

Green Urban Sat

Rapport de synthèse du projet



**métropole
GrandNancy**



Laboratoire
image, ville, environnement | LIVE
de l'Université de Strasbourg
et du CNRS



TERRANIS

RAPPORT D'ÉTUDE

Août 2024

Le Cerema est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, présent partout en métropole et dans les Outre-mer grâce à ses 26 implantations et ses 2 400 agents. Détenteur d'une expertise nationale mutualisée, le Cerema accompagne l'État et les collectivités territoriales pour la transition écologique, l'adaptation au changement climatique et la cohésion des territoires par l'élaboration coopérative, le déploiement et l'évaluation de politiques publiques d'aménagement et de transport.

Doté d'un fort potentiel d'innovation et de recherche incarné notamment par son institut Carnot Clim'adapt, le Cerema agit dans 6 domaines d'activités : Expertise & ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral.

Site web : www.cerema.fr

Green Urban Sat

Rapport de synthèse du projet

Commanditaire : CNES

Auteur : Cerema

Responsable du rapport

Tél. : +33(0)7 64 73 35 20

Courrier : emma.bousquet@cerema.fr

Direction Territoriale Occitanie, 1 avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse

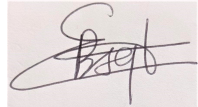

Historique des versions du document

v0	30/08/2024	Livrable L1.3 – rapport de synthèse du projet

Références

N° d'affaire : 22-TV-0274

Partenaires : CNES, TerraNIS, Laboratoire Image Ville Environnement, métropole du grand Nancy

Emma Bousquet	Cerema/OSECC	Auteur principal	30/08/2024	
Julien Bouyer	Cerema/TEAM	Contributeur	30/08/2024	
Céline Ciron	TerraNIS	Contributeur	30/08/2024	

Résumé de l'étude

Ce rapport présente le projet SCO Green Urban Sat dans son ensemble, projet de deux ans qui a permis de développer une méthode de cartographie fine de la végétation urbaine. L'objectif final est de pouvoir quantifier certains services écosystémiques fournis par la végétation, dans un contexte de changement climatique avec de forts impacts en milieu urbain.

La méthode est basée sur des données satellitaires à très haute résolution spatiale Pléiades ; la zone test est la métropole du Grand Nancy. Ce rapport décrit les différentes étapes de calcul permettant d'obtenir une couche géospatialisée des formes végétales et de leurs attributs descriptifs associés. Ces attributs serviront de métriques dans le calcul d'indicateurs des services écosystémiques sélectionnés.

Les différentes sous-parties de ce rapport sont approfondies dans plusieurs livrables spécifiques.

5 à 10 mots clés à retenir de l'étude

Imagerie satellitaire, Pléiades, télédétection, analyse spatiale, végétation, formes végétales, classification, strates, paysages, attributs descriptifs, services écosystémiques.

Statut de communication de l'étude

Les études réalisées par le Cerema sur sa subvention pour charge de service public sont par défaut indexées et accessibles sur le portail documentaire du Cerema. Toutefois, certaines études à caractère spécifique peuvent être en accès restreint ou confidentiel. Il est demandé de préciser ci-dessous le statut de communication de l'étude.

- Accès libre : document accessible au public sur internet
- Accès restreint : document accessible uniquement aux agents du Cerema
- Accès confidentiel : document non accessible

Cette étude est capitalisée sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx), via le dépôt de document : <https://doc.cerema.fr/depot-rapport.aspx>

Liste des abréviations

BD	Base de Données
DHDA	Des Hommes et Des Arbres
FV	Forme Végétalisée
GUS	Green Urban Sat
HRL	High Resolution Layers (Copernicus)
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
IRC	Infra-Rouge Couleur
LAI	Leaf Area Index
LCZ	Local Climate Zones
MGN	Métropole du Grand Nancy
MNH	Modèle Numérique de Hauteur
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MSAVI	Modified-Soil Adjusted Vegetation Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
OCS	Occupation du Sol
OSECC	Observation Satellitaire Et Changement Climatique
OSM	Open Street Map
PAN	Panchromatique
PIR	Proche InfraRouge
RGB/RVB	Red Green Blue / Rouge Vert Bleu
RF	Random Forest
RPG	Référentiel Parcellaire Graphique
SCO	Space Climate Observatory
SE	Services Écosystémiques
STL	Street Tree Layer
TEAM	Transferts et interactions liés à l'EAU en Milieu construit
THRS	Très Haute Résolution Spatiale

Glossaire

Polygone bufferisé	Polygone qui a subi une extension de sa surface.
Canal / bande spectrale	Chaque bande spectrale est une image raster en niveau de gris qui représente les valeurs de réflectance des surfaces au sol pour un intervalle de longueurs d'ondes donné.
Classification	Distribution en classes des pixels d'une image selon un ou plusieurs critères.
Espace végétalisé	Paysage composé d'une ou plusieurs structures végétalisées.
Forme végétalisée	Structure végétale contextualisée par son paysage d'implantation.
Image multi-spectrale	Image composée de plusieurs bandes spectrales.
Indicateur géométrique	Calcul de forme/géométrie sur des polygones (donnée vecteur).
Indice radiométrique	Dérivé d'un calcul sur les bandes spectrales.
MNH	Représentation des données d'élévation des éléments du sur-sol, bâtiments et végétation principalement (image raster).
MNS	Représentation de la forme de la surface terrestre incluant tous les éléments visibles et permanents du paysage comme les bâtiments ou la végétation (image raster).
MNT	Représentation de la topographie (terrain « nu ») d'une zone terrestre (image raster).
Paysage	Fragment de territoire dont l'organisation spatiale répond à certains critères d'urbanisme, ou de marqueurs géographiques.
Raster	Représente un ensemble d'informations captées sous la forme d'une matrice de pixels arrangée en lignes et colonnes.
Résolution spatiale	Taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer sur une image raster.
Résolution spectrale	Capacité d'un capteur à travailler sur des petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est grande, plus le spectre obtenu est détaillé.
Segmentation	Découpage d'une image en plusieurs segments selon un ou plusieurs critères.
Structure végétalisée	Surface unitaire d'occupation du sol relativement homogène en matière de développement vertical et répartition surfacique de la végétation.
Téledétection	Ensemble des techniques utilisées pour déterminer à distance les propriétés d'objets naturels ou artificiels à partir des rayonnements qu'ils émettent ou réfléchissent.
Texture	Représentation de l'homogénéité des valeurs d'un voisinage de pixels.
Vecteur	Représente un ensemble d'informations sous la forme d'objets géométriques individuels (ponctuels, lignes, polygones) définis par différents attributs.

Sommaire

1	Contexte : apport de Green Urban Sat pour l'évaluation des services écosystémiques.....	8
2	Etat de l'art "Très haute résolution spatiale et détection de la végétation"	9
3	Référentiel des formes végétalisées choisi pour le projet Green Urban Sat 10	
4	Méthodologie de production.....	13
4.1	Données d'entrée.....	14
4.1.1	Images Pléiades.....	14
4.1.2	Données auxiliaires.....	14
4.2	Extraction de la végétation.....	14
4.3	Distinction des strates verticales.....	15
4.4	Distinction des formes végétales horizontales.....	16
4.5	Détection des paysages.....	18
4.6	Calcul des attributs descriptifs.....	19
5	Résultats obtenus.....	19
6	Validation.....	20
6.1	Validation qualitative.....	20
6.2	Validation quantitative.....	22
6.3	Relevé terrain.....	23
7	Démonstrateur.....	23
7.1	Production des indicateurs de synthèse de végétalisation à différents niveaux d'analyse.....	23
7.2	Développement des interfaces de visualisation des données et indicateurs.....	24
8	Conclusion.....	27
9	Bibliographie.....	27

Introduction

Aujourd'hui les collectivités se fixent des objectifs de plus en plus ambitieux en terme de renaturation de la ville, pour répondre aux enjeux d'adaptation au changement climatique et de transition écologique. La végétation constitue en effet un élément fondamental de l'écosystème urbain par les nombreux services qu'elle lui rend, avec notamment, la lutte contre les îlots de chaleur, le maintien de la biodiversité, l'amélioration de la qualité de l'air, la séquestration du carbone et l'amélioration du cadre de vie de ses habitants.

Parmi les besoins pour permettre l'évaluation de services écosystémiques (SE) rendus localement, on doit disposer d'une meilleure description de l'implantation et des caractéristiques morphologiques et écologiques de la végétation, via des bases de données (BD) géographiques numériques pour alimenter les outils, méthodes et modèles de quantification et spatialisation de l'information.

Les BD sur étagère sont assez adaptées quand il s'agit d'évaluation à grande échelle (BD d'occupation du sol 'dégradées'), pour des milieux homogènes (BD forestières), ou pour des applications très thématiques (BD naturalistes pour applications en lien avec la biodiversité). A l'échelle d'une agglomération, si ce patrimoine végétal est bien présent sur de grandes surfaces homogènes en milieu rural et agroforestier, il est réparti de manière beaucoup plus hétérogène et fragmenté dans le milieu urbain, où une description plus fine est requise.

L'arrivée des satellites à très haute résolution spatiale (THRS) Pléiades en 2011 (50 cm) et même Pléiades Neo en 2022 (30 cm) a permis des détections à grande échelle et beaucoup plus précises qu'avec les missions spatiales antérieures, notamment en milieu urbain.

Le projet Green Urban Sat (GUS), labellisé et cofinancé par le Space for Climate Observatory (SCO) en 2021, a permis de développer une méthode de cartographie fine de la végétation urbaine basée sur l'imagerie satellitaire Pléiades, afin de pouvoir ensuite mieux évaluer ses services écosystémiques. L'objectif de ce projet de deux ans était de développer sur le territoire de la Métropole du Grand Nancy une méthodologie répliquable, et au maximum indépendante des données auxiliaires.

Ce projet a été mené par le Cerema (Pôle satellitaire, Cerema Occitanie, et équipe recherche TEAM, Cerema Est), le laboratoire LIVE-A2S, et la société TerraNIS.

Les résultats obtenus sur le territoire démonstreur de la Métropole du Grand Nancy sont diffusés en ligne sur la plateforme GreenCity opérée par TerraNIS.

1 CONTEXTE : APPORT DE GREEN URBAN SAT POUR L'ÉVALUATION DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Fort de son expertise développée depuis quelques années sur le sujet de l'apport en SE de la nature en ville, le Cerema a dans un premier temps développé l'**outil SÉSAME**¹ – Services EcoSystémiques rendus par les Arbres, Modulés selon l'Essence – qui permet d'identifier les espèces les plus à même de produire les services attendus dans le cadre d'un projet d'aménagement ou de végétalisation. Cependant, il permet une aide spécifique au choix de plantation ou de gestion d'un seul ou d'un groupe individu.

Évaluer quantitativement ces services rendus sur une portion étendue de territoire serait un apport tangible pour éclairer et encourager les différents acteurs - élus, services techniques, aménageurs et citoyens – à repenser l'aménagement des villes en meilleure synergie avec les actions de végétalisation.

