

Les données topographiques actuelles sont-elles adaptées à l'étude du climat urbain ?

Are today topographic data suitable for urban climate study?

Anne Ruas¹, Florence Jacquinod², Zohra Mhedhbi³, Florian Betou⁴

¹ COSYS, IMSE/COSYS, Université Gustave Eiffel, anne.ruas@univ-eiffel.fr

² LASTIG, EIVP, florence.jacquinod@eivp-paris.fr

³ PRODIG, IRD, zohra.mhedhbi@ird.fr

⁴ LEE, Université Gustave Eiffel, florian.betou4@gmail.com

RÉSUMÉ. Le changement climatique bouscule les agendas de recherche ainsi que les priorités d'aménagement urbain. Pour les métropoles françaises de nombreux événements viennent perturber les territoires, parmi lesquels les inondations et les canicules. Les réaménagements urbains pour faire face à ces enjeux sont coûteux et se programment sur des échelles de temps longs. La simulation numérique est un formidable outil pour étudier des scénarios d'évolution urbain et étudier l'efficacité de solutions d'aménagements. En matière de climat urbain des modèles numériques existent et sont progressivement améliorés par les communautés scientifiques. Ces modèles sont paramétrés, entre autres, par les données géographiques qui décrivent les surfaces minérales (les bâtiments, les sols asphaltés) les surfaces non minérales (les surfaces d'eau, les sols herbacés, les sols nus perméables) et les canopées arborées. Dans cet article nous étudions l'adéquation des données topographiques existantes pour la paramétrisation de modèles climatiques. Nous commençons par rappeler l'importance des spécifications des bases de données pour comprendre l'écart entre le monde réel et le contenu des bases de données. Nous décrivons ensuite des stratégies pour construire des données d'occupation du sol adaptées à l'étude du climat urbain à partir de référentiels nationaux et en l'absence de ces référentiels. Enfin nous réfléchissons aux perspectives de l'apport des données très grandes échelles, de type BIM, pour l'étude des climats urbains. En conclusion nous proposons une amélioration des spécifications des bases de données géographiques nationales pour mieux répondre aux besoins d'aménagement du territoire dans le contexte du changement climatique.

ABSTRACT. Climate change is shaking up research agendas and urban planning priorities. A number of events, including floods and heatwaves, are disrupting metropolitan areas. Urban redevelopment to meet these challenges is costly and takes time. Numerical simulation is a great tool for studying urban development scenarios and the effectiveness of development solutions. Numerical models of the urban climate exist and are gradually being improved by the scientific community. These models are parameterised, among other things, by geographical data describing mineral surfaces (buildings, asphalt floors), non-mineral surfaces (water surfaces, herbaceous soils, bare permeable soils) and tree canopies. In this article we study the suitability of existing topographic data for parameterising climate models. We begin by recalling the importance of database specifications for understanding the gap between the real world and the content of databases. We then describe strategies for constructing land cover data suitable for studying the urban climate using national reference systems and in the absence of such data. Finally, we consider the potential contribution of very large-scale data, such as BIM, to the study of urban climates. In conclusion, we propose an improvement in the specifications of national geodatabases to better meet the needs of urban planning in the context of climate change.

MOTS-CLÉS. données topographiques, climat urbain, spécifications, BIM.

KEYWORDS. topographic data, urban climate, data base specifications, BIM.

Introduction

Le changement climatique bouscule les agendas de recherche ainsi que les priorités d'aménagement urbain. Pour les métropoles françaises de nombreux événements viennent perturber les territoires, parmi lesquels les inondations et les canicules. S'ajoute à cela la nécessité de faire évoluer rapidement notre modèle énergétique afin de réduire les émissions de gaz à effets de serre. Les réaménagements urbains pour faire face aux enjeux sont coûteux et se programment sur des échelles de temps longs. La simulation numérique est un formidable outil pour étudier des scénarios d'évolution urbain et étudier l'efficacité de solutions d'aménagements ou d'organisations socio spatiales. En matière de climat urbain des modèles

numériques existent et sont progressivement améliorés par les communautés scientifiques. Ces modèles sont basés sur des calculs d'échange thermique entre les composants urbains à partir de données climatiques des couches de l'atmosphère : le climat en ville est un climat particulier où interviennent des échanges thermiques entre composants urbains qui stockent et échangent de la chaleur. Ainsi la ville change le climat et on parle de climat urbain. C'est pourquoi les modèles de climat urbain sont paramétrés par les objets urbains, en particulier par les surfaces minérales : les bâtiments, les sols asphaltés ainsi que les surfaces non minérales : les surfaces d'eau, les sols herbacés, les sols nus perméables, et les canopées arborées. Plus les villes sont minérales, plus la chaleur est stockée dans les matériaux et plus les îlots de chaleur sont intenses.

Cet article est le premier de la série d'articles publiés dans ce numéro spécial dont l'objectif est d'examiner les relations entre la géomatique (les données, les méthodes, les représentations) et l'analyse du climat et de la pollution urbaine. Ainsi dans ce premier article nous regardons particulièrement les données topographiques¹ qui alimentent les modèles climatiques urbains à l'échelle de la ville. Ces données ne décrivent pas le climat mais l'espace support dans lequel et avec lequel le climat est étudié. Comme il sera détaillé dans d'autres articles de ce numéro spécial, le climat urbain peut être étudié à très grande échelle et petite étendue – à l'échelle d'un canyon urbain ou d'une place composée de plusieurs bâtiments - ou à moyenne échelle et grande étendue – à l'échelle d'une ville. Il s'agit de deux regards complémentaires et qui utilisent des données et des modèles différents. En guise de modèles on distingue les modèles physiques qui reproduisent des dynamiques physiques et qui sont basés sur des bilans énergétiques (par exemple les modèles SURFEX-TEB ou Solweig), sur la mécanique des fluides (par exemple ENVI-met) ou les deux (par exemple Solène micro-climat)², des modèles statistiques basés sur des mesures faites (ou simulées) dans l'espace et généralisées (par exemple le modèle LCZ, (Leduc et al, ce numéro spécial)). Tous les modèles ont besoin de données topographiques en entrée, mais particulièrement les modèles physiques qui ont besoin non seulement des bâtiments mais aussi de la nature de la couverture du sol et d'une description de la couche arborée en ville (Masson et al., 2020).

Parmi les informations géographiques de base pour l'étude du climat urbain on retient en priorité :

- Les bâtiments parce qu'ils stockent et libèrent de la chaleur, ils produisent de l'ombre (et donc changent le rayonnement des surfaces qu'ils ombragent) et sont des lieux de vie donc d'intérêt pour les calculs de température.
- L'occupation des sols. En particulier la matière de la couverture du sol et son degré de perméabilité sont essentiels pour savoir si le sol absorbe et stocke de la chaleur et fait ruisseler l'eau (surface minérale) ou si au contraire ce sol peut stocker de l'eau (surface hydrographique et surface perméable) puis évaporer ou évapotranspirer pendant les heures chaudes.
- La couche arborée parce qu'elle génère de l'ombre, peut absorber de l'eau en cas de pluie et évapotranspirer en cas de forte chaleur.

Ces données topographiques décrivant les bâtiments, la couverture du sol et la végétation sont aujourd'hui utilisées selon deux modèles géométriques différents :

- Lorsque le modèle climatique couvre une grande étendue les données topographiques sont représentées de façon simplifiée ou moyennée à l'échelle d'une maille et non par la géométrie précise de ces objets topographiques. C'est le cas du modèle SURFEX-TEB (Masson et al., 2013) qui peut calculer le climat d'une ville entière sur une longue période en segmentant l'espace en mailles allant de 100m à 1km selon les besoins et que nous avons choisi comme cas d'école dans cet article. Chaque maille en entrée du modèle décrit l'espace support : son occupation du sol, l'orientation principale des rues, la hauteur et l'isolation majoritaire des bâtiments de la maille, et la couverture arborée. Le thème de l'occupation des sols est décomposé en cinq catégories : les bâtiments, les sols imperméabilisés (souvent

¹ Nous utilisons le terme 'topographique' dans le sens de la description des lieux et non uniquement le relief.

² Ces modèles seront évoqués dans les autres articles de ce numéro spécial en particulier (Bernard et al, 2025).

appelée voiries), les sols nus, les sols végétalisés et les surfaces hydrographiques. Le modèle intègre également des indices décrivant les bâtiments. Les exemples présentés dans cet article proposent des méthodes permettant le calcul de ces données à partir de données disponibles.

– Lorsque l'étude est limitée à une place ou un petit quartier, on peut utiliser des modèles qui utilisent la géométrie explicite et précise de tous les objets présents : les bâtiments en 3D, la couverture des sols entre les bâtiments, mais aussi la géométrie 3D de tous les objets qui modifient les rayonnements dont les arbres. Nous verrons en dernière section de cet article les données BIM de grande précision qui pourraient répondre à ces besoins.

Les données topographiques nécessaires aux études climatiques sont soit saisies ex-nihilo grâce à des financements ad-hoc soit construites à partir de données existantes (Masson et al., 2020). C'est ce cas qui nous intéresse, en particulier nous regardons si les données publiques produites par l'Institut Géographique National permettent l'étude du climat urbain. Afin d'aider au choix du référentiel géographique adapté à l'étude du climat, nous commençons par rappeler l'importance des spécifications pour comprendre les écarts entre le monde réel et les bases de données topographiques (section 1). Nous prenons l'exemple de la BDTopo® de l'IGN puisqu'elle est largement utilisée aujourd'hui pour les analyses climatiques parce qu'elle dispose de représentation des bâtiments et des rues qui sont deux couches indispensables à l'étude du climat urbain. Nous verrons que la couche végétation est par contre mal adaptée aux besoins actuels. La connaissance des spécifications est importante parce qu'elles permettent de savoir si un référentiel dispose des données utiles pour les analyses climatiques et sur quels thèmes, ou si le référentiel est trop loin des besoins. Nous reviendrons sur ce point en conclusion de cet article.

A travers des exemples issus de projets de recherche récents, nous décrivons ensuite différentes stratégies d'exploitation de bases de données au service d'analyses climatiques. La section 2 propose une méthode pour construire les données d'occupation du sol adaptées à l'étude du climat urbain à partir de référentiels dont la BD Topo® et de la base OCS-GE en soulignant les difficultés rencontrées. Comme nous le verrons il n'y a pas en France aujourd'hui de données sur étagère et couvrant tout le territoire français permettant de répondre aux besoins actuels de l'étude des climats urbains mais des solutions sont toutefois mises en œuvre à partir des données disponibles. En Section 3, nous verrons comment utiliser d'autres types de données en l'absence de données de référence pour le cas de l'étude du climat dans la commune de Tunis qui permet de mesurer l'intérêt d'avoir des données publiques disponibles pour de telles analyses. Enfin nous présentons en section 4 les données urbaines très grandes échelles, issues des BIM, qui n'existent pour l'instant que sur quelques quartiers mais qui pourraient alimenter dans quelques années les modèles de climatologie urbaine de grande précision.

