

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

THESE / UNIVERSITE RENNES 2

Sous le sceau de l'Université Bretagne Loire

Pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

Mention : Géographie

Ecole doctorale Société Temps Territoire

Présentée par :

Jean NABUCET

Préparé à :

Unité Mixte de Recherche 6554 CNRS, LETG

Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain

Soutenue le 30 novembre 2018

Devant le jury composé de :

Anne Puissant
Professeure – Univesité de Strasbourg / *Rapporteur*

Sylvain Bigot
Professeur – Université Grenoble Alpe / *Rapporteur*

Marc Robin
Professeur - Université de Nantes / *Examinateur*

Hervé Daniel
Maître de conférence HDR Agrocampus-Ouest / *Examinateur*

Hervé Quénol
Directeur de recherche CNRS UMR LETG /*co-directeur de thèse*

Laurence Hubert-Moy
Professeure - Université Rennes 2 / *Directrice de thèse*

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Remerciements

Tout d'abord je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mes deux directeurs de thèse, Laurence Hubert-Moy et Hervé Quénol. Laurence, les mots me manquent pour vous exprimer ma reconnaissance. Je vous suis sincèrement reconnaissant pour la confiance que vous m'avez accordé, votre soutient, vos conseils avisés et votre expérience. Hervé, je tiens à t'adresser mes plus sincères remerciements pour avoir accepté de co-diriger cette thèse. J'ai réellement apprécié nos nombreux échanges au cours desquels j'ai énormément appris. Je te suis également reconnaissant pour ton soutient tout au long de ce doctorat et d'avoir su trouver les mots pour que celui-ci voit le jour.

Je tiens à remercier Anne Puissant, Marc Robin, Sylvain Bigot, et Hervé Daniel d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse et d'évaluer ce travail.

Ce travail de thèse ne serait rien sans le soutien des équipes administratives du laboratoire et de l'université qu'ils en soient chaleureusement remerciés. J'ai une pensée plus particulière pour Roselyne Grelet, notre gestionnaire qui nous accompagne dans toutes nos demandes et qui est un soutien sans faille à la vie du laboratoire.

Je remercie également l'ensemble de la direction de l'UMR LETG d'avoir acceptée que cette thèse se déroule au sein du laboratoire. Merci à Samuel Corgne, actuel directeur du laboratoire, ainsi qu'à Hervé Quénol, qui ont tout mis en œuvre pour que cette thèse se déroule dans des conditions idéales. Mes plus sincères remerciements se tournent également vers Marc Robin, ancien directeur de l'UMR LETG, et Françoise Gourmelon, directrice actuelle de l'UMR, qui ont su me donner cette chance unique de réaliser cette thèse.

Un grand merci à Jacques Baudry, ancien directeur de la Zone Atelier Armorique, à Cendrine Mony, directrice actuelle, ainsi qu'au comité, qui ont fait preuve d'une grande compréhension et d'un soutien sans faille dans la réalisation de mes travaux de doctorat.

Je tiens à remercier les personnels de la Ville de Rennes et de l'AUDIAR qui ont participé à cette thèse. Merci à Bertrand Martin pour la mise à disposition des bases de données « arbre » de la Ville de Rennes et pour ces retours avisés sur la gestion du végétal en ville. Je remercie également le service SIG et plus particulièrement Christelle Gibon, pour nos nombreux échanges et pour la mise à disposition des données

aéroportées de l'IGN sur la ville de Rennes. Enfin un merci tout particulier à Emmanuel Bouriau qui, sans le savoir, a participé largement à ce manuscrit. Merci infiniment « Manu» pour ton soutient, tes conseils avisés et les nombreux échanges que nous avons pu avoir sur les enjeux du végétale en ville.

Je remercie Patrick Launeau et Manuel Giraudet de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Nantes Angers pour leur aide dans l'exploitation des donnés Hyperspectrales, ainsi que Dimitri Lague pour nos nombreux échanges sur les données LiDAR TITAN.

Que soient également remerciés Solène Croci et Alain Butet pour leur aide précieuse à la réalisation des campagnes de mesures biologiques sur le site des Prairies St Martin. Avec un remerciement spécial à Solène pour ces nombreuses relectures et ces commentaires avisés sur l'analyse des variables paysagères.

Je remercie vivement Xavier Foissard et Renan Leroux pour leur aide lors des analyses des données climatiques, et tout particulièrement Xavier qui m'a accompagné et initié à la mesure climatique en ville.

Ensuite, je tiens à remercier très chaleureusement trois chevilles ouvrières de cette thèse, je pense à Charlotte Vincent, Chloé Avril et Olivier Gillet que j'ai eu le privilège d'encadrer aux cours de mon travail de doctorat. Merci à vous pour votre investissement, votre rigueur et votre bonne humeur !

Cette thèse est le résultat de nombreuses interactions avec des personnes d'une grande richesse. J'ai une pensée toute particulière pour Robert Bariou et Jean-pierre Marchand qui ont participé à faire la géographie d'aujourd'hui. Merci Robert de m'avoir attiré dans cette voie dès mon DEUG et pour nos nombreux échanges sur la photo-interprétation. Jean-Pierre, merci pour nos longues discussions sur la conceptualisation du système ville et l'analyse des interactions des échelles, il me tarde d'explorer plus avant cet aspect de la géographie.

Au cours de ces 3 années de doctorats j'ai eu le privilège de travailler au côté d'une équipe formidable. Je remercie les titulaires, Johan, Olivier, Valérie, Thomas, qui m'ont soutenu pendant ces trois ans. Je remercie les anciens comme les nouveaux doctorants, Audrey, Fanny, Arthur, Renan, Adeline, Julie, Edwige, Vero, Xavier, Pauline, et une mention spéciale pour Julien et Perrine, qui ont toujours été des soutiens exceptionnels pour toutes les missions, de jour comme de nuit, avec ou sans SODAR, mais toujours avec le sourire.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

J'ai également trouvé pendant ces trois ans de doctorat et mes 10ans d'activité au laboratoire, des amis, des gens dont le soutient est essentiel. Je pense à Seb et Steph, Pauline D et Xavier, qui ont toujours répondu présent même dans les moments les plus difficiles. Je pense à Pauline L pour son dynamisme et sa farouche volonté d'allée de l'avant ! A Hervé et Clémence qui, même de l'autre côté du globe, ont toujours trouvé de temps de prendre le temps ! Et comme dirait Melle Vannier « Faut arrêter ces conneries de nord et de sud une fois pour toutes !! Le nord, suivant comment on est tourné, ça change tout ! (Perceval de Galle®Kaamelot ».

J'ai une pensée très reconnaissante pour Damien et Carla, Antoine et Nana… Des amis fidèles et des soutiens sans faille. Merci infiniment pour votre présence et votre aide à toutes les étapes de cette thèse et au quotidien. Damien, tu m'as confié un jour : « tout a une fin sauf le saucisson qu'en a deux », aujourd'hui est donc le début d'autre chose.

Je pense également à des amis fidèles de la bande de Kerfot, je pense à Didier et Julie, à Toph et Clem, à Yann et Steph, et à Gaïe et Sarah et à toute leurs extensions. Nous allons enfin pourvoir profiter et surtout, Julie, je crois que je t'ai trouvé un livre de chevet pour t'endormir ! Tu comprendras peut être enfin ce qu'est le pixel !

Enfin pour leur soutient de toujours je tiens à remercier ma famille. Merci à mon frère et à mes sœurs pour leurs nombreuses relectures, leur aide précieuse dans la construction de ce manuscrit. Je remercie infiniment mes parents pour nous avoir appris que rien n'est acquit et qu'il faut croire en nous. Merci maman. Je n'oublie pas mon petit bouchon qui a été l'une de mes plus fidèles aide de camp pendant les vacances ; merci à toi ma chérie.

Enfin, une aide précieuse et une ouvrière de l'ombre, sans qui ce manuscrit ne serait pas…. Merci à toi.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Liste des sigles et des acronymes

ACP	Analyse en Composante Principale
AEE	Agence Européenne pour l'Environnement
ANR	Agence Nationale de la Recherche
AUDIAR	Agence d'Urbanisme et de Développement Intercommunal de l'Agglomération Rennaise
ECORURUB	ECOlogie du Rural vers l'URBain
EEA	European Environment Agency
EPCI	Etablissement Public de Coopération Intercommunale
CESBIO	Centre d'Etude Spatiale de la BIOsphère
CES-OSO	Centre d'Expertise Scientifique – Occupation des Sols Opérationnelle
CLC	Corine Land Cover
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DIPEE	Dispositif de Partenariat en Ecologie et Environnement
GES	Gaz à Effet de Serre
GPS	Global Positioning System
HRS	Haute Résolution Spatiale
ICU	Indice de Chaleur Urbain
IF	Indice de Fraicheur
IGN	Institut Géographique National
ILTER	International Long Terme Ecological Research
INEE	Institut Ecologie et Environnement
INRA	Institut National de Recherches en Agronomie
IOTA	Infrastructure pour l'Occupation des sols par Traitement Automatique
LiDAR	Light Detection and Ranging

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

MEDDTL	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable des Transports et du Logement
MMI	Model Multi-Interférence
MNIE	Milieux Naturels d'Intérêt Ecologique
OPAC	Office Public d'Aménagement et de Construction
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OSM	Open Street Map
OSUNA	Observatoire des Sciences de l'Univers de Nantes Angers
OSUR	Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes
PADD	Projet d'Aménagement de Développement Durable
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PLUI	Plan Local d'Urbanisme Intercommunal
PPRI	Plan de Prévention du Risque d'Inondation
SCOT	Schéma de Cohérence Territorial
SE	Service Ecosystémique
SIG	Système d'Information Géographique
THRS	Très Haute Résolution Spatiale
UE	Union Européenne
ZA	Zone Artisanale
ZA	Zones Ateliers
ZAAr	Zone Atelier Armorique
ZAC	Zone d'Aménagement Concertée
ZI	Zones Industrielles
ZUP	Zone à Urbaniser en Priorité

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Sommaire

Remerciements I

Liste des sigles et des acronymes IV

Sommaire VI

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART 9

Introduction de la premiere partie 11

chapitre 1 : Les enjeux de la cartographie de la vegetation en milieu urbain 13

Chapitre 2 : Utilisation des donnees de teledetection a tres haute resolution spatiale pour la cartographie de la vegetation en milieu urbain 29

Chapitre 3 : Site d'etude et donnees 55

Synthese de la premiere partie 91

DEUXIÈME PARTIE : ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA RÉSOLUTION SPATIALE POUR L'ÉTUDE DE LA VÉGÉTATION URBAINE : DU MULTI-SPECTRALE AU SUPER-SPECTRALE 95

Introduction de la deuxieme partie 97

Chapitre 4 : Exploitation des donnees a THRS multi-spectrale 99

Chapitre 5 : Comparaison d'images multi-spectrales et super-spectrales pour identifier les especes d'arbres en milieu urbain 115

Synthese de la deuxieme partie 139

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

PARTIE 3 EXPLOITATION DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA VÉGÉTATION URBAINE : DE LA 2D À LA 3D 143

Introduction de la troisieme partie 145

Chapitre 6 : Evaluation des donnees multi-spectrales stereoscopiques pour l'etude de la vegetation en ville 147

Chapitre 7 : Evaluation des donnees lidar pour l'etude de la vegetation en ville 163

Synthèse de la troisième partie 179

QUATRIÈME PARTIE : INTÉGRATION DES INFORMATIONS SUR LA VÉGÉTATION DÉRIVÉES DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION THRS DANS DES MODÈLES ENVIRONNEMENTAUX 183

Introduction de la quatrième partie 185

Chapitre 8 : Application à l'étude de la répartition des communautés de carabidés forestiers en ville 187

Chapitre 9 : Application à l'étude de la répartition des températures dans un parc urbain en contexte d'îlot de chaleur urbain 215

Synthèse de la quatrième partie 261

CONCLUSION GÉNÉRALE 265

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 273

TABLES DES ILLUSTRATIONS 309

Liste des figures 310

Liste des tableaux 316

TABLE DES MATIÈRES 319

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Introduction générale

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Au cours des prochaines décennies, on estime qu'environ trois quarts de la population mondiale se concentrera dans les villes, 80% de la population française résidant déjà en zone urbaine en 2018 (ONU, WUP 2018). Cette concentration explique que la nature en ville suscite un intérêt croissant, tant chez les gestionnaires et les élus, les scientifiques, que le public.

Les bienfaits attribués à la végétation peuvent se répartir dans les trois piliers du développement durable : l'environnement (régulation thermique, qualité de l'air, écoulement des eaux et protection des sols, biodiversité), l'économie (valorisation du bâti, valorisation des produits végétaux, agriculture urbaine et attractivité du territoire), et l'homme (santé et bien-être, lien social) (Boulanger, 2004). Toutefois, un des arguments les plus forts pour la présence de la nature en ville aujourd'hui est l'effet de la végétation sur le climat local (Perini et Magliocco, 2014). Par exemple, les arbres peuvent baisser de deux degrés la température dans une rue, ce qui apparaît bénéfique dans le contexte des questions soulevées par l'îlot de chaleur urbain. Un autre argument fort est le maintien ou l'augmentation de la biodiversité en ville, tant végétale qu'animale (Rudd *et al.,* 2002 ; Tzoulas *et al.*, 2007), et les services écosystémiques associés. Par un jeu d'échelle, il s'agit d'implanter davantage d'espèces à une échelle locale par exemple dans les parcs et jardins, tandis qu'à une échelle géographique plus petite, c'est par la mise en œuvre d'une trame verte plus ou moins continue que l'on cherche à favoriser la circulation et le maintien de la biodiversité (Clergeau, 2013).

Dans ce contexte, de nombreuses politiques de gestion ont été définies afin de restaurer la nature en ville et ses fonctions multiples (Cormier, 2015). Toutefois, si la végétation en ville apporte des réponses à certains enjeux de développement, il est important de prendre en compte les atouts, mais aussi les limites qui vont favoriser ou limiter son développement : le milieu urbain peut être un milieu favorable à l'expansion de certaines plantes invasives non désirées ou représenter un environnement stressant pour des végétaux (imperméabilisation des sols, pollution..), leur durée de vie étant plus faible en ville qu'en campagne (Aziz *et al.*, 2014 ; Calfapietra *et al.*, 2015 ; Mullaney *et al.*, 2015). Enfin, sur le plan économique, la mise en place et l'entretien de la végétation représente déjà actuellement un coût important (par exemple, la gestion annuelle de la végétation à Paris s'élève à 11 million d'euros (Plante et cité), et dans le contexte des politiques d'augmentation de la végétation en ville, de nombreuses villes cherchent à optimiser sa gestion afin de réduite, ou a minima, de ne pas augmenter ce coût.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Ainsi, au vu des enjeux liés à la végétation en ville, il apparaît stratégique, non seulement, de connaître sa répartition spatiale sur l'ensemble du territoire urbain, mais également de la caractériser afin d'identifier les espèces qui la composent et leur stade de croissance.

Le milieu urbain est caractérisé par une très forte hétérogénéité, la végétation occupant une place relativement limitée parmi les espaces artificialisés, au milieu du bâti et des réseaux de transports. La végétation en ville présente des formes très diverses, allant des alignements d'arbres le long des rues, aux grands parcs urbains, en passant par les jardins de particuliers individuels, les squares publics ou les parterres des ronds-points (Musy *et al.*, 2009). De plus, de nombreuses initiatives sont prises actuellement pour implanter de la végétation sur les toits, le long des façades, ou sur des parkings jusqu'alors entièrement asphaltés (Ali-Toudert et Mayer, 2007 ; Susca *et al.*, 2011 ; Graça *et al.*, 2018).

D'une façon générale, la cartographie de la végétation urbaine est effectuée en utilisant des observations réalisées sur le terrain et des bases de données cartographiques diverses. Si la télédétection constitue une source de données largement utilisée pour identifier et caractériser la végétation à des échelles nationales et régionales (Corine Land Cover EEA ; EEA « urban Atlas » project), elle n'est actuellement pas privilégiée, à l'exception des orthophotoplans - qui présentent des limites, notamment en raison d'une faible résolution spectrale - pour l'étude du milieu urbain à une échelle locale. Or, les acteurs locaux expriment le besoin de disposer de cartes détaillées de la végétation sur l'ensemble du territoire urbain afin de mieux la gérer, ce qui n'est pas réalisable aujourd'hui sans utiliser des données de télédétection. Par ailleurs, il est aussi nécessaire d'intégrer des cartes exhaustives et détaillées de la végétation dans des modèles climatiques locaux, afin de répondre aux exigences des plans Climat-Air-Energie-Territoriaux.

Avec l'apparition des données de télédétection à Très Haute Résolution Spatiale (THRS), il est aujourd'hui possible d'obtenir des informations sur la végétation en ville à des échelles spatiales fines. Les données THRS permettent en effet de fournir des informations sur l'occupation et l'utilisation des sols (Herold *et al.*, 2003 ; Myint *et al.*, 2011 ; Chen *et al.*, 2018), sur la structure et les propriétés biophysiques de la végétation (Degerickx *et al.*, 2018 ; Shi *et al.*, 2018) à une échelle parcellaire, voire infra-parcellaire. Ceci explique que l'exploitation des données de télédétection pour des applications urbaines n'a cessé d'augmenter depuis une dizaine d'années. Des images sont par exemple utilisées pour cartographier les surfaces artificialisées (Weng, 2012 ;

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Yang et He, 2017), ou les formations végétales à une échelle fine (Zhang X. *et al.*, 2010 ; Ucar *et al.*, 2018).

La plupart du temps, les données de télédétection utilisées pour étudier la végétation en ville sont des données optiques acquises par des capteurs passifs (Yang et He, 2017 ; Zhang X. et *al.*, 2010). Cependant, ces données fournissent des informations uniquement sur la surface de la végétation, la profondeur de pénétration des flux d'énergie étant très faible dans ces longueurs d'onde.

D'autres données de télédétection, telles que les données LiDAR (Light Detection and Ranging), offrent aujourd'hui de nouvelles possibilités pour caractériser la structure de la végétation. En effet, les données LiDAR ont la capacité d'acquérir des mesures 3D de la végétation à une résolution spatiale fine, ce qui permet d'estimer une grande variété de caractéristiques telles que la hauteur des arbres ou leur volume, (Müller et Brandl, 2009 ; Heinzel et Koch, 2011). Elles fournissent ainsi des informations complémentaires à celles qui sont dérivées des images optiques. Or les données LiDAR THRS, dont l'acquisition est récente, sont jusqu'à présent encore assez peu exploitées en milieu urbain.

La problématique de cette thèse porte sur l'évaluation de capteurs optiques à THRS pour l'identification et la caractérisation de la végétation urbaine. Cette thèse s'inscrit dans le cadre de recherches pluridisciplinaires associant écologues, géographes télédétecteurs et climatologues.

Les principales questions auxquelles elle vise à répondre sont : Qu'est-ce qu'apportent les images satellite THRS par rapport aux bases de données existantes sur la végétation en ville? Quel peut être l'apport d'images THRS super-spectrales par rapport aux images THRS multi-spectrales ? Quel est l'intérêt d'utiliser des données THRS 3D pour cartographier la végétation en ville? Enfin, quel est l'impact de la prise en compte des informations dérivées de données THRS sur les modèles environnementaux ?

Afin de répondre à ces questions, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux données THRS satellites et aéroportées acquises dans la partie visible-proche infrarouge du spectre électromagnétique. En effet, si plusieurs études ont montré l'intérêt de l'imagerie optique THRS de type IKONOS ou Quickbird pour étudier la végétation en ville (Ouma et Tateishi, 2008 ; Zhang X. *et al.*, 2010), ces données restent sous-exploitées par les gestionnaires qui utilisent des bases de données nationales ou internationales déjà existantes ou de bases de données qu'ils développent à partir de relevés effectués sur le terrain. Or, l'analyse de la complémentarité entre

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

images optiques THRS et ces bases de données reste à faire. Par ailleurs, si l'imagerie optique THRS de type super-spectral a déjà été évaluée pour étudier l'occupation des sols ou la végétation naturelle ou semi-naturelle en milieu rural (Rapinel *et al.*, 2014 ; Pu et Cheng, 2015), elle reste encore peu évaluée pour étudier la végétation en ville, à l'exception de quelques études portant sur des surfaces boisées assez étendues, de quelques dizaines d'hectares (Immitzer *et al.*, 2012; Yan J. *et al.*, 2018). En effet, les images satellites super-spectales sont bien souvent sous-exploitées malgré l'intérêt qu'elles présentent pour l'identification et la caractérisation de la végétation, au profit de l'imagerie hyper-spectrale aéroportée. Or cette dernière, en dépit de son intérêt pour l'étude de la végétation en milieu urbain (Jensen *et al.*, 2012 ; Alonzo *et al.*, 2014), présente de forte contraintes liées aux acquisitions aéroportées, les données satellites hyper-spectrales actuellement disponibles n'ayant pas une résolution spatiale suffisante. En outre, si les données satellites 3D n'était pas assez précises pour l'étude de la végétation en ville (Soergel, 2010), les données « 3D » issues des satellites stéréoscopiques THRS tel que Pléiades présentent un fort potentiel pour cela. Enfin, les données acquises par les LiDAR aéroportés (Guo *et al.*, 2011; Ucar *et al.*, 2018) et leur couplage avec des données THRS multi-spectrales est très prometteur pour la détection et la caractérisation de la végétation, car les informations qu'elles fournissent sont a priori complémentaires.

Le principal objectif de cette thèse est d'évaluer l'intérêt des images THRS pour cartographier la végétation en ville. Plus précisément, elle vise à évaluer le potentiel des images THRS sur trois composantes : la résolution spatiale, la résolution spectrale et l'altimétrie. Cette thèse est organisée en quatre parties :

- **La première partie** expose la problématique générale de la thèse et présente, à partir de la littérature scientifique, un état de l'art sur des données et des méthodes permettant d'identifier et de caractériser la végétation en ville. Cette première partie comprend trois chapitres : le **chapitre 1** décrit les enjeux de la cartographie de la végétation en milieu urbain. Le **chapitre 2** présente une synthèse sur l'utilisation des données de télédétection THRS pour la cartographie de la végétation en milieu urbain en exposant successivement l'intérêt et les limites des bases de données existantes sur la végétation en ville, et les caractéristiques des données 2 D et 3D en vue de leur exploitation . Le **chapitre 3** décrit les sites d'étude et les données utilisées.

- **La deuxième partie** porte sur l'évaluation de l'impact de la résolution spectrale des images satellites THRS sur la cartographie de la végétation urbaine. Le **chapitre 4** évalue l'intérêt d'utiliser des images THRS multi-spectrales en complément des bases de données existant sur la végétation en ville. Le **chapitre 5** évalue l'apport

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

des données super-spectrales en les comparant à des données multi-spectrales pour cartographier des espèces arborées en ville.

- **La troisième partie** est centrée sur l'intérêt de l'utilisation des informations altimétriques pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. **Le chapitre 6** évalue des images satellites multi-spectrales stéréoscopique pour identifier les différentes strates de végétation. **Le chapitre 7** est consacré à l'évaluation de données LiDAR 3D pour améliorer l'identification des strates de végétation et détecter la présence de végétation sous la canopée.

- La **quatrième partie** de la thèse est dédiée à l'évaluation de l'impact de l'intégration des informations sur la végétation dérivée de données de télédétection THRS dans des modèles environnementaux, à travers deux applications. La première porte sur la modélisation des flux de populations animales (**chapitre 8),** tandis que la seconde a pour objectif d'évaluer l'apport de l'altimétrie dérivée de données THRS pour l'étude de l'îlot de chaleur urbain (**chapitre 9**).

Les travaux de cette thèse ont été réalisés dans le cadre de deux programmes de recherche : (1) le Research programme for earth observation STEREO II du Belgian Federal Science Policy à travers le projet VALI-URB (Urban sprawl and ecological corridors: Consolidation of VHRS remote sensing methods). Ce projet, mené sous la direction de E. Wolff (IGEAT/Université Libre de Bruxelles) avait pour objectif de proposer des méthodologies reproductibles d'analyse, en vue d'analyser l'évolution des surfaces bâties et de la végétation dans les zones urbaines et périurbaines de Bruxelles, Strasbourg et Rennes à partir d'images HRS et THRS ; (2) le programme TOSCA du CNES à travers le projet VEGIDAR 2014-2018 (Analyse de la Végétation en Ville par couplage LiDAR et PLEIADES). Ce projet, mené sous la direction de T. Corpetti (LETG UMR CNRS 6554) visait à exploiter simultanément des données THRS optiques et LiDAR afin de proposer de nouvelles méthodologies de détection et de cartographie de la végétation en milieu urbain.

Par ailleurs, cette thèse s'inscrit pleinement dans deux programmes :

***(1) le programme Zone atelier du CNRS** (Projet « Zone Atelier Armorique ») dont les objectifs sont de comprendre par l'observation, la modélisation et l'expérimentation, les relations entre la structure du paysage, les modes d'usages des terres (en particulier agricoles), les processus écologiques contrôlant la distribution des espèces animales et végétales, les fonctionnements biogéochimiques, la façon dont les politiques publiques, en particulier celles relatives à l'agriculture et à l'agro-environnement font évoluer les structures paysagères et les usages des terres, et évaluer*

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

en retour l'efficience des politiques publiques en termes de protection des ressources et de la biodiversité, et de services écosystémiques rendus. **Un observatoire d'environnement urbain en centre-ville de Rennes** *a été labellisé dans le cadre de la Zone Atelier Armorique du CNRS. Cet observatoire, situé sur le lieu-dit des Prairies Saint Martin, a pour objectif de réaliser un suivi à long terme des variables biophysiques en fonction de l'évolution de l'occupation des sols et des pratiques. Ces recherches sont menées dans un contexte pluridisciplinaire impliquant notamment des géographes et des écologues.*

(2) **le programme Kalidéos du** *CNES qui vise à favoriser l'utilisation des données de télédétection spatiale et le développement d'applications aval images. Le site Bretagne développe une approche méthodologique permettant le suivi par télédétection des dynamiques de l'occupation des sols et des structures paysagères dans une zone marquée à la fois par une agriculture intensive et une croissance urbaine rapide. Des images prétraitées Pléiades et SPOT6 produites et mises à disposition gratuitement par le CNES dans le cadre de ce programme ont été utilisées dans le cadre de cette thèse.*

Enfin, cette thèse a bénéficié des collaborations existantes depuis de nombreuses années entre le LETG et **l'Agence d'urbanisme de Rennes (AUDIAR)** *d'une part et le LETG et* **Rennes Métropole** *d'autre part. Ces acteurs et gestionnaires territoriaux ont participé aux recherches menées dans le cadre de cette thèse à travers des financements (matériel de terrain et stages), la mise à disposition de leurs bases de données, mais aussi à travers des échanges très fructueux.*

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Première partie :

Contexte et état de l'art

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Introduction de la première partie

La première partie de ce manuscrit expose les cadres thématiques et méthodologiques dans lesquels s'inscrit cette thèse, en précisant, dans un premier temps, les enjeux que représente l'étude de la végétation en ville et dans un second temps, la manière dont il est possible de l'identifier et de la caractériser.

L'objectif de cette partie est de mener une réflexion à partir de la littérature, afin de comprendre les enjeux de l'étude de la végétation en ville et d'orienter les choix méthodologiques à effectuer pour identifier et caractériser la végétation urbaine à partir de données de télédétection et d'inventaires effectués *in situ*.

Dans le premier chapitre nous nous attachons à décrire les enjeux de la cartographie de la végétation en milieu urbain. Après avoir présenté les caractéristiques de la végétation urbaine, nous exposerons les fonctions et services rendus par la végétation en termes environnementaux, économiques et humains.

Dans le second chapitre nous présentons une synthèse sur l'utilisation des données de télédétection utilisées pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. Nous effectuons dans un premier temps un rappel sur les caractéristiques des bases des données disponibles, que ce soit à l'échelle internationale, nationale ou locale pour cartographier la végétation. Dans un second temps, nous analysons le potentiel des données de télédétection 2D, qu'elles soient acquises par des capteurs aéroportés ou spatiaux, en nous attachant à comparer les données multi, super-spectrales et hyper-spectrales. Dans un troisième temps, nous analysons l'utilisation des données de télédétection 3D, en abordant successivement l'intérêt et les limites des données stéréoscopiques acquises en mode aéroporté ou spatial, et des données LiDAR aéroportées.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le site d'étude choisi dans cette thèse, de la ville de Rennes, qui appartient à la Zone Atelier Armorique et au site Kalideos Bretagne. Nous détaillons les caractéristiques de ce site et du « sous-site » retenu pour identifier et caractériser la végétation, l'Observatoire urbain des Prairies Saint-Martin. Nous présentons ensuite les données utilisées dans le cadre de ce travail. Il s'agit d'une part des données extraites des inventaires effectués sur le domaine public par les services municipaux et qui ont servi à calibrer et valider les classifications des données de télédétection. Il s'agit d'autre part des images satellites et aéroportées acquises en modes passif et actif, et qui comprennent des images multi et super-spectrales et des données LiDAR.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 1 : Les enjeux de la cartographie de la végétation en milieu urbain

1 La végétation en milieu urbain : spécificités et caractéristiques 14
1.1 Les spécificités du milieu urbain. 14
1.2 Les formes de végétation urbaine : diversité et modes de représentation 15
1.2.1 Une grande diversité de formes 15
1.2.2 Les modes de représentation de la végétation urbaine 18
2 Les fonctions et services apportés par la végétation urbaine 19
2.1 Pour l'environnement 21
2.1.1 Le climat 21
2.1.2 La qualité de l'air. 22
2.1.3 L'écoulement de l'eau et la protection des sols 23
2.1.4 La biodiversité 23
2.2 Pour l'homme et la société 24
2.2.1 La santé 24
2.2.2 Le lien social 26
2.3 Pour l'économie 26

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

L'objet de ce chapitre est de présenter successivement, à partir de l'analyse de la littérature, les caractéristiques de la végétation urbaine, les fonctions et services qu'elle rend d'un point de vue environnemental, humain et économique.

1 La végétation en milieu urbain : spécificités et caractéristiques

1.1 Les spécificités du milieu urbain

Par opposition aux milieux naturels, semi-naturels et agricoles, la ville est un espace très anthropisé, regroupant des activités et des fonctions diverses, et comprenant une forte diversité d'objets (Cadenasso *et al.*, 2007). Elle est caractérisée par une forte hétérogénéité qui se révèle dans une dimension horizontale et verticale. On y trouve en effet des matériaux de natures différentes (surfaces minérales, métalliques, végétales, surfaces en eau), des objets aux surfaces réduites et aux volumes variables, liés à une verticalisation qui change d'un quartier à l'autre, d'un îlot à l'autre, d'un bâtiment à l'autre (Aguejdad, 2011). La ville est un milieu très fragmenté qui forme une véritable mosaïque. La fragmentation du milieu urbain est concrétisée notamment par des obstacles, qui peuvent être infranchissables pour la faune (bâtiments, routes, murs, clôtures...).

La ville est aussi un espace très artificialisé où les surfaces minérales dominent sous la forme de surfaces bâties, de routes, de parkings, etc.... La végétation y est présente souvent de façon résiduelle.

Le caractère très artificialisé et fragmenté de la ville a des conséquences importantes, en particulier sur le climat et la biodiversité (Luo *et al.*, 2007 ; Xiao R. *et al.*, 2007 ; Rizwan *et al.*, 2008;). En effet, la forte artificialisation entraine des températures plus élevées en milieu urbain qu'en milieu rural, généralement de 2 ou 3 degrés. Le milieu urbain connaît des pics de chaleur l'été plus élevés qu'en milieu rural, tandis qu'en hiver, les températures s'élèvent en raison des déficits thermiques des bâtiments et des activités industrielles.

De plus, l'architecture urbaine constitue un frein à la circulation de l'air. L'alignement de hauts immeubles génère des couloirs de vent spécifiques à la ville (Abohela *et al.*, 2013). Elle empêche aussi la dispersion des éléments polluants générés par les rejets dus au trafic routier, et aux activités industrielles. Des zones de

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

concentration de pollution sont régulièrement observées dans des rues très encaissées, dites rues «canyon» (Nowak *et al.*, 2006). Les éléments polluants sont alors confinés au milieu urbain et sont remobilisés par les précipitations qui les transferts ainsi vers les cours d'eau et les nappes phréatiques (Zhao *et al.*, 2010)

Enfin, la pollution lumineuse, très importante en ville, a un impact sur la biodiversité. Le manque d'obscurité la nuit peut perturber les cycles biologiques, la pollinisation par les insectes diurnes, les déplacements d'animaux, ou encore leur reproduction (Hölker *et al.*, 2010). La luminosité peut également contribuer à la fragmentation des habitats (Walker et Kendrick, 1998). Par ailleurs, les nuisances lumineuses ont aussi un impact bien connu aujourd'hui, sur la santé humaine (Chepesiuk, 2009).

1.2 Les formes de végétation urbaine : diversité et modes de représentation

1.2.1 Une grande diversité de formes

La nature en ville peut être définie comme l'ensemble des espaces et des ressources naturelles (espèces végétales, espèces animales, eau) et des écosystèmes présents en milieu urbain. Elle regroupe « *l'air, l'eau, les sols, et le tissu vivant constitué de micro-organismes, faune, flore, milieux naturels et semi- naturels, agricoles et forestiers, squares, jardins, parcs urbains, toitures et murs végétalisés, etc…* » (APPANPC, 2014).

La végétation en milieu urbain présente un très grand nombre de formes et de configurations différentes : alignement d'arbres ou de haies le long des routes, parterres de fleurs des ronds-points, jardins privés individuels, jardins publics ou grands parcs urbains, situés généralement en périphérie des agglomérations. En plus de la végétation naturelle présente en ville, on observe le développement de la végétation sur les toitures et les façades.

La variété des formes observées est liée à la grande diversité des espèces rencontrées en villes (Wang et López-Pujol, 2015), mais aussi à leur mode de gestion : elles peuvent être spontanées ou cultivées (Bournérias *et al.*, 2001), cultivées traditionnellement ou en mode hors sol (Chalmandrier *et al.*, 2017), libres ou structurées.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Ainsi, le terme même « d'espace vert» revêt une très grande diversité de sens en fonction de sa composition, de l'usage et du contexte dans lequel il se situe. Ainsi, la végétation urbaine est par définition un objet complexe (Cadenasso *et al.*, 2007 ; Lehmann *et al.*, 2014 ; Koc *et al.*, 2016 ; Taylor et Hochuli, 2017), qu'il est nécessaire d'appréhender d'un point de vue physique, spatial, biotique et social, et par conséquent de manière interdisciplinaire (Mehdi *et al.*, 2012 ; Taylor et Hochuli, 2017).

Il n'existe pas de nomenclature disponible aujourd'hui, qui permette de traiter simultanément les composantes physiques, spatiales, biotiques et sociales de la végétation urbaine (Cadenasso *et al.*, 2007). De ce fait, cinq grands types de typologies peuvent être recensés :

- les typologies botaniques ou phytosociologiques, qui proposent des nomenclatures basées sur les genres/familles/espèces, habitats ou sur les fonctions écologiques (EUNIS, Corine biotope,..) ;
- les typologies structurelles, qui se basent sur des approches plus physiques et géographiques pour étudier la forme et l'organisation de la végétation. Ces analyses sont très largement développées par la communauté des sciences spatiales *(Lehmann et al.*, 2014);
- les typologies réglementaires, basées sur le statut juridique ou foncier de la végétation et qui déterminent donc son usage urbanistique (public, privé, ..) (Musy *et al.*, 2009.) ;
- les typologies basées sur les modes de gestion. Celles-ci sont développées par les gestionnaires et les services des espaces verts afin d'assurer un suivi et une gestion optimale de ces espaces ;
- les typologies d'usage et de fonction. Ce type d'approche est essentiellement basé sur le type d'usage par les citoyens (récréatif, loisir de plein air, etc…)(Musy *et al.*, 2009).

Dans le cadre de cette thèse, nous cherchons à caractériser la végétation urbaine à partir de données de télédétection. En conséquence, nous nous intéresserons plus particulièrement aux typologies phytosociologiques ou structurelles.

En ce qui concerne les typologies phytosociologiques, il n'en n'existe pas de spécifique à la « végétation urbaine ». En effet, la très grande complexité de la diversité floristique urbaine observée actuellement en Europe, est héritée des grands courants urbanistiques qui ont façonné la ville au cours du temps (Loram *et al.*, 2008 ;

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Consalès *et al.*, 2012). Les typologies utilisées pour décrire la végétation urbaine sont donc des typologies botaniques généralistes déclinées pour le milieu urbain (CORINE BIOTOPE, EUNIS,…). De nombreux gestionnaires se sont appropriés ces nomenclatures pour inventorier la végétation.

En ce qui concerne les typologies structurelles, elles décrivent généralement la végétation urbaine selon deux composantes : une composante horizontale et une composante verticale. La végétation, comme tout objet inscrit dans un territoire, est caractérisée par son mode d'implantation selon une composante horizontale : ce mode est soit ponctuel (arbre ou arbuste isolé), soit linéaire (platebande, alignement d'arbres, ..), soit surfacique (massifs floraux, surfaces en herbe,…). Toutefois, la composante horizontale de la végétation urbaine ne comprend pas seulement la une fraction sol : Elle inclue aussi la canopée de la végétation et plus particulièrement la surface de la canopée. Ainsi, un même élément de végétation peut être représenté différemment selon la composante horizontale. Un arbre peut, par exemple, être représenté par un point pour indiquer le lieu de son implantation, ou par une surface pour représenter l'emprise de sa canopée. La végétation peut aussi être classée selon une composante verticale, en fonction des différentes strates qui la composent. Ainsi, quatre strates majeures peuvent être distinguées (Figure 1.1): (1) La strate muscinale, composée majoritairement de mousses et de lichens, ne dépassant que rarement les quelques centimètres ; (2) La strate herbacée composée d'une grande diversité floristique, d'une hauteur maximum de 1,5m ; (3) La strate arbustive, comprenant les arbustes et buissons de 2m à 7m ; (4) La strate arborée, regroupant les espèces se développant au-delà des 8m. En milieu urbain, les gestionnaires utilisent ces différentes strates, soit seules (alignement d'arbres de bord de route) ou combinées (massifs horticoles), pour structurer le paysage. Aujourd'hui, la composante verticale n'est pas associée uniquement à la notion de strate issue des classifications des séries de végétation, mais elle intègre une autre dimension apparue avec les nouveaux courants architecturaux. Ainsi, les architectes et urbanistes exploitent de plus en plus les façades et les murs pour y implanter de la végétation. Les végétaux, qui sont placés sur tout ou partie des bâtiments, appartiennent essentiellement à la strate herbacée.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

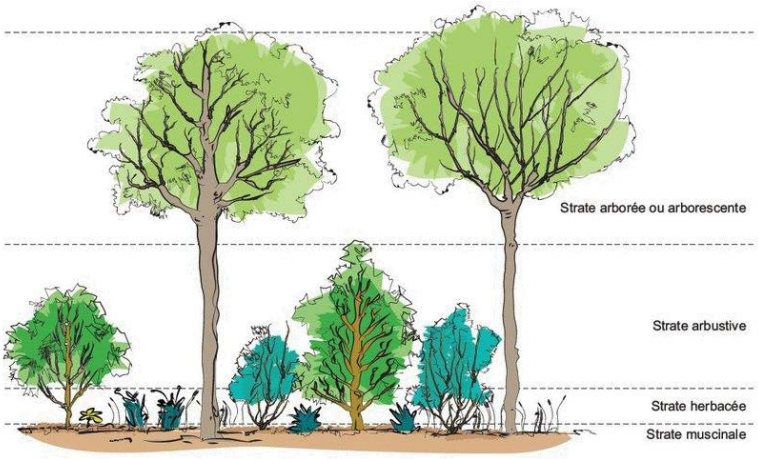


Figure 1.1 : Représentation des quatre strates de la végétation que l'on peut trouver en milieu urbain (source : Clergeau, 2013)

1.2.2 Les modes de représentation de la végétation urbaine

La diversité des formes de la végétation urbaine entraîne des questionnements sur ses modes de représentation cartographiques qui, par nature, sont une modélisation et donc une simplification de la réalité observée.

Les modes de représentation spatiale de la végétation sont largement issues des sciences des systèmes d'information géographique (SIG). En effet, chaque objet, en fonction de ses caractéristiques, peut être intégré dans un SIG suivant deux modes de représentation, le mode vecteur et le mode raster.

En mode vecteur, chacune des trois primitives graphiques utilisées (le point, la ligne et le polygone) représente un élément végétal, la table attributaire contenant les informations qui le caractérisent (coordonnée, taille, date d'implantation, etc). Ces informations, qui sont le plus souvent d'une grande précision spatiale et thématique, sont essentielles pour la gestion de la végétation urbaine.

Si la représentation en mode vecteur est la plus communément utilisée par les gestionnaires, elle présente toutefois certaines limites. En effet, les objets végétation sont difficiles à représenter avec une seule primitive graphique. Par exemple, il apparaît réducteur de représenter un arbre seulement par un point ou une surface au regard des descripteurs qui lui sont associés dans les bases de données (hauteur et envergure de la canopée, espèce, type de gestion, etc…). Il est donc nécessaire de multiplier les représentations d'un même objet végétal pour recenser l'ensemble de ces caractéristiques. Pour gérer cette complexité, les services des villes, en collaboration avec des scientifiques, ont élaboré des bases de données relationnelles et autres infrastructures de données géographiques (Gourmelon *et al.*, 2017) afin de parvenir à

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

une représentation pertinente de la végétation. Toutefois, la complexification croissante des bases de données limite la capacité des villes à les actualiser et à les faire évoluer. En effet, réaliser une base de ce type pour une agglomération représente un investissement humain et matériel important qu'il est difficile de maintenir dans le temps. Ces bases sont donc rarement mises à jour et complétées au gré des projets urbains mis en œuvre dans le cadre de politiques urbaines.

En mode raster, la végétation peut être représentée à deux échelles : celle du pixel, la végétation étant analysée en fonction de ses caractéristiques spectrales et ou texturales (Rochon et Bonn, 1996) ; celle de l'objet, qui résulte de la segmentation de l'image en zones homogènes selon ses caractéristiques spectrales, texturales, de forme, de situation par rapport aux objets voisins. La représentation de la végétation en mode raster est moins communément utilisée par les gestionnaires que la représentation en mode vecteur, car ces derniers exploitent encore assez peu les images aéroportées et satellitaires. Toutefois, l'approche de la végétation par objet a permis aux gestionnaires de commencer à s'approprier les informations dérivées de données de télédétection, les gestionnaires étant plus habitués à traiter de l'information sous forme d'objets que sous forme de pixels.

Enfin, au-delà de la représentation cartographique de l'objet végétation, la littérature montre aussi que la végétation urbaine inventoriée dans les bases de données est analysée à quatre échelles (Sheets et Manzer, 1991 ; Goddard *et al.*, 2010) :

- l'échelle de l'objet (l'arbre, le parterre, …) ;
- l'échelle de la rue (arbres d'alignement, plantations de pieds d'arbres, …) ;
- l'échelle du quartier ou de l'îlot morphologique (continuité ou discontinuité d'éléments de végétation) ;
- l'échelle du paysage (pénétrante verte, réseau de boisements, éléments de trames vertes).

2 Les fonctions et services apportés par la végétation urbaine

La végétation dans le milieu urbain est étudiée en termes de fonctions et de services écosystémiques depuis une trentaine d'années.

Au niveau écologique, les espaces végétalisés en ville sont multifonctionnels, c'est-à-dire qu'ils assurent un ensemble de fonctions écologiques (Bastian *et al.*, 2012). Ces

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

fonctions peuvent être étudiées à travers la composition, la structure de la végétation ou *via* différents processus tels que la productivité par exemple. L'ensemble de ces fonctions génère des Services Ecosystémiques (SE) que l'on peut définir comme l'ensemble des bénéfices directs et indirects issus du fonctionnement des écosystèmes (Costanza *et al.*, 1997; De Groot *et al.*, 2002). Le nombre de services écosystémiques rendus par la végétation urbaine recensés dans la littérature varie de 6 (Bolund et Hunhammar, 1999) à 20 (Camps-Calvet *et al.*, 2016).

Les services positifs ou bienfaits attribués à la végétation urbaine peuvent se répartir dans les trois piliers du développement durable : l'environnement, l'homme (santé et bien-être, lien social), et l'économie (valorisation du bâti, valorisation des produits végétaux, agriculture urbaine et attractivité du territoire) (Figure 1.2).

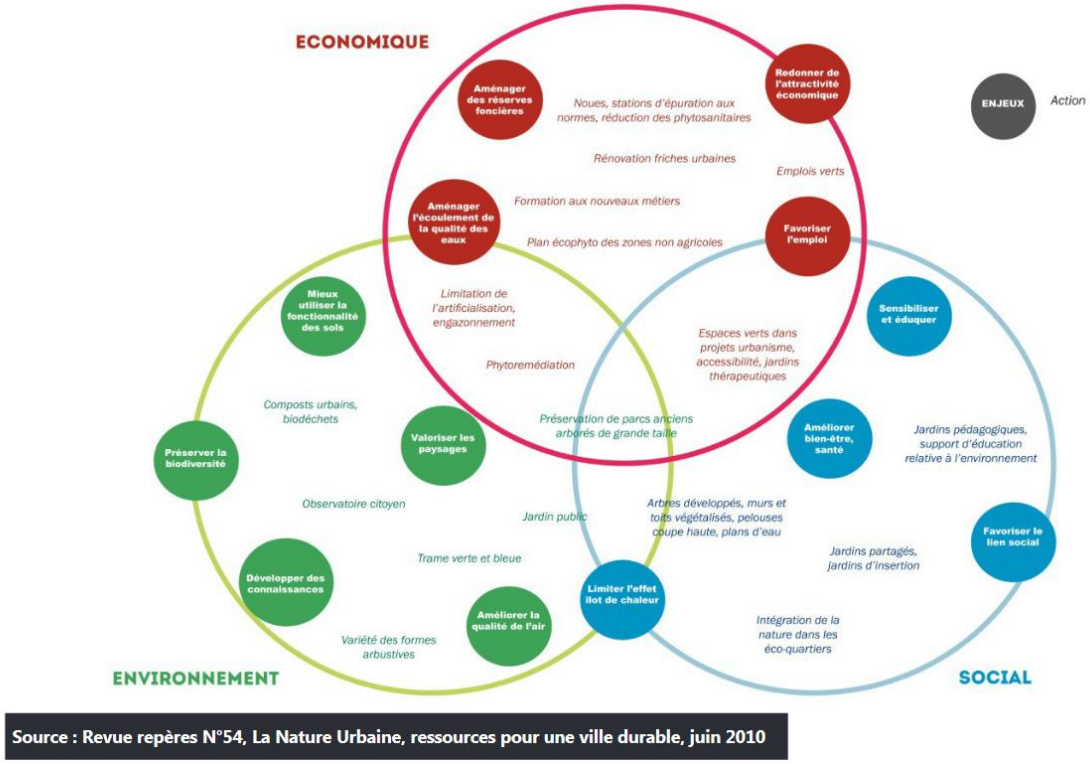


Figure 1.2 : Les trois piliers du développement durable

A contrario des services associés à la notion de bienfaits, les desservices sont définis comme les effets négatifs produits par les écosystèmes naturels et semi-naturels. Ces bénéfices et ces desservices agissent positivement ou négativement sur le bien-être humain (services de régulation, d'esthétiques, de récréation, etc.). Ils peuvent être évalués à travers des approches d'évaluation écologiques, sociologiques, économiques, etc. (Selmi *et al.*, 2013)

Nous allons ci-après détailler les fonctions et services des effets selon ces trois dimensions : environnementale, humaine, et économique.

2.1 Pour l'environnement

2.1.1 Le climat

La végétation joue un rôle majeur dans le cadre de la régulation du climat aux échelles fines en milieu urbain. En effet, la ville, par son caractère très minéral et sa morphologie particulière (forte verticalité,…), induit la mise en place d'un « îlot de chaleur » urbain qui est d'autant plus marqué que la ville est dense. Cet îlot de chaleur » se traduit spatialement par des températures plus élevées en centre-ville qu'en campagne (Susca *et al.*, 2011 ; Foissard, 2015 ; Cuny *et al.*, 2015). La végétation est un élément de la matrice paysagère qui permet, via différents processus physiques, d'atténuer cet effet d'îlot de chaleur :

- L'évapotranspiration, qui rafraîchit l'air via l'évaporation de l'eau présente dans le sol et les végétaux (Figure 1.3a) ;

- La transpiration, qui est la libération d'eau par la plante ;

- Les effets d'ombrage. La végétation, par interception du rayonnement solaire, permet de limiter le réchauffement des surfaces. Ce mécanisme dépend essentiellement de la volumétrie aérienne de la végétation et de la capacité d'interception de la canopée (Figure 1.3b).

Ces différents processus à l'œuvre permettent de réduire de 1 à 5°C les températures des espaces végétalisés comparativement à des espaces non végétalisés (Susca *et al.*, 2011).

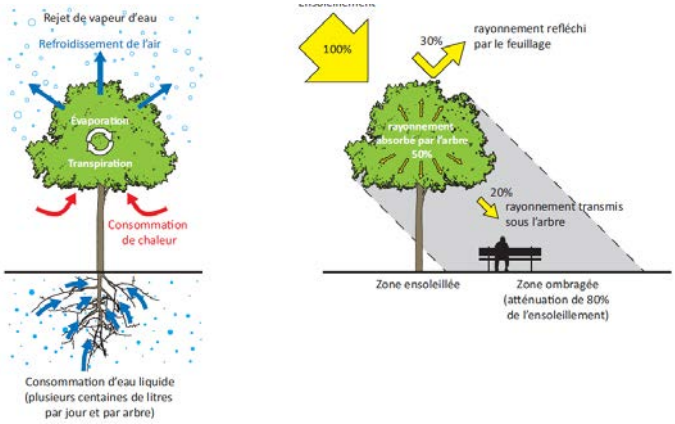


Figure 1.3 : Processus physique de régulation radiatif et thermique de la végétation

La végétation urbaine, en fonction de son organisation et de sa morphologie, peut également assurer des fonctions de protection (brise-vent, site d'abris, etc…) (Wang Y. *et al.*, 2014) en définissant un obstacle à l'écoulement de l'air.

A une échelle plus globale, la végétation permet d'atténuer l'effet de serre, à travers le processus de photosynthèse, les feuilles des végétaux chlorophylliens absorbant le CO2. La végétation urbaine, et plus particulièrement la végétation de type arborée et arbustive, participe activement à la séquestration du carbone de l'atmosphère dans ses tissu ligneux. Le taux de séquestration est difficile à évaluer précisément, mais des travaux scientifiques attestent d'un effet significatif de la végétation sur le stockage du dioxyde carbone (Yang *et al.*, 2005 ; Cox, 2012 ; Wang et Lin, 2012). Ils montrent que la quantité de CO2 séquestrée par la végétation arborée dépend de l'espèce considérée, de l'âge des arbres, de leur hauteur, leur diamètre, ou encore de la densité des peuplements. Elle varie aussi en fonction de la qualité de l'air et de la lumière (variable en fonction de l'heure de la journée, de la saison..) et de l'eau disponibles. Ces travaux montrent aussi le rôle majeur des forêts urbaines dans ce processus. Toutefois, il faut aussi noter que les végétaux relâchent aussi du CO2 lors de la respiration ou lorsque la végétation est exportée sous la forme de coupes ou leur décomposition par exemple.

2.1.2 La qualité de l'air

La végétation en milieu urbain permet également d'améliorer la qualité de l'air (Nowak *et al.*, 2006 ; Jim et Chen, 2008). Cet effet sur la qualité de l'air est direct, *via* l'absorption des polluants par les stomates, et indirect, à travers les effets de la végétation sur la régulation climatique qui réduit de fait la consommation d'énergie et donc les émissions de GES (Santamouris *et al.*, 2001). Ainsi, de nombreuses études ont été menées sur la capacité de la végétation à capter différents types de polluants, tel que le dioxyde d'azote (Morikawa *et al.*, 2003 ; Takahashi *et al.*, 2005), l'ozone (Alonso *et al.*, 2011), les grosses ou les fines particules (Freer-Smith *et al.*, 2005). Il est important de noter que les effets de régulation de la végétation sur la qualité de l'air sont plus ou moins contrastés selon le type de végétation considéré (caduque ou sempervirente, arborée ou herbacée), et l'heure ou la saison considérée (Yang *et al.*, 2005) (Figure 1.4).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

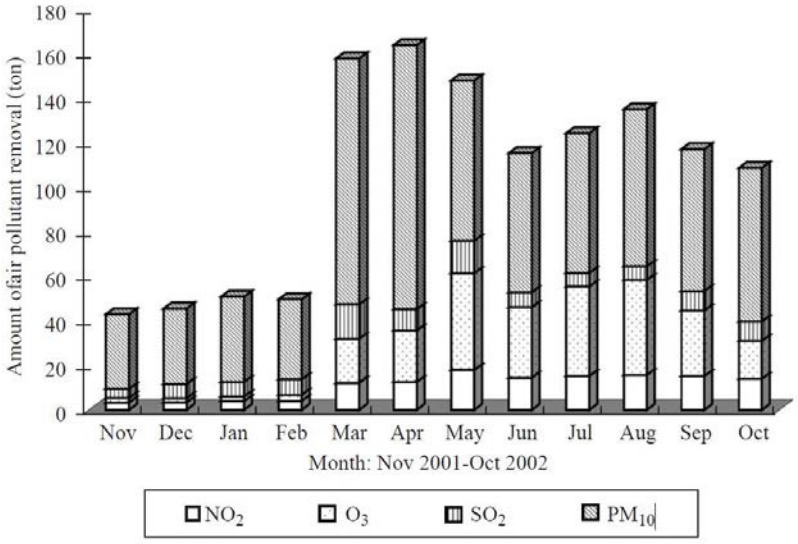


Figure 1.4 : Prélèvement mensuel des polluants atmosphériques par arbre pour la ville de Beijing en 2002 (Yang et al., 2005)

2.1.3 L'écoulement de l'eau et la protection des sols

Parmi les différents effets de la végétation sur l'eau et les sols, nous pouvons citer la rétention d'eau par la végétation par l'intermédiaire de son réseau racinaire (Bartens *et al.*, 2008). Celle-ci permet de limiter le ruissellement de surface, et par conséquent, la surcharge des réseaux d'évacuation des eaux fluviales. Il ne s'agit pas d'un effet direct mais plutôt d'un effet indirect, la végétation permettant de stocker l'eau qui sera libérée par évaporation ou par évapotranspiration. Les effets de la végétation sur la circulation de l'eau dans la ville sont fonction de multiples facteurs tels que l'intensité des précipitations ou le type de végétation. Les parcs et jardins, les toitures végétalisées, les friches ou encore les surfaces boisées sont des surfaces perméables qui permettent de retenir l'eau temporairement, de ralentir l'écoulement, ou de l'absorber par infiltration (Zeleňáková *et al.*, 2017) En outre, la présence d'un couvert végétal en ville protège les sols non artificialisés de l'érosion et du tassement provoqué par l'impact des précipitations et leur écoulement (Zeleňáková *et al.*, 2017).

2.1.4 La biodiversité

La biodiversité, qui se traduit par la variété des écosystèmes, des espèces, des gènes et de leurs interrelations, est nécessaire pour entretenir les fonctions essentielles, la structure et les processus de l'écosystème urbain. Elle est transversale aux différents services rendus puisqu'elle intervient au niveau des régulations environnementales, de l'approvisionnement, et des services culturels.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Le nombre et la qualité des espaces verts dans une ville déterminent le niveau de biodiversité qui s'y trouve. A une échelle locale (infra-urbaine), c'est la gestion des espaces verts eux-mêmes qui importe. A une échelle plus globale (celle de la ville), seul le développement d'un « maillage vert » (c'est-à-dire d'une trame verte avec plus ou moins de continuités qui incluent la végétalisation des bâtiments et des espaces privés) permettrait de maintenir une biodiversité ordinaire (espèces indigènes) jusqu'au centre de la ville et pourrait jouer un rôle dans la trame verte régionale (Clergeau et Blanc, 2013).

