

RAPPORT D'ETUDE

Juin 2021

SCO SatLCZ

Pléiades © CNES © IGN
Distribution Airbus D&S

Cartographie LCZ par satellite

SCO SatLCZ

Cartographie LCZ par satellite

Affaire suivie par

Dominique HEBRARD – DTer Sud-Ouest / Agence de Toulouse / groupe OSECC
Tél. : +33(0)5 62 25 97 52
Mél. : dominique.hebrard@cerema.fr
Site de Toulouse : 1 avenue du Colonel Roche – 31 400 Toulouse

Références

N° affaire : C20ST0138

Partenaire(s) : Airbus Defence & Space, CNES

Devis n° D20ST0138-1 du 26/11/2020

Rapport	Nom	Date	Visa
Établi par	Benjamin PICCININI		
	Dominique HEBRARD		
Relu par	Teodolina LOPEZ		
	Jean-Charles PRUVOST (Airbus D&S)		
Validé par			

Résumé de l'étude :

(10 lignes maximum)

SOMMAIRE

1. L'îlot de Chaleur Urbain.....	1
1.1. Ingénierie intégrée.....	1
1.2. Zones Climatiques Locales.....	1
2. Méthode développée par le Cerema.....	2
2.1. Les données nécessaires à la classification LCZ.....	3
2.1.1. Les unités morpho-climatiques urbaines.....	3
2.1.2. La connaissance du bâti et de l'occupation du sol.....	3
2.2. Historique de l'algorithme LCZ Cerema Sat'.....	4
2.2.1. L'algorithme analytique Stewart & Oke.....	4
2.2.2. Les algorithmes intermédiaires.....	6
2.2.3. L'algorithme Cerema opérationnel.....	6
3. Implémentation de l'algorithme opérationnel.....	8
3.1. Méthode générale.....	8
3.1.1. La segmentation des tissus urbains.....	8
3.1.2. Limites à lever et améliorations.....	8
3.1.3. Schéma général de la méthode.....	9
3.2. Démarche de mise en œuvre.....	10
3.3. Conclusion sur la mise en œuvre de la version finale de l'algorithme LCZ.....	15
3.4. Outils.....	16
3.4.1. Scripts automatiques.....	16
3.4.2. Modeleurs QGIS.....	16
4. Analyse de l'impact des données d'entrée.....	18
4.1. Présentation des données de l'étude.....	18
4.1.1. Les données de l'étude.....	18
4.1.2. Qualité des images.....	19
4.2. Évaluation qualitative des données d'entrée.....	20
4.2.1. Comparaison des bâtis 3D.....	20
4.2.2. Contrôle des OCS par tirage aléatoire de points.....	21
4.2.3. Résultat statistique de la comparaison des OCS.....	21
4.2.4. Conclusion sur la qualité des données d'entrée.....	22
4.3. Impact sur le résultat des LCZ.....	23
4.3.1. Impact du maillage.....	23
4.3.2. Impact du bâti 3D et de l'OCS.....	26
4.4. Conclusion sur l'impact des données d'entrée.....	30
5. Reproductibilité sur Rayong.....	32
6. Usage opérationnel à Lille.....	34
6.1. LCZ et indicateurs sous-jacents.....	34
6.2. Indice de vulnérabilité socio-économique.....	35
Annexes.....	36

Index des figures

Figure 1: Fiche descriptive LCZ 3.....	5
Figure 2 : Méthode opérationnelle de cartographie des LCZ.....	9
Figure 3 : Comparaison des superficies de classes LCZ fonction des versions de logigramme.....	12
Figure 4 : Cartographies LCZ fonction des versions de logigramme.....	13
Figure 5 : Exemple de disparités entre les versions intermédiaires (v9.4) et opérationnelle (v9.5.2).....	14
Figure 6 : Fenêtres input/output des modeleurs QGIS.....	16
Figure 7: Image commande Airbus 2020.....	19
Figure 8: Image commande CNES 2017.....	19
Figure 9 : Impact du maillage sur les superficies des classes LCZ, sur la base des données Ecopia.....	24
Figure 10 : Impact du maillage sur la localisation des classes LCZ, sur la base des données Ecopia.....	25
Figure 11 : Impact des données d'entrée sur les superficies des classes LCZ, sur la base du maillage Urban Atlas.....	27
Figure 12 : Impact des données d'entrée sur la localisation des classes LCZ, sur la base du maillage Urban Atlas.....	28
Figure 13 : Image Pléiades de Rayong (à gauche) et cartographie LCZ associée (à droite).....	32
Figure 14 : Validation visuelle avec, de haut en bas, l'image Pléiades, les données OCS/bâti 3D, le maillage 100 m.....	33
Figure 15 : Indicateurs de taux d'imperméabilité (à gauche) et de taux de végétation (à droite).....	34
Figure 16 : Cartographie LCZ (à gauche) et indice de vulnérabilité socio-économique (à droite).....	35

Index des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des images Pléiades utilisées dans l'étude.....	19
Tableau 2 : Analyse surfacique et volumique des données Bâti 3D.....	20
Tableau 3 : Analyse statistiques des OCS suite au contrôle visuel des points de validation.....	21
Tableau 4 : Analyse normalisée de l'impact des données d'entrée, pour les LCZ 1 à 9.....	29

1. L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

En milieu urbain dense, l'effet de l'îlot de chaleur urbain (ICU) peut dégrader fortement la qualité de vie en été. Avec la hausse des températures moyennes et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des canicules, l'effet d'ICU engendre également une amplification des risques sanitaires, une surconsommation énergétique liée au recours à la climatisation des bâtiments, et une vulnérabilité accrue des infrastructures et réseaux. La lutte contre l'effet d'ICU a clairement été identifiée comme objectif stratégique dans le dernier plan national d'adaptation au changement climatique.

Ces mesures d'adaptation doivent s'appuyer sur des éléments de diagnostic quantitatifs et spatialisés pour une analyse de la vulnérabilité des quartiers urbains et des leviers mobilisables pour la réduire. Le recours aux cartographies LCZ a été identifié dans un ouvrage récent [ADEME, 2017] recensant les outils et méthodes de diagnostic de la surchauffe urbaine. L'avantage est de pouvoir les utiliser dans un objectif purement urbain et qualitatif, mais aussi pour une expertise climatique plus poussée par croisement avec des mesures météorologiques in-situ, ou en constituant des entrées pour les modèles de simulation climatique. Leurs indicateurs attributaires (morphologie et occupation du sol) sont aussi un appui pour formaliser des objectifs chiffrés pour la planification en termes de régulation de la densité, de dés-imperméabilisation des sols ou de renaturation dans des zones à enjeu.

Enfin, le croisement de ces données avec d'autres données urbaines ou démographiques permet de construire des approches préventives, afin de diminuer les risques pour la population ou pour améliorer le confort de vie.

1.1. Ingénierie intégrée

Le Cerema développe une expertise dans le domaine de la micro-climatologie urbaine, au travers de son équipe de recherche, avec l'appui de son pôle application satellitaire. Sur un plan plus large, il dispose également de compétences dans le domaine de l'aménagement du territoire et de l'adaptation au changement climatique des territoires. Ces compétences permettent de proposer une vision intégrée des problématiques propres aux ICU, en couvrant les champs de la production des données nécessaires au diagnostic, jusqu'aux propositions de solutions pour lutter contre les ICU et leur prise en compte dans la planification urbaine.

1.2. Zones Climatiques Locales

Le référentiel *Local Climate Zones* (LCZ) est proposé par la communauté internationale de climatologie urbaine [Stewart & Oke, 2012]. Cette méthode repose sur une segmentation des territoires en unités de surface de typo-morphologies élémentaires homogènes vis-à-vis de leur comportement climatique.

Une série d'indicateurs caractérisant la morphologie des tissus urbains, l'occupation du sol ou les caractéristiques des matériaux sont calculés. Enfin, sur la base d'une nomenclature en dix-sept classes, une classification est établie. Elle permet de classer les unités de surfaces en fonction de leur sensibilité au phénomène d'ICU. La nomenclature est présentée en Annexes.

2. MÉTHODE DÉVELOPPÉE PAR LE CEREMA

La méthodologie proposée par Stewart & Oke repose sur un corpus de mesures de températures de l'air dans plusieurs villes dans le monde, qui ont permis de mettre en évidence la relation entre les morphologies urbaines, constituées par l'arrangement et l'implantation des bâtiments, leur densité, leur hauteur et les occupations du sol. Cette méthode s'avère pertinente à plusieurs titres. Elle permet de disposer d'une connaissance fine des morphotypes urbains, en les classant en fonction de leur sensibilité à l'ICU, et permet de conserver un lien étroit avec la température de l'air.

Elle permet aussi de s'affranchir de la mise en œuvre d'un réseau de stations météorologiques sur le terrain, qui demeure coûteux à déployer et à maintenir. Cette méthode présente des difficultés en matière de représentativité et d'exploitation des mesures.

S'il est admis qu'il existe un lien entre les températures de surface et la température de l'air dans la rue, il n'est pas possible à ce stade de décrire une relation fiable entre ces deux données. La mobilisation de l'imagerie infra-rouge thermique satellitaire n'est donc pas une description des ICU. Elles décrivent des îlots de chaleur de surface. Nous n'avons pas retenu à ce stade la mobilisation de ces données pour décrire les ICU.

Enfin, il est possible de mettre en œuvre des mesures des températures de l'air via une plate-forme mobile. Cette méthode est particulièrement intéressante, car elle représente des transects urbains en parcourant différentes typologies de paysage urbains. En contrepartie, pour être pertinente cette méthode est exigeante en termes de mise en œuvre : horaires de mesure restreints, de nuit, en période estivale et en conditions météorologiques anticycloniques. Le Cerema dispose d'un véhicule équipé de capteurs météorologiques, mais nous réservons cet outil à des fins de recherche et développement.

Il existe aussi la possibilité de décrire les ICU grâce aux outils de modélisation micro-climatiques notamment les outils développés par le CNRM. Sur la base d'une modélisation fine de la ville, le modèle TEB (*Town Energy Balance*) permet de calculer les échanges d'énergie et d'eau entre la ville et l'atmosphère et le climat urbain. En contrepartie cet outil, bien que pertinent, demeure difficile à mettre en production, en particulier à des coûts faibles.

La méthode développée par le Cerema est issue du projet DiaCliMAP financé par l'ADEME entre 2015 et 2017. Ce projet a permis le développement d'une méthode mobilisant l'imagerie Très Haute Résolution Spatiale (THRS) pour la production d'indicateurs LCZ pour la métropole du Grand Nancy, croisés avec des données microclimatiques mesurées localement [10th ICUC, Bouyer et al.]. Ces expériences ont été reproduites sur le territoire de Lille Métropole, et ont permis de consolider les développements de l'algorithme Cerema Sat LCZ. Cette approche s'inscrit dans la même démarche que celle proposée par Stewart & Oke et permet au Cerema de développer des évolutions de ses propres algorithmes LCZ tout en gardant un lien étroit avec la mesure de la température de l'air.

2.1. Les données nécessaires à la classification LCZ

La construction des cartographies LCZ reposent sur un découpage en unités morpho-climatiques urbaines homogènes et des indicateurs sous-jacents de morphologie urbaine, d'occupation du sol et thermiques qui permettent de classer chaque unité étudiée en classe LCZ.

2.1.1. Les unités morpho-climatiques urbaines

Les LCZ sont définies par des indicateurs qui sont une agrégation statistique de données pour une zone définie. Ces zones sont définies suivant une segmentation des territoires en unités typomorphologiques élémentaires homogènes vis-à-vis de leur comportement climatique. La définition de la taille d'un ICU selon Stewart & Oke est une unité morpho-climatique d'un rayon de l'ordre de 300 m au minimum.

Les méthodes de segmentation urbaine n'ont pas été développées dans le cadre des travaux conduits par le Cerema.

Il a été décidé d'utiliser l'Urban Atlas fourni par Copernicus pour toutes les agglomérations de plus de 50 000 habitants. Cet atlas présente plusieurs avantages. Il couvre les principales villes européennes, il est gratuit et facilement accessible. Il n'a pas été conçu pour découper la ville en unités morpho-climatiques cohérentes mais sa nomenclature décrit des niveaux d'imperméabilisation des sols qui correspondent généralement à des typologies architecturales homogènes. Malgré quelques limites, par exemple un découpage parfois trop fin pour définir un ICU, nous avons considéré cet atlas pertinent. De plus, c'est la seule donnée disponible sur étagère proposant une segmentation urbaine compatible avec la problématique des ICU.

2.1.2. La connaissance du bâti et de l'occupation du sol

Une seconde famille de données va permettre de construire les indicateurs sous-jacents aux LCZ. Ces données sont une description de l'occupation du sol (OCS), et d'une connaissance de la 3D associée.

C'est à ce stade que l'imagerie Très Haute Résolution Spatiale stéréoscopique Pléiades a été mobilisée. Sur la base d'algorithmes de machine learning et d'une chaîne de traitement développée par le Cerema, une classification de l'OCS est produite. Cette couche OCS, combinée au Modèle Numérique de Surface et au Modèle Numérique de Terrain va permettre de disposer des informations utiles au calcul des indicateurs sous-jacents aux LCZ : bâti 3D, surfaces imperméables et surfaces perméables notamment.

L'expérience a montré que dans le cas de la France, la mobilisation de la couche bâti 3D de la BD Topo de l'IGN donnait de meilleurs résultats que la couche bâti 3D issue de la classification de l'image, elle a donc été retenue pour ce territoire.