1. L'importance des spécifications pour le choix du référentiel approprié pour l'étude du climat urbain, exemple de la BD Topo ®

L'étude du climat urbain requiert l'utilisation de données géographiques qui représentent l'espace dans lequel se déroule le phénomène étudié. Les géographes appellent communément cet espace 'l'espace support' ou 'l'espace absolu', défini comme un 'cadre de référence dans lequel le géographe localise les objets dont il parle' (Bailly et al 2016), ou comme 'le repère immuable dans lequel on situe les objets et analyse leurs relations' (Pumain, Saint Julien 2010). Nous appellerons cet espace l'espace support. Cette terminologie permet de distinguer les données décrivant cet espace des données décrivant le phénomène étudié : le climat. Évidemment, l'espace support joue un rôle important dans l'analyse des phénomènes soit parce qu'il est constitutif du phénomène soit parce qu'il permet de mieux comprendre les impacts du phénomène sur le territoire étudié.

Pour comprendre la représentation des données dans une base de données géographique il faut avoir recours au concept de monde réel qui est le monde tel qu'il est perçu et que l'on modélise intellectuellement en le découpant en entités correspondant à des catégories selon une ontologie adaptée (Ruas et Bianchi 2002). Dans le monde réel l'espace support est d'une grande complexité, il est composé

d'un agrégat de composants volumiques naturels et anthropiques qui ne cessent de changer : il est construit, rénové, détruit, reconstruit, la végétation aussi est en constante évolution. Par contre la représentation de cet espace sous forme de données géonumériques est très simplifiée. Pour bien distinguer l'espace réel de sa représentation, nous utilisons le terme d'entités pour parler des éléments de l'espace réel et d'objets pour parler de la représentation de ces entités. On distingue ainsi l'entité route (une route de l'espace réel) de l'objet route qui est la représentation numérique de l'entité route. Cette distinction est primordiale pour mieux comprendre l'écart entre les entités du monde réel et leurs représentations numériques qui sont utilisées pour les études climatiques (Ruas et Bianchi 2002).

Ce sont en principe les instituts de géographie ou de cartographie qui sont chargés de produire des bases de données géographiques aux échelles nationales. Ces bases de données dites topographiques sont les bases de référence et doivent satisfaire un ensemble très large de besoins. Elles ont la caractéristique de couvrir tout le territoire et d'être régulièrement mises à jour à partir de sources et de processus variés. En France c'est l'IGN qui est le producteur de cartes et de données géographiques de référence. La base de données de référence est la BDTopo® qui existe depuis 1997. C'est un référentiel 2.5D qui permet une cartographie jusqu'au 1:10 000 et qui est diffusée sous licence ouverte Etatlab depuis 2021. La BDTopo® est versionnée ce qui permet d'avoir des représentations de l'espace à différentes temporalités. Le terme 2.5D renvoie au fait que les objets de la base ont une géométrie en trois coordonnées (x,y,z), le z représentant l'altitude des objets au sol. Par exemple, la géométrie de chaque tronçon de routes est décrite par une suite de coordonnées (x,y,z) : chaque point (x,y) ayant une altitude z. Les bâtiments ont en plus une hauteur. Il ne s'agit pas d'une base 3D à proprement parlé parce qu'il n'y a pas de volumes représentés, même si dans le cas des bâtiments, le z au sol et la hauteur permettent de construire un volume simplifié (de type 'boîte à chaussure'). On parle donc de base 2.5D, qui décrit les géométries des objets sur une surface non plane, et qui permet de générer une représentation 3D des bâtiments.

Une base de données est décrite par des spécifications qui donnent les règles permettant de comprendre l'écart entre le monde réel, fait d'entités, et la base de données composée d'objets. Ainsi les spécifications décrivent d'une part les règles de sélection - les conditions auxquelles doivent répondre les entités pour être représentées sous forme d'objets dans la base - et les règles de représentation qui détaillent comment seront représentés les objets et par quels attributs. Par exemple, les règles de sélection diront quels bosquets seront représentés (ceux qui sont plus grands qu'un certain seuil) et celles de représentation diront comment seront représentés ces bosquets (sous la forme d'une zone polygonale) et avec quels attributs. Les spécifications sont donc un document clé car elles expliquent tout ce qu'il y a et surtout ce qu'il n'y a pas dans une base de données par rapport au monde réel. Les spécifications sont des métadonnées.

L'image suivante (figure 1) illustre la couche bâtiment de la BDtopo® associée à d'autres thèmes : le réseau routier et le cadastre. La représentation 3D sous la forme de 'boîte à chaussure' (on parle aussi de collection de prismes droits) - tel qu'expliqué dans les spécifications - est très simplifiée par rapport à la géométrie réelle mais couvre tout le territoire français et permet de nombreuses analyses dont des études d'écoulement ou d'éclairement.



Figure 1. Bati 3D de la BDTopo associé à d'autres composantes du référentiel Grande Echelle (© IGN, 2023).

Quelques questions sont fondamentales pour le choix d'un référentiel géographique : les données ont-elles des spécifications de sélection et de représentation homogènes et fiables sur le territoire étudié ? Les données sont-elles actuelles ou suffisamment récentes ? Les différents thèmes sont-ils cohérents les uns avec les autres ? Le niveau de détail et les seuils de sélection sont-ils adaptés à mon besoin, et ici en l'occurrence à l'étude du climat urbain ?

Le niveau de détail décrit l'écart entre les entités de l'espace support et leur représentation sous forme d'objets (Ruas et Bianchin 2002). En réalité, pour comprendre le niveau de détail d'une base de données, il faut examiner ses spécifications. Par simplification, on peut approcher le niveau de détail par la précision géométrique des objets de la base qu'on qualifie de décimétrique, métrique, décamétrique. Par exemple, la BDTopo® a une précision planimétrique de l'ordre de 2 à 3 mètres, ce qui signifie que la géométrie de chaque objet de la base est au plus décalée de 2 à 3 mètres de sa position réelle. Généralement la précision relative (c'est-à-dire la précision des objets les uns par rapport aux autres) est bien meilleure. On ajoute la notion de granularité pour décrire le niveau de détail de la forme des objets. Un objet peut ainsi avoir une précision absolue de 2 mètres et une granularité de 50 cm ce qui signifie que les détails plus grands que 50 cm sont décrits.

Si le niveau de détail est important, les seuils de sélection le sont encore plus et sont souvent méconnus. Par exemple pour la couche végétation de la BDTopo® de type «Bois» il est écrit dans les spécifications que « Les zones arborées de superficie comprise entre 500 et 5000 m², dont le couvert absolu est supérieur à 40 %, et avec des arbres atteignant une hauteur supérieure à 5 m (ou avec des arbres capables d'atteindre ces seuils in situ), sont systématiquement incluses. Les zones arborées de superficie comprise entre 80 et 500 m² peuvent être saisies mais de façon non exhaustive » (source BD TOPO® Version 3.3 - Descriptif de contenu - Janvier 2023, page 175), ce qui signifie *a contrario* que si le couvert est estimé à moins de 40% d'une surface qui mesure entre 500 et 5000m² alors cette surface ne sera pas saisie. De même que si la surface de l'entité Bois est inférieure à 80m², alors cette surface ne sera pas saisie. D'après ces spécifications, entre 80 et 500m² on ne sait pas ce qui est dans la base de données. Ça ne peut pas être satisfaisant pour l'étude du climat urbain, notamment parce que de nombreuses solutions vertes urbaines sont inférieures à 500m². Pour comprendre ces règles et ces seuils, rappelons qu'en France l'IGN couvre le territoire avec des données topographiques standards qui

historiquement permettent la fabrication de la carte au 1 :25 000. Les spécifications de cette base n'ont pas été faites historiquement pour étudier le climat urbain ou la pollution mais pour faire des cartes. Ainsi on notera que pour étudier le climat urbain et la pollution, la description de la végétation en ville de la base de données de référence en France n'est pas suffisamment précise, les seuils de sélection sont trop élevés et la distinction entre végétation basse et haute fait défaut.

Ainsi sur la France les bâtiments de la BDTopo permettent une représentation 3D pertinente pour des études de climat à l'échelle de la ville, mais les données de végétation ne le sont pas. Nous verrons dans la suite de cet article des stratégies pour pallier à ces défauts et pour acquérir ou fabriquer ces données lorsqu'elles ne sont pas disponibles.

2. Construire des données sur l'occupation des sols pour la paramétrisation de modèles de climats urbains à partir de bases de données disponibles en France

Notre premier exemple est l'étude de l'impact de solutions fondées sur la nature (la plantation d'arbres, l'installation de noues, etc.) sur le climat urbain et sur la gestion de l'eau pluviale en prenant comme cas d'étude la ville de Nantes. Pour ce faire, un modèle de climatologie urbaine standard est utilisé. Il s'agit de l'outil SURFEX-TEB (Masson et al., 2013) qui est utilisé avec une grille de modélisation d'une résolution de 100m. Ce modèle utilise des descriptions architecturales et morphologiques et des données de description de l'occupation du sol.

Pour les informations architecturales et morphologiques telles que les hauteurs moyennes des bâtiments, leurs types, l'usage de chaque bâtiment, son âge, la présence éventuelle d'un système de climatisation, la nature des matériaux de construction et la couleur de l'enveloppe nous utilisons la couche bâti de la BD Topo®, que nous avons complétée par des hypothèses. Nous détaillons ici la couche d'occupation des sols qui a été la plus complexe à construire.

Cette couche à construire est une mosaïque de cinq types de couverts. Afin de fournir les données nécessaires à chaque type de couvert, les mailles de modélisation doivent contenir des fractions surfaciques de bâtiment, d'eau, de voirie (surfaces imperméabilisées), de végétation haute et basse et de sol nu (zone non revêtue ou perméable mais non végétalisée). La base de données ECOCLIMAP (Faroux et al. 2013) fournit des données d'occupation mais avec une résolution de 1km ce qui ne correspond pas aux besoins de cette recherche. Pour calculer les fractions surfaciques d'occupation du sol dans chaque maille, une analyse des sources de données géographiques a été réalisée. La première source analysée est la BDTopo® de l'IGN qui recouvre tout le territoire Français et est régulièrement mise à jour. Cette source d'information est souvent utilisée pour la construction des LCZ sur la France (Bocher et al., 2021 ; GeoClimate+³), pour des études de corrélations entre climat et territoire (Crétat et al., 2024) ou pour la paramétrisation de modèles sur le territoire français dont le modèle SURFEX-TEB (Projet MAPUCE⁴ ou (Betou et al., 2022)). Par contre ce n'est pas une base de données d'occupation des sols, ce qui veut dire que la BDTopo® ne classe pas chaque lieu : si on représente tous les objets de la BDTopo® sur un plan, il y a donc des 'trous' qui sont des lieux non renseignés dans cette base (figure 2). Par exemple, le thème routier de la BDtopo® est représenté sous la forme d'axes routiers et non d'une surface incluant les bords de la chaussée, parce que son utilité est la cartographie aux moyennes échelles et les calculs d'itinéraires qui ont besoin uniquement des axes. Les thèmes de la végétation, présents dans la BDTopo® sous la forme de bois ou de haies, ont des seuils de sélection actuellement encore bien trop élevés (section 1). Par exemple, conformément aux spécifications de la base, l'alignement d'arbres visible en figure 2 n'est pas saisi. Il faut donc trouver d'autres sources de données qui peuvent compléter la voirie, la végétation basse, la végétation haute et le sol nu.