Les parcs urbains présentent souvent une diversité spécifique importante due en grande partie à présence d'espèces exotiques. La diversité des espèces et des habitats rencontrés sont liés aux caractéristiques de l'espace vert lui-même (taille, géométrie, mode de gestion) mais aussi aux caractéristiques de leur environnement (densité de bâti, degré d'isolement).

Des études ont montré que la diversité spécifique décroit avec l'urbanisation (Niemela, 1999 ; Niemelä *et al.*, 2010). L'urbanisation favorise aussi certaines espèces, des espèces plus généralistes ou exotiques au détriment d'espèces indigènes (Vilà *et al.*, 2011). La perte de ces espèces est liée à la de perte d'habitats –leurs habitats-, qui entraîne un effet d'isolement des espèces lorsque la matrice urbaine ne permet pas leur dissémination. Les trames vertes urbaines peuvent alors favoriser l'augmentation de la biodiversité en reconnectant des habitats entre eux (Xiu *et al.*, 2016).

2.2 Pour l'homme et la société

2.2.1 La santé

Les effets de la végétation sur la santé des individus, en milieu urbain, sont essentiellement des effets indirects. La végétation agit comme un levier vis-à-vis d'un ou de plusieurs facteurs environnementaux (diminution de l'îlot de chaleur urbain, réduction des polluants) qui entraînent une amélioration ou une dégradation de l'environnement des individus. La végétation agit sur plusieurs composantes de la santé, celle-ci étant définie ici au sens de l'OMS (Organisation Mondiale de Santé) : « *La santé est un état de bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité* ».

- Les effets sur la santé physique

Plusieurs études ont montré le lien entre l'importance de la végétation et la capacité de récupération de certains patients (Tzoulas *et al.*, 2007). Ainsi, on observe

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

des temps de récupération plus courts chez les patients disposant d'une vue sur un espace vert que chez les patients disposant d'une vue sur un espace très minéral.

Les espaces verts ont aussi indirectement un effet thérapeutique pour les personnes atteintes de maladies respiratoires ou les personnes sensibles pour qui, la pollution atmosphérique est un facteur de risque sanitaire (Tzoulas *et al.*, 2007). Toutefois, certaines espèces végétales sont nocives pour les personnes allergiques au pollen (graminées, bouleaux, …) et peuvent déclencher des crises d'asthme par exemple.

Pour citer un autre exemple de service indirect rendu par la végétation urbaine, nous pouvons noter que la proximité des espaces verts urbains facilite l'accès à une activité physique (marche à pied, course, vélo…) qui entraîne une réduction de l'obésité et des risques associés (Potwarka *et al.*, 2008). Cette proximité conduit également à une augmentation significative des mobilités douces (vélo, marche,…) qui améliorent de ce fait, la qualité de l'environnement par réduction des émissions de polluants liés aux moyens de transport. De même, la fréquentation d'espaces verts permet de réduire la probabilité de développer certaines pathologies telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète et certains types de cancer (Zhou et Parves Rana, 2012)

- Les effets sur la santé « mentale

Les espaces verts permettent de limiter « l'anxiété, le stress, l'irritabilité ou les difficultés de concentration et améliorent le bien-être sur le lieu de travail, ainsi que l'efficacité générale des individus » (Birds, 2007, 2004 ; Brown, 2007; Cuny *et al.*, 2015). Les espaces végétalisés permettent aussi de développer des émotions positives amenant les individus au « lâcher prise » et au soulagement émotionnel en échappant au contexte de stress dans lequel ils évoluent (Macnaghten et Urry, 2000).

- Les effets sur le confort de l'environnement

De nombreuses études ont permis d'établir un lien entre réduction du bruit et végétation. La diminution du bruit est dépendante d'une multiplicité de variables. Klingberg *et al.*, (2017) ont montré que la réduction du bruit était corrélée au développement du feuillage au cours de l'année. Ow et Ghosh, (2017) montrent qu'une barrière de végétation semi-ouverte à moyennement ouverte permet de réduire de presque 50% la propagation du bruit, et que contrairement aux idées reçues, une végétation dense n'est pas plus efficace qu'une végétation qui l'est moins. Ainsi, ils démontrent que la diminution du bruit est proportionnelle à densité du végétal, mais que jusqu'à 5m d'épaisseur de la « haie ». Au-delà, la diminution du bruit n'est plus significative. Il est important de souligner que malgré des mesures empiriques de la diminution du bruit dans différents contextes de végétalisation, des aspects

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

psychologiques interviennent au niveau de l'appréhension du bruit par les citoyens. Ainsi, le type de barrière (type de végétal, valeur esthétique,…) permettant ou non l'inter-visibilité avec l'élément perturbateur accentue, ou au contraire diminue, la perception du bruit par l'individu (Viollon *et al.*, 2002).

En outre, la végétation agit comme un filtre au niveau des conditions climatiques, qu'il s'agisse des températures (rafraichissement), des précipitations ou du vent (Giridharan *et al.*, 2005; Rizwan *et al.*, 2008).

2.2.2 Le lien social

Dans l'acceptation commune, il semble que les espaces verts facilitent les échanges et les rencontres (Long et Tonini, 2012). Un contexte paysager où la végétation domine amène « instinctivement » l'usager à s'ouvrir à l'autre. Les espaces verts sont également des espaces où les pratiques récréatives sont les plus fréquentes, entraînant de fait, des échanges plus soutenus. Il faut noter que la multiplicité des types d'espaces verts (parcs urbains, golfs, jardins familiaux et partagés) apporte différents degrés de satisfaction ou de plaisir.

2.3 Pour l'économie

D'une façon générale, la proximité d'un espace vert ou d'une forêt urbaine fait augmenter le prix du foncier (Crompton, 2001). Par ailleurs, a vue sur un espace vert ou sur une pièce d'eau constitue aussi une plus-value immobilière.

A une échelle plus globale, la présence d'espaces verts constitue *a priori* une attractivité touristique (Davern *et al.*, 2016). Même s'il s'avère que les usagers des parcs et jardins sont en très grande majorité des résidents de la ville, et à l'exception de certains espaces verts remarquables qui motivent la visite d'une ville, l'ensemble des aménagements végétaux participe à l'image de la ville, à son ambiance, à son esthétique, ce qui attire les touristes.

Sur le plan économique, la valorisation des déchets végétaux sous forme d'énergie représente aujourd'hui un apport non négligeable (MacFarlane, 2009). La valorisation concerne le bois de chauffage et les résidus herbacés. Les déchets végétaux peuvent aussi servir comme éléments de paillages ou de revêtements dans des aménagements paysagers.

Le végétal urbain sert aussi à produire des denrées alimentaires. L'agriculture urbaine est pratiquée non seulement dans les espaces péri-urbains, mais aussi en villes

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

au sein des jardins familiaux et partagés, des friches, sur les toitures ou balcons de certains bâtiments (Soulard *et al.*, 2011). La production de denrées alimentaires en ville, largement pratiquée sur sol, commence à l'être en mode hors-sol (Chalmandrier et al., 2017).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 2 : Utilisation des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain

1 Intérêts et limites des cartes existantes 30
1.1 Les cartes issues des bases de données nationales et internationales 30
1.1.1 Corine Land Cover (CLC) 31
1.1.2 La base de données du CES OSO 32
1.1.3 La base BD-TOPO Végétation de l'IGN 33
1.1.4 La base de données Open Street Map 34
1.1.5 L'Urban Atlas 35
1.2 Les cartes réalisées à des échelles locales 37
1.2.1 Les bases de données sur les espaces verts 37
1.2.2 Les inventaires effectués lors des grands travaux urbains 38

2 Les données de télédétection THRS 2D 39
2.1 Du visible à l'infrarouge moyen 39
2.1.1 Les données multi-spectrales 39
2.1.1.1 Les orthophotoplans 39
2.1.1.2 Les images satellites 40
2.1.1.3 Les images super-spectrales 42
2.1.2 Les données hyper-spectrales 43

3 Les données de télédétection THRS 3D 45
3.1 En mode passif : les données stéréoscopiques 45
3.1.1 Les données acquises par drone 46
3.1.2 Les données acquises par avion 48
3.1.3 Les données satellites 49
3.2 En mode actif : les données LiDAR 50

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Ce chapitre présente un état de l'art sur la cartographie de la végétation urbaine. Après avoir analysé les cartes de végétation dérivées des bases de données existantes sur la végétation aux échelles internationale, nationale et locale, nous détaillerons le potentiel et les limites avérées des données de télédétection THRS 2 D et 3D.

1 Intérêts et limites des cartes existantes

1.1 Les cartes issues des bases de données nationales et internationales

Les bases de données traitant de la végétation en milieu urbain à une échelle nationale ou internationale sont recensées dans la table 2.1. Ces bases sont hétérogènes en termes de précision et de nomenclature.

Table 2.1: Bases de données utilisées aux échelles nationale et internationale

Base de données	**Couverture**	**Echelle**	**Statut**	**Producteur**
Corine Land COVER (CLC)	Europe des 28 et partenaires	1/100000	Gratuit	Agence Européenne pour l'Environnement (UE)
CES OSO	Territoire nationale	1/50000	Gratuit	CNES (FR)
BD_TOPO Volet Végétation	Territoire nationale et DOM/TOM	1/25000	Payant	IGN (FR)
Open Street Map (OSM)	Mondiale	Du 1/1000 au 1/100000	Gratuit	Participatif
Urban Atlas	Aire urbaine de plus de 100000 Habitants	1/50000	Gratuit	Agence Européenne pour l'Environnement (UE)

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

1.1.1 Corine Land Cover (CLC)

La base de données CLC est élaborée à l'échelle du territoire européen des 28 et de 6 autres pays partenaires, soit au total 39 pays membres de l'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE). Il s'agit d'un inventaire biophysique de l'occupation des sols produit dans le cadre du programme européen d'observation de la terre Copernicus.

CLC, produite au 1/100 000ème, est issue de l'interprétation visuelle d'images satellitaires et de l'utilisation de données annexes. Elle est actuellement disponible à 4 dates : 1990, 2000 et 2006 et 2012.

La précision spatiale de CLC est de 25 ha, soit une taille de maille relativement peu adaptée au milieu urbain, ce dernier présentant une forte hétérogénéité (Figure 2.1). La nomenclature de CLC n'est pas adaptée non plus à l'étude de la végétation du milieu urbain, puisqu'elle ne comprend qu'une seule classe « espaces verts » qui recensent les grands parcs urbains.

Ainsi, cette base de données, bien que gratuite, n'est que très rarement utilisée en milieu urbain, excepté pour effectuer des comparaisons entre des villes de grande superficie (Guérois, 2003).

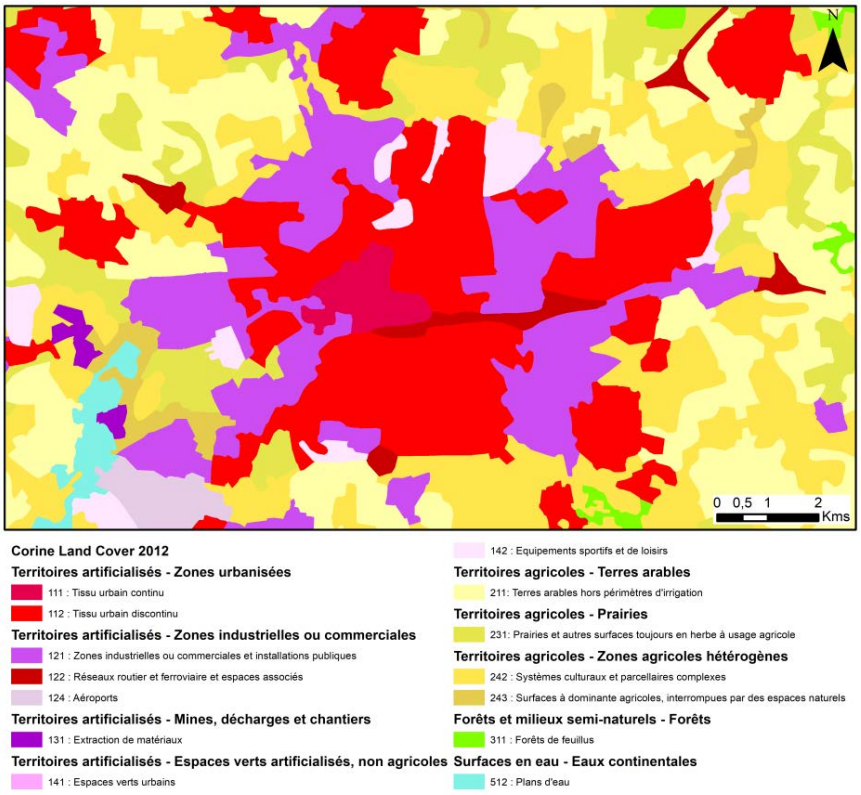


Figure 2.1 : Extrait de la base de données Corine Land Cover sur la ville de Rennes (Source : CLC2012)

1.1.2 La base de données du CES OSO

La base de données réalisée par le CES-OSO (Centre d'Expertise Scientifique - Occupation des Sols Opérationnelle) a été développée depuis 2014 dans le cadre du Pole de données THEIA du CNES. L'objectif était de mettre à disposition, sur tout le territoire national, une couverture annuelle de l'occupation du sol réalisée à partir des séries temporelles d'images satellites Sentinel-2 et Landsat 8. La base de données est produite en utilisant deux logiciels : IOTA 2 (Infrastructure pour l'Occupation des sols par Traitement Automatique), une des chaines de production de cartes d'occupation des sols développée par le laboratoire CESBIO (UMR CNRS, CNES, IRD), et l'Orfeo Toolbox qui est une bibliothèque de logiciels de traitements d'images développés par le CNES.

La carte d'occupation du sol de 2017 a été produite uniquement à partir de d'images Sentinel-2 qui ont une résolution spatiale de 10m X 10m (les années précédentes ayant été produites à partir de données Landsat 8 et Sentinel-2) (Figure 2.2). La nomenclature utilisée comprend 17 classes, dont 3 classes de végétation utilisable dans un contexte urbain. La précision de la carte est relativement bonne (indice de kappa : 0,86 ; indice de précision globale : 0,87). Les erreurs les plus élevées sont observées au niveau de la classe « bâti » (précision : 0 .16) et de la classe « zones industrielles et commerciales » (précision : 0,56). Pour ce qui relève plus spécifiquement de la végétation urbaine, le facteur limitant est la résolution spatiale (10m X 10m) des images Sentinel qui limite l'extraction et la caractérisation fine de la végétation. Cette carte permet toutefois d'effectuer une analyse comparative du % de couverture végétale entre les grandes villes françaises, à une échelle de l'ordre du 1/50000ème.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

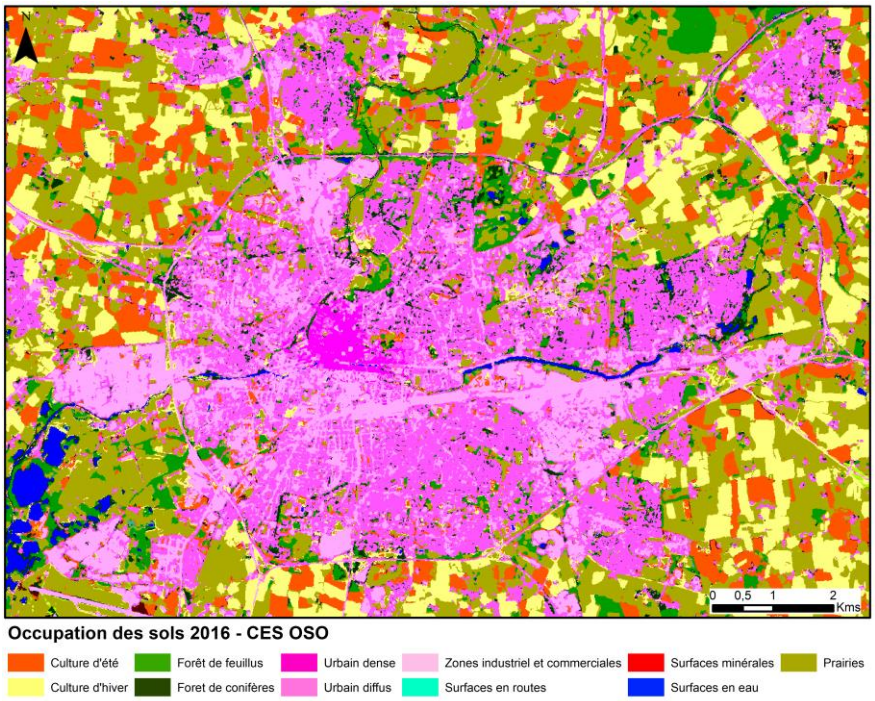


Figure 2.2 : Extrait de la carte d'occupation des sols sur la ville de Rennes (2017) (Source : CES-OSO)

1.1.3 La base BD-TOPO Végétation de l'IGN

La couche végétation produite dans le cadre de la base de données (BD) TOPO de l'IGN® (v2) permet de disposer d'une couverture homogène de la végétation arborée et/ou ligneuse sur l'ensemble du territoire national (Métropole et Dom/TOM) (Figure 2.3).

Toutefois, si les bois de plus de 500m^2 ainsi que les forêts ouvertes, landes, vignes et vergers de plus de 5000m^2 figurent bien dans cette base de données, les autres classes de végétation arborées et ligneuses ne sont pas représentées de façon exhaustives (guide de la BD TOPO, IGN ©) : seules la structure principale d'un réseau dense de haies ou rangées d'arbres et une partie des arbres isolés et bosquets sont représentées.

En dépit de ces limites, la couche végétation de la BD TOPO de l'IGN® (V2) reste aujourd'hui le produit de référence pour réaliser des études comparatives de l'emprise de la végétation en ville sur le territoire national. En effet, il n'existe pas, aujourd'hui, de base d'étendue nationale plus précise que celle-ci pour étudier la végétation en milieu urbain.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

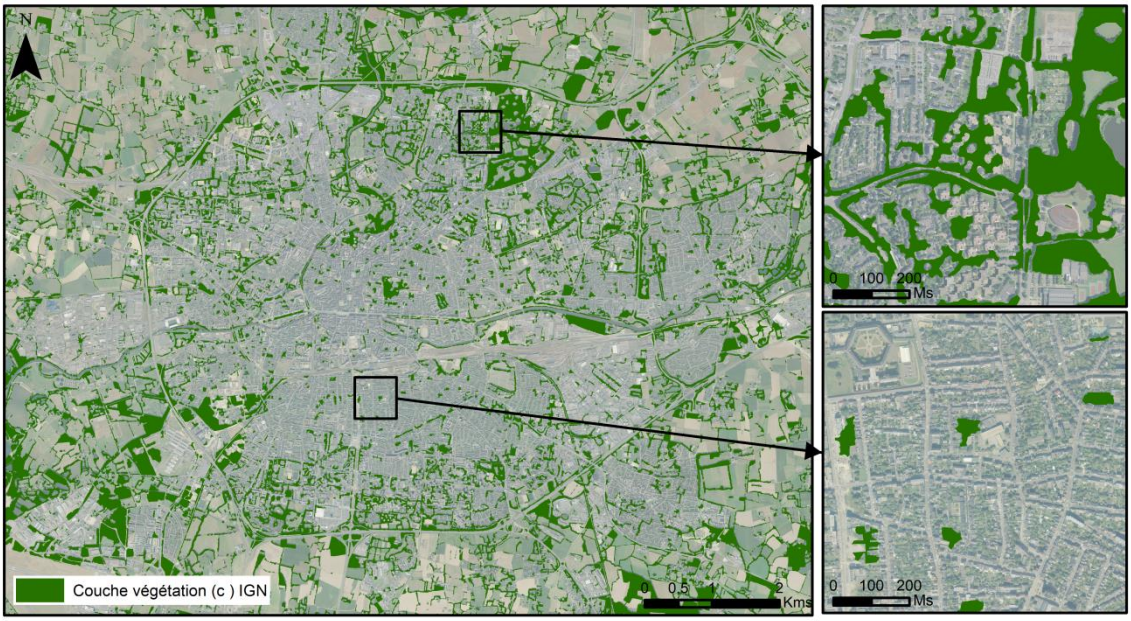


Figure 2.3 : Extrait de la BD Végétation sur la ville de Rennes (Source : IGN)

1.1.4 La base de données Open Street Map

L'Open Street Map (OSM) est un projet de base de données cartographique mondiale initié en 2004 dont l'objectif était de mettre à disposition gratuitement, toutes les données géoréférencées disponibles de quelque nature qu'elles soient. Ainsi, l'OSM recouvre une très grande diversité d'informations qui vont du réseau routier au mobilier urbain, des réseaux implantés à la délimitation des parterres de fleurs dans certains parcs. Cette base de données est constituée essentiellement de relevés réalisés avec des GPS, principalement sur la base d'une participation volontaire des membres de la « communauté OSM ».

La philosophie même du projet, qui est ancrée dans la culture du « libre » et qui repose sur le principe de la diffusion ouverte de la donnée, implique une grande hétérogénéité des données collectées. En effet, l'OSM est constituée de données récupérées de deux façons différentes:

- de façon participative : La production des données est encadrée par la communauté OSM afin de respecter les standards de production sur le plan de la géométrie. Toutefois, les efforts de production étant parfois très différents d'un site à l'autre, l'homogénéité et exhaustivité de la mesure sur l'ensemble d'un territoire ne sont pas toujours assurées.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

- par la récupération de données libres qui sont mises à disposition par différents partenaires du projet (acteur du territoire, entreprise, distributeur de données, etc…).

L'OSM apporte des informations inédites, très diverses et parfois très précises sur la végétation urbaine (Figure 2.4). Néanmoins, il est encore difficile de les exploiter de façon systématique pour l'étude d'un territoire donné. L'hétérogénéité des données récoltées dans les différentes agglomérations ne permettant pas de comparaison.

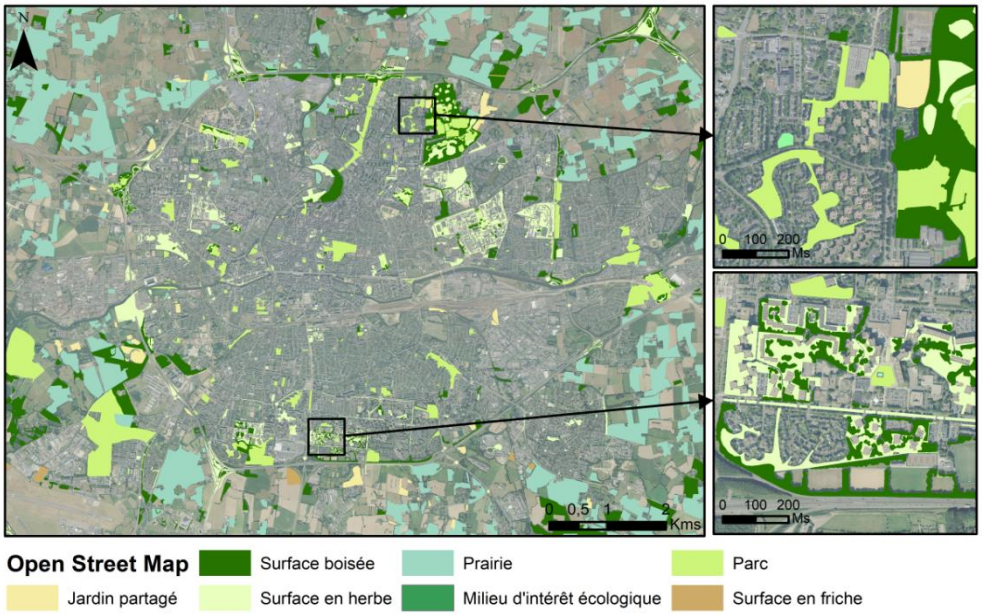


Figure 2.4 : Extrait de la base de données Open Street Map sur la ville de Rennes (Source : OSM 2018)

1.1.5 L'Urban Atlas

L'Urban Atlas est un des services fournis dans le cadre du programme GMES/Copernicus. Celui-ci fournit des données d'occupation et d'utilisation des sols à une échelle pan-européenne sur le territoire de l'UE et de certains de ses partenaires) pour plus de 800 aires urbaines de plus de 100 000 habitants en 2012 (Figure 2.5). Cette base de données a été initiée en 2006 suite au constat du manque de données disponibles sur les territoires à dominante urbaine pour une mise en œuvre, et le suivi, des politiques européennes en matière de développement urbain. Cette base de données est produite à partir d'images satellites à haute résolution spatiale. La carte 2012 a été réalisée à partir de données IRS-6, SPOT 5 et Rapideye ré-échantillonnées à 20m. L'échelle d'exploitation a été fixée au 1/10000ème, avec une unité minimum de détection de 0,25ha (Urban Atlas mapping guide, 2006).

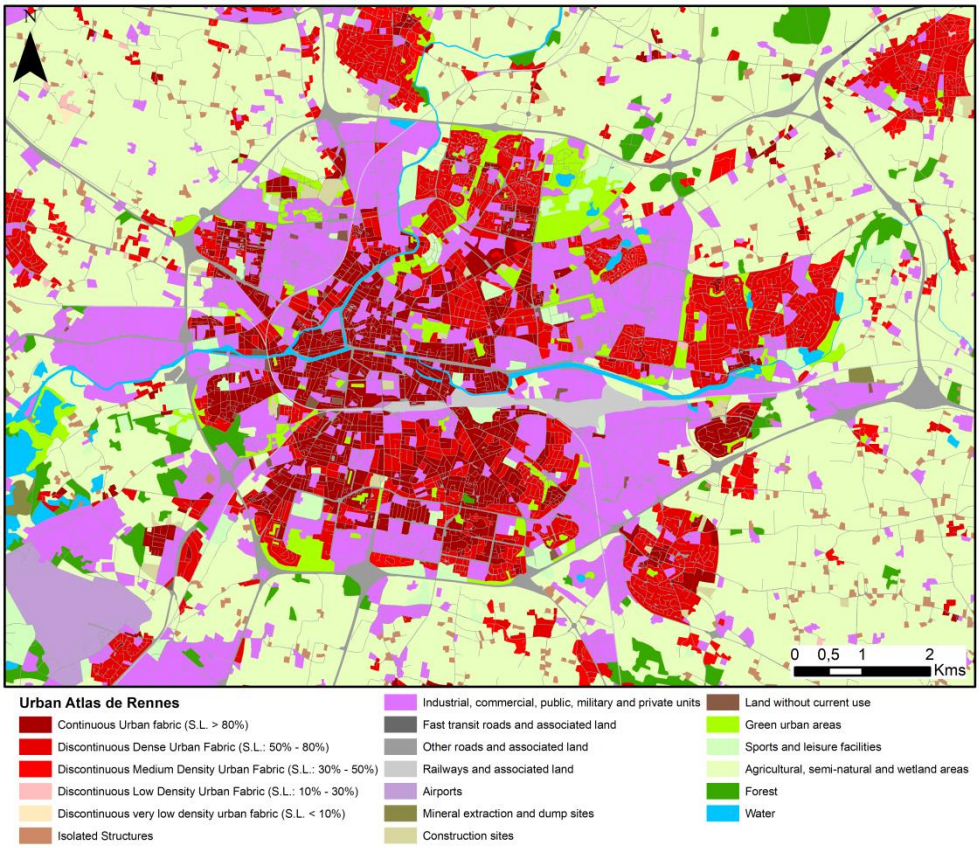


Figure 2.5 : Extrait de la base de données de l'Urban Atlas sur la ville de Rennes (EEA, 2006)

L'Urban Atlas se décline depuis 2012 à des échelles fines pour différents produits tels que la couche d'information sur la hauteur du bâti ou le produit «Street tree layer» (Figure 2.6). Ce dernier est issu du traitement semi-automatique d'images satellites à très haute résolution spatiale simulées à partir de données SPOT5 à 2,5m. Sur ce produit tous les éléments boisés de plus de 500m² et de plus de 10m de largeur au minimum sont cartographiés. Il offre ainsi la possibilité, pour les agglomérations qui n'ont pas créé leur propre base de données sur la végétation, de disposer d'informations utiles. Le produit «Street tree layer» permet également d'assurer des comparaisons sur la végétation de plusieurs villes.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

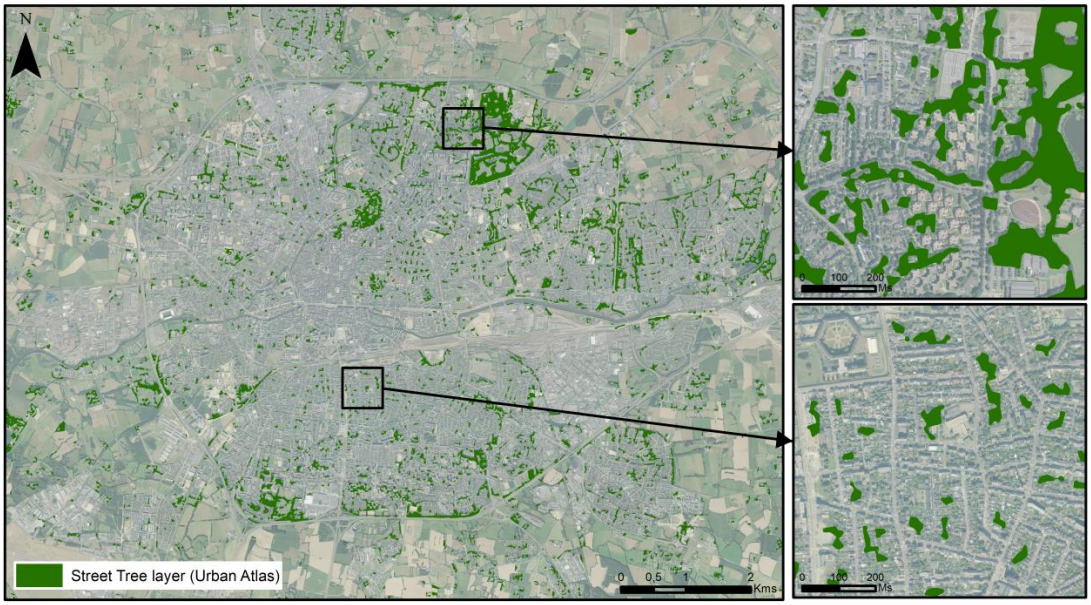


Figure 2.6 : Extrait de la donnée Street Tree Layer de l'urban Atlas sur la ville de Rennes

Les différents types de cartes présentés précédemment ont pour principale caractéristique d'être disponibles *a minima* sur tout le territoire national de manière homogène. Néanmoins, les échelles des trois premiers types de cartes et le côté ponctuel et hétérogène du quatrième type ne permettent pas de les exploiter à une échelle opérationnelle au sens de l'action publique. En effet l'aménageur et le gestionnaire, dans le cadre de la mise en œuvre des directives, décrets et autres documents d'urbanisme tels que les Plan Locaux d'Urbanisme (PLU) ou les Schémas de Cohérence Territoriaux (SCOT), ont besoin d'avoir accès à des données homogènes, exploitables à une échelle de l'ordre du 1/5000 et couvrant tout le territoire urbain.

1.2 Les cartes réalisées à des échelles locales

1.2.1 Les bases de données sur les espaces verts

Les bases de données sur les espaces verts sont développées à l'initiative des villes, généralement par les services des espaces verts. Elles contiennent des informations très précises sur la végétation des parcs (espèces, état sanitaire, date de plantation, entretient, mode de gestion, etc…). Les végétaux sont répertoriés quand ils sont implantés, ou lors de travaux de réaménagement. En dehors des parcs publics, les relevés effectués sur la végétation ne sont pas exhaustifs sur le reste du territoire urbain (Figure 2.7). De plus, la mise à jour de la base de données est ponctuelle, et réalisée de façon fragmentaire en terme de couverture. Il est donc difficile -voire impossible-

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

d'avoir une vision complète et détaillée de l'état de la végétation, à partir de ce type de base de données.

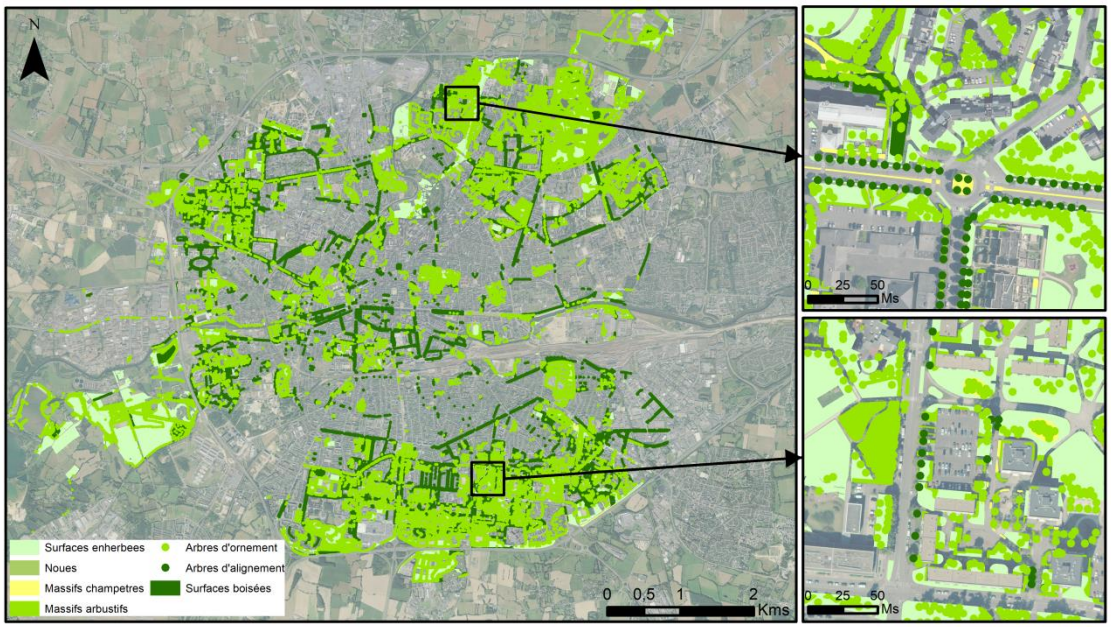


Figure 2.7 : Extrait de la base de données du service des espaces verts de la ville de Rennes (Source Ville de Rennes)

1.2.2 Les inventaires effectués lors des grands travaux urbains

Des inventaires floristiques sont réalisés sur le terrain lors de grands travaux d'aménagement de l'espace urbain du type : implantations de voies de circulation (routes, métro), projets de zone à urbaniser, projets de zones d'aménagement concertées, etc… Il s'agit majoritairement de relevés géoréférencés sur le terrain avec des GPS.

Bien qu'ils soient très précis et très fiables, ces inventaires présentent plusieurs limites : ils sont lourds à mettre en œuvre, coûteux, et dépendants de l'opérateur. Les protocoles d'inventaire ne sont pas normalisés et bien souvent mis en œuvre par différents prestataires. De plus, ils ne couvrent pas toute une ville et ne sont pas mis à jour, sinon exceptionnellement. Il est en effet difficile d'assurer des observations et un suivi sur des territoires étendus avec de telles précisions et des protocoles d'inventaires homogènes. Cette approche est donc ponctuelle et rend difficile la comparaison entre les quartiers. Il apparaît quasi-impossible de comparer la végétation de deux villes. Il est donc difficile d'utiliser ces données pour avoir une vision homogène spatialement et temporellement. De même une utilisation de ces données pour réaliser une comparaison

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

dans le cadre d'évaluation des politiques d'aménagement serait difficile sauf exploitation à l'échelle du quartier.

Néanmoins, il est important de noter que de nombreuses villes sont actuellement en train de se doter d'un Atlas Local de la Biodiversité (ALB) qui a pour vocation de structurer les données produites par de multiples partenaires (bureaux d'étude, associations de naturalistes, chercheurs, citoyens). L'objectif est de pouvoir disposer d'une base de connaissances à jour et exhaustive lors de travaux de renouvellement urbain.

Les deux types de bases de données locales présentées précédemment, décrivent précisément la végétation urbaine, mais présentent l'inconvénient majeur de ne pas permettre de réaliser des cartes exhaustives de la végétation sur l'ensemble du territoire urbain.

2 Les données de télédétection THRS 2D

Nous présentons successivement ci-après les données de télédétection à très haute résolution spatiale utilisables pour étudier la végétation en milieu urbain dans le domaine optique et proche infrarouge

2.1 Du visible à l'infrarouge moyen

2.1.1 Les données multi-spectrales

Deux types de données multi-spectrales peuvent être considérés pour l'étude et le suivi de la végétation en milieu urbain dans le domaine optique, les données du domaine visible et les données du domaine proche infrarouge et moyen infrarouge.

2.1.1.1 Les orthophotoplans

Les orthophotoplans de l'IGN© en mode couleur et en mode infrarouge couleur sont les données est les plus communément utilisées depuis des décennies par l'ensemble des acteurs (aménageurs-gestionnaires, chercheurs, ...). Elles sont caractérisées par de faibles résolutions spectrales et radiométriques (Figure 2.8 (b)) et *a contrario* par une très forte résolution spatiale, de l'ordre de 0,20m (Figure 2.8 (a)).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

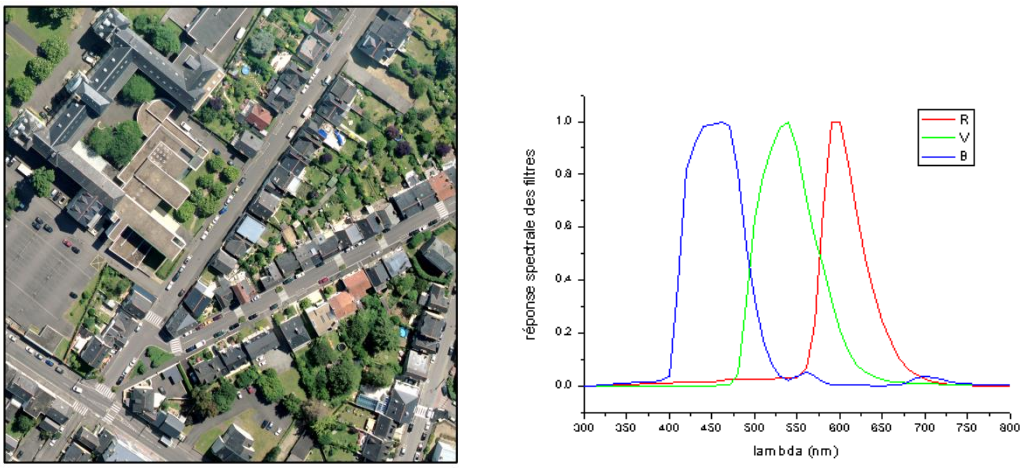


Figure 2.8 : Extrait de l'orthophotoplan sur la ville de Rennes (a) et largeur de bande de la caméra V2 (b) (Source : IGN, 2014)

Les orthophotoplans © IGN sont aujourd'hui encore largement utilisés pour cartographier la végétation urbaine : le plus souvent, une extraction manuelle des informations est effectuée par photo-interprétation assistée par ordinateur. Des couches SIG sur la végétation sont produites par un opérateur selon le mode de représentation souhaité (point, ligne, polygone) (Shojanoori et Shafri, 2016). Cette méthode tend aujourd'hui à être supplantée, pour certaines classes de végétation, par des approches de classification automatiques.

L'analyse de la végétation en ville à partir des orthophotoplans est limitée par leurs résolutions spectrale et radiométrique qui ne permettent pas une bonne séparabilité des différents types de végétation entre eux. Parfois même de la végétation avec d'autres types d'occupation des sols comme par exemple, confusions courantes entre les conifères avec des ombres ou des surfaces en eau (Lefebvre, 2011). Avec l'émergence des approches basées sur la texture de l'image (Lefebvre, 2011 ; Mingxing Hu, 2011) et la disponibilité grandissante de données à « très » très haute résolution spatiale (de l'ordre de 5cm à 10cm), les orthophotoplans sont de plus en plus traités de manière automatique. Les nouvelles méthodes de traitement basées sur l'apprentissage profond (type réseaux de neurones, deep-learning, …) permettent un gain substantiel de temps dans l'exploitation de ce type de données (Audebert *et al.*, 2016), ce qui et accentue la demande de ce type de données. Cependant, leur faible résolution spectrale demeure une limite pour l'identification des espèces.

2.1.1.2 Les images satellites

Ces dernières années, les images satellites THRS optiques ont beaucoup été utilisées pour cartographier la végétation, notamment dans le milieu urbain. On a en

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

effet assisté à une augmentation significative du nombre de capteurs spatiaux permettant d'acquérir des images à des résolutions spatiales d'un ordre métrique à sub-métrique (Figure 2.9), tels que Pléiades, Geoeye, IKONOS, Quickbird, Deimos II, etc... Ces données présentent des résolutions spatiales équivalentes à celle de la première génération d'orthophotoplans © IGN mais ont des résolutions spectrales plus élevées (bandes spectrales plus étroites et plus nombreuses) et couvrant *a minima* le visible et le proche infrarouge (PIR) (Figure 2.10), parfois le moyen infrarouge (MIR). Les bandes du PIR et du MIR sont essentielles pour la caractérisation et le suivi de la végétation. Les acquisitions spatiales THRS présentent également une flexibilité importante, au regard des acquisitions aéroportées. En effet, le satellite offre une capacité de revisite de quelques jours contre des délais bien supérieurs pour l'aéroporté qui est généralement de 3 à 5ans.



Figure 2.9 : Extrait d'une image Pléiades sur la ville de Rennes en mode panchromatique en haut et en mode multi-spectral en bas (Kalideos, CNES)

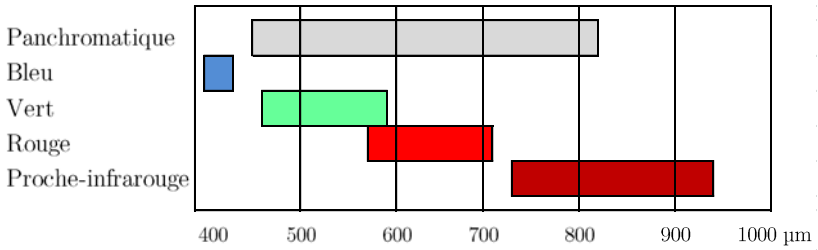


Figure 2.10 : Largeur de bandes de Pléiades (Source : CNES)

Les images satellites multi-spectrales THRS, restent encore assez peu utilisées par les aménageurs et gestionnaires, alors qu'elles sont largement exploitées par la communauté scientifique pour la caractérisation de la végétation en ville. En effet, ces données permettent entre autres de réaliser la cartographie des canopées arborées en

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

ville (Hong et *al.*, 2009 ; Puissant *et al.*, 2014 ; Li *et al.*, 2015) , de caractériser certaines espèces d'arbres (Zhang et Hu, 2012) notamment à partir de l'analyse de variables biophysiques telles que le Leaf Area Indice (LAI) (Ma et Ju, 2011), ou encore d'évaluer l'état santé des arbres (Xiao et McPherson, 2005).

Une résolution spatiale fine couplée à une résolution spectrale assez bonne et une répétitivité croissante font des images satellites multi-spectrales THRS un outil pertinent pour l'étude de la végétation en ville. Il faut toutefois noter certaines limites à ce type de données, leur résolution spectrale étant encore insuffisante pour caractériser finement les espèces.

2.1.1.3 Les images super-spectrales

Les données super-spectrales sont définies comme étant des images de télédétection ayant un nombre de bandes spectrales supérieur à 10, avec des largeurs de bandes plus étroites que celles des capteurs multi-spectraux (Gianinetto, 2004). Nous pouvons citer comme exemple de capteur Worldview 3 qui dispose de 28 bandes spectrales avec réparties en quatre modes avec des résolutions spatiales différentes : panchromatique (0.31m), multi-spectral (1.24m), moyen infrarouge (3.70m) et CAVIS pour « Clouds, Aerosols, vapors, Ice and snow » (30m) (Figure 2.11).

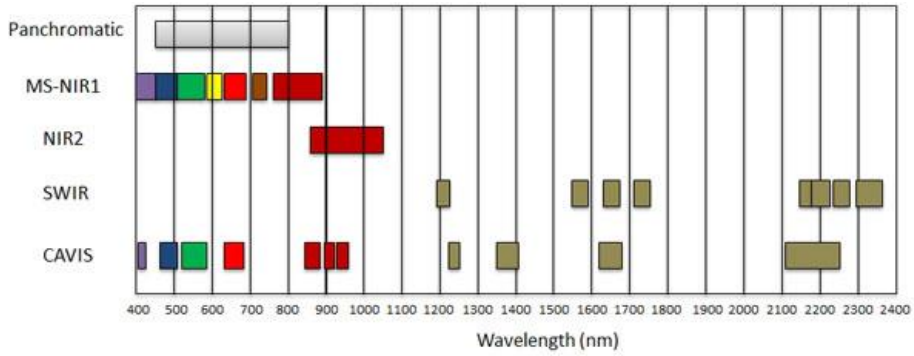


Figure 2.11 : Largeur de bandes spectrales de Worldview II (Source : DigitalGlobe)

Les capteurs super-spectraux offrent une dimension spectrale plus élevée que les capteurs multi-spectraux avec un nombre de bandes plus important, ainsi qu'une résolution spatiale infra métrique. L'intérêt des nouvelles bandes spectrales (Nouri *et al.*, 2014 ; Li *et al.*, 2015) offertes par ce type de capteurs s'avère particulièrement intéressant pour la cartographie des surfaces minérales et des sols nus, mais reste limité pour la végétation (Novack *et al.*, 2011 ; Yan *et al.*, 2015 ; Momeni *et al.*, 2016). En effet, en dépit du nombre élevé de travaux scientifiques menés avec des images satellites super-spectrale THRS, peu de travaux présentent de réelles avancées dans le

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

domaine de la cartographie de la végétation en ville en tirant parti de la richesse spectrale de ces données. La très grande majorité des études menées en milieu urbain avec ce type de données ne s'attarde que très peu sur la végétation en ne traitant que des classes « surfaces en herbe » et « boisements », en insistant sur leur délimitation, mais sans chercher à les caractériser finement, par exemple en décrivant leur état ou en discriminant les espèces qui les composent. Quelque rares études abordent toutefois la question de la richesse floristique. Par exemple, Pu et Landry (2012) ont cartographié une dizaine d'espèces d'arbres en ville en utilisant une image multi-spectrale (IKONOS) et une image super-spectrale (Worldview II). Leurs résultats ne montrent pas un apport important des bandes spécifiques de Worlview II pour la classification des espèces d'arbres, les indices de kappa obtenus avec les deux types d'images étant peu élevé (proches de 0.5) et très proches.

Les données super-spectrales présentent donc un potentiel qui a été, jusqu'à présent grandement sous-exploité pour étudier la végétation en ville.

2.1.2 Les données hyper-spectrales

La littérature concernant l'exploitation des données hyper-spectrales en milieu urbain est peu abondante au regard de l'exploitation plus ancienne de cette technologie dans d'autres domaines des sciences de l'environnement (agronomie, foresterie, géologie,…) (Borengasser *et al.*, 2007; Hardin et Hardin, 2013). Les données hyper-spectrales peuvent être également acquises dans les domaines optiques et thermiques. Cependant, seules les données hyper-spectrales enregistrées dans le domaine visible - proche infrarouge 0,4-2,5 µm - ne seront abordées ici, car elles sont actuellement les données les plus utilisées pour étudier la végétation en ville.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

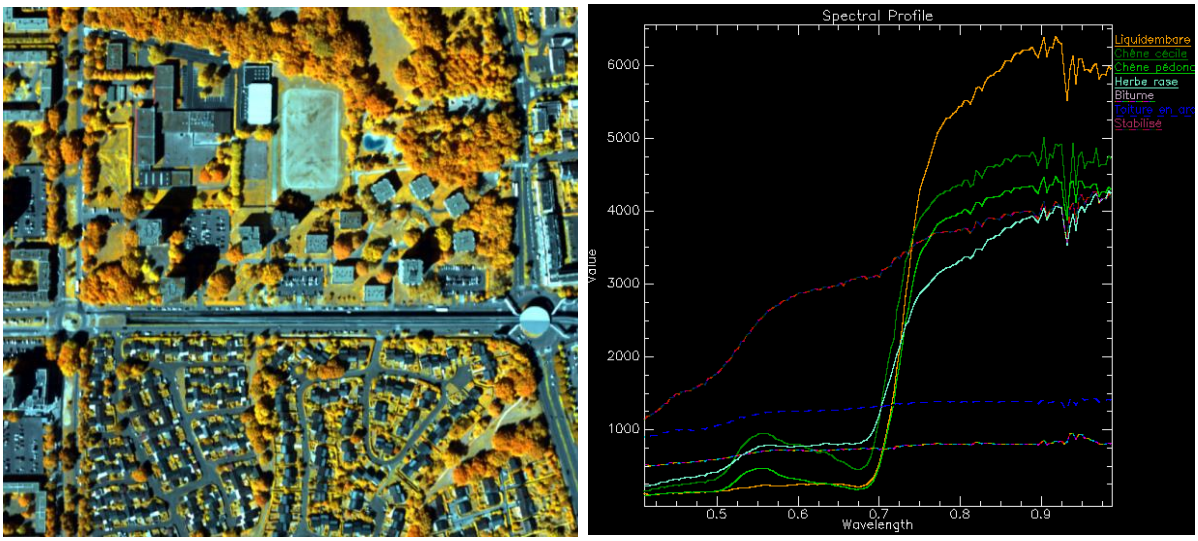


Figure 2.12 : Extrait d'une image hyper-spectrale sur la ville de Rennes (à gauche) et de signatures spectrales de matériaux qui en sont dérivées (à droite)

Les données hyper-spectrales sont utilisées en milieu urbain dans des domaines d'application très variés. Une grande majorité des travaux sont orientés sur la nature des matériaux qui constituent la ville (voierie, toiture,...)(Figure 2.12). En effet, l'empreinte environnementale des matériaux utilisés pour construire ou rénover le tissu urbain étant un enjeu majeur, de nombreuses études ont exploité des images hyper-spectrales pour effectuer le suivi de l'imperméabilisation des sols (nature, composition, état de dégradation,...), notamment pour évaluer son impact sur l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (Hardin et Hardin, 2013 ; Roessner *et al.*, 2001 ; Segle *et al.*, 2003 ; Falcone et Gomez, 2005 ; Weng *et al.*, 2008 ; Weng, 2012).

Cependant, de nombreux travaux de recherche ont démontré l'intérêt des images hyper-spectrales pour caractériser la végétation en milieu urbain. Ainsi, de manière non exhaustive, ces données sont utilisées pour

- La cartographie de l'occupation du sol : la résolution spectrale très élevée de ces données permet d'identifier un plus grand nombre de classes que les autres données de télédétection et d'améliorer la délimitation de certains objets (Jensen *et al.*, 2009 ; Alonzo *et al.*, 2014 ; Chen *et al.*, 2018). Toutefois, les classes relatives à végétation restent le plus souvent limitées aux classes « végétation arborée » et « végétation herbacée » (Dell'Acqua *et al.*, 2004 ; Huang et Zhang, 2008, 2009).

- La cartographie des espèces d'arbres (Greiwe et Ehlers, 2005 ; Pu et Liu, 2011 ; Launeau, 2017) : dans le cadre du programme ANR VegDUD, Launeau (2017) a évalué des données hyspex (0,4-2,5µm) à 0.6m de résolution spatiale pour la cartographie de 14 espèces d'arbres sur la ville de Nantes. Les résultats illustrent le grand intérêt de ce

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

type de données, la précision de la classification étant élevée (indice de précision globale : 0,8). Les auteurs soulignent la nécessité de maitriser l'ensemble de la chaine de traitement des corrections géométriques, radiométriques et atmosphériques.

La mesure de variables biophysiques : Plusieurs études ont été menées avec des données hyper-spectrales pour évaluer la densité de la canopée ou de la couverture foliaire (Jensen *et al.*, 2009, 2012). Par exemple, Jensen (2012) a montré l'intérêt des données hyper-spectrales AISA+ pour la cartographie des espèces d'arbres (10 espèces classées avec une précision élevée, l'indice de précision globale > 0,8) et l'évaluation de la couverture foliaire (R^2=0,73). Les auteurs expliquent qu'une partie des erreurs de classification est dues à la nature de la couverture du sol sous la canopée. En effet, les canopées présentant un haut degré d'ouverture entraînent un retour plus significatif du sol et donc un nombre de pixels mixtes plus important.

3 Les données de télédétection THRS 3D

L'étude de la végétation en ville nécessite de bien appréhender l'hétérogénéité du tissu urbain. L'hétérogénéité peut être appréhendée selon deux dimensions : une dimension horizontale qui a été abordée dans les points 2.1 et 2.2 et une dimension verticale. En effet, le milieu urbain est caractérisé aussi par une verticalité importante des infrastructures urbaines (bâtiments, arbres,...) ce qui entraîne variabilité spatiale de sa dimension 3D.

Il existe deux types de données de télédétection 3D : les données acquises en mode passif, et les données actives enregistrées à partir d'une source de rayonnement connu comme un faisceau laser ou un radar en bande X. Nous présenterons ici successivement ces deux types de données.

3.1 En mode passif : les données stéréoscopiques

L'approche par stéréoscopie n'est pas nouvelle dans le domaine de la télédétection. En effet, cette méthode est utilisée depuis les premières photographies aériennes réalisées dans les années 1910. Plus particulièrement orientée pour l'étude du relief dans les premières utilisations, cette approche a connu une très grande diversification d'usage au cours du temps, avec des études portant sur la production de données tel que des modèles numériques de surface, l'élévation du bâti, le suivi de fouille archéologique, etc... Cette méthodologie permet la production de données en

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

pseudo-3D ou 2,5D, c'est-à-dire des données illustrant l'élévation des éléments du paysage dans le plan orthogonale à l'angle de prise de vue (généralement au nadir). Elle ne permet donc pas de modéliser les structures paysagère en « vrai 3D » puisque les parties non observées de l'image ne sont pas reconstruite (occlusion des bâtiments ou des arbres, etc…).

Les récentes avancées technologiques (informatique et imagerie numérique) ont permis d'automatiser le traitement de données stéréoscopiques et facilité, ainsi, l'acquisition de modèles tridimensionnels de très haute qualité (Sabater, 2010). Ces données sont généralement acquises par des capteurs embarqués par des drones, des avions ou des satellites. Le mode d'acquisition choisi entraîne des différences au niveau des données que nous allons aborder ci-après.

3.1.1 Les données acquises par drone

Nex et Remondino, 2014 présentent le drone comme le moyen d'observation intermédiaire entre la mesure effectuée sur le terrain et celle effectuée par l'avion (Figure 2.13).

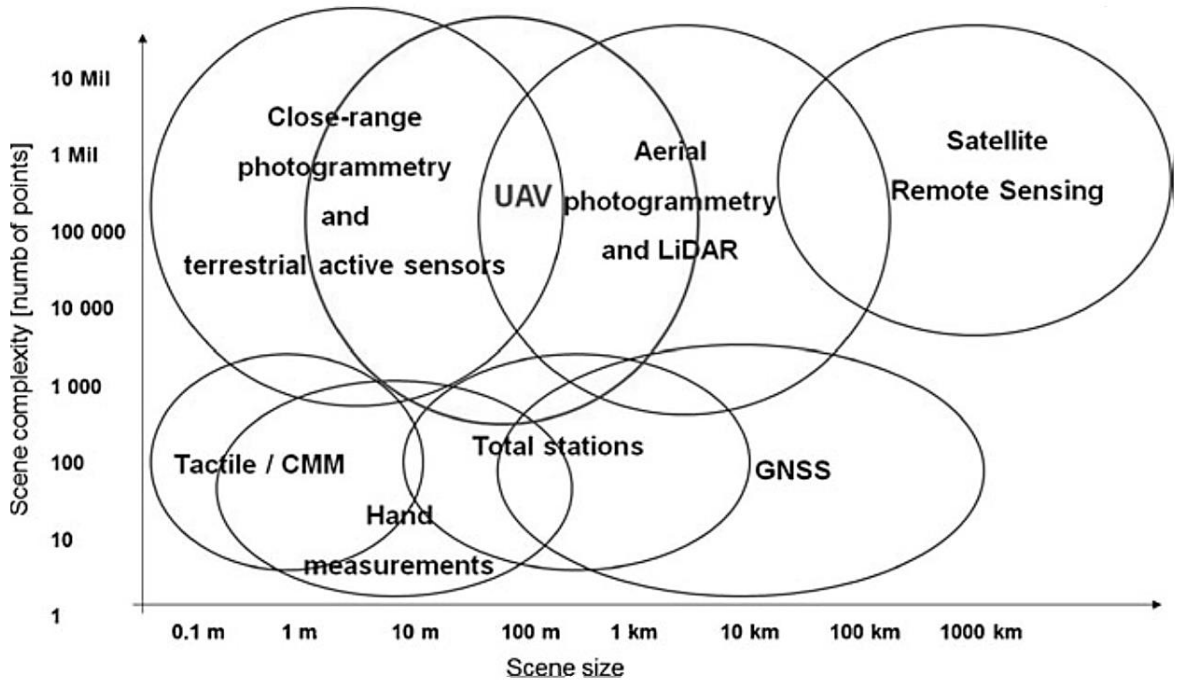


Figure 2.13 : Volume et résolution des images drone (cercle rouge) comparés à ceux des autres données permettant d'effectuer de la reconstruction 3D (Source : Nex., 2014)

Aujourd'hui, les drones offrent une très grande variété, tant sur le plan du vecteur lui-même (aile volante, quadri ou hexacoptère, …) que sur le plan des capteurs embarqués (appareil photographique, caméra thermique, capteur hyperspectral…). Ils

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

offrent, avec la miniaturisation des composants, les mêmes possibilités que l'avion en terme de capteurs (optique, multi-spectrale, thermique, LiDAR), avec une flexibilité de mise en oeuvre plus fine que celui-ci, et à un coût nettement inférieur (Nex et Remondino, 2014). Les données sont généralement acquises par des caméras photogrammétriques ou de plus en plus par des caméras vidéo. De manière générale, le drone ne permet pas encore de couvrir de grands territoires mais permet *a contrario* une très grande finesse de représentation des éléments du paysage. La maniabilité de ce type de vecteur en fait un atout certain pour des acquisitions à très grande échelle en milieu complexe, comme le milieu urbain.