Dans ce cadre, le Cerema mène depuis 2021 une action dans le cadre du programme **Des Hommes et Des Arbres** (DHDA)² visant à développer des méthodes et outils d'évaluation et de valorisation des

¹Site web de l'outil : <https://sesame.cerema.fr/>

²Dans le cadre du programme France 2030 / PIA3 « Territoires d'Innovation. Page web du projet : <https://www.deshommesetdesarbres.org/projets/evaluations-ses/>

SE sur les territoires urbanisés, et à les déployer sur le territoire démonstrateur de la Métropole du Grand Nancy, son partenaire. Cette approche est plutôt orientée diagnostic et aide à la stratégie et décision à l'échelle globale d'une collectivité ou agglomération.

Dans un premier temps, et du fait des compétences de l'équipe projet, une liste thématique de SE à évaluer a été priorisée :

- la **régulation microclimatique** (rafraîchissement et adaptation à la surchauffe urbaine)
- la **régulation hydrologique** (abattement du ruissellement, infiltration)
- le **maintien des continuités écologiques** (restauration de trames vertes)
- les **bénéfices socioculturels** (espaces récréatifs, de bien être et structuration paysagère)

Pour alimenter les divers outils, méthodes et modèles de quantification et spatialisation d'indicateurs de SE associés développés dans le cadre du projet, **une identification fine des formes végétalisées et de leurs attributs est nécessaire**. Typiquement pour évaluer une capacité de rafraîchissement, liée à l'ombrage, une information précise sur la forme (surface/volume) des canopées arborées, leur répartition dans l'espace, et leur densité de feuillage (ou LAI) sont importants à spécifier.

Ainsi, la méthode de cartographie détaillée de la végétation proposée dans le projet GUS vise l'automatisation et la répliquabilité à n'importe quelle agglomération, en s'appuyant sur des produits de télédétection à très haute résolution spatiale (THRS) qui offrent aujourd'hui des perspectives de description très fine des objets observés.

2 ETAT DE L'ART "TRÈS HAUTE RÉOLUTION SPATIALE ET DÉTECTION DE LA VÉGÉTATION"

Historiquement, la cartographie de la végétation urbaine était majoritairement réalisée localement par relevés de terrain, par imagerie aérienne mais avec un coût très élevé, ou gratuitement mais de manière grossière par imagerie satellitaire à moyenne résolution. Copernicus offre par exemple des jeux de données (High Resolution Layer) de couverture arborée (Tree Cover Density) et herbacée (Grasslands) sur l'Europe continentale, à 10 m de résolution spatiale. Cette résolution est cependant limitante pour l'analyse de la végétation urbaine. Copernicus fournit également via l'Urban Atlas une couche de couverture arborée urbaine (Street Tree Layer) basé sur divers produits satellitaires, entre 2 et 4 m de résolution. Bien que plus détaillée que les deux précédente, cette couche reste insuffisante pour les collectivités et n'est disponible que sur les centre-villes des grandes agglomérations. Depuis l'arrivée des satellites à très haute résolution spatiale (THRS) **Pléiades** en 2011 (Gleyzes et al., 2012), de nombreux travaux s'intéressent à leur apport pour la **détection de la végétation urbaine** (Rougier, 2016 ; Nabucet, 2018).

En effet, les images issues des satellites Pléiades présentent une résolution spatiale de 50 cm, quatre canaux spectraux (rouge, vert, bleu, et proche infrarouge) en plus de la bande panchromatique, et la possibilité de prises de vue stéréoscopiques permettant de remonter à un modèle 3D du terrain observé. L'ensemble de ces spécifications en fait une mission spatiale très bien adaptée pour l'observation de la végétation urbaine, plus fragmentée et moins étendue que la végétation rurale (forêts, landes, prairies, etc.).

La végétation émet un signal particulier dans le **proche infrarouge** à cause de sa concentration en chlorophylle. Des indices radiométriques combinant différentes bandes spectrales dont le proche infrarouge permettent donc de détecter et d'analyser la végétation. Les principaux indices utilisés dans la littérature pour l'analyse de la végétation urbaine sont le **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al., 1974), l'**EVI** (Enhanced Vegetation Index, Huete et al., 2002) et le **MSAVI** (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, Qi et al., 1994). Ces indices aident à distinguer différents types de végétation et à évaluer leur état de santé. Le NDVI est le plus communément utilisé, même si l'EVI et le MSAVI semblent mieux distinguer la végétation sur un fond non végétalisé (toit ou route par exemple). Le **LAI** (Leaf Area Index) est un paramètre biophysique permettant d'évaluer la densité du feuillage. Un proxy du LAI peut être dérivé de l'imagerie satellitaire (Bsaibes et al., 2009) mais ne re-

présente pas les mêmes valeurs qu'un LAI in situ. L'obtention d'un LAI satellitaire à partir d'imagerie Pléiades n'a pas encore été développé.

La **texture** est un autre produit dérivé des images satellites THRS qui représente l'homogénéité radiométrique au sein d'un voisinage de pixels. Cet indicateur permet de distinguer les strates herbacées et arborées sur les images THRS (Dedieu et al., 1997 ; Van Delm and Gulinck, 2011).

Les **données d'élévation**, telles que les modèles numériques de surface dérivés des images satellites Pléiades, sont très intéressantes pour obtenir la hauteur des éléments du sur-sol, dont la végétation. Ces données peuvent permettre de distinguer différentes strates de végétation selon leur hauteur (Iovan et al., 2017).

Différentes méthodes de **classifications automatiques** existent pour détecter la végétation à partir d'imagerie THRS. Ces méthodes prennent en entrée l'image ainsi que les indices radiométriques et attributs texturaux présentés ci-dessus. Ces méthodes peuvent être supervisées (random forest RF, support vecteur machine SVM, réseaux de neurones dont le Convolutional Neural Network CNN, etc.) ou non-supervisées (K-means, ISODATA). Les méthodes supervisées sont conseillées lorsque les classes sont déjà identifiées. L'inconvénient majeur de ces méthodes est la nécessité de production d'échantillons d'entraînement en amont, labellisés avec des données auxiliaires exogènes de végétation (BD TOPO, Registre Parcellaire Graphique RPG, Occupation des SOIs OSO, Street Tree Layer STL, etc.).

Ensuite, il existe deux approches pour la classification automatique à partir d'images raster :

- **L'approche "pixel"** qui attribue à chaque pixel de l'image une classe en fonction de sa valeur radiométrique ;
- **L'approche "orientée-objet"** qui segmente l'image en objets plus larges que le pixel selon un seuil d'homogénéité déterminé. Les objets sont ensuite classés sur la base de critères spectraux, texturaux, de forme ou de voisinage.

Ces deux approches fournissent de bons résultats. L'approche "pixel" peut s'avérer très longue sur les images Pléiades du fait de la très grande quantité de pixels. L'approche orientée objet peut être davantage source d'erreurs et est très dépendante du type de segmentation choisi.

Ainsi, l'imagerie satellitaire THRS Pléiades permet une analyse fine du milieu urbain et de sa végétation, avec des méthodes automatiques basées sur des indicateurs radiométriques et texturaux dérivés. De plus, ces images sont accessibles avec un coût réduit (gratuit pour les archives et pour un quota de programmation, 1.80€/km² au-delà) pour les acteurs publics français dont les collectivités, grâce au dispositif DINAMIS. Le coût des images est plus élevé pour les acteurs privés ou étrangers. Les inconvénients principaux de l'utilisation de l'imagerie THRS sont la nécessité de stockage important et le temps de traitement des données volumineuses. Les ombres et la météo peuvent également affecter la qualité des images (Shahtahmassebi et al., 2013) et donc des cartographies et indicateurs dérivés.

Le détail de cet état de l'art est disponible dans le rapport du livrable L2.2.1 de Mathilde Segaud (2022).

3 RÉFÉRENTIEL DES FORMES VÉGÉTALISÉES CHOISI POUR LE PROJET GREEN URBAN SAT

Cette première partie du projet propose un référentiel socle de description de la végétation pour à la fois déterminer la nomenclature d'une BD adaptée à l'évaluation des SE propre au projet mais aussi les critères de classification des algorithmes de traitement d'image et de données décrites au chapitre 4.

Le référentiel a été élaboré de manière à répondre à plusieurs problématiques importantes :

- dépasser le mode d'identification usuel en strates verticales (arborée/herbacée) ou en espaces de nature selon leur usages et en partie artificialisés (parcs, squares, etc.) ;

- décrire à une résolution très fine les formes morcelées et hétérogènes de végétation implantées en milieu urbain, en particulier dans l'espace privé ou les services des collectivités ne bancarisent pas de données ;
- disposer d'une nomenclature suffisamment générique pour satisfaire les attentes interdisciplinaires liées aux différents SE évaluer, et les besoins opérationnels des collectivités qui diffèrent selon les territoires.

L'approche retenue est une classification structurelle reposant sur un double socle de description :

- une description de la **morphologie de la végétation** selon 2 critères : la strate verticale (basé sur le critère de hauteur) et l'organisation surfacique (basée sur l'emprise 2D) (Figure 1)
- une description de l'**implantation de la végétation** qualifiée de « paysage » (Figure 2)

La schématisation synthétique correspond à une description matricielle où chaque forme ou espace végétalisé(e) correspond au croisement des deux catégories de description précédentes (Figure 3).

Les éléments de la BD de végétation issue de GUS sont des objets vectoriels. Ils sont décrits selon une nomenclature dont les différentes entités correspondent à chaque forme végétalisée, et embarquent des attributs quantitatifs (chap. 4.6. Figure 10) dont le type de paysage d'implantation.

L'intérêt de ce référentiel est qu'il peut tout à fait être adapté à d'autres applications de l'analyse territoriale que l'évaluation des SE.