2.2. Historique de l'algorithme LCZ Cerema Sat'

Pour mettre en œuvre une méthode de cartographie des LCZ, nous avons implémenté un algorithme basé sur les concepts de Stewart & Oke. Cette implémentation s'est effectuée en plusieurs étapes. Une première version proche des concepts décrits par Stewart & Oke a été produite, puis des versions intermédiaires de développement. Ces versions ont une double vocation. Elles sont une base pour nos travaux qui relèvent de la recherche, mais sont aussi des versions pour aboutir au final à une version opérationnelle, facile à mettre en œuvre, avec un jeu de données d'entrée le plus restreint possible, quel que soit le territoire étudié.

2.2.1. L'algorithme analytique Stewart & Oke

Les indicateurs proposés par Stewart & Oke

Cette méthode dite analytique s'appuie sur une implémentation la plus fidèle possible des fiches de chacune des LCZ. Les indicateurs proposés par Stewart & Oke peuvent être classés en trois familles distinctes, qui sont à l'origine des facteurs explicatifs du phénomène d'ICU. Ces trois familles englobent respectivement :

1. Les indicateurs morphologiques : le « Sky view factor », le « Canyon aspect ratio », le « Mean building height » et le « Terrain roughness class ». Cette première famille rend compte de l'aérodynamisme des tissus urbains, et donc de leur propension à être plus ou moins rafraîchis grâce aux vents. En particulier, le « Sky view factor » représente la capacité d'un tissu urbain à piéger le rayonnement solaire.
2. Les indicateurs d'occupation du sol : le « Building surface fraction », l'« Impervious surface fraction » et le « Pervious surface fraction ». Ces indicateurs vont rendre compte de la capacité des sols à refléter ou emmagasiner l'énergie solaire, et la capacité de rafraîchissement grâce à l'évapotranspiration ou la présence d'humidité.
3. Les indicateurs thermiques : la « Surface admittance », la « Surface albedo » et les « Anthropogenic heat flux ». Ces indicateurs vont rendre compte des flux et stocks en fonction de la capacité des matériaux à stocker de l'énergie, ou des émissions d'énergie dues aux activités humaines telles que les climatisations, les industries ou les véhicules.

Les classes LCZ : fiches descriptives

Chaque LCZ est définie suivant un panel d'indicateurs sous-jacents dont les valeurs sont bornées en fonction de la classe LCZ.

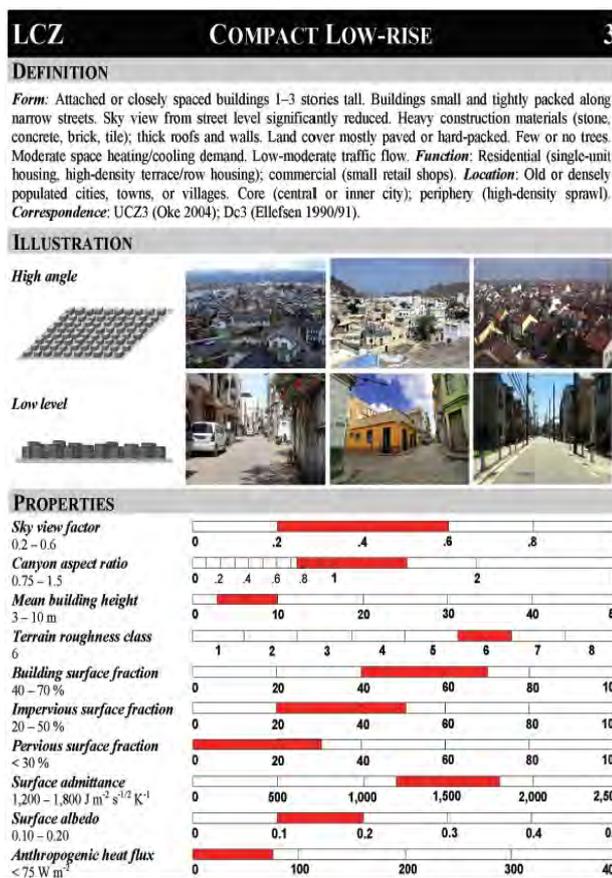


Figure 1: Fiche descriptive LCZ 3.

Des limites bien identifiées, une approche pragmatique

L'objectif premier de la méthode est d'être reproductible facilement, à des coûts raisonnables, avec des données facilement accessibles. Or, pour ce qui concerne les indicateurs thermiques, aucune base de données sur étagère ou facile à construire à l'échelle d'une agglomération n'est disponible à ce jour.

On observe que les indicateurs proposés par Stewart & Oke sont parfois redondants ou très similaires pour décrire un même phénomène. Ils sont également parfois peu discriminants, ce qui est particulièrement le cas pour les indicateurs thermiques. Ils sont donc abandonnés sans avoir a priori d'impact majeur sur la classification.

La mise en œuvre stricte des seuils décrits dans le corpus de fiches ne permet pas de classer de manière exhaustive tous les cas de figure.

Première version : un algorithme presque conforme

Les premiers travaux ont donc consisté à proposer des méthodes expertes, de sorte à créer des branches complémentaires de l'arbre de décision produit. Stewart & Oke ne proposent pas de méthode d'implémentation pratique, ni de hiérarchisation des indicateurs. Les choix propres au Cerema sont :

- une mobilisation des données disponibles en France
- la hiérarchisation des indicateurs entre eux
- le respect des seuils proposés dans les fiches LCZ
- une sélection des indicateurs à mettre en œuvre, en fonction des données disponibles en France (Urban Atlas, BD Topo et OCS produite sur la base des images Pléiades)
- une dépendance de l'algorithme à la nomenclature de l'Urban Atlas
- pas de mobilisation des indicateurs thermiques
- une écriture de branches dites expertes pour combler les surfaces non-classées, avec une introduction d'indicateurs d'OCS complémentaires : sol nu vs végétation basse vs végétation moyenne vs végétation haute vs autre

Les premières cartes LCZ ont montré des résultats satisfaisants, mais avec des limites. Certaines classes présentaient des confusions, et l'algorithme ne traitant pas tous les cas de figure, des trous de classification restent présents. La traduction des fiches au travers d'un arbre de décision conduisait à une structure particulièrement complexe, et à de nombreux cas particuliers pour palier les limites de la méthode proposée par Stewart & Oke. **Enfin, la maintenance de l'algorithme et son évolution sont peu ergonomiques et chronophages.**

2.2.2. Les algorithmes intermédiaires

Sur la base des limites évoquées précédemment, plusieurs évolutions de l'algorithme ont été conduites. Ces évolutions ont été notamment mises au point sur le territoire de Lille Métropole. Ces étapes nous ont conduit à nous écarter du cadre strict de la nomenclature proposée par Stewart & Oke, et à développer un algorithme original. Nous ne décrivons pas ici dans le détail ces évolutions, mais elles visaient les objectifs suivants :

- s'affranchir de la dépendance de l'algorithme aux nomenclatures de l'Urban Atlas
- s'affranchir du calcul de certains indicateurs particulièrement gourmands en ressources de calcul
- mobilisation plus forte des indicateurs OCS issus des images avec notamment la végétation
- s'affranchir des indicateurs redondants et n'apportant pas de plus-value significative pour la qualification fiable des LCZ ; parfois certains indicateurs pouvaient apporter de la confusion si les données d'entrée ne sont pas d'une qualité parfaite
- suppression de la classe LCZ 10 et fusion avec LCZ 8
- simplifier la structure de l'algorithme pour le faire évoluer et s'affranchir du cadre strict proposé par Stewart & Oke

Plusieurs versions successives ont été réalisées, et ont permis de s'approcher des objectifs visés.

2.2.3. L'algorithme Cerema opérationnel

Cet algorithme est la dernière étape de développement. Les dernières évolutions de cet algorithme ont été réalisées dans le cadre du SCO SatLCZ. Elles sont décrites plus en détail dans le chapitre suivant.

3. IMPLÉMENTATION DE L'ALGORITHME OPÉRATIONNEL

3.1. Méthode générale

Une dernière étape consistait à adapter l'algorithme afin de pouvoir être utilisé avec tout type de données en entrée, s'affranchir totalement des données locales, et permettre de produire une cartographie LCZ uniquement à partir des informations extraites de l'image satellite.

Plusieurs verrous, décrits ci-dessous, sont levés par cette dernière étape.

3.1.1. La segmentation des tissus urbains

La segmentation des tissus urbains est basée sur le découpage proposé par l'Urban Atlas. Nous savons que l'algorithme a été conçu et simplifié en évaluant les résultats dans une grille Urban Atlas, sa qualité et sa performance sont potentiellement dépendants de ce découpage. Plusieurs alternatives existent pour s'affranchir de ce découpage.

Le projet MApUCE a développé une méthode de segmentation dite USR (Unité Spatiale de Référence). Nous ne retenons pas cette option car bien que très intéressante elle est très dépendante des données française.

Il est également possible de photo-interpréter l'image et créer manuellement ce découpage à dire d'expert. Le Cerema utilise cette méthode pour les études sur de petits territoires dès lors que les surfaces impliquées permettent de produire cette segmentation dans un temps raisonnable.

Une option consisterait à développer une méthodologie de segmentation automatique des tissus urbains en se basant sur la classification de l'image et d'autres indicateurs dérivés. Cette option est certainement la plus intéressante en vue de l'industrialisation, mais elle n'entre pas dans le champ de la présente étude.

Enfin, la solution communément retenue, en particulier pour les projets aux échelles internationales, consiste à s'appuyer sur une grille déterminée de manière arbitraire. C'est par exemple le cas des LCZ proposées dans le cadre de WUDAPT. C'est la solution que nous retenons ici, son impact sur les résultats sera évalué dans le cadre de cette étude (cf. 4.3.1).

3.1.2. Limites à lever et améliorations

Simplification et robustesse de l'algorithme

La simplification de l'algorithme doit apporter une certaine robustesse et stabilité lorsqu'on fait évoluer la qualité des données en entrée. Ce volet sera évalué dans la présente étude (cf. 4.3.2). Il permettra notamment de comparer trois OCS différentes, ainsi que quatre couches de bâti 3D différentes.

La question de la production de la hauteur des bâtis et de la hauteur de végétation

La nécessité de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de qualité, pour la connaissance de la hauteur des bâtiments et de la végétation, est un point délicat de la méthode. En effet, en France, nous disposons du MNT RGE Alti produit par l'IGN, qui permet, par soustraction à un Modèle Numérique de Surface (MNS), de disposer facilement des informations relatives à la hauteur de la végétation. L'IGN fournit également une information sur la hauteur des bâtiments dans ses couches de la BD Topo.

Or, si la production de MNS de qualité satisfaisante est aujourd’hui acquise, dès lors que l’on dispose de couple ou mieux d’un triplet d’images de qualité, à ce jour la production de MNT demeure une tâche délicate et souvent coûteuse.

Plusieurs axes de travail ont été explorés dans cette étude pour pallier cette difficulté :

- l’évaluation de la réalisation d’une méthodologie simple pour produire un MNT à partir du MNS et de l’OCS produite. Cette piste a finalement été abandonnée, car nous avons réussi à mettre en œuvre une version de l’algorithme qui permet de s’affranchir de cette information.
- dans la mesure où Airbus D&S est en capacité de fournir une couche d’OCS et un modèle de bâti 3D uniquement à partir de l’image et du MNS, dès lors le MNT sert juste à la distinction entre la végétation haute et basse. Un axe de travail a été de développer une adaptation de l’OCS et des indicateurs sous-jacents afin de s’affranchir de la production d’un MNT.

Amélioration de la pertinence de la classification

À l’issue des premières phases de développement, l’algorithme est quasi opérationnel, mais il reste certaines classes qui nécessitent une amélioration. Les classes urbaines 6 et 9 et les classes rurales A à D et F nécessitent quelques ajustements pour en améliorer la pertinence.

3.1.3. Schéma général de la méthode

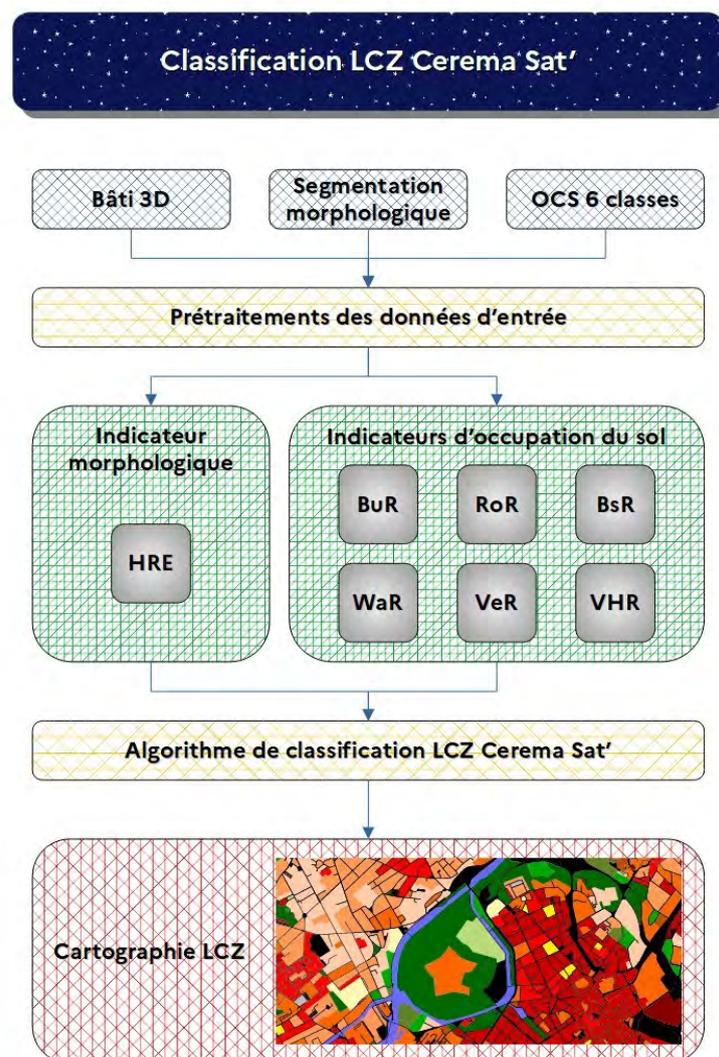


Figure 2 : Méthode opérationnelle de cartographie des LCZ.