La photogrammétrie par drone n'est pas fondamentalement différente de celle mise en œuvre pour les données aéroportées. La reconstruction des structures 3D est réalisée avec des méthodes «Structure From Motion » (SFM), qui consistent à analyser des séries d'images numériques d'un même objet vu selon différents angles de prise de vues. Le nuage de points 3D est ensuite généré à partir du repérage de points homologues dans les différentes images, en tenant compte de la position du point d'observation et des caractéristiques spectrales et optiques de la caméra au moment de la prise de vue.

En milieu urbain, les mesures de structures 3D sont majoritairement acquises via des LiDAR aéroportés avec des avions, les territoires à couvrir étant relativement étendus. Cependant, cette technologie ne permet pas une fréquence de revisite suffisante pour un suivi régulier (Jarzabek-Rychard et Karpina, 2016). Le drone apparait alors comme un outil pertinent pour faire des mises à jour ponctuelles sur certains secteurs avec une précision de représentation 3D aussi détaillée que le LiDAR. Ainsi, Jarzabek-Rychard et Karpina (2016) montrent dans leur étude qu'il est possible d'obtenir avec des images stéréoscopiques acquises par drone, des mesures ayant une précision de l'ordre de 18cm en xy et 15cm en en z, à comparer avec les 15cm en xy et 5cm en z obtenus avec des données LiDAR ALS (à basse altitude). De la même manière, Gevaert *et al.*, (2016) ont étudié l'apport de la très haute résolution spatiale 2D, 2,5D et 3D en milieu urbain en utilisant des données acquises par un drone DJI Phantom 2 avec une caméra RGB grand angle (FOV=110°). L'évaluation comparée de l'orthophotographie (3cm), du modèle numérique de surface (3cm) et du nuage de points (450pts/m3) a montré que les données 2D et 2,5D (données spectrales, de texture, d'élévation) apportent une information pertinente pour la cartographie de l'occupation du sol (précision globale de 0,81) et la 3D améliore la délimitation des objets de la précédente classification (précision globale de 0,91) et permet d'extraire des objets du mobilier urbain (lampadaires, …). Le drone est un outil extrêmement pertinent pour le milieu urbain en raison de la résolution spatiale centimétrique des

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

données qu'il permet d'acquérir et de sa grande flexibilité. Il permet en effet d'acquérir des données avec différents capteurs et différents angles de prises de vue, ce qui tend vers la « vraie » 3D. Sa limite est très clairement son incapacité à couvrir de grands territoires.

3.1.2 Les données acquises par avion

Les avions sont particulièrement adaptés pour acquérir des données 3D de grande précision sur des territoires étendus. L'avion permet en effet, avec des altitudes de vols allant jusqu'à de 5000m, d'obtenir des images avec des résolutions spatiales de quelques centimètres, sur un rayon d'action de plusieurs centaines de kilomètres en une journée, avec des conditions d'acquisition (GPS, plateformes inertielles,...) et d'observation (caméras) de grande précision. En France, l'Institut Géographique National (IGN) assure des couvertures aériennes stéréoscopiques à chaque acquisition orthophotographique départementale (Figure 2.14 - Extrait de la conférence MNS de l'IGN 21 Juin 2018) avec des précisions planimétriques de l'ordre de 20cm sur l'ensemble d'un département et de 5cm sur les agglomérations.

Une très grande partie des études sur le milieu urbain menées à partir de ce type de données traitent de la fraction bâtie et plus particulièrement des bâtiments et du suivi de ceux-ci. La végétation n'est que peu étudiée, en dépit du fait que quelques études ont attesté de l'intérêt que ce type de données pour cela (Baltsavias et Gruen, 2008).

Cependant, les acquisitions aériennes stéréoscopiques présentent également un certain nombre de limites pour la reconstruction en 3D, malgré des taux de recouvrements importants (jusqu'à 80%). Ces données montrent en effet les mêmes inconvénients que les données optiques 2D, avec la présence de zones d'ombres ou de zones d'occultation qui limitent leur exploitation. Il en va de même pour les distorsions géométriques ou radiométriques des images qui influencent significativement l'exploitation des données, et plus particulièrement encore dans un contexte de détection de changements (Stal *et al.*, 2013 ; Kothencz *et al.*, 2018).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

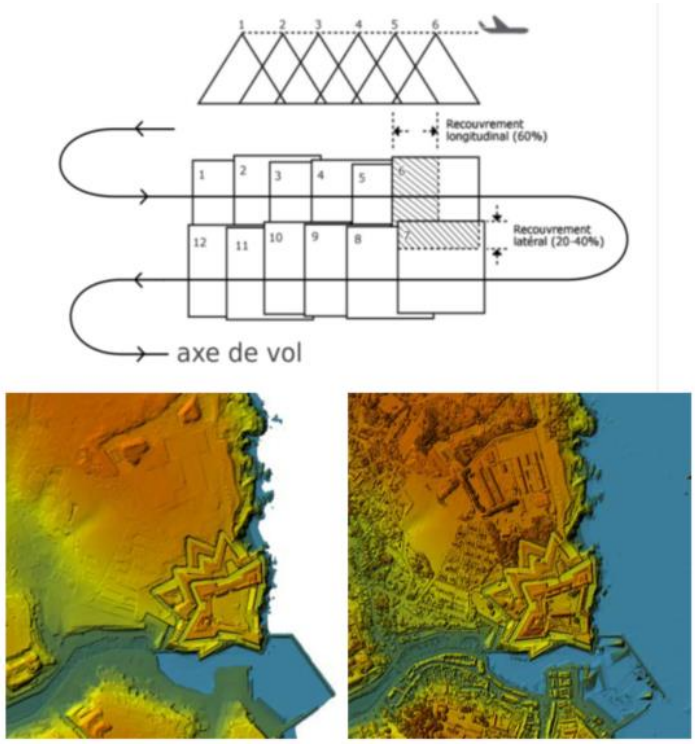


Figure 2.14 : Plan de vol d'une mission stéréoscopique de l'IGN ©) (a) et extraits du MNT (b) et du MNS (c) qui en sont dérivés

3.1.3 Les données satellites

Aujourd'hui une grande diversité de capteurs spatiaux permettent de réaliser des couvertures stéréoscopiques ou tri-stéréoscopiques lors d'un même passage (Figure 2.15 ; Table 2.2) Certains d'entre eux comme Pléiades sont en capacité de réaliser des couvertures avec de multiples angles d'acquisition en enregistrant des images en mode « Along track » et « Across track » en dépointant l'angle d'acquisition sur la fauchée voisine.

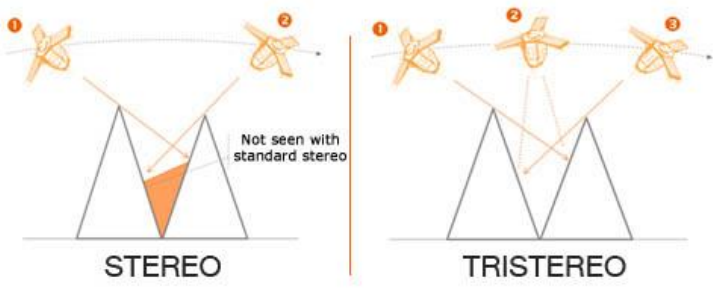


Figure 2.15 : Illustration d'une acquisition « Along track » en mode stéréoscopique (a gauche) et tristéréoscopique (à droite) (Source : CNES)

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 2.2 : Liste des capteurs THRS présentant un mode stéréo ou tri-stéréoscopique(Source : Panagiotakis et al., 2018)

Satellite	Spatial Resolution (Panchromatic)	Stereo	Tristereo	Temporal Resolution
Ikonos	0.82 m	y	n	3 to 5 days off nadir
Quickbird	0.61 m	y	n	1 to 3.5 days off-nadir
Pleiades 1A/B	0.7 m	y	y	4 days off-nadir
Worldview-1	0.46 m	y	n	5.9 days off nadir
Worldview-2	0.46 m	y	n	3.7 off nadir
OrbView-3	1 m	y	n	3 off nadir
GeoEye-1	0.46 m	y	n	2.8 off nadir
SPOT-5	2.5 m	y	n	2–3 days off nadir
SPOT-6 & SPOT-7	1.5 m	y	n	1 day off nadir
Resurs-DK1	0.8 m	y	n	6 days off nadir
ZY-3A	2.1 m Nadir/3.5 m Forward–Backward	y	y	5 days off nadir
IRS Cartosat-1	2.5 m	y	n	5 days off nadir
IRS Cartosat-2	1 m	y	n	4 days off-nadir
IRS Cartosat-2 B	1 m	y	n	4 days off-nadir

Les données satellitaires stéréoscopiques ont beaucoup été exploitées pour caractériser le milieu urbain (Poli *et al.*, 2015 ; Perko *et al.*, 2015 ; Kothencz *et al.*, 2018; Panagiotakis *et al.*, 2018). Paradoxalement, il faut noter que la végétation urbaine n'a été que très peu étudiée à partir de ce type de données, la caractérisation du bâti étant l'objet d'étude principal.

Nous pouvons noter tout de même que les données 3D issues de la photogrammétrie satellitaire ont été exploitées pour améliorer la délimitation des objets verts ou la précision de la classification. Ainsi, les travaux de Lefebvre *et al.*, 2016 illustrent un apport significatif du MNS dérivé des données Pléiades pour la caractérisation de la végétation haute avec des indices de Kappa>0,9 et plus particulièrement pour les arbres isolés et les alignements d'arbre. De même, Kothencz *et al.*, (2018) illustre l'apport de la tri-stéréoscopie pour la cartographie 2D de la végétation avec des différences de moins de 5% par rapport à la cartographie de terrain et un apport plus limité pour l'analyse des strates de végétation avec des précisions globales de 58% en moyenne pour les strates étudiées.

3.2 En mode actif : les données LiDAR

L'exploitation des données LiDAR (Light Detection and Ranging) a réellement débuté à la fin des années 90 avec les premières applications bathymétriques et topographiques. Le LIDAR est un capteur de télédétection active qui permet de mesurer une distance par rapport à un objet par émission d'ondes lumineuses au moyen d'un faisceau laser dans les domaines du visible et/ou de l'infrarouge (Figure 2.16).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

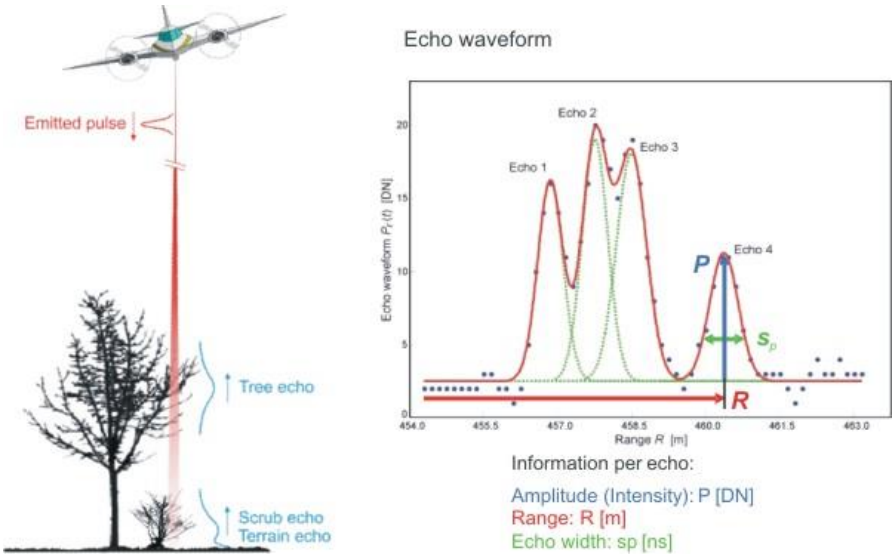
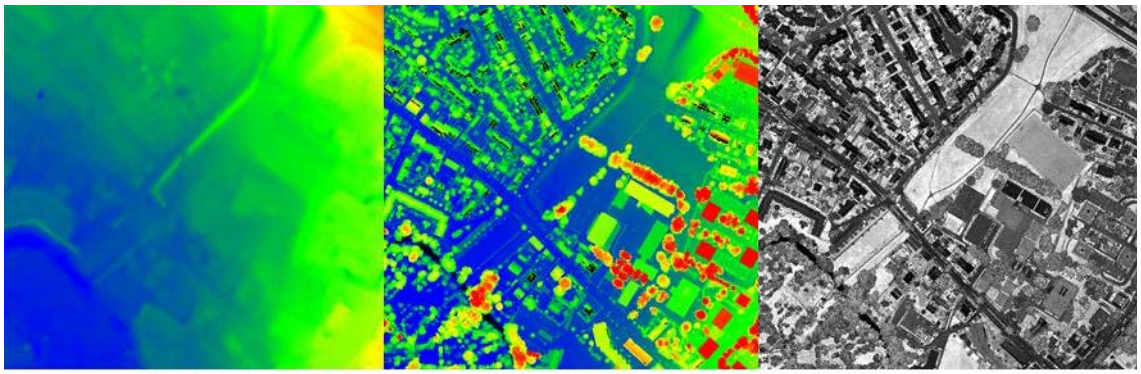


Figure 2.16 : Principes de fonctionnement du LiDAR (Source : OPALS - Université technique de Vienne)

Il existe deux grands types de lidars topographiques, indépendamment de leur longueur d'ondes d'émission. Il s'agit des LiDAR Multi-échos, qui traitent uniquement les pics de rétrodiffusion les plus significatifs en enregistrant leur coordonnées (x,y,z), et les LiDAR à retour d'onde complet, qui enregistrent l'ensemble du retour d'onde sur la trajectoire du tir. Les informations issues de ces types de capteurs sont essentiellement des nuages de points plus ou moins dense en fonction des paramètres d'acquisition du LiDAR (champs instantanée de vison (FOV), fréquence de balayage (PRF), angle de scan, …) et des paramètres de vol de l'avion (altitude, vitesse...).



(a) MNT (b) MNS (a) Intensité

Figure 2.17 Illustration du MNT (a), du MNS (b) et de l'Intensité dérivés du LiDAR

Les données LIDAR ont beaucoup apporté pour l'analyse du milieu urbain grâce à leur précision altimétrique et leur acquisition en mode actif qui permet, contrairement à la stéréoscopie aéroportée, d'acquérir des données exploitables même dans l'ombre des bâtiments (Figure 2.17). Cependant, Baltsavias et Gruen (2003) présentent certains inconvénients liés à l'utilisation des LiDAR aéroportés, notamment des erreurs dues

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

aux doubles rebonds sur les structures verticales, un temps de vol plus long et un plan de vol complexe à élaborer.

Les domaines d'application des données LiDAR en milieu urbain sont nombreux. Actuellement, le domaine le plus étudié est certainement la caractérisation de la structure du bâti et de la morphologie des bâtiments dans une perspective de modélisation 3D de la structure de la ville (Deng *et al.*, n.d. ; Gross, 2005 ; Haala et Kada, 2010 ; Wang R, 2013). Ceci s'explique par le fait que les enjeux de connaissance du bâti et de sa configuration sont majeurs notamment pour la planification des aménagements urbains et la gestion durable du territoire.

Les données LIDAR sont également utilisées pour étudier la répartition de la population au sein de la ville. Lu *et al.*, (2011) ont ainsi développé une approche basée sur le volume du bâti, pour évaluer la population potentielle résidant dans certains quartiers à l'habitat hétérogène de Denver (Colorado, USA). Les modélisations montrent une forte relation entre structure spatiale et densité de population (R^2>0.8). Chun et Guldmann (2014), exploitent la capacité du LiDAR à représenter l'hétérogénéité du milieu urbain pour la modélisation statistique de l'îlot de chaleur urbain. Ils extraient ainsi des informations sur la hauteur des bâtiments, l'ouverture du ciel (Sky View Factor, SVF), la radiation solaire à partir du model 3D de la ville. Les modèles montrent des relations complexes entre la température de surface mesurée et les variables paysagères, mais note un apport significatif des variables dérivées du LiDAR.

Les données LiDAR permettent également d'étudier les réseaux aériens (Lu et Kieloch, 2008), ou le potentiel photovoltaïque, bien que dans ce cas, de nombreuses limites soient à prendre en compte telle que le bruit lié à la détection des fenêtres de toits, les antennes et autres éléments présents sur le toit (Voegtle *et al.*, 2005). Dans leurs travaux, Huang Y. *et al.*, (2013) ont étudié le volume de la végétation à l'aide de données LiDAR pour étudier différentes espèces d'arbres dans un quartier de Shangaï. Leurs résultats illustrent un intérêt majeur pour le LiDAR pour le calcul du volume de végétation arborée avec un indice globale de précision de 95,7%. De la même manière, Han *et al.*, (2014) ont proposé une méthode basée sur l'intensité issue du LIDAR pour améliorer la classification des classes végétation haute et basse (indice de Kappa> 0,94). Zhou et Troy (2008) ont proposé une approche de classification par fusion de données LiDAR / optiques, le LiDAR permettant de segmenter les objets et de discriminer plus finement la végétation haute et basse. Cette approche par fusion de données Optiques ou hyper-spectrales Vs LiDAR est relativement courante, les données optiques permettant d'extraire la végétation par classification ou seuillage d'indices de

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

végétation et le LiDAR permettant d'améliorer l'extraction des objets et de travailler sur la verticalité des objets.

Malgré ces investigations, Caynes *et al*, (2016) insistent sur la faiblesse des travaux menés à des échelles fines sur des territoires urbains étendus. Ils soulignent que malgré la disponibilité croissante de données et l'importance que revêt la composante verticale de la végétation pour la perception, le bien-être, la biodiversité, etc… peu de travaux sont menés sur la structure de la végétation en milieu urbain, à l'instar du milieu rural. Nous pouvons tout de même citer les travaux de Huang Y. *et al.*, (2013) qui abordent le calcul du volume de la végétation à partir de données LIDAR ou de Goodwin *et al.*, (2009) qui traitent de l'exploitation croisée de données optiques et LiDAR pour dériver des indices sur les houppiers et la canopée boisée à des échelles fines (échelles de la rue). Bien que ces quelques études aient permis d'obtenir des mesures simples de la structure verticale de la végétation urbaine, comme la taille des cimes et la hauteur de la canopée, elles n'ont pas étudiées la structure verticale de la végétation (configuration des strates, étagement de la végétation, etc….) ou simultanément la structure spatiale et verticale de celle-ci (densité de branches, structure interne de la canopée, etc…). Ceci représente une limite importante de l'exploitation qui a été faite jusqu'à présent de ce type de données, alors que l'obtention de variables sur les structures spatiales et verticales de la végétation à des résolutions fines sont les principaux enjeux actuels pour l'évaluation de la fonctionnalité des espaces verts urbains (Caynes *et al.*, 2016).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 3 : Site d'étude et données

1 Contexte des recherches en télédétection urbaine à Rennes.....56

2 Les sites d'étude 58

2.1 Le site atelier urbain.....58

2.1.1 Une structure urbaine basée sur le modèle de la ville archipel 58

2.1.2 Une morphologie urbaine diversifiée 60

2.2 Rennes : La place du végétal dans la ville.....63

2.2.1 Rennes : une ville précurseur 63

2.2.2 Quelle connaissance sur les éléments de trame verte en ville à Rennes ?.....65

2.2.3 La répartition du végétal à Rennes.....66

2.3 A l'échelle locale du site des prairies St Martin 69

3 Les données.....73

3.1 Les données à très haute résolution spatiale 75

3.1.1 Les données multi-spectrales et super-spectrales.....75

3.1.2 Les données Pléiades stéréoscopiques.....76

3.2 Les données aéroportées 78

3.2.1 Les photographies aériennes. 78

3.2.2 Les données hyper-spectrales 80

3.2.3 Les données LIDAR.....83

3.3 Les mesures au sol 85

3.3.1 Les mesures spectroradiométriques 85

3.3.2 Les mesures de structure de la végétation 87

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Après avoir présenté le contexte des recherches menées par télédétection sur le milieu urbain à Rennes, nous exposerons successivement les sites d'étude et les données utilisées dans le cadre de cette thèse pour cartographier la végétation urbaine.

1 Contexte des recherches en télédétection urbaine à Rennes

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de plusieurs travaux de recherche menés par télédétection spatiale en milieu urbain sur la métropole rennaise (Guégan-Roué, 1994 ; Aguejdad, 2011 ; Aguejdad *et al.*, 2017 ; Clergeau *et al.*, 2001). Les premiers, menés en collaboration avec l'agence d'urbanisme de Rennes (AUDIAR), ont permis, à partir d'images optiques à haute résolution spatiale, de cartographier la végétation en ville et d'étudier la consommation foncière entre 1985 et 2005 en déterminant le type d'occupation du sol au détriment duquel l'extension urbaine s'est effectuée (Aguejdad et Hubert-Moy, 2016). Les gestionnaires du territoire ont largement communiqué sur ces travaux qui illustrent l'intérêt des données de télédétection pour l'étude du milieu urbain.

Dans la continuité de ces premiers résultats, les travaux dans le domaine de la télédétection spatiale appliquée au milieu urbain se sont poursuivis sur la métropole de Rennes afin d'étudier le lien entre l'artificialisation des sols et la dynamique des communautés animales et végétales le long d'un transect ville/campagne. Ces travaux, menés dans le cadre du programme ECORURB (ECOlogie du Rural vers l'URBain, 2003 - 2012) piloté par l'INRA, le CNRS et les universités de Rennes 1 et 2, ont conduit à la structuration d'une équipe pluridisciplinaire regroupant géographes, écologues, climatologues, parasitologues…. La dynamique initiée dans le cadre du programme ECORURB a permis d'illustrer le lien entre trajectoires de l'occupation du sol (Aguejdad, 2011) et la présence de certaines espèces faunistiques relictuelles (Croci, 2007). La profondeur temporelle (25 ans) ainsi que la finesse spatiale (10m à 30m) des données de télédétection utilisées ont permis de bien caractériser les grandes transitions de l'occupation et de l'usage du sol le long du gradient. Des bases de données ont alors été constituées à partir des mesures effectuées *in situ* (relevés climatiques, biologiques pédologiques), et de cartographies d'occupation et d'utilisation des sols réalisées avec des séries temporelles d'images de télédétection dans le cadre de ce programme.

Le programme ANR « Villes Durables », et plus précisément le projet « Evaluation des trames vertes urbaines et élaboration de référentiels : une infrastructure entre esthétique et écologie pour une nouvelle urbanité » qui a succédé

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

aux travaux menés dans le cadre d'ECORURB sur le site rennais, a permis d'évaluer l'intérêt des trames vertes pour la production de nouvelles formes urbaines plus « durables » d'une part, et élaborer des référentiels utilisables par les opérateurs et les collectivités, d'autre part (http ://www.trameverteurbaine.com/). Ce programme a réellement mis en évidence les « éléments verts » dans la ville et leurs usages multiples.

A l'issue de ces différents travaux de recherche menés en étroite collaboration avec les acteurs institutionnels, le site de la métropole rennaise a intégré en 2011 la Zone Atelier Armorique (ZAAr) qui fait partie du réseau des Zones Ateliers (ZA) de l'INstitut Ecologie et Environnement (INEE) du CNRS, relai français des réseaux ILTER (International Long Term Ecological Research) et LTER-Europe. Les Zones Ateliers ont vocation à structurer des réseaux inter-organismes de recherches interdisciplinaires sur l'environnement et les socio-écosystèmes en lien avec les enjeux sociétaux (INEE-CNRS) (Figure 3.1).

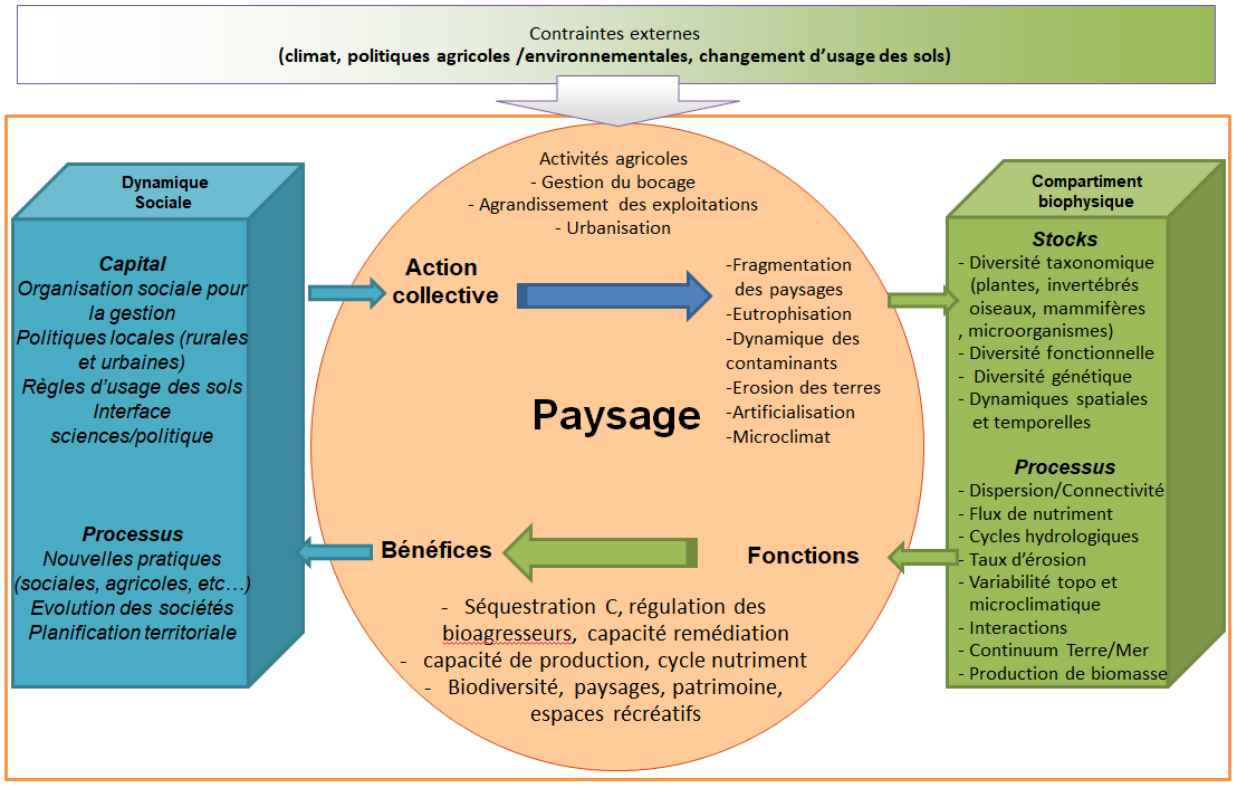


Figure 3.1: Cadre conceptuel de la Zone Atelier Armorique en 2017

Dans le cas de la ZA Armorique, qui comprend un gradient de 50km Ville-campagne, allant du site atelier urbain de Rennes, au site atelier rural de Pleine-Fougères (Figure 3.2), la question du paysage et de la représentation de celui-ci est au cœur des réflexions.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Il s'agit de placer le paysage aussi bien comme déterminant des activités humaines que comme résultant de celles-ci. Les recherches portant sur le site atelier urbain de la ZAAr par télédétection sont menées à deux échelles : celle de l'agglomération de Rennes, qui comprend le territoire de Rennes et ses villes périphériques ; celle de l'observatoire local qui peut correspondre à un espace vert, un quartier, ou un îlot.

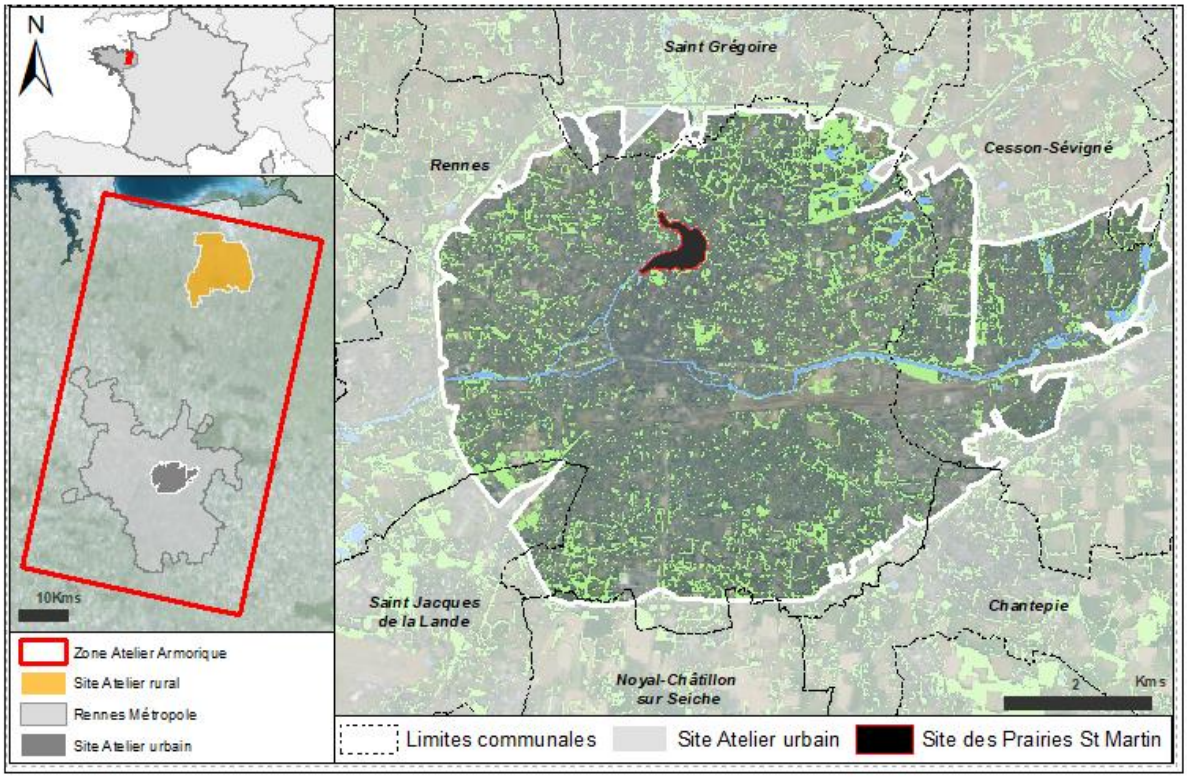


Figure 3.2 : Carte de localisation du site d'étude

2 Les sites d'étude

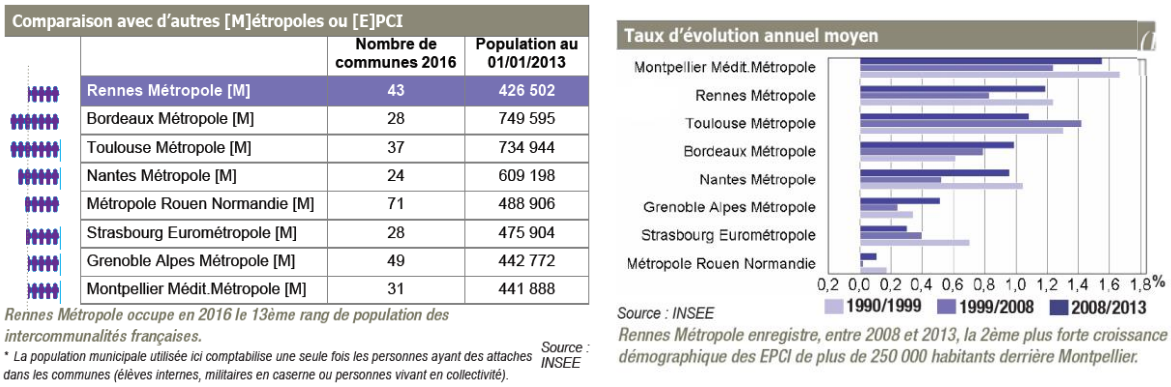
2.1 Le site atelier urbain

2.1.1 Une structure urbaine basée sur le modèle de la ville archipel

A l'échelle nationale, la métropole Rennaise, située à l'Est de la Région Bretagne et au centre du département de l'Ille et Vilaine, est une agglomération de taille moyenne (Figure 3.3). Elle couvre un territoire de 705 Km², dont 50 sont occupés par

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

la ville de Rennes. Elle comptait environ 451000 habitants en 2015, 221000 habitants résidant alors dans la ville de Rennes (INSEE, 2015).



Comparaison avec d'autres [M]étropoles ou [E]PCI

	Nombre de communes 2016	Population au 01/01/2013
Rennes Métropole [M]	43	426 502
Bordeaux Métropole [M]	28	749 595
Toulouse Métropole [M]	37	734 944
Nantes Métropole [M]	24	609 198
Métropole Rouen Normandie [M]	71	488 906
Strasbourg Eurométropole [M]	28	475 904
Grenoble Alpes Métropole [M]	49	442 772
Montpellier Médit.Métropole [M]	31	441 888

Rennes Métropole occupe en 2016 le 13ème rang de population des intercommunalités françaises.

** La population municipale utilisée ici comptabilise une seule fois les personnes ayant des attaches dans les communes (élèves internes, militaires en caserne ou personnes vivant en collectivité).* *Source : INSEE*

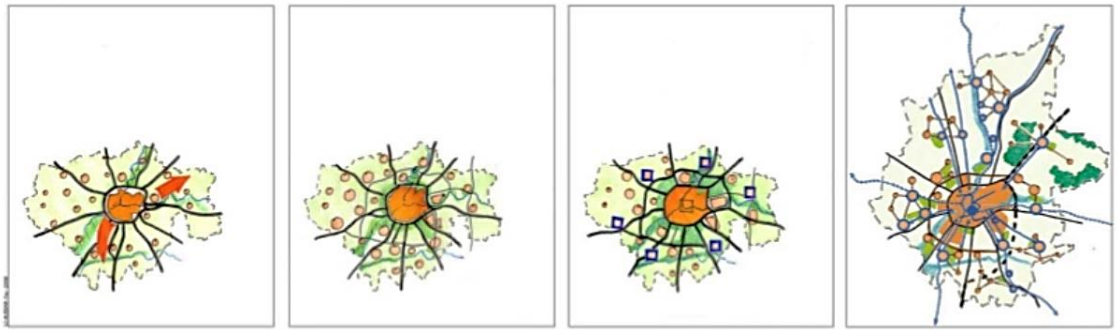
Source : INSEE

Rennes Métropole enregistre, entre 2008 et 2013, la 2ème plus forte croissance démographique des EPCI de plus de 250 000 habitants derrière Montpellier.

Figure 3.3 : Rennes métropole dans le contexte national des métropoles (AUDIAR, 2015)

Rennes métropole, qui occupait en 2013 la 13e place des intercommunalités les plus peuplées de France (Figure 3.3a) derrière Strasbourg et Nantes, a enregistré entre 2008 et 2013 la deuxième plus forte croissance démographique des EPCI avec plus de 250000 habitants et près de 1,2% de croissance (Figure 3.3b). Cette croissance démographique explique en grande partie le dynamisme de ce territoire.

Ce dynamisme démographique c'est accompagné très tôt d'un modèle de consommation foncière réellement singulier à l'échelle nationale, avec une extension urbaine basée sur le modèle de la ville archipel. Cette structuration de l'artificialisation de manière contigüe aux villes de petites tailles existant en périphérie de Rennes a été initiée dès les années soixante-dix avec les premières réflexions menées sur une structure intercommunale (Figure 3.4). Cette stratégie de croissance urbaine avait vocation à limiter la consommation foncière en limitant la diffusion de l'habitat et le développement du mitage. Elle présentait également l'intérêt de préserver les espaces interstitiels et leur usage (ceinture verte, agriculture périurbaine, etc…).



SDAU 1974 - Une urbanisation continue le long d'axes lourds de transport en commun, type ville-nouvelle

SD 1983 - Le "SD vert des villettes": un développement équilibré sur l'ensemble des communes dans la ceinture verte

SD 1994 - L'alternance et l'équilibre entre la ville et la campagne, une structuration autour de pôles d'appui

SCoT 2007 - Un changement d'échelle et d'outils : la ville-archipel en réseau

Figure 3.4 : Modèle de développement de la tache urbaine de la métropole rennaise (AUDIAR, 2015)

Le Schéma Directeur de Cohérence Territoriale (SCOT) adopté en 2015 (Pays de Rennes, 2015) présente le cadrage et les orientations données à la structuration de l'armature urbaine de la métropole rennaise. Il renforce et structure cette architecture urbaine sur la base de la ville archipel en proposant une structuration du paysage urbain en 4 grands pôles :

- « le cœur de métropole » : comprenant Rennes et quatre communes limitrophes, il constitue le pôle économique, de services et commercial de la métropole ;

- « les Pôles structurants de bassins de vie » : il s'agit des pôles secondaires qui animent les bassins de vie avec des équipements et services en réponse aux besoins du quotidien. Ils n'incluent pas toutes les villes secondaires, mais le projet de territoire souhaite développer leur attractivité afin de parvenir à constituer, sur l'ensemble du territoire, une armature urbaine confortant la ville archipel ;

- « Les Pôles d'appui au Cœur de métropole » : ils assurent les mêmes fonctions que les communes du Cœur de métropole et;

- Les Pôles de proximité : ils complètent le maillage urbain.

La métropole de Rennes affirme ainsi une volonté forte de maitrise de la consommation foncière, ce qui amène à une densification du tissu urbain pour accueillir unf lux démographique croissant.

2.1.2 Une morphologie urbaine diversifiée

La structuration urbaine de la métropole rennaise, basée sur le modèle de la ville archipel, a induit une morphologie urbaine particulière. Un « cœur de métropole » construit autour d'un centre historique cloisonné dans sa rocade, entouré par des petites villes périphériques à dominante pavillonnaire dense (Figure 3.5).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

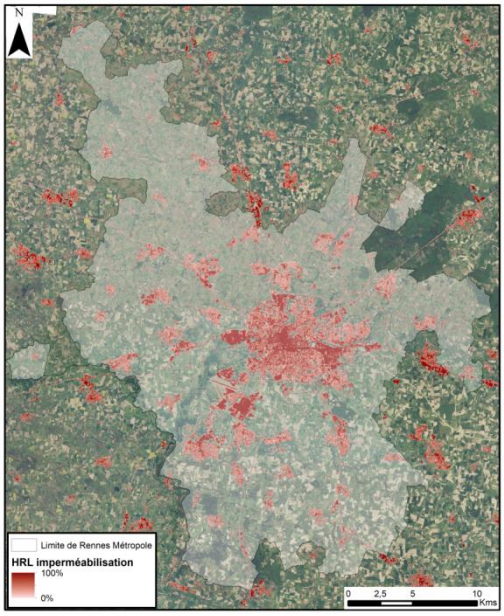


Figure 3.5 : Indice d'artificialisation de Rennes Métropole (HR imperviousness, EEA)

La morphologie de Rennes Métropole est essentiellement issue des courants urbanistiques d'après-guerre. Cette période, marquée par un urbanisme en rupture avec des conceptions antérieures, est marquée par une spécialisation des fonctions en ville : habiter, travailler, circuler, se distraire (AUDIAR, 2015). La ville est conçue pour être fonctionnelle. De ce fait, centrée sur la circulation automobile elle possède un maillage routier dense et hiérarchisé. Cette phase de construction majeure s'est poursuivie dans les années soixante et soixante-dix avec la construction massive de barres et de tours en réponse à la crise du logement. Entre 1960 et 1980, 5 Zones à Urbaniser en Priorité (ZUP) sont sorties de terre (Villejean, Le Blosne, Maurepas, Cleunay et Bréquigny), ainsi que les grands secteurs hospitaliers et universitaires (AUDIAR, 2015). Le modèle de construction est systématiquement le même. Il s'agit de la réalisation de grands ensembles urbanistiques (tant dans leur volumétrie, que leur usage) en rupture forte avec les quartiers anciens périphériques. Cette verticalité dans les constructions permet d'ouvrir le paysage urbain et de faire une place au végétal et au stationnement dans cette société du tout automobile. Pendant cette période, les communes périphériques se sont développées selon un autre modèle de développement urbanistique. Le développement pavillonnaire a alors connu un réel succès et promu l'image de la maison individuelle. Des initiatives ont été prises par certaines communes pour mettre en œuvre de nouveaux modèles d'implantation issus des pays anglo-saxons inspirés du modèle de la « cité jardin ». Les lotissements ont alors été conçus pour faciliter les circulations douces. Ils sont composés d'alignements de maisons isolées ou mitoyennes qui favorisent le lien social. L'espace public était alors plus ponctuel et moins central.

Dans ce modèle de développement urbain, les zones commerciales et industrielles sont l'emblème des changements des années soixante. L'aménagement des zones commerciales et industrielles a été réalisé de manière très similaire sur l'ensemble de la métropole rennaise : une grande surface, sa galerie marchande, son parking, divers commerces. Cette architecture particulière marque le paysage urbain des entrées de Rennes, ces zones étant implantées à proximité de la rocade, permettant ainsi un accès rapide en voiture.

Les années quatre-vingt-dix et deux mille sont marquées par un urbanisme plus nuancé, renouant avec la mixité de l'architecture et des fonctions. Les Zones d'Aménagement Concertées « *confèrent une cohérence globale en termes de trames de voierie, de liaisons piétonnes et d'implantation du bâti* » (AUDIAR, 2015) et introduisent les perspectives d'extension dans une logique de gestion durable des territoires. Ces opérations sont réalisées en respectant davantage les structures paysagères en place et réaffirment l'espace public au travers de la mise en place d'espaces verts et de parcs urbains. Parallèlement, « *l'exigence de densification impose de repenser les formes urbaines* » (AUDIAR, 2015) en développant un nouveau modèle de construction basé sur de petits collectifs, forme intermédiaire entre le grand ensemble et la maison individuelle.

Aujourd'hui, les orientations de la métropole rennaise en matière d'urbanisme posent bon nombre de questions sur la façon de mettre en œuvre un renouvellement urbain qui puisse répondre aux enjeux de la ville de demain. Dans les documents de cadrage du PLUI de Rennes Métropole, quatre défis majeurs sont retenus concernant le renouvellement urbain :

- S'inscrire dans la transition énergétique, ce qui impose de repenser la manière de construire (matériaux, exposition, mode de construction) mais sans rentrer dans l'uniformisation ;
- Densifier la ville de manière intelligente, en restructurant les grands ensembles, en densifiant les ZI et en retravaillant sur le pavillonnaire ;
- Repenser l'espace public pour et par les citoyens ;
- Développer une image de la ville appréciée de tous.

Au cours de sa construction, la métropole rennaise a donné un poids de plus en plus important aux citoyens et à la nature. Ce choix politique est lié à une prise de conscience de nos sociétés, en lien notamment avec le changement climatique, de la nécessité de changer durablement les pratiques du territoire. La nature est perçue aujourd'hui comme un enjeu majeur pour la durabilité de la ville, pour tous les services et fonctions qu'elle rend à la société. Ainsi, le choix d'un modèle d'urbanisme prend

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

désormais en considération la réduction de l'empreinte de l'Homme sur la nature en favorisant des constructions plus respectueuses de l'environnement.

2.2 Rennes : La place du végétal dans la ville

Cette partie est issue de la valorisation des travaux que j'ai réalisés pour l'Agence d'Urbanisme de Rennes (AUDIAR) (Bouriau, E., Nabucet, J., Hubert-Moy, L., 2014).

2.2.1 Rennes : une ville précurseur

Le modèle de la ville archipel offre à Rennes une situation toute particulière. Le centre-ville historique se situant à moins de 3 ou 4 kilomètres de la campagne, directement de l'autre côté de la rocade qui entoure la ville (Figure 3.4). Quatre excroissances prolongent aujourd'hui la ville au-delà de la rocade : les villes de Chantepie, Saint-Grégoire et Saint-Jacques-de-la-Lande, ainsi que la ZA de la route de Lorient (Rennes et Vezin-le-Coquet). Cette entité urbaine continue, dénommée « cœur de métropole », est en contact direct avec les terres agricoles. Ce paysage est le résultat d'une volonté des élus qui a permis de préserver une ceinture verte autour de la ville centre et des communes périphériques. En plus de la proximité immédiate de « nature » vis-à-vis du cœur de métropole, de nombreux secteurs au sein de la ville sont constitués d'éléments semi-naturels : rivières de la Vilaine et de l'Ille, les parcs, les jardins…. Ces dernier offrent ainsi aux habitants des espaces de respiration, qu'ils soient publics ou privés. Ces espaces sont essentiels à la qualité de vie à l'intérieur de la ville, quelle que soit leur taille ou leur vocation.

Cette préoccupation autour du végétal en ville n'est pas récente pour Rennes qui est une ville précurseur en matière de biodiversité. En 1981, elle a été pionnière dans la mise en œuvre d'une gestion différenciée de ses espaces verts, du plus horticole au plus naturel, en laissant une place grandissante à la biodiversité spontanée dans certains de ces espaces. De la même manière, la ville a été pionnière sur l'arrêt de l'usage des produits phytosanitaires, expérimenté sur un quartier dès 2001, et étendu à l'ensemble des espaces publics depuis 2005. La Direction des Jardins et de la Biodiversité, cherche à améliorer la biodiversité de certains espaces verts depuis les années 1990, et continue de mener des opérations tests, accompagnées de suivis naturalistes, sur certains d'entre eux.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Si la question de la place du végétal et de ses fonctionnalités n'est pas nouvelle à Rennes, les communes périphériques ne sont pas en reste. On peut citer la valorisation de la Vilaine à Cesson-Sévigné ou la mise en place du Parc de la Morinais à Saint-Jacques-de-la-Lande qui a reçu le premier prix national des zones humides en zone urbanisée (cette action s'inscrit à la fois dans le « Plan national d'actions en faveur des zones humides », lancé en février 2010 par le Ministère de MEDDTL (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable des Transports et du Logement) et dans le plan « Restaurer et valoriser la Nature en ville » issu du Grenelle de l'environnement et lancé en novembre 2010).

Bien avant le lancement du Grenelle de l'environnement, la ville de Rennes avait intégré des milieux naturels dans les documents d'urbanisme locaux en appliquant les concepts de l'écologie du paysage (le premier inventaire des MNIE date des années 1990 et a été mis en place à l'occasion des études menées pour le Schéma Directeur de 1994). La trame verte et bleue territoriale, construite notamment à partir des grandes vallées, a vu le jour à cette période. Des analyses écologiques plus fines ont été effectuées dès les années 2000 sur l'agglomération rennaise dans le cadre de l'élaboration des plans locaux d'urbanisme (PLU). C'est à partir de 2003, dans le contexte des réflexions menées sur le SCoT du Pays de Rennes, que le concept de trame verte et bleue a vraiment pris corps. Cependant, cette approche concernait principalement les territoires non urbanisés et la question de l'élaboration de ces trames en milieu urbain, bien qu'esquissée et encouragée, n'en était qu'à ses balbutiements. Le PLU de la ville de Rennes de 2004 décrivait sommairement les grands principes de « ceinture verte » et de « corridors écologiques ». Le projet d'aménagement et de développement durable (PADD) présentait quant à lui, une carte intitulée « la nature en ville » ajoutant aux grands éléments semi-naturels les parcs urbains, les grands corridors verts, les connexions existantes ou en projet, les arbres d'alignement…. Le PADD affichait l'objectif d'«*assurer une continuité verte, depuis les grands espaces verts et naturels jusqu'aux places ou rues de quartier*». En 2000, Rennes s'était également dotée d'un Plan Bleu afin d'assurer la reconquête des bords de la Vilaine et de l'Ille (« végétalisation des berges, mise en œuvre de continuités et de cheminements doux » créant des connexions inter et intra quartiers).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

2.2.2 Quelle connaissance sur les éléments de trame verte en ville à Rennes ?

Bien que de nombreuses actions aient été menées localement sur la biodiversité avec la mise en œuvre d'espaces verts publics et de parcs urbains, la place de la végétation en ville ne se réduit pas à ces espaces verts aménagés. En effet, la question d'une fonctionnalité plus globale de l'écosystème ville reste à explorer. Si la connaissance est globalement bonne en ce qui concerne les écosystèmes localisés dans les espaces publics (Figure 3.6), très peu de données sont disponibles concernant l'espace privé qui représente près de 80% du territoire de la commune de Rennes. On a donc encore aujourd'hui une vision fragmentée de la place réellement occupée par le végétal dans la ville. Or cette information est nécessaire pour construire de nouvelles continuités territoriales urbaines et les intégrer dans le projet urbain à différentes échelles (logement, îlot, quartier, ville, agglomération et territoire), afin de construire une véritable trame verte et bleue urbaine.

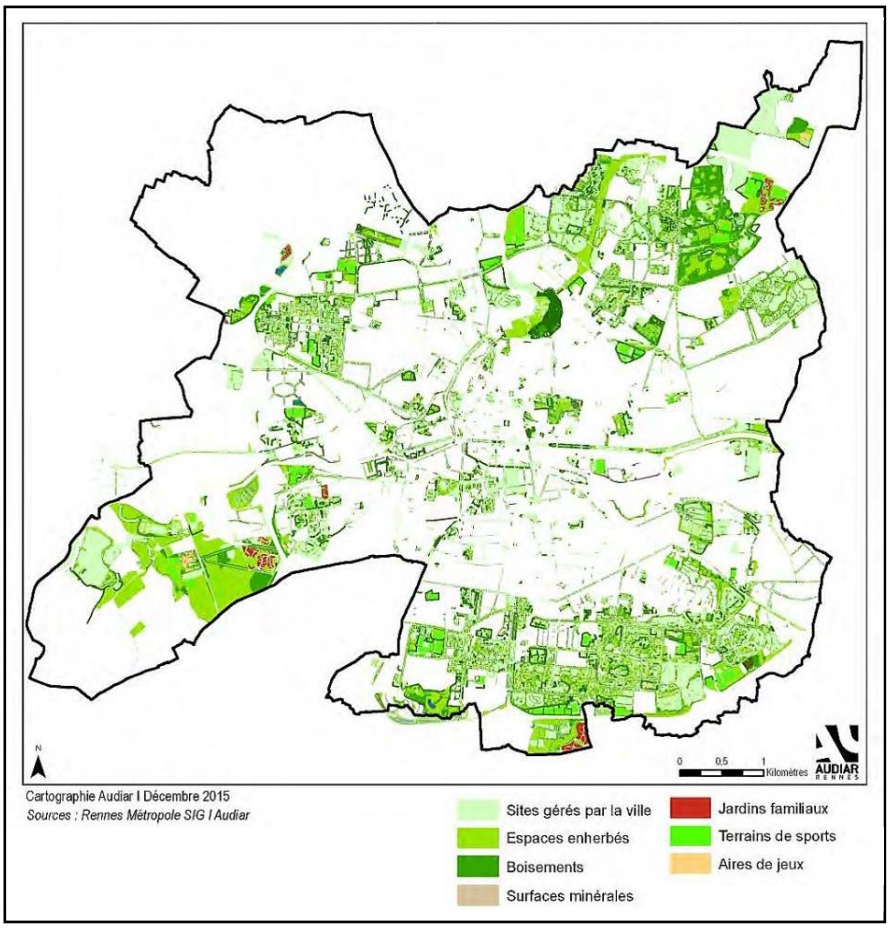


Figure 3.6 : Espaces verts entretenus par la ville de Rennes en 2015

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Si le concept de trame verte et bleue peut se décliner en milieu urbain, il relève cependant d'une réalité différente de celui qui s'applique aux espaces agro-naturels qui bordent la ville. En effet, la ville constitue un écosystème à part entière où la présence et l'intervention humaine sont très fortes. Une place importante du minéral, lié au bâti et aux infrastructures, entraine la discontinuité et la fragmentation des éléments naturels. Ces derniers sont alors de plus petites tailles et présentent une diversité végétale qu'on ne retrouve pas dans la nature…. Cette originalité en fait un milieu très riche pour certaines espèces puisqu'il concentre des situations très variées. A titre d'exemple, la ville de Rennes est la deuxième commune du département en matière de richesse floristique. Mais cette diversité n'est pas nécessairement l'illustration d'un bon fonctionnement écologique et peut même conduire à des problèmes pour les gestionnaires de la ville, certaines espèces devenant très invasives en l'absence d'équilibre (cas de la renouée du japon, ou de l'herbe de la pampa par exemple).

En plus de ce volet biodiversité, une trame verte et bleue urbaine doit intégrer de nombreuses autres fonctions et usages (utilitaires, récréatifs, santé, lien social, paysage…). De ce fait, elle peut revêtir des aspects très divers : liaisons douces, parcs, jardins familiaux ou partagés, bassins tampons, végétation d'agrément…

Tous les espaces n'ont pas vocation à être renaturés, l'objectif étant de réaliser un maillage cohérent et fonctionnel, en lien avec l'ensemble des autres fonctions de la ville. Le tissu urbain est par nature évolutif. De ce fait, l'objectif n'est pas de sanctuariser ou de mettre sous cloche, mais plutôt de donner des clés de lecture, permettant d'intégrer la place des services rendus par les écosystèmes dans les espaces en mutation. La nature doit être prise comme un élément du cadre de vie et de qualité urbaine. Sa traduction sera alors très différente dans le centre historique, dans un quartier pavillonnaire ou entre des immeubles. La réflexion sur la mise en œuvre de la trame verte et bleue doit donc intégrer, en plus de la question de la biodiversité, l'ensemble de ces fonctions et usages.

Mais avant d'aborder la question en termes de stratégie d'action, il est nécessaire d'inventorier l'existant. Or, la plupart des données disponibles dans les services des communes sont très hétérogènes et l'information qu'elles contiennent est circonscrite à l'espace public.

2.2.3 La répartition du végétal à Rennes

Pour étudier le végétal de manière homogène sur le territoire rennais, l'AUDIAR et le laboratoire LETG-Rennes (Bouriau E., Nabucet J., Hubert-Moy L., 2014)

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

disposent de bases de données qu'ils ont constituées. . La carte de l'occupation des sols obtenue par le laboratoire LETG à partir de la classification Rennes d'une image Worldview 2 de 2011, calibrée et validée par des relevés de végétation effectués par l'AUDIAR, présente un fort niveau de précision (d'un ordre métrique à infra-métrique), ce qui permet de l'utiliser depuis l'échelle parcellaire jusqu'à l'échelle de l'agglomération. Elle donne un état des lieux précis de la place occupée par les éléments de nature (boisements, surfaces en herbes, surfaces en eau), les éléments artificialisés (chemins gravillonnés…) et les éléments minéralisés (bâti, routes…).