Cependant, la proposition initiale théorique a dû être revue de manière itérative du fait des limites techniques de la télédétection satellitaire et de notre algorithme de classification dans sa version actuelle. On peut notamment relever sa capacité partielle à repérer fidèlement des organisations spatiales d'arbres régulières ou diffuses, ou bien discriminer la nature de strates herbacées naturelles, agricoles ou urbaines. Au final, le référentiel retenu dans la version actuelle se compose de :

- Paysages : 1er niveau uniquement : milieu urbain, voiries et infrastructures, étendues et cours d'eau, milieu agricole et forestier
- Structures Végétalisées :
 - Strate arborée :
 - Arbre isolé
 - Alignement d'arbres
 - Boisement
 - Strate arbustive :
 - Arbuste isolé
 - Alignement d'arbustes
 - Boisement
 - Strate herbacée
 - Prairies
 - Cultures

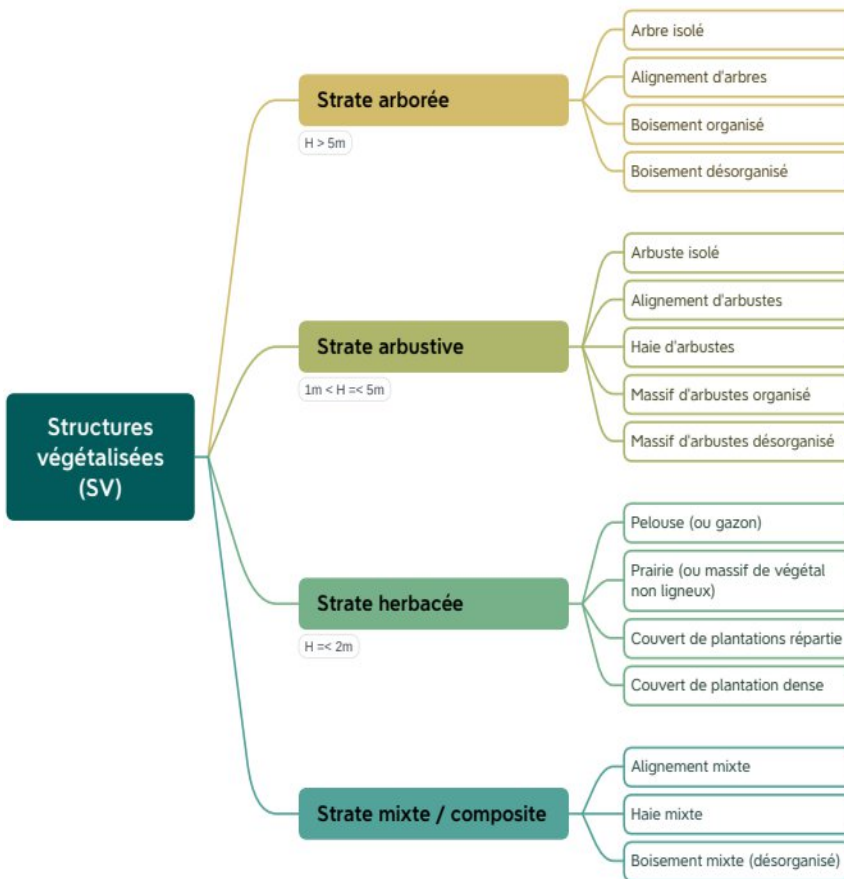


Figure 1 – Référentiel de description des structures végétalisées

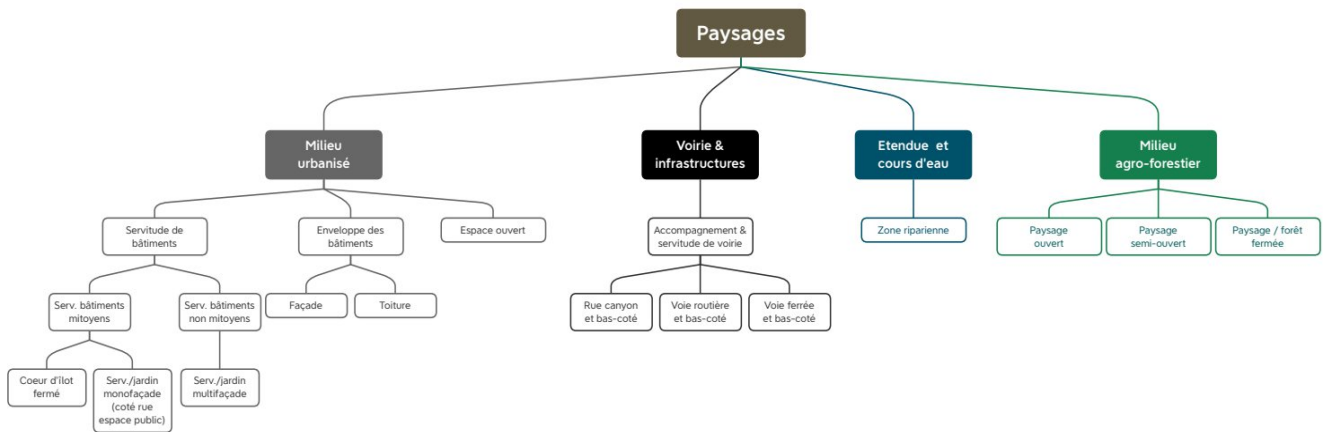


Figure 2 – Référentiel de description des paysages

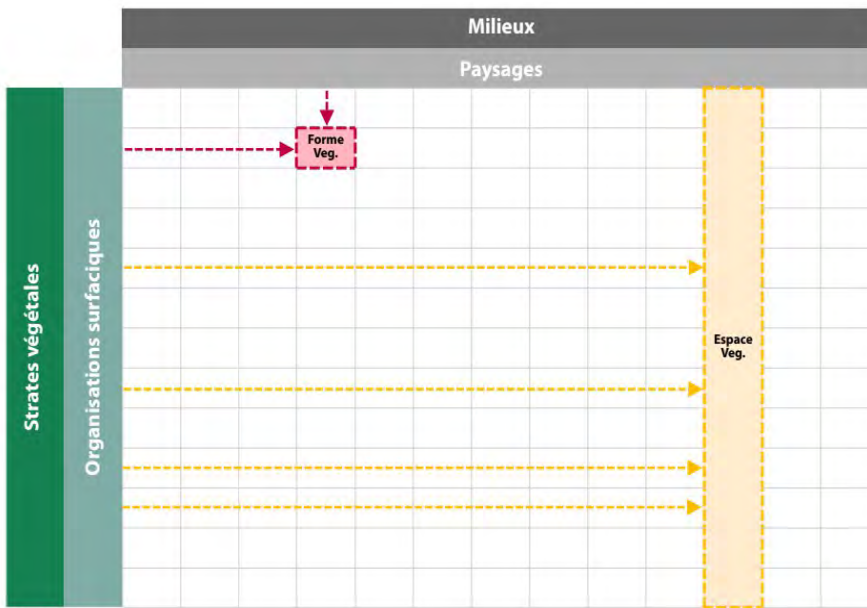


Figure 3 – Référentiel de classification de la végétation

4 MÉTHODOLOGIE DE PRODUCTION

La méthodologie générale de production est détaillée dans la Figure 4. Elle est basée sur le référentiel présenté ci-dessus, adapté à la faisabilité technique de l'analyse d'images Pléiades, et composée de cinq étapes : extraction de la végétation, distinction des strates verticales, distinction des formes végétales horizontales, détection des paysages, et calcul des attributs descriptifs associés aux formes végétales. Le détail de la méthodologie est disponible dans le rapport du livrable L3.2.2 de Mathilde Segaud et al. (2024).

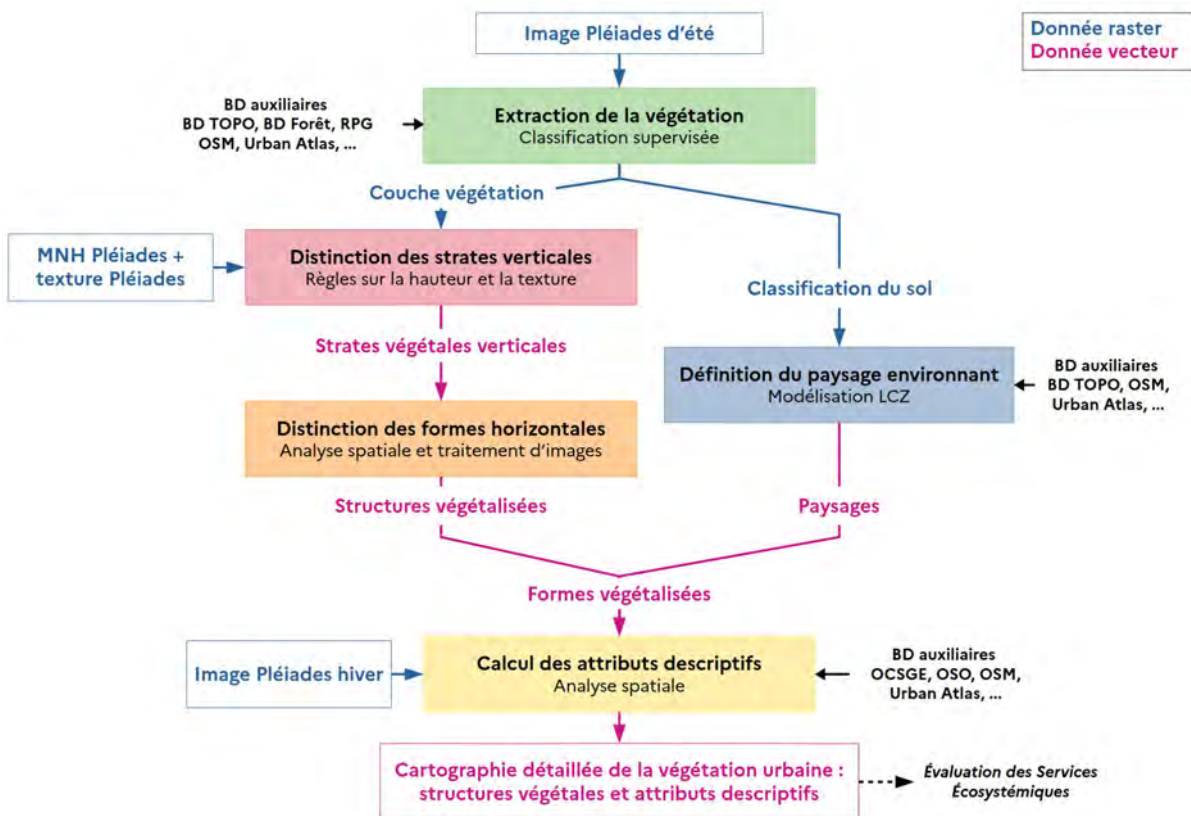


Figure 4 – Méthodologie de cartographie fine de la végétation urbaine développée dans le projet GUS.

4.1 Données d'entrée

4.1.1 Images Pléiades

Le projet GUS vise à développer une méthodologie applicable à toutes les métropoles, en limitant l'usage de données locales et le nombre d'images satellitaires d'entrée pour réduire les coûts. Pour une cartographie précise de la végétation urbaine, des données à très haute résolution spatiale sont nécessaires, d'où l'utilisation des images satellitaires Pléiades qui offrent une résolution de 50 cm et quatre bandes spectrales, permettant de dériver plusieurs indices radiométriques. Le mode stéréoscopique de Pléiades fournit aussi des modèles numériques de surface (MNS). Les données Pléiades sont également peu coûteuses pour les métropoles grâce au dispositif Dinamis.

Le projet a comparé cinq images Pléiades de différentes saisons, démontrant que **l'image de référence doit être acquise entre mai et juillet**, lors du pic d'activité de la végétation, avec en complément **une image d'hiver** permettant de distinguer les types de végétation et de sol. Pour la donnée d'élévation, le **mode tri-stéréoscopique** doit idéalement être choisi pour l'image d'été.

Pour le démonstrateur sur la métropole du grand Nancy, nous disposons d'une image tri-stéréoscopique acquise le 14 juin 2022 et d'une image monoscopique acquise le 21 décembre 2021.