³ de la Fondation GEOMANUM (<https://geomanum.org/fr/projets/geoclimate>)

⁴ https://www.umn-cnrm.fr/ville.climat/IMG/pdf/rapport_scientifique_mapuce_v1.2.pdf



Figure 2. BDTopo® (bâtiments et zones arborées) superposée à l'Orthophoto (IGN) à 50 cm de 2023 (source Géoportail).

Au niveau international les bases de données CLC (Corine Land Cover)⁵ ou Urban Atlas de Copernicus⁶ sont disponibles mais ont une résolution grossière puisque leur seuil de sélection des surfaces minimales est de 25ha, elles sont donc bien moins précises que la BDTopo®. Utiliser une base de données d'occupation des sols avec des seuils si élevés sur des zones urbaines reviendrait à ne pas intégrer la plupart des solutions basées sur la nature qui sont implémentées aujourd'hui dans les villes pour lutter contre la chaleur urbaine et qui ne mesurent parfois que quelques centaines de mètres carrés comme les cours d'école ou les petits parcs de proximité. Il est donc nécessaire de se tourner vers une base de données spatialement plus précise.

En France la base de données d'occupation des sols OCS GE (OCcupation du Sol Grande Échelle) de l'IGN est une base de données plus récente que la BDTopo® (elle a débuté courant 2014 et doit couvrir la France fin 2025) qui propose une couverture spatialement plus détaillée que les bases CLC ou Urban Atlas et sémantiquement bien plus riche que la BDTopo® pour l'occupation et l'usage du sol.

La figure 3 illustre un extrait de la BD OCS GE comparé à l'orthophotographie et la BDTopo®. Les thèmes présents en figure 3d sont les bâtiments (rouge - code CS 1.1.1.1), la voirie (rose – routes, trottoirs, places, parking - code CS 1.1.1.2), les arbres feuillus (vert - code CS2.1.1.1), les herbacés (vert pale - code CS 2.2.1) et le sol à matériaux minéraux (jaune - code CS 1.1.2.1).

⁵ <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/corine-land-cover-occupation-des-sols-en-france/>

⁶ <https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas/urban-atlas-2018>

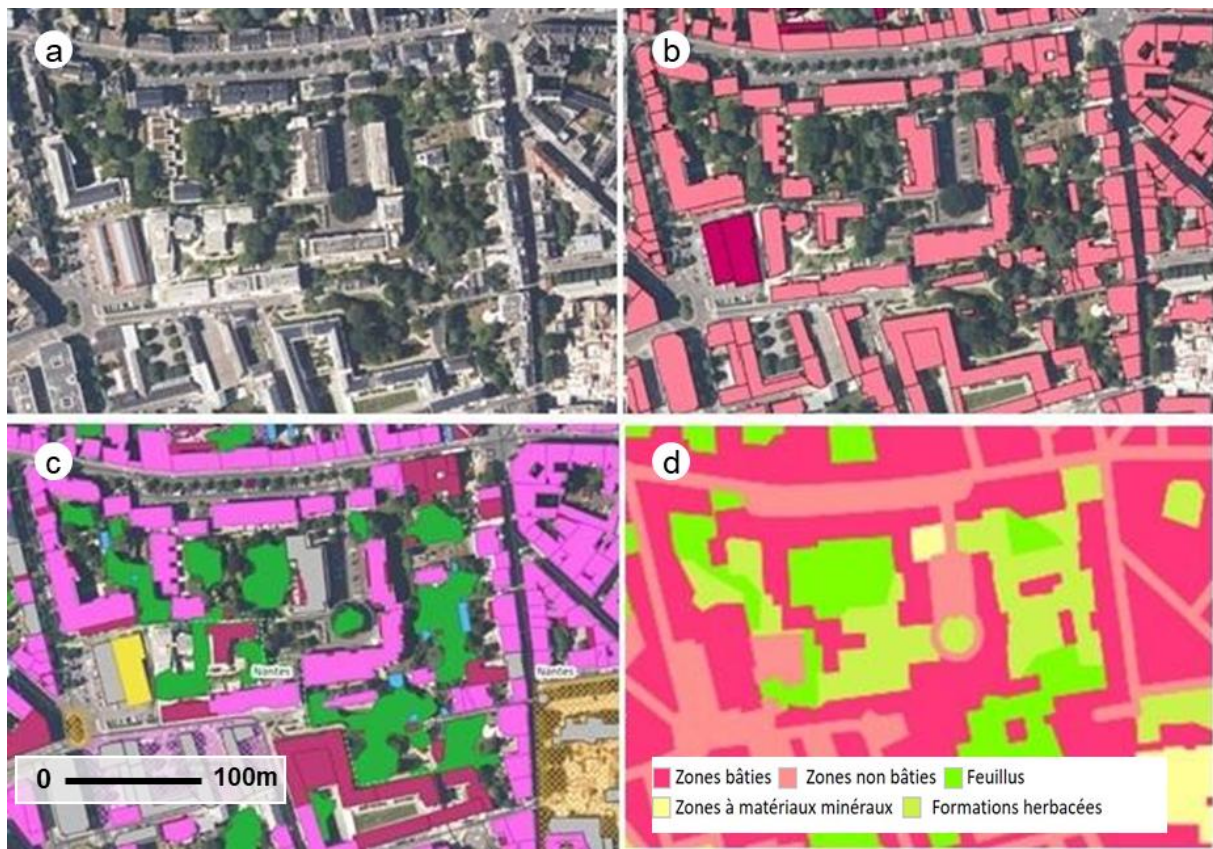


Figure 3. Perte de détail dans les bases de données d'occupation des sols dus aux seuils de sélection
Exemple 1 en centre ville a/ Orthophotographie b/ couche bâti de la BD Topo, c/ BDTopo bâti et végétation d/
OCS GE © IGN

La figure 3 illustre bien l'impact des seuils de sélection des objets dans les bases de données. En comparant visuellement les images, on voit clairement que dans la base OCS GE (d, en bas à droite) les entités du monde réel sont agrégées pour faire des blocs de taille minimale, aussi bien pour les bâtiments que pour la végétation. La encore le document des spécifications de cette base explique ces choix⁷. En page 10 de ce document, les seuils de sélection sont présentés : HMI : hauteur minimale d'intérêt ; IMI : largeur minimale d'intérêt ; LMI : longueur minimale d'intérêt ; UMI unité minimale d'intérêt (donc la surface minimale). En zone construite l'UMI est de 500 m² sauf pour le bâti où il est de 200 m². Il est précisé que le seuil de prise en compte des bâtiments est de 50 m² et que la superficie des zones bâties supérieures à 50 m² et inférieures à 200 m² est portée à 200 m². Ainsi les bâtiments sont grossis et agrégés pour créer des blocs. L'UMI de la voirie ou des sols nus est de 500 m² en zone urbaine avec une largeur minimale (IMI) de 5 m pour la voirie et de 10 m pour les sols nus. Dans de nombreux cas, ce processus d'agrégats élimine les cours et placettes qui sont souvent assimilées à du bâti ou de la voirie alors que ce sont des zones où des solutions basées sur la nature seraient potentiellement pertinentes même si elles sont de taille inférieure à 500 m². Par exemple l'alignement d'arbres en haut de la photo en figure 3(a) a été assimilé à de la voirie 'Zones non bâties' alors qu'il s'agit d'une solution basée sur la nature qu'il faudrait intégrer aux données d'entrée du modèle hydro-climatique. La figure 4 illustre l'impact de ces agrégats sur un quartier de petites maisons. Pour ce type de tissu urbain, les agrégats dans la base OCS GE génèrent une forte sous-estimation de la couverture végétale en ville. A noter que ces effets d'agrégats et de perte d'information sont bien plus forts pour les bases de données CLC ou Urban Atlas puisque les seuils minima de sélection de ces deux bases sont bien plus élevés que les seuils de OCS GE.

⁷ OCS GE version 1.1 description de contenu <https://geoservices.ign.fr/documentation/donnees/vecteur/ocsge/>



Figure 4. Perte de détail dans les bases de données d'occupation des sols dus aux seuils de sélection
Exemple 2 sur un quartier de petites villas a/ Orthophotographie b / BDTopo tous thèmes c/ OSC GE © IGN

Ainsi, si la BD OCS GE dispose bien des classes pertinentes pour l'étude du climat urbain avec SURFEX-TEB, les agrégats et découpages en objets limitent l'utilisation unique de cette base pour nos besoins. La recherche d'autres bases de données locales s'est avérée infructueuse. Il a donc été décidé de construire la partition par combinaison de la BDTopo® pour le bâti et les zones hydrographiques, et de la BD OCS GE pour la voirie, le sol nu et la végétation et d'utiliser une méthode d'apprentissage pour compléter les données manquantes. Le processus proposé commence par superposer les couches surfaciques bâti et hydro de la BDTopo® sur les couches voiries, sol nu et végétation basse de l'OCS GE, la couche bâtie découpant les autres couches. Le résultat de cette superposition produit un ensemble de polygones non typés (PNT) (figure 5) dont le type est défini par apprentissage. En figure 5, la flèche 1 représente le découpage par le bâti et la flèche 2 représente la création des zones non typées à classer.

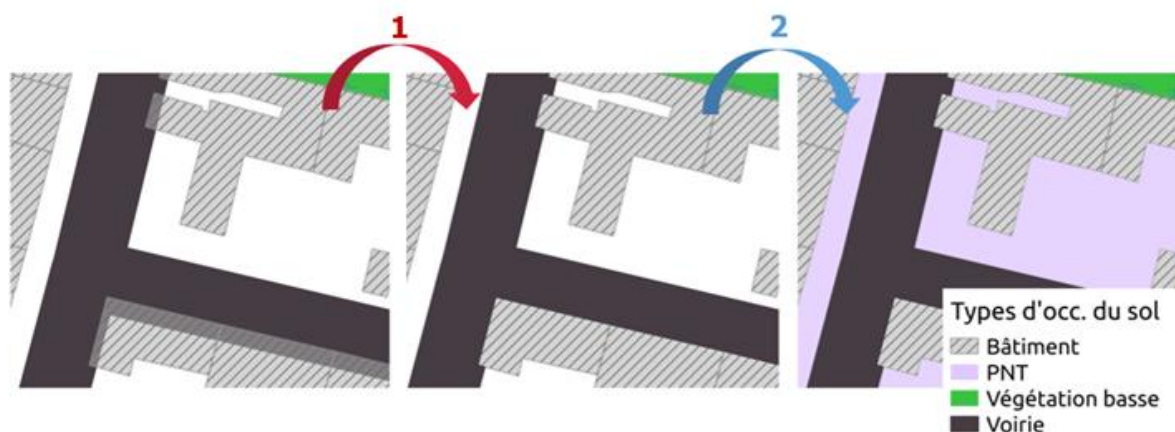


Figure 5. Superposition des couches pour isoler les polygones non typés (PNT) (Betou, 2024)

Au total après superposition des couches, seulement 5,54% de l'espace sur la métropole nantaise est non typé. Ces zones non typées sont en très grande majorité soit de la voirie soit de la végétation basse. Pour savoir comment affecter ces 5,54% de surface en voirie ou végétation basse, on utilise la classification des îlots urbains en USR (Unité spatiale de Référence (Bocher et al., 2018)). Cette classification est basée sur des indicateurs morphologiques urbains standardisés dédiés au climat urbain (voir (Leduc et al., 2025, ce numéro spécial)). Puis on utilise une image hyperspectrale disponible sur une partie du centre urbain pour calculer automatiquement les proportions de végétation dans ces zones. Cette image a été traitée par le Laboratoire de planétologie et Géoscience de Nantes Université, et est associée à un masque NDVI/EAUX/SOLS et un modèle numérique de hauteur (MNH). L'intersection

spatiale du MNH et du masque de l'image permet d'identifier la végétation haute (pixels représentant la végétation et pour lesquels la hauteur est $> 2\text{m}$) de la végétation basse. Après polygonisation, les surfaces de végétation sont intersectées à une description des îlots urbains (USR) permettant ainsi l'obtention de fraction surfacique de végétation par PNT et par USR. La proportion de voirie dans ces zones est réalisée par identification visuelle sur des zones tests. A l'issue de cette étape, il suffit ensuite de répartir ces proportions végétation basse / voirie dans les quartiers appartenant à la tâche urbaine de la métropole. Le détail des règles d'attribution est décrit dans (Betou, 2024).