3.2. Démarche de mise en œuvre

Dans le but de rendre cette méthode la plus simple et la plus rapide possible, le nombre d'indicateurs et de données d'entrée pour les calculer a été revue. Cette sélection s'est faite en parallèle de la réorganisation de l'arbre de décision : réduction du nombre de branche (il n'y a plus qu'un seul chemin pour arriver à une classe LCZ) et nouvelle hiérarchisation des indicateurs.

La 1^{re} idée de réorganisation du logigramme a été de distinguer dès le départ les LCZ « bâties » 1 à 9 des LCZ « non-bâties » A à G, en se basant sur le taux de bâti de la maille. Il est l'un des 6 indicateurs d'OCS retenus/développés dans cette version :

- BuR : le taux de bâti
- RoR : le taux de route et surfaces minérales imperméables
- BsR : le taux de sol nu perméable
- WaR : le taux de surface en eau
- VeR : le taux de végétation
- VHR : la part de végétation haute sur la végétation globale

Dans la méthode de Stewart & Oke, BuR correspond à l'indicateur *Building Surface Fraction*, RoR à *Impervious Surface Fraction*, et la combinaison BsR+WaR+VeR à *Pervious Surface Fraction*.

Ces indicateurs sont principalement utilisés pour la distinction des LCZ « non-bâties » A à G. Le but est de déterminer l'OCS majoritaire pour attribuer la classe LCZ : G si c'est WaR, F si c'est BsR, E si c'est RoR. Concernant les classes LCZ de végétation A à D, une fois que la classe majoritaire a été détectée comme végétation VeR, c'est l'indicateur VHR qui entre en jeu. Il a été développé dans le but de s'affranchir totalement du MNT comme donnée d'entrée.

Une version intermédiaire de l'algorithme était basée sur la hauteur moyenne de la végétation qui permettait de distinguer les LCZ A à D. Ce nouvel indicateur VHR se rapproche plus de la définition de ces classes, qui se base sur la densité (et donc la part de végétation haute) plus que sur la hauteur.

Pour constituer tous ces indicateurs OCS, il faut donc une classification OCS, en raster 6 classes :

- bâti
- route et surfaces minérales imperméables
- sol nu perméable
- surfaces en eau
- végétation haute (ou ligneuse)
- végétation basse (ou herbacée)

Pour le 2^d groupe d'indicateurs morphologiques, il n'y en a plus qu'un seul qui intervient : le *Height of Roughness Elements* (HRE). C'est un indicateur originellement présent dans la méthode de Stewart & Oke, et qui rend compte de la hauteur moyenne des éléments de sur-sol.

Ne servant à distinguer que les LCZ de type « bâties », il ne calcule plus que la hauteur moyenne du bâti, et s'appuie sur une donnée bâti 3D : une donnée vecteur sous forme de polygones, qui représente l'emprise au sol de chaque bâtiment. À cette représentation graphique s'ajoute une information attributaire de hauteur du bâtiment, sous format numérique réel.

Dans le projet DiaCliMAP, il a été montré la redondance de la plupart des indicateurs morphologiques, d'où le choix de se restreindre au HRE ; le *Sky View Factor* et l'*Aspect Ratio* présentant également des temps de calcul et des ressources machines très importants.

Toute la réflexion portant sur la mise en œuvre de cette version opérationnelle s'est faite par une analyse de sa pertinence sur le territoire de Lille Métropole, à partir des données produites dans le cadre du projet DiaCliMAP, et du découpage Urban Atlas. Toutes les cartographies LCZ des versions précédemment présentées ont été générées : v10 analytique, v9.3 et v9.4 intermédiaires, v9.5.1 et v9.5.2 opérationnelles. L'analyse de la cartographie WUDAPT a également été réalisée.

La validation de cet algorithme opérationnel s'est faite sur la base de la correspondance statistique avec les précédentes versions Cerema (notamment avec la version analytique v10 qui se veut être la référence, puisqu'une traduction de la méthode de Stewart & Oke, cf. intro 2 et 2.2.1) et étudiée au regard des mesures de températures mobiles faites sur Lille. Sur les classes LCZ en désaccords, une photo-interprétation est venue compléter l'analyse.

Sur le graphique suivant, on note des disparités sur les classes 6 et 9, A à D et F. Ces disparités se retrouvent sur l'illustration associée, notamment pour les classes A à D et F.

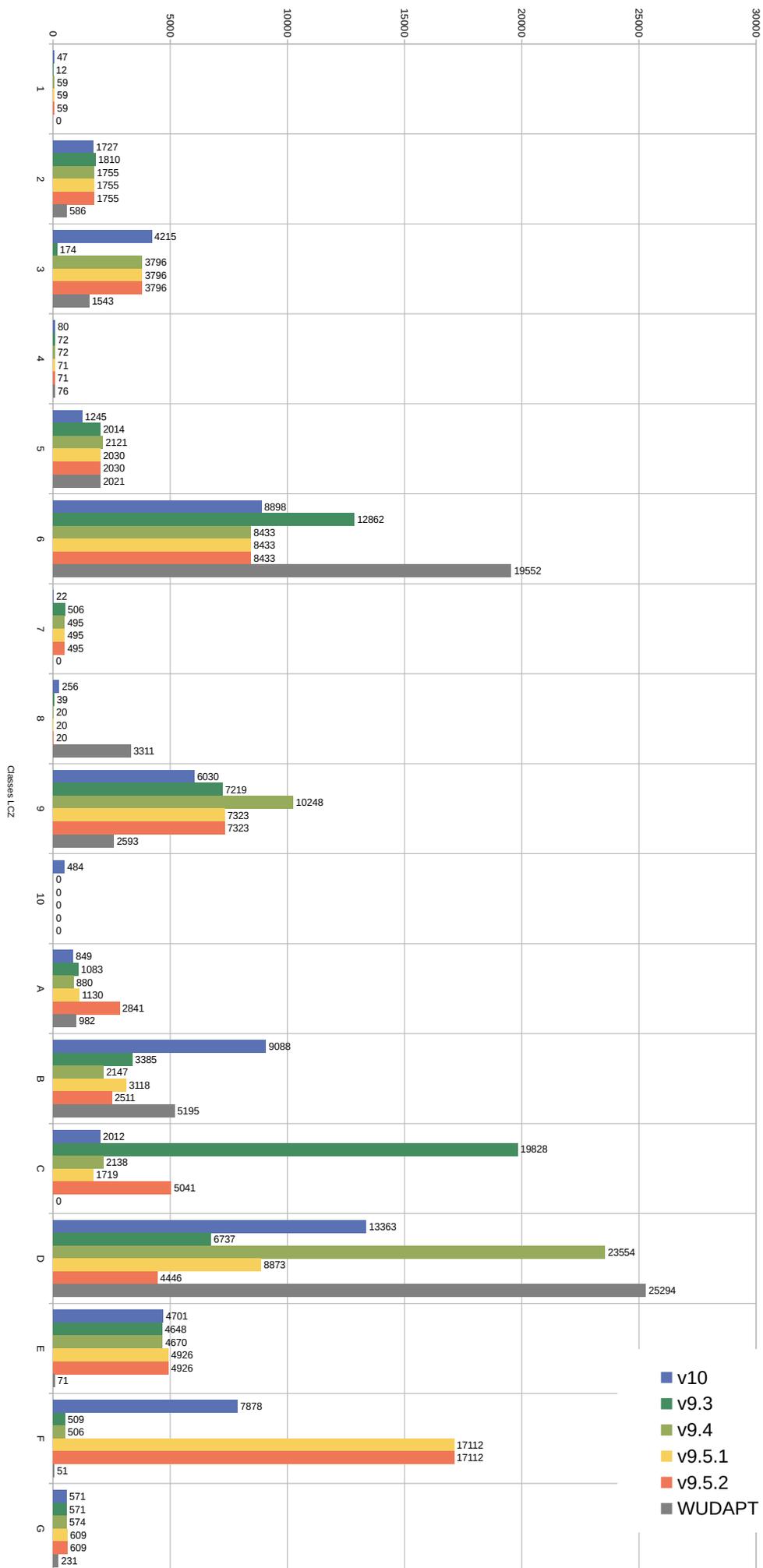


Figure 3 : Comparaison des superficies de classes LCZ fonction des versions de logigramme.

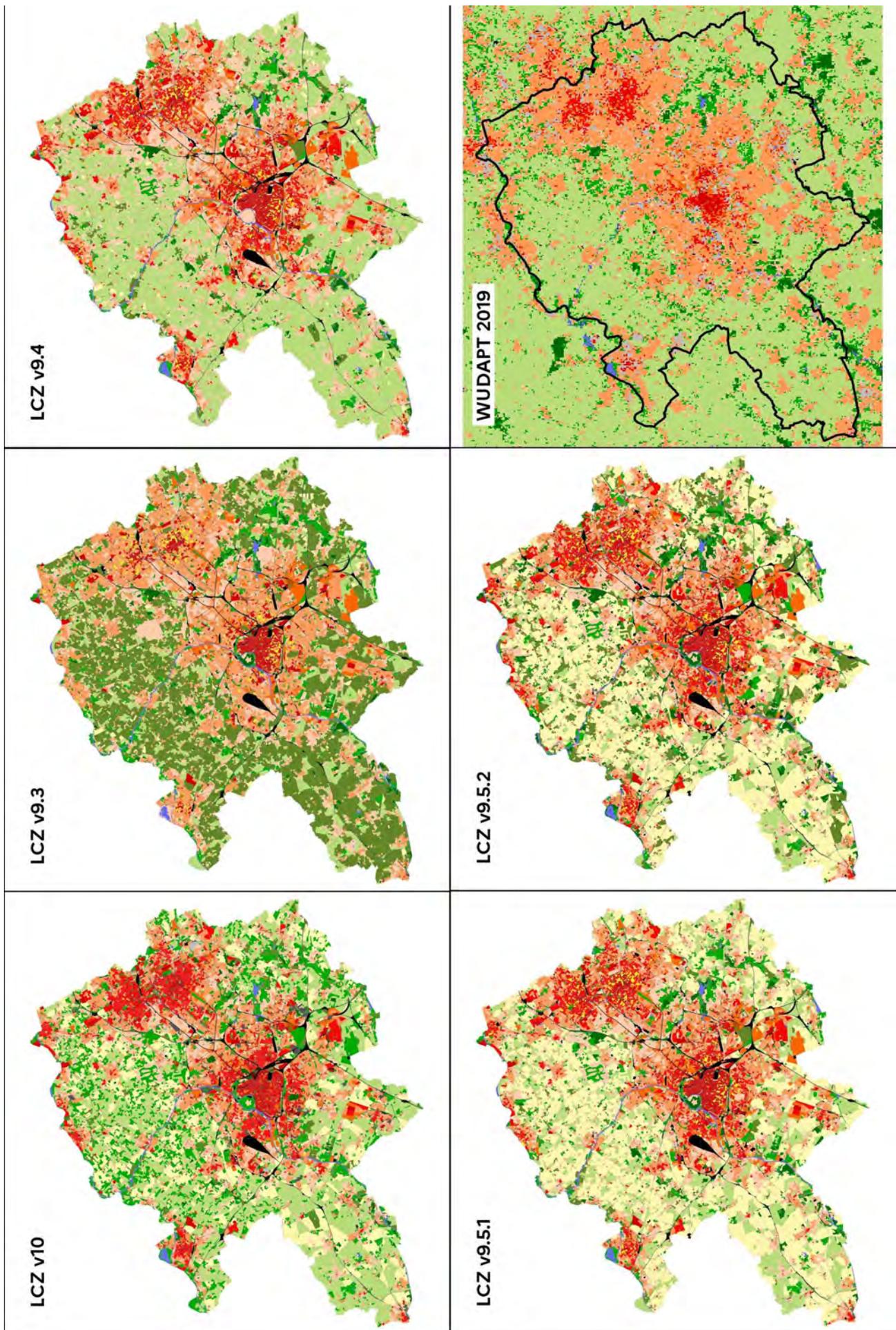


Figure 4 : Cartographies LCZ fonction des versions de logigramme.

La validation par photo-interprétation, sur la base de l'image Pléiades utilisée pour la production de toutes les données d'entrée ayant servi dans cette analyse, montre bien la pertinence de cette version sur les précédentes :

- les disparités entre les classes 6 et 9 (et quelques autres LCZ « bâties ») viennent du taux de bâti, qui a été révisée (passage du seuil de 10 % à 5 %), et qui rend mieux compte de la vérité sur ces quartiers de type résidentiel
- les disparités entre les classes A à D et F sont là aussi confirmées sur la version finale, avec l'utilisation des indicateurs type OCS (classe majoritaire). En effet, le sol nu n'était jamais pris en compte comme indicateur dans les versions précédentes, et les véritables zones de sol nu (champs notamment) finissaient au mieux en végétation basse (LCZ D) au pire en végétation arbustive ou bois clairsemé (LCZ C ou B)



Figure 5 : Exemple de disparités entre les versions intermédiaires (v9.4) et opérationnelle (v9.5.2).