4.1.2 Données auxiliaires

Les bases de données géographiques exogènes peuvent être : locales, nationales, européennes ou internationales. Ces données sont utilisées pour la production des échantillons d'apprentissage, la détection des strates verticales, des paysages et le calcul des attributs descriptifs de la végétation. La méthode GUS a été conçue pour être indépendante du type de données exogènes utilisées ; cependant les résultats obtenus seront de moins bonne qualité sur une métropole disposant de peu de données exogènes (hors Europe principalement).

Les données exogènes utilisées sur la France sont : le LIDAR HD, la BD TOPO, la BD FORET, et le RPG. Les données exogènes pouvant être utilisées sur l'Europe sont : les LPIS (Land Parcel Information System), le Street Tree Layer et l'Urban Atlas, et les Couches à Haute Résolution de Copernicus. Enfin, en-dehors de l'Europe, l'Open Street Map pourra être utilisé.

Des bases de données locales de gestion ont également servi de référence pour évaluer les résultats.

4.2 Extraction de la végétation

L'extraction de la végétation à partir de l'image satellitaire Pléiades se fait par **classification supervisée avec une approche pixel**. La méthode développée par le Cerema Occitanie dans le cadre des productions de cartes d'occupation du sol a été réutilisée. Cette méthode de classification considère comme données d'entrée les 4 canaux R G B PIR de l'image Pléiades, des néocanaux (NDVI, MSA-VI2, NDWI2, teinte, texture SFS), et le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) associé. La production des échantillons d'apprentissage se fait automatiquement par tirage dans diverses bases de données auxiliaires faisant référence (RPG, BD TOPO, etc.). Ces échantillons doivent cependant être nettoyés et corrigés d'erreurs telles que des recouvrements. Le nettoyage se fait avec des indices radiométriques (NDVI, NDWI, etc.). Des ratios sont ensuite appliqués pour la sélection des échantillons d'apprentissage. En effet, les classes doivent être échantillonnées proportionnellement à la représentativité réelle de chaque classe sur le territoire étudié.

Le modèle de machine learning utilisé est le **Random Forest** (Breiman, 2001) implémenté dans l'OTB, l'un des algorithmes les plus utilisés dans la littérature, et l'un des plus robustes face à la quantité de données d'entrée.

La classification fournit en sortie cinq classes : bâti, route, sol nu, eau, et végétation (Figure 5). C'est uniquement cette dernière classe qui nous intéresse pour la suite du projet GUS.

L'étape d'extraction de la végétation est donc assez lourde à mettre en place car elle comporte une large part d'intervention manuelle, principalement pour la préparation des données, la création des échantillons d'apprentissage, leur nettoyage et le choix des seuils et ratios à appliquer selon le territoire d'étude. Une alternative pour simplifier cette étape et la rendre indépendante de données auxi-

liaires serait d'extraire la végétation par la simple application d'un seuillage sur le NDVI, même si les résultats seront moins qualitatifs.

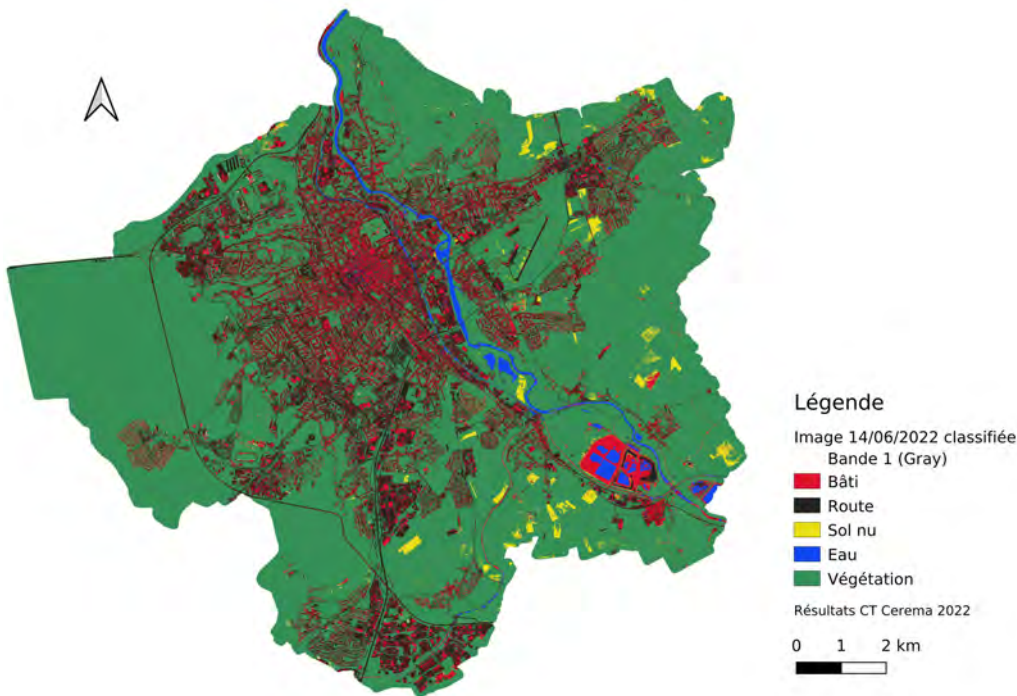


Figure 5 - Résultat de la classification du sol sur la métropole du grand Nancy.

4.3 Distinction des strates verticales

A partir de la couche de végétation précédemment produite, trois strates verticales de végétation sont identifiées (strate arborée, arbustive et herbacée).

Dans le référentiel choisi pour GUS, la distinction de ces strates est basée sur des critères de hauteur. Cependant, ayant constaté de fortes incertitudes sur les valeurs de hauteurs du MNH Pléiades, le choix a été fait de **prioriser la valeur de texture sur celle de hauteur** (Figure 6). Ce choix peut être modifié si le MNH fourni en entrée présente une grande fiabilité (LiDAR par exemple).

NB : le MNH utilisé pour le projet GUS a été obtenu par soustraction entre le MNS Pléiades calculé par le logiciel CARS et le MNT RGE alti de l'IGN.

La distinction est appliquée sur une segmentation de l'image avec l'algorithme MeanShift de l'OTB (Comaniciu and Meer, 2002), qui permet de regrouper les pixels à radiométries similaires en super-pixels sur lesquels des statistiques sont calculées. Les critères de distinction des strates sur les segments végétalisés sont les suivants :

- **strate herbacée** : texture ≥ 11
- **strate arbustive** : texture < 11 et MNH ≤ 3 m
- **strate arborée** : texture < 11 et MNH > 3 m

Puis, des corrections ont dû être appliquées afin de reclassifier les segments mal classés. Ceux-ci sont principalement constitués de couronnes et bords d'arbres classés en arbustes, le MNH y étant inférieur à 3 m. Pour cela, les segments arbustifs sont comparés à leurs voisins avec des règles de hauteur et de surface, et leur classe peut être réattribuée comme herbacée ou arborée, ou conservée selon les cas.

Les segments situés dans l'ombre présentent également de nombreuses fausses détections car leur texture est très faible. Les segments herbacés uniquement entourés de segments arborés ou arbustifs et dont le MNH est supérieur à 3 m (respectivement 1 m) ont donc été reclassés en arboré (respectivement arbustif).

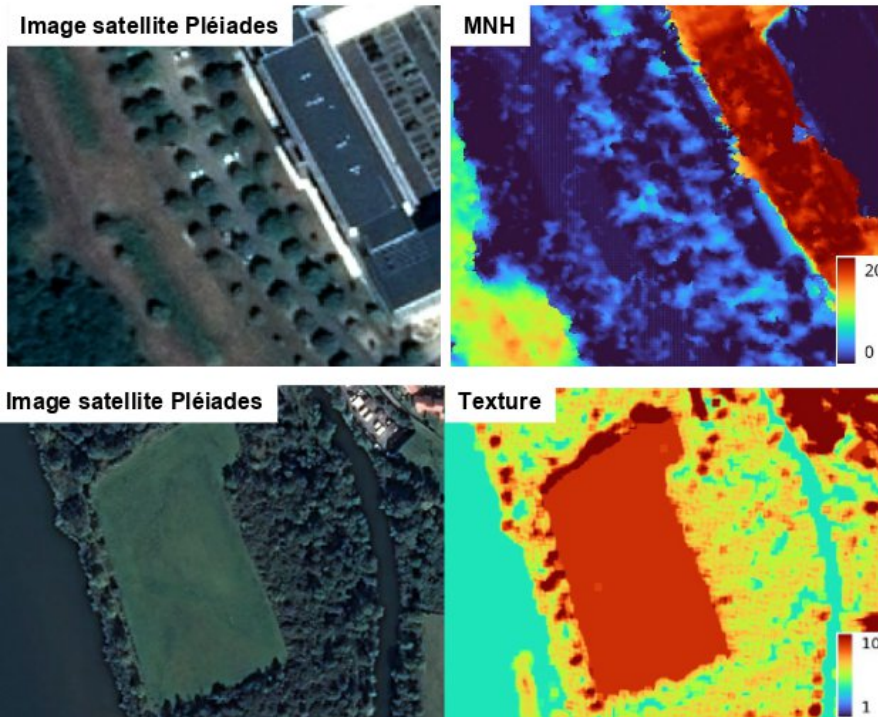


Figure 6 – Haut : Image Pléiades et MNH associé. Les différentes strates végétales sont difficilement différenciables. Bas : Image Pléiades et texture associée. La différence de texture entre végétation herbacée et ligneuse ressort nettement

4.4 Distinction des formes végétales horizontales

Au sein des strates verticales détectées peuvent ensuite être distinguées des formes végétales horizontales. Le référentiel de GUS distingue les **alignements**, **boisements** et individus **isolés** dans les ligneux (strates arborées et arbustives) ; et les **prairies** des **cultures** pour la strate herbacée.

Pour la distinction des formes végétales au sein des ligneux, les arbres isolés sont ceux dont la surface est inférieure à un certain seuil. Puis, les alignements et boisements sont différenciés par leur forme. Les alignements ont une forme longiligne (longueur > 2 x largeur), tandis que les boisements sont des regroupements d'arbres/arbustes avec une surface significative. Des indicateurs géométriques tels que la compacité, la convexité et l'élongation sont calculés et permettent de distinguer ces formes végétales (Touya et al., 2010).

NB : les valeurs de seuils ont été déterminées empiriquement et peuvent être modifiées selon la zone d'étude.

Au sein de la strate herbacée, la distinction des prairies et cultures est réalisée grâce à la chaîne *iota2* (Inglada et al., 2016) disponible en open source, qui analyse les séries temporelles Sentinel-2 sur une année pour différencier différents types de phénologie. Pour cette étape, des échantillons d'apprentissage « cultures » et « prairies » sur la zone d'étude ont été sélectionnés dans le RPG.

Les résultats de cette étape de distinction des formes végétales horizontales sur un extrait du territoire sont visibles sur la Figure 7.