A l'échelle de la zone agglomérée du cœur de métropole, c'est-à-dire des cinq communes en continuités, les espaces à caractère naturel occupent 42 % de l'espace, répartis en 17 % de zones boisées, 23,5 % de surfaces enherbées et 1,5 % de surfaces en eau. A l'échelle des communes, le degré de végétalisation varie de 38 % pour la ville centre à 51 % pour Saint-Grégoire. En dehors des espaces verts publics des villes, une grande part de ces espaces est composée de jardins privatifs qui participent de manière non négligeable à la place de la nature dans l'urbain (de l'ordre de 80 %) (Figure 3.7).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

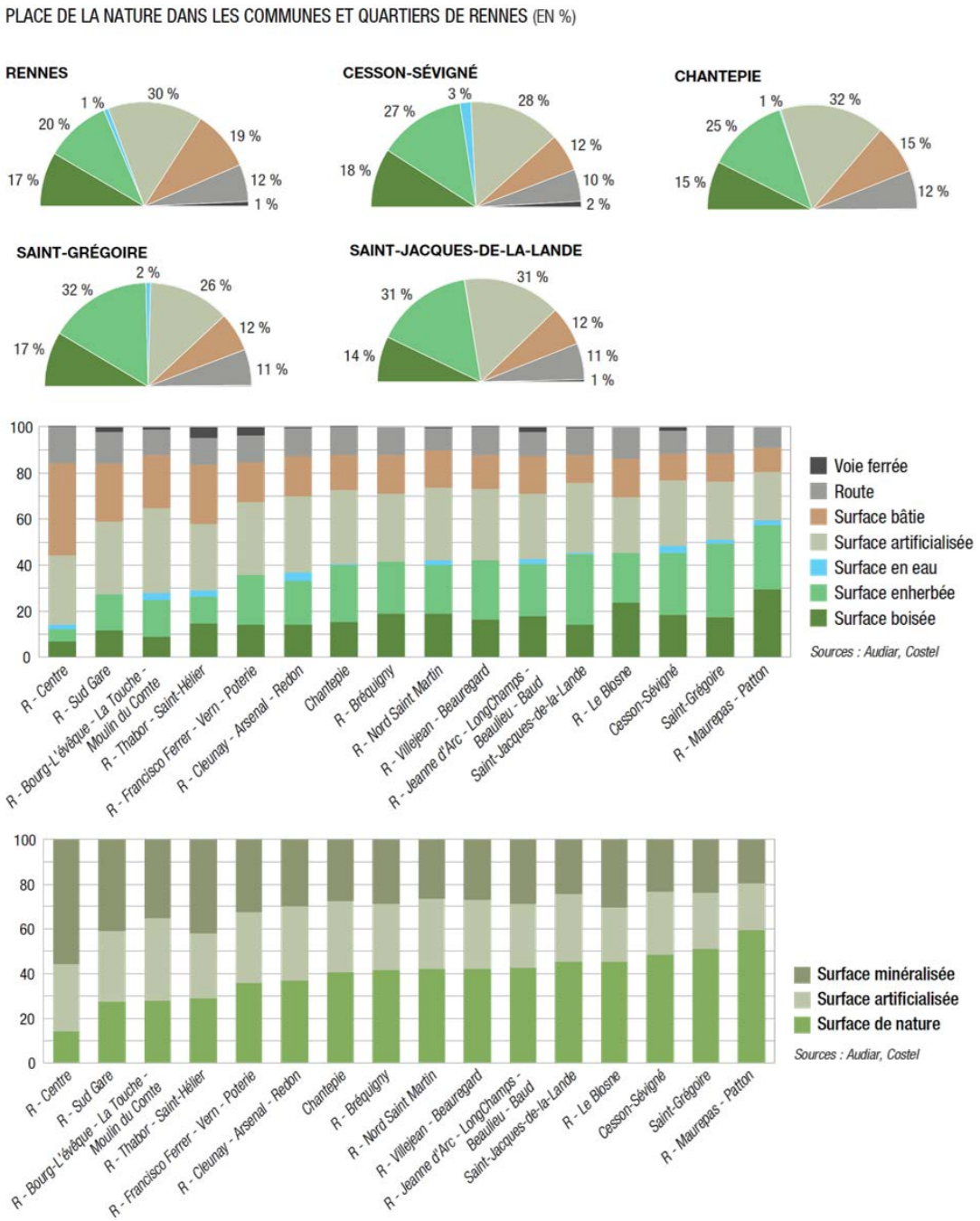


Figure 3.7 : Statistiques de la répartition du végétal par quartier (AUDIAR-LETG 2014)

D'une manière générale, ces résultats sont conformes aux observations, mais ils permettent de quantifier précisément et de localiser la nature au sein de l'urbain (Figure 3.8). Si la nature est présente partout dans la ville, même dans les quartiers les plus minéraux, l'analyse du territoire à une échelle fine démontre que les éléments de nature vont d'un peu moins de 10 % de l'espace en plein centre de Rennes à près de 80 % dans le quartier des Gayeulles. Ils sont par ailleurs très peu présents dans les ZA (autour de 20 %). La répartition de la nature en ville est donc hétérogène et liée à la morphologie ainsi qu'à l'histoire des quartiers.

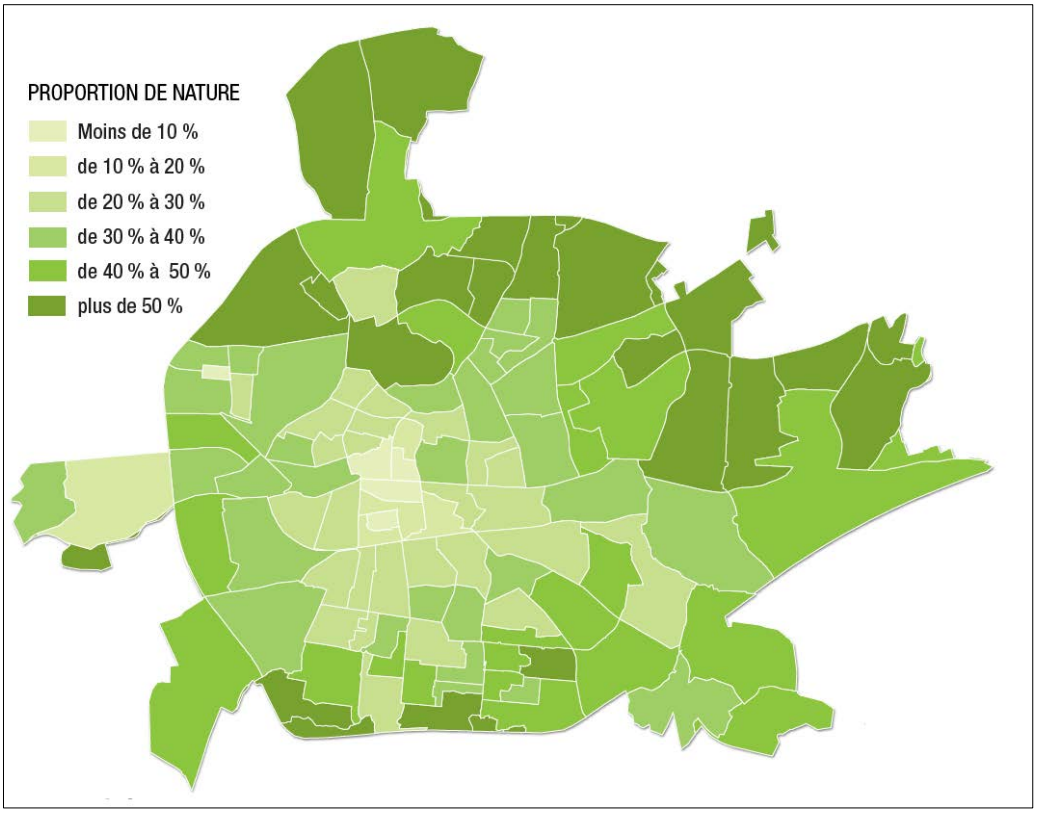


Figure 3.8 : Part des surfaces végétales par quartier (AUDIAR-LETG, 2014)

2.3 A l'échelle locale du site des prairies St Martin

Le site atelier des « Prairies Saint-Martin » correspond à un territoire d'environ 40 ha situé au cœur de la ville de Rennes (Figure 3.9). Cette enclave géographique au sein de la ville de Rennes, isolée entre le canal d'Ille et Rance à l'Ouest et l'ancien bras de l'Ille à l'Est, présente un caractère réellement singulier dans le paysage urbain qui l'entoure aujourd'hui (Figrue 3.10).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

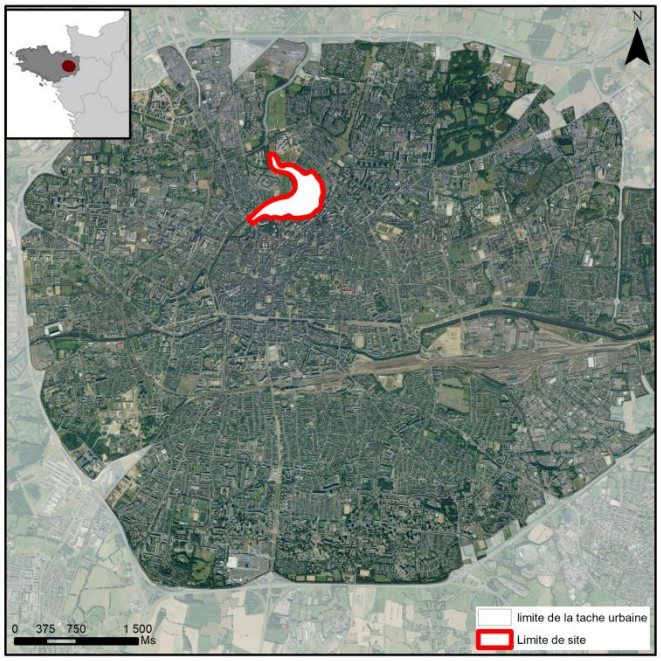


Figure 3.9 : Carte de localisation du site des prairies St martin de Rennes

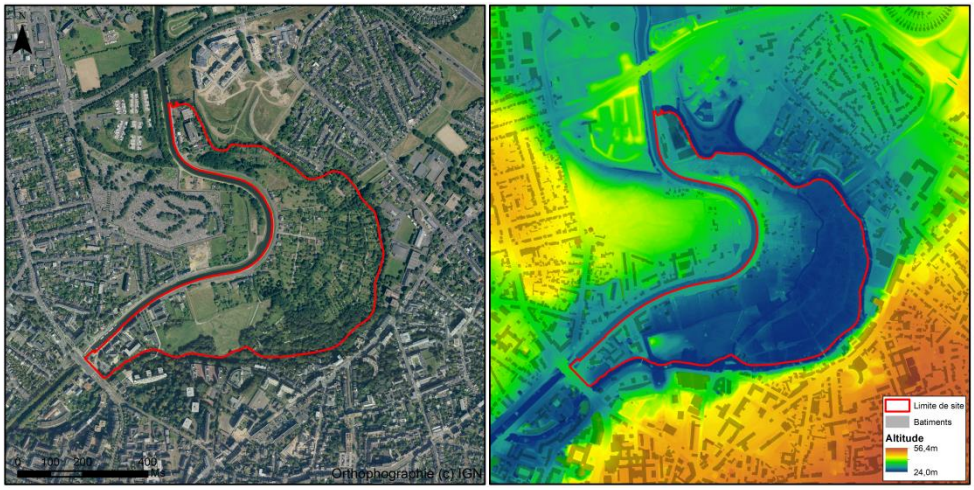
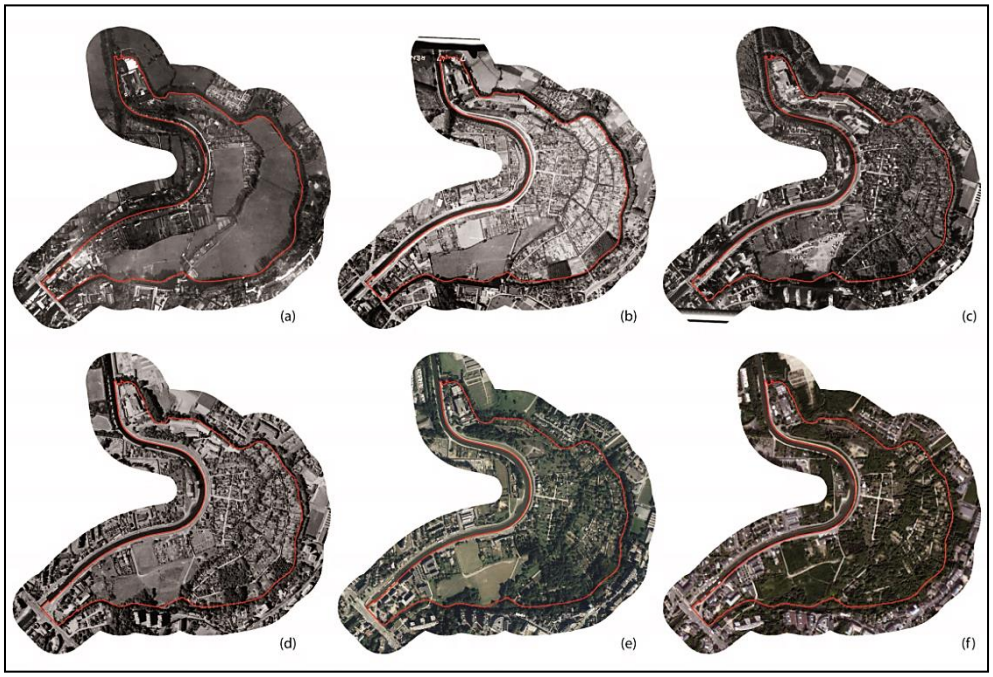


Figure 3.10 : Présentation du site des Prairies St Martin

Le site est essentiellement agricole jusqu'à la fin du 18ième siècle. Les premières modifications du 19ième siècle, avec l'implantation d'industries (tanneries) et un prémice d'urbanisation avec la construction du faubourg, donnent une nouvelle orientation au site qui le marquera durablement (Figure 3.11a). Au cours des années 30's, l'OPAC (Office Public d'Aménagement et de Construction) réaménage le site en jardin ouvrier (en attendant la possibilité de construire des logements sur le site) (Figure 3.11b). L'entre-deux guerre marque profondément le site avec l'implantation de la zone industrielle du Trublet sur le remblai du bras de l'Ille et le développement de l'habitat « informel » (lotissement Raoul Anthony) en réponse à une pénurie de logement. Le site se singularise davantage avec l'artificialisation croissante de la ville de Rennes qui

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

l'entoure et devient dans les années 70-80 un territoire d'enjeux avec un projet de voierie important en réponse aux préoccupations de circulation dans la ville de l'époque (Figure 3.11c). Dans les années 90 (Figure 3.11d), suite aux multiples crues qui touchent la ville, tous projets d'aménagement sur le site sont abandonnés et une volonté forte de maintien du caractère « naturel » du site est alors affirmée.



(a) *1924,*
(b) *1947,*
(c) *1970,*
(d) *1990,*
(e) *2010,*
(f) *2013*

Figure 3.11 : 11 Mosaïque de photographies aériennes

Durant toute cette période, les jardins ouvriers prospèrent et en 2007, suite à l'adoption du Plan de Prévention du Risque d'Inondation, une étude sur la pollution des sols est menée. Celle-ci révèle des taux particulièrement élevés de métaux lourds hérités du passé industriel du site, ce qui pose la question de l'usage du site en tant que source d'alimentation des usagers présents. En 2013 (Figure 3.11f), les jardins ouvriers prennent fin pour donner un nouvel usage au site. En effet, ce territoire d'enclave en lien étroit avec la vallée de l'Ille et le centre-ville de Rennes devient un lieu de centralité et de continuité. Ainsi, dans le cadre du projet urbain, il s'agit de créer un « parc « écologique » urbain qui réponde aux enjeux de la ville et de son territoire. Ces derniers doivent répondre :

- aux questions de gestion et de suivi de la remobilisation des sols pollués sur le long terme, tout en assurant un usage du site par le citoyen,

- au maintien de la fonctionnalité écologique du site, tant sur le plan climatique, le site des PSM se présentant comme un îlot de fraicheur particulièrement marqué en plein centre-ville, que sur le plan écologique par l'accueil et la circulation d'espèces faunistiques et floristiques,

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

- à la demande sociale toujours plus grande de nature en ville,

- aux nécessités réglementaires concernant la mise en œuvre du PPRI et de la Trame Verte et Bleue.

De par son histoire et ses usages, ce site présente un mode d'occupation et d'utilisation des sols très diversifié (jardins familiaux, friches, bâti, voiries,…). De plus, son isolement, dans une matrice urbaine fortement minéralisée, entraîne des conditions climatiques particulières au sein du milieu urbain. Ainsi, il s'agit d'un site particulièrement intéressant à suivre sur le plan environnemental. Par exemple, il est possible d'étudier comment les changements d'origine climatique et anthropique interagissent et affectent les communautés et les populations animales et végétales présentes sur le site (Figure 3.12).

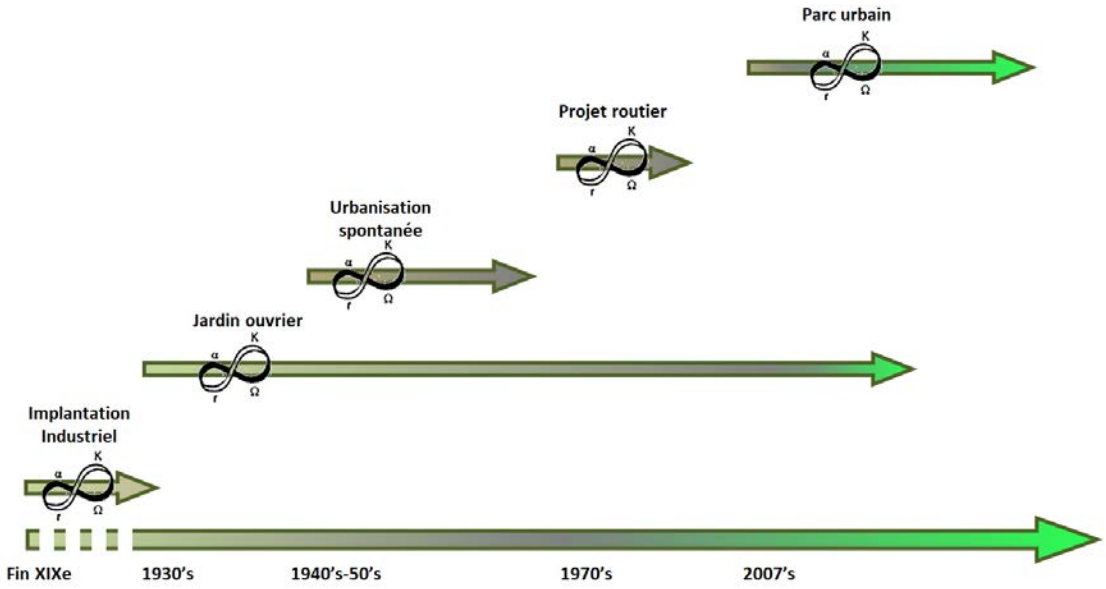


Figure 3.12 : Cycles de stabilité et d'instabilité du site des Prairies Saint-Martin de Rennes (1900 - 2020)

Les recherches sur les relations paysage-climat et leurs impacts sur la biodiversité sont conduites sur ce site atelier dans une logique de suivi à long terme (telle que définie dans le cadre conceptuel de la ZAAr). Elles sont aussi menées selon une approche interdisciplinaire (écologie, histoire, art, géographie, sociologie, …) avec des interactions étroites avec les décideurs et aménageurs (Ville de Rennes, Rennes-Métropole) ainsi que les associations de riverains et naturalistes qui pratiquent le site au quotidien. Ces trois types d'acteurs structurent réellement le socle de l'observation et de la recherche menée sur ce site.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Plus spécifiquement, la cartographie, la caractérisation et le suivi du végétal sur un site comme celui des Prairies St Martin est un enjeu majeur. En effet, cette masse significative de végétation en périphérie proche du centre-ville explique en grande partie la singularité du site. Celui-ci, jusqu'à la phase de travaux de réhabilitation enclenchés en 2014, présentait une mosaïque de paysages complexes allant du « paysage » ouvert de prairie de fauche à un « paysage » fermé de ripisylve, en passant par des paysages de transition hérités d'un bocage agricole composé de haies de frênes et de vergers. Cette grande hétérogénéité dans l'organisation spatiale du végétal s'accompagne également d'une très grande diversité floristique essentiellement issue de l'usage fortement anthropique du site. Le réaménagement du site en parc écologique va entraîner une modification majeure du fonctionnement du site et de l'organisation spatiale des éléments de celui-ci. Ces modifications vont être mise en œuvre à des échelles de temps très courte nécessitant un suivi du site adapté. Les données issues de la télédétection apparaissent donc comme des outils privilégiés pour assurer le suivi du site, pendant et après les travaux, pour permettre une meilleure compréhension des processus de résilience dans le cadre de la réadaptation du fonctionnement initial du site.

3 Les données

Les données exploitées dans le cadre de cette thèse comprennent des données de télédétection 2D et 3D et des mesures effectuées sur le terrain. Il existe une base historique importante de données spatiales sur le site urbain de la ZAAr. Cette base a été étoffée sur la période récente par des acquisitions réalisées dans le cadre de deux programmes nationaux du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) : le programme KALIDEOS (Observatoire spatial de Bretagne 2016-2020) et le programme TOSCA (Projet VEGIDAR (2014-2017)). En plus des images spatiales, ce dernier a permis l'acquisition d'un jeu de données aéroportées sur l'ensemble du site d'étude.

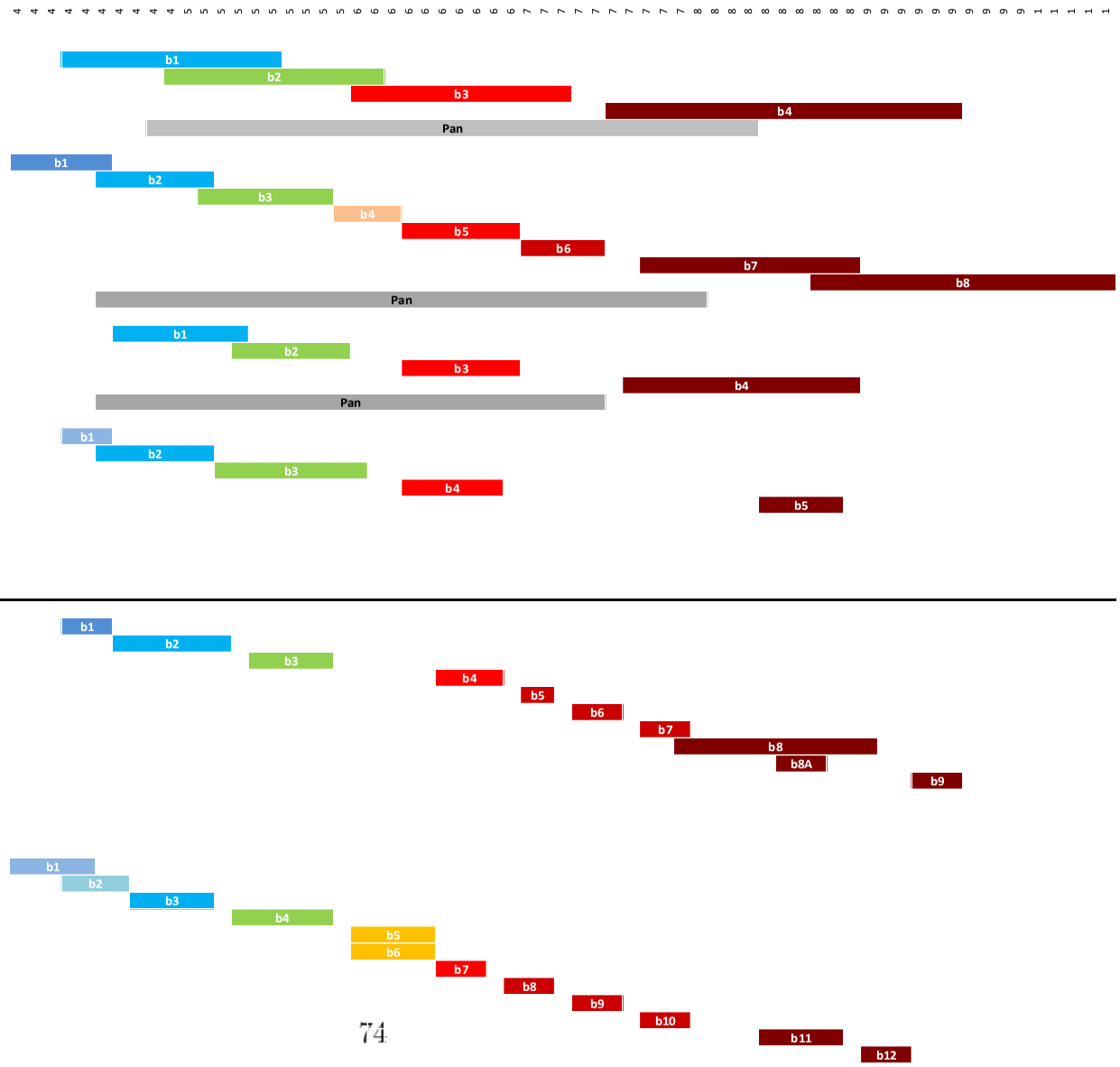
Les données spatiales exploitées dans le cadre de cette thèse sont recensées dans la table 3.1. Il détaille les caractéristiques de ce jeu de données très diversifié en termes de résolutions spatiale, spectrale et temporelle.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 3.1 : Caractéristiques des données spatiales utilisées

longueur d'onde (nm)

	Date	Type	Géométrie	N°	GSD (m)
Pléiades	10.04.12	mono	ortho	b1	2.8
				b2	2.8
	14.08.13	stéréo	Parfait & ortho	b3	2.8
				b4	2.8
				Pan	0.7
Worldview II	22.04.11	mono	ortho	b1	1.24
				b2	1.24
				b3	1.24
				b4	1.24
				b5	1.24
				b6	1.24
				b7	1.24
				b8	1.24
				Pan	0.31
SPOT 6	21.08.14	mono	ortho	b1	8.6
				b2	8.6
				b3	8.6
				b4	8.6
				Pan	2.15
Landsat 8 OLI	17.03.15	mono	brute	b1	30
				b2	30
				b3	30
				b4	30
				b5	30
				b6	30
				b7	30
				b8	15
				b9	30
Sentinel 2 -MSI				b1	60
				b2	10
				b3	10
				b4	10
				b5	20
				b6	20
				b7	20
				b8	10
				b8a	20
				b9	60
				b10	60
				b11	20
				b12	20
Venµs				b1	5.3
				b2	5.3
				b3	5.3
				b4	5.3
				b5	5.3
				b6	5.3
				b7	5.3
				b8	5.3
				b9	5.3
				b10	5.3
				b11	5.3
				b12	5.3



Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

3.1 Les données à très haute résolution spatiale

Nous pouvons distinguer deux types de données THRS : les données multi-spectrales et super-spectrales, que sont respectivement Pleiades et Worldview II d'une part, et les données stéréoscopiques PLEIADES d'autre part.

3.1.1 Les données multi-spectrales et super-spectrales

L'image Pleiades du 10/04/2012 a été acquise dans le cadre de la recette en vol du satellite Pleiades entre Décembre 2011 et Avril 2012. La programmation a été effectuée pour le programme STEREO II VALI-URB de l'agence spatiale Belge (BELSPO) dont l'objectif était d'évaluer Pleiades pour la cartographie de l'occupation du sol en milieu urbain. L'image Pleiades a une résolution spatiale de 70cm en mode panchromatique, rééchantillonnée à 50cm, et une résolution spatiale de 2,8m en mode multi-spectral rééchantillonnée à 2m. Le produit final est donc livré avec des résolutions spatiales de 50cm et 2m. Pleiades dispose de 4 bandes spectrales couvrant les spectres du Bleu au Proche infrarouge avec des largeurs de bandes relativement étendues (Table 3.1). Cette image a fait l'objet d'une orthorectification sur la base du modèle numérique de terrain de l'IGN et de l'ortho-photoplan © IGN. La précision géométrique de la correction est inférieure au pixel.

Des corrections radiométriques et atmosphériques ont été réalisées avec le modèle 6S (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum – Vector (6SV) (Vermote *et al.*, 1997) intégré dans l'Orféo Toolbox pour assurer un passage en réflectances au sol.

Les images à 50cm et 2m ont ensuite été fusionnées en utilisant la méthode de fusion de type Gramdschmilt (Laben and Brower, 2000) avec le logiciel de traitement d'image ENVI 4.7 © Harris Geospatial. Un mode de rééchantillonnage de type bilinéaire a été appliqué pour assurer un changement d'échelle à 50cm en mode multi-spectral.

Les images Worldview II ont été acquises dans le cadre du programme ANR Villes durables « Evaluation des trames vertes urbaines et élaboration de référentiels : une infrastructure entre esthétique et écologie pour une nouvelle urbanité » sur l'ensemble du territoire du Pays de Rennes. Les images Worldview II ont une résolution spatiale de 46cm en mode panchromatique et de 1,86m en mode multi-spectral. Il présente 8 bandes spectrales du Violet/Bleu au proche infrarouge (X2) et une bande dans le Red Edge. Ce capteur a été le premier de la génération des capteurs super-spectraux à très haute résolution spatiale.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Les images Worldview II ont été livrées géorectifiées mais les décalages notables entre ces dernières et l'orthophotoplan © IGN ont nécessité de retraiter la géométrie. Des corrections ont été appliquées à partir de l'orthophotoplan pour réduire ces déformations (RMSE<0.3m). Des corrections radiométriques et atmosphériques ont aussi été réalisées à partir des spécifications du capteur et du modèle de correction atmosphériques 6S afin d'obtenir des valeurs de réflectance au sol.

3.1.2 Les données Pléiades stéréoscopiques

Les images Pléiades du 14/08/2013 ont été acquises en mode stéréoscopique dans le cadre de la clôture des programmations d'images du programme VALI-URB (BELSPO). Elles ont été enregistrées entre 11h10 et 11h11 en mode capteur parfait avec un rapport de B/H < 0,2 (134km/694km). Le mode capteur parfait consiste à réaliser le niveau de prétraitement le plus faible pour limiter les altérations de l'image qui pourraient nuire à la reconstruction photogrammétrique. Il s'agit de corrections radiométriques de niveau 1, soit la correction des détecteurs aberrants, la reconstruction des zones inter-barrettes, etc… et des prétraitements permettant l'élimination des tous les effets de l'instrument (Doc Pleiades© CNES). Le rapport de Base sur Hauteur, qui est inférieur à 0,2, permet d'assurer dans le cadre d'une acquisition stéréoscopique (et non tri-stéreoscopique) et de limiter les effets de canyon urbain qui empêche l'inter-visibilité d'un même élément sur les deux images (Figure 3.13).

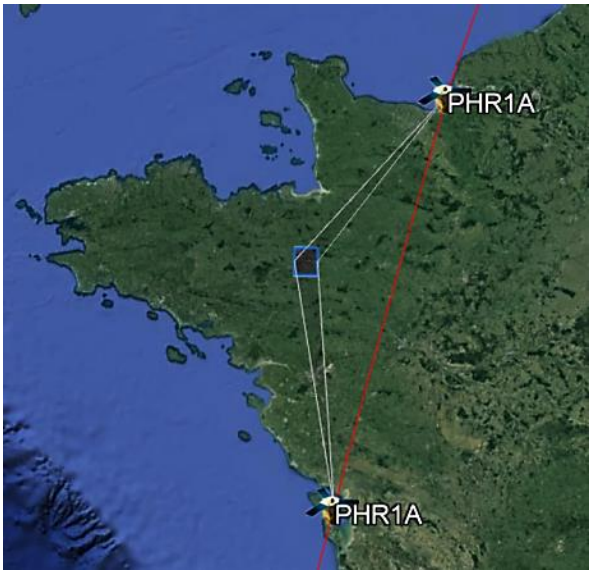


Figure 3.13 : Acquisition Pléiades : Illustration du rapport base/hauteur (Source : CNES)

La figure 3.14 illustre les résultats obtenus à partir d'une reconstruction 3D réalisée avec le logiciel ERDAS®Imagine et la suite LPS (Eisank *et al.*, 2015).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

L'algorithme de reconstruction exploité est une méthode de type SGM (Semi-Global Matching)(Hirschmuller, 2008) basée sur la mise en correspondance des pixels des images du couple stéréoscopique et du calcul des images de disparité pour le couple. Ces images de disparité calculée, le SGM génère un nuage de points photogrammétrique 3D.

Le nuage de points est issu de la reconstruction 3D obtenu à partir des deux images panchromatiques en mode capteur parfait (brute de tout traitement, excepté de la correction du bruit du capteur). La densité de points est proche de 4Pts/m², pour des images ayant une résolution spatiale de 50cm*50cm. Ce nuage de points a ensuite été colorisé à partir des comptes numériques de l'image multi-spectrale.

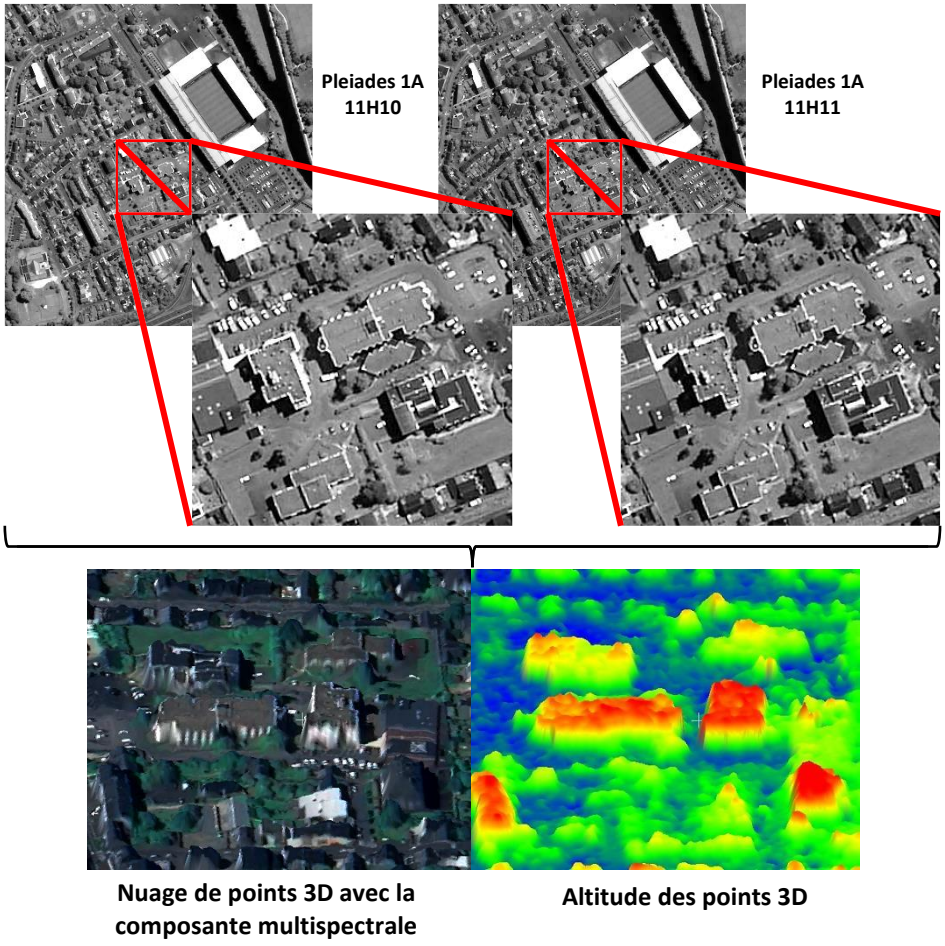


Figure 3.14 : Exemple d'un couple stéréoscopique Pléiades (en haut) et les produits 3D extraits en bas.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

3.2 Les données aéroportées

Les données aéroportées utilisées dans le cadre de cette thèse sont recensées dans la table 3.2. Elles comprennent des photographies aériennes, des données LiDAR et des données hyper-spectrales.

Table 3.2 : Caractéristiques des données aéroportées utilisées

Types de données	**Date**	**Capteur**	**Résolution spatiale (m)**	**Gamme spectrale**	**Mode**
Photographies aériennes	03/07/2014	Caméra V2 © IGN	0,2	MS (RVB)	Brute
Image hyperspectrale	21/08/2015	Hyspex	0,8	400-1000nm 1000-2500nm	Luminance
	09/09/2015				
Données LIDAR	21/08/2015	Optec TITAN	0,25	532nm	Multi-echos
				1024 nm	Retour d'onde complète
	09/09/2015			532nm	Multi-echos
				1024 nm	Retour d'onde complète

3.2.1 Les photographies aériennes

Les photographies aériennes sont issues de la mission IGN du 03/07/2014 effectuée sur l'Ille et Vilaine à une résolution spatiale de 20cm. Les images ont été acquises à partir d'une caméra CAM V2 en modes Rouge, Vert, Bleu. L'altitude moyenne de vol était de 1800m avec une couverture de l'ordre de 80% en longitudinal et 60% en latéral. Avant la livraison, les images ont subi une correction des distorsions liées au processus d'acquisition.

Les images aériennes ont été mises à disposition par la ville de Rennes ainsi que les données de trajectographies et de la plateforme inertielle. Ces informations ont ensuite été intégrées aux entêtes des images (exifs) qui indiquent le positionnement et l'état de l'avion sur ses trois axes (Table 3.3)

Table 3.3 Exemple d'informations présentes dans l'exif des images aériennes

SourceFile	**GPSLatitude**	**GPSLongitude**	**GPSAltitude**	**Roll**	**Pitch**	**Yaw**
00053_04088.tif	**48,13**	**-1,67**	**1843,78**	**-0,10**	**-0,03**	**-89,80**
00053_04089.tif	**48,13**	**-1,67**	**1842,87**	**-0,12**	**0,09**	**-89,84**
00053_04090.tif	**48,13**	**-1,67**	**1842,18**	**-0,03**	**0,11**	**-89,92**
00053_04091.tif	**48,13**	**-1,67**	**1842,24**	**-0,16**	**-0,08**	**-89,98**
00053_04092.tif	**48,13**	**-1,68**	**1843,07**	**-0,05**	**-0,01**	**-90,00**

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Pour effectuer l'extraction du nuage de points 3D, une méthode de type « Structure From Motion » a été appliquée en utilisant le logiciel Photoscan Agisoft ©.

Le nuage de points résultant permet de récupérer les informations en X, Y et Z ainsi que les informations spectrales issues des comptes numériques des images (Figure 3.15). Dans notre cas, malgré la disponibilité des données de trajectographie et d'inertie, le nuage de points présentait encore des déformations inhérentes au processus de reconstruction. En effet, nous ne connaissions pas le type d'optique utilisée pour la mission. Or, il s'agit d'un paramètre requis par Photoscan pour corriger parfaitement les effets de distorsion. Des corrections ont donc été effectuées en post-traitement pour assurer la conformité du nuage de points sur les 3 axes. Les données LIDAR présentées Section 3.2.2.3 ont été utilisées pour ce recalage.

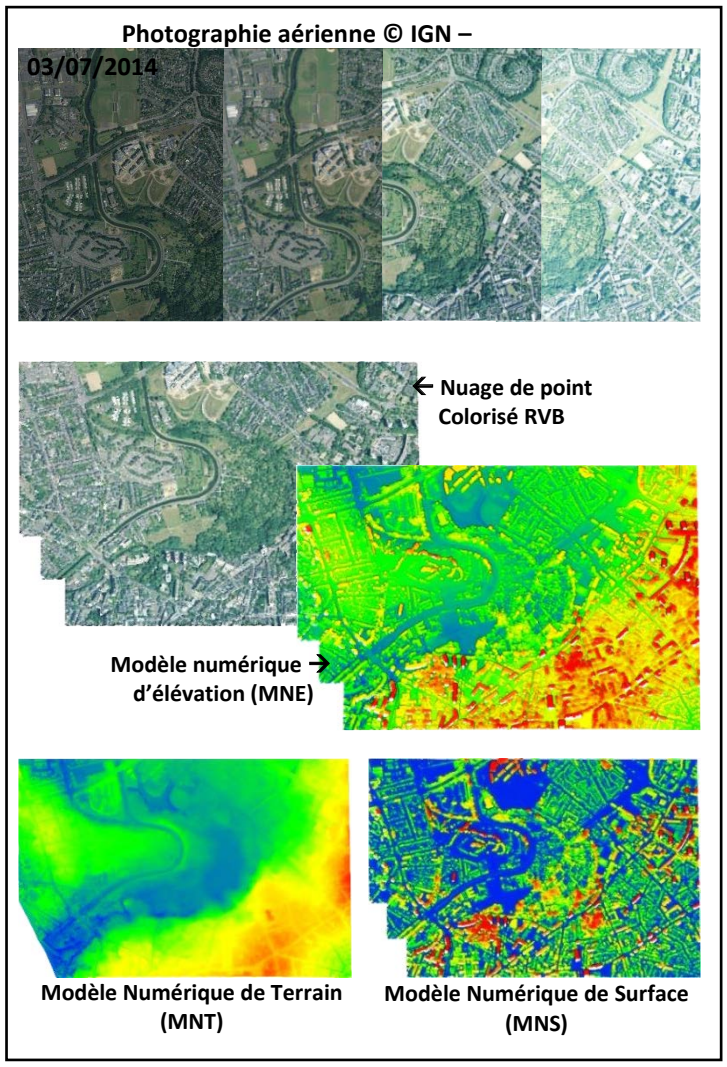


Figure 3.15 : Exemple de couples stéréoscopiques de photographies aériennes (en haut) et les produits 3D extraits (en bas).

Le nuage de points ainsi corrigé a ensuite été classé en deux classes « sol »et « sur-sol » à partir du logiciel Lastools © rapidlasso GmbH. Lastools (initialement développé pour l'exploitation de données LIDAR). Des corrections de ces classifications ont été effectuées manuellement grâce au logiciel Cloudcompare. Le calcul du modèle numérique de terrain et du modèle numérique de surface a ensuite été réalisé à partir de Lastools (Figure 3.15).

3.2.2 Les données hyper-spectrales

Les données hyper-spectrales obtenues sur le site de Rennes ont été acquises à partir de la caméra Hyspex de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Nantes Angers (OSUNA) dans le cadre du programme de recherche VEGIDAR du TOSCA (CNES). Cette caméra de type pushbroom permet d'acquérir des données de 400nm à 2500nm avec une résolution spectrale de 3.63nm et un champ instantané de vision du pixel (FOV) de 0,18 mrad. Cependant, pour couvrir l'ensemble du spectre, deux types de caméras sont nécessaires : l'une couvrant le domaine du VNIR (de 400 à 1000nm), l'autre le domaine du SWIR (de 1000 à 2500nm). Ces deux types de caméras ne présentant pas les mêmes spécifications d'enregistrement du signal, il a été nécessaire de modifier les paramètres d'intégration ainsi que les angles d'ouverture pour assurer un recouvrement cohérent des deux séries d'images (Table 3.4).

Table 3.4 : Caractéristiques des paramètres d'acquisition de la caméra Hyspex

Caméras	**Temps d'intégration (ms)**	**Trame par période**	**Binning**	**Résolution spatiale (m)**
VNIR	13,5	14	2	0.9
SWIR	3	0	0	1.8

Les conditions météorologiques de l'été 2015 sur le site de Rennes ayant été particulièrement défavorables, la mission hyper-spectral a été réalisée sur deux jours (Table 3.5).

Table 3.5 : Présentation des caractéristiques du vol hyper-spectral

Caméras	**Date**	**Heure**	**Vitesse (nds)**	**Altitude de vol (m)**	**Résolution spatiale (m)**
Hyspex (VNIR + SWIR)	21/08/2015	10h – 12h	110	1100	VNIR 0.8 * 0.8 SWIR 0.8 * 1.6
Hyspex (VNIR + SWIR)	09/09/2015	14h – 16h30	110	1100	VNIR 0.8 * 0.8 SWIR 0.8 * 1.6

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Le site atelier de Rennes est couvert par deux séries de 30 lignes et 29 lignes de vol (Figure 3.16).

Ces données ont été corrigées radiométriquement et atmosphériquement à partir du modèle ATCOR 4 (Atmospheric and Topographic CORrection, Richter, 1996) et des scripts de post-traitement développés par le Laboratoire de Physique du Globe (par Manuel Giraud et Patrick Launeau du LPG – UMR CNRS 6112) dans le cadre du programme VegDUD. Ces scripts éliminent les effets dus aux conditions d'observation (spécularité), à l'état de l'atmosphère (aérosols ou gaz), ou à la présence de certains type de matériaux (toiture peinte ou en bac acier) et d'assurer ainsi le passage des luminances aux réflectances au sol.

Malgré ces corrections, les données peuvent présenter un bruit inhérent à des corrections basées sur des modèles et ne tenant pas compte de l'état de l'atmosphère à la date d'acquisition. Les données nécessitent donc un deuxième niveau de correction basée sur des spectres de références, acquis sur le terrain de manière concomitante à l'acquisition aéroportée (Figure 3.17a). Elle se base sur une transformation du signal telle que : $R_{cor}(i) = Rb(i) * B(i)$

$Rb(i)$: Réflectance sortie d'ATCOR

$B(i)$: $R_{asd}(i)$ / $Rb(i)$

avec R_{asd} : Réflectance mesurée sur le terrain

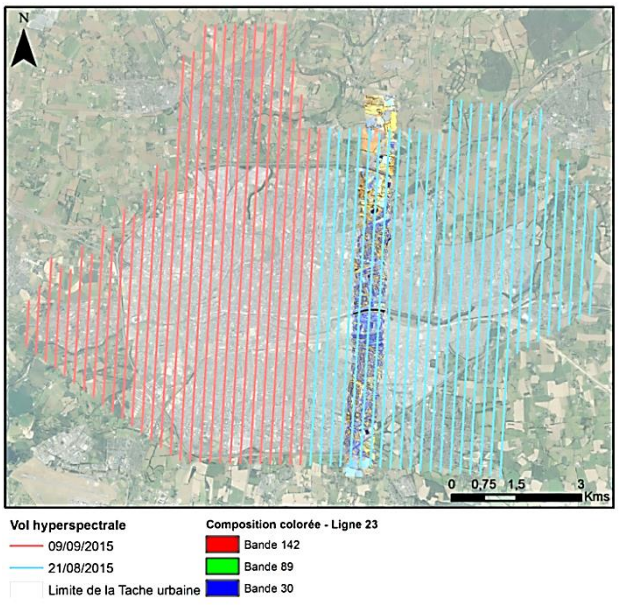


Figure 3.16 : Couverture et trajectographie des deux vols de la mission hyperspectrale effectuée sur le site atelier de Rennes en 2015

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nous avons également cherché à réduire le bruit présent sur l'image en utilisant une méthode de type « transformé au minimum du bruit » ou MNF pour « Minimum Noise Fraction » qui repose sur le principe que les images hyper-spectrales fournissent un gros volume d'information sur un nombre important de bandes spectrales et que la probabilité de redondance d'information spectrale comme spatiale est grande (Kazemipour, 2010). Ce type de donnée favorise l'apparition de bruit de classification lié à la faible séparabilité entre les matériaux. Pour réduire ce bruit, des méthodes de réduction de dimension telle que l'Analyse en Composante Principale (ACP) ou la MNF ont été appliqués aux données de télédétection. La MNF est une méthode dérivée de l'ACP reposant sur les propriétés de distribution aléatoire du bruit dans les spectres. Celle-ci permet d'isoler le bruit dans les composantes les moins significatives puis par transformation inverse de la relation statistique de recomposer les images en réflectance (Figure 3.17b).

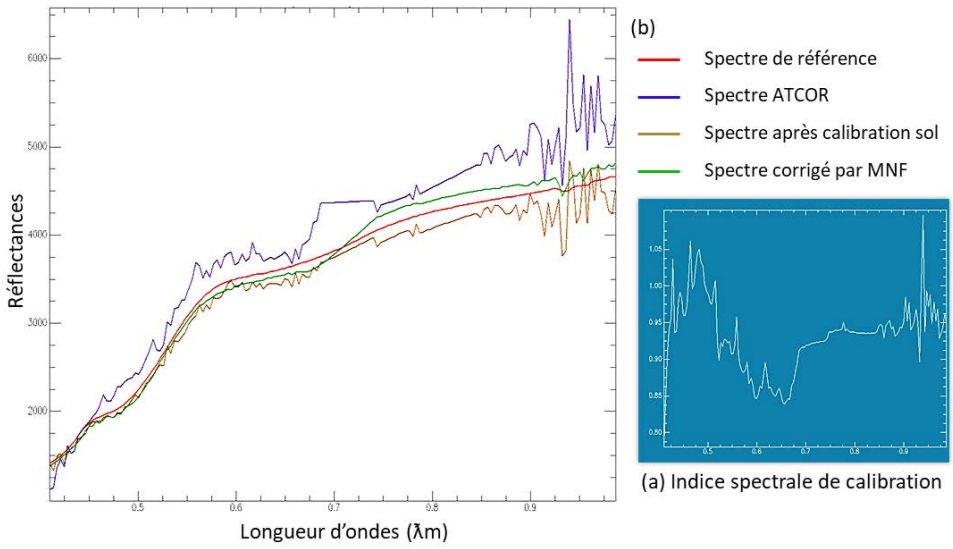


Figure 3.17 : Correction des valeurs de réflectances

L'ensemble des corrections radiométriques et atmosphériques ayant été appliqués, nous avons ensuite réalisé un premier niveau de correction géométrique, basées sur les données de trajectographies de l'avion et du modèle numérique d'élévation du SRTM. Les conditions d'intégration dans l'avion n'ayant pas été optimales ; le bras de levier entre les caméras et la plateforme inertiel n'ayant pas pu être mesuré lors de l'intégration dans l'avion). Il a fallu procéder à un deuxième niveau de corrections par géorectification. Cette méthode est basée sur la prise de points de référence sur l'orthophotoplan © IGN à 10cm de la ville de Rennes. Cette étape a consisté à une prise d'un minimum de 150 points d'amers par ligne de vol avec un algorithme de géorectification de type spline et un rééchantillonnage de type bilinéaire (Musy *et al.*, 2009). La précision globale de ce géoréférencement est inférieur au pixel

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

pour toutes les images, même si localement certain déformation inhérente aux conditions d'acquisition ont pu être observées.

Dans la suite de nos travaux, seules les données du domaine du VNIR ont été exploitées. Le recalage nécessaires des données VNIR et SWIR des deux caméras n'était assuré que par la géorectification des images en post-acquisition. Ce traitement nécessite énormément de temps pour assurer une exploitation optimale des deux caméras. Les données SWIR feront l'objet de valorisation ultérieure à ces présents travaux.

3.2.3 Les données LIDAR

Les données LiDAR ont été acquises de manière concomitante aux données hyper-spectrales, dans le cadre du programme de recherche VEGIDAR et de la plateforme LiDAR de l'OSUNA et de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR). Le LiDAR opéré est un Optec TITAN en mode bi-spectral vert et/ou proche-infrarouge avec un mode d'acquisition à retour d'onde complet pour l'un ou l'autre des canaux.

Dans le cadre de cette mission, nous avons privilégié une acquisition des données en mode multi-échos dans les canaux vert et proche-infrarouge avec une acquisition à retour d'onde complète dans le proche infrarouge (Table 3.6). Ce choix s'est imposé dans la mesure où le vol initialement prévu durant la période hivernale (un minimum de développement foliaire afin d'étudier la structure verticale de la végétation), n'a été finalement réalisé que durant l'été suivant. Nous avons donc cherché à optimiser la détection de points dans la partie du spectre ou la probabilité de retour était la plus forte.

Table 3.6 : Caractéristiques des données LIDAR utilisées

Date	Longueur d'onde	Mode	Densité de points	FOV (degrés)	PRF (kHz)	Altitude de vol (m)
21/08/2015	532nm	multi-échos	10	17	200	1100
	1024 nm	multi-échos retour d'onde complète	15			
09/09/2015	532nm	multi-échos	15			
	1024 nm	multi-échos retour d'onde complète	10			

Le développement foliaire limite considérablement la pénétration du signale dans la canopée et par conséquent la détection de points dans les éléments de végétation arborée ou en dessous. A une altitude de 1100m la rétrodiffusion dans le canal du vert

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

est, en condition normal d'acquisition, relativement faible comparativement au proche infrarouge. Ceci est, entre autre, lié à la diffusion et l'absorption du signal par l'atmosphère et par les éléments au sol, telle que la végétation. Nous avons donc acquit les données à retour d'ondes complètes dans le proche-infrarouge pour améliorer la détection d'écho faible (sous-jacent à la canopée) permettant de densifier le nuage de points.

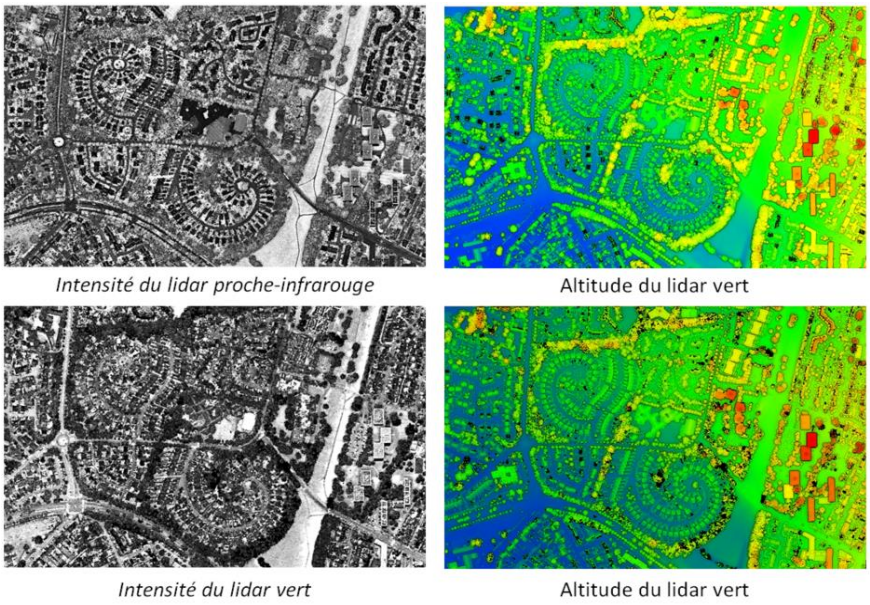


Figure 3.18 : Extrait de variables issue des données lidar de Rennes

La précision géométrique des données dans les canaux vert et proche-infrarouge a fait l'objet de deux types d'évaluations. La premières a été réalisée par le prestataire de la mission : Il s'agissait d'estimer la précision altimétrique de données à partir de point coté relevés par le prestataire et également disponible sur le SIG de la ville de Rennes. Cette première estimation à parmi de mesurer une précision altimétrique de 6cm en Z sur les surfaces planes (parking, route, etc…). Nous avons réalisé une seconde évaluation afin de s'assurer du bon calage des deux nuages de points entre eux. Cette évaluation a été réalisée en calculant, sur 25 millions points échantillonnés aléatoirement dans classe sol, la distance entre les deux nuages à partir de l'algorithme de mesure de distance nuage à nuage de Cloudcompare (Figure 3.19). La précision globale est de plus ou moins 10cm pour 95% des points, ce qui correspond bien à la spécification du capteur, telle qu'elle a été définies par le constructeur. La précision est plus élevée sur les surfaces planes avec près de 98% des points étant situés dans un intervalle de plus ou moins 5cm. Les différences supérieures à ces marges sont essentiellement présentes sur les zones de recouvrement entre deux lignes de vols. Ces différences sont également liées à la différence d'angle d'acquisition des deux lasers, le

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

vert tirant avec un angle de 7° d'inclinaison vers l'avant et le proche-infrarouge tirant au nadir.

