lien étroit avec la thématique des risques territoriaux), la question des impacts de l'artificialisation des sols sur le climat urbain, ainsi que l'analyse et le suivi du microclimat urbain sont également développés.

d) La production et l'accès aux données énergie-climat

Les agences d'urbanisme ont majoritairement accès à des bases de données énergie-climat (tous formats confondus). En matière de données urbaines, les données de l'IGN sont principalement citées, auxquelles s'ajoutent des données de l'État (MAJIC, cadastre), toutes facilement accessibles pour les agences d'urbanisme. Des données plus locales, spécifiquement construites pour suivre l'évolution du tissu urbain (IMU, TUF, typomorphologies...) sont également exploitées.

Les données énergétiques utilisées sont plus diversifiées. Les données en open data (fournisseurs / distributeurs / transporteurs d'énergie, Météo France), celles issues du RGP INSEE, ainsi que les données traitées et diffusées par les observatoires régionaux énergie-climat et les AASQA sont principalement mobilisées. Quelques exercices de modélisation sont également engagés par certaines agences.

Les données climatiques quant à elles ont pour source essentielle Météo France à travers des jeux de données locales ou bien via les sites de référence mis à disposition (DRIAS, Climat HD). Ces données climatiques sont également indirectement abordées via l'exploitation de données de température de surface issues d'images satellites.



En conclusion

Avec un taux de réponses de 53%, cette enquête nous propose un bilan représentatif des pratiques en cours au sein des agences d'urbanisme du réseau FNAU, mais également des attentes encore exprimées en matière d'intégration des thématiques énergie et climat dans les exercices de planification en urbanisme et d'aménagement du territoire.

Des difficultés d'accès à la donnée, aux outils, des freins au partage de ces sujets avec les élus et d'autres acteurs du territoire sont toujours signalés. On constate néanmoins une nette amélioration de l'appropriation et du développement des sujets Energie et Climat par les agences d'urbanisme, au regard de l'enquête réalisée en 2015 dans le cadre du projet de recherche MApUCE.

Le protocole de suivi des pratiques des agences d'urbanisme, dont la première édition fait l'objet de la présente présentation, prévoit une fréquence de mise en œuvre tous les 3 à 4 ans.

Ce suivi dans le temps, qui sera assuré sous pilotage de la FNAU, suivant une méthodologie récurrente, doit permettre de mesurer la capacité des acteurs opérationnels à répondre à l'évolution du contexte climatique, au renouvellement du cadre législatif et à la structuration permanente des pratiques des agences d'urbanisme.

Le rapport complet d'analyse des besoins des utilisateurs, réalisé dans le cadre du programme de recherche PAENDORA auprès des agences d'urbanisme du réseau FNAU, peut être consulté sur demande auprès de la FNAU ou de l'AUAT.

E.2. Veille juridique des aspects « énergie-climat » en urbanisme

a) De l'importance d'une veille juridique continue

Dans le cadre du projet de recherche MApUCE, les partenaires juristes du LIEU (Aix-Marseille Université) ont établi un ensemble de fiches méthodologiques ayant pour objectif d'accompagner les acteurs urbains dans l'intégration des problématiques autour de l'énergie et du climat urbain dans les documents de planification en urbanisme (SCoT, PLU), aux différentes étapes de leur élaboration.

Ces fiches détaillent les fondements juridiques à considérer, les difficultés éventuelles, et proposent des exemples de rédaction permettant d'intégrer de façon pertinente ces enjeux dans les différents volets du document.

Ces fiches sont disponibles sur le site Internet de halshs :

- Fiche exemple: Agen - <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354293v1>
- Fiche-outil : Le SCOT: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354275v1>
- Fiches-outils: Le PLU(i):
 - Rapport de présentation et PADD : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354282v1>
 - Règlement <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354285v1>
 - OAP <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01354288v1>



De façon complémentaire, le guide « Urbanisme et microclimat – Outils et recommandations générales pour les documents de planification », établi à l'issue du projet de recherche MApUCE détaille dans sa partie « III. Intégration de ces outils dans les documents d'urbanisme : leviers d'actions mobilisables pour agir sur le microclimat urbain » les outils et leviers proposés par la législation et la réglementation en urbanisme pour agir tant sur un tissu urbain dense existant que sur des zones à urbaniser et/ou lors d'opérations de densification.