Figure 6. Occupation des sols pour la paramétrisation de SURFEX avec les pourcentages végétation et voirie calculés.

Pour chaque zone non typée (PNT) un pourcentage de voirie et de végétation a pu être calculé et représenté sous la forme de camemberts en figure 6. La méthode proposée permet ainsi de construire une partition de la métropole de Nantes composée de bâti, voirie, surface d'eau, végétation basse, sol nu et de polygones mixtes caractérisés par un pourcentage de voirie et de végétation basse (Figure 6). Une fois cette couche d'occupation du sol préparée, on peut enfin paramétrer la composante occupation des sols du modèle de climatologie urbaine SURFEX-TEB (Masson et al., 2013). Ce modèle permet alors de calculer pour chaque maille le climat urbain d'aujourd'hui et de demain et d'étudier l'impact de nouveaux aménagements urbains sur le climat futur dans la métropole de Nantes (Betou 2024).

En l'absence de base de données d'occupation suffisamment résolue, en particulier pour la couche de végétation, l'utilisation de la BDtopo® couplée à OCS GE et complétée par un apprentissage à base d'image et de classification urbaine permet de générer une couverture d'occupation des sols dont la résolution est cohérente avec la taille des aménagements de végétalisation des villes et de la résolution utilisée pour le modèle climatique.

3. Construction de données d'occupation de sol et de morphologie urbaine pour la paramétrisation de modèles de climats urbains en cas de pénurie de données : le cas du grand Tunis

Tout comme la section précédente, l'objectif de ce travail sur Tunis est d'alimenter le schéma de surface SURFEX (Masson et al., 2013) couplé au modèle atmosphérique Meso-NH⁸ afin de simuler une canicule qui a eu lieu entre le 9 et le 13 juillet 2019.

Comme pour les travaux présentés en section 2, la surface doit être décrite comme une mosaïque de quatre types de couverts, en distinguant 1/ la mer, 2/ les sols naturels (sol nu, végétation), 3/ les lacs et les rivières et 4/ les zones urbaines. Les zones urbaines doivent être elles-mêmes décrites en cinq catégories : fraction de route, de bâtiment, de sol nu, de végétation basse et de végétation haute. Les données de surface doivent ainsi être traitées pour correspondre aux exigences de ce modèle. Cependant à Tunis, il y a de véritables problèmes de disponibilité et d'accès aux données. Les institutions tunisiennes, académiques comme professionnelles, font face à une pénurie de données urbaines qui est due, dans une certaine mesure, à un manque de moyens financiers et humains. L'enjeu est donc ici de collecter les données existantes accessibles et de construire les données manquantes afin de les structurer en indicateurs conformes aux exigences du modèle.

Dans cette optique, nous avons mobilisé, pour la construction de la base de données d'occupation du sol, des données provenant de diverses sources : des données collectées auprès de l'Agence d'Urbanisme du Grand Tunis (AUGT), des données Open Street Map (OSM) et des résultats de traitements par télédétection, en l'occurrence des données Sentinel. Grâce aux données Sentinel nous avons pu calculer : 1/ les cartes en Zones Climatiques Locales⁹ (figure 7) pour le grand Tunis construites en utilisant la méthode WUDAPT¹⁰ (Bechtel et al 2015) et 2/ les différentes strates de végétation. La méthode WUDAPT permet une classification supervisée qui repose sur des zones d'apprentissage correspondant aux 17 typologies de LCZ qu'il faut identifier et dessiner sur Google Earth. En partant de ces zones d'apprentissage et des images Sentinel 2a qui couvrent toute la région d'intérêt, une classification semi-automatique est effectuée sur le système d'information géographique SAGA. En ce qui concerne les données architecturales et de morphologie urbaine, nous les avons construites au moyen d'une collecte de données participatives sur le réseau social Facebook (Mhedhbi et al., 2019).

⁸ Le modèle Meso-NH est modèle atmosphérique de méso-échelle non-hydrostatique de la communauté française de recherche. Il permet de simuler une vaste gamme de phénomènes atmosphériques allant de l'échelle planétaire (quelques milliers de kilomètres) jusqu'à l'échelle des tourbillons (quelques mètres). Il a été développé par le Centre National de Recherches Météorologiques (URA 1357 CNRS/Météo-France) et le Laboratoire d'Aérodynamique (UMR 5560 UPS/CNRS)

⁹ Les Zones Climatiques Locales sont des zones uniformes en usage du sol et en hauteur de bâti, en matériaux de construction et en activité humaines. Elles peuvent s'étendre sur quelques centaines de mètres à quelques kilomètres (voir Leduc et al., 2025, ce numéro spécial)

¹⁰ WUDAPT : World Urban Database and Access Tools (<https://www.wudapt.org/>)

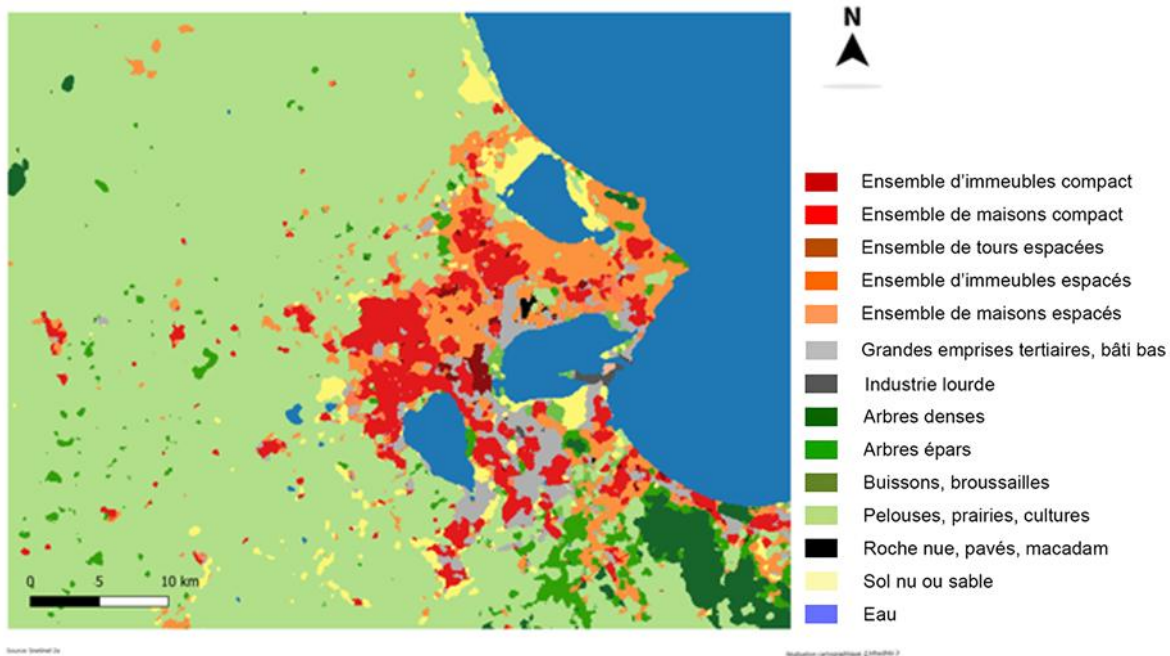


Figure 7. Carte en zones climatiques locales du Grand Tunis selon la méthode WUDAPT (Mhedhbi 2021).

La carte LCZ a ensuite été enrichie grâce à d'autres sources avec des données collectées localement et des données open source. Les principaux traitements ont consisté à homogénéiser les formats et les systèmes de projection cartographique. Pour ce faire, nous avons géocodé toutes les cartes, images et tables de données spatiales à notre disposition. Par la suite, nous avons fait une harmonisation de la projection cartographique en projection WGS84/ UTM zone 32 N (EPSG 32632), permettant ainsi la gestion, la superposition et le croisement de différentes données. Nous avons par la suite corrigé interactivement la géométrie de certains objets présentant des erreurs ou parfois privilégié une source à une autre. Dans notre chaîne de traitement, nous avons noté essentiellement des incohérences dues au manque de précision géométrique. Parmi les nombreuses erreurs rencontrées, nous citons à titre d'exemple d'un écart de près de 50% de la surface entre la couche représentant le lac de Tunis issue de OSM et celle issue des données de l'AUGT. Ce travail de contrôle et de corrections des données à partir de données disponibles a duré plusieurs mois et a permis de lever des ambiguïtés et de consolider les données sans que pour autant il ait été possible de certifier la qualité finale des données compte tenu de la multitude des sources non caractérisées par des métadonnées.

La carte LCZ ainsi construite et corrigée est un point de départ pour l'extraction de données nécessaires à la paramétrisation du modèle. Bien que destinée à l'étude du climat urbain, cette zone dépasse la tâche urbaine de Tunis. En effet l'analyse du climat urbain intègre toujours les espaces environnants participant au climat global.

Surfaces en eaux continentales et mer

À l'aide du logiciel GRASS, nous avons extrait de la carte LCZ les objets relevant de la classe G, qui correspond aux surfaces en eau. Cependant avec une résolution de la carte LCZ à 100 m, les cours d'eau ne sont pas détectés. Nous avons donc complété cette couche avec les données OSM relatives aux cours d'eau à écoulement pérenne qui traversent la région tunisoise. Les lignes de la couche vectorielle des oueds ont été regroupées et une zone tampon a été appliquée pour tenir compte de la largeur de leurs lits mineurs. Pour créer la couche des surfaces en eau maritime, nous avons exploité les objets relevant de la classe G de la carte des LCZ. L'application d'un masque sur les limites administratives du Grand Tunis a permis de séparer la mer des eaux intérieures.

Les diverses occupations du sol à l'intérieur de la zone urbaine

La zone urbaine est plus complexe que les autres couches. Elle est composée de plusieurs types de données comme les routes, le bâti et la végétation urbaine, elle-même composée à son tour de végétation haute, végétation basse et sols nus.