Figure 7 – Résultats de l'étape de distinction des formes végétales horizontales, pour a) la classe arborée, b) la classe arbustive, c) la classe herbacée.

4.5 Détection des paysages

Les différents paysages urbains qui abritent de la végétation sont distingués, en utilisant des classifications basées sur le concept de **zones climatiques locales (LCZ)**, en utilisant une méthode développée par le Cerema dans le cadre du **projet SCO SatLCZ** (Piccinini et Hébrard, 2021). Cette méthode produit des indicateurs décrivant la morphologie urbaine et l'occupation du sol à partir d'imagerie satellitaire Pléiades. Elle segmente le territoire en unités typo-morphologiques élémentaires homogènes vis-à-vis de leur comportement climatique.

Pour l'exploration du premier niveau du référentiel des paysages du projet GUS, les classes LCZ ont été regroupées (Figure 8, Figure 9) :

- **milieu urbain** : fusion des classes 1 à 10
- **voiries et infrastructures** : classe E
- **étendues et cours d'eau** : classe G
- **milieu agricole et forestier** : fusion des classes A B C D F

Le principal intérêt de caractériser les paysages est d'apporter une information contextuelle aux formes végétales, qui peut servir à évaluer certains services écosystémiques. Dans la version actuelle de GUS, l'information de paysage est un attribut des formes végétales. Si les paysages étaient détectés en amont des formes végétales, ils pourraient faciliter la détection de certaines formes végétales spécifiques à certains milieux. Cette option sera analysée dans une v2 de la méthode GUS.

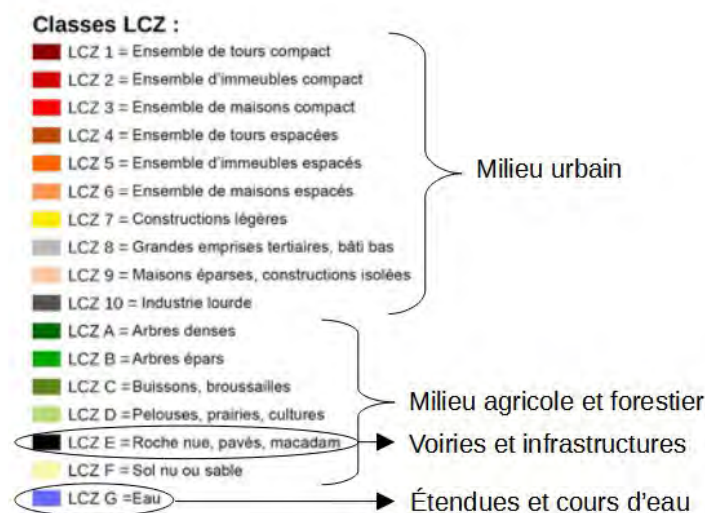


Figure 8 – Regroupements des classes LCZ effectués pour obtenir le premier niveau de description des paysages.

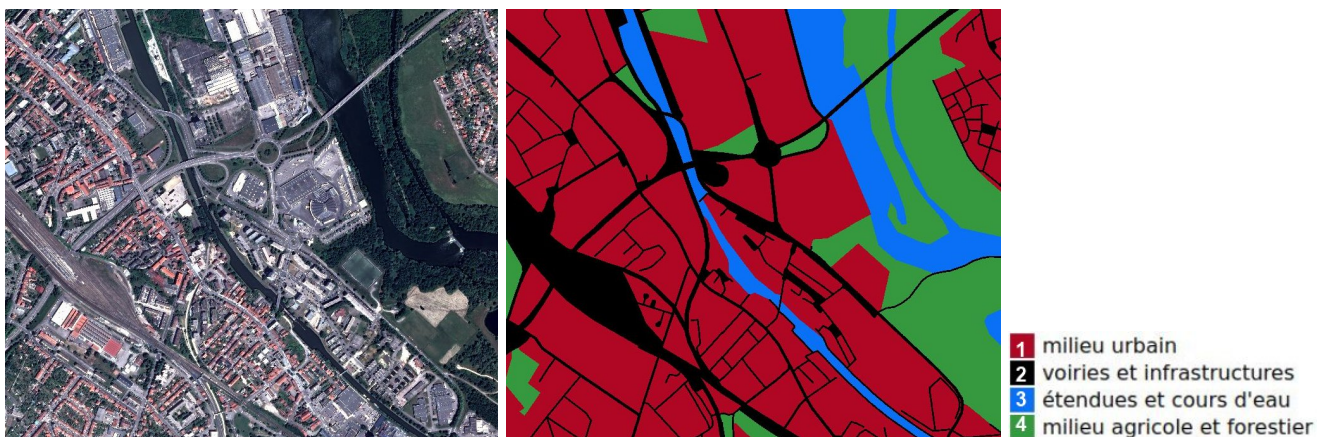


Figure 9 – Résultat de détection des paysages basé sur un regroupement de classes LCZ.

4.6 Calcul des attributs descriptifs

Plusieurs attributs descriptifs sont calculés sur les polygones de formes végétalisées, et serviront ensuite de métriques pour évaluer les services écosystémiques sélectionnés.

Ces attributs descriptifs, au nombre de 14, se décomposent en attributs de morphologie végétale, de couvert végétal, de sol support de la végétation, et de paysage.

Les attributs de **morphologie végétale** sont : la **strate verticale**, la **forme horizontale**, la **surface** du polygone, et sa **hauteur** (moyenne, médiane, écart-type, minimale et maximale). Ces attributs de hauteur sont calculés à partir du MNH Pléiades.

Les attributs de **couvert végétal** sont : le **pourcentage de couvert conifère/feuillu** et le **pourcentage de couvert persistant/caduc**. Le premier est calculé par seuillage sur la bande proche infrarouge, ayant constaté des réflectances très différentes entre feuillus et conifères dans cette longueur d'onde. Le deuxième est déduit de la différence de NDVI entre les images Pléiades d'été et d'hiver. Une variation importante de NDVI indique un feuillage caduc et inversement.

Pour le **sol support de végétation**, le **type de sol** est calculé sous les arbres et arbustes, avec deux possibilités : sol végétalisé ou non. Cette information est dérivée de la valeur de NDVI en hiver : si celle-ci reste élevée, on considère que le sol sous la végétation est végétalisé.

Enfin, le type de **paysage** dans lequel s'insère la forme végétalisée, détecté précédemment, est également fourni.

D'autres attributs pourront potentiellement être ajoutés dans une v2 de la méthode (en gris dans la Figure 10).

Morphologie végétale	Couvert végétal	Sol support de végétation	Paysage
<ul style="list-style-type: none"> • Strate végétale • Forme végétale • Surface • Hauteur et statistiques (moyenne, médiane, écart-type, min, max) • Volume canopée • Densité surfacique • Port de l'arbre • Diamètre moyen du tronc 	<ul style="list-style-type: none"> • % couvert conifère/feuillu • % couvert persistant/caduc • Saisonnalité • Diversité d'essence • LAI • État de santé 	<ul style="list-style-type: none"> • Type de sol • Taux d'humidité 	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau 1 (urbain, voirie, eau, agricole et forestier) • Niveau 2

Figure 10 – Attributs développés (noir) et à développer ultérieurement (gris) dans le projet Green Urban Sat.

5 RÉSULTATS OBTENUS

La couche géospatiale obtenue est montrée en Figure 11. Elle présente 8 classes : **arbre isolé**, **arbuste isolé**, **alignement arboré**, **alignement arbustif**, **boisement arboré**, **boisement arbustif**, **culture** et **prairie**.

Cette couche est accompagnée d'une table attributaire contenant les attributs descriptifs présentés précédemment, qui décrivent chaque polygone de forme végétalisée.



Figure 11 – Extrait de la couche géospatiale obtenue sur la métropole du Grand Nancy.

6 VALIDATION

6.1 Validation qualitative

La validation qualitative a consisté à chercher de potentielles erreurs systématiques dans la couche GUS sur 5 zones représentatives de la métropole du grand Nancy (cimetière, urbain dense, péri-urbain résidentiel, parc, et bord de cours d'eau). Pour cela, la couche GUS a été comparée avec une photo-interprétation réalisée à partir de l'image Pléiades de juin et d'une orthophoto de la collectivité à 5 cm de résolution, et avec les couches Copernicus Street Tree Layer (STL), Grasslands (HRL GRA) et Tree Cover Density (HRL TCD). Les erreurs recherchées peuvent être spatiales, et identifiées visuellement sur la couche vectorielle géographique, ou bien sur les valeurs d'attributs, identifiées dans la table attributaire.

Dans l'ensemble, la couche GUS présente une bonne description de la végétation urbaine, de meilleure qualité et avec une nette plus grande précision que les couches Copernicus (Figure 12).

Les observations générales constatent :

- une sur-représentation de la classe végétation, qui "bave" sur les routes et bâtiments
- de fausses détections d'herbe sur certaines surfaces imperméabilisées (voirie principalement)
- une mauvaise classification en "arbustif" de nombreuses parties basses des arbres
- la non-détection de la majorité des arbustes, qui sont classifiés en arboré ou en herbacé (Figure 13)
- des valeurs de hauteur (issues du MNH Pléiades) aberrantes, principalement sur la classe herbacée

Le détail des observations est présenté dans le rapport de stage de Nicolas Wolfarth (2024).