Ce guide de recommandations est disponible sur le site Internet du LIEU¹³. Ces divers documents ont été élaborés dans la temporalité du projet de recherche MApUCE et sont à jour au regard de la législation et de la réglementation à cette date.

La montée en puissance des enjeux énergétiques et climatiques est néanmoins susceptible de faire évoluer, d'une part, leur prise en considération dans les politiques publiques, notamment celles en urbanisme et en aménagement, et, d'autre part, le contexte juridique national en la matière.

Une veille juridique attentive et continue apparaît nécessaire pour ajuster au mieux les documents d'urbanisme et les démarches d'aménagement au regard des potentialités que leur propose le cadre juridique actualisé. La définition et la mise en place d'un dispositif de veille juridique pérenne, à destination en premier lieu des agences d'urbanisme du réseau FNAU, ont donc fait l'objet d'une tâche du projet de recherche PÆNDORA.

b) Pertinence d'un nouveau dispositif de veille juridique

Si certaines agences d'urbanisme du réseau FNAU intègrent des juristes au sein de leur équipe, qui assurent cette veille juridique au quotidien, ce n'est pas le cas dans l'ensemble des 49 agences du réseau FNAU.

Les agences dépourvues de juristes au sein de leur équipe ont alors le choix de se tourner vers des partenaires institutionnels (services de l'Etat dans la plupart des cas) ou vers des cabinets juristes privés pour s'assurer de la bonne compréhension du champ législatif et réglementaire dans lequel elles évoluent.

Parmi les agences d'urbanisme comprenant des juristes au sein de leurs équipes, certaines ont formalisé un dispositif de veille juridique à destination, en premier lieu, des équipes en interne et, en second lieu, des membres et partenaires de chacune des agences.

Un des exemples les plus aboutis est le dispositif de veille juridique mis en place par l'agence d'urbanisme de Bordeaux (a'urba) qui édite depuis 2013 un **Bulletin de Veille Juridique** (Figure 37). Celui-ci est destiné en premier lieu à l'équipe interne et aux membres et partenaires de l'agence bordelaise, et qui a progressivement élargi sa diffusion « à la demande » auprès d'agents d'autres agences d'urbanisme du réseau FNAU. Sa liste de

¹³ http://iuar-lieu-amu.fr/wp-content/uploads/2019/07/MApUCE_guide-methodologique_BD_48p.pdf



diffusion comptait en 2020 environ 160 contacts issus d'agences d'urbanisme du réseau FNAU.



Figure 37 : bulletin de veille juridique de l'a'urba de juin 2020

Au regard des caractéristiques du dispositif de suivi produit par l'a'urba, en termes de : contenu ciblé, fréquence, compétences juridiques d'ores et déjà en place, politique de diffusion, il ne nous a pas semblé pertinent de créer un nouveau dispositif, concurrentiel, nécessitant des compétences juridiques à pérenniser.

Un contact a donc été établi par l'AUAT avec l'agence d'urbanisme de Bordeaux, en la personne de son conseiller juridique, pour lui proposer d'associer la mission juridique de l'a'urba à la tâche du projet de recherche PÆNDORA,

c) Association de l'a'urba

La proposition d'associer l'a'urba au projet PÆNDORA été reçue très positivement et est perçue comme une opportunité de :

- Mutualiser des échanges et des connaissances entre agences d'urbanisme à l'échelle du réseau FNAU,
- Conforter les objectifs et contenus du Bulletin de Veille Juridique,
- Redynamiser cette publication.

Le Bulletin de Veille Juridique cible spécifiquement le droit de l'urbanisme, de l'habitat, de l'environnement et des mobilités. A ce titre, toute évolution législative, réglementaire, jurisprudentielle, doctrinale ou bibliographique, dès lors qu'elle concerne ces champs juridiques, est intégrée dans le Bulletin de Veille Juridique. Aussi, toute évolution qui intégrerait un motif lié à la problématique de l'énergie ou à celle du climat, est systématiquement relevée et doit figurer dans le Bulletin de Veille Juridique édité.



d) Diffusion du suivi juridique

La liste de diffusion du Bulletin de Veille Juridique comptait en début 2020 environ 160 contacts issus d'agences d'urbanisme du réseau FNAU.