L'intégration de l'analyse de la donnée LCZ WUDAPT tient du fait qu'elle est déjà disponible à l'échelle internationale (même si produite à l'heure actuelle uniquement en Europe et en Amérique du Nord). Le but est de voir la pertinence de cette cartographie LCZ globale au regard de notre méthode qui utilise des données plus locales.

WUDAPT est produite sur la base d'un maillage carré de 100 m, à partir d'une classification supervisée, et n'utilise pas d'indicateurs de morphologie urbaine ou d'OCS. De plus, elle n'intègre pas de données 3D pour faire une distinction plus fine des LCZ à fort potentiel ICU (1 à 3 notamment). Malgré ces limites. Les tendances globales apparaissent bien : les centres urbains denses, les secteurs ruraux en périphérie, les zones de végétation...

Pour terminer cette analyse, on voit une différence majeure entre les versions 9.5.1 et 9.5.2 sur les LCZ A à D. Cette différence s'explique par le changement d'indicateur pour discriminer ces classes : on passe d'un seuillage basé sur la hauteur moyenne de la végétation à un seuillage basé sur le taux de végétation haute sur la végétation globale, qui est plus représentative de la réalité (cf. début du chapitre).

3.3. Conclusion sur la mise en œuvre de la version finale de l’algorithme LCZ

La démarche mise en œuvre a permis de valider la dernière évolution de l’algorithme 9.5.2, que nous avons nommé « algorithme Cerema opérationnel ». La confrontation à notre algorithme analytique a permis de le valider, mais aussi de l’améliorer. Les comparaisons avec l’algorithme WUDAPT ont conforté également la pertinence de notre algorithme tout en montrant l’intérêt de l’apport d’une donnée OCS plus fine, en particulier la connaissance du bâti 3D. Ces informations permettent notamment une distinction plus fiable des LCZ urbaines.

Enfin les simplifications apportées dans le cadre de SatLCZ ont permis une normalisation des données d’entrée en utilisant en entrée simplement une OCS et le Bâti 3D. Cette simplification apporte une grande souplesse pour les données d’entrée et autorise maintenant un usage de l’algorithme sur la base de données qui peuvent toutes être extraites uniquement sur la base d’un triplet d’images Pléiades.

3.4. Outils

3.4.1. Scripts automatiques

Depuis plusieurs années, le Pôle sat' du Cerema développe une chaîne de traitement d'images satellite, et de production d'indicateurs associés. Celle-ci permet une exploitation des données satellite sur des thématiques telles que l'aménagement du territoire, la gestion des risques, ou le suivi du littoral. Elle est développée en Python, et n'utilise que des outils libres : GDAL/OGR, OTB, PostGIS... En avril 2020, cette chaîne est publiée en Open Source sur le GitHub du Cerema¹.

Dans cette chaîne, une branche dite LCZ est présente. Celle-ci se basant à l'origine sur la méthode de Stewart & Oke, on y retrouve un script Python par indicateur (à l'exception des indicateurs thermiques), et un dernier pour la mise en place de la cartographie LCZ, à partir du croisement de ces indicateurs, calculés par polygone de notre fichier de segmentation du territoire d'étude.

De plus, un script calculant les indicateurs dérivés de l'OCS est ajouté à la branche dite LCZ.

3.4.2. Modeleurs QGIS

Dans un souci de diffusion de la méthode et de prise en main facilitée, des modeleurs QGIS ont été développés. A la différence des scripts Python précédents, seuls les indicateurs retenus dans la dernière version de la méthode ont été développés. Il y a donc 3 modeleurs :

- un modeleur HRE pour l'indicateur de morphologie urbaine : *Height of Roughness Elements*
- un modeleur OCS pour les indicateurs d'occupation du sol : taux d'occupation des classes OCS (bâti, route, sol nu, eau, végétation) + taux de végétation haute sur la végétation globale
- un modeleur final pour la cartographie des LCZ

Le modeleur OCS, basé sur un croisement raster-vecteur, existe en deux versions : une version qui utilise les outils intégrés à QGIS (Histogramme zonal), et une version qui utilise un script issu de la chaîne de traitement du Pôle sat' adapté à QGIS (plus rapide, mais ne fonctionnant que sous Windows).

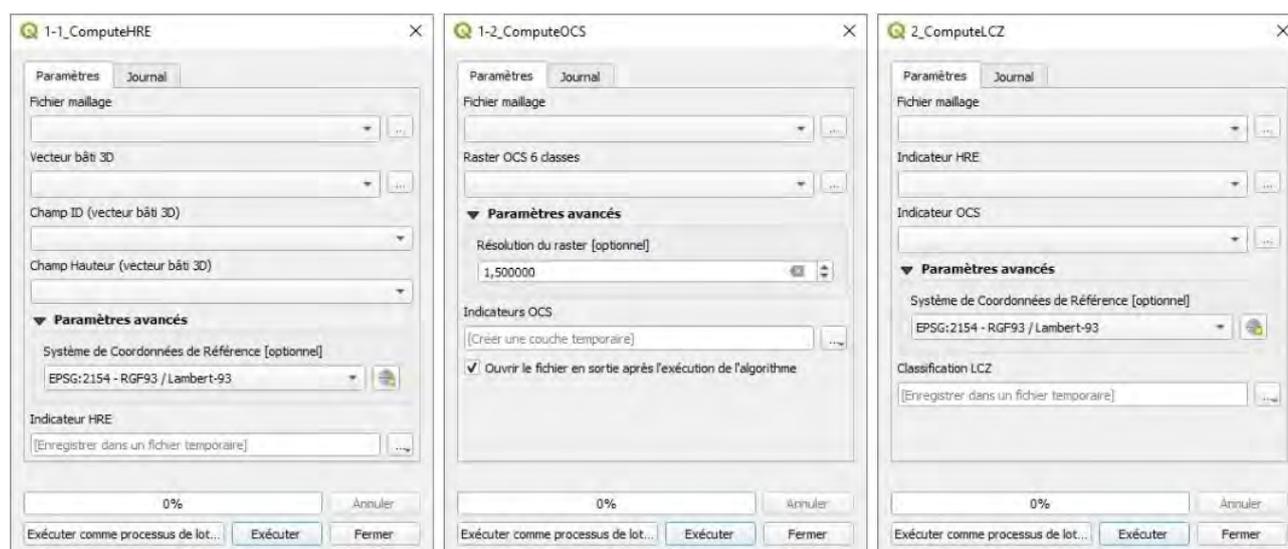


Figure 6 : Fenêtres input/output des modeleurs QGIS.

1 <https://github.com/CEREMA/dterso.chaineTraitement.traitementImageSatelliteEtIndicateursDerives>

4. ANALYSE DE L'IMPACT DES DONNÉES D'ENTRÉE

4.1. Présentation des données de l'étude

Cette étude est l'occasion de poser des repères qualitatifs en fonction des différentes bases de données disponibles pour la partie méthodologique. Si l'évolution de l'algorithme Cerema a été conduite de sorte à être fidèle à la classification de Stewart & Oke (algorithme v10 dit analytique) ou à en améliorer les faiblesses flagrantes, ici l'approche se focalise sur l'impact potentiel de la qualité des données d'entrée.

Dans la version opérationnelle de l'algorithme LCZ Cerema sat', les deux données principales en entrées sont le bâti 3D et l'OCS. Une évaluation qualitative est menée ici afin d'évaluer leur pertinence dans le cadre de leur usage pour la production de cartographies LCZ, puis dans un second temps d'identifier les limites de chacune des bases de données

4.1.1. Les données de l'étude

Ce chapitre décrit toutes les données que nous avons mobilisées pour conduire l'étude qualitative :

- l'OCS Cerema est produite avec une méthode semi-automatique mobilisant une faible intervention humaine, mais présente l'inconvénient d'être difficilement transférable à l'international
- l'OCS Ecopia d'Airbus est produite suivant un processus semi-automatique avec forte intervention humaine. Il n'y a aucune difficulté de production à l'international
- l'OCS UrbanLandCover d'Airbus est produite suivant un processus totalement automatique et doit être sur le principe reproductible à l'étranger
- le bâti 3D Cerema dérivé de notre OCS et amendé de l'information hauteur sur la base du MNH
- le bâti 3D de la BD Topo de l'IGN réalisée par photo-interprétation sur la base d'images aérienne de 20 cm de résolution
- le bâti 3D extrait de l'OCS Ecopia et amendé de l'information hauteur grâce au MNS et les scripts produits par Airbus D&S
- le bâti 3D extrait de l'OCS UrbanLandCover et amendé de l'information hauteur grâce au MNS et les scripts produits par Airbus D&S

4.1.2. Qualité des images

Les données disponibles pour cette étude, qu'elles soient issues des traitements de la chaîne Cerema, de la production semi-automatique Ecopia ou automatique UrbanLandCover, sont produites à partir d'images satellites Pléiades.

Toutefois, dans un objectif de comparaison, il faut noter que les images n'ont pas été acquises dans les mêmes conditions, et n'ont pas été produites par les mêmes chaînes de traitement (pré-traitements Airbus ou IGN).

En particulier, les différences notables sur la zone d'étude sur le centre de Lille sont les suivantes :

Tableau 1 : Caractéristiques des images Pléiades utilisées dans l'étude.

Commanditaire	Date d'acquisition	Angle d'incidence	Ombres portées	Plage de valeur (excluant les 2 % min et 2 % max)
Airbus D&S	27/05/2020	1 °	faibles	0 – 2700
CNES	15/10/2017	11 °	très importantes	200 – 750

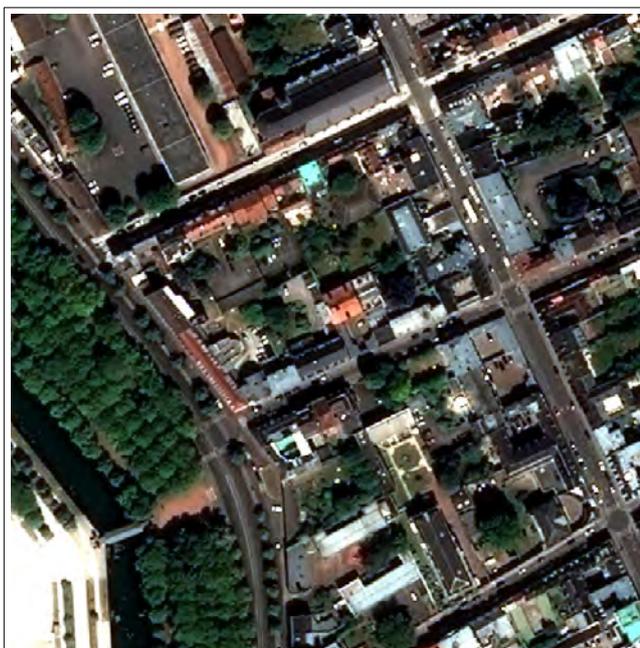


Figure 7: Image commande Airbus 2020.



Figure 8: Image commande CNES 2017.

Les dynamiques sont très différentes et on observe des ombres portées plus marquées en 2017. Ces différences sont dues à la différence des dates d'acquisition dans l'année.

Nous n'avons pas mené d'étude précise sur ce point mais ce constat pourra éventuellement expliquer des différences dans les résultats de la suite de l'étude.

4.2. Évaluation qualitative des données d'entrée

4.2.1. Comparaison des bâtis 3D

La BD Topo est produite sur la base d'orthophotographies aériennes à 20 cm. Elle tire parti du cadastre, ce qui permet de mieux distinguer les bâtiments accolés, et en particulier de distinguer les différentes hauteurs. Cette base de donnée évolue dans le temps, elle bénéficie d'une profondeur historique importante, et s'améliore à chaque révision. Elle profite d'une mise à jour majeure uniquement tous les trois ans, mais cet inconvénient est largement compensé par une qualité géométrique très fine.

On retiendra cette base de donnée comme référence pour la suite de notre étude. Nous considérons que les évolutions des tissus urbains entre les dates de production des bases de données sont négligeables.

Le tableau suivant synthétise, sur la zone d'étude, les surfaces et les volumes de bâti calculés pour chaque base de donnée :

Tableau 2 : Analyse surfacique et volumique des données Bâti 3D.

	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Écart de surface	Écart de volume
IGN	6 222 332	66 377 733	référence	référence
Ecopia 2020	6 326 329	70 296 804	2 %	6 %
UrbanLandCover 2020	5 228 874	55 524 052	-16 %	-16 %
Cerema 2017	8 789 069	82 458 688	41 %	24 %

On note un écart important du bâti 3D Cerema. Ceci s'explique principalement par la méthode de classification pixel développée par le Cerema, qui est particulièrement sensible à la qualité du MNS pour la couche bâti. Les MNS ne décrivent pas de façon précise un bâtiment, en particulier autour de celui-ci. Le pourtour des bâtiments n'est pas une chute verticale comme un mur mais une pente progressive.

Dès lors, comme la méthode utilise le MNH en primitive, le bâti est détecté de manière exhaustive, mais systématiquement surévalué en termes de surface. C'est pourquoi en France, la production des LCZ par la méthode Cerema se fait sur la base du bâti IGN.