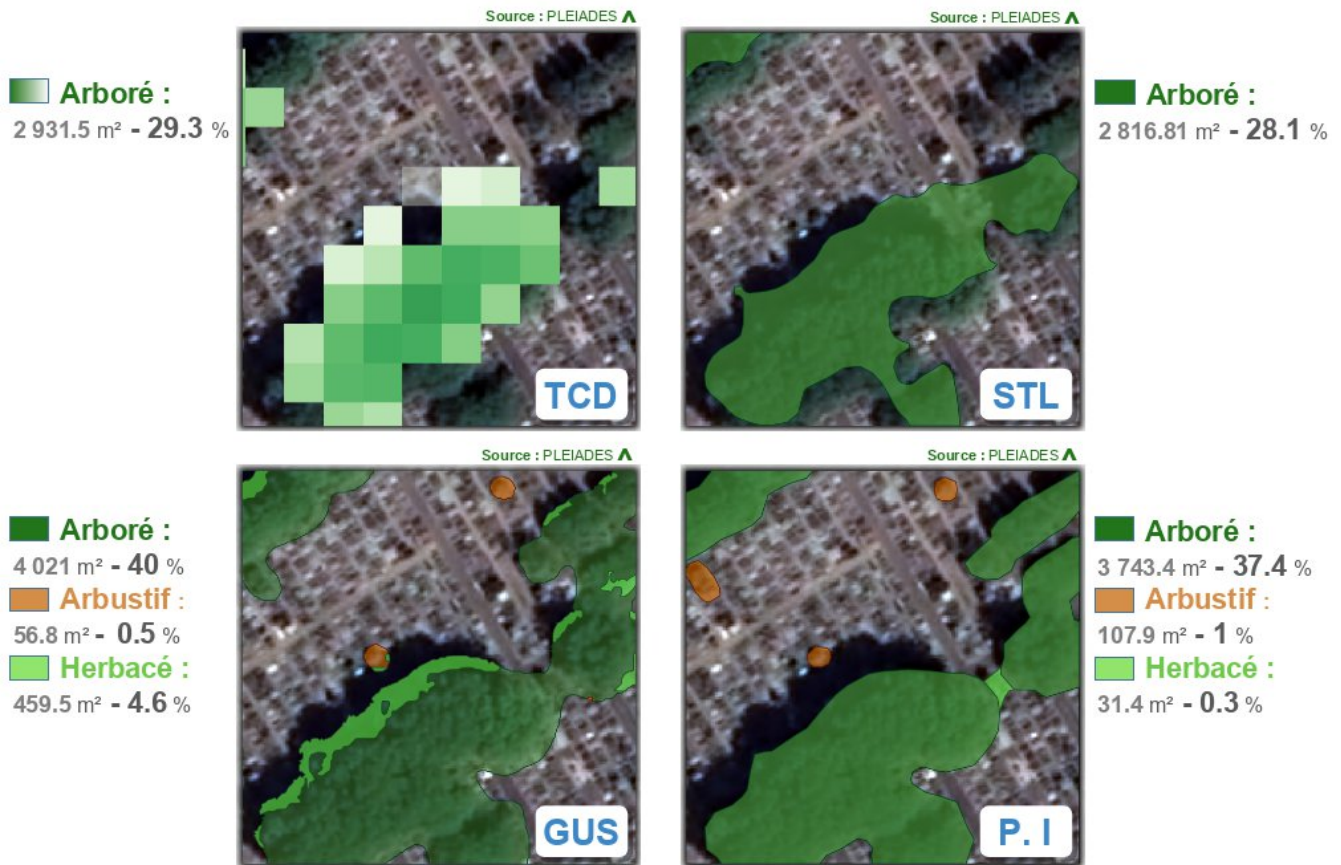


Figure 12 - Visualisation des couches Copernicus TCD, STL, de la couche GUS et de la couche photo-interprétée sur la zone du cimetière. Les résultats de GUS sont très proches de la photo-interprétation.

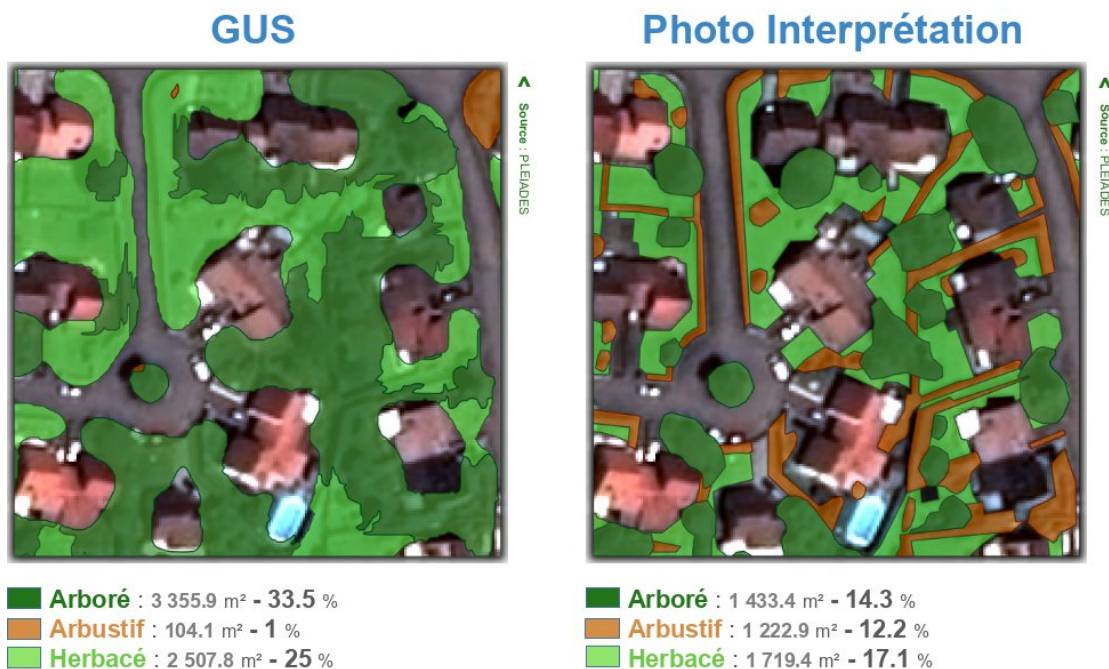


Figure 13 – Visualisation de la couche GUS et de la couche photo-interprétée sur la zone de péri-urbain résidentiel. On constate que la plupart des arbustes ne sont pas détectés par GUS du fait de leur surface étroite.

6.2 Validation quantitative

La validation quantitative a consisté en un tirage aléatoire d'environ 700 points sur la métropole du Grand Nancy (Figure 14) et à leur labellisation par photo-interprétation, puis à un calcul de performances via une matrice de confusion.

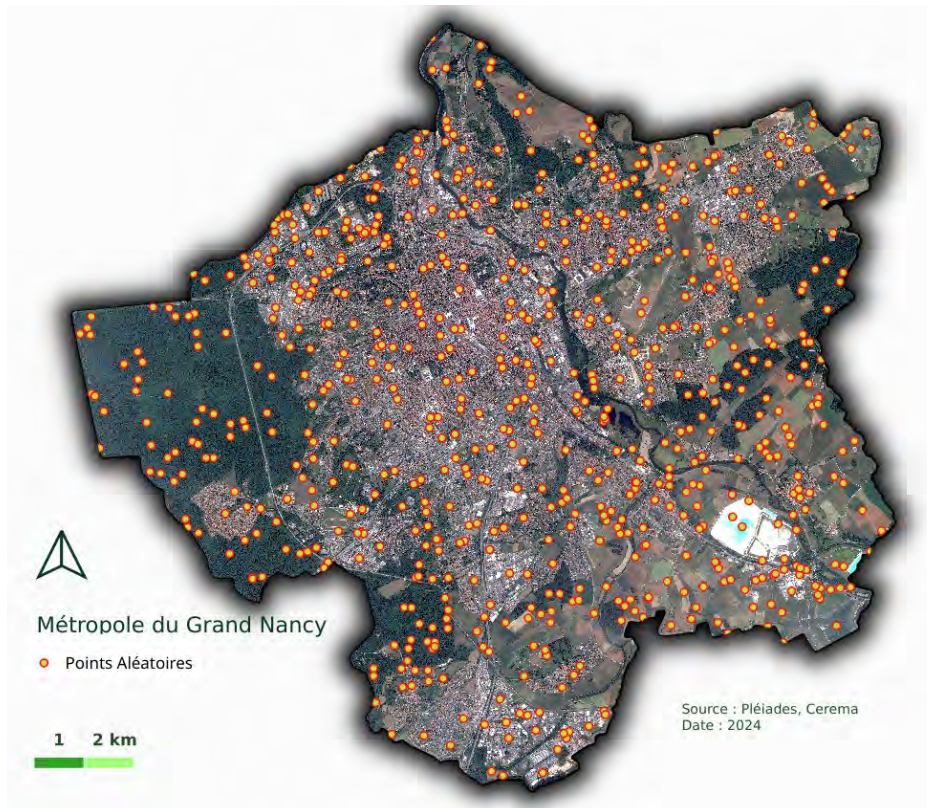


Figure 14 – Localisation des ~700 points tirés aléatoirement sur le territoire de la métropole du grand Nancy pour la validation quantitative.

Les statistiques dérivées de la matrice de confusion obtenue sont les suivantes :

Classe	Précision	Rappel	F-Score
Arbre Isolé	75 %	18.7 %	30 %
Alignement Arboré	83.3 %	50 %	62.5 %
Boisement Arboré	88.1 %	95.8 %	91.8 %
Arbuste Isolé	-	-	-
Alignement Arbustif	10 %	16.6 %	28.5 %
Boisement Arbustif	50 %	10 %	66.6 %
Prairies	67.7 %	85.9 %	75.7 %
Cultures	73.6 %	48.2 %	58.3 %
Autres	93.5 %	86.5 %	89.9 %
Kappa	75.8 %		
Accuracy	81.9 %		

Ces statistiques sont élevées sur la plupart des classes. Les meilleures détections sont celles de la classe « boisement arboré ». La classe « arbuste isolé » n'a pas été évaluée car non tirée dans les échantillons. Les classes « alignement arbustif » et « boisement arbustif » présentent de mauvais résultats car très peu d'échantillons ont été tirés dans ces classes.

Le détail de cette validation quantitative est présenté dans le rapport de stage de Frank Amice (2024).

6.3 Relevé terrain

Pour disposer d'une base de données de validation plus réaliste que la base de photo-interprétation, une campagne de relevé terrain a été proposée. L'objectif est de pouvoir valider en plus des formes et répartitions spatiales, l'ensemble des attributs du référentiel, comme la hauteur réelle, le sol d'implantation ou le type de feuillage qu'il est difficile à photo-interpréter.

25 zones de relevés ont été définies, pour couvrir un maximum de types de paysages urbains du référentiel initial : espaces ouverts dont un cimetière, cœurs d'îlot en milieu urbain dense, bords de voies automobile et ferrée, squares et parcs.

La campagne a démarré à l'été 2024 mais n'a pas pu être finalisée pour en intégrer des résultats dans le cadre du projet GUS. Elle servira à améliorer la méthode dans le cadre de futurs développements à la suite du projet.

7 DÉMONSTRATEUR

7.1 Production des indicateurs de synthèse de végétalisation à différents niveaux d'analyse

Les indicateurs de végétalisation sont produits à partir des données de végétation (strates verticales, formes végétales, paysages et attributs descriptifs). Ils ont pour objectif de permettre une analyse plus globale du territoire et d'accompagner la Métropole du Grand Nancy dans les prises de décisions en présentant un niveau d'information plus proche des concepts manipulés par les décideurs politiques et les équipes techniques.

Ces indicateurs reposent sur des calculs statistiques :

- **de ratio**, comme le pourcentage de la surface de l'unité d'analyse occupée par la végétation ;
- **de poids**, comme la part des alignements arbustifs dans l'ensemble des formes végétales ;
- **de moyenne**, comme la moyenne pondérée par la surface de la hauteur des canopées dans l'unité d'analyse.

L'ensemble de ces indicateurs sont produits à différents niveaux d'analyse afin de répondre aux besoins de la collectivité :

- **La maille hexagonale** (de 200m de côté) : découpage du territoire de façon uniforme et constant dans le temps.
- **L'îlot morphologique urbain** : découpage en "pâtés de maisons" produit dans le cadre de l'Urban Atlas et utilisé pour les zones climatiques locales (LCZ).
- **L'IRIS** : découpage utilisé par l'INSEE pour diffuser les informations statistiques (recensements, données socio-économiques, etc.).
- **Les communes** : découpage administratif plus large donnant une vision plus générale du territoire d'étude.
- **L'enveloppe urbaine** : produit à partir de données d'occupation du sol, ce découpage permet de mettre de côté l'impact des milieux naturels, agricoles et forestiers (ENAF) péri-urbain sur les valeurs des indicateurs.