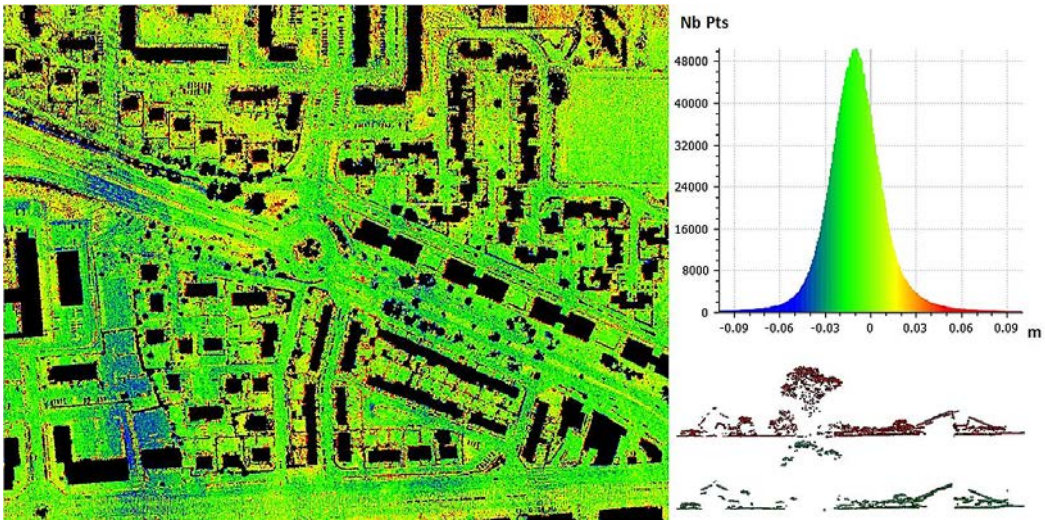


Figure 3.19 : Mesure de la précision relative des deux nuages de points dans les canaux verts et PIR

Les nuages de points ont ensuite été classés en deux catégories (sol et sursol) avec LAStools afin de calculer le MNT et le MNS de la zone d'intérêt. Les points aberrants tels que les points de faible intensité de haute altitude ou les points issus des doubles rebonds se trouvant sous la surface du sol ont été éliminés par seuillage.

3.3 Les mesures au sol

Les mesures au sol sont étroitement liées aux acquisitions aéroportées réalisées dans le cadre du programme VEGIDAR. Deux types de mesures sol ont été effectuées :

3.3.1 Les mesures spectroradiométriques

Les mesures spectroradiométriques ont été réalisées en même temps que les acquisitions hyper-spectrales du 21/08/2015 et du 09/09/2015. Elles ont été effectuées à partir d'un ASD Field Specpro 3 (350 - 2500nm) équipé d'un FOV de 8° (Figure 3.20).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

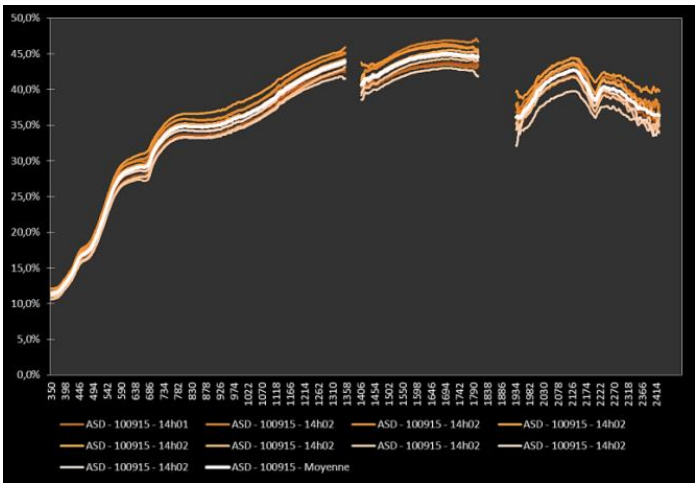


Figure 3.20 : Spectre de référence sur sable

Ces mesures ont été acquises suivant le même protocole utilisé dans le cadre de l'ANR VegDUD. Les mesures sols ont été réalisées sur des surfaces minérales homogènes telles que des sables, des surfaces en granite (Figure 3.21). Au regard des résolutions spatiales des données hyper-spectrales nous avons réalisé un point de mesures tous les 1m, sur une surface proche de 20m². Ces mesures ont été positionnées précisément à partir d'un système GPS de type Trimble GEOXH 2008. Le post-traitement différentiel réalisé au laboratoire à partir du logiciel pathfinder a permis d'obtenir une précision globale des points est l'ordre de 30cm.

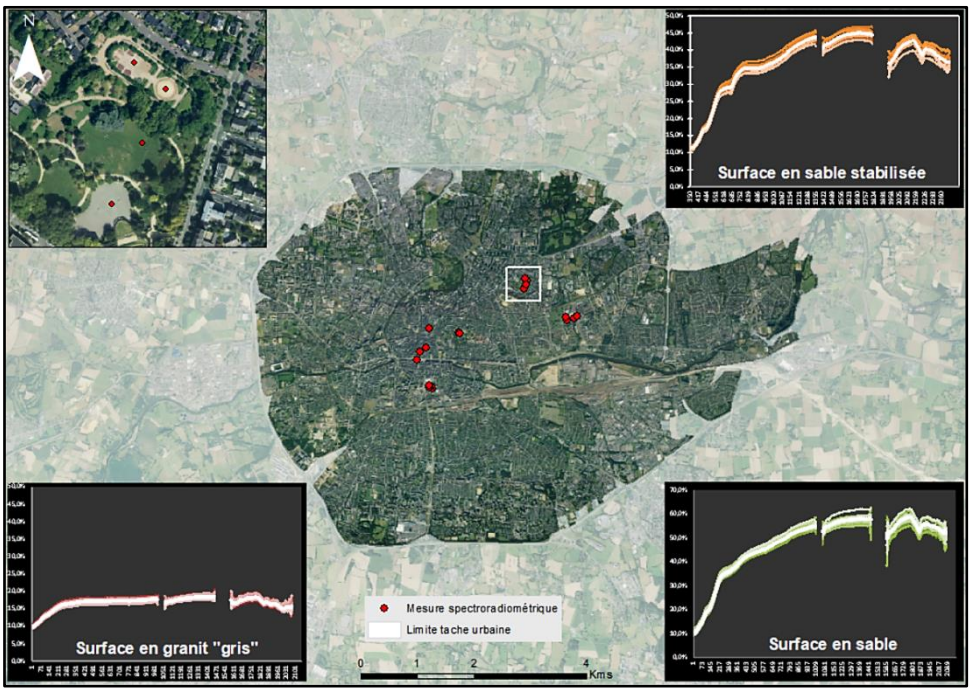


Figure 3.21 : Carte de localisation des points de mesures spectroradiométriques

3.3.2 Les mesures de structure de la végétation

Des mesures de la structure de la végétation ont été réalisées entre le 20 Aout et le 10 Septembre 2015 sur le site des Prairies St Martin et sa périphérie. Deux types de mesures ont effectuées I) le relevé des strates de végétation et II) les mesures par photographie hémisphérique sous canopée. L'ensemble des 120 points de mesures ont été positionnées précisément à l'aide d'un DGPS Trimble GEOXH 2008 (Figure 3.22).



Figure 3.22 : Carte de localisation des points de mesures de la structure de la végétation

Les mesures de strate ont été effectuées suivant la méthode de Kent (2012) avec une analyse par classe de hauteur de végétation (Table 3.7).

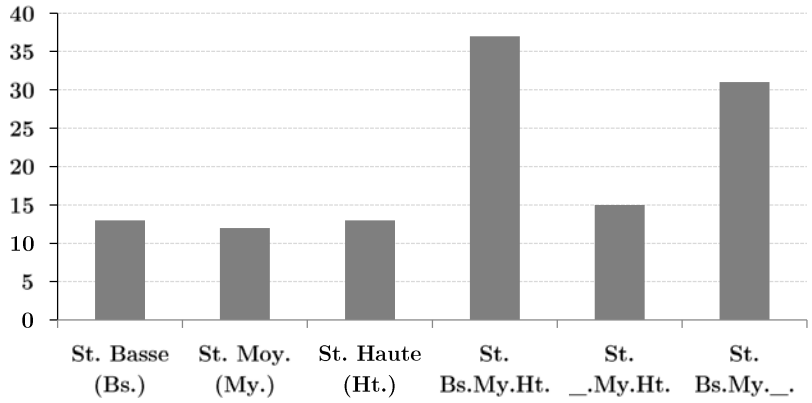
Table 3.7 Classe de hauteur de végétation (Kent., 2012)

Strate	**Hauteur**
Arborée	**H > 10m**
Arbustive	**5m < M < 10m**
Ligneuse	**1m < L < 5m**
Herbacées	**< 1m**

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

La répartition des différentes classes de relevées sont présentées dans la table 3.8.

Table 3.8 : Classe de hauteur de végétation (Kent., 2012)



On peut constater une distribution assez inégale des classes dans l'échantillonnage de terrain. Ceci est essentiellement dû au faite que les relevés ont été réalisés sur l'espace publique, et plus particulièrement au sein du parc des Prairies St Martin qui présente un caractère forestier marquée.

Les mesures hémisphériques ont été réalisée suivant le protocole de mesures définit dans (Betbeder *et al.*, 2014). Il s'agissait d'effectuer des prises de vue photographique avec une optique de type hémisphérique sous la canopée. L'appareil utilisé est un Canon EOS 7D Mark II avec un objectif Sigma 8mm/F3.5. Les clichés une fois acquit ont été classés en deux classes, ciel / non ciel, pour étudier, d'une part le degré d'ouverture de la canopée par l'analyse des proportions de chaque classe, et d'autre la complexité de la structure de la canopée en étudiant l'indice d'hétérogénéité développé par Burel et Baudry (2003) calculé tel que :

$$H = -\sum_{c=1}^{nnh} (P_c * \ln P_c)$$

Avec P_c la proportion de couple c de pixel adjacent pour l'ensemble des couples (ciel/ciel, ciel/branche, branche/branche) et nnh le type de couple.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

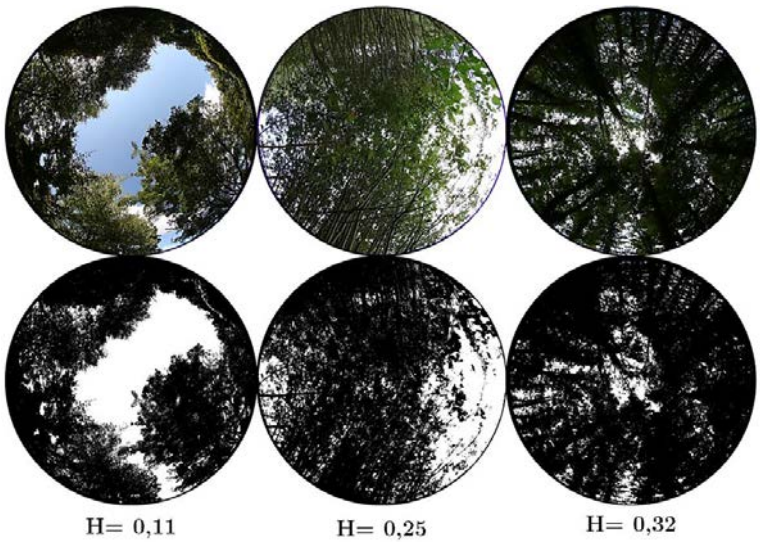


Figure 3.23 : Illustration du résultat du traitement des photographies hémisphériques

Cette métrique décrit la complexité de l'ouverture de la canopée, avec une valeur forte lorsque la canopée présente une grande proportion d'interface ciel/branche (nombreuse petite trouée dans la canopée), et une valeur faible lorsque le nombre de couple branche/branche ou ciel/ciel augmente indiquant une fermeture de la canopée 'Figure 3.23. Cette métrique est particulière intéressante pour la mesure de pénétration du signal LiDAR dans la canopée (Alonzo et al., 2015).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Synthèse de la première partie

L'analyse de l'état de l'art effectué dans cette première partie nous a permis de définir les enjeux de l'étude de la végétation en ville, et d'orienter les choix méthodologiques à effectuer en termes de données et de méthodes pour identifier, et caractériser la végétation urbaine à partir de données de télédétection et d'inventaires effectués *in situ*.

La végétation en milieu urbain présente un très grand nombre de formes et de configurations différentes qui est lié à la grande diversité des espèces rencontrées en villes, mais aussi à leur mode de gestion. Cette diversité explique que la représentation cartographique de la végétation urbaine représente un enjeu méthodologique important car il n'existe pas de nomenclature disponible aujourd'hui qui permette de traiter simultanément les composantes physique, spatiale, biotique et sociale de la végétation urbaine. Les données de télédétection permettent de cartographier la végétation urbaine selon des typologies phyto-sociologiques et structurelles, en mode pixel ou en mode objet, à une échelle allant de l'objet (un arbre par exemple) au paysage urbain dans son ensemble.

La végétation urbaine assure un certain nombre de fonctions et de services en termes environnementaux, économiques et humains. Par exemple, à une échelle locale, la végétation permet de réduire de 1 à 5°C les températures des espaces végétalisés, comparativement à des espaces non végétalisés, ou d'améliorer la qualité de l'air en captant des polluants tels que le dioxyde d'azote ou l'ozone. A une échelle plus globale, elle atténue l'effet de serre en séquestrant le CO2 de l'atmosphère. La végétation agit aussi sur la biodiversité, celle-ci augmentant avec l'accroissement du nombre et de la qualité des espaces verts en ville. Les fonctions et services assurés par la végétation dépendent de plusieurs facteurs, parmi lesquels le type d'espèce présent, la densité de la végétation, le stade de croissance des arbres... Par ailleurs, il faut aussi noter que si la plupart des services rendus par la végétation sont associés à la notion de bienfaits, elle peut aussi engendrer des effets négatifs tels que la production de CO2 ou provoquer des allergies.

La végétation urbaine est généralement cartographiée à partir, soit de bases de données disponibles à des échelles internationales et nationales, soit à partir de bases de données développées par les services des villes. Les premières présentent l'avantage de délivrer des informations homogènes sur la végétation et *a minima* sur tout le territoire national. Toutefois, les cartes sont produites à des échelles qui ne permettent pas de les

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

exploiter à une échelle opérationnelle au sens de l'action publique. Les secondes fournissent une information beaucoup plus détaillée sur la végétation, mais ont l'inconvénient majeur de ne couvrir que la partie publique du territoire urbain.

La production de cartes détaillées et exhaustives de la végétation urbaine est un besoin exprimé tant par les gestionnaires de la ville que par les scientifiques. Les données de télédétection THRS apparaissent comme un outil privilégié et adapté à l'identification et la caractérisation de la végétation urbaine. Les images de télédétection optiques multi-spectrales 2D, qu'elles soient acquises par des capteurs aéroportés ou spatiaux, sont couramment utilisées pour identifier et caractériser les écosystèmes urbains. Elles fournissent des informations intéressantes sur l'occupation et l'utilisation des sols ou encore sur la présence/absence de la végétation. Cependant, la reconnaissance de la végétation est limitée à quelques espèces en raison de leur faible résolution spectrale. Les données hyper-spectrales aéroportées, quant à elles, permettent de distinguer davantage d'espèces, mais leur usage est encore peu répandu en raison de la lourdeur du dispositif à mettre en œuvre pour acquérir et traiter les données. Les images super-spectrales THRS sont très peu exploitées pour étudier la végétation urbaine, malgré l'intérêt qu'elles présentent pour la caractérisation de la végétation.

Par ailleurs, si les données de télédétection 3D, qu'il s'agisse des données stéréoscopiques acquises en mode aéroporté ou spatiale ou des données LiDAR aéroportées, ont beaucoup été utilisées pour étudier les surfaces artificialisées en ville. Cependant, elles ont été peu exploitées pour analyser la végétation urbaine, à l'exception des forêts. Or elles présentent un fort potentiel pour cela, en permettant d'appréhender le volume de la végétation. En outre, l'utilisation combinée de données 2D et 3D est très prometteuse. Cette synergie devrait permettre de réaliser la cartographie de la végétation urbaine à une échelle fine en appréhendant simultanément les dimensions horizontales et verticales du milieu urbain.

Nous avons choisi de cartographier la végétation sur ville de Rennes pour les raisons suivantes : le site de Rennes est inclus dans la Zone Atelier Armorique sur laquelle des recherches interdisciplinaires sont menées sur le thème paysage-biodiversité ; le site de Rennes est inclus dans le site Kalideos Bretagne, ce qui permet de bénéficier de données spatiales gratuites et de qualité ; des collaborations sont engagées depuis plusieurs années avec des gestionnaires locaux (AUDIAR et Rennes Métropole). Les recherches menées pendant cette thèse sur l'étude de la végétation urbaine ont été effectuées à deux échelles : celle de la ville de Rennes et celle de l'observatoire local des Prairies Saint-Martin, qui est un site de 40 ha localisé au cœur de la ville de Rennes.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Deuxième partie :

Évaluation de l'impact de la résolution spatiale pour l'étude de la végétation urbaine : Du multi-spectrale au super-spectrale

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Introduction de la deuxième partie

La deuxième partie de ce manuscrit présente les travaux réalisés sur l'évaluation des images satellites THRS pour la cartographie de la végétation urbaine. Les objectifs de cette partie sont d'évaluer l'intérêt d'utiliser (1) des images à très haute résolution spatiale pour identifier et caractériser la végétation et (2) des images ayant une résolution spectrale élevée afin d'identifier les espèces végétales.

Dans le quatrième chapitre, la végétation est cartographiée à partir d'images THRS multi-spectrales et de bases de données existant sur la végétation en ville afin d'évaluer l'intérêt d'utiliser ce type d'images en complément de bases de données accessibles gratuitement sur tout le territoire national. Une approche méthodologique multi-scalaire a été développée pour cartographier les surfaces bâties et vertes dans les zones urbaines et périurbaines. Afin de tester la reproductibilité de la méthode, elle a été appliquée sur deux villes françaises de taille moyennes aux formes urbaines différentes : Strasbourg et Rennes.

Dans le cinquième chapitre, nous évaluons l'apport des données satellites THRS super-spectrales pour cartographier des espèces arborées en ville. Plus précisément, nous cherchons à évaluer l'apport respectif des bandes spectrales du violet, du jaune et du red-edge, qui ne sont pas inclues dans les images THRS multi-spectrales pour l'identification des espèces d'arbres. Pour cela, nous avons simulé, à partir de données aéroportées hyper-spectrales acquises sur la ville de Rennes, les bandes spectrales de capteurs super-spectraux et de capteurs multi-spectraux afin de les comparer.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 4 : Exploitation des données à THRS multi-spectrale

1 Introduction **100**

2 Context of the study **101**

3 Study sites and datasets **101**

4 Methodology **105**

4.1 Training and validation steps 106

4.2 Segmentation and classification methods 107

5 Résultats et discussions **108**

5.1 Morphological Urban Area with ancillary data 108

5.2 Classification results 109

6 Conclusions **113**

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

1 Introduction

Ce chapitre expose l'utilisation de données multi-spectrales THRS présentées dans le chapitre 2 pour cartographier la végétation en milieu urbain.

Il reprend un article publié dans la Revue Française de Photogrammetrie et de Télédétection (RFPT) : Nabucet, J., Rougier, S., Deniau, J., Vétillard, L., Hanson, E., Benarchid, O., Wolff, E., Hubert-Moy, L., Puissant, A., 2015. Multi-scale methodology to map grey and green structures in urban areas using Pléiades images and existing geographic data. *RFPT* 209, 95-101.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet VALI-URB (Urban sprawl and ecological corridors : Consolidation of VHRS remote sensing methods) dirigé par Eléonore Wolff (IGEAT/Université Libre de Bruxelles), et mené dans la Research programme for earth observation STEREO II, initié par la Belgian Federal Science Policy. Elle repose sur deux constats : (1) l'identification et le suivi des extensions urbaines ainsi que la préservation des écosystèmes en milieu urbain, devenus des enjeux majeurs afin de maintenir ou d'augmenter la biodiversité dans les zones urbaines de la plupart des villes européennes, et (2) de nombreuses études ont déjà été menées sur la cartographie et l'analyse des villes européennes et leurs évolutions au moyen de données de télédétection mais une méthodologie consolidée et reproductible manquait encore.

Afin de répondre à ces deux enjeux, des chercheurs appartenant à trois équipes (une belge, deux françaises) ont développé une méthodologie multi-scalaires basée sur des images Pléiades et des données géographiques existantes (bases de données vectorielles de type OSM et BDTOPO ® IGN) pour cartographier les surfaces bâties et vertes dans les zones urbaines et périurbaines. Plus précisément, l'objectif était de montrer l'intérêt d'utiliser une information d'occupation et d'utilisation des sols dérivée des images Pléiades, combinée à des données vecteurs pour cartographier de manière semi-automatique les structures grises et vertes à l'échelle locale (1/10 000ème) par une classification orientée-objet. La méthode proposée a été appliquée sur deux villes de taille moyenne et aux formes urbaines différentes : Strasbourg et Rennes (France).

Après avoir brièvement décrit le contexte de l'étude, la méthode développée et les résultats obtenus sont détaillés ci-après.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

2 Context of the study

Improving our knowledge on the urban patterns with their grey and green structures and their dynamics at multiple spatial scales (from the urban block to the morphological urban zone) plays an important role for a wide range of applications, such as urban planning and management (Herold *et al.*, 2005), disaster management (Okada et Takai 2000), or energy consumption modelling in urban environments (Heiple et Sailor, 2008). Many studies have mapped and analysed European cities and their evolution using optical remote sensed data but a consolidated and reproducible methodological framework is still missing. In the context of the VALI-URB Project, a multi-scale methodology based on Pleiades images and existing ancillary data (vector databases or the Open Street Map - OSM - database) has been proposed to map built-up and vegetation land features in urban and suburban areas. The mapping of grey and green elements at local scale performed with an object-based image analysis using Pleiades satellite images with a generic methodology on two test sites (Strasbourg, Rennes) is provided. The second section presents the study site and data, and the third one details the flowchart of the general methodology. Section 4 shows first results obtained on Strasbourg and Rennes. Conclusions and discussion of the results are expressed in section 5.

3 Study sites and datasets

Two medium-sized cities with different urban forms have been chosen to apply the standardized methodological approach (Figure 4.1). Both cities present several typical morphological urban characteristics representative of some western urban areas.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

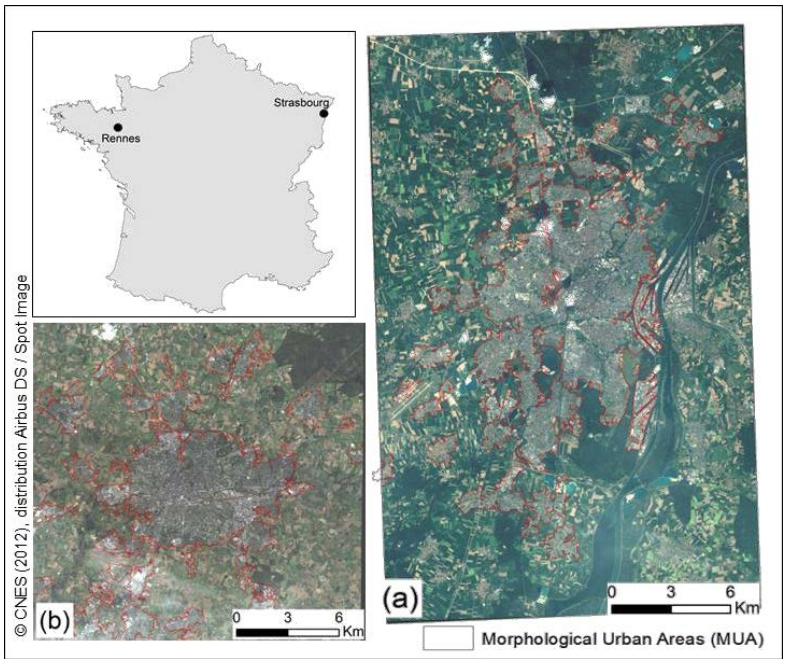


Figure 4.1 : Location of the study sites. Pleiades images are displayed as a true color composition (RGB).

Strasbourg is a compact urban city of 415,000 inhabitants (2013) which covers an area of 316 km² with a density of 1498 inhab./km². This city is organized as a concentric dense city centre inherited from the Middle-Ages with surroundings organized in some rings (Figure 4.1a). Rennes is a multi-nodal city of 473,187 inhabitants (2013) surrounded by a green-belt and covering an area of 705 km² with a density of 587 inhab./ km². The city is structured as a polycentric city (Figure 4.1b). Both cities are submitted to a gradual urbanisation process since the last century with an urban sprawl achieving the third ring (Strasbourg) and the peripheric cities (Rennes). Thus, several urban patterns or Urban Fabrics (UF) can be observed in both cities along a gradient of urbanization from the city-centre and its suburbs (Figure 4.2).

A bundle (MS + P) Pleiades image has been acquired in both cities during leaf-on period (Figures 4.1a and 4.1b and Table 4.1). Radiometric and atmospheric corrections are applied to Pléiades images using the 6S model (Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum vector code) proposed by Vermote *et al.* (1997). Corrections are performed with the Orfeo Tool Box (OTB) using the Optical Calibration/6S module. Both images are orthorectified by the French National Geographic Institute. Pan-sharpened ortho-images with a 0.5m spatial resolution are created based on the combination of panchromatic and multi-spectral bands.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 4.1 : Characteristics of Pléiades images (MS –Multispectral / P – Panchromatic).

Study site	Acquisition date	Resampled Spatial resolution	Cloud cover (%)
Rennes	10/04/12	2m, 0.5m	10-15
Strasbourg	08/14/12	2m, 0.5m	5-10

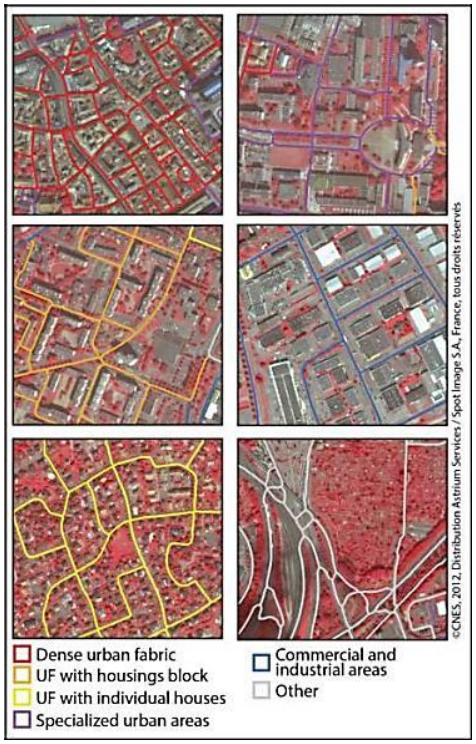


Figure 4.2 : Typology of urban patterns (urban fabrics).

A list of urban objects (Table 4.2) was firstly defined to map the urban areas at 1/10,000 according to (Puissant *et al.*, 2005). In this study, urban objects are defined as homogeneous units in the Pleiades image by two attributes: (1) the first one refers to the spectral response of the object (material) and (2) the second refers to its spatial dimension (shape) (Puissant, 2003). Based on this definition, twenty-three urban objects were defined. These objects were grouped into three object categories (Table 4.2 - level 1: water, vegetation, artificial/mineral) according to classical and standardized land cover nomenclature (Corine Land Cover or Urban Atlas datasets).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 4.2 : Nomenclature of urban objects in four level (in grey – typology used for the land cover classification).

Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
1 Water	11 water surface	111 pond / lake	
		112 swimming pool	
	12 linear water	121 brook	
		122 small river	
		123 big river	
		124 channel	
2 Vegetation	21 tree /shrub	211 isolated tree (crown surface)	2111 isolated deciduous tree 2112 isolated coniferous tree
		212 tree group (copse)	2121 deciduous tree group 2122 coniferous tree group 2123 mixed tree group
		213 tree alignment	2131 deciduous tree alignment 2132 coniferous tree alignment 2133 mixed tree alignment
		214 other	
	22 grass	221 square / rectangular grass	
		222 square linear grass	
		223 round grass	
		224 grass with other form	
3 Artificial/ mineral	31 above ground surface	311 orange roof building 312 dark grey roof building 313 light grey/white roof building	
	32 ground surface	321 dark to light grey surface	
		322 orange surface	
		323 'green' mineral surface	
		324 beige surface	
	33 linear element	331 linear dark to light grey	
		332 linear beige	
4 Shadow			
5 Cloud/haze			
6 Artefact			

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

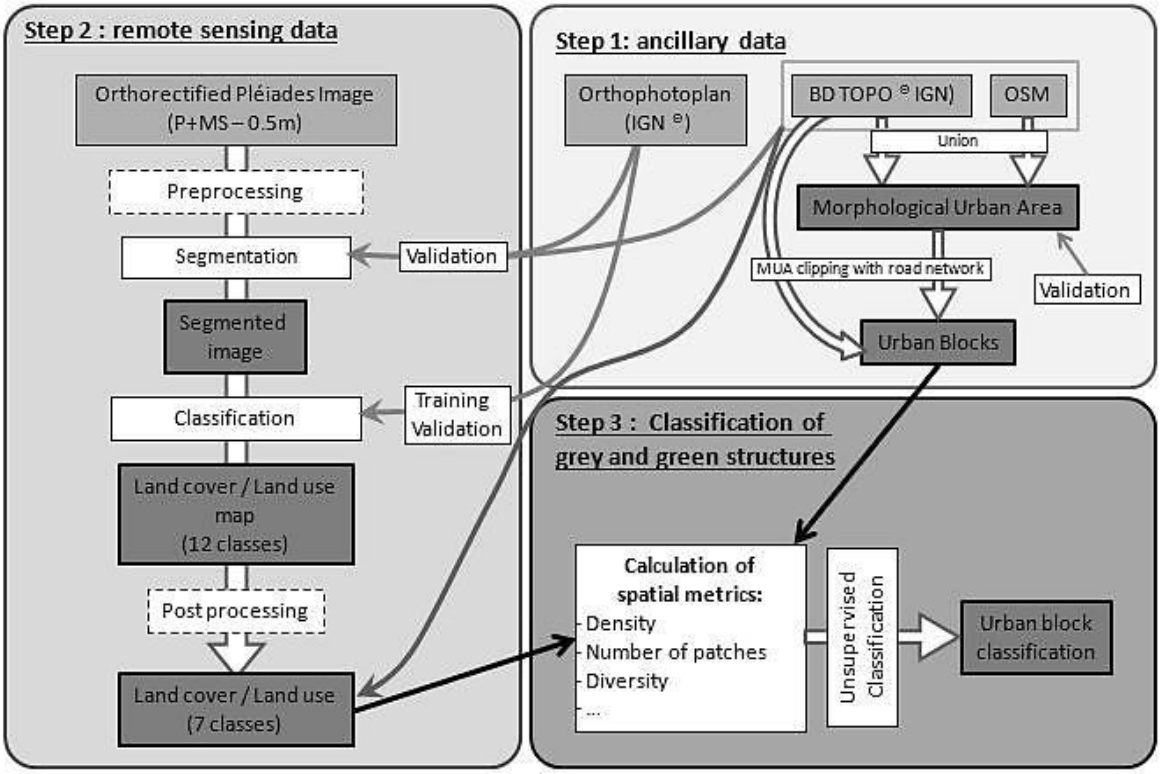


Figure 4.3 : Flowchart of the general methodology

4 Methodology

The proposed methodology is organized in three steps (Figure 4.3) and follows a bottom-up approach in order to be close to the visual interpretation process.

The first step (Figure 4.3 - step 1) concerns the extraction of the Morphological Urban Area (MUA) and the delineation of 'urban blocks' based on ancillary data. A protocol based on Loriot (2008) was proposed to extract impervious surfaces (housing, communication ways, commercial or industrialized zones). The MUA was firstly delineated using (1) the built-up layer derived from the combination of the BD TOPO ® IGN and the OSM databases and (2) the road, railway and hydrographic network layers, extracted from the BD TOPO ® IGN database. In this study BD TOPO ® IGN database is considered as the reference layer to be updated by the OSM database. Comparison of the two layers allowed us to extract the elements present only in the OSM database, to validate them by photo-interpretation and update the BD TOPO ® IGN database. Each limit (Figure 4.1) is validated using MUA's limits derived from aerial photographs and cadastres provided by the urban agencies of both cities. Then,

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

units called 'urban blocks' were delineated in using the MUA limits previously defined and the main roads, rivers and all the railways.

In the second step, the MUA is classified using an object-based image analysis (Figure 4.3 - step 2). The Pléiades images are firstly segmented before being classified to identify the urban objects defined in the nomenclature (Table 4.2 in grey). Three supervised classification algorithms were tested. The segmentation and classification results are then evaluated. The training and validation schemes proposed are detailed in section 3.1. Section 3.2 explains the segmentation and classification algorithms.

In the step 3, the grey and green structures are analysed at the 'urban block' scale (Figure 4.3 - step 3). This analysis is based on a series of metrics classically used in landscape ecology. Eight spatial metrics (% of land cover per class, number of patches, mean and standard deviation of patch size, patch and edge density, shape index, Shannon index) are calculated on the land cover classification (Figure 4.3 - step 2) at the scale of the urban blocks. These blocks were previously classified into six classes of urban fabrics. In Rennes, a supervised photo-interpretation process is applied to build these classes. In Strasbourg, a regional land use database is available ®CIGAL (Figure 4.2). This exploratory analysis has to allow classifying urban blocks into urban fabrics. In this paper, only preliminary results of unsupervised classification of these urban blocks based on four metrics are presented. Validation step is performed using the Kappa Index (Congalton, 1991).

4.1 Training and validation steps

A rigorous statistical accuracy assessment generally requires suitable reference data, an appropriate sampling scheme and independence between the training and validation datasets (Congalton, 1991). Training and validation samples are generated through a stratified random sampling scheme adapted from Puissant *et al.* (2014). The stratification is based on an urbanization index, which represents the complexity of a city with several density levels. The urbanization index was built using three land cover classes ('vegetation areas' (A_V), 'non-vegetation areas' (A_{NV}) and water areas (A_w)). Vegetation areas are extracted in thresholding a NDVI computed from the Pleiades images. Water surfaces were derived from the BD TOPO ® IGN database and other areas that did not belong to AV or Aw are considered as non-vegetation areas. Study zones are sub-divided into squared plots with a respective area AT of 0.25km2 (500m x 500m). For each plot the urbanization index "Iu" is computed using:

$$Iu = \frac{\mathbf{A}_{nv} - \mathbf{A}_{v}}{\mathbf{A}_{t} - \mathbf{A}_{w}}$$

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

This urbanization index ranges from -1 for the totally vegetation surfaces to 1 for the totally artificialized plots. The proposed index is classified by quantiles in five classes in order to obtain diverse and representative samples. This type of discretisation is particularly adapted, as each class is equally represented. For the two most urbanized plots, a random selection of 1000 segments per class is labelled. For the three least urbanized plots, only 600 segments are considered since their spatial organization is less complicated and composed of objects fewer. Classification methods prsented in next part are then evaluated by cross-validation technique. 2/3 of labelled segments are randomly chosen and considered for the training, and 1/3 for the validation. Kappa indexes are also calculated to assess classification results.

4.2 Segmentation and classification methods

The Pleiades images are segmented using the Multiresolution segmentation algorithm of eCognition® software (Baatz et Shäpe, 2000 ; Burnett et Blasche, 2003). The optimal parameters (shape, compactness, smoothness) are performed using two methods: an unsupervised method, the Estimate Scale Parameter (ESP) tool (Drăguţ *et al.*, 2010) and a supervised method, the distance index (Levine et Nazif, 1985 ; Clinton *et al.*, 2010). The supervised method is validated using one hundred and eighty reference polygons randomly selected from the OSM or the BD TOPO ® IGN databases, or digitized from the orthophotoplan (IGN®) (Belgiu and Drăguţ, 2014). In total, 28 parameter combinations were tested to determine the optimal scale, smoothness and compactness values (Tables 4.3 and 4.4).

Table 4.4 : Test of segmentation parameters

Scale	Shape	Compactness
70	0.5;0.9	0.5;0.9
80	0.5;0.9	0.1;0.5;0.9
90	0.5;0.9	0.1;0.5;0.9
100	0.5;0.9	0.5;0.9
110	0.5;0.9	0.5;0.9
120	0.5;0.9	0.5;0.9

Table 4.3 : Optimal segmentation parameters

Site	Scale	Shape	Compactness
Rennes	80	0.9	0.5
Strasbourg	90	0.9	0.1

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Three supervised classification methods are applied to the segmented images: K-Nearest Neighbor (KNN) (Cover et Hart, 1967), Random Forest (RF) (Breiman, 2001) and Support Vector Machine (SVM) (Vapnik, 1998). The classifications are performed using 14 image features with spectral information (mean and standard deviation values), indexes (NDVI, MSAVI, and brightness), geometric information (area, compacity, asymmetry) and textural parameters (Homogeneity and entropy). Spatial post-processing is then conducted by crossing the classifications with the ancillary data (Figure 4.3 - step 2). Seven classes of landcover are considered: building from OpenStreetMap or from BD TOPO ® IGN, network (roads and railways) and water from BD TOPO ® IGN, agricultural parcel from 'Registre Parcellaire Graphique' (RGP), tree, grass and other artificialized surfaces with classification of Pleiades images.

5 Résultats et discussions

5.1 Morphological Urban Area with ancillary data

The maps of the MUA created with the protocol (Figure 4.3 – step 1) are very close to the MUAs provided by the planning agencies in both cities (Figure 4.4). For instance, the MUA of Rennes shows a slight difference (less than 10%) between the surfaces of the two MUAs. The main differences can be explained by scattered housing along some roads, which were aggregated during the layer elaboration. These results show that this semi-automatic method for mapping the MUA can be reproducible and should be adaptable to different types of city.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

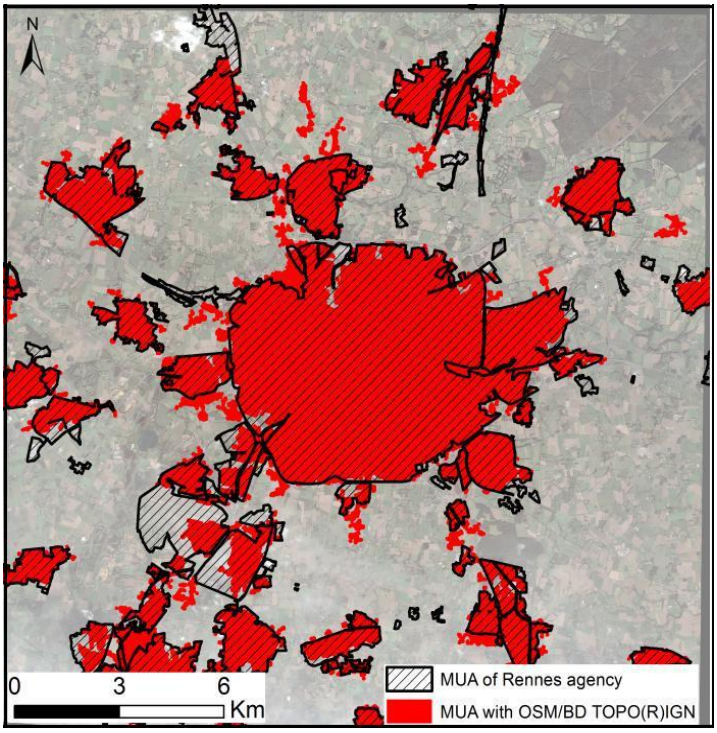


Figure 4.4 : Comparison of MUAs on Rennes The MUA produced using OSM/ BD TOPO ® IGN databases and the MUA provided by the planning agency (AUDIAR).

5.2 Classification results

Kappa values for the three classification algorithms are satisfactory (Table 4.5) with values always superior to 0,7. Though, RF and SVM classifiers give better results than the KNN technique. The best classification result is obtained with the SVM classifier for Strasbourg (Kappa:0.8) and with the RF classifier for Rennes (Kappa:0.79). RF classifier and SVM show greater robustness in some class discrimination (shadows/water, shadow/gray object) (Figure 4.5). Shadow discrimination requires more specific methods, the three classification methods showing the same limits to correctly extract them.

Table 4.5 : Classification Kappa values.

	KNN	**SVM**	**Random Forest**
Strasbourg	**0.72**	**0.80**	**0.78**
Rennes	**0.73**	**0.78**	**0.79**

The performances of classification by class expressed with the F-measures appear unequal (Table 4.6). In general, F-measures are significantly higher than 0.7

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

which express good performances for classification model for both cities. But mistakes exist for classes like scrubs in the two sites due to misclassification with wooded elements. This class is very under-represented in the landscape and few examples are taken into account for the training step. Other classes, like orange areas in Rennes or herbaceous vegetation in Strasbourg, have same problems. Most classifiers under class-imbalance, like SVM or RF, tend to be biased in favour of the majority class, and vice versa, and may underestimate the number of cases belonging to the minority class (He and Garcia, 2009).

Table 4.6 : Classification F-measures.

	Strasbourg (SVM)	**Rennes (RF)**
Water bodies	**0,968**	**0,839**
Wooded areas	**0,914**	**0,87**
Scrubs	**0,142**	**0**
Orange area	**0,869**	**0,25**
Herbaceous areas	**0,591**	**0,817**
Grey area	**0,853**	**0,874**
White areas	**0,667**	**0,776**
Beige areas	**0,757**	**0,704**
Crops	**0,879**	**0,825**
Bare soils	**0,84**	**0,853**
Shadows	**0,808**	**0,766**
Clouds	**0,958**	**0,889**

The nomenclature presented in table 4.2 is organized in 4 levels of detail. In this work, the classification results show that objects are well classified at Level 2 for vegetation and water classes, and at Level 3 for the class "artificial areas". However, the classification failed to identify classes at level 4. This is probably due to the difficulty to extract shape indexes from the segmented images that could be used to refine the classification.



Figure 4.5 : Comparison of the classified images produced in Rennes (a) RGB original image of Rennes, (b) classification map using RF, (c)) classification map using KNN, (d)) classification map using SVM.

The series of metrics are computed at two scales: the MUA and the urban blocks. First, the distribution of urban fabrics is not the same in the two cities (Table 4.7). Dense urban fabrics and individual residential areas are more present in

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Strasbourg whereas specialized urban areas are more numerous in Rennes. Some errors about the identification of urban blocks can be observed because urban block classes were assigned differently in the two cities, i.e. by photo-interpretation and using a regional land cover database respectively for Rennes and Strasbourg. This explains why some small blocks delimited by roads, like places or roundabouts, are affected to urban classes whereas this kind of objects are classified as other objects in the case of Rennes.

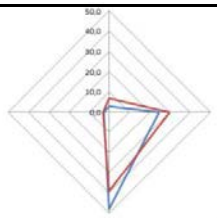
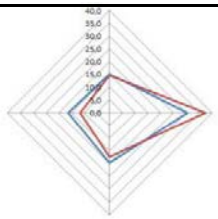
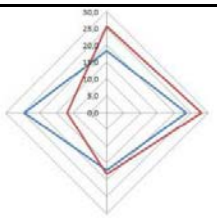
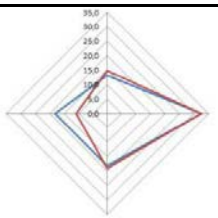
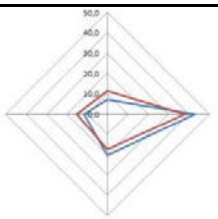
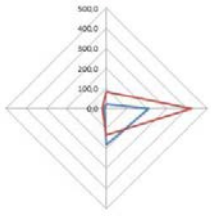
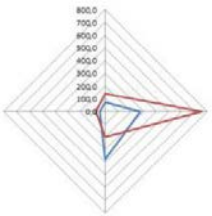
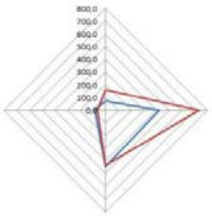
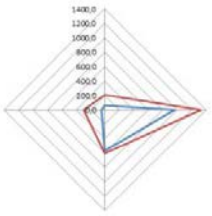
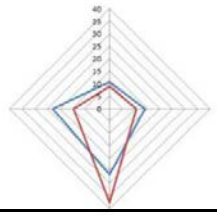
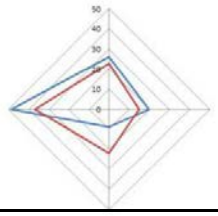
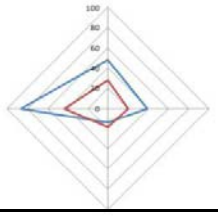
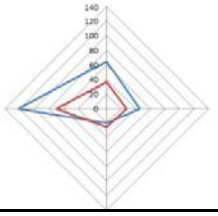
At the urban fabric scale, part of land cover objects in urban blocks appears similar in both cities (Table 4.8). Only the urban fabric with individual houses presents different patterns with more "tree vegetation" in Strasbourg and "grass" in Rennes. Trees in this block are bigger and fewer in Strasbourg than in Rennes. Artificial areas are also larger in Strasbourg, which can be explained by the data source used to of assign the urban blocks to a given class. Moreover, buildings are larger but less numerous in Rennes due to the size of urban blocks in this city (Table 4.7). Urban fabrics in Rennes appear more fragmented for all blocks probably owing to the classification results. The combination of the three metrics presented in table 4.8 allows differentiating urban fabrics based on their composition. First result of unsupervised classification of urban blocks is presented in figure 4.6. The result is encouraging with an overestimation of two classes: 'others surfaces' and mixed UF.

Table 4.7 : Composition of urban blocks

	Mean Area (ha)		Proportion of each class (%)		Number of patches	
	Rennes	Strasbourg	Rennes	Strasbourg	Rennes	Strasbourg
Dense urban fabrics	0.83	1.05	1	4	88 (2%)	520 (11%)
UF with housing blocks	1.08	1.86	12	8	651 (13%)	494 (11%)
UF with individual houses	1.04	1.80	18	26	993 (19%)	1746 (39%)
Specialized urban areas	2.51	1.20	24	6	570 (11%)	296 (6%)
Industrial and commercial areas	5.45	2.68	16	13	177 (3%)	304 (3%)

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 4.8 : Composition of urban fabrics characterized by three metrics

	Dense urban fabrics	UF with housing blocks	UF with individual houses	Specialized urban areas	Industrial and commercial areas
Part of landscape					
Mean Area					
Number of patches					



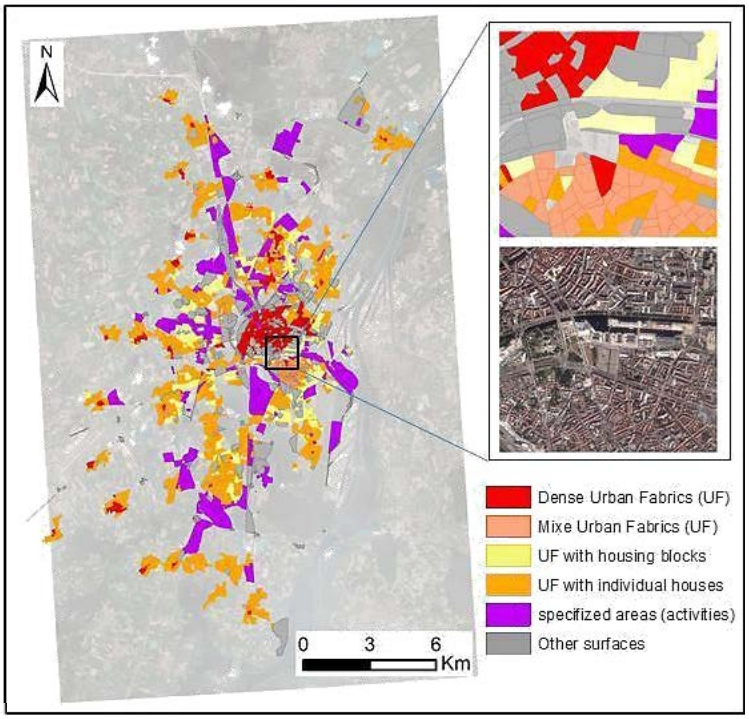


Figure 4.6 : First result of unsupervised classification of urban blocks in Strasbourg with four metrics (% of landcover per class, number of patches, standard deviation of patches and Shannon index).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

6 Conclusions

The proposed methodology in this research based on Pleiades imagery allows producing some information related to MUA and urban fabrics related to grey and green structures. The proposed methods using existing data at different levels in the process produce multi-scale information and showed preliminary good results on Strasbourg and Rennes. Some developments on Brussels have done same results. The spatial analysis of urban fabric could be also completed by others indexes and has to be evaluated on a great number of urban fabrics. However, the same type of approach could also be applied to cities characterized by other morphology development by adapting features selection and composition.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 5 : Comparaison d'images multi-spectrales et super-spectrales pour identifier les espèces d'arbres en milieu urbain

1 Introduction.....116

2 Les données.....119

2.1 La base de données « arbre » de la ville de Rennes.....120

2.2 Les données de télédétection.....123

2.2.1 Méthodologie.....123

2.2.2 Les prétraitements.....124

3 Les traitements.....125

3.1 La détermination de l'importance des variables.....125

3.2 La classification des variables.....126

4 Résultats.....127

4.1 Analyse de l'importance des variables utilisées pour classer les images.....127

4.2 Les résultats des classifications.....129

4.2.1 Analyse de la précision globale des classifications.....129

4.2.2 Analyse des matrices de confusion des classifications effectuées avec les images super-spectrales.....130

5 Discussions.....133

5.1 Contribution des bandes spectrales à la classification des espèces d'arbres.....133

5.2 Contribution des indices de végétation à la classification des espèces d'arbres.....134

5.3 Comparaison des algorithmes de classification.....135

6 Conclusion et perspectives.....136

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

1 Introduction

Les résultats exposés dans le chapitre précédent ont permis de montrer que les images multi-spectrales THRS permettent d'identifier plusieurs classes de végétation, dont la végétation arborée, sans discriminer les espèces d'arbres au sein de cette dernière. Nous aborderons dans ce chapitre la cartographie des espèces d'arbres en ville à partir d'images THRS multi-spectrales et super-spectrales simulées à partir de données hyper-spectrales.

La connaissance des différents types d'espèces d'arbres présents en ville représente un enjeu croissant dans des métropoles où la question du maintien de la végétation est stratégique, notamment d'un point de vue climatique. En effet, le changement climatique implique une sollicitation de plus en plus grande de la végétation urbaine (Roy *et al.*, 2012; Tallis *et al.*, 2011). L'augmentation des températures entraîne une mobilisation accrue de la végétation et des arbres, en particulier pour les réguler, ce qui pose la question de la résilience des arbres aux évolutions du climat. Le suivi de l'état sanitaire des populations arborées en ville devient donc un enjeu majeur pour assurer une relative stabilité des mesures de compensation attendues de la végétation (Yang, 2009). Ce suivi de l'état sanitaire des éléments boisés revêt de plusieurs composantes : Il s'agit aussi bien de suivre le stress hydrique de la plante à des échelles intra et inter-annuelles, pour mesurer l'adaptation du couvert végétal (Nowak *et al.*, 2004), que de déceler le développement de maladies qui pourraient freiner la croissance ou décimer certaines espèces de peuplements (Tubby et Webber, 2010), etc… Le suivi des espèces d'arbres en ville soulève aussi des questions de gestion du territoire. En effet, on constate une augmentation du nombre d'arbres implantés en milieu urbain (Fuller et Gaston, 2009), amplifiant de ce fait les interventions effectuées pour la gestion du patrimoine boisé, qu'il s'agisse du suivi des modes de gestion et d'entretien, de l'état sanitaire des arbres ou encore de la gestion des déchets verts générés par la taille ou le cycle végétatif naturel de l'arbre (feuilles qui tombent), etc.

La cartographie des espèces d'arbres en milieu urbain représente encore aujourd'hui un défi, en raison de la complexité de ce milieu. En effet, la ville présente une très grande diversité de types de végétation arborée qui sont gérés selon des modes eux-mêmes très variés (Threlfall *et al.*, 2016). En effet, dans une très grande majorité des métropoles, la cartographie des espèces d'arbres est aujourd'hui réalisée par des agents municipaux qui référencent sur le terrain le patrimoine arboré du domaine

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

public. Même si ces relevés sont très précis, ils ne permettent pas de connaître de manière exhaustive la diversité du patrimoine arboré et d'en effectuer régulièrement le suivi, puisqu'ils ne couvrent pas le domaine privé.

Les données de télédétection disponibles aujourd'hui offrent un potentiel intéressant pour compléter l'inventaire de la végétation arborée en milieu urbain. En effet, leurs résolutions spatiales et spectrales étant plus précises, celles-ci permettent de produire des informations fines en contexte urbain (Davis et Wang, 2003). Plusieurs études ont montré l'intérêt plus particulier des données de télédétection THRS multi et hyper-spectrales pour la cartographie de la végétation arborée.

Les études utilisant les données THRS multi-spectrales portent davantage sur les forêts urbaines ou les milieux boisés situés à proximité des grandes agglomérations, que sur le patrimoine arboré intra-urbain qui est, de par sa distribution et sa diversité, plus complexe à étudier. De manière générale, les résultats obtenus dans ces études montrent que les données multi-spectrales, de par leur faible résolution spectrale, n'offrent pas de très bons résultats pour la cartographie des espèces d'arbres. Ainsi, Ke et Quackenbush (2007), ont évalué des images Quickbird pour délimiter des couronnes d'arbres. Ils ont ainsi identifié quatre classes de groupes de conifères et une classe regroupant tous les feuillus avec une précision globale de 0,76%. Ils ont tenté, sans succès, d'identifier les espèces d'arbres, l'indice de précision globale diminuant rapidement avec l'augmentation du nombre de classes. La précision de la classification qu'ils ont obtenue est conforme à la précision recensée dans la bibliographie (Chubey *et al.*, 2006 ; Goodwin *et al.*, 2005 ; Johansen et Phinn, 2006 ; Wang *et al.*, 2004 ; Li *et al.*, 2015 ; Xiao et McPherson, 2005). En revanche, Carleer et Wolff (2004), qui ont cartographié sept espèces et des groupes d'arbres dans une forêt de peuplements relativement homogène et dense, localisée à proximité de Bruxelles. Ils ont obtenu une précision globale de 0,85% en utilisant deux images IKONOS acquises au cours de la même année, l'une en pleine période d'activité chlorophyllienne et l'autre en fin de saison végétative. Force est de constater que la résolution spectrale des données multi-spectrales THRS limite la cartographie de la végétation arborée au niveau des espèces, et seulement a un nombre limitées d'entre elles.

La plupart des études de cartographie portant sur les espèces d'arbres en milieu urbain a été réalisée à partir de données hyper-spectrales aéroportées (Mingxing Hu, 2011 ; Jensen *et al.*, 2012 ; Pu et Landry, 2012 ; Launeau, 2017). L'exploitation de ces données permet d'obtenir des classifications avec des indices de précisions plus élevés que ceux obtenus avec des données multi-spectrales pour un nombre de classes plus

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

élevé (identification d'un nombre plus important d'espèces). Par exemple, Jensen *et al.* (2012), en adaptant la méthode de Xiao *et al.* (2004) au milieu urbain, ont évalué le potentiel des données hyper-spectrales AISA+ pour la cartographie de 10 espèces d'arbres sur deux villes de l'Utah aux Etats-Unis, en atteignant une précision globale de 91%. Les erreurs résiduelles de classification des données hyper-spectrales sont dues à la présence de pixels mixtes liés à l'ouverture de la canopée (mélange sol-végétation). Plusieurs études expliquent l'intérêt d'utiliser conjointement des données hyper-spectrales et des données LiDAR THRS pour limiter les effets de ces pixels mixtes et améliorer ainsi la précision des classifications qui peut atteindre 0,96% (Höfle *et al.*, 2012 ; Alonzo *et al.*, 2014 ; Yan *et al.*, 2015). Toutefois, la possibilité de disposer de données hyper-spectrales à THRS (taille du pixel : sub-métrique) et *a fortiori* de données LiDAR acquises au cours de la même saison, sans compter les moyens de les traiter, limite considérablement leur utilisation à large échelle dans un cadre opérationnel. Ainsi, si ces études illustrent l'intérêt des données hyper-spectrales pour la cartographie des espèces d'arbres, elles montrent aussi la limite de leur reproductibilité. En effet, cette dernière est conditionnée par l'acquisition de données aéroportées (seul moyen actuel capable de mettre en œuvre un capteur hyper-spectral avec une très haute résolution spatiale) associé à toutes ses contraintes : conditions aérologiques nécessaires, capacité de revisite, coût, technicité, etc… Ces contraintes limitent aussi considérablement les approches comparatives d'un site urbain à un autre.