Afin de diffuser cette publication plus largement et de façon plus pérenne aux personnels des agences d'urbanisme de l'ensemble du réseau FNAU, la liste de diffusion a été complétée par l'AUAT, sur la base des listes de membres des clubs FNAU sur les thématiques « Energie », « Environnement » et « Planification & Réglementation », très actifs à l'échelle de l'ensemble du réseau FNAU. Ces listes ont été consultées le 24 août 2020, sur l'extranet de la FNAU.

C'est au total 402 contacts, potentiellement nouveaux, qui ont été proposés à l'a'urba pour compléter sa liste de diffusion du Bulletin de Veille Juridique. Ces compléments ont été intégrés par l'a'urba. Après élimination des doublons (certains personnels étaient déjà destinataires du Bulletin de Veille Juridique), la liste de diffusion mise à jour compte désormais 489 contacts en agences d'urbanisme.

Cette liste est opérationnelle pour diffusion du Bulletin de veille juridique des mois de Juillet-Août courant Septembre 2020. Le mode opérationnel de vérification et de mise à jour de la liste de diffusion, au regard des listes de membres des clubs FNAU thématiques « Energie », « Environnement » et « Planification & Réglementation » sera reconduit annuellement, suivant des modalités à préciser.

Nous avons informé la FNAU de cette collaboration entre agences d'urbanisme, au bénéfice du réseau FNAU, menée grâce au projet PAENDORA.

Livrable	Nature	Accès
Plan d'action pour la mise en place d'une veille juridique et des pratiques des agences de la FNAU : définition de protocoles de suivi, production d'une grille d'enquête et de suivi juridique, formatage des rapports de restitution	Veille juridique intégrée via le bulletin mensuel de l'a'urba de Bordeaux Rapport méthodologique sur l'enquête	Bulletin de l'a'urba sur inscription (gratuite). Rapport et grille disponible sur demande auprès de l'AUAT/Toulouse
Réalisation du premier exercice de suivi.	Rapport et synthèse	Rapport et synthèse disponibles sur demande auprès de l'AUAT/Toulouse La synthèse sera en ligne.



F. Conclusion

Le projet PÆNDORA avait pour ambition de développer et appliquer une approche générique de production de données urbaine à l'échelle des îlots urbains (les pâtés de maisons), de les appliquer pour un domaine métier (l'îlot de chaleur urbain), et, le cas échéant en s'appuyant sur ces données, poursuivre le travail sur des méthodologies d'accompagnement des acteurs de l'urbanisme vis-à-vis de l'adaptation au changement climatique.

Afin de pouvoir fournir plus d'une centaine d'indicateurs morphologiques et micro-climatiques (comme les Local Climate Zones, la chaîne du projet MApUCE a été entièrement re-développée au sein de l'outil GeoClimate. Cet outil a été élaboré de façon générique afin notamment de pouvoir utiliser les algorithmes indépendants des uns des autres mais également de pouvoir utiliser à l'avenir d'autres sources données que la BDTopo V2.2 de l'IGN, comme par exemple OpenStreetMap (ce dernier développement ayant été réalisé en collaboration avec le projet européen URCLIM). Cette approche permet de découpler la donnée d'entrée du calcul des indicateurs.

L'utilisation de la chaîne GeoClimate par les acteurs, que ce soit par exemple en agence d'urbanisme ou bureau d'études, a été facilitée par l'intégration des aspects géospatiaux dans le logiciel libre Dbeaver, qui permet la visualisation et l'exploitation de la chaîne. Sur un cas d'application métier sur l'îlot de chaleur sur l'EuroMétropole de Strasbourg des retours d'expérience de bureaux d'études et de la collectivité ont permis d'améliorer GeoClimate.

Afin d'accompagner les collectivités, nous avons approfondi le transfert d'informations climatologiques :

- Aux échelles locales, au sens description des phénomènes météorologiques typiques influençant la ville (types de temps sensible, via des fiches)
- À l'échelle urbaine, avec la construction d'un indicateur d'îlot de chaleur d'été facilement exploitable en agence d'urbanisme, car utilisant des données déjà connues ainsi que des cartes de LCZ issues du projet, mobilisable quand l'on dispose des données de la BDtopo
- Via une réflexion sur la représentation graphique des informations pertinentes.