- **La Métropole** : niveau d'analyse le plus large, le calcul des indicateurs à cette échelle permet d'avoir des valeurs d'indicateurs calculées pour le territoire d'étude dans sa globalité.

La description complète de ces indicateurs ainsi que les liens vers les flux WMS de chacune des unités d'analyse sont disponibles dans la fiche de métadonnées "Indicateurs de végétalisation pour le Grand Nancy en 2022" (<https://greencity.terrancis.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/3ded6b96-7946-4e6d-a99c-83d68c920fff>).

7.2 Développement des interfaces de visualisation des données et indicateurs

Le démonstrateur "Observatoire de la végétation du Grand Nancy" prend la forme d'un site web composé de plusieurs interfaces permettant de visualiser et d'interagir avec les données et indicateurs produits dans le cadre du projet et également avec d'autres données open source.

Pour faciliter la navigation, l'ensemble des interfaces est accessible depuis la même page grâce à un système d'onglets et se découpe en trois grandes parties : présentation, exploration, analyse.

a. Les explorateurs

L'objectif des explorateurs est de donner accès à l'ensemble des données brutes produites dans le cadre du projet. On distingue :

- L'explorateur de données :

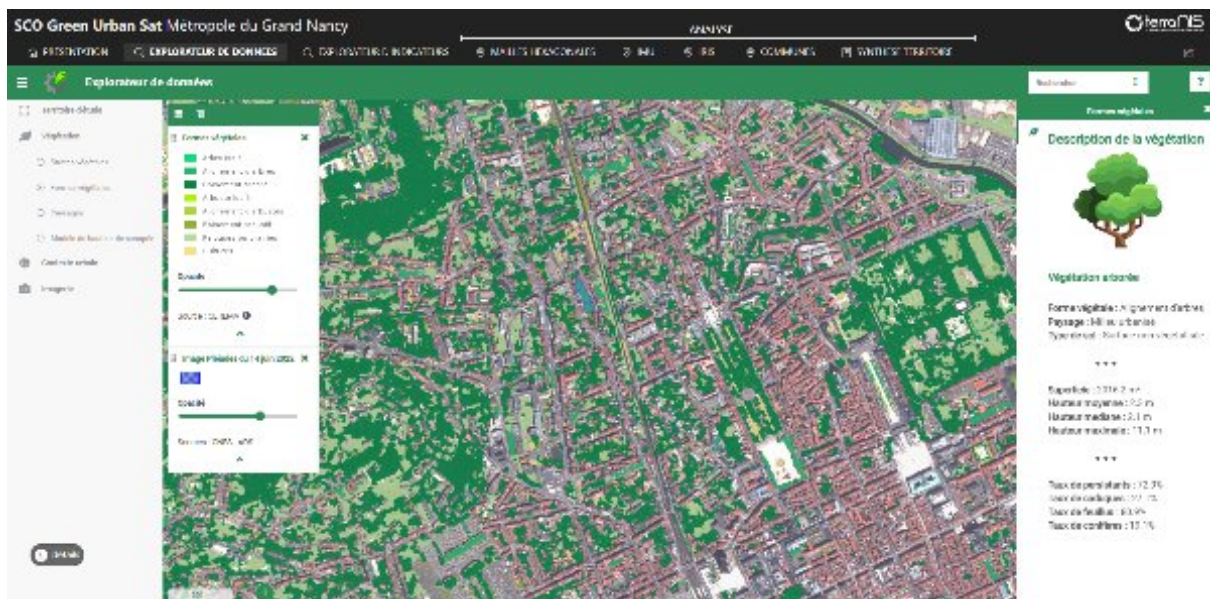


Figure 15 - Capture d'écran de l'explorateur de données

Il permet de visualiser la cartographie de la végétation en choisissant d'afficher les strates végétales (végétation arborée, arbustive et herbacée) ou les formes végétales (arbre isolé, boisement, alignement, etc.).

L'explorateur permet aussi de superposer à ces cartes d'autres informations relatives au contexte urbain (LCZ, voirie, etc.) ou d'afficher l'image satellite très haute résolution utilisée pour la détection ainsi que le modèle de hauteur de canopée (MNH).

Un panneau s'affiche à droite lorsqu'on clique sur une entité de la carte pour obtenir des informations détaillées : paysage associé, type de sol, attributs de la canopée (nature et statistique de hauteur).

- L'explorateur d'indicateurs :

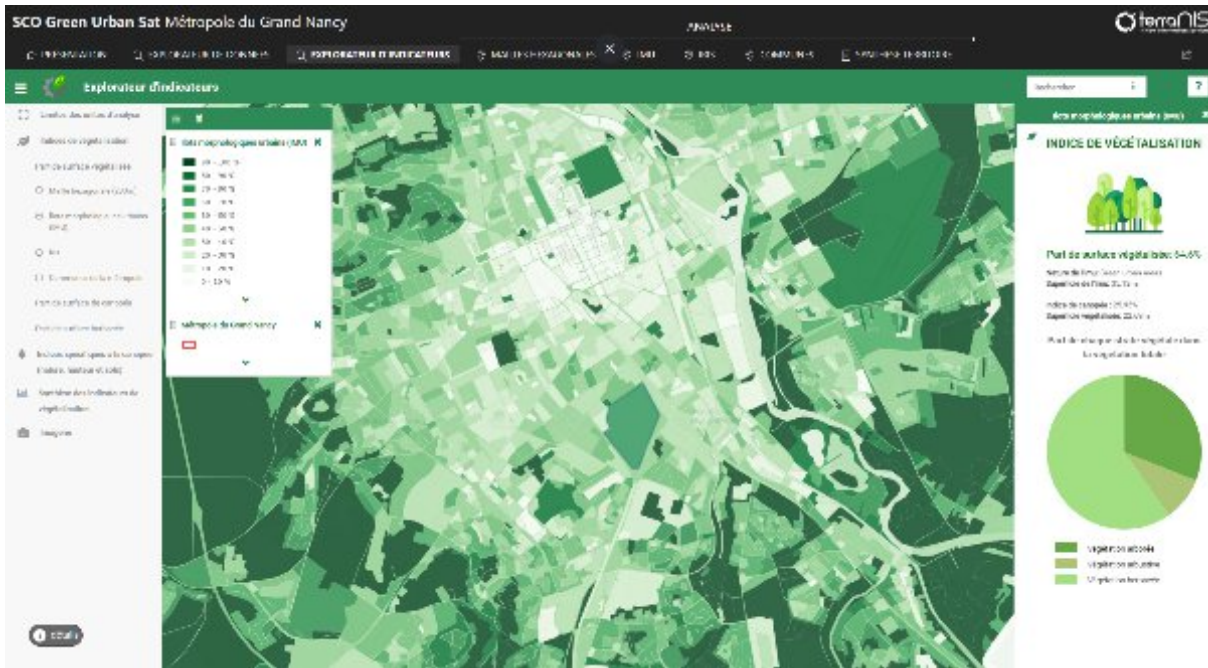


Figure 16 - Capture d'écran de l'explorateur d'indicateurs

Il permet de visualiser les indicateurs de végétalisation comme la part de surface de canopée et les indicateurs spécifiques à la canopée comme le pourcentage de feuillus pour les différentes unités d'analyse. Le panneau de droite affiche pour chaque entité sélectionnée des informations statistiques précises, parfois sous la forme de diagramme circulaire.

Les explorateurs permettent la visualisation de données et d'indicateurs, la superposition de différentes couches d'information, l'export et le partage des vues, mais également l'accès aux différentes métadonnées via les boutons d'information (i).

b. Les tableaux de bord d'analyse et de synthèse

Les tableaux de bord permettent une approche plus visuelle et synthétique des données et indicateurs à différents niveaux d'analyse.

La partie droite du tableau de bord permet l'affichage des indicateurs et graphiques essentiels. Elle se divise en quatre "blocs" d'information concernant : les strates végétales, les formes végétales, les paysages et les attributs descriptifs de la canopée.

La partie gauche est occupée par la carte de l'indice de surface végétalisée. Les actions de sélection (entité ou groupe d'entités) sur la carte mettent à jour automatiquement les données des panneaux de droite.

Le bandeau supérieur permet également de filtrer les données par communes ou de n'afficher que les entités à l'intérieur de l'enveloppe urbaine.

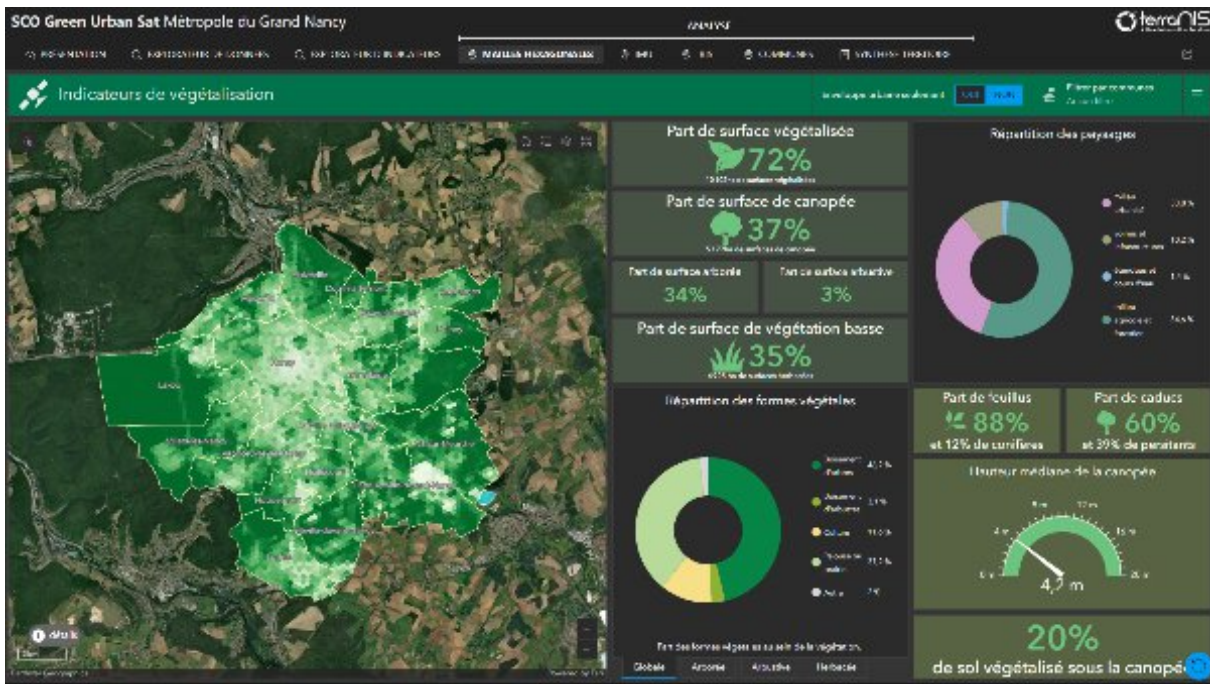


Figure 17 - Capture d'écran du tableau de bord d'analyse à la maille hexagonale

Enfin, le dernier onglet de synthèse présente les informations à l'échelle de la Métropole du Grand Nancy et permet de comparer l'ensemble du territoire avec son enveloppe urbaine :