Les limites de la tâche urbaine : la couche Ville

Pour cartographier les différentes occupations du sol urbain, nous avons extrait les objets LCZ relevant des classes 1 à 10 ainsi que E (sol imperméable artificiel ou naturel). Ce périmètre urbain extrait de la carte LCZ a ensuite été comparé à la tâche urbaine issue de la base de données des Plans d'Aménagement Urbain (PAU) du Grand Tunis de l'AUGT. La base de données des PAU du Grand Tunis datant de 2013, comprend 35 PAU de différentes communes du Grand Tunis. Ces PAU décrivent entre autres les règles d'utilisation du zonage et les densités autorisées de construction. Cependant, les PAU ne couvrent généralement pas l'ensemble des communes, et selon un rapport de l'Agence Française de Développement en 2016, leur mise en œuvre est limitée, avec seulement 60 % de réalisation au cours de la dernière décennie. Cela justifie notre choix de ne pas avoir recours uniquement à cette source d'information pour délimiter la tâche urbaine mais de la combiner avec nos propres résultats de télédétection en l'occurrence les LCZ(s) urbaines. Nous avons donc construit la couche VILLE à partir des zones classées habitat, des zones civiques (emplacements réservés aux équipements publics existants à caractère administratif, culturel, éducatif, sanitaire, etc.) et des zones d'équipements (socio-collectifs, sanitaires, éducatifs, etc.) des zones industrielles, zones touristiques et des zones polyfonctionnelles. Cette couche nous a permis de réajuster les limites de la tâche urbaine en combinant les deux sources de données.

Les routes

Nous avons extrait le réseau routier de la région du Grand Tunis à partir d'OSM. Cette couche récupérée est linéaire avec des lignes segmentées. Le traitement réalisé sur QGIS a consisté à regrouper et éliminer les superpositions entre segments. Enfin, l'application d'une zone tampon a permis de définir des largeurs selon le type de routes. En se basant sur le standard de largeurs de routes de 7 m une zone tampon de 7 m a été appliquée à toutes les routes sauf les piétonnes (étiquetées « pedestrians ») qui sont essentiellement localisées dans la médina ou dans les quartiers très populaires où le bâti est très dense et les rues très étroites. Pour ces routes piétonnes une zone tampon de 2 m a été choisie. Enfin, pour les autoroutes, représentées dans la couche linéaire d'OSM par deux lignes, on a appliqué un tampon d'une largeur de 14 m. Nous avons ainsi défini des largeurs types puis agrégé ces zones par union géométrique. Nous avons fait l'hypothèse que les accotements n'existent que hors zone urbaine. Concernant les trottoirs, nous avons appliqué une zone tampon de 1.5 m de chaque côté des routes classées résidentielles. Cette couche de routes est complétée par les parkings issus de la base de données PAU de l'AUGT.

La végétation urbaine et sol nu

L'extraction de la végétation (haute, basse) et le sol nu est le second grand traitement de cette base de données. La donnée sur la végétation urbaine du Grand Tunis étant très lacunaire, nous devons trouver une méthode pour déterminer la végétation et sa stratification. Un traitement par télédétection avec des images Sentinel 2 nous a paru être une solution satisfaisante pour extraire la végétation. Nous avons appliqué une classification orientée objets pour pouvoir prendre en compte les propriétés spectrales, géométriques et texturales permettant de mieux identifier la végétation dispersée du Grand Tunis. Nous avons effectué la classification avec le logiciel libre de télédétection Orfeo Tool Box (OTB). La végétation a pu être extraite pour toute la région d'intérêt. Une matrice de confusion a été créée pour permettre de comparer les données classées et les données de référence que nous avons vérifiées par photo-interprétation. Nous avons obtenu une qualité moyenne de classification (Overall Accuracy de

60% et un indice kappa de 36%)¹¹. En dépit de cette qualité moyenne de la classification, ce travail de télédétection nous a permis d'avoir une première idée sur la distribution des différentes catégories de végétation (haute, basse, sol nu) sur le territoire du Grand Tunis. Il serait possible de passer par des images de meilleure résolution (SPOT, Pléiades) dont on arrive à mieux extraire la végétation haute et basse (Crombette, 2016; Nabucet, 2018) mais ces images ont un coût dont l'achat n'a pas pu être envisagé dans le cadre de nos travaux et qui serait difficile à généraliser dans une démarche méthodologique à destination des pays des Suds. La végétation obtenue grâce à notre méthode est découpée selon les limites de la tache urbaine. Puis, une vectorisation automatique des trois couches obtenues - la végétation haute, la végétation basse et le sol nu - rendent possible un calcul de la fraction de végétation urbaine (figure 8).

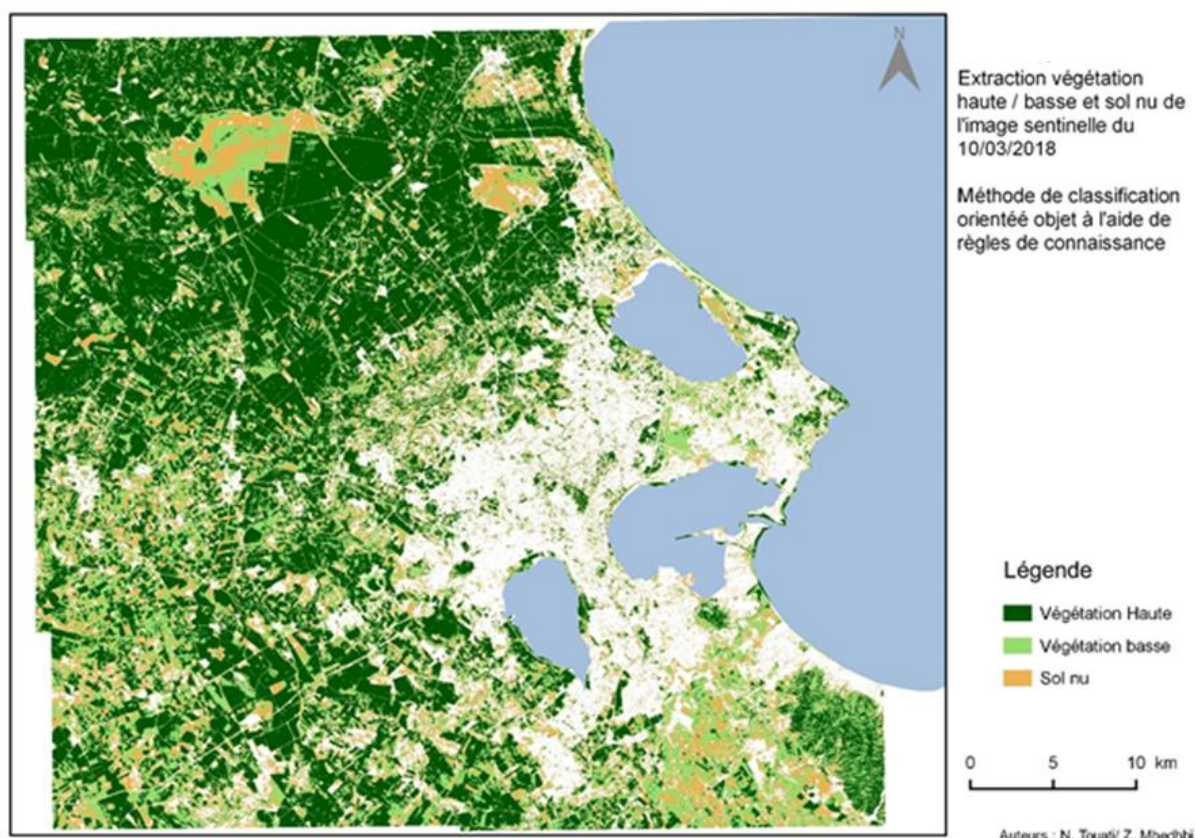


Figure 8. Végétation haute, basse et sol nu extraits d'un traitement de télédétection (Mhedhbi, 2021).

Le bâti

A Tunis, il n'existe pas de données sur les bâtiments. Pour récupérer cette information, nous déterminons le bâti par soustraction, comme étant le résidu des couches précédemment obtenues, soit :

$$\text{B\AA TI} = \text{VILLE} - (\text{ROUTE} + \text{VEGH} + \text{VEGB} + \text{SOL-NU})$$

La carte en figure 10 présente l'étendue du bâti dans la région du Grand Tunis. Le zoom sur une zone montre clairement le découpage opéré suite aux traitements effectués. A noter que cette couche décrit l'emprise sol des bâtiments. Pour les autres paramètres d'architecture une autre méthode sera proposée (voir ci-dessous).

¹¹ La précision globale et l'indice de kappa sont des indices classiques utilisés en traitement d'image pour estimer la qualité d'une classification. Une valeur de 36% est une fiabilité modérée.



Figure 9. Surfaces bâties du Grand Tunis (Mhedhbi 2021).

Les surfaces naturelles rurales

La couche de surface NATURE représente les surfaces naturelles non urbaines. Comme la précédente, elle est obtenue par soustraction au moyen de la formule suivante :

$$\text{Nature} = \text{LCZ} - (\text{MER} + \text{EAU} + \text{VILLE})$$

Notre méthode a permis d'affiner les contours de la zone rurale autour de la ville, mais la description de la végétation dans cette zone rurale reste générique. Nous ne détaillons pas les caractéristiques de cette végétation dans la mesure où il suffit, pour la modélisation atmosphérique du climat urbain que nous avons adoptée, d'avoir la délimitation de ces zones.

Les caractéristiques architecturales et morphologiques du Grand Tunis

Le modèle a également besoin d'informations architecturales et morphologiques telles que les hauteurs moyennes des bâtiments, leurs types, l'usage de chaque bâtiment, son âge, la présence éventuelle d'un système de climatisation, la nature des matériaux de construction et la couleur de l'enveloppe comme en section 2. En l'absence de BD sur les bâtiments il a fallu trouver comment décrire les paramètres types. La stratégie choisie pour produire ces données morphologiques urbaines pour le Grand Tunis consiste en une cartographie volontaire basée sur une approche participative. L'objectif est de collecter, à travers un questionnaire diffusé sur les réseaux sociaux, les données architecturales WUDAPT-L1[1] (hauteur, types, usages, fenêtres, etc). En effet, le fait que Tunis dispose depuis mars 2017 de l'outil Google Street View nous permet de tester le questionnaire et ensuite d'évaluer la pertinence et l'efficacité de la démarche en comparant les résultats de l'enquête avec ceux issus des images de rues du corpus Google Street View.

Nous avons pu collecter 110 réponses. La précision des réponses varie entre 81 % et 86 % pour la plupart des paramètres. L'étape suivante consiste à géolocaliser les réponses et à les placer sur la carte LCZ. Ce croisement avec la typologie des LCZ et son enrichissement avec d'autres données de littérature et de l'expertise locale nous a permis de proposer quelques valeurs pour caractériser les archétypes de bâtiments de l'agglomération tunisoise (Mehdhbi et al., 2019). La carte de la figure 11 montre l'un de ces indicateurs, à savoir les types de bâtiments de l'agglomération. L'ensemble des indicateurs construits (les types de bâtiments, leurs usages, leur période de construction, etc.) ont été mobilisés pour alimenter le schéma de surface SURFEX couplé au modèle atmosphérique Meso-NH afin de simuler une canicule qui a eu lieu entre le 9 et le 13 juillet 2019 (Mhedhbi et al, 2022).