La donnée UrbanLandCover présente des écarts sur la définition géométrique des bâtiments comparativement à la BD Topo IGN, et certains bâtiments n'ont pas été détectés. C'est ce que l'on constate également sur le plan statistique, où on mesure des valeurs en deçà de la BD Topo IGN.

Sur la couche Ecopia, on observe une très bonne fidélité à l'image, la détection des bâtiments est quasi exhaustive. Leur définition est un peu moins fine que celle proposée par la BD Topo IGN, ce qui explique certainement ce léger écart statique. Cependant, c'est une très bonne donnée tant sur le plan surfacique que sur le plan des hauteurs (lié au volume).

4.2.2. Contrôle des OCS par tirage aléatoire de points

La méthode choisie est basée sur un tirage aléatoire de points de contrôles. Nous avons effectué un échantillonnage probabiliste orienté surface sur la classification en utilisant la théorie multinomiale de probabilité (De Keersmaecker, 1987) pour définir le nombre d'éléments à échantillonner afin d'obtenir les points qui seront considérés comme la référence. Ce calcul nous a conduit à réaliser un tirage au sort de 700 points.

On ne cherche pas à qualifier la géolocalisation, la photo-interprétation des points est faite sur l'image ayant servi à la classification.

4.2.3. Résultat statistique de la comparaison des OCS

Le tableau suivant présente les écarts statistiques constatés pour l'OCS décrite par chaque base de donnée sur la zone d'étude. Ces écarts sont exprimés en pourcentage de désaccord entre la classification considérée et les points de contrôles.

Tableau 3 : Analyse statistiques des OCS suite au contrôle visuel des points de validation.

	Ecopia 2020		UrbanLandCover 2020		Cerema 2020		Cerema 2017	
	Toutes classes	Perméable / imperméable	Toutes classes	Perméable / imperméable	Toutes classes	Perméable / imperméable	Toutes classes	Perméable / imperméable
Taux de désaccord	23 %	13 %	37 %	18 %	28 %	13 %	31 %	13 %

Si on observe des désaccords toutes classes confondues entre les classifications et les échantillons de contrôle, on note des taux semblables pour les classifications UrbanLandCover et Cerema, et meilleurs pour la classification Ecopia.

En contrepartie, si on observe uniquement les échantillons de contrôle fusionnés en classes perméables et imperméables, les classifications Ecopia et Cerema donnent des résultats semblables, alors que la classification UrbanLandCover présente plus de confusions entre ces groupes de classes.

Comme pour l'analyse sur le bâti, Ecopia s'avère être l'OCS de meilleure qualité. En contrepartie, l'OCS Cerema sur les plans des postes perméables et imperméables est comparable à Ecopia.

4.2.4. Conclusion sur la qualité des données d'entrée

La couche OCS Ecopia présente des erreurs du fait de la simplification de la saisie des objets. En contrepartie, un fort niveau d'interprétation humaine permet de limiter les erreurs grossières. Le bilan permet de classer cette couche comme étant la plus fidèle à l'image.

La couche OCS UrbanLandCover produite de manière totalement automatique présente l'avantage d'être plus rapide à fournir avec un coût de production plus faible. Elle repose notamment sur des méthodes de segmentation et de régularisation des formes des bâtiments et de « machine learning ». Le résultat présente l'avantage d'un rendu plus esthétique que les méthodes de classification pixel. En contrepartie, du fait de la totale automatisation, elle présente l'inconvénient de certaines approximations propres à ce type de classifications. C'est pourquoi elle obtient les moins bons résultats du contrôle.

La couche OCS produite par le Cerema est basée sur des méthodes semi-automatiques. Une intervention humaine est nécessaire pour la validation des échantillons d'apprentissages qui sont ensuite utilisés par l'algorithme de « machine learning » (Random Forest). Une dernière opération humaine intervient pour les phases de post-traitement pour améliorer les erreurs majeures de la classification. Cette méthode hybride permet de compenser partiellement les faiblesses des méthodes automatiques. Dans le cas présent, les résultats sur le bâti présentent un biais important du fait d'une image et d'un MNS de plus faible qualité à la base de cette classification.

Il apparaît clairement que l'OCS produite par Ecopia est qualitativement meilleure que les OCS Cerema ou UrbanLandCover, mais repose sur des méthodes avec une forte intervention humaine qui impactent le prix et les délais de production pour une industrialisation de la méthode.

Il est donc pertinent de comparer les différents scénarios d'utilisation des données pour la production des cartographies LCZ, suivant une approche qualitative orientée sur l'usage plus que sur la qualité intrinsèque des données.

4.3. Impact sur le résultat des LCZ

Afin d'évaluer l'impact des données d'entrée sur le résultat, plusieurs tests ont été réalisés sur la zone d'étude de Lille sur la base de l'algorithme LCZ opérationnel validé précédemment. Les données comparées sont les suivantes :

- classifications OCS : OCS Ecopia, OCS UrbanLandCover, OCS Cerema
- bâti 3D : bâti 3D Ecopia, bâti 3D UrbanLandCover, bâti 3D Cerema (toutes trois issues de la classe bâti de l'OCS associée), BD Topo bâti de l'IGN

En plus de ces tests sur les données d'entrée, des tests complémentaires sur l'impact du maillage ont été réalisés, sur la zone d'étude de Lille, en utilisant le découpage Urban Atlas, et des maillages carrés, hexagones, losanges, chacun de 100 m et 200 m. Ils ont également été réalisés sur la base de l'algorithme LCZ opérationnel.

4.3.1. Impact du maillage

La question du maillage se pose à plusieurs égards :

- il n'est pas défini dans la méthodologie Stewart & Oke : on parle uniquement d'un îlot d'un rayon minimum de 200 m à 500 m (soit une superficie de 12 ha à 80 ha)
- il faut qu'il représente au mieux la morphologie urbaine

À partir de ce constat, et jusqu'à aujourd'hui, le Cerema basait sa méthodologie sur le découpage Urban Atlas. Il présente l'avantage de décrire assez fidèlement la morphologie urbaine (sa nomenclature décrit l'occupation du sol et la densité de bâti), même si les polygones « urbains » sont généralement de petite taille compte tenu de la définition de l'îlot de Stewart & Oke (l'Urban Atlas suit les routes pour faire le découpage, d'où certains polygones très petits).

Il présente cependant l'inconvénient de n'être produit qu'à l'échelle européenne, et pour des aires urbaines de plus de 50 000 habitants. Il n'était donc pas possible de l'utiliser pour traiter Rayong en Thaïlande. Et même en France, il n'existe pas si l'on travaille sur le territoire de petites collectivités locales.

Une 1^{re} façon de contourner cette problématique a été de construire à la main ce maillage morphologique. Cependant, cette méthode n'est vraiment rentable que pour de petit territoire d'étude (< 100 km²). Au-delà, et dans un souci de production automatique, des maillages géométriques (sous forme de polygones réguliers) ont été testés et utilisés : carrés, hexagones, losanges, de 100 m ou 200 m.

Nous avons fait le choix d'un rayon plus petit que la définition, compte-tenu du fait que le maillage géométrique ne représente pas la morphologie urbaine. Ainsi, les résultats ne sont pas à interpréter à la maille (qui ne correspond pas à la définition d'un îlot), mais il faut considérer un ensemble de mailles adjacentes de même classe LCZ qui permettent de reconstituer un îlot suivant la définition de Stewart & Oke.

L'analyse suivante porte sur l'impact du maillage au regard des données bâti 3D et OCS Ecopia. La classification basée sur l'Urban Atlas étant notre référence.

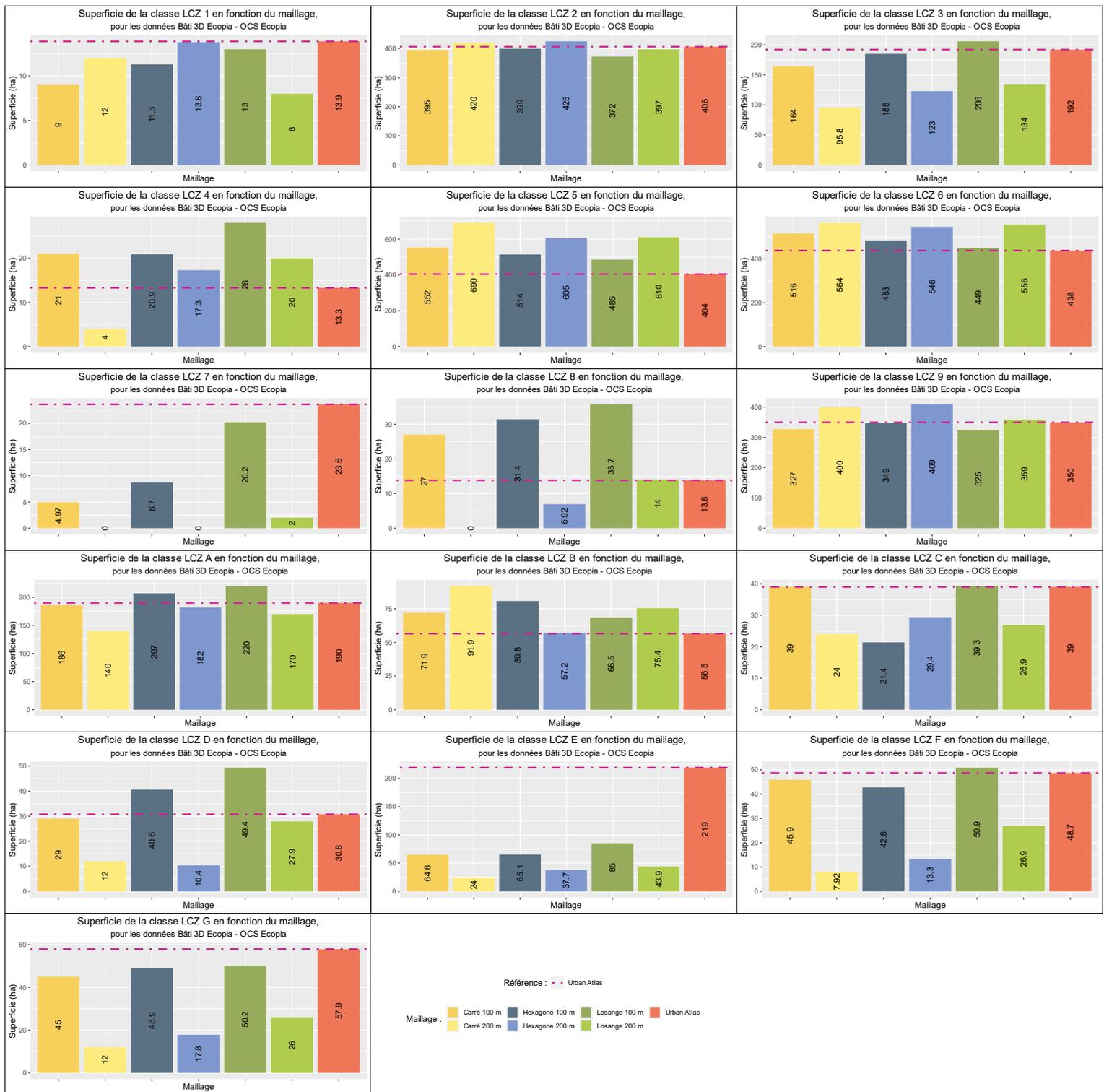


Figure 9 : Impact du maillage sur les superficies des classes LCZ, sur la base des données Ecopia.

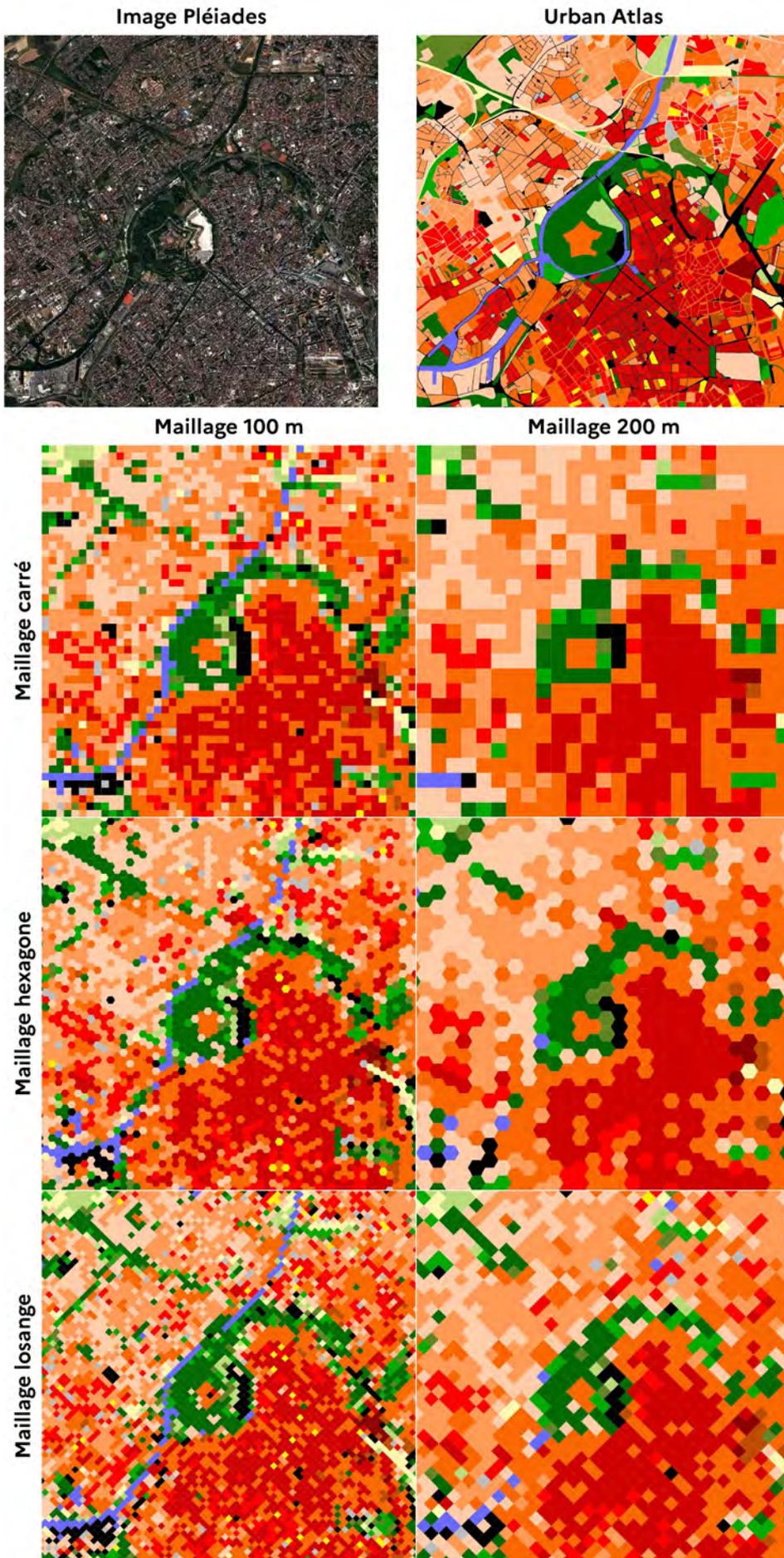


Figure 10 : Impact du maillage sur la localisation des classes LCZ, sur la base des données Ecopia.