Un kit sur les données clés de l'adaptation a été conçu et publié sous le format d'un guide ADEME offre une vision des pratiques de planification actuelles et des méthodologies d'accompagnement. Il présente les questions repères et un regard critique (cohérence et marge de manœuvre) des données mobilisées, en faveur d'une vision compréhensible et proactive de l'adaptation. Les enseignements de ce kit ont été mis en œuvre dans un exercice de "PLUi augmenté" sur l'agglomération de Toulouse Métropole.

Enfin, un exercice de suivi des pratiques des agences d'urbanisme a été mené, et a montré une amélioration depuis 2015 de la prise en compte de l'adaptation dans la planification urbaine. Une veille juridique est pérennisée sur ces questions, via la mise en place d'une collaboration pérenne au niveau de la FNAU avec le bulletin juridique de l'a'urba de Bordeaux.



L'ensemble des recherches et actions de transfert menées dans le projet PÆNDORA ont aussi mené à des actions ou perspectives non envisagées au départ. Ceci montre la généricité des approches et leur (relative probablement) facilité d'utilisation et d'appropriation par les acteurs. A titre d'exemple, le pôle prospective, émergence de SNCF-Réseau pour la Bretagne et Pays de la Loire expérimente ainsi l'utilisation de GeoClimate pour ses analyses territoriales.

Les premiers travaux et échanges avec des agences d'urbanisme, en France et à l'étranger (notamment en Tunisie) menés dans PÆNDORA nous a permis d'organiser en début de projet une session lors de la conférence CitiesIPCC qui s'est tenue à Edmonton en mars 2018 titré : *Initiating climatic awareness in urban planning practices through participatory action research* et de contribuer, à la hauteur de ce qui était possible de faire (propositions en amont, relecture des versions intermédiaires) à la rédaction d'un *Programme mondial de recherche et d'action relatif aux villes et à la science des changements climatiques*¹⁴.

¹⁴ https://citiesipcc.org/wp-content/uploads/2018/11/Research-Agenda_FR_Short-version_revised_clean.pdf



G. Annexes

G.1 Références des articles scientifiques publiés par le projet

2020 Gardes T., R. Schoetter, J. Hidalgo, N. Long, V. Masson: Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities, *Science of the total environment*, 737, 139253, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139253

2018 Hidalgo, J. et Jouglu, R. On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. *PLoS ONE*, 13 (12) <https://journals.plos.org/plosone/>

2019 Jouglu R., Hidalgo J. et Pouponneau B. Définition des situations météorologiques locales pour une cinquantaine de villes françaises. *La Météorologie* (106) <http://hdl.handle.net/2042/70370>

G.2 Actions de valorisation grand public et acteurs

2020 Bretagne G., Haouès-Jouve S., Hidalgo J., Touchard O. (2020). Cartographier, modéliser. *La Revue Urbanisme* (417), pp 33-34

2020 Atlas climatique sur le périmètre de Toulouse Métropole, AUAT

<https://www.aua-toulouse.org/atlas-climatique/>

2020 Exposition aux chaleurs urbaines – Dataviz, AUAT

<https://www.aua-toulouse.org/votre-exposition-aux-chaleurs-urbaines-estivales/>

2019 Chaleur et santé en ville, AUAT

<https://www.aua-toulouse.org/360-chaleur-et-sante-en-ville/>

2019 Les îlots de chaleur urbains sous surveillance, AUAT

<https://www.aua-toulouse.org/les-ilots-de-chaleur-urbains-sous-surveillance-2/>

2019 Glossaire : Co-bénéfice des actions en faveur du climat, AUAT

<https://www.aua-toulouse.org/glossaire-co-benefice-des-actions-en-faveur-du-climat/>

2018 Glossaire : Îlot de chaleur urbain à Toulouse, AUAT

<https://www.aua-toulouse.org/glossaire-ilot-de-chaleur-urbain-a-toulouse/>

2018 J. Hidalgo. Organisation d'une session intitulée « Initiating climatic awareness in urban planning practices through participatory action research” lors de la conférence CitiesIPCC qui s'est tenue à Edmonton en mars 2018. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/17-06-030-CITIES-IPCC-digital-program-17x11-r04.pdf>