La nouvelle génération de capteurs satellitaires super-spectraux HRS (Sentinel-2) ou THRS (Worldview II, Venus) offre des opportunités pour cartographier la végétation arborée en milieu urbain. Ces derniers présentent un nombre de bandes supérieurs à 8 dans les domaines du visible, du proche-infrarouge et plus récemment du moyen infra-rouge, le nombre maximum de 28 bandes étant actuellement atteint avec Worldview-3. Outre un nombre plus élevé de bandes, ces capteurs permettent d'acquérir des informations dans des longueurs d'onde non couvertes par les capteurs multi-spectraux : le violet (0,35-0,4nm), le jaune (0,58-0,63 nm) et le red-edge (0,7-0,77 nm). De nouveaux indices de végétation tels que le NDWI (Normalized Difference Water Index) (Gao, 1996), le NDSI (Normalized Difference Soil Index) (Deng *et al.*, 2015), ou le PSSR (Pigment Specific Simple Ratio) (Blackburn, 1998) ont été élaborés afin de tirer parti des informations contenues dans ces bandes spectrales pour étudier la végétation. Ainsi, Waser *et al.* (2014) et Dan Li *et al*, (2014) ont montré que les indices dérivés de la bande du jaune ou du red-edge de Worldview présentent un certain intérêt pour la cartographie des espèces d'arbres. Waser *et al*, (2014), obtiennent ainsi une précision globale de 83% avec un indice de kappa de 0,78 pour une classification de

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

sept espèces d'arbres à partir de données Worldview II en contexte forestier. De la même manière Dan Li *et al*, (2014), étudie l'apport de ces nouvelles bandes pour la classification de quatre espèces d'arbre en milieu urbain, affichant une précision globale de 80,9% et un indice de kappa de 0,75. En dépit de l'intérêt que présentent ces images super-spectrales, peu d'études ont évalué l'apport de ces nouvelles bandes spectrales et des indices de végétation qui en sont dérivés pour cartographier la végétation arborée en milieu urbain. Par ailleurs, les études qui évaluent le potentiel des images super-spectrales pour cartographier la végétation mettent, pour la plupart, en œuvre une procédure de comparaison de ces images avec des images multi-spectrales. Or, cette procédure est très contrainte par le décalage dans les dates d'acquisition des données, par des différences au niveau des conditions de visée des capteurs, ou encore par des différences de résolutions spatiales entre les capteurs… (Pu et Landry, 2012).

Cette étude a pour objectif d'évaluer le potentiel d'images acquises par des capteurs super-spectraux comparativement à des images acquises par des capteurs multi-spectraux pour cartographier les arbres en milieu urbain. Plus précisément, nous cherchons à évaluer i) l'apport respectif des bandes spectrales du violet, du jaune et du red-edge pour l'identification des espèces d'arbres ii) l'intérêt des indices de végétation calculés avec ces bandes spectrales par rapport aux indices de végétation qui ne les utilisent pas. Afin de s'affranchir des disparités générées sur les images multi-spectrales par des conditions d'acquisition et des résolutions spatiales différentes, nous avons comparé les données THRS multi et hyper-spectrales en utilisant des images simulées à partir de données hyper-spectrales.

2 Les données

Le site d'étude ayant été décrit dans le chapitre 3, nous nous attacherons ici essentiellement à détailler les données exploitées dans cette étude. Les enjeux de reconnaissance des arbres pour la ville de Rennes sont liés essentiellement à la gestion de la végétation. En effet, les agents souhaitent disposer de cartes d'inventaires des arbres afin de faciliter leur entretien et leur suivi sanitaire (évolution de la croissance, suivi des maladies…).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

2.1 La base de données « arbre » de la ville de Rennes

La base de données recensant les arbres de la ville de Rennes référence une grande partie du patrimoine arboré de la ville situé sur le domaine public, qu'il s'agisse des arbres d'alignement, d'ornement ou autres massifs arbustifs. Elle est constituée de près de 100 000 points de mesures *in situ* positionnés très précisément avec des points GPS. Le patrimoine arboré urbain y est décrit à travers près d'une vingtaine de descripteurs, tels que la date d'implantation de l'arbre, l'espèce et le genre auxquels il appartient, son état sanitaire, ou ses modes de gestion… Toutefois, cette base présente une grande hétérogénéité relative d'une part à la nature de l'information recensée (grande diversité des qualificatifs utilisés pour décrire un arbre selon les agents), et d'autre part à la disparité, d'un arbre à l'autre, de la fréquence des relevés effectués. Ainsi, 30% des arbres recensés dans la base seulement sont exploitables à l'échelle de l'espèce (soit environ 30 000 points).

Les arbres sont recensés dans la base selon 3 niveaux : le genre, l'espèce et le cultivar, ce dernier étant une déclinaison de l'espèce en fonction de différents critères essentiellement esthétiques ou techniques (couleur, croissance, résistance à la maladie,…). La figure 5.1 illustre la grande diversité des genres présents sur le territoire rennais (83 genres ont été référencés), mais également la disparité de leur présence sur le territoire. Ainsi, six genres regroupent près de 62% du nombre total d'individus : les tilleuls, les chênes, les érables, les frênes les platanes et les pruniers. Un même genre peut contenir plusieurs espèces qui elles-mêmes peuvent contenir plusieurs types de cultivars. Par exemple, le frêne présente à Rennes une déclinaison en 4 espèces et 7 cultivars (Table 5.1). La base de données de la ville de Rennes ne compte pas moins de 177 espèces et 120 cultivars, soit au total 400 déclinaisons regroupant tous les genres, les espèces et les cultivars. Dans un souci de simplification et de compréhension, nous utiliserons dans cette étude le terme « espèces » comme un terme générique à la place du terme déclinaison.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

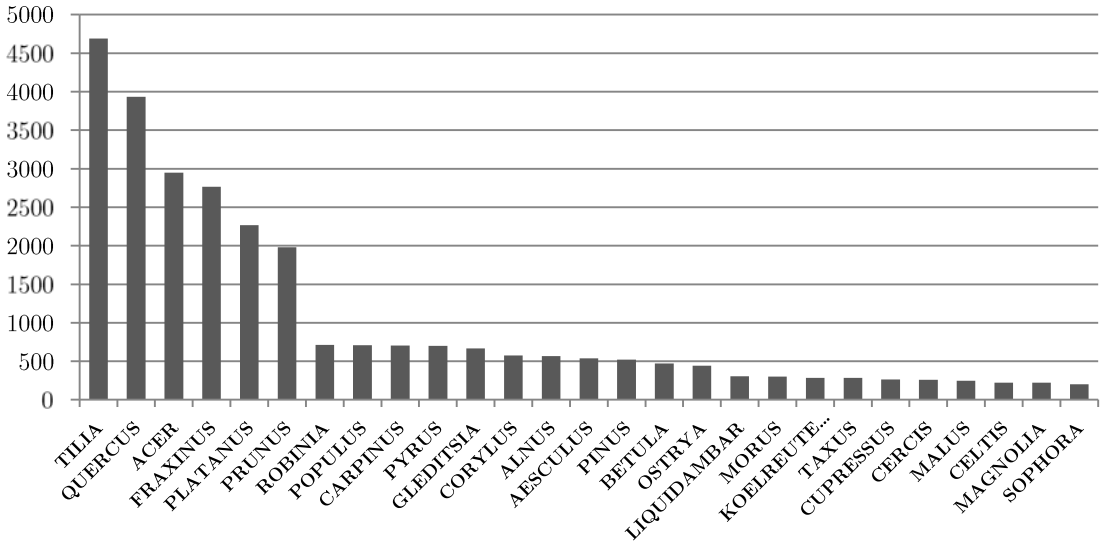


Figure 5.1 Nombre d'individus par genre référencés dans la base « arbre » de la ville (Source : Rennes Métropole)

Table 5.1 : Extrait de la base de données arbre

Genre	Espèce	Cultivar	Nb d'ind.
FRAXINUS	ANGUSTIFOLIA	RAYWOOD	79
	EXCELSIOR	ALTENA	11
		DIVERSIFOLIA	519
		WESTHOF'S GLORIE	433
	ORNUS	FLAME	2
		LOUISE LADY	20
	OXYCARPA	FLAME	139

L'analyse de la base de données montre une grande hétérogénéité au niveau de l'abondance des espèces d'arbres sur le territoire rennais : 14 espèces (sur les 400 recensées) couvrent près de 50% des arbres inventoriés, et moins de 40 espèces en couvrent plus de 75%. Cette hétérogénéité s'exprime également sur le plan spatial avec une distribution très hétérogène des espèces (Figure 5.3). Pour cette étude nous avons retenu les 19 espèces les plus abondantes présentes sur le territoire couvert par l'image hyper-spectrale. Ces 19 espèces représentent 36% des arbres présents dans la base de données de la ville de Rennes, soit 10933 arbres (Figure 5.2).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

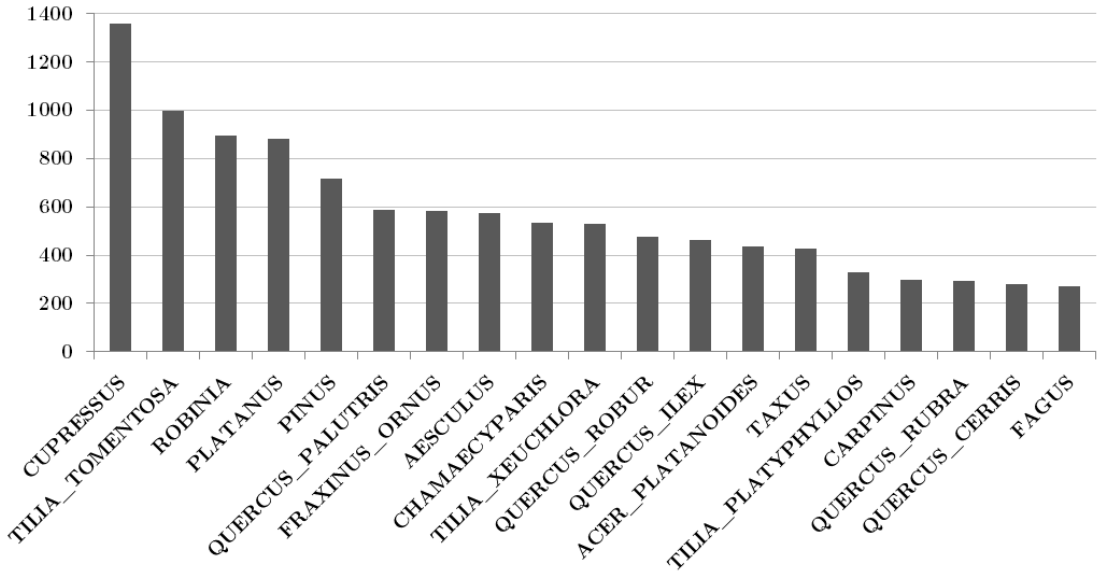


Figure 5.2 Nombre d'individus des 19 espèces retenues pour cette étude

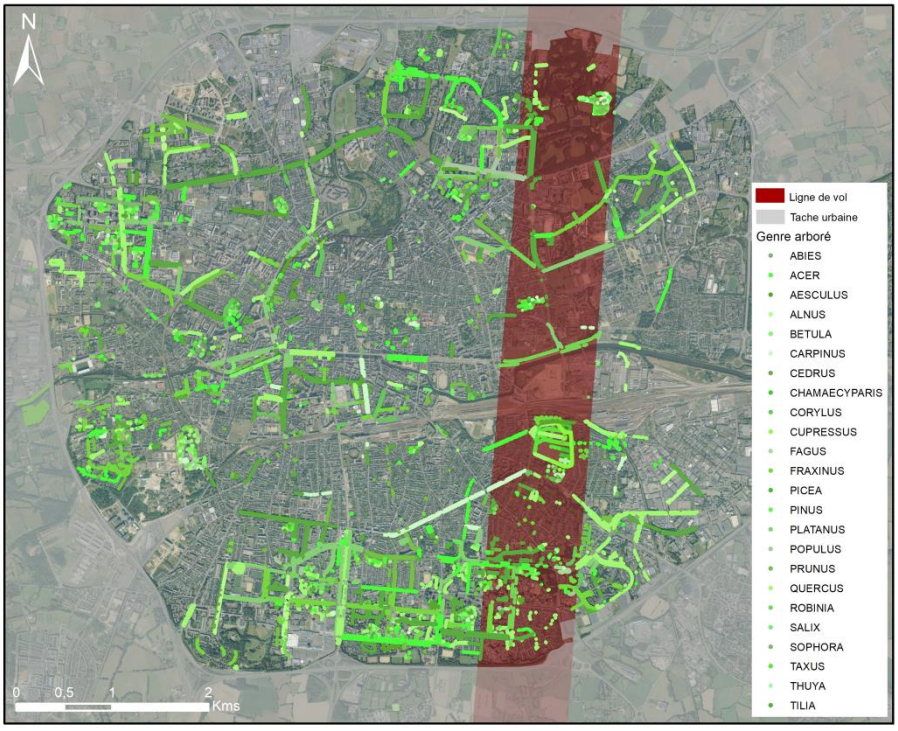


Figure 5.3 Carte des espèces d'arbres recensées dans la base de données arbre de la ville de Rennes avec la trace de vol de la mission hyperspectrale réalisée le 09/09/2015

2.2 Les données de télédétection

Les données hyper-spectrales utilisées ont été acquises lors de la mission aéroportée réalisée dans le cadre du programme VEGIDAR (TOSCA CNES). Pour rappel (chapitre 3), ces données ont été acquises le 21/08/2015 à l'aide d'une caméra hyspex (0,4 – 2,5µm). Seules les données acquises dans le domaine de 0,4 à 1 µm ont été exploitées dans cette étude.

2.2.1 Méthodologie

La méthodologie générale mise en œuvre pour traiter les données est présentée sur la figure 5.4.

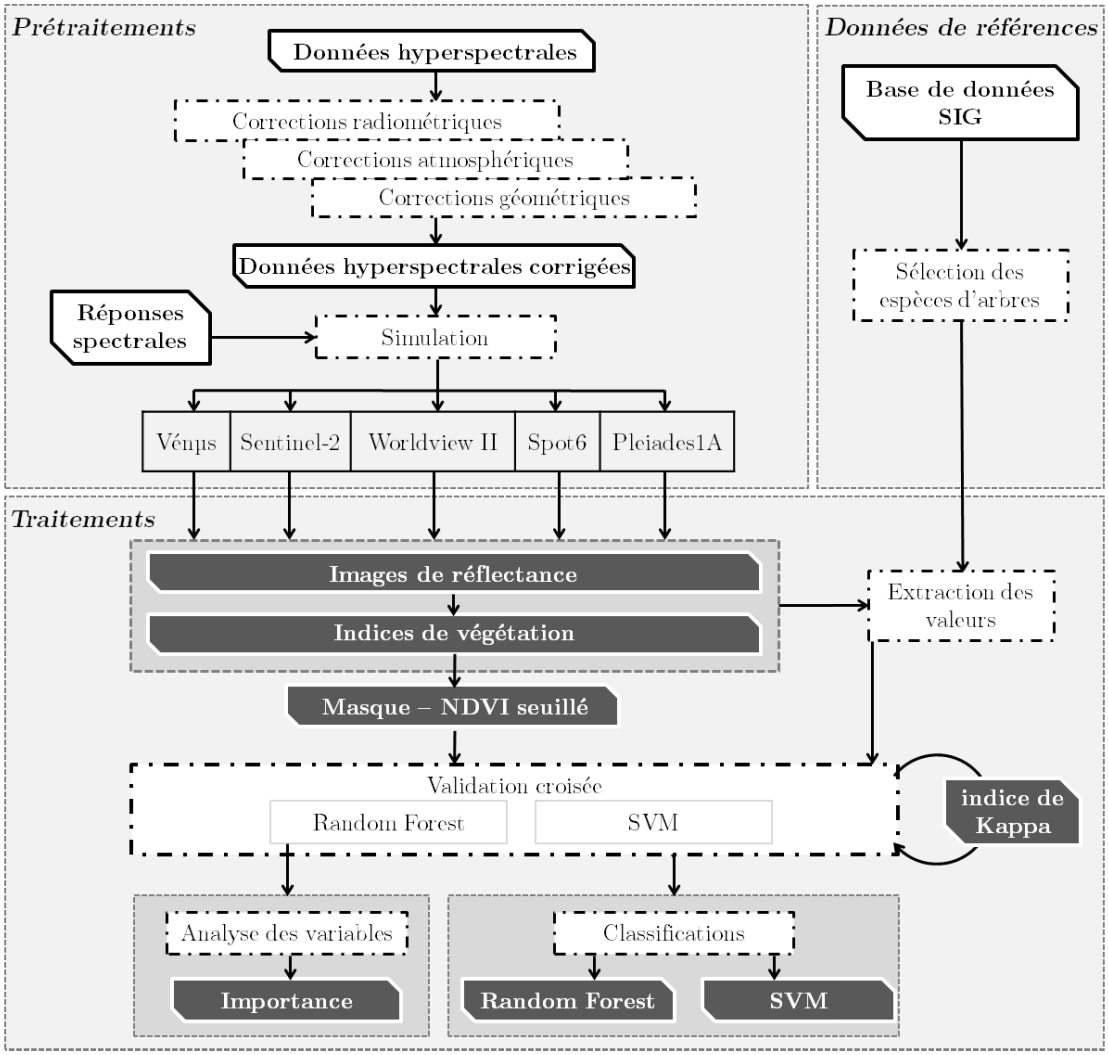


Figure 5.4 Organigramme de traitement des données

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

2.2.2 Les prétraitements

La première phase de prétraitement consiste à corriger les données hyper-spectrales des effets radiométriques, atmosphériques et géométriques. Ces prétraitements sont détaillés dans le chapitre 3.

Les données hyper-spectrales corrigées ont ensuite été utilisées afin de simuler les bandes spectrales des images Vénμs, Sentinel-2, Worldview II, SPOT 6 et Pléiades 1A et ainsi produire deux types de variables : des images de réflectance dans chaque bande spectrale et des indices de végétation calculés à partir de ces dernières.

Plusieurs types d'images multi et super-spectrales ont été simulées à partir des données hyper-spectrales précédemment prétraitées : des images THRS P, SPOT 6, Worldview II d'une part, et des images super-spectrales HRS Sentinel 2 et THRS Vénμs d'autre part. Les caractéristiques spectrales de ces capteurs sont présentées dans la table 3.1 du chapitre 3. Pour simuler les bandes de ces différents capteurs, nous avons d'abord ré-échantillonné spectralement l'image hyper-spectrale à 0,1nm. En effet, à l'origine celle-ci était échantillonnée à 3,7nm, ce qui ne permettait pas de simuler de façon optimale des largeurs de bande des cinq capteurs étudiés. Nous avons d'abord ré-échantillonné l'image en interpolant les valeurs de réflectance de manière linéaire avec le logiciel ENVI 5.1 ® Excellis. Nous avons ensuite appliqué les fonctions de réponse spectrale à l'image interpolée pour obtenir une image de réflectance pour chacune des bandes spectrales des cinq capteurs (Figure 5.5). Notons que toutes les images ont été simulées à 0,8m, qui est la résolution spatiale de l'image hyper-spectrale

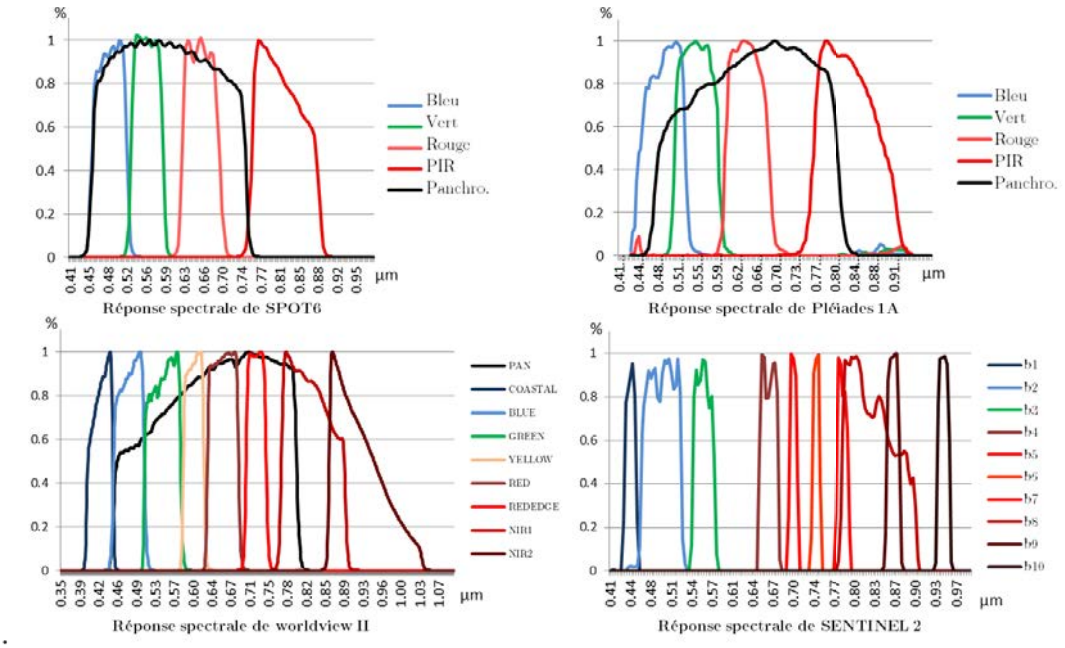


Figure 5.5 Exemple de réponse spectrale pour les capteurs Worldview II et Sentinel 2

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nous avons ensuite calculé certains des indices de végétation les plus couramment utilisés dans la bibliographie (Table 5.2). Tous les indices n'ont pu être calculés pour les cinq capteurs étudiés, car selon la configuration spectrale de ces derniers, ce n'était pas toujours possible (bandes manquantes dans le violet, le jaune et le red-edge).

Table 5.2 : Liste des indices de végétation utilisés

Indice de végétation	Nom complet	Formule	Capteur	Auteur
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$	*	Tucker, 1979
EVI	Enhanced Vegetaion Index	$\frac{2{,}5 * (NIR - Red)}{((NIR + 6 * Red - 7{,}5 * Blue) + 1)}$	*	Huete, 2000
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$	*	Gitelson, 1996
NDWI	Normalized Difference water Index	$\frac{(NIR2 - Coastal)}{(NIR2 + Coastal)}$	**	Gao, 1996
NDSI	Normalized Difference Soil Index	$\frac{(Green - Yellow)}{(Green + Yellow)}$	**	Deng, 2015
NHFD	Non Homogeneous Feature Difference	$\frac{(RedEdge - Coastal)}{(RedEdge + Coastal)}$	**	Wolf, 2010
SIPI	Structure Insensitive Pigment Index	$\frac{(NIR - Coastal)}{(NIR - Red)}$	**	Peñuelas, 1995
PSSR	Pigment Specific Simple Ratio	$\frac{\text{NIR}}{\text{Red}}$	*	Blackburn, 1998
CHL-RED-EDGE	Chlorophyll Red-Edge	$\left(\frac{RedEdge3}{RedEdge1}\right)^{-1}$	**	Lamb, 2002

** capteurs multi-spectraux et super-spectraux, ** Capteurs super-spectraux*

3 Les traitements

3.1 La détermination de l'importance des variables

Nous avons cherché à déterminer le poids respectif des variables (bandes spectrales et indices de végétation) dans le processus d'identification des espèces d'arbres. Pour cela, nous avons choisi d'appliquer l'algorithme Random Forest (RF) sur toutes ces variables, et ce pour chacune des images simulées. L'usage de l'algorithme RF s'est largement répandu ces dernières années dans le domaine de la télédétection (Sommer, 2015), d'une part pour effectuer des classifications d'images, mais aussi afin

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

d'évaluer l'importance de chacune des variables intégrées dans le processus de classification en étudiant l'importance par permutation (Breiman, 2001). Il s'agit de tester aléatoirement, l'importance de la relation de chaque variable avec la variable à expliquer (ici une espèce d'arbre) par permutation aléatoire de la j-IIème variable. Plus l'erreur de classification augmente, plus la variable a un poids fort dans le processus de classification. Cette méthode permet d'analyser la structuration du jeu de données (classement des variables selon leur importance), mais aussi de réaliser une sélection de variables pour optimiser les temps de traitement, plus particulièrement quand les données sont volumineuses (Körting *et al.,* 2013). Dans notre cas, nous n'avons pas procédé à une sélection de variables après avoir analysé leur importance, afin d'évaluer le potentiel de l'ensemble du jeu de données.

3.2 La classification des variables

Les algorithmes RF et Support Vector Machine (SVM) ont été retenus pour réaliser les classifications des espèces d'arbres en mode supervisé.

La méthode de classification par RF utilise un ensemble d'arbres de décision déterminé de manière aléatoire pour classer les éléments de l'image. L'apprentissage du modèle est basé sur une approche de type boostrap -une méthode de sous-échantillonnage d'une population-, qui, en limitant l'apport des particularités de l'échantillon mesuré par la multiplication des sous-échantillons, rend l'apprentissage du modèle plus robuste.

La méthode de classification par SVM est aussi largement utilisée aujourd'hui en télédétection. En effet, elle permet de résoudre des problèmes de classification de type non linéaire, en projetant les données dans un espace à un grand nombre de dimensions et en les séparant par une fonction linéaire (Bruzzone et Persello, 2009). Cette méthode est recommandée quand le nombre d'échantillons utilisés pour la classification est faible. Les données utilisées pour entraîner et valider les classifications ont été sélectionnées dans la base de données arbre de la ville de Rennes en ne conservant que les espèces comptant plus de 40 individus. Ce seuil a été appliqué pour assurer la représentativité des classes dans le processus d'entraînement et de validation des classifications.

Une fois la sélection des échantillons arbres effectuée à partir de la base de données arbres de la ville de Rennes, nous avons procédé à un tri de ces échantillons afin de ne conserver que ceux qui correspondaient à des arbres sur les images. Pour

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

cela, nous avons extrait à partir des images simulées, pour chaque arbre, la médiane de chaque variable (bande spectrale ou indice de végétation) calculée sur le pixel correspondant au relevé arbre et à ses voisins d'ordre un. Avant de calculer ces médianes, les pixels n'étant pas couverts par les arbres dans ces fenêtres de neuf pixels (surfaces artificialisées, sols nus, prairies ou pelouses, ombres…) ont été éliminées en utilisant une image du NDVI seuillée. L'ensemble des arbres a été extrait en seuillant l'image du NDVI avec sa valeur médiane, seules les valeurs supérieures à ce seuil ayant été retenues. Dans les cas où aucune valeur ne répondait à cette règle, seule les valeurs maximum de NDVI ont été retenues (Alonzo *et al.*, 2013).

L'entraînement et la validation de la classification ont alors été réalisés en appliquant la méthode par validation croisée (K-fold Cross validation) (Kohavi, 1995) qui a été implantée dans le logiciel R (package CARET). La sélection de la meilleure classification a été effectuée en utilisant un tirage aléatoire de n-1 sous-échantillons. Dans notre cas, l'échantillonnage a été divisé en 5 sous-échantillons et le tirage aléatoire au sein de ceux-ci a été répété 10 fois. Cette méthode permet de limiter significativement le sur-apprentissage dans la phase d'entraînement de la classification. Les résultats des classifications ont été validés en calculant un indice de Kappa.

4 Résultats

4.1 Analyse de l'importance des variables utilisées pour classer les images

L'analyse de l'importance des variables utilisées pour classer les images montre l'apport des indices de végétation pour la classification des arbres, et ce quel que soit l'image considérée (Figure 5.6). En effet, on constate que la variable la plus importante est toujours un indice de végétation. Il s'agit de l'EVI pour SPOT 6 et Pléiades, du NDWI pour Sentinel-2 et Worldview 2, et du NHFD pour Vénμs. Ces indices sont tous dérivés de ratios intégrant le proche-infrarouge et la bande du bleu ou du « violet ».

Si l'on considère les 5 variables les plus importantes pour les images étudiées, on observe qu'au moins trois variables sur cinq sont des indices de végétation, contre deux bandes spectrales. Si les indices diffèrent d'un capteur à l'autre, les indices NDWI, EVI, GNDVI et NHFD sont classés dans les cinq variables les plus importantes pour toutes les images. A l'inverse, on observe un apport assez peu significatif du NDVI et ce quel que soit l'image considérée. Nous pouvons également souligner l'importance des indices

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

dérivés de la bande du « violet » (NHFD, NDWI) et qui ont une importance de 2,5 à 5,6 fois supérieure aux indices suivants en ordre d'importance.

Par ailleurs, si les bandes spectrales les plus importantes diffèrent aussi d'une image à l'autre, la bande du vert est systématiquement présente dans la liste des cinq variables les plus importantes, et ceci pour toutes les images. Elle apporte une information significativement plus importante (facteur de 1,2 à 2,1 selon l'image considérée) que la bande spectrale classée deuxième en ordre d'importance. A l'inverse, on observe la faible importance du proche infrarouge pour toutes les images.

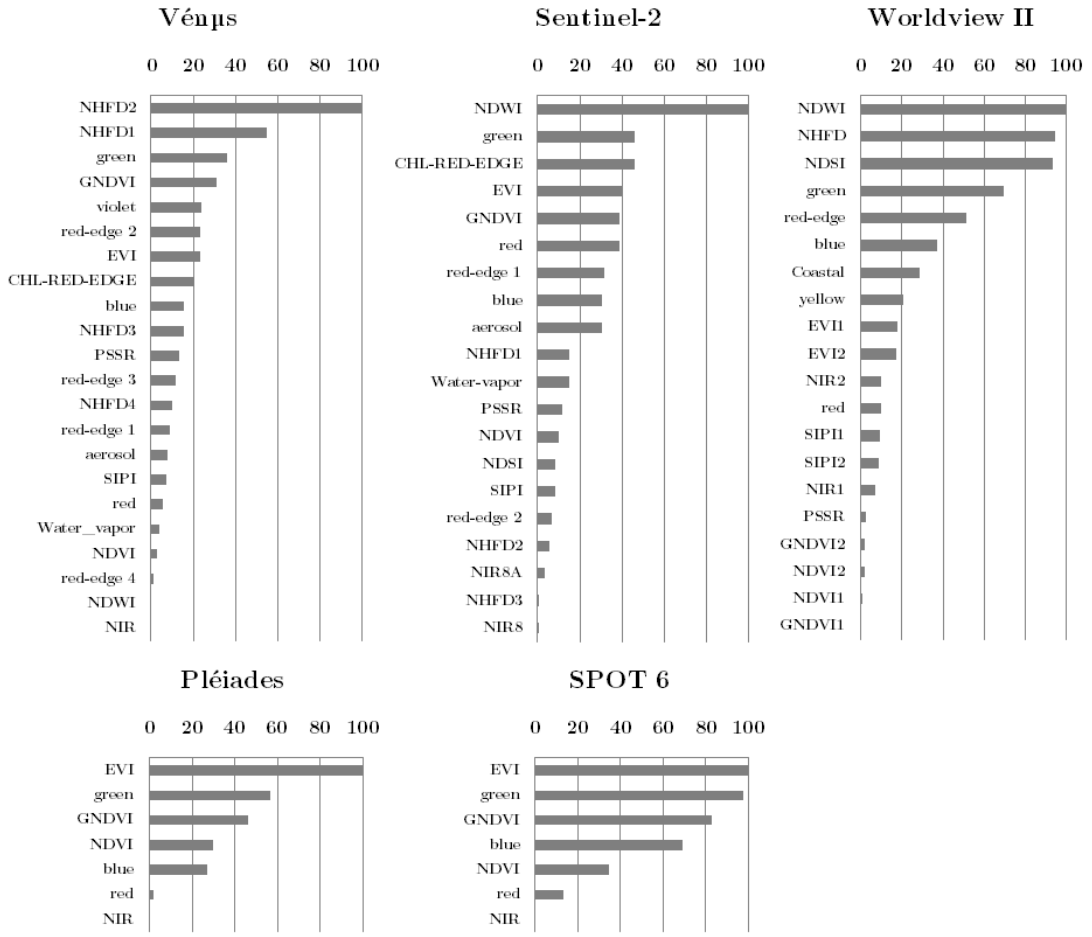


Figure 5.6 Graphique de distribution de l'importance des variables utilisées pour les classifications pour les cinq images étudiées

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

4.2 Les résultats des classifications

4.2.1 Analyse de la précision globale des classifications

Les résultats obtenus pour les 19 classes d'espèces d'arbres étudiées sont présentés dans la table 5.3.

Une première lecture du tableau montre que les résultats produits avec l'algorithme SVM sont légèrement supérieurs à ceux obtenus avec l'algorithme RF, et ceci pour tous les capteurs. Les indices de kappa varient de 0,53 à 0,61 pour RF et de 0,55 à 0,71 pour SVM.

Table 5.3 : Qualité des classifications par mode et type de classification pour chaque capteur

		RF		SVM	
Capteur	**Classification**	**OA**	**Kappa**	**OA**	**Kappa**
Vénμs	Données Spectrales	0,63	0,61	0,73	0,71
	Données spectrales et indice de végétation	0,65	0,62	0,73	0,72
Sentinel-2	Données Spectrales	0,62	0,60	0,72	0,70
	Données spectrales et indice de végétation	0,62	0,60	0,73	0,71
WV2	Données Spectrales	0,60	0,58	0,69	0,67
	Données spectrales et indice de végétation	0,62	0,60	0,69	0,67
SPOT	Données Spectrales	0,55	0,52	0,58	0,56
	Données spectrales et indice de végétation	0,56	0,53	0,59	0,56
Pléiades	Données Spectrales	0,54	0,51	0,58	0,56
	Données spectrales et indice de végétation	0,56	0,53	0,58	0,55

La comparaison des résultats obtenus pour les cinq images étudiées montre un réel apport du mode super-spectral pour la détermination des différentes espèces d'arbres comparativement au mode multi-spectral. L'image présentant les meilleurs résultats est Vénμs, avec un indice OA de 0,73 et un indice de kappa de 0,72. A l'inverse, la classification effectuée avec l'image Pléiades, avec un indice OA de 0,56 et un indice de kappa de 0,53, est la moins bonne. La différence entre les classifications réalisées avec les images SPOT et Pléiades, qui présentent les résultats les moins bons, toutes configurations considérées, n'est pas significative, les indices de précisions (OA et Kappa) étant quasiment égaux. L'analyse des résultats obtenus avec les images super-spectrales montre une différence notable entre les classifications effectuées avec

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

les images Vénµs et sentinel-2 d'une part et l'image Worldview II d'autre part. Les résultats obtenus avec les images Vénµs et Sentinel-2 sont relativement similaires, avec respectivement des indices kappas de 0,72 et 0,71. Les résultats obtenus avec l'image Worldview II sont légèrement moins bons, avec un kappa de 0,67.

4.2.2 Analyse des matrices de confusion des classifications effectuées avec les images super-spectrales

L'analyse des indices de précision (Figure 5.7) des trois meilleures classifications (Figure 5.8) obtenues avec les images super-spectrales montrent une forte hétérogénéité en fonction des espèces considérées : Les indices de précision par classe évoluent de 32,4% (*Carpinus betulus*) à 90,5% (*Cupressus*) pour Vénµs, de 40,4% (*Carpinus betulus*) à 92,4% (*Cupressus*) pour Sentinel-2 et enfin de 32,7% (*Carpinus betulus*) à 91,1% (*Cupressus*) pour Worldview II. Les résultats obtenus pour les trois images sont relativement similaires pour les espèces les mieux classées (surtout pour Vénµs et Sentinel-2). Une différence notable entre Vénµs et les deux autres images est observée pour les espèces les moins bien classées (Précision < 60%), Vénµs offrant systématiquement de meilleurs résultats.

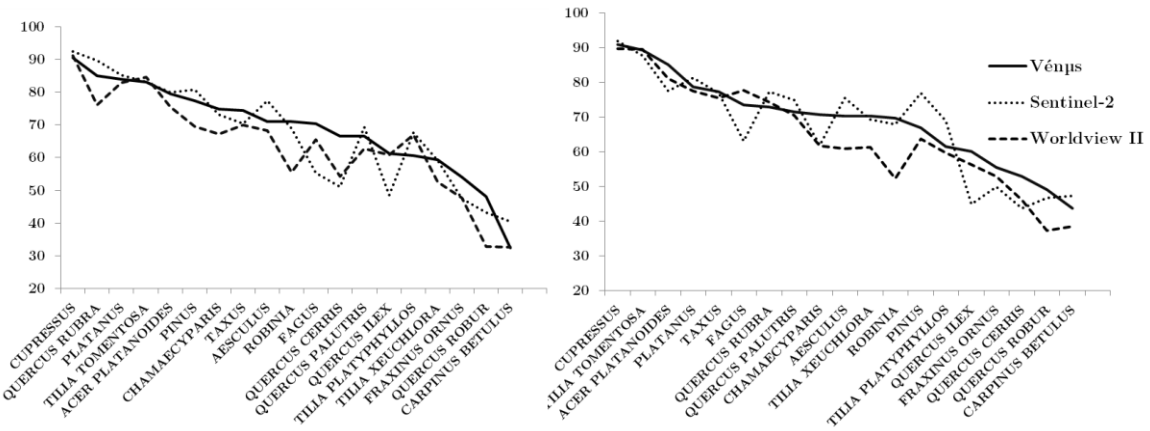


Figure 5.7 Indices de précision de la meilleure classification par espèce d'arbres obtenue avec les images super-spectrales, avec les erreurs de sous-estimations en (a) et les erreurs de sur-estimations en (b)

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

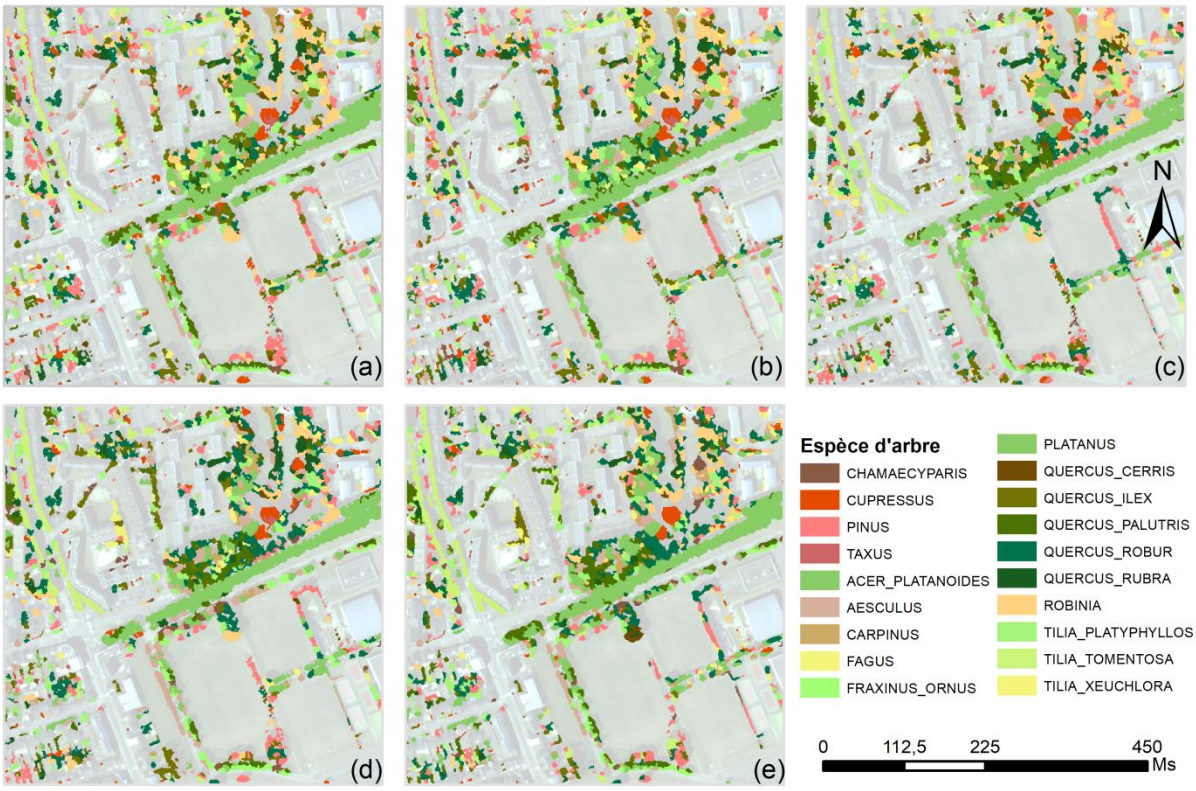


Figure 5.8 Extrait des meilleures classifications SVM pour (a) Pléiades, (b) SPOT 6, (c) Worldview II, (d) Sentinel-2, (e) Vénμs

L'analyse des matrices de confusion montre aussi que trois groupes d'espèces ne sont pas bien discriminés : les cyprès et conifères à épines denses regroupant le *carpinus betulus*, *chamaecyparis* et *taxus betula*, les chênes regroupant les *quercus cerris*, *ilex*, *plalutris*, *robur* et *rubra*, et les tilleuls regroupant les *tilia platyphyllos*, *tomentosa* et *xeuclora* (Figure 5.9, encadré noir). Nous pouvons également noter des confusions entre certaines espèces comme le *robinia* ou le *fraxinus ornus*, qui présentent des erreurs de sous-estimation respectivement de 55,4% et 47,6% et de sur-estimation respectivement de 52,2% et 52,9%. Contrairement aux erreurs des trois groupes d'espèces précédemment cités, qui sont surtout des erreurs de sous-estimation, les erreurs relatives à ces espèces sont essentiellement des erreurs de sur-estimation.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Matrice de confusion Venus / SVM / Mode spectrale & indices

	ACER PLATANOIDES	AESCULUS	CARPINUS BETULUS	CHAMAECYPARIS	CUPRESSUS	FAGUS	FRAXINUS ORNUS	PINUS	PLATANUS	QUERCUS CERRIS	QUERCUS ILEX	QUERCUS PALUTRIS	QUERCUS ROBUR	QUERCUS RUBRA	ROBINIA	TAXUS	TILIA PLATYPHYLLOS	TILIA TOMENTOSA	TILIA XEUCHLORA	Préd. (%)
ACER PLATANOIDES	578	17	5	0	0	0	28	0	13	0	13	10	1	7	8	0	0	0	0	85.0
AESCULUS	22	669	47	5	0	30	75	9	29	0	1	10	13	0	0	4	36	1	0	70.3
CARPINUS BETULUS	15	40	165	9	0	23	31	9	4	7	7	38	10	3	7	0	1	1	8	43.7
CHAMAECYPARIS	6	18	27	640	46	1	29	21	0	0	5	17	0	0	5	47	10	14	21	70.6
CUPRESSUS	0	1	0	57	2024	0	0	11	0	0	10	0	7	10	27	58	1	24	0	90.8
FAGUS	0	26	35	0	0	317	6	0	3	0	0	1	14	0	5	0	21	0	3	73.5
FRAXINUS ORNUS	25	45	34	22	13	24	524	14	82	12	28	20	6	0	0	10	26	22	38	55.4
PINUS	0	11	24	39	44	0	17	936	7	0	56	11	68	0	97	11	11	22	47	66.8
PLATANUS	19	18	38	0	0	5	76	7	1233	18	0	108	0	0	0	0	1	30	15	78.6
QUERCUS CERRIS	0	0	13	0	0	0	5	7	4	313	59	3	63	5	96	0	2	11	11	52.9
QUERCUS ILEX	4	0	26	0	16	0	59	44	1	53	472	19	30	0	38	0	11	0	13	60.1
QUERCUS PALUTRIS	17	23	15	7	1	12	27	3	78	1	10	652	4	20	19	0	4	19	1	71.4
QUERCUS ROBUR	13	27	48	4	16	11	13	59	1	27	35	28	370	12	75	0	3	0	12	49.1
QUERCUS RUBRA	19	8	0	2	10	0	0	0	6	10	0	54	18	425	11	2	0	19	0	72.8
ROBINIA	0	1	11	10	34	3	24	73	0	29	40	0	144	10	1050	17	5	29	27	69.7
TAXUS	0	8	0	43	25	0	26	1	0	0	0	0	0	0	18	507	9	0	20	77.2
TILIA PLATYPHYLLOS	8	27	11	9	0	7	1	1	7	0	2	8	7	0	7	8	327	35	67	61.5
TILIA TOMENTOSA	0	1	0	4	8	10	5	4	2	0	9	1	3	8	0	10	23	1378	78	89.2
TILIA XEUCHLORA	1	1	11	4	0	7	24	11	0	0	23	0	11	0	18	7	49	55	525	70.3
Ref. (%)	79.5	71.1	32.4	74.9	90.5	70.4	54.0	77.4	83.9	66.6	61.3	66.5	48.1	85.0	70.9	74.4	60.6	83.0	59.3	

Matrice de confusion SENTINEL / SVM / Mode spectrale & indices

	ACER PLATANOIDES	AESCULUS	CARPINUS BETULUS	CHAMAECYPARIS	CUPRESSUS	FAGUS	FRAXINUS ORNUS	PINUS	PLATANUS	QUERCUS CERRIS	QUERCUS ILEX	QUERCUS PALUTRIS	QUERCUS ROBUR	QUERCUS RUBRA	ROBINIA	TAXUS	TILIA PLATYPHYLLOS	TILIA TOMENTOSA	TILIA XEUCHLORA	Préd. (%)
ACER PLATANOIDES	578	34	28	2	0	0	40	1	20	6	17	7	0	11	1	0	2	0	0	77.4
AESCULUS	25	722	49	1	0	43	57	1	15	0	0	12	9	0	0	3	7	9	5	75.4
CARPINUS BETULUS	24	30	204	2	7	42	27	13	7	7	3	23	20	0	17	0	1	5	0	47.2
CHAMAECYPARIS	10	23	23	615	41	0	56	24	0	0	7	19	1	1	10	82	9	46	27	61.9
CUPRESSUS	0	1	8	52	2057	0	6	1	0	0	10	1	8	9	28	46	0	11	0	91.8
FAGUS	0	11	47	2	0	247	39	0	0	0	0	11	2	0	2	0	24	4	3	63.0
FRAXINUS ORNUS	31	23	33	35	3	42	456	20	66	11	47	29	1	0	11	21	27	17	41	49.9
PINUS	1	5	11	31	17	0	28	963	9	0	24	0	62	0	51	4	1	17	30	76.8
PLATANUS	18	6	14	0	0	11	69	9	1239	13	1	93	9	4	0	0	0	16	22	81.3
QUERCUS CERRIS	0	0	6	0	4	0	3	9	3	237	79	0	50	0	108	0	13	19	13	43.6
QUERCUS ILEX	17	0	17	0	8	0	63	31	0	53	369	22	84	0	68	6	34	22	27	44.9
QUERCUS PALUTRIS	8	24	11	12	0	13	27	0	60	3	8	673	15	10	20	0	5	0	9	74.9
QUERCUS ROBUR	1	25	17	20	17	7	8	43	5	26	84	32	330	4	85	0	0	1	1	46.7
QUERCUS RUBRA	10	1	0	10	17	0	1	0	8	9	0	39	10	443	22	3	0	1	0	77.2
ROBINIA	0	0	13	0	24	0	10	50	0	99	57	0	152	5	1013	9	0	32	29	67.8
TAXUS	0	1	0	43	25	0	30	0	0	0	0	0	0	0	11	470	10	2	20	76.8
TILIA PLATYPHYLLOS	0	5	22	2	0	21	0	0	8	0	25	10	0	0	0	0	362	24	47	68.8
TILIA TOMENTOSA	0	5	1	9	5	11	8	8	10	1	10	0	0	0	12	13	11	1365	87	87.7
TILIA XEUCHLORA	0	16	1	5	0	9	32	19	5	0	21	0	11	7	12	10	29	53	520	69.3
Ref. (%)	79.9	77.5	40.4	73.1	92.4	55.4	47.5	80.8	85.2	51.0	48.4	69.3	43.2	89.7	68.9	70.5	67.7	83.0	59.0	

Matrice de confusion Worldview II / SVM / Mode spectrale & indices

	ACER PLATANOIDES	AESCULUS	CARPINUS BETULUS	CHAMAECYPARIS	CUPRESSUS	FAGUS	FRAXINUS ORNUS	PINUS	PLATANUS	QUERCUS CERRIS	QUERCUS ILEX	QUERCUS PALUTRIS	QUERCUS ROBUR	QUERCUS RUBRA	ROBINIA	TAXUS	TILIA PLATYPHYLLOS	TILIA TOMENTOSA	TILIA XEUCHLORA	Préd. (%)
ACER PLATANOIDES	545	4	23	0	0	3	39	0	18	6	11	14	0	1	6	0	2	0	0	81.1
AESCULUS	21	640	53	22	0	51	62	23	51	0	0	34	11	3	0	16	49	13	2	60.9
CARPINUS BETULUS	14	15	165	11	3	20	30	20	1	0	19	38	22	4	48	0	6	1	11	38.6
CHAMAECYPARIS	10	35	33	574	51	0	46	23	0	0	1	10	0	0	6	70	9	31	31	61.7
CUPRESSUS	0	0	0	81	1993	0	13	22	0	0	10	0	7	10	31	49	0	8	0	89.6
FAGUS	7	21	11	0	0	292	3	0	0	0	0	6	4	0	0	0	15	12	5	77.7
FRAXINUS ORNUS	24	39	19	27	17	20	457	0	68	10	24	19	14	0	10	21	14	17	64	52.9
PINUS	7	9	27	46	35	0	6	839	1	0	24	10	80	0	192	0	1	4	37	63.7
PLATANUS	26	37	13	0	0	0	74	6	1205	20	9	123	1	7	1	0	5	19	9	77.5
QUERCUS CERRIS	0	0	19	0	7	0	15	3	8	252	68	6	74	3	77	0	0	10	6	46.0
QUERCUS ILEX	13	3	44	0	3	0	54	24	3	46	463	16	66	0	57	1	12	0	17	56.3
QUERCUS PALUTRIS	16	25	7	0	0	22	20	0	77	7	18	610	10	30	19	0	1	0	4	70.4
QUERCUS ROBUR	18	25	22	4	8	4	14	51	0	44	31	32	251	31	105	0	2	10	23	37.2
QUERCUS RUBRA	2	7	0	0	15	0	0	0	6	3	0	47	14	377	35	2	0	0	0	74.2
ROBINIA	3	8	38	19	30	10	26	180	0	77	70	0	178	19	815	11	16	38	24	52.2
TAXUS	0	6	0	48	19	0	29	0	0	0	0	0	0	0	19	464	2	8	20	75.4
TILIA PLATYPHYLLOS	12	40	14	12	0	5	8	0	7	0	7	6	8	0	8	0	352	25	87	59.6
TILIA TOMENTOSA	0	5	2	3	7	7	1	1	10	0	0	0	7	9	12	13	10	1391	78	89.4
TILIA XEUCHLORA	5	18	15	7	0	12	63	16	0	0	7	0	16	1	29	16	30	57	463	61.3
Ref. (%)	75.4	68.3	32.7	67.2	91.1	65.5	47.6	69.5	82.8	54.2	60.8	62.8	32.9	76.2	55.4	70.0	66.9	84.6	52.6	

ACER PLATANOIDES, AESCULUS, CARPINUS BETULUS, CHAMAECYPARIS, CUPRESSUS, FAGUS, FRAXINUS ORNUS, PINUS, PLATANUS, QUERCUS CERRIS, QUERCUS ILEX, QUERCUS PALUTRIS, QUERCUS ROBUR, QUERCUS RUBRA, ROBINIA, TAXUS, TILIA PLATYPHYLLOS, TILIA TOMENTOSA, TILIA XEUCHLORA

Figure 5.9 Matrices de confusion des trois meilleures classifications des espèces d'arbres pour les trois capteurs super-spectraux.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

5 Discussions

5.1 Contribution des bandes spectrales à la classification des espèces d'arbres

L'analyse comparative des résultats des classifications des espèces d'arbres appliquées sur des images simulant les résolutions spectrales des capteurs Vénus, Sentinel-2, Worldview II, SPOT6 et Pléiades, montrent l'apport significatif des bandes présentes dans les images super-spectrales, non comprises dans les images multi-spectrales (violet, jaune, red-edge), pour la cartographie des espèces d'arbres en milieu urbain. Elle confirme les résultats obtenus dans des études qui ont évalué des images super-spectrales (Dalponte *et al.*, 2009 ; Pu et Landry, 2012 ; Qi Chen, 2011). Par exemple, Dan Li *et al.*, 2014 ont montré l'apport important des bandes du jaune et du red-edge dans le cadre de travaux sur la cartographie de quatre espèces d'arbres sur un quartier de la ville de Beijing. De même, les travaux de Pu and Landry, 2012 illustrent l'importance relative du jaune et du red-edge pour la classification de 11 espèces d'arbres sur le site de Tampa (USA-FL) à partir de données hyper-spectrales.

Dans le cadre de ces travaux, nous avons travaillé à la classification de 19 espèces d'arbres. Les résultats que nous avons obtenus confirment aussi ceux de travaux antérieurs en mettant en évidence l'apport de la bande du vert (Alonzo *et al.*, 2013 ; Pu, 2009) et ce indépendamment du type d'image considérée (multi ou super-spectrale). Ce caractère discriminant du domaine spectral du vert est lié à l'expression du mécanisme de capture de l'oxygène par certains pigments caroténoïdes (cycle de xanthophylle) (Ustin *et al.*, 2009). Notre étude confirme aussi les travaux de Pu (2009) qui met en évidence l'intérêt de la bande du red-edge pour discriminer des espèces d'arbres, systématiquement présente dans les trois variables spectrales les plus importantes. De la même manière, nos résultats confortent les observations effectuées par Dalponte *et al.*, (2013) concernant le faible intérêt du proche infrarouge pour la discrimination des classes d'arbres en ville. En effet, nous constatons un apport très peu significatif du proche-infrarouge dans la discrimination des classes, ce qui peut s'expliquer par la grande variance intra-classe de cette variable. Cette dispersion des valeurs de réflectance dans le proche-infrarouge peut être due à la date d'acquisition de l'image qui a eu lieu en fin de période végétative, ce qui entraîne une grande diversité des stades phénologiques et des niveaux d'activité chlorophyllienne.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

5.2 Contribution des indices de végétation à la classification des espèces d'arbres

Nos résultats mettent en exergue le faible intérêt du NDVI, et ce quel que soit la classification considérée. En effet, le NDVI étant situé systématiquement dans les dernières valeurs d'importance calculées avec l'algorithme random forest, il n'apporte pas d'informations essentielles à la classification. Ceci conforte les résultats obtenus par Liu *et al.,* (2017) qui ont montré que le NDVI participe très peu à la classification des 15 espèces d'arbres qu'ils ont étudiés.

Contrairement au NDVI, les indices informant sur l'état de l'activité pigmentaire des espèces (CIPI, PSSR, Chl-red-edge) participent pour partie à la classification. Toutefois, ces derniers ne peuvent pas être considérés comme des variables essentielles, excepté l'indice Chl-red-edge qui participe significativement à la classification effectuée avec Sentinel-2. Cet indice, qui est calculé à partir du ratio entre deux bandes du red-edge, informe sur l'intensité de l'activité chlorophyllienne. Cette observation confirme le constat effectué par Liu *et al.*, (2017) et Jensen *et al.*, (2009, 2012) qui ont montré l'importance d'indices calculés à partir de bandes centrées sur l'absorption de l'eau ou de certains pigments.

Ainsi, notre étude met en évidence que les indices participant le plus à la classification effectuée avec RF, sont les indices calculés avec des ratios proche-infrarouge/red-edge et vert/ « violet » (indices NDWI, NHFD et GNDVI). Ces derniers, issus des bandes entre 400 et 450nm, sont rarement utilisés pour la cartographie de la végétation en ville. Immitzer *et al.* (2012) ont obtenu des résultats similaires aux nôtres. Ils montrent en effet, que la meilleure combinaison de bandes pour réaliser une classification de 10 espèces d'arbres sur un site forestier, avec un algorithme de type RF, est composée du « violet », du vert, et des NIR1 et NIR2. Néanmoins, ils soulignent que l'apport du « violet » reste très limité du fait de sa corrélation avec le bleu (R^2= 0,88). De même, Clark et Roberts (2012) soulignent l'intérêt des indices dérivés de la bande du bleu pour la caractérisation des espèces d'arbres en forêt tropicale. Ils montrent également que ces indices sont particulièrement importants lorsque la classification est réalisée à l'échelle de la couronne de l'arbre.