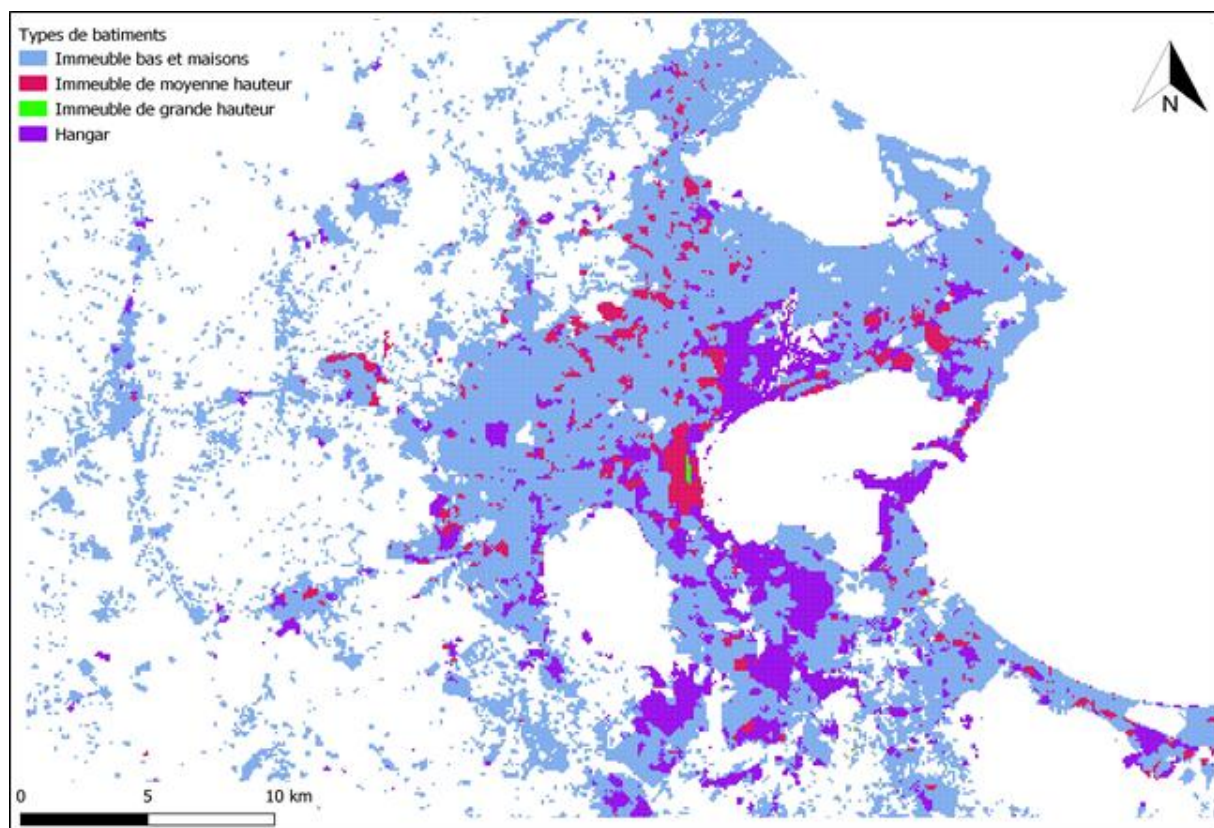


Figure 10. Carte de types de bâtiments (Mhedhbi, 2021).

Dans ce contexte spécifique de pénurie de données, la chaîne de traitements mise en œuvre est basée sur une combinaison de techniques d'analyses vectorielle et matricielle et sur différents types de données issues de sources différentes. Ce travail permet non seulement d'alimenter les modélisations climatiques, mais également de jouer un rôle d'objet intermédiaire pour discuter de ces enjeux émergents avec les acteurs de l'urbanisme du Grand Tunis.

4. Les City Information Models 3D comme pourvoyeurs de données sur l'espace support : l'exemple du quartier La Vallée à Châtenay-Malabry

Cette section présente une démarche d'exploitation de modèles numériques représentant des morceaux de ville de manière très détaillée pour en extraire une description géométrique simplifiée utilisable pour des analyses climatiques à l'échelle d'un espace public ou d'un quartier.

Depuis quelques années, des City Information Models (CIM), parfois aussi appelés jumeaux numériques, sont produits sur certains territoires. Nous pouvons citer par exemple le CIM du Belvédère à Bordeaux (Duloup et Fredon, 2019), celui du quartier La Vallée à Châtenay-Malabry (Deprêtre et al., 2023) ainsi que les jumeaux numériques de Kalasatama, produit sur un quartier d'Helsinki, (City of Helsinki, 2019) et de la métropole de Rennes (IGN, 2021 et Le Breton et al., 2021). Bien que les termes CIM et jumeaux numériques ne soient pas synonymes, ils sont tous les deux employés pour désigner des modèles 3D urbains (Deprêtre et al., 2022).

Le potentiel des données issues des CIM est souligné depuis plusieurs années par de nombreux auteurs dans la littérature scientifique. Dall'O et al. (2020) mettent en avant le CIM comme outil pour répondre aux besoins de transition écologique de villes devenant de plus en plus complexes, tandis que d'autres présentent le CIM comme étant une plateforme permettant d'intégrer dans un système les informations nécessaires au développement de villes plus durables (Amorim, 2015; Billen et al, 2015; Amorim, 2016; Thompson et al, 2016; Almeida and Andrade, 2018; Dantas et al, 2019; Petrova-Antonova and Ilieva, 2019; Sielker and Sichel, 2019).

A l'heure actuelle, ces modèles sont surtout produits par des collectivités et acteurs publics en charge de territoires urbains et avec des ressources leur permettant d'acquérir des données 3D spécifiques à leur territoire ou lors de projets urbains de construction ou de transformation d'une zone urbaine. Dans ce dernier cas, les modèles sont souvent réalisés par les intervenants du projet puis transmis à la maîtrise d'ouvrage une fois le projet livré. Ainsi, ces modèles ne vont a priori pas couvrir la totalité du territoire national. Néanmoins, ces modèles sont susceptibles d'être disponibles pour des milieux urbains particulièrement soumis à la pollution et à des questions de surchauffe urbaine. Nous explorons ici la possibilité d'en extraire des données sur l'espace support utilisables pour des simulations climatiques numériques à l'échelle d'un espace public ou d'un quartier, c'est-à-dire permettant une modélisation géométrique explicite des bâtiments, de l'occupation du sol et de la végétation, alors que comme le montre la section 2 sur le territoire français les données standards manquent de précisions pour les modélisations climatiques.

Concrètement, les maquettes numériques urbaines recouvrent des réalités hétérogènes, en fonction des territoires concernés (Deprêtre et Jacquinod, 2021). Il est alors difficile de monter en généralité sur leurs apports possibles en tant que fournisseur de données pour l'espace support pour des simulations numériques climatiques à l'échelle quartier. Néanmoins, un travail exploratoire a montré à la fois le potentiel de ce type de modèle et les obstacles à lever pour pouvoir en extraire une modélisation géométrique des bâtiments et des espaces publics (voiries et végétation) contenant des informations sémantiques sur les surfaces (imperméabilité, matériaux éventuels), les bâtiments (matériaux) et la végétation (espèces) (Deprêtre et al., 2023). Ce travail exploratoire n'était pas centré spécifiquement sur l'exploitation pour des analyses climatiques, mais sur la création d'un modèle utilisable pour une variété d'applications à l'échelle quartier, dont des analyses climatiques à l'échelle d'espaces publics, à l'image du travail de Sirakova (2018) ou d'une partie des analyses de Delval et al. (2018).

Le projet de recherche-action E3S (Ecoquartier smart, sobre et sécurisé), rassemblant des praticiens d'Eiffage et des chercheurs de l'Université Gustave Eiffel pour développer des innovations urbaines, a permis d'explorer les usages urbains d'un CIM de type BIM+ (Building Information Model étendu à l'échelle quartier, cf. Gil, 2020). Le terrain d'étude et d'expérimentation était le quartier La Vallée à Châtenay-Malabry, qui s'étend sur 20 hectares. Un atelier rassemblant praticiens et chercheurs a été dédié au CIM du projet, afin de recenser les usages possibles de ce modèle numérique à l'échelle urbaine et d'évaluer leur faisabilité. Le projet de quartier, découpé en plusieurs phases, était en cours de conception et de construction (selon les phases) pendant la durée du projet E3S. Ainsi nous avons pu accéder au CIM en cours de constitution, expérimenter l'usage des données du CIM à l'échelle urbaine et établir, en lien avec les praticiens, des recommandations pour permettre l'extraction de données nécessaires à la modélisation de l'espace support à l'échelle quartier depuis un BIM+. En effet le BIM+ est trop détaillé pour la réalisation d'analyses, notamment climatiques, reposant sur des simulations numériques.

Le CIM de type BIM+ du projet La Vallée est produit pour le compte de la maîtrise d'ouvrage sous l'égide d'une équipe de CIM management par l'ensemble des concepteurs au fur et à mesure de l'avancée du projet. Il est utilisé dans les phases de conception et de construction pour faire de la coordination entre les métiers et corriger avant construction d'éventuels conflits entre les éléments conçus par chaque corps de métier. Il est composé de plusieurs modèles numériques assemblés ensuite au sein d'un modèle unique à l'échelle de la ZAC par un BIM manager. Les producteurs des maquettes ont chacun des spécialités différentes - Voirie et réseaux divers (VRD), Paysage, Architecture, Gros-Œuvre - et travaillent au sein d'entités différentes. Concrètement, le CIM est un assemblage de plusieurs maquettes numériques, représentant chacune une partie des aménagements : une pour les bâtiments, une pour les réseaux enterrés, une pour la voirie, une pour les aménagements urbains (mobilier urbain par exemple).

Les objets représentés dans le CIM sont caractérisés par un ensemble de propriétés propre à chaque type d'objet et défini dans la convention BIM réalisée par un BIM Manager, missionné pour coordonner l'ensemble des maquettes numériques du projet. La figure 11 montre une vue générale du CIM.



Figure 11. *Vue générale du CIM du projet La Vallée à Châtenay-Malabry (92), © Urbanita Architecture, Agence Pietri, Atelier Alfonso Femia, Leclercq Associés, Atelier M3, Atelier 2/3/4, BASE, OTCI*

Les représentations géométriques sont de précision submétrique et les informations associées à chaque objet sont nombreuses incluant par exemple les matériaux et leur résistance thermique, ainsi que les surfaces, périmètres et volumes précis propres à chacun. En cela, elles sont bien trop détaillées lorsque l'on s'intéresse à la morphologie à l'échelle urbaine pour les études de climat. Par ailleurs, les objets peuvent être modélisés et renseignés de manière différente selon les intervenants, en fonction des méthodes et pratiques instituées au sein de chaque entité participant à la conception et à la réalisation du projet. L'enjeu est alors de pouvoir sélectionner et agréger les informations dont on a besoin pour reconstituer un modèle géométrique à l'échelle du quartier, malgré le niveau de détail excessif pour l'échelle urbaine et les différences de modélisations entre les modèles numériques des différents intervenants.