Considérant les statistiques et les représentations des différents maillages, on peut conclure que le maillage a assez peu d'impact sur le résultat d'une classification LCZ, notamment sur les classes à enjeux ICU (LCZ 1 à 3).

Si on pousse l'analyse un peu plus loin, on se rend compte que c'est la maille losange à 100 m qui est la plus proche de la référence Urban Atlas ; ceci pouvant s'expliquer par la surface de maille la plus faible testée, qui rend donc compte plus finement du territoire. De plus, la structuration du territoire en axes nord-ouest/sud-est et nord-est/sud-ouest (que ça soit le cours d'eau, les routes ou la voie ferrée) est plus facilement visible avec ce maillage.

Pour information, voici la surface des différents maillages testés :

- Urban Atlas : min = 1 m² ; max = 63 ha
- maille carrée 100 m : 1 ha
- maille carrée 200 m : 4 ha
- maille hexagone 100 m : 0,9 ha
- maille hexagone 200 m : 3,5 ha
- maille losange 100 m : 0,5 ha
- maille losange 200 m : 2 ha

Ainsi, en l'absence d'Urban Atlas ou d'autre découpage morphologique, un maillage géométrique peut convenir pour cartographier les LCZ, tout en sachant qu'une expertise plus poussée du résultat devra être faite.

4.3.2. Impact du bâti 3D et de l'OCS

L'étude de l'impact des données d'entrée est faite sur la base du maillage Urban Atlas qui, malgré la disparité des superficies de polygones (de 1 m² à 63 ha, qui ne respectent donc pas toujours la définition de l'îlot de Stewart & Oke), présente l'avantage majeur de décrire une certaine morphologie urbaine par le découpage morphologique des quartiers.



Figure 11 : Impact des données d'entrée sur les superficies des classes LCZ, sur la base du maillage Urban Atlas.

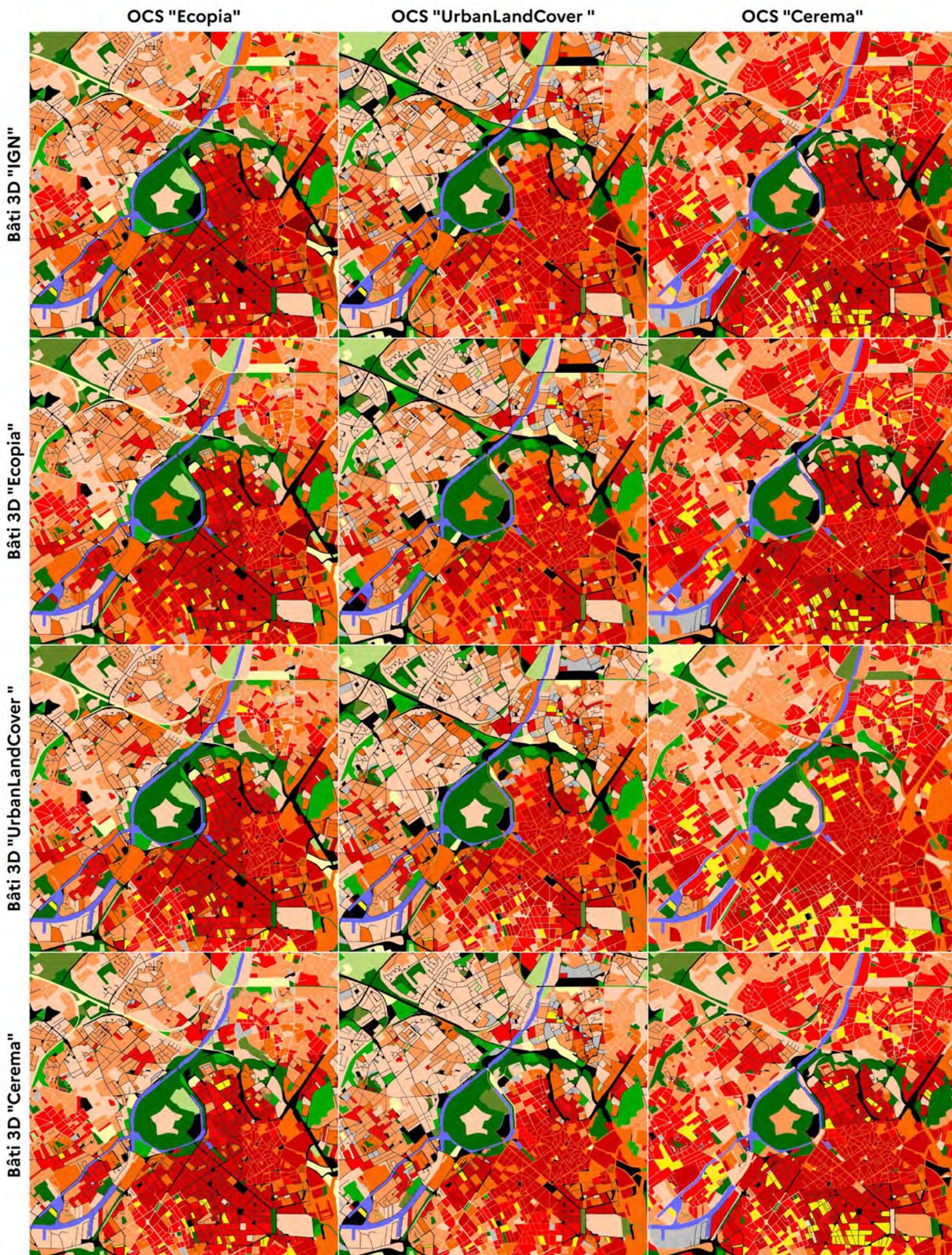


Figure 12 : Impact des données d'entrée sur la localisation des classes LCZ, sur la base du maillage Urban Atlas.

L'analyse est plus délicate, puisqu'on croise deux données en même temps. Une démarche a été mise en œuvre pour évaluer la pertinence des différentes combinaisons de ces données :

- on prend la combinaison « Bâti 3D IGN / OCS Ecopia » comme référence, car chacune de ces données d'entrée présente les meilleurs résultats dans sa catégorie, suite à une analyse statistique réalisée auparavant (cf. 4.2)
- on calcule, pour chaque combinaison Bâti 3D / OCS, l'écart de superficie de chaque classe LCZ, au regard de cette référence
- pour chaque combinaison et chaque classe LCZ, ces écarts sont normalisés, et constituent une note de 0 à 1 (plus la note est faible, plus le résultat est proche de la référence)
- pour chaque combinaison, on calcule la moyenne sur toutes les classes LCZ

Voici les résultats, si nous considérons uniquement les classes LCZ « bâties » (1 à 9) :

Tableau 4 : Analyse normalisée de l'impact des données d'entrée, pour les LCZ 1 à 9.

Combinaison Bâti 3D / OCS	Écart à la référence	Reproductibilité
IGN / Ecopia	référence	
Ecopia / Ecopia	0,17	À l'international
UrbanLandCover / Ecopia	0,24	
IGN / UrbanLandCover	0,39	
Ecopia / UrbanLandCover	0,43	
Cerema / Ecopia	0,43	
IGN / Cerema	0,46	En France
UrbanLandCover / UrbanLandCover	0,54	À l'international
Ecopia / Cerema	0,56	
UrbanLandCover / Cerema	0,58	
Cerema / UrbanLandCover	0,59	
Cerema / Cerema	0,63	À l'international

Le passage des données au travers de l'algorithme LCZ Cerema confirme les résultats obtenus grâce à l'analyse qualitative des données d'entrée (cf. 4.2) : on constate que la combinaison « Bâti 3D Ecopia / OCS Ecopia » demeure la plus pertinente.

La combinaison « Bâti 3D IGN / OCS Cerema », validée et utilisée dans nos études en France, est considérée comme acceptable dans un contexte opérationnel. La combinaison « Bâti 3D UrbanLandCover / OCS UrbanLandCover » obtient des résultats comparables ; nous pouvons considérer que cette solution de production de donnée peut-être validée.

En contrepartie, la combinaison « Bâti 3D Cerema / OCS Cerema » demeure acceptable pour un usage en condition opérationnelle, dans la mesure où les écarts demeurent raisonnables. En contrepartie, elle est moins bonne qualitativement comparativement aux autres combinaisons.

Même si les 2/3 des combinaisons testées n'ont aucun sens d'un point de vue opérationnel, le but était de voir si chacune des données d'entrée avait un impact, et si oui, laquelle impactait le plus.

On note que c'est l'OCS qui impacte le plus, puisque pour une OCS donnée, on a un score assez similaire (indépendamment du bâti 3D associé), mais que les OCS entre elles (pour un bâti 3D donné) pouvait présenter des scores plus divergents.

De plus, un bâti 3D de qualité (IGN ou Ecopia) améliore les résultats d'une OCS « de mauvaise qualité » (UrbanLandCover ou Cerema).

4.4. Conclusion sur l'impact des données d'entrée

On a pu voir que les données d'entrée impactent le résultat des classifications LCZ. Les résultats sont confirmés que l'on observe la qualité intrinsèque ou la qualité d'usage de ces données.

Cependant, cet impact reste négligeable, compte-tenu du fait qu'il n'engendre pas de classification LCZ totalement aberrante (par exemple, un îlot LCZ 2 déterminé en LCZ C) : il s'agit plus d'un jeu de seuils des indicateurs sous-jacents, qui pourraient même être éventuellement ajustés en fonction de la qualité des données d'entrée.

Prenons le cas d'une OCS qui sur-estime la classe bâti, et qui, par sa méthode de calcul, sous-estime la hauteur de ce bâti (donnée bâti 3D) : il pourrait être judicieux d'augmenter légèrement les seuils de l'indicateur BuR (taux de bâti), et diminuer ceux de l'indicateur HRE (hauteur moyenne du bâti).

La méthode opérationnelle développée et utilisée pour cette étude (et toute future étude), dite également simplifiée, permet justement de faire varier ces seuils assez facilement.

Pour le maillage, cet impact est encore plus négligeable. La problématique soulevée ici est l'expertise qui doit être mobilisée en fonction du maillage choisi. Une segmentation morphologique (qui délimite bien des îlots morpho-typiquement) identique aura besoin d'une expertise bien moins poussée qu'un découpage géométrique régulier, qui peut regrouper des îlots de natures différentes, et « moyenner » la classe LCZ sur ces mailles.

Ainsi, en fonction de l'étude, son territoire ou du budget disponible, on peut adapter la méthodologie que nous avons développée pour s'adapter aux différents cas de figure.

Un projet avec des moyens confortables autorisera la production de données OCS et de bâti 3D de bonne qualité accompagnés d'une segmentation morphologique permettant une cartographie LCZ de grande valeur.

Pour les territoires plus modestes, les données OCS et bâti 3D seront de moins bonne qualité, avec un découpage géométrique régulier, mais la cartographie LCZ associée en restera tout de même globalement juste et de qualité. La contrepartie étant un niveau d'expertise un peu supérieur pour interpréter les données.

5. REPRODUCTIBILITÉ SUR RAYONG

Dans ce chapitre sera présentée la production réalisée sur le territoire de Rayong, dans l'optique de valider la reproductibilité de la méthode développée sur Lille. Cette production a été réalisée sur un maillage carré régulier de 200 m, sur la base des données Copia fournies par Airbus D&S.