Enfin, nous pouvons noter que, malgré un apport significatif des indices de végétation dans l'analyse des variables d'importances, ceux-ci apportent peu dans l'amélioration de la précision globale des classifications, l'utilisation exclusive des images de réflectance permettant d'obtenir de très bons résultats.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

5.3 Comparaison des algorithmes de classification

Dans le cadre de ces travaux, nous avons comparé les algorithmes de classification RF et SVM. De manière générale, nous avons obtenu de meilleurs résultats avec le SVM. Ces résultats confortent les travaux de Dalponte *et al.*, (2013) qui ont montré la supériorité du SVM sur le RF et le GML (Gaussian maximum likelihood) pour discriminer 19 classes d'espèces d'arbres et ce, indépendamment des variables prise en compte dans la classification.

La comparaison entre les classifications obtenues avec des images super-spectrales et multi-spectrales atteste d'un apport significatif des bandes du « violet », du jaune et du red-edge, ainsi que des indices dérivés à partir de celles-ci dans la classification (+0,1 à +0,17 de la valeur de l'indice de kappa). Ces résultats confirment les conclusions de Immitzer (2012) et de Novack *et al.* (2011) qui montraient un apport dans les classifications des nouvelles bandes spectrales du capteur Worldview II en comparaison de capteurs multi-spectraux.

Nos résultats confortent également les observations réalisées par, Waser *et al.*, (2014), qui illustrent l'importance des indices de végétation issus des nouvelles bandes spectrales des capteurs super-spectraux pour la détection du frêne en milieu forestier, et plus particulièrement pour la détection des dommages causés par le *Hymenoscyphus pseudoalbidus* (champignon ravageur du *Frêne).* Il montre que les indices intégrant les bandes du vert ou du bleu avec le proche-infrarouge permettent une meilleure détection de 7 espèces d'arbres et améliore la discrimination des individus infectés.

Les résultats des classifications obtenues avec les images super-spectrales montrent des différences selon les images utilisées. Les classifications effectuées avec Worldview II présentent des indices de précisions globalement inférieurs de presque 0,1 par rapport aux classifications effectuées avec Vénμs et sentinel-2. Cette différence peut être liée au fait que les bandes spectrales de ces derniers sont plus étroites, et par conséquence, moins corrélées que celles de Worldview II. Cette résolution radiométrique plus fine améliorerait la séparabilité des classes.

Les résultats soulignent aussi la forte hétérogénéité des précisions des classifications selon les espèces. Comme la méthode utilisée pour entraîner et valider les classifications (k-fold Cross validation) limite les effets de l'échantillonnage et de l'apprentissage, il est peu probable que ces différences soient liées à la phase d'entraînement du modèle. Cette forte hétérogénéité peut être due à la présence de pixels mixtes. Trois espèces, deux feuillus (Fraxinus, Robinia) et un conifère (Pinus),

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

qui présentent des niveaux de confusion élevés avec d'autres espèces, sont caractérisées par des degrés d'ouverture de la canopée importants : la structure des branches comme le type de feuilles des frênes et des robiniers, ou le faible taux de fermeture de la canopée du pin, introduisent un retour important des éléments sous-jacents présents au sol sous la canopée. Ce type de conclusion est courant pour ce type d'espèces qui génèrent des pixels mixtes sur les images.

6 Conclusion et perspectives

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'apport des données de télédétection super-spectrales comparativement à des données multi-spectrales pour la cartographie des espèces d'arbres en ville. Pour cela, nous avons simulé des images Vénµs, Sentinel-2, Worldview II, SPOT 6 et Pléiades à partir de données hyper-spectrales acquises sur le site de Rennes.

Cette approche a permis d'illustrer l'intérêt des données super-spectrales comparativement aux données multi-spectrales, puisque nous avons obtenu des résultats de classification systématiquement supérieurs avec les données super-spectrales (19 espèces d'arbres classées avec un indice de Kappa compris entre 0.69 et 0.73 avec les images super-spectrales contre 0.58 à 0,59 avec les images multi-spectrales).

Les résultats de classification obtenus sont très satisfaisants compte tenu du nombre d'espèces étudiées. En ce qui concerne les algorithmes utilisés, ils sont conformes à la littérature, l'indice de Kappa obtenu avec SVM étant supérieur (Kappa=0.61 avec RF, Kappa=0.73 avec SVM). Si la précision des classifications effectuées avec les images super-spectrales est élevée, des confusions ont été observées, notamment quand les arbres présentent un fort degré d'ouverture de la canopée. Dans ce cas, les erreurs sont essentiellement liées au caractère mixte de la mesure spectrale engendré par le mélange de la réponse spectrale de l'arbre et du sol sous-jacent.

Les résultats illustrent l'importance des indices calculés à partir de ces nouvelles bandes spectrales pour classer les espèces d'arbres. Ils confirment également l'intérêt des indices dérivés des bandes du proche infrarouge, intérêt rapporté dans la bibliographie dédiée aux données hyper-spectrales en contexte forestier. Par ailleurs, ils confirment aussi l'importance de la bande du vert qui avait été démontrée dans de

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

précédentes études. Néanmoins, cette étude montre que les indices de végétation n'apportent finalement que peu d'informations supplémentaires qui permettent d'améliorer les résultats de classification.

Dans la continuité de cette étude, et afin de discriminer davantage d'espèces d'arbres en ville, il serait intéressant d'évaluer l'apport du moyen infrarouge, ce domaine spectral étant particulièrement sensible à la structure de la feuille et à l'eau dans la végétation. Il serait également intéressant de travailler plus spécifiquement sur des approches de démélangeage pour affiner la classification des espèces d'arbres présentant une ouverture de la canopée importante.

Enfin, cette méthode d'analyse basée sur une approche de simulation des bandes spectrales à très haute résolution spatiale (0,8m), présente un réel intérêt pour les préconisations des spécificités capteurs des futures missions spatiales à THRS.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Synthèse de la deuxième partie

Dans le cadre de cette seconde partie, nous avons évalué des images satellites THRS pour la cartographie de la végétation urbaine. Les objectifs de cette partie étaient d'évaluer l'intérêt d'utiliser (1) des images à très haute résolution spatiale pour identifier et caractériser la végétation et (2) des images ayant une résolution spectrale élevée afin d'identifier les espèces végétales.

Nous avons d'abord cartographié la végétation sur les villes de Rennes et de Strasbourg à partir d'images THRS multi-spectrales Pléiades et de bases de données existantes sur la végétation en ville (OSM et BDTOPO ® IGN) en utilisant une approche méthodologique multi-scalaire, afin d'évaluer l'intérêt d'utiliser ce type d'images en complément de bases de données accessibles gratuitement sur tout le territoire national. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation des données Pléiades permet de déterminer automatiquement l'aire morphologique urbaine (tache urbaine) à l'intérieur de laquelle l'occupation des sols a été définie. De plus, nous avons montré que les images multi-spectrales THRS Pléiades permettent d'identifier trois classes de végétation (arborée, arbustive, herbacée) sans toutefois discriminer les espèces au sein de ces classes. Par ailleurs, la comparaison de trois algorithmes de classification (RF, SVM, KNN) confirme d'une part, la supériorité de RF et SVM sur KNN et d'autre part, la proximité des taux de classification de RF et SVM qui sont très proches. Ces résultats ont été publiés dans la Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection (RFPT).

Par la suite, nous avons testé le potentiel des images super-spectrales comparativement à des images multi-spectrales pour étudier la végétation urbaine. Nous avons ainsi émis l'hypothèse que les des bandes spectrales du violet, du jaune et du red-edge amélioraient la discrimination des espèces d'arbres en ville. Ainsi, les bandes spectrales d'images super-spectrales Vénµs, Sentinel-2, Worldview II et d'images multi-spectrales SPOT 6 et Pléiades ont été simulées à partir de données aéroportées hyper-spectrales acquises sur la ville de Rennes afin de les comparer. Nous nous sommes affranchis de la disparité des résolutions spatiales des images super-spectrales existantes, en traitant toutes les images simulées avec la même résolution spatiale (0,8m). Les résultats obtenus ont montré le fort potentiel des données super-spectrales comparativement aux données multi-spectrales, puisque nous avons obtenu des résultats de classification en utilisant l'algorithme SVM systématiquement supérieurs

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

avec les données super-spectrales, 19 espèces d'arbres ayant été classées avec un indice de Kappa de 0.72 avec les images super-spectrales contre 0.56 avec les images multi-spectrales. Les résultats mettent aussi en évidence que les indices de végétation n'améliorent que très peu les résultats de classification. Cette étude est la première, à notre connaissance, à explorer le potentiel des images super-spectrales pour discriminer des d'espèces d'arbres en ville. Elle a été effectuée en utilisant des bandes du visible et du proche infrarouge (de 0,4 à 1 µm), et il serait intéressant de tester aussi les bandes spectrales de l'infrarouge moyen (de 1 à 2,5 µm). Il apparaît aussi pertinent de classer aussi les images hyper-spectrales qui ont servi à simuler les images super-spectrales et multi-spectrales afin de comparer les trois types de données et de montrer l'apport des données hyper-spectrales pour identifier les arbres en ville. En effet, si des données hyper-spectrales ont déjà été utilisées pour cela, elles n'ont pas encore été comparées avec des images. Enfin, les résultats de cette étude pourraient contribuer à la configuration de futures missions spatiales, par exemple pour définir les spécifications des futures images Sentinel en termes de résolutions spatiale et spectrale.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Troisième partie :

Exploitation des données de télédétection pour la cartographie de la végétation urbaine : de la 2D à la 3D

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Introduction de la troisième partie

La troisième partie de ce manuscrit présente les travaux réalisés sur l'évaluation des données de télédétection THRS 2,5D et 3D pour la cartographie de la végétation urbaine. Les objectifs de cette partie sont d'évaluer l'intérêt d'utiliser (1) des données THRS multispectrales 2,5D issues d'un couple d'images stéréoscopiques pour la cartographie de la végétation urbaine, et (2) des données LiDAR bi-spectrales pour identifier et caractériser la structure 3D de la végétation arborée.

Dans le sixième chapitre, nous présentons la cartographie de la végétation à partir d'images THRS multi-spectrales et d'un modèle numérique d'élévation dérivé d'un couple d'images stéréoscopiques THRS Pléiades. Plus précisément, nous avons évalué l'intérêt d'utiliser trois types de variables calculées à partir de ces données pour classer la végétation: les informations spectrales, les indices de contexte (texture, profils morphologiques) et les données de hauteur dérivées du modèle d'élévation en 2,5D obtenu par photogrammétrie. Afin de tester la sensibilité de la méthode, l'algorithme de classification choisi (Random Forest) a été appliqué sur quatre types de paysages urbains différents, et une analyse détaillée de la classe « végétation arborée » a été réalisée.

Dans le septième chapitre, nous évaluons l'apport des données LiDAR bi-spectrales pour cartographier la végétation arborée en ville. Plus précisément, nous avons cherché à : (1) identifier la végétation arborée exclusivement à partir de données LiDAR, (2) réaliser une classification des différentes strates de végétation arborée en utilisant ces données et (3) évaluer la classification de la végétation arborée basée sur des méthodes d'analyse de la dimensionnalité. Pour cela, nous avons exploité des données enregistrées par le LiDAR bi-spectral Optech Titan qui dispose des canaux du vert et du proche-infrarouge en mode multi-échos.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 6 : Évaluation des données multi-spectrales stéréoscopiques pour l'étude de la végétation en ville

1 Introduction 149

2 Study area and data 149

3 Features computation 151

3.1 Normalized Digital Surface Model 151

3.2 Features based on spectral bands 151

3.3 Contextual features 152

3.4 Classification of urban vegetation 154

3.5 Reference data validation 154

4 Results and discussion 155

5 Conclusion 157

6 Discussion étendue 159

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Ce chapitre détail l'utilisation des données multi-spectrales stéréoscopiques Pléiades, présentées dans le chapitre 2, pour la cartographie de la végétation en milieu urbain.

Il reprend les travaux présentés au colloque international de SPIE Remote Sensing en 2016 : Lefebvre, A., Nabucet, J., Corpetti, T., Courty, N., Hubert-Moy, L., 2016. Extraction of urban vegetation with Pleiades multi-angular images. Proc. SPIE 10008, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments, 100080H

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme TOSCA du CNES à travers le projet VEGIDAR 2014-2018 (Analyse de la Végétation en Ville par couplage LIDAR et PLEIADES) dirigée par Thomas Corpetti (UMR CNRS 6554 LETG). L'objectif de ce projet était d'étudier l'apport de la fusion de données satellitaires multi-spectral et de données en 3D multi-sources pour la cartographie du végétal en ville. Il s'agissait i) d'évaluer l'apport de données 3D pour l'amélioration des classifications pour la cartographie de la végétation en milieu urbain de réaliser et ii) de réaliser une évaluation des données lidar aéroportée bi-spectrale pour la caractérisation de la végétation en 3D.

Afin de répondre à ces questionnements une méthodologie basées sur l'exploitation des valeurs multi-spectrales et du modèle numérique de surface issues d'un couple stéréoscopique d'imagerie Pléiades a été développée. Plus précisément, l'objectif était ici de mettre en évidence l'apport de la donnée 2,5D dans l'amélioration des classifications de la végétation en milieu urbain.

Après avoir brièvement décrit le contexte de l'étude, la méthode développée et les résultats obtenus sont détaillés ci-après

1 Introduction

Green frames and green-infrastructures are obviously credible answers to new challenges that cities have to face. Vegetation now has an important part in all recent urban plans. It has indeed been demonstrated that green areas provide numerous ecological services such as biodiversity conservation (Croci *et al.*, 2008), heat island and air pollution reduction (Nowak *et al.*, 2006). It has also been highlighted that they contribute to human well-being (Weber *et al.*, 1992) and increase the value of Increase the value of surrounding property (Dwyer *et al.*, 1992). However urban vegetation is difficult to monitor and manage and local decision makers are still looking for still looking for effective methods to assess its impact and uses. Indeed, the databases on urban vegetation are still limited and are primarily made from field mission. At the European level, for example, the Copernicus land services took the initiative to map urban vegetation for cities of more than 50,000 residents. However, the minimal mapping unit is used to 500m^2 patch whose width is greater than 10m (Lefebvre *et al.*, 2015). This data cannot be used to extract individual trees or networks of small hedges. Such small vegetated objects are visible on Very High Resolution (VHR) images with sub-metric spatial resolution and their automatic extraction processing has already been presented in numerous papers (Nichol *et al.*, 2005 ; Carleer et Wol, 2006 ; Pu et Landry, 2012 ; Puissant *et al.*, 2014). These studies mainly focus on the contribution of the spectral and texture information of VHR images. However, few papers have evaluated the capabilities of some platforms, such as Pleiades, to generate Digital Elevation Model from multi-angular images and their contributions to extract urban vegetation.

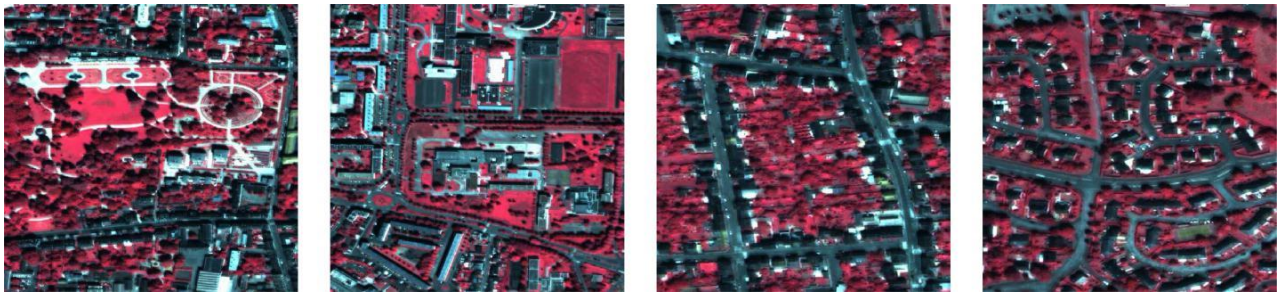
This article investigates contributions of Pleiades multi-angular images to extract and characterize low and high urban vegetation. It is proposed to produce a normalized DSM (nDSM) and to combine it successively to well-know spectral and contextual features.

2 Study area and data

The study area is the city of Rennes in France. It is a mid-sized city of about 2,500km^2 with over 200,000 inhabitants. The study focuses on 4 different urban

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

landscapes (Figure 6.1): public garden in the city center, university campus, urban housing, and suburban housing. This dataset was selected to reflect the heterogeneity of the urban landscape. For example, the city center embeds small and connected buildings whereas the university campus is composed of large individual and high buildings. As a consequence the vegetation organization is also different: suburban housing is mainly composed of private backyard while the city center includes more public tree lines along the roads.



a. Public garden *b. University campus* *c. Urban housing* *d. Suburban housing*

Figure 6.1 : Presentation of the 4 urban landscapes with combination Pleiades pan-sharpened bands (Green, Red, Near-infrared).

The available data is a pair of Pleiades images acquired with PHR-1A platform at the 14th August 2013 at AM 11 :10 :57 and AM 11 :11 :12. The incidence angles are presented in table 6.1. Of note, we gave preference to low incidence angles to limit hidden surfaces by building frontages.

Table 6.1 : Acquisition parameters of Pleiades data.

Name	Time	Incidence Angles (degree)		
		Along Track	Across Track	Overall
Image 1	AM 11 :10 :57	-3.403	6.713	7.512
Image 2	AM 11 :11 :12	5.492	4.528	7.100

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

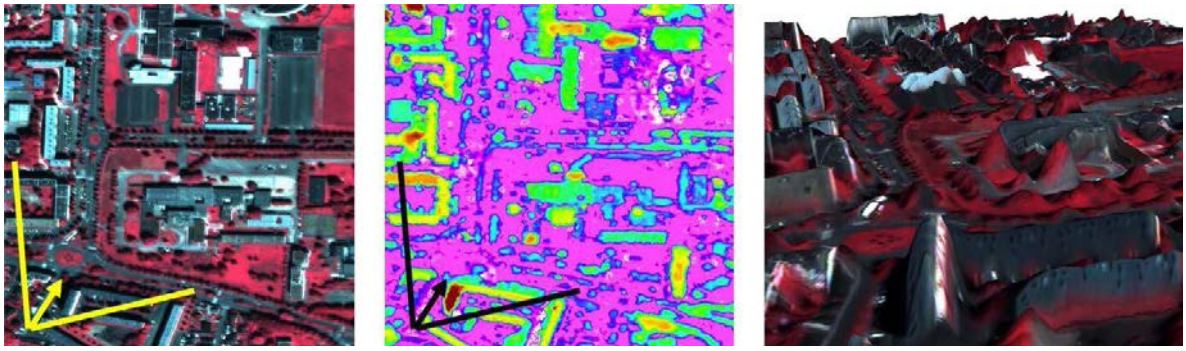
3 Features computation

3.1 Normalized Digital Surface Model

Among the numerous software and approaches to generate a DSM from Pleiades images (Durand *et al.*, 2013 ; Perko *et al.*, 2014), the ERDAS eATE software was selected for its automatic processing and its reliability to process large scenes. The elevation information was computed with the panchromatic band of the Pleiades images. To obtain uniform information about height of urban objects (building, trees...), it is necessary to create a DSM that compensates the bare earth relief. The Normalized Digital Surface Model (nDSM) is then the subtraction of the DSM and the Digital Elevation Model (DEM). To this end, generation of the DEM consists of removing all objects (buildings, trees, bridges...) from DEM. This step was performed with a slope based algorithm (Vosselman, 2000). This method assumes that a large height difference (slope) between two nearby pixels is due to an object and can then be removed. Figure 6.2 provides an example of the result obtained.

3.2 Features based on spectral bands

All multispectral bands (blue, green, red, near-infrared) were used for classification. A pansharpening with panchromatic band was performed with the subtractive resolution merge method, which is relatively radiometrically accurate (Aguilar *et al.*, 2013).



a. 2D pansharpened image *b. nDSM* *c. 3D reconstruction*

Figure 6.2 : Example of nDSM obtained with ERDAS eATE and slope based smoothing on the University Campus.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

In addition, the Normalized Difference Vegetation was used (Eq 1).

$$NDVI = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{R}}{NIR + R}$$

Where R is the red band and NIR the near-infrared. It is essential information to extract vegetation and it is also suitable to limit shadow e ects (Zhang L. *et al.*, 2015).

We also add the Normalized Difference Water Index (NDWI) is also used (Eq 2).

$$NDWI = \frac{\mathrm{G} - \mathrm{NIR}}{G + NIR}$$

Where G is the red band and NIR the near-infrared. In contrary to the NDVI, this metric is usually used to extract dark object such as water and shadow (Salehi *et al.*, 2012).

3.3 Contextual features

A precise characterization and description of urban trees is a complex task. Trees can be isolated, organized as a line or grouped in patches. They can also be cut thinly or not. The multispectral information is often insufficient and contextual features providing information on their shape, size and their organization is mandatory. Thus, we selected contextual features based on texture analysis and granulometry.

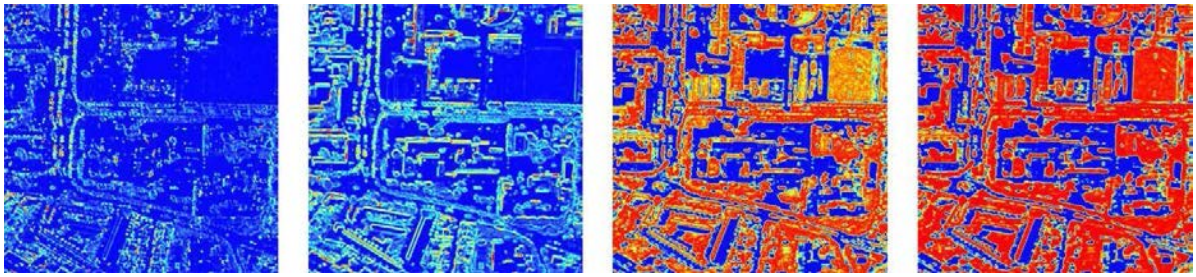
Among the numerous texture analysis techniques, we used the Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) because of its efficiency in numerous characterizations of remote sensing data (Lefebvre *et al.*, 2016). Any GLCM is associated with a direction u. For a given pattern $I(x)$ (with $X = (x, y)$ the spatial coordinates), the approach consists in computing a matrix $\boldsymbol{G_u}$ of size $N \times N$ (with N the number of grey-levels) where each element $g(i, j) = \boldsymbol{G_u}(i, j)$ is the number of pairs of pixels such that $I(X) = i$ and $I(X + u) = j$. Several criteria can then be computed from $\boldsymbol{G_u}$ to describe a texture pattern. Among them, we selected the contrast, the energy and the entropy respectively de ned in eq. (3), (4) and (5) where $g(i, j)$ corresponds to the element (i, j) in matrix $\boldsymbol{G_u}$:

$$Contrast = \sum_{i,j} (i-j)^2 \cdot g(i,j), \tag{3}$$

$$Energy = \sum_{i,j} g(i,j)^2, \tag{4}$$

$$Entropy = -\sum_{i,j} g(i,j) \ln g(i,j)). \tag{5}$$

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018



a. Contrast Minimum *b. Contrast Maximum* *c. Energy Minimum* *d. Entropy Minimum*

Figure 6.3 : Example of texture features compute on the University Campus study site.

However, these features provide information in a given direction μ and are then rotation sensitive (Lefebvre *et al.*, 2011). To be rotation invariant, the descriptors are computed in 10 different directions and the minimum and maximum value are kept, (Pesaresi *et al.*, 2008 ; Lefebvre *et al.*, 2016) as shown in figure 6.3.

In addition to GLCM, we compute the granulometry which is based on successive openings (and closings) by reconstruction with structuring elements (SE) of various size (Fauvel, 2007). We first compute Morphological Profile (MP), defined for a level ℓ as :

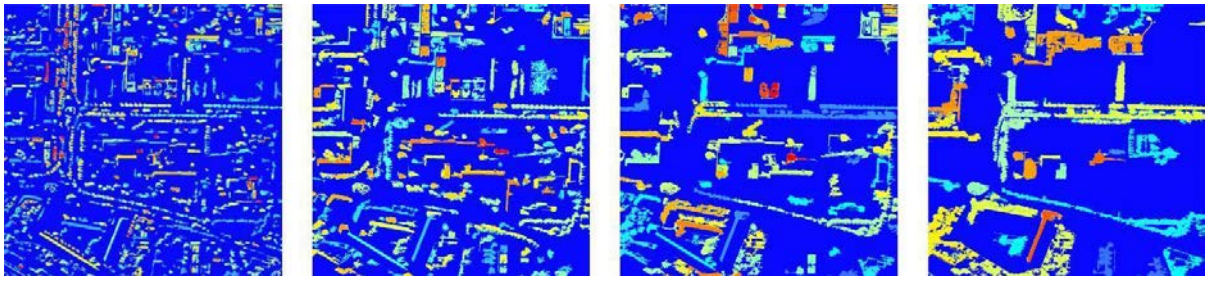
$$MP_{\ell}^{R}(x) = \phi_{(\ell)}^{R}(I(x)) \tag{6}$$

Where x is a pixel of the image I and $\emptyset\frac{R}{(\ell)}$, with $R = \{o, c\}$, is the operation of opening $(R = o)$, or closure $(R = c)$ using a structural element of size ℓ. Such MP provides both spatial and radiometric information and are very interesting for the contextual description of the image (Pesaresi et Benediktsson, 2011). A derived version, Differential Morphological Pro les (DMP), consists in the subtraction of MP for various scales of structuring elements:

$$DMP_{i}^{R}(x) = MP_{\mathcal{N}(i+1)}^{R}(x) - MP_{\mathcal{N}(i)}^{R}(x) \tag{7}$$

Where N is a set of growing scales of SE (in practice we use $N = \{3; 7; 11; 15; 19\}$). The DMP have shown their performance to extract green linear elements (Aksoy *et al.*, 2010 ; Fauvel *et al.*, 2013) and also urban environment (Chanussot *et al.*, 2006). As can be shown in figure 6.4, DMP are very interesting since isolated trees appear in the first component and the large tree lines in the third or fourth component.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018



a. SE : disk of radius 3 *b. SE : disk of radius* *c. SE : disk of radius 11* *d. SE : disk of radius 15*

Figure 6.4 : Example of DMP on the University Campus of Rennes, France

3.4 Classification of urban vegetation

GLCM and granulometry based on DMP are then used to describe green areas in cities. As for the classification, the training dataset is composed of 4 thematic classes: Low vegetation (grass), High vegetation (tree), Road network and Building. Samples were manually edited homogeneously on the Pleiades pan-sharpened images on overall city. Classification was performed with the bagging trees algorithm which is part of ensemble methods such as random forest and boosting (Breiman, 1996). Ensemble methods are suitable to classify remote sensing image in urban areas (Puissant *et al.*, 2014 ; Lefebvre *et al.*, 2016) and is less sensitive to irrelevant features (in contrast to SVM or neural networks).

3.5 Reference data validation

Two validation datasets were used. Both were edited manually on the Pleiades pan-sharpened images. However, samples were selected inside the extent of the 4 urban landscapes (presented in sec 2.1).

The first dataset consists of the selection of three thematic classes (Low vegetation, High vegetation, Mineral objects) and is used to validate the overall accuracy of the classification. The second validation dataset has been defined in order to understand the effect of the urban landscape on the misclassification of high vegetation. Five thematic were selected : Isolated tree (> 10m), Isolated tree (< 10m), Tree lines (> 10m), Tree lines (< 10m) and Tree patch.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

4 Results and discussion

A set of 4 classifications with different features combination was performed to evaluate the contribution of the elevation information:

Spectral features (MS)

Spectral features + nDSM (MS + DSM)

Spectral features + Contextual features (MS + CON)

Spectral features + Contextual features + nDSM (MS + CON + DSM).

The classifications on the 4 urban landscapes are presented in figure 6.3 and their associated Kappa index in figure 6.6.

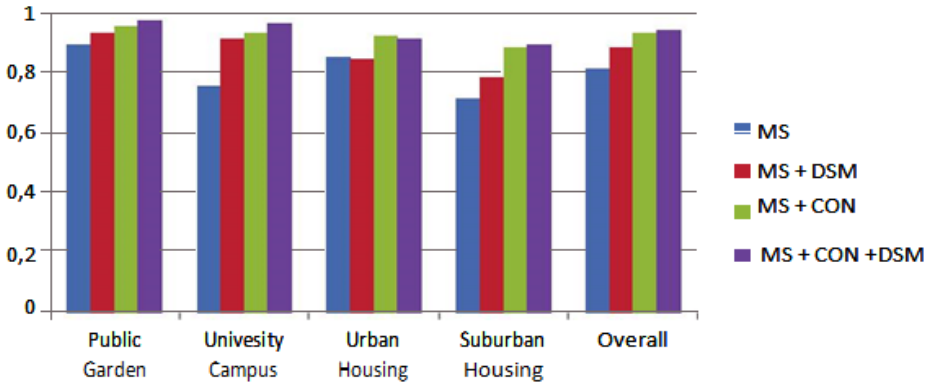


Figure 6.5 : Kappa index for the 4 urban landscapes and the overall study site with different features selection.

A significant difference can be noticed between MS and other classifications. The nDSM improves the Kappa index by 0:82 to 0:89 for all classifications. However this difference is less important compared to MS+ CON classifications. This highlights the importance of contextual features to extract urban vegetation. The nDSM also improves the classification and allows to increase Kappa index by 0:94 to 0:95.

Visually, the results are consistent with the statistical analysis. MS classifications (first column of figure 6.5) include a salt and pepper noise and the MS+ CON classifications seem to provide a coarser result including more commission errors for the tree class.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018



Figure 6.6 : Classifications on the four urban elements using four combinations of features.

It can be observed that some landscapes are easier to analyze than others. For example, the Public Garden is composed of large compact surfaces of vegetation. Conversely, the urban and suburban residential areas have a large number of private land where low vegetation and high are heterogeneous and mixed. In these cases, the nDSM and contextual information is essential.

The figure 6.7 shows the rate of commission and omission errors for the tree class. The error rate decreases with the addition of features. While one might think that MS+ CON and MS+ CON + DSM classifications are similar, results show that

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

MS+ CON + DSM classifications have the advantage to reduce significantly the commission errors. This result confirms the visual interpretation presented previously.

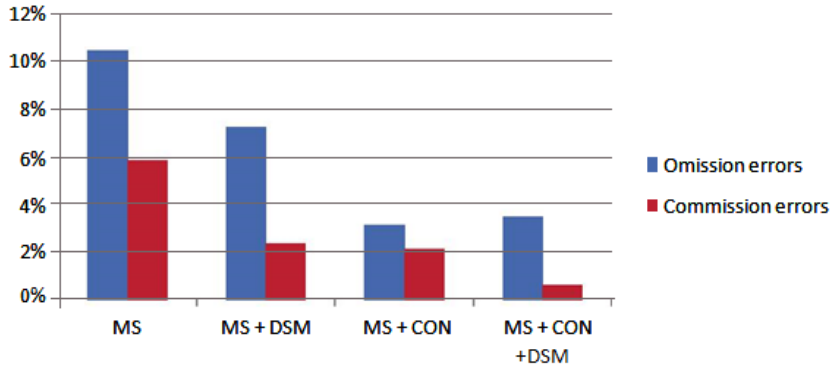


Figure 6.7 : Commission and omission errors of high vegetation class for the 4 urban landscapes and the overall study site with different features selection

Finally, we analyzed the omission errors for the tree class (figure 6.8). It can be noticed that classifications including nDSM tend to omit small items such as tree lines (< 10m) and single trees (< 10m). Its combination with contextual information is thus complementary. It detects smaller objects while limiting commission errors.

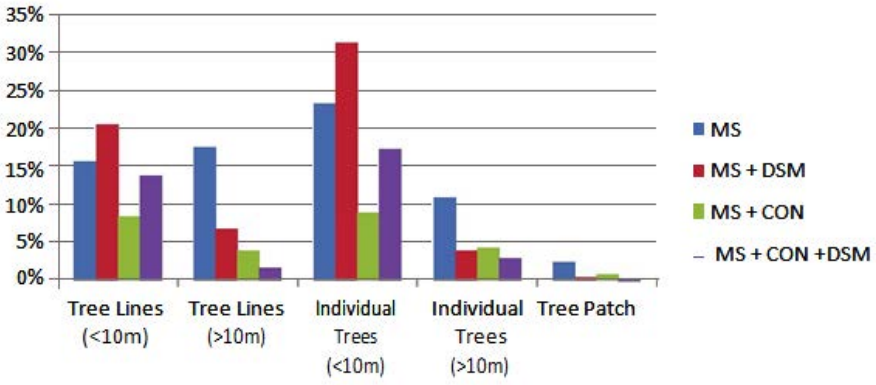


Figure 6.8 : Omission errors for 5 high vegetation classes with di erent features selection.

5 Conclusion

This article focuses on the extraction of urban vegetation from Pleiades multi-angular images. We evaluated the contribution of the nDSM built with stereo-pair images to extract urban vegetation. Several sets of features were computed and evaluated on different urban landscapes with the bagging tree algorithm. Results reveal that stereo-pair images improve the extraction of vegetation whatever the cityscape.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

We also demonstrated that contextual information (texture, granulometry) is complementary with elevation information. It allows extraction of small objects such as isolated trees or fine alignments and limits commission errors. Future work should attempt to classify different vegetation classes and evaluate its contribution at the city scale to meet the needs of national and European policy makers.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

6 Discussion étendue

La cartographie de la végétation en ville nécessite le développement de méthodes adaptées à la complexité de la matrice paysagère qui est composée d'une grande diversité d'objets de nature, de taille, de forme et de distribution différentes. Les données de télédétection telles que les images acquises par le satellite Pléiades, grâce à la forte résolution spatiale de ce dernier, offrent un potentiel intéressant pour ce type d'application en dépit de leur faible résolution spectrale qui limite parfois leur utilisation en contexte urbain, la séparabilité des différentes classes de végétation étant souvent difficile.

L'approche développée dans cette étude est basée sur l'utilisation de données ici stéréoscopiques multi-spectrales acquises par le satellite Pléiades. L'objectif était d'évaluer ces données pour améliorer pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. Plus précisément, nous avons cherché à évaluer l'apport de trois types d'information dérivées des images Pléiades : les informations spectrales, le contextuelles et altimétriques.

Les résultats de cette étude confirment l'intérêt de l'exploitation des données THRS 2D pour la cartographie de l'occupation du sol en milieu urbain. La classification obtenue avec les données multi-spectrales et les indices de végétation qui en sont dérivés offre des résultats satisfaisants avec un kappa de 0,81. L'analyse des résultats obtenus par type de paysage urbain montre cependant une forte variabilité, l'indice de Kappa variant de 0,85 pour le paysage de type « jardin public » à 0,72 pour le paysage de type « habitat diffus ».

Les résultats obtenus pour les classifications intégrant le modèle numérique d'élévation (MNE) dérivé des données 3D sont supérieurs, de 1 à 10% en précision globale en fonction du paysage considéré, par rapport à ceux obtenus en utilisant les informations spectralesexclusivement. Cette amélioration est particulièrement marquée dans les contextes paysagers de type « campus universitaire » et « habitats diffus ». Le MNE permet d'améliorer la distinction entre la végétation basse et la végétation haute, mais il permet également d'améliorer la discrimination de petits objets tels que les arbres isolés ou les alignements d'arbres. Ceci s'observe particulièrement bien sur la figure 7,5(d). Les travaux de Aguilar *et al.*, (2013), qui ont évalué l'apport du MNE pour la cartographie de l'occupation du sol en 10 classes en milieu urbain en utilisant des images Geoeye, worldview II et un MNE issu de données LiDAR interpolées et rééchantillonées aux résolutions spatiales de Geoeye et Worldview II, présentent des

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

résultats très similaires. En effet, ils montrent que les meilleurs résultats de classification sont obtenus par le couplage du MNE avec des indices de végétation (Indice de Kappa = XX sans le MNE, XX avec le MNE).

Dans notre étude, le MNS a été calculé suivant la méthode SGM de ERDAS sur la base d'une acquisition stéréoscopique (Kulessa et Lang, 2016).Toutefois, cette méthode, si elle est l'une des plus communément utilisées dans la littérature (Kulessa et Lang, 2016 ; Panagiotakis *et al.*, 2018), ne permet pas de faire de la réelle 3D. En effet, les éléments du paysage peuvent être plus ou moins bien représentés suivant la complexité de l'organisation spatiale de ceux-ci (Tian *et al.*, 2014). Ces biais dans la reconstruction sont essentiellement liés à l'ombre et à l'absence de points de liaison entre les images du fait de l'angle de prise de vue des images, ou encore de l'occultation de certaines parties de l'image (Aguilar *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2014).

L'utilisation des matrices de co-occurence des niveaux de gris, ainsi que des profils morphologiques (Pesaresi et Benediktsson, 2001) appliqués aux images multi-spectrales pour la classification de l'occupation du sol, montre également un réel intérêt. L'utilisation combinée des indices de texture, représentant l'hétérogénéité de distribution des comptes numériques dans l'image, ainsi que des profils morphologiques sont particulièrement intéressants dans des contextes paysagés qui présentent une grande hétérogénéité (« habitats résidentiels » et « habitats diffus »). Les indices dérivés de l'approche par profil morphologique renseignent sur la taille des éléments qui composent l'image sans passer par une segmentation. Ils permettent d'intégrer dans la classification une composante spatiale de l'information qui renseigne sur le contexte dans lequel se trouve le pixel à classer (Chanussot *et al.*, 2006). Les indices de kappa obtenus pour les paysages « jardins public » et « campus universitaire » demeurent les plus élevés. Cependant, l'intégration des métriques de contexte dans la classification permet d'améliorer significativement les résultats, pour les types de paysage « habitat résidentiel » et « habitats diffus ». Par ailleurs, les variables contextuelles ont un poids important dans la classification, les résultats obtenus avec celles-ci étant meilleurs que ceux des classifications réalisées avec les variables d'élévation.

La classification qui présente les meilleurs résultats intègre l'ensemble des informations spectrales, contextuelles et d'élévation. Bien que les indices de kappa des classifications effectuées exclusivement avec les données multi-spectrales et celle-ci soient très proches, l'analyse des erreurs de sous-estimation illustre une réelle complémentarité des trois types de variables.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Une analyse plus fine des erreurs de sous-estimation et de sous-estimation pour la classe végétation arborée montre des résultats plus contrastés, e pourcentage d'erreurs diminuant significativement avec l'utilisation d'un nombre croissant de variables. Il en est de même pour les massifs arbustifs.

On observe toutefois un taux d'erreurs plus élevé pour les classes « alignements d'arbres » et « arbres isolés inférieurs à 10m » de classification quand on utilise les variables altimétriques. Ce taux d'erreur diminue significativement avec l'introduction des données de contexte. Cela signifie que l'hétérogénéité de hauteur au sein de ces classes n'est pas restituée par les données de télédétection utilisées, tandis que les données de contexte permettent de mieux extraire l'information. Ceci peut s'expliquer par l'imprécision du MNS généré avec les images Pléiades. En effet, l'évaluation du MNS construit avec le produit stéréoscopique Pléiades montre une précision très variable. Cela est probablement moins vrai pour le produit tristéréoscopique (Kulessa et Lang, 2016 ; Panagiotakis *et al.*, 2018). Ainsi, il aurait été intéressant de tester cette méthode avec une acquisition tristéréoscopique qui aurait permis d'améliorer la précision de la reconstruction 3D.

Une analyse plus poussée de la complémentarité des données 3D stéréoscopiques et des données multi-spectrales représente un enjeu recherche fort pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. En outre, les capacités d'observation multi-angulaire de Pléiades ainsi que sa capacité de revisite offrent des perspectives intéressantes en termes de détection de changements de la végétation en milieu urbain.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 7 : Évaluation des données LIDAR pour l'étude de la végétation en ville

1 Introduction 164

2 Study area and data 165

3 Methodology 167

3.1 Pre-processing LiDAR point cloud 168

3.1.1 Preprocessing ground value 168

3.1.2 Preprocessing intensity value 168

3.2 Classification of tree 169

3.3 Segmentation of tree crown 169

3.4 Multi layer classification 170

4 Results and discussion 170

4.1 Classification vegetation / non-vegetation 170

4.2 Classification tree / no tree 171

4.3 Segmentation of crown 172

4.4 Multilayer tree classification 172

5 Conclusion 174

6 Discussion étendue 175

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Ce chapitre détaille l'utilisation des données LiDAR bi-spectrales -présentées dans le chapitre 2- pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. Il reprend les travaux réalisés dans le cadre du projet de recherche VEGIDAR (TOSCA CNES) présenté dans le chapitre 6.

Il reprend les travaux présentés au colloque international de SPIE Remote Sensing en 2016 : Nabucet, J., Hubert-Moy, L., Corpetti, T., Launeau, P., Lague, D., Michon, C., Quénol, H., 2016. Evaluation of bi-spectral LiDAR data for urban vegetation mapping. Proc. SPIE 10008, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments, 100080H.

L'objectif de cette étude était d'analyser l'apport des données multispectrales 3D pour caractériser la végétation en ville et améliorer la cartographie des espèces d'arbres. Il s'agissait de la première évaluation des données enregistrées par le LiDAR bi-spectral Optech TITAN acquis dans le cadre d'un consortium de recherche composé de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes et l'Observatoire des Science de l'Univers de Nantes.

1 Introduction

Because of human population growth, urbanization is one of the most important challenges facing society today. This artificialisation of agricultural and/or semi-natural landscape globally and locally impacts climate change, the circulation of biodiversity, water circulation, etc... In order to monitor and regulate this impact, most urban policies take considerable account of the role of vegetation in urban areas (Chiesura, 2004). Urban vegetation provides multiple environmental services, including regulation of the local climate, improved air quality, limitation of water runoff, citizen well-being and other social and psychological benefits.

At the moment urban vegetation is mostly monitored by cities mapping services in public spaces either by GPS surveys or by classification of 2D multispectral remote sensing data (Ramdani, 2013). More recently, assessments of Light Detection and Ranging (LiDAR) data have authorized significant improvements in vegetation mapping in urban areas (Höfle *et al.*, 2012 ; Han *et al.*, 2014). Two kinds of systems sensors are used in the literature: those based on discrete return and those based on full waveform systems. From such data various approaches are used to study urban vegetation: exploitation of the point cloud (Alonzo *et al.*, 2015), decomposition and analysis of the waveform (Mallet *et al.*, 2011) or combination with other remote sensing

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

data (as multispectral satellite imagery) (Yan W.Y. *et al.*, 2015). A new generation of LiDAR sensors (such as the Optech Titan[1]) offer the possibility to acquire data in multiple wavelengths in 3 differents channels (Morsy *et al.*, 2016). This paper presents an evaluation of this new generation of airborne LIDAR bi-spectral discrete return mode to classify urban multilayer vegetation.

2 Study area and data

The study area is located in the city center of Rennes (France), around the future urban ecological park where acquisitions are performed through on the Rennes Observatory of Urban Environment (ZAA-CNRS, LTER-France) (Figure 7.1). A large diversity of species and tree management can be found within the study site, e.g single tree, hedgerows, alley of trees, shrubs... This site is also characterized by different urban morphology of buildings, such as individual houses with small gardens, high buildings with open landscape, city center building complexes...

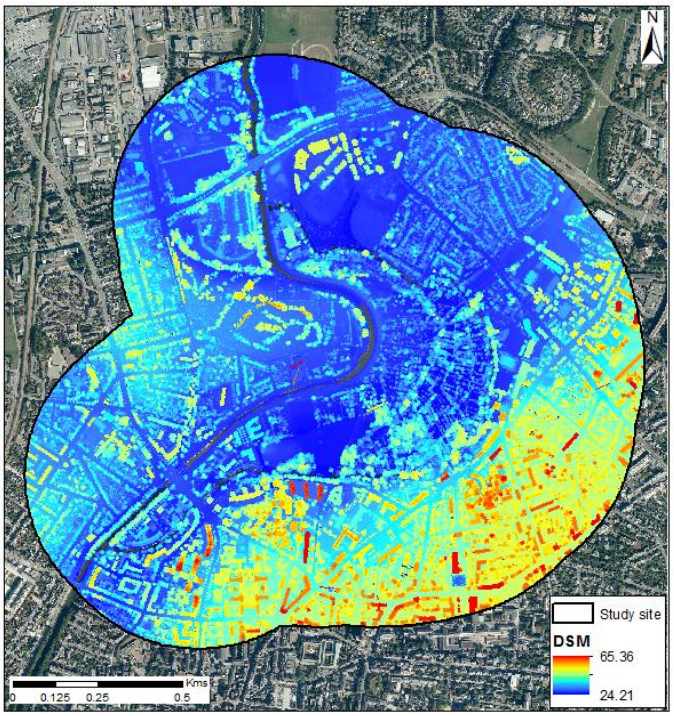


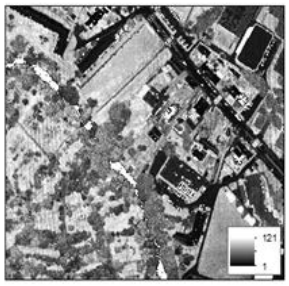
Figure 7.1 : Study site

[1] See for example www.lidar-nantes-rennes.eu

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 7.1 : Bi-spectral LiDAR Optech titan point cloud information

NIR LIDAR	Nb of point	%	Density Pts/m²
all returns	50534567	100	13,95
Echo 1	45096780	89.24	12.47
Echo 2	4889853	9.68	2.72
Echo3	526326	1.04	0.77
Echo 4	21608	0.04	0.32



Green LIDAR	Nb of point	%	Density Pts/m²
all returns	41834668	100	11.1
Echo 1	40144320	95.96	10.65
Echo 2	1618414	3.87	1.6
Echo3	63886	0.15	0.42
Echo 4	8048	0.02	0.1



The LiDAR data were acquired during the 2015 summer season (August/September) during the leaf-on season. Data acquisition was performed with the bi-spectral discrete Optec TITAN system, which uses green channel (532 nm), acquired with 7° forward looking and the near infrared (NIR) (1064nm), acquired at 0° nadir viewing angle. For this laser scanning campaign, the flight altitude was 1100m and the speed of flies was 128Kts. A pulse repetition frequency of 200Khz, a scan angle range à +- 15° and a beam divergence of 0.35mRad were used. The global accuracy is 10cm in Z dimension. Table 7.1 presents the LiDAR statistic for the NIR and the green channel respectively.

The extraction of Digital Terrain Model (DTM) and Digital Surface Model (DSM) was produced using the software LAStools ®RapidLasso, and the evaluation and comparison of the LiDAR precision was computed using Cloudcompare software (Cloudcompare V2.6.0, 2016). An evaluation matching Green and NIR point clouds was performed on a surface corresponding to four flight lines on ten grounds flat reference surface (38000 pts). The average distance between the two clouds is approximately 2cm with 0.028 standard deviation.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

3 Methodology

The data were processed following the steps presented in figure 7.2. Firstly, the intensity and the height data were preprocessed to obtain an intensity index and the Canopy Height Model (CHM). Secondly, the influence of elevation terrain was removed to extract tree crowns based on a watershed algorithm. The final step focuses on multilayer vegetation coverage classification for the green, NIR and both channel point clouds.

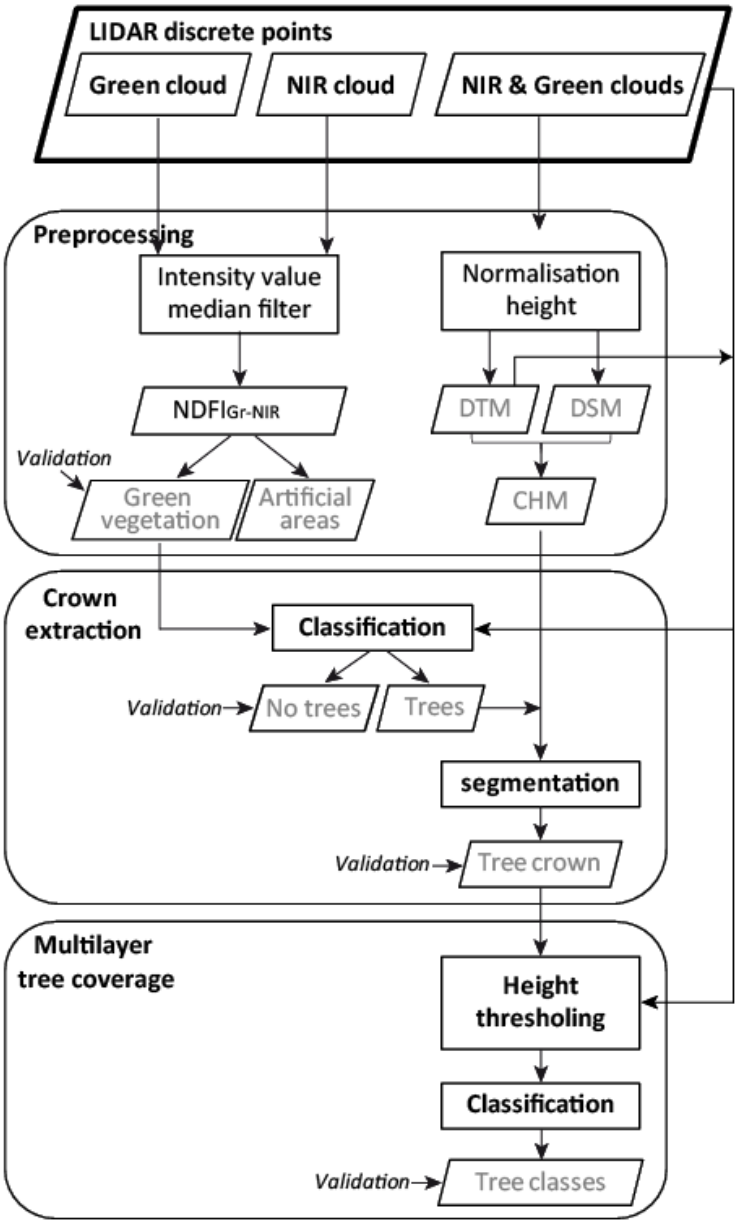


Figure 7.2 : The work flow chart methodology

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

3.1 Pre-processing LiDAR point cloud

3.1.1 Preprocessing ground value

The urban environment is a complex landscape that embeds roads, houses, buildings, little gardens, etc. Therefore obtaining a reliable DTM without manual editing is difficult (Han *et al.*, 2014). In this work the classification of ground and non-ground points was performed by using both lasground algorithm of LAStools and Canupo algorithm of Cloudcompare (Brodu et Lague, 2012) to clean up the point cloud.

3.1.2 Preprocessing intensity value

The Optech TITAN LiDAR does not use similar pitch angle of acquisitions for the two channels. In addition, the LiDAR intensity values depend on surface reflectance, atmospheric transmission, local incidences angle and sensor to object distance (Hasega'wa, 2006 ; Mazzarini *et al.*, 2006). To minimize the noise between the two channels, we selected a 2D approach that allows the use of standard image analysis algorithms and manage the large volume of data (1.2 billion points). The intensity data were pre-processed through median filtering which enables noise reduction using a square filtering window (Lukac, 2003). The resulting distributions of Digital Number (DN) of the two channels are presented in figure 7.3.

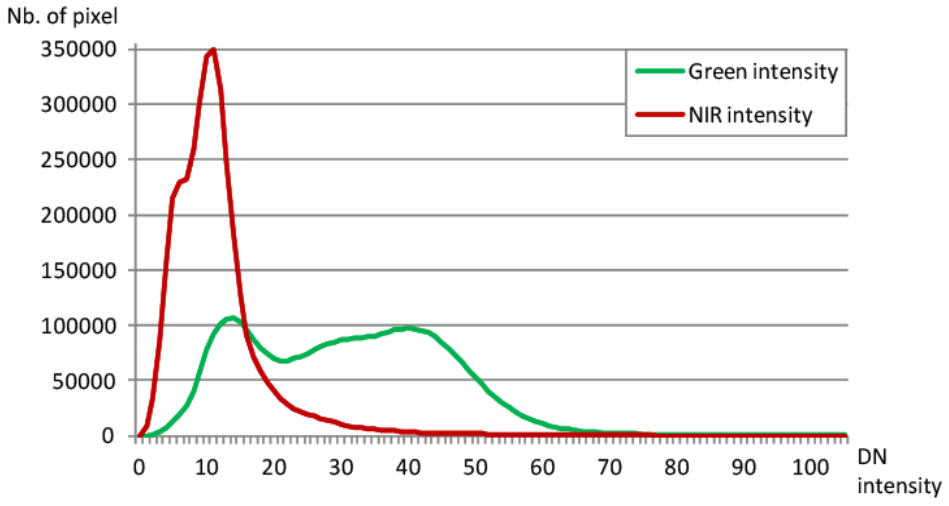


Figure 7.3 : Histogram of the green and NIR intensity images

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

The intensity values from green and NIR wavelengths were used to compute the Normalized Difference Feature Index (NDFI) based on the Normalized Difference Water Index (NDWI) (Mcfeeters, 1996) as follows :

$$\text{NDFI} = \frac{\rho_{green} - \rho_{nir}}{\rho_{green} - \rho_{nir}}$$

The $\text{NDFI}_{Gr/NIR}$ was then threshold to classify artificial and green vegetation (Morsy *et al.*, 2016).

3.2 Classification of tree

The urban landscape is not only characterized by a complex landscape but the state of its vegetation is also hazardous: single trees, hedgerows, vegetation on the top of building, shrubs..... The majority of existing works on urban vegetation are based on multispectral imagery acquired by satellite or Plane (Bretar *et al.*, 2007 ; Hirschmugl *et al.*, 2007 ; Iovan *et al.*, 2008) and LiDAR derivate raster layers. In this study trees are detected by identifying the local dimensionality properties of the scene at each point and at different scale (Brodu *et al.*, 2012). This approach, based on the geometrical distribution in the 3D spatial distribution of the laser point, has been initially developed to classify terrestrial LiDAR data. In this work, this approach has been applied to cluster trees from other types of vegetation (Grass, scrubs, ...) from the large point density (average of 25pts/m², green and NIR point cloud).

3.3 Segmentation of tree crown

The segmentation, applied to the high resolution DSM, relies on an object-based raster analysis that makes use of a watershed algorithm (Digabel et Lantuéjoul, 1978) (Chen *et al.*, 2006 ; Zhao *et al.*, 2007). The watershed segmentation starts from initial markers, chosen to isolate individual tree crowns on the CHM. In practice these markers are estimated on an inverted canopy maxima model that corresponds to the maximum tree height (and filtered by minima imposition (Chen *et al.*, 2006) to remove all tree tops). From these initial markers regions are segmented on the basis of watershed to isolate tree crowns.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

3.4 Multi layer classification

The first step for the extraction of multilayer vegetation coverage was to normalized the Z component of the laser point cloud (Han *et al.*, 2014), which is the difference between the Z point and the Z value of the DTM. This normalization was performed by LASTools.

The second step was to define the threshold between the various stratums of vegetation. For our study we use the classical forestry stratum definition presented in table 7.2 (Kent, 2012). The herbaceous class was not used in this study because of the large confusions between this class and urban furniture.