Dans le cadre de sa thèse, Adeline Deprêtre a expérimenté les utilisations possibles du CIM pour l'évaluation de l'intensité urbaine d'un quartier (Deprêtre, 2023). Elle a proposé un indice d'intensité des usages pour aider à concevoir des quartiers plus compacts, limitant l'artificialisation et agréables à vivre pour les usagers. Pour calculer les différents paramètres associés à son indice¹², elle a réalisé une maquette simplifiée du quartier, par extraction et agrégation d'une partie des données du CIM. L'objectif était de pouvoir automatiser le calcul des paramètres composant l'indice d'intensité des usages. Ce modèle contient une description géométrique des enveloppes extérieures des bâtiments avec leurs principaux matériaux, une description de l'utilisation du sol, et pour les surfaces imperméabilisées, des matériaux utilisés, le mobilier urbain et les arbres avec leur espèce. Ainsi, en matière d'imperméabilisation des sols, cette maquette simplifiée permet de calculer automatiquement les surfaces perméables et imperméables, en pondérant la perméabilité en fonction des types de surface et de leurs matériaux (voir figure 12). Il permet également de calculer le volume intérieur des bâtiments, les superficies totales de déperdition des parois des bâtiments, c'est-à-dire, qui sont en contact avec l'extérieur (façades et toitures), et de disposer d'une représentation précise des volumes bâtis et des voiries réparties par matériaux ou par type d'usagers les empruntant (figure 13).

¹² L'indicateur de l'intensité des usages d'un quartier évalue le volume des actions et des interactions sociales et spatiales qu'un quartier peut offrir aux usagers sur une période de temps donné. Il est calculé à partir de 27 paramètres qui permettent de quantifier et/ou de qualifier l'état et la qualité de l'environnement spatial (par exemple via des paramètres morphologiques décrivant les ambiances urbaines ou les gabarits), l'attractivité et l'accessibilité du quartier (par exemple via des paramètres sur les transports ou la diversité fonctionnelle) et l'environnement social du quartier (par exemple via des indicateurs démographiques).



Figure 12. Identification grâce au CIM des surfaces imperméables, ici en gris © Urbanita Architecture, Agence Pietri, Atelier Alfonso Femia, Leclercq Associés, Atelier M3, Atelier 2/3/4, BASE, OTCI

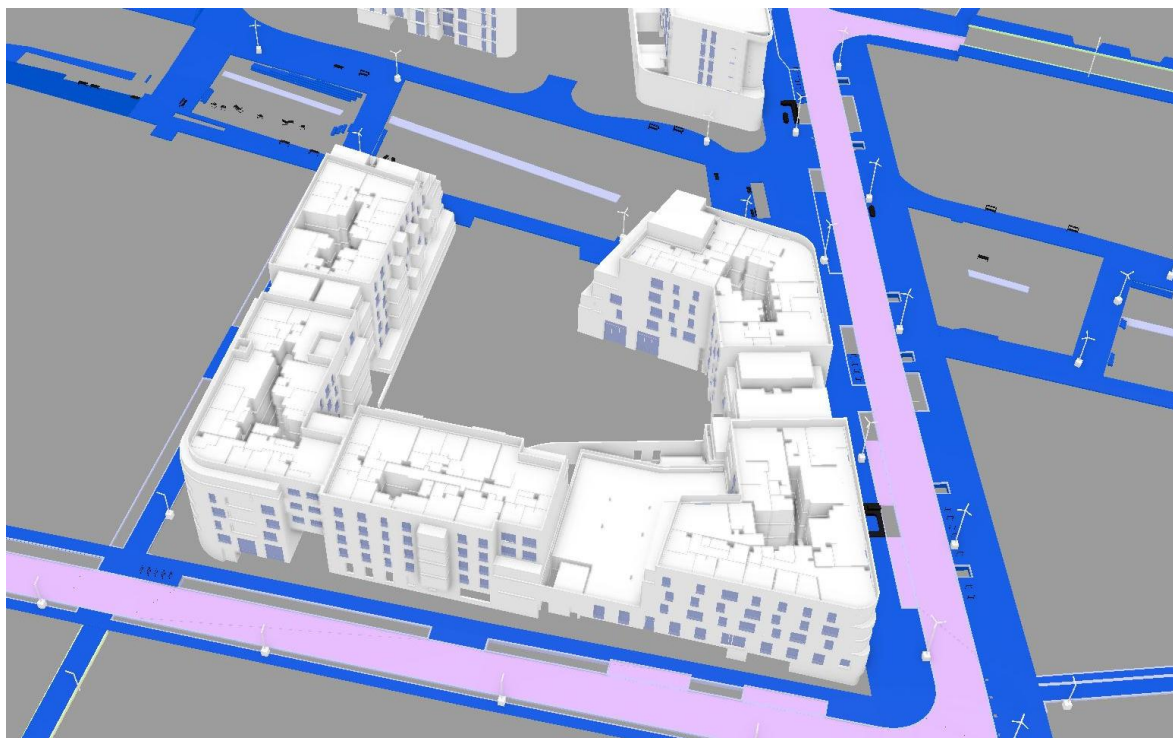


Figure 13. Identification grâce au CIM des surfaces allouées aux piétons, en bleu, des surfaces allouées aux transports motorisés et cycles, en rose © Urbanita Architecture, Agence Pietri, Atelier Alfonso Femia, Leclercq Associés, Atelier M3, Atelier 2/3/4, BASE, OTCI

Un travail de simplification géométrique, basé sur le regroupement d'objets en fonction de leurs caractéristiques sémantiques a également été réalisé (par exemple regrouper les éléments de chaussées par type de voie). Le modèle ainsi simplifié peut servir de support à des simulations numériques nécessitant une description géométrique et sémantique de l'espace support avec un nombre d'objets géométriques très grandement limité par rapport au niveau du détail d'un modèle BIM.

Le processus d'extraction des données pour constituer la maquette simplifiée a été long et fastidieux. En effet, selon les intervenants du projet, les modèles numériques sont structurés et/ou renseignés différemment. Ainsi, il a fallu appliquer à chaque modèle isolément un jeu de filtres spécifiques. De plus, l'échelle d'origine de la modélisation demande des sélections de très nombreux objets à agréger pour qu'ils soient utilisables à l'échelle urbaine, les différences de modélisation venant là encore compliquer grandement la tâche. Enfin, pour certaines surfaces comme la voirie, il n'existait pas au début du projet de préconisations précises sur la manière de subdiviser les voiries en objets permettant une réutilisation à l'échelle du quartier. Ainsi, les voiries pouvaient, dans les premières versions du CIM, être simplement divisées en faces représentant les variations du relief (correspondant à une triangulation), chaque face ayant comme propriétés des informations géométriques et de matériaux. Pour une exploitation à l'échelle du quartier, et pour obtenir un nombre minimum d'objets afin de faciliter l'utilisation dans des outils de simulation numérique, il est nécessaire de pouvoir par exemple regrouper automatiquement les objets modélisés par type de voies. Cela a été rendu possible grâce à des échanges avec les personnes en charge de ces modèles, en leur proposant notamment d'ajouter des propriétés indiquant les usagers de chaque voie (piétons, cyclistes, etc.).

Afin de permettre et de faciliter la création de maquette simplifiée à l'échelle quartier à partir du CIM de type BIM+, deux des axes d'amélioration identifiés pour le CIM du quartier sont essentiels dans le cas d'analyses climatiques reposant sur une modélisation géométrique explicite des objets du territoire. Le premier concerne l'harmonisation des règles de formalisation des données sémantiques aux objets modélisés. Dans les premières versions du CIM, par exemple, certaines propriétés des murs, comme le fait qu'ils soient intérieurs ou extérieurs au bâtiment modélisé, étaient bien présentes pour tous les murs, mais stockées de manière différente selon les lots immobiliers, ou, plus précisément, selon les pratiques des intervenants modélisant ces lots. Le second axe d'amélioration porte sur l'anticipation des besoins de réutilisation du CIM et, plus précisément, sur l'ajout de certaines propriétés aux objets dont la modélisation était prévue dans le CIM. Par exemple, l'ajout dans les propriétés des éléments de voirie modélisés de données sur les usagers des voies permet de faire des regroupements d'éléments géométriques pour réduire le nombre d'entités modélisées et notamment le nombre de faces 3D à prendre en compte par les algorithmes de simulation numérique.

Les échanges avec les acteurs du projet ont montré que, si ces préconisations sont communiquées aux producteurs des maquettes numériques en amont, elles peuvent être prises en compte sans grandes difficultés par les différents intervenants. Au contraire, la reprise d'une modélisation existante pour respecter des contraintes supplémentaires peut s'avérer très chronophage. Ainsi, dans la mesure où une utilisation pour constituer un modèle de l'espace support à l'échelle urbaine est anticipée et des préconisations établies en amont de la production de ces modèles, leur potentiel pour les études climatiques est réel, que ce soit pour alimenter des modèles avec des données précises sur l'occupation du sol (surfaces de voirie, de végétation, perméabilité des matériaux de surfaces), ou pour produire des modèles 3D de la morphologie urbaine pour des simulations physiques d'écoulement de l'air, de rayonnements, et qui utilisent des représentations explicites des objets urbains.

Conclusion : repenser les spécifications des données support pour l'étude du climat urbain

Comme nous l'avons souligné en introduction le changement climatique nous incite à repenser les villes et en particulier l'aménagement urbain pour mieux lutter contre les îlots de chaleur et les épisodes d'inondation. Pour cela la simulation du climat urbain est un formidable outil qui peut permettre de comparer les impacts de nouveaux aménagements soumis à des épisodes de canicules ou d'inondation par rapport à une ville qui ne se serait pas adaptée. Pour pouvoir réaliser ces analyses comparatives il faut être en mesure de paramétrer les modèles climatiques avec des données décrivant l'espace géographique avec un niveau de détail compatible avec la taille des aménagements envisagés. Dans cet article, en nous appuyant sur des travaux de recherche récents, nous avons donc examiné la paramétrisation d'un modèle de climatologie urbaine avec des données topographiques. Les exemples présentés dans cet article proposent des méthodes permettant le calcul de ces données à partir de données

disponibles. Dans le cas de la France, si les données de bâti, des rues et d'hydrographie disponibles dans la BDTopo ® de l'IGN sont satisfaisantes, les données décrivant les sols imperméables, la végétation au sol ou en canopée ne sont pas à la hauteur des enjeux. L'analyse que nous avons faite montre en effet que les seuils de sélection utilisés dans la BD Topo ® ou dans la BD OCS GE sont aujourd'hui bien trop élevés et passent à côté de l'information pertinente. Par ailleurs, ces manques dans les données de l'espace support se font sentir dans de nombreux pays, comme le montre l'exemple de la Tunisie, où l'absence de base de données de référence rend la situation encore plus compliquée. Dans les deux cas, des solutions sont néanmoins proposées pour paramétrer au mieux les modèles climatiques. Le nouveau prototype CoSIA de détection de l'occupation des sols à partir d'images haute résolution et d'intelligence artificielle pour alimenter la base de données OCS GE pourrait apporter une réponse de grande qualité dans les années à venir sur le territoire français, en assumant une marge d'erreur de classification.