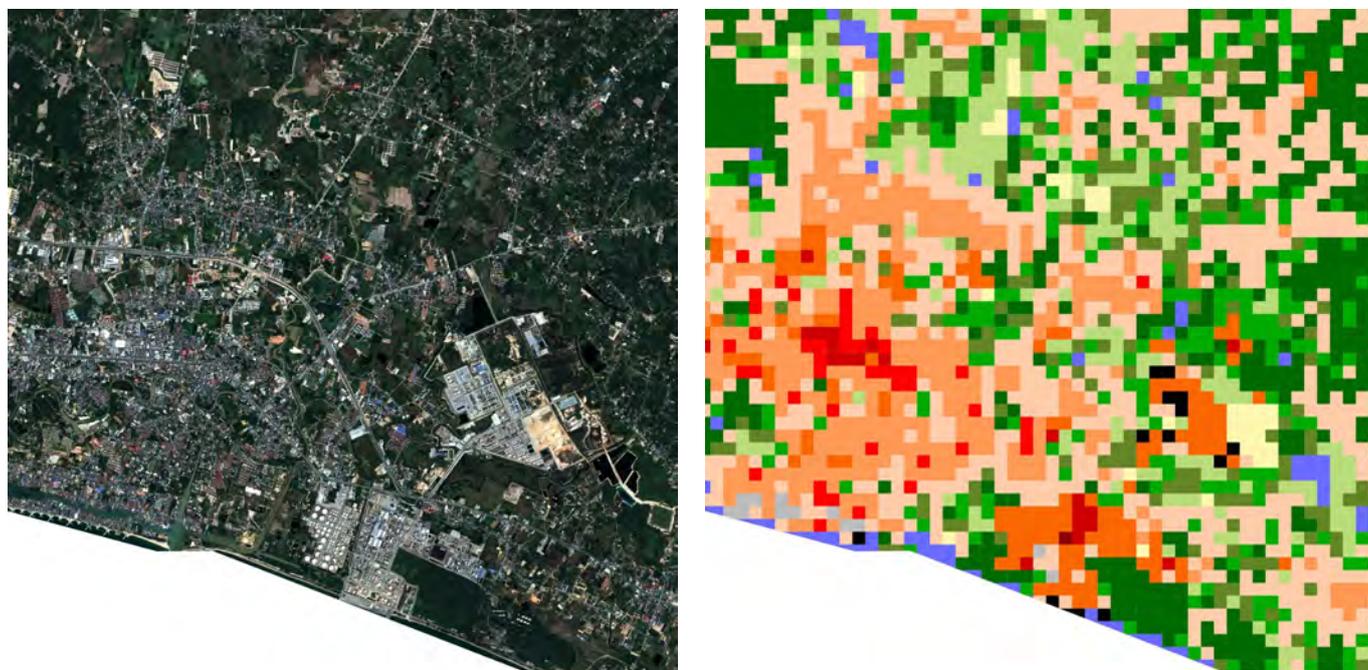


Figure 13 : Image Pléiades de Rayong (à gauche) et cartographie LCZ associée (à droite).

La cartographie semble juste à 1^{re} vue, notamment avec le dégradé des LCZ densément bâties vers les zones de végétation, malgré les zones industrielles qui ressortent plus en LCZ 5 (orange) que LCZ 8 (gris), mais qui peut s'expliquer par une part accrue de surfaces perméables (végétation), et une hauteur du bâti (notamment la présence de nombreux silos) plus importante que des zones industrielles « plus classiques », et qui correspond plus à la définition de la LCZ 5.

Une validation est cependant nécessaire pour confirmer que l'algorithme est bien reproductible. Pour cela, un tirage aléatoire a été réalisé, dans le but d'extraire un polygone par type de classe LCZ (les LCZ 4 et 7 n'étant pas représentées). On les labellise ensuite manuellement à dire d'expert, à la fois par visualisation de l'image Pléiades, mais également avec les données d'entrée OCS et bâti 3D, puisque ce sont elles qui donnent leur classe aux polygones. Enfin, une comparaison est également faite avec le maillage 100 m, qui décrit le territoire de façon plus fine.

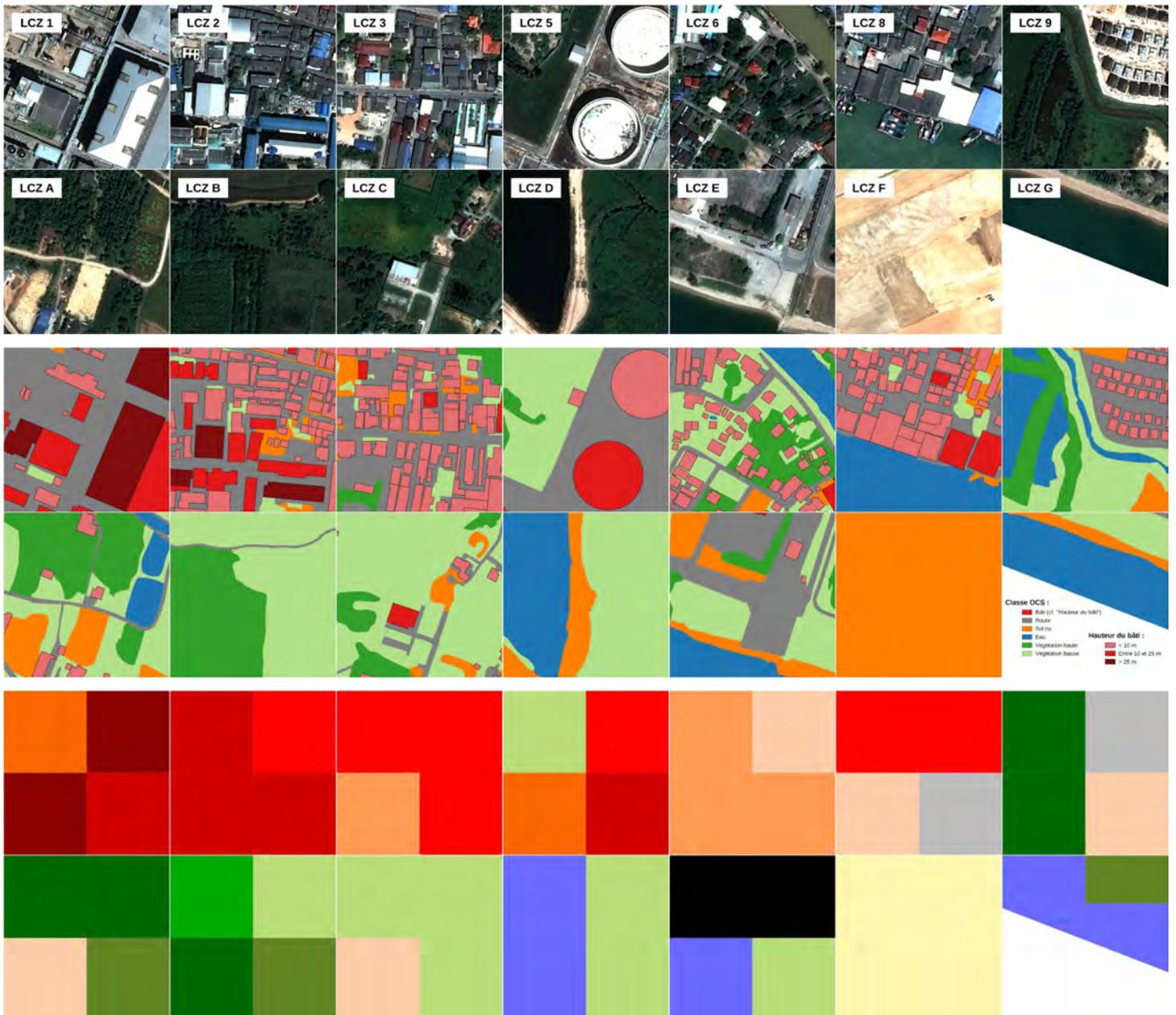


Figure 14 : Validation visuelle avec, de haut en bas, l'image Pléiades, les données OCS/bâti 3D, le maillage 100 m. N.B. : la maille LCZ G est en bordure de zone d'étude, et la zone NoData (1/2 sud-ouest) correspond à la mer.

En tenant compte de la définition des classes LCZ, alors le résultat obtenu est tout à fait juste, au regard de l'image Pléiades ou des données d'entrée OCS et bâti 3D : un très fort taux d'imperméabilisation avec une hauteur de bâti qui décroît pour les LCZ 1 à 3, un taux plus faible d'imperméabilisation pour les LCZ 5 et 6, du bâti plus large pour la LCZ 8, et plus dispersé pour la LCZ 9. Pour les LCZ A à G, la correspondance avec la classe majoritaire d'OCS se retrouve bien.

Comme attendu et expliqué avec l'utilisation d'un maillage géométrique régulier, on note une mixité des morpho-types dans une même maille ; mixité qui tend à diminuer lorsque l'on passe sur le maillage carré à 100 m, qui, comme précisé précédemment, décrit le territoire de façon plus fine.

Ainsi, on peut conclure que la méthode développée sur Lille dans le cadre de ce projet est tout à fait reproductible sur des territoires hors de France métropolitaine.

6. USAGE OPÉRATIONNEL À LILLE

6.1. LCZ et indicateurs sous-jacents

Pour des questions sur l'adaptation des villes au changement climatique et leur aménagement, certains des indicateurs servant à produire la cartographie LCZ peuvent être utilisés. C'est notamment le cas des indicateurs de taux d'imperméabilité et de taux de végétation.

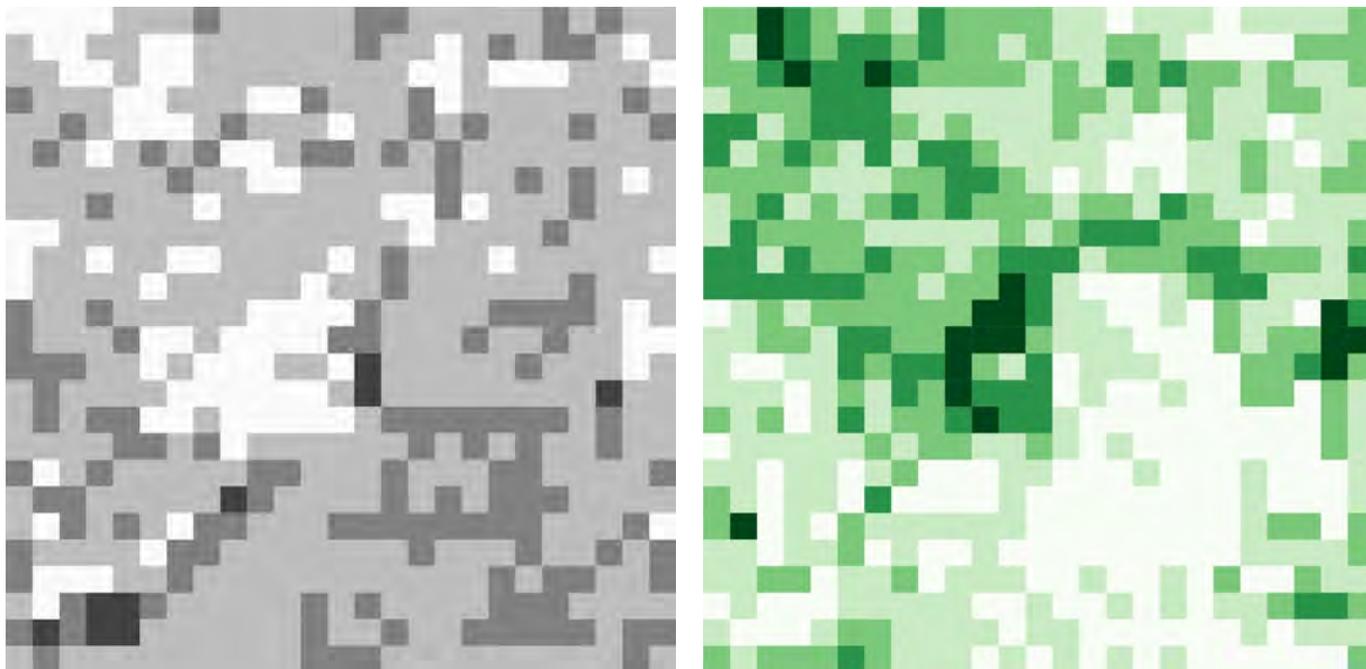


Figure 15 : Indicateurs de taux d'imperméabilité (à gauche) et de taux de végétation (à droite).

L'imperméabilisation des sols et les surfaces végétales sont deux leviers parmi d'autres qui peuvent être utilisés par les aménageurs pour diminuer l'impact du phénomène d'ICU :

- d'un côté, desimpermeabiliser les sols permet de diminuer le stockage de chaleur le jour (par la nature des matériaux), et de diminuer son relâchement la nuit
- de l'autre, la végétation permet un refroidissement de l'air ambiant, par le phénomène d'évapotranspiration

Ces cartes sont donc des outils précieux pour les aider du mieux possible à localiser et prioriser les secteurs à enjeux (zones très imperméables, ou à très faible couvert végétal), et mettre en place les politiques publiques d'aménagement pour lutter contre le phénomène d'ICU.

6.2. Indice de vulnérabilité socio-économique

À titre d'exemple d'exploitation des cartographies LCZ, nous avons produit un indicateur de vulnérabilité socio-économique. Il faut noter que la méthode présentée ici est valide en France, grâce à une donnée socio-économique fine fournie par l'INSEE. Une reproduction sur d'autres territoires nécessiterait une donnée équivalente ou proche.

On peut définir la donnée LCZ comme la représentation d'un aléa : elle représente, de façon très simplifiée, la probabilité qu'un phénomène d'ICU ait lieu : plus l'îlot est rouge sombre, plus il peut être sujet au phénomène d'ICU, tout en gardant en tête qu'un îlot doit être considéré avec ses voisins (un îlot LCZ 2 ne sera pas aussi sensible s'il est entouré de LCZ 3 que de LCZ 6 ou de LCZ 9).