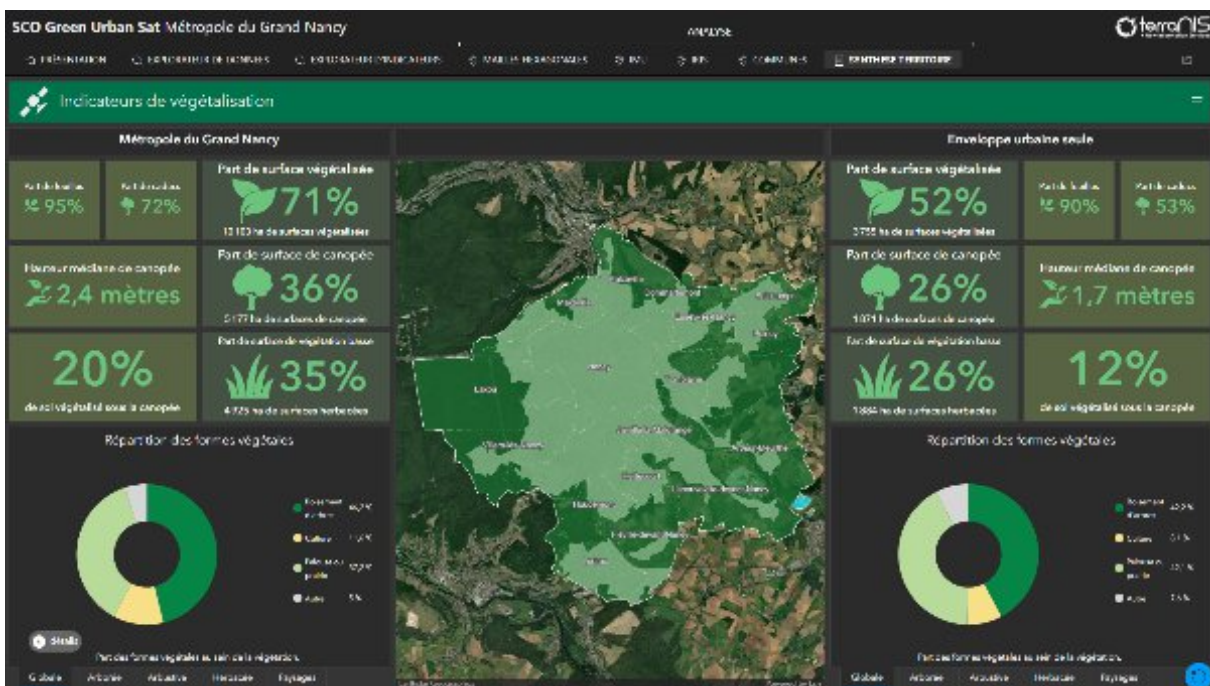


Figure 18 - Capture d'écran de la synthèse pour le territoire

8 CONCLUSION

Le projet Green Urban Sat cofinancé par le Space for Climate Observatory a permis de développer une méthodologie de cartographie détaillée de la végétation urbaine, accompagnée d'attributs descriptifs qui permettront par la suite l'évaluation de services écosystémiques dans le projet Des Hommes et Des Arbres. La classification finale offre un niveau de description beaucoup plus précis que celui des cartes globales de végétation urbaine existantes, qui se contentent généralement de détecter et distinguer la végétation haute et basse ; et qui ne sont généralement pas assez précises sur le milieu urbain. Ici, trois strates verticales végétales sont discriminées (herbacée, arbustive et arborée), puis différentes formes végétales sont détectées (boisement, alignement et individu isolé pour la végétation ligneuse ; culture et prairie pour la végétation herbacée). Des attributs descriptifs, dont le paysage environnant, sont calculés et intégrés dans la description vectorielle de la végétation.

La couche géospatiale obtenue est disponible sur le démonstrateur "Observatoire de la végétation du Grand Nancy" Green City de TerraNIS, qui prend la forme d'un site web composé de plusieurs interfaces permettant de visualiser et d'interagir avec les différentes données et indicateurs produits.

La méthodologie est basée quasi exclusivement sur des données satellitaires, et nécessite deux acquisitions du satellite Pléiades : une tri-stéréoscopique au printemps/été et une monoscopique en hiver. La méthodologie est répliquable sur n'importe quelle métropole du monde, avec de meilleurs résultats attendus sur la France et l'Europe étant donné la qualité des données auxiliaires disponibles.

Les scripts de production sont fonctionnels et disponibles sur GitHub : <https://github.com/CEREMA/dterocc.sco.gus>.

La méthodologie Green Urban Sat présente toutefois plusieurs limites, qui seront creusées dans une version plus approfondie (v2) dès le mois de décembre 2024 :

- Le référentiel initial (chapitre 3) n'a pas pu être totalement satisfait par la classification, du fait de limites techniques. Certaines seront creusées dans la v2.
- Le Modèle Numérique de Hauteur satellitaire Pléiades n'est pas assez précis pour distinguer les 3 strates végétales. La texture a donc été privilégiée sur la hauteur pour la distinction des strates verticales ; l'arrivée de satellites plus précis (Pléiades Neo, CO3D) devrait pouvoir résoudre ce problème.
- La détection de la végétation est légèrement sur-estimée et empiète sur les autres classes, malgré la paramétrisation optimale des valeurs de seuils et de ratios appliqués.
- La méthode n'est pas 100 % automatique. Elle nécessite l'intervention d'un opérateur externe pour optimiser différentes valeurs de seuils et ratios, toutes rassemblées dans un unique fichier de configuration. Le développement d'une v2 devrait pouvoir rendre la méthode plus facilement répliquable.

9 BIBLIOGRAPHIE

Amice, F., « Validation quantitative et qualitative d'une nouvelle méthode de cartographie fine de la végétation urbaine », rapport de stage, Cerema, Direction territoriale Occitanie, Toulouse, mai 2024.

Breiman, L., « Random forests », *Machine Learning*, 2001, 45, 5–32.

Bsaibes, A., et al., « Albedo and LAI estimates from FORMOSAT-2 data for crop monitoring », *Remote Sens. Environ.*, vol. 113, no 4, p. 716-729, 2009, doi:10.1016/j.rse.2008.11.014/

Comaniciu, D., and Meer, P., « Mean shift: a robust approach toward feature space analysis », *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 24, no 5, p. 603-619, 2002, doi: 10.1109/34.1000236.

Dedieu, J.-P., Bornicchia, F., Kerkache, R., and Pella, H., « Apport des informations de texture en télédétection pour l'étude de l'occupation des sols / The contribution to land use studies of textural analysis using remote sensing data », *Rev. Géographie Alp.*, vol. 85, no 3, p. 9-26, 1997, doi: 10.3406/rga.1997.3923.

- Gleyzes, M. A., Perret, L., and Kubik, P., « Pléiades system architecture and main performances », *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. XXXIX B1, p. 537-542, 2012, doi: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-537-2012.
- Grizonnet, M., Michel, J., Poughon, V. et al. « Orfeo ToolBox: open source processing of remote sensing images », *Open geospatial data, softw. stand.* 2, 15 (2017). <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0031-6>
- High Resolution Layer Grassland 2018 (raster 10 m and 100 m), Europe, 3-yearly, <https://doi.org/10.2909/60639d5b-9164-4135-ae93-fb4132bb6d83>.
- High Resolution Layer Tree Cover Density 2018 (raster 10 m and 100 m), Europe, 3-yearly, <https://doi.org/10.2909/486f77da-d605-423e-93a9-680760ab6791>.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G., « Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices », *Remote Sensing of Environment* 83(2002), 195-213, doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- Inglada, J., Vincent, A., Arias, M., and Tardy, B., [iota2-a25386. 10.5281/zenodo.58150](https://zenodo.org/record/58150), 2016.
- Iovan, C., Boldo, D., and Cord, M., « Modélisation de la végétation en milieu urbain: détection et caractérisation à partir d'images aériennes haute résolution couleur et infrarouge », *Rev. Fr. Photogrammétrie Télédétection*, 2017.
- Nabucet, J., « Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain », Université Rennes 2, 2018.
- Piccinini B., and Hébrard, D., « SCO SatLCZ - Cartographie LCZ par satellite », Cerema Toulouse, rapport d'étude, juin 2021.
- Qi, J, Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., and Sorooshian, S., « A modified soil adjusted vegetation index », *Remote Sens. Environ.*, vol. 48, no 2, p. 119-126, 1994, doi:10.1016/0034-4257(94)90134-1.
- Rougier, S., « Apport des images satellites à Très Haute Résolution Spatiale couplées à des données géographiques multi-sources pour l'analyse des espaces urbains », Université de Strasbourg, 2016.
- Rouse, J. W. et al., « Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation ». Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 1974.
- Segaud, M., « Projet Green Urban Sat - Apport de la très haute résolution spatiale dans la détection de la végétation », Cerema, Direction territoriale Occitanie, Toulouse, oct. 2022.
- Segaud, M. et al, « Projet Green Urban Sat - Méthodologie de production des indicateurs de végétation retenus », Cerema, Direction territoriale Occitanie, Toulouse, fev. 2024.
- Shahtahmassebi, A., Yang, N., Wang, K., Moore, N., and Shen, Z., « Review of shadow detection and de-shadowing methods in remote sensing », *Chin. Geogr. Sci.*, vol. 23, no 4, p. 403-420, 2013, doi: 10.1007/s11769-013-0613-x.
- Touya, G., Duchêne, C., and Mustière, S., « Généralisation et intégration pour un fond vert commun entre l'IFN et l'IGN ». *Revue Internationale de Géomatique*, 20(1), pp.65-86, 2010.
- Urban Atlas Street Tree Layer 2018 (vector), Europe, 6-yearly, <https://doi.org/10.2909/205691b3-7ae9-41dd-abf1-1bf60d72c8c>.
- Van Delm, A., and Gulinck, H., « Classification and quantification of green in the expanding urban and semi-urban complex: Application of detailed field data and IKONOS-imagery », *Ecol. Indic.*, vol. 11, no 1, p. 52-60, 2011, doi:10.1016/j.ecolind.2009.06.004
- Wolfarth, N, « Recherche d'erreurs dans les BDD Harris et GUS – Cas généraux et application », rapport de stage, Cerema, Direction territoriale Est, Nancy, mai 2024.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

CEREMA

Siège social : Cité des mobilités - 25 avenue François Mitterrand - CS 92 803 - 69674 Bron Cedex -

Tél. : +33 (0)4 72 14 30 30 – www.cerema.fr