Enfin de nouvelles perspectives sont offertes par les données grande échelle de type CIM. Lors d'un projet urbain de grande ampleur tel que le réaménagement d'un quartier, les aménageurs et les promoteurs produisent et utilisent des données géographiques très précises conçues pour définir, rénover, construire un quartier. Ces données sont pour l'instant hétérogènes, mais pourraient être une formidable source d'information pour les futures analyses du climat urbain mais aussi du bien être local lié aux conditions atmosphériques (dont le renouvellement de l'air, l'ensoleillement). Ces données pourraient par exemple compléter la base de données nationale des bâtiments (BDNB) utilisée pour la rénovation énergétique (accessible sur <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-de-donnees-nationale-des-batiments/>). Aujourd'hui un important travail reste à mener pour définir les standards de ces données CIM, leur interface avec les modèles climatiques et leurs conditions d'utilisation, mais on peut penser qu'elles participeront un jour à la description de l'espace support au même titre que la BDTopo ® et que l'OCS GE. Pour autant ; la couverture du territoire français sous la forme de CIM étant un travail considérable, on peut penser qu'il serait pertinent de revoir les spécifications des bases de données nationales topographiques et d'occupation des sols pour mieux accompagner toutes les villes et territoires dans leur trajectoire d'adaptation aux défis climatiques.

Bibliographie

- Almeida F., M. Andrade, 2018, Considerações sobre o conceito de City Information Modeling. In Situ Revista Científica do Programa de Mestrado Profissional em Projeto, Produção e Gestão do Espaço Urbano, v.4, 21 38.
- Amorim A. L. (2015) Discutindo city information modelling (CIM) et conceitos correlatos. Gestão & Tecnologia de Projetos, vol. 10, no 2. <https://doi.org/10.11606/gtp.v10i2.103163>.
- Amorim A. L. (2016). Cidades Inteligentes e City Information Modeling. Blucher Design Proceedings, 481 488. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2016-440>
- Bailly A., H. Beguin, R. Scariati, 2016, Chapitre 4. L'espace géographique. Dans : A. Bailly, H. Beguin & R. Scariati (Dir), Introduction à la géographie humaine (pp. 61-71). Paris: Armand Colin. <https://doi.org/10.3917/arco.baill.2016.01.0061>
- Bechtel B., P. J. Alexander, J. Böhner, J. Ching, O. Conrad, J. Feddema et al., 2015,. Mapping local climate zones for a worldwide database of the form and function of cities. ISPRS International Journal of Geo-Information, 4(1), 199-219.
- Bernard E., 2021, Réponse Hydro-climatique de Paris et sa petite couronne, Thèse de doctorat. Université Toulouse 3.
- Bernard J., T. Leduc, A. Rodler, A. Merville, H. Hamdi, 2025, Geoclimatic modeling: tools, limits and outlooks, Risques urbains, this issue
- Betou F., 2024, Méthodologie pour l'étude d'impact hydro-climatique du changement climatique : modélisation numérique à l'échelle de la métropole nantaise. Thèse de doctorat soutenue le 18/12/2024 à l'université de Nantes.
- Betou F., K. Chancibault, E. Gaume, A. Ruas, 2022, Modélisation hydro-climatique de la métropole nantaise : préparation des données d'occupation du sol. JDHU - Journées Doctorales en Hydrologie Urbaine 2022, Oct 2022, Lyon, France. fh1-04049561f
- Biljecki F., H. Ledoux, J. Stoter, 2016, An improved LOD specification for 3D building mod-els. Computers, Environment, and Urban Systems, vol. 59, pp. 25-37.
- Billen R., A.-F. Cutting-Decelle, C. Métral, G. Falquet, S. Zlatanova, O. Marina, 2015, Challenges International Journal of 3-D Information Modeling, 4(2), 68 76. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-1677-4.ch016>

- Bocher E., G. Petit, J. Bernard, S. Palominos, 2018. A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain. *Urban Climate* 24, 153–174. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.008>
- Bocher E., J. Bernard, E. Wiederhold, F. Leconte, G. Petit, S. Palominos, C. Noûs, 2021, GeoClimate: a Geospatial processing toolbox for environmental and climate studies. *Journal of Open Source Software*, 6(65), 3541. <https://doi.org/10.21105/joss.03541>
- City of Helsinki, 2019, The Kalasatama Digital Twins Project -The final report of the KIRA-digipilot project
- Copernicus, 2020, Urban Atlas Mapping Guide v6..3 (p. 48) [Technical report]. European Commission. <https://land.copernicus.eu/en/products/urban-atlas>
- Crétat J., Y. Richard, B. Pohl, et al., 2024, Impact of topography and land cover on air temperature space-time variability in an urban environment with contrasted topography (Dijon, France, 2014–2021). *Theor Appl Climatol* 155, 1941–1958 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04742-4>
- Crombette P., 2016, Contribution des technologies satellitaires Pléiades à l'étude des trames vertes urbaines: entre maintien des connectivités écologiques potentielles et densification des espaces urbains (Doctoral dissertation, Université Toulouse le Mirail-Toulouse II).
- Dall'O' G., A. Zichi, M. Torri, 2020, Green BIM and CIM: Sustainable Planning Using Building Information Modelling . In *Green Planning for Cities and Communities: Novel Incisive Approaches to Sustainability*, édité par Giuliano Dall'O', 383-409. Research for Development. Cham: Springer International Publishing, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41072-8_17.
- Dantas H. S., J. M. M. S. Sousa, H. C. Melo, 2019, The Importance of City Information Modeling IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 225, 012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012074>
- Delval T., Jolibois A., Carré S., Aguinaga S., Mailhac A., Brachet A., Soula J., Deom S., 2018, Building/city information model for simulation and data management. In : Karlshøj J., Scherer R. (éd.), *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, CRC Press. pp. 137-145.
- Deprêtre A., 2023, L'intensité urbaine comme aide à l'amélioration : conception d'un indice axé sur les usages et d'une méthode pour l'évaluation de ses variables basée sur un CIM, Thèse soutenue à l'Université de Mons, 29 juin 2023
- Deprêtre A., A. Mielniczek, F. Jacquinod, 2023, Le City Information Modelling (CIM) au service d'un projet urbain : retour d'expérience sur la première phase de mise en œuvre du CIM d'un quartier, *Flux* N° 133, n° 3 (25 octobre 2023): 57-75. <https://doi.org/10.3917/flux1.133.0057>
- Deprêtre A., F. Jacquinod, 2021, Evaluation urban intensity through a city information model - intermediate results from an action research project , *Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2021, VIII-4/W2-2021, pp.153-160
- Deprêtre A., F. Jacquinod, A. Mielniczek 2022, Exploring digital twin adaptation to the urban environment: comparison with CIM to avoid silo-based approaches, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-4-2022, pp.337 – 344
- Duloup V., V. Fredon, 2019, A Case Study of BIM Design for a Smart City with the Architecture, Engineering & Construction Collection, Autodesk University, p. 23
- Faroux S., A. T. Kaptué Tchuenté, J.-L. Roujean, V. Masson, E. Martin, P. Le Moigne, 2013, ECOCLIMAP-II/Europe: a twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, *Geosci. Model Dev.*, 6, 563-582, doi:10.5194/gmd-6-563-2013, 2013. <http://www.geosci-model-dev.net/6/563/2013/gmd-6-563-2013.html>
- Gil, J., 2020, City Information Modelling: A Conceptual Framework for Research and Practice in Digital Urban Planning. *Built Environment* 46, no 4, pp. 501-527. <https://doi.org/10.2148/benv.46.4.501>.
- IGN, 2021, Smart City. Rennes la pionnière, *IGN Magazine*, 102, pp. 8-11
- Le Breton M.-A., M. Girardeau, H. Bailleul, 2021, From Open Data to Smart City Governing Innovation in the Rennes Metropolitan Area (France), *International Journal of E-Planning Research*, 10(4), 17–38. <https://doi.org/10.4018/IJEPR.20211001.0a2>
- Leduc T., J. Leconte, J. Bouyer, J. Hidalgo, 2025, 'Données dérivées et classifications standards pour les modèles de simulation climatique urbaine et l'analyse territoriale, *Risques Urbains*
- Masson V., P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, et al, 2013, The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, *Geosci. Model Dev.*, 6, 929–960, <https://doi.org/10.5194/gmd-6-929-2013>, 2013.

- Masson V., W. Heldens, E. Bocher, M. Bonhomme, B. Bucher, C. Burmeister, C. de Munck, T. Esch, J. Hidalgo, F. Kanani-Sühring, Y.-T. Kwok, A. Lemonsu, J.-P. Lévy, B. Maronga, D. Pavlik, G. Petit, L. See, R. Schoetter, N. Tornay, ... J. Zeidler, 2020, City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate*, 31, 100536. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100536>
- Mhedhbi Z., 2021, Construire une expertise cliamtique pour mettre à l'agenda l'adaptation au changement climatique dans la planification et l'aménagement urbains. Le cas du Grand Tunis. Thèse de doctorat de l'université de Toulouse 2 soutenue le 5 mars 2021.
- Mhedhbi Z., J. Hidalgo, C. de Munck, S. Haouès-Jouve, N. Touati, V. Masson, 2022, Tool adjustments to support climate adaptation in urban planning for southern cities: The case of Greater Tunis, Tunisia », *Cybergeog: European Journal of Geography* , DOI : <https://doi.org/10.4000/cybergeog.39297>
- Mhedhbi Z., V. Masson, J. Hidalgo, S. Haouès-Jouve, 2019, Collection of refined architectural parameters by crowdsourcing using Facebook social network: Case of Greater Tunis. *Urban Climate*, 29, 100499.
- Nabucet J., 2018, Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain (Doctoral dissertation, Université Rennes 2).
- ORFEO Toolbox Software Guide, 2008. <http://otb.cnes.fr>
- Petrova-Antonova D., S. Ilieva, 2019, Methodological Framework for Digital Transition and Performance Assessment of Smart Cities. 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech), 1 6. <https://doi.org/10.23919/SpliTech.2019.8783170>
- Pumain D., T. Saint-Julien, 2010, Chapitre 1. Information géographique et espace. Dans Pumain et Saint-Julien (Dir), *Analyse spatiale: Les localisations* (pp. 9-55). Paris: Armand Colin.
- Ruas A., A. Bianchin ,2002, Echelle et niveau de détail dans A. Ruas (Dir) *Généralisation et représentation multiple*. Collection IGAT ISBN 2-746-0494-0 Paris : Lavoisier 2002.
- Sielker F., A. Sichel,2019, Overcoming barriers to information modelling in socially responsible cities. <https://doi.org/10.17863/CAM.43318>
- Sirakova T. A., 2018, Urban Planning: from GIS and BIM straight to CIM. Practical application in the urban area of Porto. Thèse de Master en ingénierie civile soutenue à l'Université de Porto.
- Thompson E. M., P. Greenhalgh, K. Muldoon-Smith, J. Charlton, M. Dolník, 2016, Planners in the Urban Planning, 1(1), 79 94. <https://doi.org/10.17645/up.v1i1.556>
- Tornay N., R. Schoetter, M.Bonhomme, S. Faraut, V. Masson, 2017, GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings =for urban climate and building energy consumption simulations, *Urban Climate*, Volume 20, 2017, Pages 75-93, ISSN 2212-0955, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.03.002>.