À partir d'autres données, on peut calculer une vulnérabilité sur des enjeux : l'impact potentiel, plus ou moins fort, d'un aléa sur les personnes, les biens, ou l'environnement. L'exercice a été fait sur plusieurs territoires, pour produire un indice de vulnérabilité socio-économique.

Celui-ci a été obtenu à partir des données INSEE de population dite vulnérable, via le calcul :

- d'un indice sanitaire : les personnes à la santé plus fragile, qui regroupe les moins de 5 ans et les plus de 65 ans (les plus de 75 ans dans la littérature, mais les données INSEE, organisées par classe [65 ; 79], ne permettent pas cette distinction)
- d'un indice social : les ménages dits pauvres², qui disposent de peu de moyens pour l'accès aux soins, pour aménager leur logement (isolation et/ou climatisation), ou pour se ressourcer (à la campagne, à la plage, à la montagne...), et sont donc plus sujets à la fatigue et aux complications liées aux fortes chaleurs

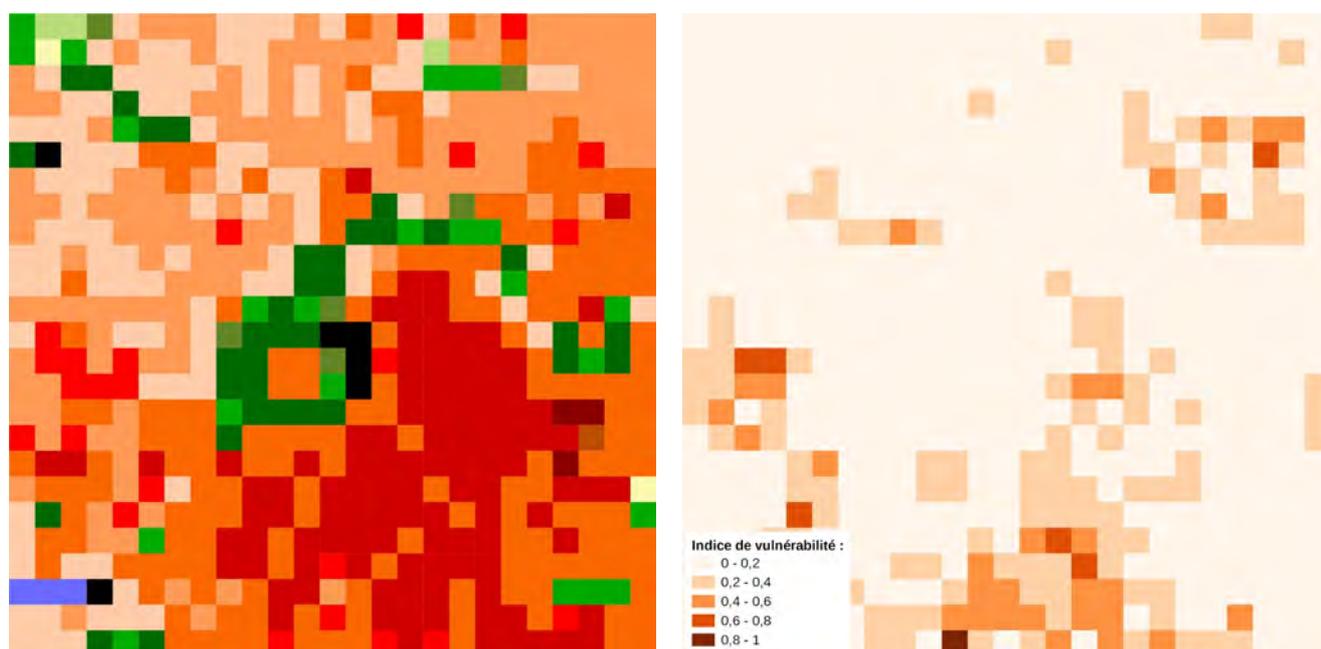


Figure 16 : Cartographie LCZ (à gauche) et indice de vulnérabilité socio-économique (à droite).

Ainsi, l'analyse croisée de ces deux données aléa et vulnérabilité permet de produire une 3^e donnée sur le risque : dans notre exemple, la menace qu'un phénomène d'ICU ait des conséquences graves sur les populations vulnérables d'un point de vue sanitaire ou social.

Dans l'exemple ci-dessus, on note un risque potentiellement accru pour les personnes vivant au sud de la zone : ensemble de polygones classés en LCZ 2 et 3, et indice de vulnérabilité élevé.

Cette donnée est donc un outil supplémentaire pour les aménageurs, pour les aider dans la mise en place de politiques d'aménagement de lutte contre le phénomène d'ICU.

² niveau de vie inférieur au seuil de pauvreté, fixé à 60 % du niveau de vie médian en métropole

Annexes



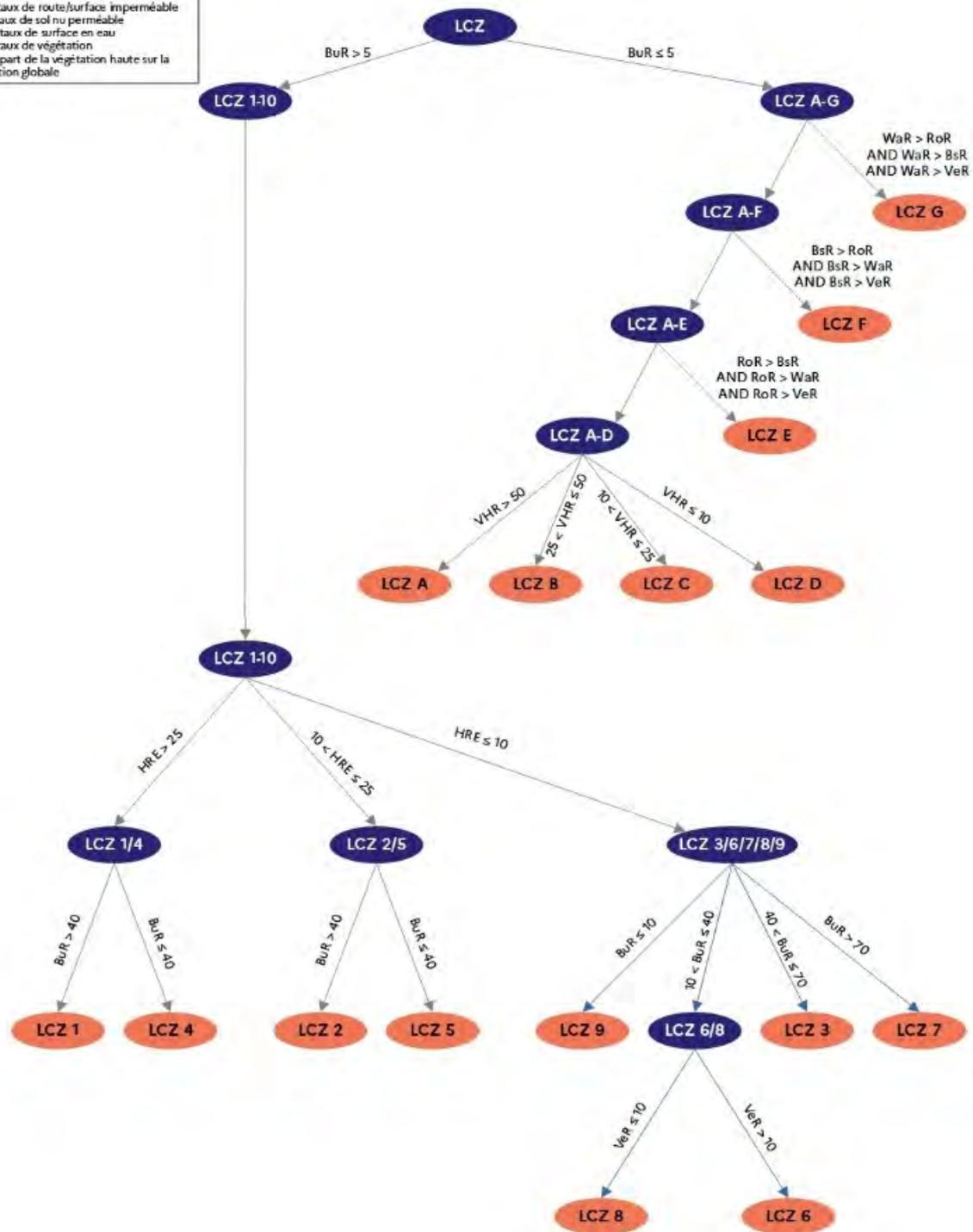
Les zones climatiques locales (LCZ)

Stewart et Oke (2012) — Traduction Cerema

Classes bâties	Définitions	Classes non bâties	Définitions
1. Ensemble compact de tours 	<p>Mélange dense de grands immeubles avec des dizaines d'étages. Peu ou pas d'arbres. Sol principalement revêtu. Matériaux de construction : béton, acier, pierre, verre.</p>	A. Espace densément arboré 	<p>Paysage fortement boisé composé d'arbres à feuilles caduques et/ou à feuilles persistantes. Couverture du sol principalement perméable (plantes basses). Fonction de la zone : forêt, arboriculture, parc urbain.</p>
2. Ensemble compact d'immeubles 	<p>Mélange dense de bâtiments de hauteur moyenne (3 à 9 étages). Peu ou pas d'arbres. Sol principalement revêtu. Matériaux de construction : pierre, brique, tuile, béton.</p>	B. Espace arboré clairsemé 	<p>Paysage légèrement boisé composé d'arbres à feuilles caduques et/ou à feuilles persistantes. Couverture du sol principalement perméable (plantes basses). Fonction de la zone : forêt, arboriculture, parc urbain.</p>
3. Ensemble compact de maisons 	<p>Mélange dense de bâtiments de faible hauteur (1 à 3 étages). Peu ou pas d'arbres. Sol principalement revêtu. Matériaux de construction : pierre, brique, tuile, béton.</p>	C. Espace végétalisé hétérogène 	<p>Buissons, arbustes et ligneux espacés. Couverture du sol principalement perméable (sol nu ou sable). Fonction de la zone : maquis, agriculture.</p>
4. Ensemble de tours espacées 	<p>Tours espacées de plus de 10 étages. Sol perméable végétalisé en abondance (plantes basses, arbres épars). Matériaux de construction : béton, acier, pierre, verre.</p>	D. Végétation basse 	<p>Paysage plat composé d'herbe ou plantes herbacées, de cultures. Peu ou pas d'arbres. Fonction de la zone : prairie, agriculture, parc urbain.</p>
5. Ensemble d'immeubles espacés 	<p>Bâtiments de hauteur moyenne espacés (3 à 9 étages). Sol perméable végétalisé en abondance (plantes basses, arbres épars). Matériaux de construction : béton, acier, pierre, verre.</p>	E. Sol imperméable naturel ou artificiel 	<p>Paysage plat rocheux ou revêtu. Peu ou pas d'arbres ou de plantes. Fonction de la zone : désert naturel (roche) ou route.</p>
6. Ensemble de maisons espacées 	<p>Bâtiments de faible hauteur espacés (1 à 3 étages). Sol perméable végétalisé en abondance (plantes basses, arbres épars). Matériaux de construction : bois, brique, pierre, tuile, béton.</p>	F. Sol nu 	<p>Paysage plat composé de sol nu ou de sable. Peu ou pas d'arbres ou de plantes. Fonction de la zone : désert naturel ou agriculture.</p>
7. Ensemble dense de maisons ou constructions légères 	<p>Mélange dense de bâtiments à un étage. Peu ou pas d'arbres. Sol principalement compacté. Matériaux de construction légers : bois, chaume, tôle ondulé, etc.</p>	G. Eau 	<p>Plans d'eau (mers, lacs, rivières, bassins, lagons).</p>
8. Bâtiments bas de grande emprise 	<p>Bâtiments bas (1 à 3 étages) de grande emprise, et espacés. Peu ou pas d'arbres. Sol principalement revêtu. Matériaux de construction en acier, béton, métal et pierre.</p>	10. Industrie lourde 	<p>Structure industrielle basse ou de hauteur moyenne (tours, réservoirs, cheminées). Peu ou pas d'arbres. Sol principalement revêtu ou compacté. Matériaux de construction : métal, acier, béton.</p>
9. Implantation diffuse et espacée de maisons 	<p>Bâtiments de petite ou moyenne hauteur et éloignés dans un cadre naturel ou végétalisé. Sol perméable végétalisé en abondance (plantes basses, arbres épars).</p>		

Description des classes de LCZ.

HRE = Height of Roughness Elements
 BuR = taux de bâti
 RoR = taux de route/surface imperméable
 BsR = taux de sol nu perméable
 WaR = taux de surface en eau
 VeR = taux de végétation
 VHR = part de la végétation haute sur la végétation globale



Arbre de décision de la version opérationnelle.

Classes LCZ :

-  LCZ 1 = Compact high-rise
-  LCZ 2 = Compact midrise
-  LCZ 3 = Compact low-rise
-  LCZ 4 = Open high-rise
-  LCZ 5 = Open midrise
-  LCZ 6 = Open low-rise
-  LCZ 7 = Lightweight low-rise
-  LCZ 8 = Large low-rise
-  LCZ 9 = Sparsely built
-  LCZ 10 = Heavy industry
-  LCZ A = Dense trees
-  LCZ B = Scattered trees
-  LCZ C = Bush, scrub
-  LCZ D = Low plants
-  LCZ E = Bare rock or paved
-  LCZ F = Bare soil or sand
-  LCZ G = Water

Symbologie des cartographies LCZ.



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES
DE DEMAIN