Table 7.2 : Threshold of stratum of vegetation

Stratum	**Height**
Hight tree (H)	**H > 10m**
Medium tree (M)	**5m < M < 10m**
Shrubs (L)	**1m < L < 5m**
Herbaceous	**< 1m**

4 Results and discussion

4.1 Classification vegetation / non-vegetation

The vegetation/non-vegetation classification based on NDFI is shown in figure 7.4 where vegetation areas appear to be consistent. We conducted a validation from a random stratified sample in both vegetation / non vegetation (Lefebvre e*t al.*, 2015). To this end 300 control points have been extracted and manually labeled. The global accuracy of the classification is a kappa index of 0.86, which is a reliable value. However on the one hand, some non-vegetation elements (some vehicles, metallic roof …) are falsely classified as vegetation, mainly because their intensities are larger than the vegetation ones. On the other hand some vegetation elements have not been accurately classified because of their green fraction of vegetation cover, which is too low, or of the structure of the canopy. Indeed some types of conifer, like Pinus Sylvestris, have an high degree of signal penetration through the canopy, which makes it impossible to take advantage of the intensity of the signals return to classify vegetation.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

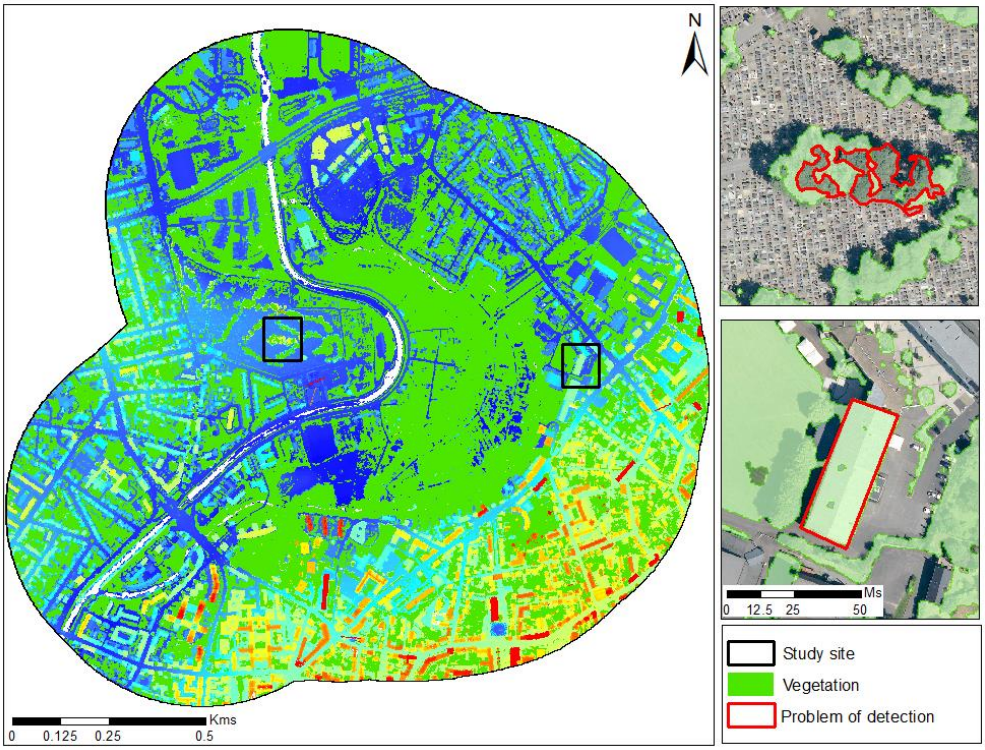


Figure 7.4 : Classification vegetation / no vegetation based on intensity index

4.2 Classification tree / no tree

The classification of tree/no-tree is based on the dimensionality algorithm of Canupo from Cloudcompare and the Lasclassify tool from LAStools software. Generally this classification is performed by Terrasolid software but for this study we only used freely available softwares. The high density of points with the combination of Green and NIR point cloud enable a good representation of the dimension of urban objects. Usually the complexity of the urban landscape makes the trees classification really difficult. For this study the use of Lastools only provide an overall accuracy of 0.69 while the use of cross LasTools and Canupo yield overall accuracy of 0.88, which is a significant gap. This difference is mainly due to the multi-scale learning realized in canupo.

Results are then very acceptable. However, a limitation in our method remains regarding the penetration of the signal in the canopy, which is not optimal with a summer flight when vegetation activity is at a maximum.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

4.3 Segmentation of crown

To evaluate accuracy, a ground truth crown map of 152 trees has been acquired by manually delineating the crowns boundaries on the CHM and aerial photography. The evaluation is based on the methodology that makes the distinction between five categories (Jing *et al.*, 2012):

- Matched: for the crowns which have more than 50% overlaps common with the crowns truth

- Nearly matched: for the crowns truth which have more than 50% common with a crowns

- Missed: if a crown covered less than half the area of crown truths

- Merged: if multiple crown truths with more than half the area covered by a crown

- Split : if multiple crowns with more than half the area covered by crown truth

The result for the watershed segmentation is presented in table 7.3:

Table 7.3 : The accuracy statistics of the tree crown maps

Categories	**Merged**	**Missed**	**Matched**	**Nearly matched**	**Split**	**Segments covering no reference crowns**
Number of crown truth	43	0	109	20	7	9

4.4 Multilayer tree classification

The result of the classification of the multilayer vegetation with the different spectral point cloud are shown table 7.4 and 7.5. Table 7.4 presents the results with all the combination of classes (Figure 7.5)

Table 7.4 : The accuracy statistics of the multilayer tree classification

Point cloud	**Kappa Index**	**Overall Accuracy**
Green	0.31	0.35
NIR	0.52	0.59
Green + NIR	0.54	0.61

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

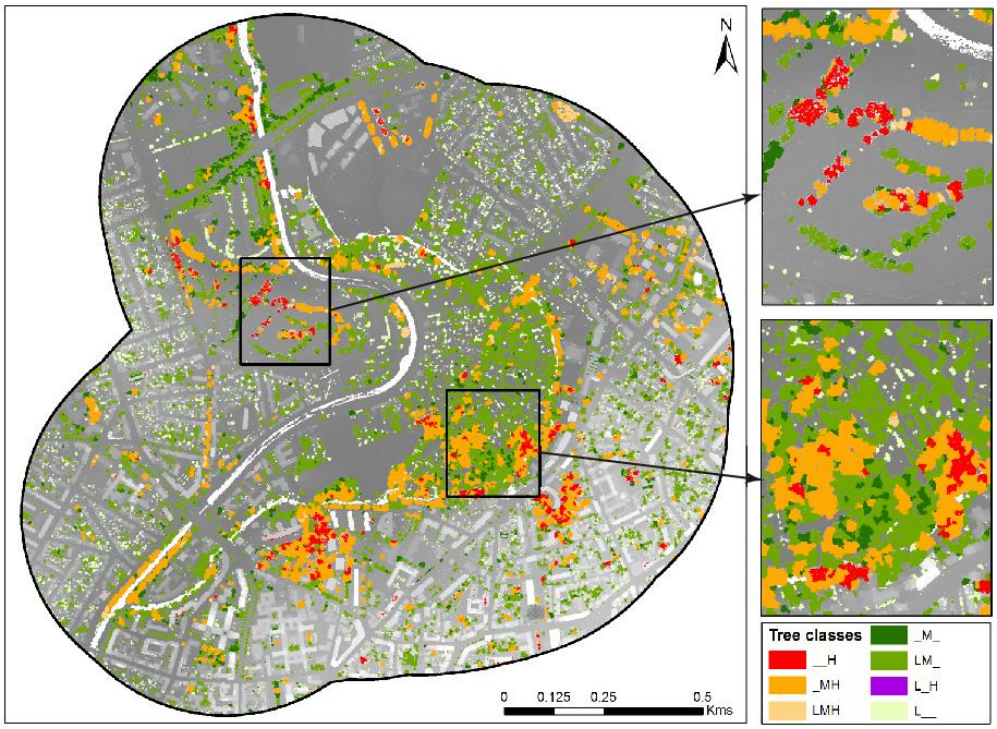


Figure 7.5 : Tree multilayer classification

The results obtained for all classes with the three points cloud shows relatively low results. The best result was obtained for the Green+NIR point cloud with a kappa index equal to 0.54, the second result is the NIR point cloud with 0.52 and the last the Green with 0.3 of kappa. This first result shows that the Green channel does not provide much more information than the NIR. The low backscattering in the Green channel does not allow densification of the point cloud and therefore can provide a better description of the geometry of the urban vegetation.

Table 7.5 presents the results of validation without the lowest class of vegetation (L). This has the effect of significantly increasing the kappa index. The index remains the highest for the merged point cloud Green+NIR with 0.78, 077 for the NIR Point cloud and 0.53 for the Green.

Table 7.5 : The accuracy statistics of the multilayer tree classification without the lowest stratum under high tree

Point cloud	**Kappa Index**	**Overall Accuracy**
Green	0.53	0.57
NIR	0.77	0.83
Green + NIR	0.78	0.85

These results show that the green channel does not provide meaningful information on the geometry of objects insofar as the low penetration of the signal does

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

not provide more information than the NIR. Likewise, the TITAN which does not have the same angle for both channels does not provide more information.

5 Conclusion

In this study, the potential of recent bi-spectral LiDAR (as the Optech TITAN we used) to classify vegetation in urban environments has been evaluated in Rennes city (France). After a pre-processing step to deal with the elevation, classification of urban vegetation has been applied on the basis of NDFI (Normalized Difference Feature Index). Results are very promising since the overall kappa is higher than 0.8. To go into more details in the characterization of data, we designed an approach to classify tree crowns into five categories. Results are less interesting, mainly because of the low penetration of the signal in the green band. In future studies, we will complement our LiDAR data with a winter acquisition (to have a better penetration and then characterization) at lower altitude (to have more responses in the green band).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

6 Discussion étendue

Les résultats de cette étude portent sur (1) l'apport de l'information spectrale des données LiDAR pour la cartographie de la végétation en milieu urbain, (2) l'exploitation des métriques dérivées du nuage de points 3D et (3) l'évaluation de l'intérêt des données LiDAR pour la caractérisation de la structure 3D de la végétation.

L'approche développée dans cette étude repose sur l'exploitation de l'intensité de la rétrodiffusion du signal LiDAR pour la cartographie de la végétation urbaine. Les premiers résultats montrent un fort intérêt de l'exploitation des données spectrales issues des deux bandes spectrales du vert et du proche-infrarouge du LiDAR Optech TITAN pour la détection des surfaces végétales.

L'utilisation de l'intensité est courante pour étudier la couverture du sol (Rottensteiner *et al.*, 2007 ; Guo *et al.*, 2011 ; Wichmann *et al.*, 2015). Cependant, celle-ci était jusque-là limitée à la longueur d'onde du proche infrarouge, bande spectrale privilégiée par les LiDAR topographiques (Mallet, 2010 ; Guo *et al.*, 2011). L'arrivée des LiDAR topo-bathymétriques multi-spectraux a permis d'appliquer sur les données acquises par ces derniers les méthodes précédemment réservées aux données multispectrales 2D telles que les indices spectraux (Wichmann *et al.*, 2015 ; Morsy *et al.*, 2016 ; Zou *et al.*, 2016).

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse confortent les précédentes observations présentes dans la littérature qui illustrent l'apport des données multi-spectrales pour la cartographie de l'occupation du sol. Ainsi, la précision des résultats obtenus est similaire aux travaux de (Fernandez-Diaz *et al.*, 2016). Les auteurs obtiennent des indices de kappa compris entre 0,4 à 0,9 pour la classification de 4 classes d'occupation du sol en utilisant des données multi-spectrales (bandes spectrale du vert (532nm), du proche-infrarouge (1064nm) et du Moyen-infrarouge (1550nm)) acquises par le LiDAR Optech TITAN. Ils montrent que l'augmentation du nombre de bandes spectrales utilisées améliore les résultats des classifications. Toutefois, la calibration radiométrique et atmosphérique des données d'intensité demeure encore une étape difficile à effectuer du fait de la grande dépendance du signal reçu à l'angle d'acquisition, à l'altitude de vol ou à l'état de l'atmosphère (Kaasalainen *et al.*, 2009 ; Briese *et al.*, 2012). Dans notre étude, le calcul de l'indice normalisé NDFI a été réalisé sur les comptes numériques bruts de l'intensité, d'une part en ne tenant pas compte de l'état de l'atmosphère, et d'autre part, en considérant que les conditions angulaires

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

d'acquisition étaient similaires pour l'ensemble des bandes spectrales utilisées. Ces conditions angulaires ne sont pas respectées dans le cas de l'acquisition des données par le LiDAR Optech TITAN dans la mesure où le laser proche infrarouge acquiert les données au nadir et le laser vert les acquiert avec un angle de 7° d'inclinaison vers l'avant. Néanmoins, l'utilisation d'un filtre médian permet de lisser les valeurs (Lucas, 2003). Ces problématiques de corrections radiométriques et atmosphériques font actuellement encore l'objet de recherches qui évaluent différentes approches, dont des méthodes basées sur l'intercalibration des différentes bandes spectrales (Briese et *al.*, 2012).

Le deuxième résultat marquant de cette étude est l'utilisation d'une méthode basée sur la dimensionnalité pour classer la végétation arborée. Cette méthode a été initialement développée pour le traitement de nuages de points 3D à très haute densité issus de lasers terrestres (Brodu et Lague, 2011). L'approche par dimensionnalité est basée sur une analyse multi-échelle de la distribution des points des nuages. Elle étudie, à chaque niveau d'échelle, la répartition des points dans leur dimension 1D, 2D, et 3D afin d'en dériver une métrique de dimensionnalité. Son utilisation pour la classification du nuage de points 3D enregistré par de LiDAR aéroporté Optech TITAN sur le site des Prairies St Martin, montre de bons résultats pour la classification de la strate arborée avec un indice de kappa de 0,88. Cette méthode a été très peu appliquée jusqu'à présent pour traiter des données LiDAR aéroportées. Les seuls travaux répertoriés sont ceux de Loghin et al., 2018, qui évaluent cette méthode pour classer des formations végétales de ripisylves. Les résultats obtenus en utilisant un nuage de points 3D d'une densité moyenne de 21pt/m² ont une précision globale de 95%. En milieu urbain, cette méthode permet d'éliminer rapidement les éléments de petites dimensions telles que le mobilier urbain, les candélabres, etc. mais également les voitures, vélos et piétons qui sont représentés dans le nuage de points. Sa limite, pour une utilisation à grande échelle, est le nombre limité de classes que peut traiter simultanément le plugin canupo disponible sous Cloudcompare, qui est réduit à 2.

La troisième partie des résultats aborde l'utilisation des données LiDAR pour la caractérisation des différentes strates de végétation en milieu urbain. La cartographie de la végétation en milieu urbain se limite bien souvent à la délimitation des surfaces occupées par la végétation, puis à leur classification en 1 seule catégorie. Les cartes qui en résultent, qu'elles soient issues du traitement de données de télédétection 2D de 3D, représentent toujours une vue du dessus de la canopée urbaine. Ainsi, elles ne permettent pas d'identifier la nature de la surface du sol sous-jacent à la végétation.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Dans le cadre de l'étude de la fonctionnalité écologique des milieux semi-naturels, cette réduction de la représentation de la végétation limite considérablement la modélisation des processus écologiques à l'œuvre (Circulation des espèces, régulation thermique, etc…) (Martinuzzi *et al.*, 2009).

L'approche développée dans cette étude pour objectif de produire une représentation simplifiée de la structuration 3D de la végétation. Il s'agissait de réaliser une cartographie qui soit utilisable sous SIG par les gestionnaires des espaces verts urbains dans le cadre de leur plan de gestion, et dans le cadre de la mise en œuvre de la trame verte urbaine. La méthodologie proposée, qui est facilement reproductible, repose sur une analyse de la distribution des points en fonction de la strate de végétation considérée. Cette méthode n'a pas permis d'obtenir de résultats satisfaisants pour la classification des trois strates (végétation arborée et végétation arbustive et végétation basse) retenues pour cette étude (indice de kappa de 0,52). Cependant, la classification en deux strates (végétation arborée et végétation arbustive), présente un kappa maximum de 0,78. Le résultat assez faible obtenu pour la classification en trois classes est assez fréquent dans la littérature. En effet, l'exploitation d'un vol d'été au maximum d'activité foliaire de la végétation limite considérablement la pénétration du signal lidar dans la canopée et donc des strates les plus basses (Sabol et al., 2014; Takahashi et al., 2005). L'analyse en deux strates (végétation arborée et végétation arbustive) présente des résultats plus intéressants et cohérents avec la littérature. Ainsi, Martinuzzi *et al.*, (2009) ont réalisé une évaluation de données LiDAR acquises à 2m de résolution sur espace forestier durant l'été 2003, pour caractériser différents habitats en fonction de la strate de végétation. Les auteurs obtiennent des résultats assez proches de ceux que nous avons obtenus dans cette étude, avec des indices de kappa compris entre 0,72 et 0,88.

Ces premières analyses des données LiDAR bi-spectrales pour la cartographie et la caractérisation de la végétation en milieu urbain sont réellement prometteuses. Il serait intéressant de reprendre cette méthodologie pour l'applqiuer sur des données acquises en l'hiver afin d'estimer la fraction de végétation herbacée sous canopée. Cette question autour de la canopée urbaine et de l'imperméabilisation des sols sous-jacents est un enjeu majeur dans la régulation des températures à l'échelle locale ou de la gestion du ruissellement des eaux de surface en ville. Les LiDAR offrent aujourd'hui une capacité d'observation de la terre inédite qui laisse envisager de nombreuses applications qui nécessiteront cependant des développements méthodologiques.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Synthèse de la troisième partie

Dans le cadre de cette troisième partie, nous avons étudié l'apport de données THRS 2,5D et 3D pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. Les objectifs de cette partie étaient d'évaluer l'intérêt d'utiliser (1) des données THRS multispectrales 2,5D issues d'un couple d'images stéréoscopiques pour la cartographie de la végétation urbaine, et (2) des données LiDAR bi-spectrales pour identifier et caractériser la structure 3D de la végétation arborée.

Pour atteindre le premier objectif, nous avons testé le potentiel des images stéréoscopiques Pléiades pour la cartographie de la végétation urbaine. Pour cela, nous avons utilisé trois types de variables calculées à partir de ces données pour classer la végétation: des variables spectrales, des variables contextelles (indices de texture et profils morphologiques de type GLCM) et une variable de hauteur dérivée de la reconstruction photogrammétrique d'un couple d'image Pléiades. Les résultats obtenus dans ce chapitre ont confirmé l'intérêt des variables multispectrales Pléiades pour la cartographie de la végétation aux échelles fines. Nous avons également montré que l'utilisation des données 2,5D permettait d'améliorer la classification de la végétation, mais que les variables contextuelles dérivées des données multispectrales avaient un poids plus important dans le processus de classification. De plus, l'analyse de la précision de la classification nous a permis d'illustrer la complémentarité entre ces deux types de variables pour la cartographie de la végétation en ville. Enfin nous avons étudié plus spécifiquement la végétation arborée et détaillé l'apport des variables spectrales, contextuelles et de hauteur dans la discrimination des différentes formes de végétation arborée en ville. *Ces résultats ont fait l'objet d'une valorisation dans le cadre du colloque SPIE Remote sensing.*

Pour atteindre le deuxième objectif, nous avons évalué des données LiDAR bi-spectrales (vert et proche infrarouge) pour cartographier la végétation arborée en ville. Nous avons pour cela réalisé un premier niveau de classification basé uniquement sur l'utilisation d'un indice spectral dérivé des valeurs d'intensité des deux bandes spectrales du LiDAR. La végétation a été identifié avec une précision satisfaisante en utilisant cette méthode (Indice de Kappa = 0,86. Nous avons ensuite classé la végétation en exploitant les nuages de points 3D des deux bandes spectrales avec une méthode initialement développée pour le lidar terrestre. La classification obtenue ainsi présente un haut niveau de précision (Indice de Kappa = 0,88) ce qui montre l'intérêt

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

d'utiliser l'information altimétrique en complément des variables spectrales issues des données 2D. Enfin, nous avons cherché à étudier la stratification de la végétation à l'échelle de l'arbre. Les résultats de classifications obtenus (Indice de Kappa = 0,52 pour 3 strates), ont montré une limite significative à cette approche, essentiellement liée à la faible pénétration du signal LiDAR dans la canopée. *Ces résultats ont fait l'objet d'une valorisation dans le cadre du colloque SPIE Remote sensing.*

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Quatrième partie :

Intégration des informations sur la végétation dérivées des données de télédétection THRS dans des modèles environnementaux

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Introduction de la quatrième partie

La quatrième partie de ce manuscrit présente les travaux réalisés sur l'évaluation de l'impact de l'intégration des informations sur la végétation dérivées de données de télédétection THRS dans des modèles environnementaux. Deux applications ont été retenues pour évaluer deux composantes des données THRS : la résolution spatiale et l'altimétrie. Ainsi, nous avons choisi d'une part de tester l'impact de la résolution spatiale des images THRS pour étudier la relation paysage-biodiversité, et d'autre part d'évaluer l'apport de l'altimétrie dérivée de données THRS pour analyser la relation paysage- îlot de chaleur urbain.

Le huitième chapitre est dédié à l'évaluation de l'impact de la représentation des habitats urbains sur la relation que l'on peut observer entre ces habitats et la biodiversité. Pour cela, nous avons cherché à mettre en relation, des métriques paysagères, calculées à différentes échelles et dérivées de cartes d'occupation du sol réalisées sur la ville de Rennes, à partir de trois images satellites ayant des résolutions spatiales différentes (Landsat 8 à 30m, Spot 6 à 6 m et Worldview-2 à 0,50m), avec des indices biologiques traduisant la distribution de communautés de carabes. Nous avons appliqué deux approches statistiques complémentaires : avec la première, nous avons cherché à mettre en évidence des gradients environnementaux dérivés des métriques paysagères et leurs impacts sur les communautés de carabes. Avec la deuxième approche, nous avons testé, pour chacun des capteurs, les relations directes entre les indices biologiques et les variables paysagères.

Le neuvième chapitre est consacré à l'évaluation de la cartographie de l'occupation du sol issue de différents types de capteurs THRS 2,5D et 3D pour la caractérisation de l'îlot de fraîcheur d'un parc urbain. Si globalement l'influence de la présence de la végétation sur la réduction de l'îlot de chaleur urbain a été démontré, nous ne savons pas précisément quel est l'impact des caractéristiques de la végétation (composition, structure, hauteur,..) et de la configuration paysagère position topographique, répartition, ...) sur l'îlot de fraîcheur. Nous avons cherché à étudier la variabilité climatique en fonction de l'hétérogénéité du paysage en condition d'îlot de chaleur urbain. Pour cela, nous avons analysé la relation entre des mesures in situ de températures enregistrées par un réseau de capteurs et des variables paysagères

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

dérivées de cartes d'occupation du sol issues de trois capteurs THRS 3D ou 2,5D (lidar, vol aéroporté IGN, Pléiades) sur le site des prairies Saint-Martin de Rennes.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 8 : Application à l'étude de la répartition des communautés de carabidés forestiers en ville

1 Introduction 188

2 Site d'étude 190

3 Méthodologie 192

3.1 Traitement des données biologiques 192

3.1.1 L'acquisition des données sur les communautés de coléoptères carabidés 192

3.1.2 Prétraitements des données biologiques 193

3.2 Traitement des données géographiques 193

3.2.1 Les données cartographiques. 193

3.2.2 Prétraitements des cartes d'occupation du sol 194

3.2.3 Extraction des variables paysagères. 195

3.2.4 Sélection des métriques paysagères 197

3.3 Les analyses statistiques 199

3.3.1 Relation entre les indices de biodiversité et la morphologie urbaine. 199

3.3.2 Relation entre les indices de biodiversité et les échelles des métriques paysagères 199

4 Les résultats. 200

4.1 Organisation des communautés de carabes 200

4.2 Relation entre les indices de biodiversité et la morphologie urbaine. 201

4.2.1 Analyse pour le capteur Landsat 8 OLI. 201

4.2.2 Analyse pour le capteur SPOT 6 202

4.2.3 Analyse pour le capteur Worldview II 204

4.3 Relation entre les indices de biodiversité et les échelles des métriques paysagères 205

4.3.1 Modèle pour Landsat 8 OLI. 205

4.3.2 Modèle pour SPOT 6. 206

4.3.3 Modèle pour Worldview II 208

5 Discussions et perspectives 209

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

1 Introduction

L'artificialisation croissante des territoires s'accompagne d'un phénomène de fragmentation des habitats au sens écologique (habitats naturels ou semi-naturels pour les espèces animales et végétales). En d'autre termes, il s'agit du morcellement des milieux favorables à une espèce en fragments ou « tâches » de surfaces plus petites et éloignées les unes des autres. Cette fragmentation a des effets négatifs sur la biodiversité (McKinney, 2002). En effet, de nombreuses études démontrent que la fragmentation des habitats impacte négativement l'abondance et la distribution des populations (Tóthmérész *et al.*, 2011 ; Soga *et al.*, 2013), ainsi que la richesse spécifique au sein des tâches d'habitats (Steffan-Dewenter *et al.*, 2002 ; Vergnes *et al.,* 2012). Pour pallier cette fragmentation, les travaux menés en écologie du paysage recommandent de restaurer les possibilités de flux d'individus entre tâches d'habitats, c'est-à-dire restaurer la connectivité (Farhig, 2003), notamment au moyen de corridors écologiques ou des trames vertes (Clergeau et Désiré, 1999). Pour freiner l'érosion de la biodiversité, la notion de trame verte et bleue a été promue en 2007 en France par le Grenelle de l'environnement. Les trames sont des outils mis à disposition des aménageurs du territoire dans l'objectif de construire un réseau écologique permettant aux espèces animales et végétales de circuler, de s'alimenter et de se reproduire et donc de rétablir des flux (Clergeau *et al.*, 2013). Ces trames, particulièrement en milieu urbain, jouent un rôle majeur pour la circulation des espèces et également dans le processus de construction du concept de « ville durable ».

La place de la nature en ville est en effet désormais une préoccupation écologique et citoyenne majeure s'inscrivant dans une perspective de « ville durable ». De plus en plus d'études visent à évaluer l'impact de l'urbanisation sur la biodiversité. Cependant, elles ne prennent en général pas en compte les différentes représentations possibles du paysage urbain. En effet, ces études sont bien souvent réalisées à partir de données d'occupation du sol issues soient de campagnes de terrain ou de la base de données SIG de la ville considérée, soit de classifications de données de télédétection. Or, dans la majorité des cas, ces cartes d'occupation du sol ont été réalisées à d'autres fins et ne sont donc pas réellement adaptées, tant au niveau de l'échelle, de la nomenclature, que des dates, pour contribuer à répondre à des questions sur la biodiversité ou le flux d'espèces.

De plus, l'augmentation récente du nombre de données de télédétection mises à disposition par des organismes tel que THEIA ou l'IGN France par exemple permet de produire des cartes d'occupation des sols différentes selon le type de données utilisées.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Ainsi, plusieurs travaux de recherche ont démontrés que différents types de données de télédétection aboutissent à différentes représentations en milieux agricoles, lesquelles influencent notre compréhension de la répartition des espèces (Vannier, 2011 ; Betbeder, 2015). Or, en zone urbaine, l'hétérogénéité des paysages peut être plus importante qu'en milieu agricole en raison du grand nombre d'objets qui les constituent et des multiples possibilités d'organisation et de structures possibles. Il apparait donc nécessaire de prendre en compte cette hétérogénéité et ses représentations dans l'étude de l'impact de l'urbanisation sur la biodiversité.

Dans cette étude, nous avons cherché à évaluer l'impact de la représentation de l'hétérogénéité des habitats urbains sur la biodiversité en prenant en considération (1) le potentiel effet du grain paysager des cartes produites à partir des données de télédétection, lequel qui varie en fonction de la résolution spatiale du capteur utilisé, et/ou (2) l'effet échelle qui varie en fonction de l'organisation et de la structure du paysage dans l'environnement proche de l'espèce.

Pour cela, nous avons considéré le modèle biologique des Coléoptères Carabidés (encore appelés Carabes). L'écologie de ces derniers et leurs relations avec la structure du paysage sont aujourd'hui bien connues (Thiele, 1997 ; Burel, *et al.,* 1998; Aviron *et al*, 2005). Ce taxon est aussi un bon indicateur du milieu et de sa dynamique (Niemela, 2001) du fait de sa sensibilité à la structure des paysages, tant agricoles qu'urbains (Vannier, 2011 ; Betbeder, 2015). Nous avons cherché à mettre en relation trois indices biologiques traduisant la structure des communautés de carabes dans des bois urbains avec des cartes d'occupation du sol issues de trois images : Landsat 8 (résolution à 30m), Spot 6 (résolution à 6m) et Worldview 2 (résolution à 0,50m). L'utilisation de résolutions spatiales différentes permet de prendre en compte un éventuel effet du grain du paysage. Des métriques paysagères de composition, de structure et de fonction ont été extraites de ces cartes à différentes échelles spatiales. Afin de tester ces effets de grain et d'échelle sur la représentation paysagère et leurs conséquences sur la relation aux données biologiques, nous avons développé deux approches statistiques complémentaires. Dans la première, nous avons cherché à mettre en évidence des gradients environnementaux et leurs impacts sur les communautés urbaines de carabes. Ces gradients ont été dérivés des métriques paysagères extraites à partir de chacun des capteurs et analysées séparément. La comparaison de ces gradients a pour but d'analyser si la représentation du paysage varie selon les capteurs. Autrement dit, de tester un effet grain du paysage sur ces représentations. De plus, pour savoir si cet effet grain impacte la distribution des communautés de carabes, ces gradients ont été mis en relation avec des indices de biodiversité. Dans une seconde approche, nous avons testé,

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

pour chacun des capteurs, les relations directes entre les indices biologiques et les variables paysagères extraites à différentes échelles et considérées une à une. Dans ce cas, la morphologie urbaine, dans son ensemble, n'est pas directement prise en compte. Nous cherchons là à tester l'existence d'un effet d'échelle sur la distribution des communautés de carabes.

2 Site d'étude

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons plus particulièrement à des communautés de carabes forestiers. Dix sites boisés ont été échantillonnés le long d'un gradient allant du centre historique (sites 01 et 02) à la zone suburbaine (site 05 à 09), en passant par le péri-centre (sites 03, 04 et 10) (Figure 8.1).

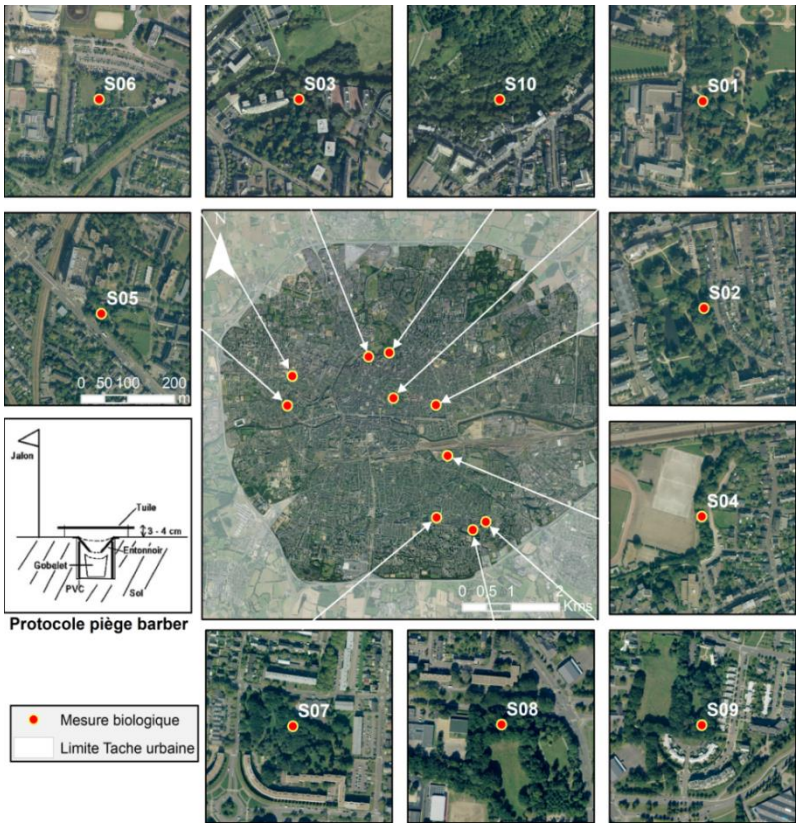


Figure 8.1 : Carte de localisation des sites de piégeages

La sélection des sites a été réalisée suivant des critères de taille, avec une sélection des bois supérieurs à 1ha, et de localisation le long du gradient centre-périphérie. Dix boisements d'une surface de 1 à 6ha ont été retenus, en plus du parc de Prairies St Martin dont la surface est de 40ha. Ce dernier a été sélectionné car il présente une forte hétérogénéité de structure du fait de l'enfrichement progressif du

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

site. Sur l'ensemble de ces sites, 8 sont des parcs urbains présentant des modes de gestion diversifiés (Table 8.1).

Table 8.1 : Présentation des sites de piégeages

Sites	Nom	Végétation dans le site	Caractéristiques morphologiques
S01	**Parc du Thabor**	Très entretenu, beaucoup d'espèces horticoles et ornementales	Centre historique, immeubles, peu d'espaces végétalisés publics en dehors d'anciens parcs urbains
S02	**Parc d'Oberthur**	Très entretenu, beaucoup d'espèces horticoles et ornementales	Centre historique, immeubles, pavillons avec jardins privés, peu d'espaces végétalisés public en dehors d'anciens parcs urbains.
S03	**Parc des Tanneurs**	Quelques arbres remarquables, peu de plantes ornementales	Centre historique, immeubles, peu d'espaces végétalisés public en dehors des Prairies St Martin (plus grand parc de Rennes)
S04	**Bordure boisée (gare sud)**	Allée arborée avec pelouses, très peu de plantes à fleurs, présence de lierre au sol.	Quartier essentiellement pavillonnaire avec jardins privés.
S05	**Parc du domaine de Saint Cyr**	Très entretenu, beaucoup d'espèces horticoles et ornementales, jardins partagés.	Immeubles avec espaces verts, pavillons avec jardins privés.
S06	**Parc de Dordain**	Peu entretenu, principalement des espèces arborées et des prairies peu fauchées.	Hôpital et Université avec espaces verts publics, quelques maisons avec jardins privés.
S07	**Parc Marc Sangnier**	Parc arboré avec pelouses, très peu de plantes à fleurs, présence de lierre au sol.	Immeubles avec espaces verts, pavillons avec jardins privés.
S08	**Parc des Hautes Ourmes**	Parc arboré avec grandes pelouses, très peu de plantes à fleurs, présence de lierre au sol.	Immeubles avec espaces verts, pavillons avec jardins privés.
S09	**Les Matelouères**	Parc arboré avec très peu de pelouses, très peu de plantes à fleurs, présence de lierre au sol.	Quartier essentiellement pavillonnaires avec jardins privés et nombreux espaces publics végétalisés.
S10	**Prairies Saint Martin**	Parc urbain en mutation. Anciennement avec jardins familiaux, zones boisées peu entretenues, zones de prairies non fauchées.	Immeubles avec peu d'espaces verts à l'est, pavillons avec jardins privés à l'ouest. Site isolé à l'est et l'ouest par des cours d'eau.

En effet, la Ville de Rennes a très tôt élaboré une codification de ses espaces verts pour y appliquer des modes de gestion différenciés, du mode le plus interventionniste tel que « les jardins structurés très fleuris » pour le S01 (le parc du Thabor), aux espaces plus spontanés tels que les « jardins champêtres » pour les sites S03 et S08 (Parc des Tanneurs et des Matelouères). Cette diversité dans les modes de gestion se traduit par une différence significative dans l'âge, la richesse et la diversité floristique des boisements. Ces sites présentent également des environnements urbains contrastés. Ce contraste illustre le gradient allant de l'urbain dense, caractérisé par une forte artificialisation et verticalité des constructions, au pavillonnaire dense à lâche, caractérisé par des maisons d'habitation implantées sur des parcelles avec jardin, et aux

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

espaces faiblement artificialisés des quartiers de grands ensembles. L'ensemble de ces sites boisés reflète donc la diversité des contextes des boisements de taille moyenne en ville.

3 Méthodologie

3.1 Traitement des données biologiques

3.1.1 L'acquisition des données sur les communautés de coléoptères carabidés

L'échantillonnage des communautés de coléoptères carabidés a été effectué dans les 10 sites de piégeages à l'aide de pièges Barber (ou « piège à fosse » ou « pot-piège ») (Spence et Niemelä, 1994). Dans chacun de ces 10 sites, 6 pièges ont été installés, espacés les uns de autres de 2 à 5 mètres. Ce type de piège vise à capturer tous les insectes tombant dans ce dernier pendant leurs déplacements. Il est constitué d'un entonnoir précipitant les insectes dans un pilulier contenant un liquide les conservant (alcool dilué à 40% plus quelques gouttes d'un mouillant pour dissoudre la graisse sur la carapace). A cela s'ajoute un tube de pvc dont le but est de retenir la terre afin que la mise en place et la relève des piluliers soit facilitées, et d'un couvercle pour limiter la chute de feuille et d'eau de pluie (Figure 8.2)

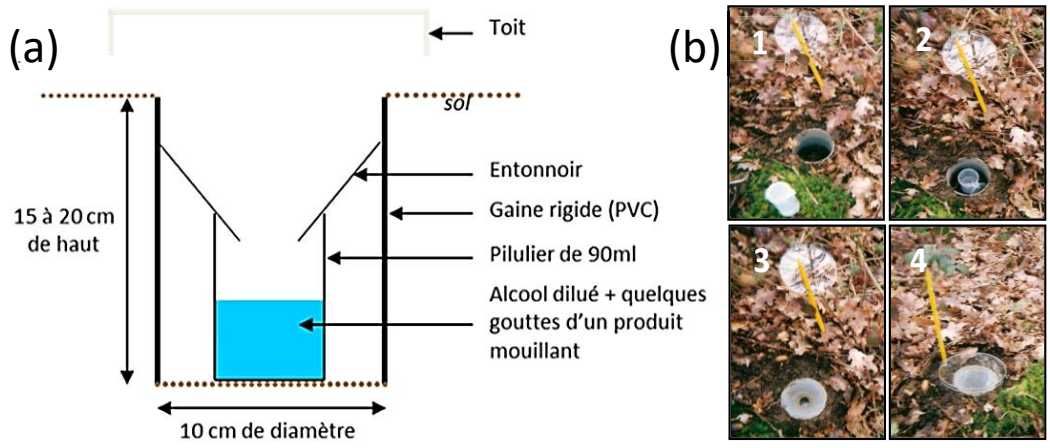


Figure 8.2 : A. Représentation schématique d'un pot-piège. B. Photos des différentes étapes de mise en place des pièges: 1 mise en place de la gaine de PVC, 2 mise en place du pilulier, 3 mise en place de l'entonnoir, 4 mise en place du toit. (D'après Croci, 2007)

Les piluliers dans les pièges ont ensuite été relevés tous les 5 jours. A chaque relevé, les piluliers pleins, contenant les insectes, étaient remplacés par des piluliers

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

vides. Cette manipulation permet ainsi un piégeage continu qui a été mené sur une période de 3 mois de début mai à fin juillet 2013. Au total, les 60 pièges ont été relevés 11 fois, soit un jeu de données reposant sur l'analyse de 660 séquences de piégeages.

3.1.2 Prétraitements des données biologiques

L'ensemble des prélèvements biologiques ont ensuite fait l'objet d'un tri en laboratoire. Il s'agit de ne récolter que les individus de coléoptères carabidés et d'en assurer la conservation. L'identification à l'espèce a ensuite été réalisée au laboratoire, sous loupe binoculaire en suivant la clé de détermination de l'INRA BAGAP et de la faune de Jeannel (1941).

Trois indices biologiques utilisés en écologie pour décrire les communautés d'espèces ont été calculés par site à partir des relevés de carabes (Magurran, 1988) :

- Abondance totale (AB) : somme du nombre d'individus, toutes espèces confondues ;
- Richesse spécifique (S) : nombre d'espèce présentes ;
- Indice de diversité de Shannon (H') : tient compte du nombre d'espèces présentes dans un site (= richesse spécifique S) et de leur abondance respective via la formule suivante :

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} p_i \log_2 p_i$$

H' : indice de diversité de Shannon.

i : une espèce du site

p_i : proportion de l'espèce i par rapport à l'abondance totale dans le site

La normalité des données biologiques a été vérifiée via le test de Shapiro–Wilk. Seule l'abondance totale a été normalisée par la transformation $\sqrt{(y+1)}$ (Legendre et Legendre, 2012) pour les analyses statistiques.

3.2 Traitement des données géographiques

3.2.1 Les données cartographiques

Les données cartographiques retenues pour cette évaluation sont issues de classification d'images de télédétection à haute et très haute résolution spatiale : Landsat 8 OLI, SPOT 6 et Worldview II. Les caractéristiques de ces données sont

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

présentées dans le chapitre 3 de la Partie 1. La table 8.2 présente plus spécifiquement les conditions d'acquisition des images et la nomenclature des classifications dérivées de celles-ci. Pour la suite du document, nous associerons à la classification des images le nom du capteur utilisé, par exemple nous citerons les données SPOT6 plutôt que de préciser les données cartographiques issues de l'image SPOT6.

Table 8.2 : Caractéristiques des données de télédétection utilisées et typologie de l'occupation des sols associée à chaque source d'images

Capteur	Résolution Spatiale(m)	Date d'acquisition	Typologie d'occupation du sol	
Landsat 8	30	17/03/2015	1- Surface en eau 3- Surface agricole 4- Surface artificialisée 5- Landes 21- Forêt de feuillus	22- Forêt de conifères 61- Fourré pré-forestier juvénile 62- Fourré pré-forestier mature
Spot 6	6	21/08/2014	1- Surface artificialisée 2- Blé 3- Surface boisée 4- Surface en eau 5- Haie 6- Maïs	7- Prairie 8- Parking 9- Route 10- Surface bâtie 11- Voie ferrée
Worldview II	0.5	04/04/2011	1- Surface bâtie 2- Route 3- Surface en eau 4- Végétation arborée	5- Surface en herbe 6- Surface artificialisée 21- Voie ferrée

La classification des images a été réalisées par une méthode orientée objet sous le logiciel Ecognition®trimble, seules les classes route, voie ferrée et surface bâtie sont issues de la BD TOPO de l'IGN ©.

3.2.2 Prétraitements des cartes d'occupation du sol

Les différentes classifications présentent des niveaux de nomenclature distincts allant de 8 à 11 classes en fonction des images utilisées. Il a donc été nécessaire d'agréger des classes pour pouvoir les comparer entre elles (Figure 8.3).

Six classes ont été retenues dans le cadre de cette étude, dont une classe « surfaces artificialisées ». Celle-ci regroupe des éléments propres à l'environnement urbain tels que, les bâtiments, les routes, les parkings, etc., connus pour avoir un « effet barrière » sur la présence et la dispersion des espèces de carabes tout comme les surfaces en eau (Keller *et al.*, 2004). Les classes « prairies » et « bois » représentent, au contraire, des environnements favorables pour ces communautés.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

La figure 8.3 illustre l'effet de la résolution spatiale sur la représentation du paysage. Ainsi, l'homogénéisation des nomenclatures permet de tester l'effet de ce grain de représentation du paysage sur l'analyse de la structure des communautés de carabes.

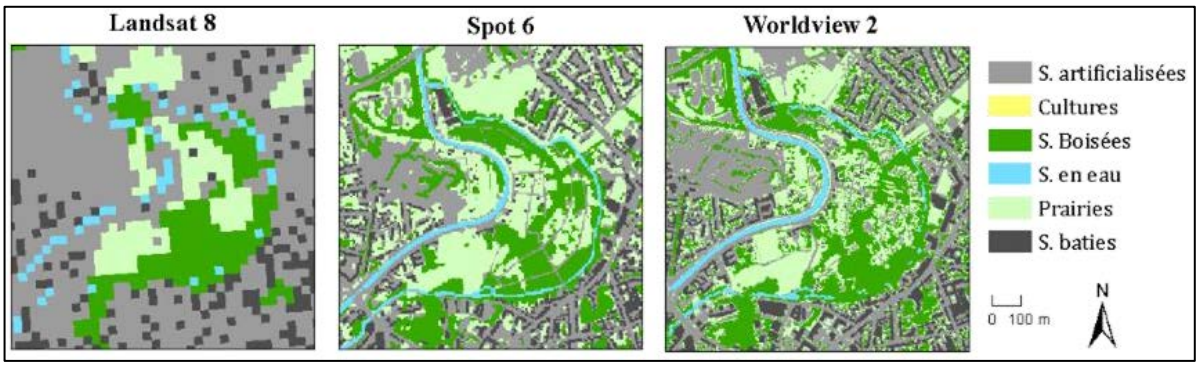


Figure 8.3 : Extraits des 3 classifications après homogénéisation de la nomenclature sur le S10 (PSM)

3.2.3 Extraction des variables paysagères

L'ensemble des variables paysagères ont été calculées à 6 échelles d'analyse (Figure 8.4), de 30 à 600m, autour des boisements étudiés (Croci, 2007). Cette analyse par zones tampons successives permet de tester le lien entre l'échelle de perception du paysage par l'espèce et l'évolution du grain en fonction de l'image considérée.

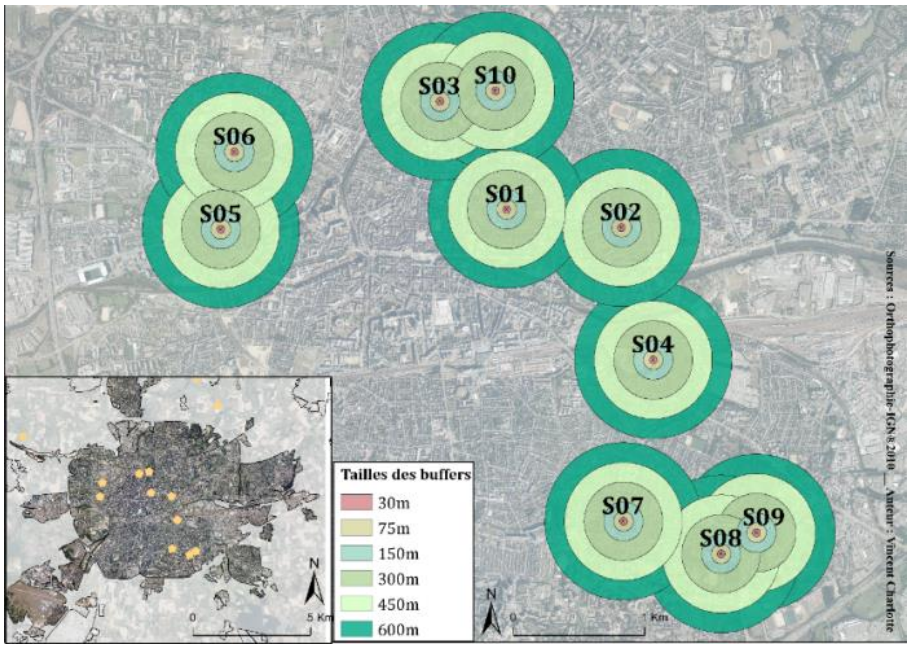


Figure 8.4 : Zone tampon pour chaque site

Afin de ne retenir que les métriques illustrant un effet de la composition et de la configuration du paysage sur la structure des carabes, une analyse bibliographique détaillée a été réalisée (Burel *et al.,* 1998 ; Niemelä *et al.,* 2002 ; Ishitani *et al.,* 2003 ; Sadler *et al.,* 2006 ; Croci *et al.,* 2008, Vergnes *et al.,* 2014). Onze métriques paysagères ont été sélectionnées puis calculées à partir de 4 logiciels : ArcGIS®ESRI, Fragstats (McGarigal *et al.,* 2012), Chloé (Boussard et Baudry, 2014) et Graphab (Foltete *et al*, 2012). Celles-ci ont été regroupées en 3 classes selon leurs caractéristiques et des informations qu'elles apportent : des métriques de composition, décrivant le paysage via des mesures de proportion pour les différentes classes ; des métriques de structure ou de configuration, montrant l'organisation qu'il peut y avoir entre les classes via des indices d'agrégation, de fragmentation, de forme ou encore d'hétérogénéité ; et enfin des métriques de fonctionnalité mettant en avant l'usage potentiel de l'environnement entre les bois par les carabes (Table 8.3).

Table 8.3 : Listes des métriques paysagères

Catégorie des indices	**Indices Calculés**	**Logiciel utilisé**
Composition	Pourcentage par classe par site (P) Nombre de patch par classe par site (NB) Taille moyenne du bois par site (TM_BO)	SIG
Structure	Indice de contagion du paysage (CONTAG) Indice d'hétérogénéité du paysage (BBHCI) Indice de forme par classe (SHAPE) Indice de dimension fractale par classe (FRAC) Indice de proximité à 100m par classe (PROX) Indice d'agrégation par classe (AI) Indice de densité de lisière par classe (ED)	Chloé et Fragstat
Fonction	Distance euclidienne du plus proche voisin entre les boisements des sites et des boisements environnants (ENN)	Graphab

Il faut noter que certains indices ont été calculés à l'échelle de la classe, *i.e.* pour chaque classe, tels que le pourcentage ou le nombre de patchs, et d'autres à l'échelle du paysage, telles que l'hétérogénéité ou la contagion, ce qui augmente significativement le nombre de métriques à intégrer dans l'analyse (Figure 8.5).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

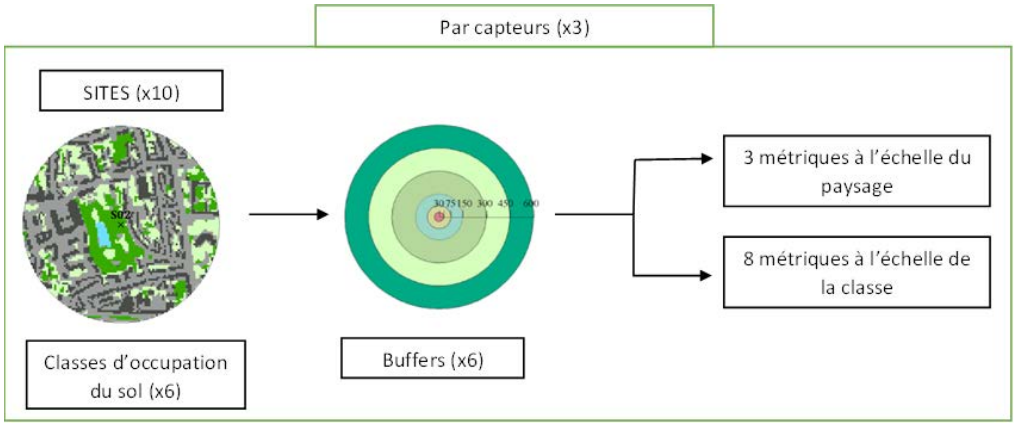


Figure 8.5 : Illustration des calculs des métriques paysagères par zone tampon

3.2.4 Sélection des métriques paysagères

Dans le but de réduire le grand nombre de métriques calculées, une sélection a été effectuée. Les images ne représentant pas de la même manière le paysage, nous avons privilégié une sélection statistique des métriques afin de prendre explicitement en compte l'effet de la résolution spatiale de la donnée cartographique. Le résultat de la sélection des métriques est donc différent pour chaque capteur.

Dans un premier temps, les variables présentant des valeurs nulles ou manquantes ont été supprimées. Dans un second temps, une analyse des matrices de corrélation, par capteur, et par groupe d'indices paysagers (composition, structure et fonction), nous a permis de sélectionner les variables les moins corrélées. Nous obtenons donc 12 métriques pour Landsat 8, 19 pour SPOT 6 et 13 pour Worldview II. Ce jeu de données (n°1) a constitué la base de données géographique principale pour la suite des analyses (Figure 8.6).

Deux types d'analyses statistiques ont ensuite été effectués, pour étudier la relation, entre la représentation cartographique du paysage issue des images des différents capteurs, et les communautés de carabes.

- La première approche, plus globale, a considéré l'ensemble des 33 métriques décrites précédemment. L'objectif était de mettre en évidence le potentiel effet du grain de la représentation du paysage sur la distribution des communautés de carabes. Pour cela, une ACP a été réalisée sur les métriques extraites pour chacune des 3 classifications afin de faire le choix entre les variables corrélées, et conserver celles qui apportaient le plus de contribution au premier et/ou deuxième axe. Cette première approche a permis de constituer le jeu de données n°2 (Figure 8.6).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

- La seconde approche, considérant les métriques une à une, a eu pour but de tenir compte des échelles et de leur potentiel effet sur la distribution des communautés de carabes. Pour cela, à partir de régressions linéaires réalisées par capteur, entre les métriques paysagères et les indices de biodiversité, les métriques sélectionnées ont été associées à un R^2 et une P-value significatifs (seuil de significativité exceptionnellement fixé ici à 0,1 en raison du faible nombre de sites considérés). Cette première approche a permis de constituer le jeu de données n°3 (Figure 8.6).

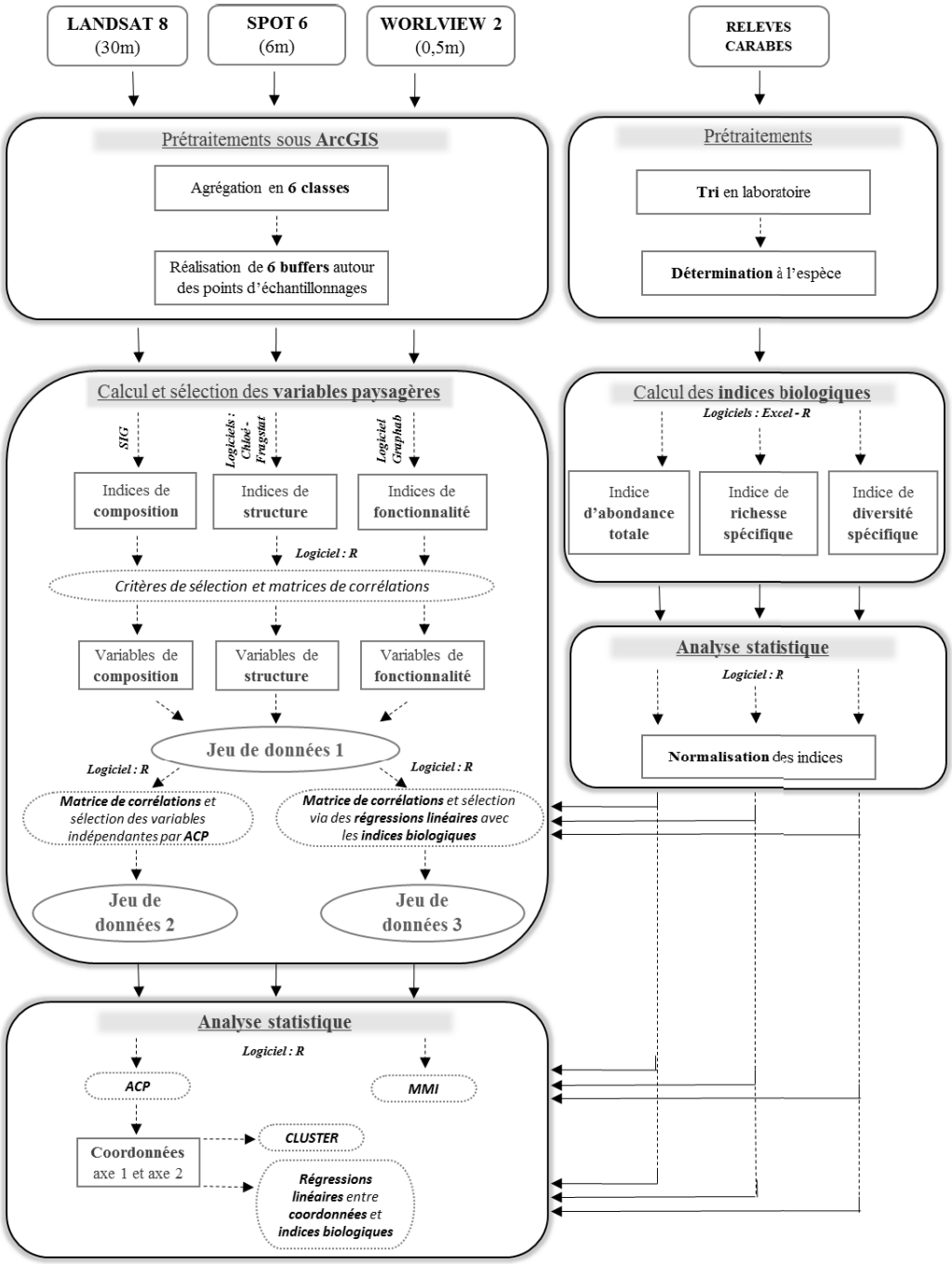


Figure 8.6 : Organigramme de traitement des données

3.3 Les analyses statistiques

3.3.1 Relation entre les indices de biodiversité et la morphologie urbaine

Dans un premier temps, une ACP a été réalisée pour chacun des trois capteurs sur la matrice sites*variables paysagères. Cette analyse permet de synthétiser l'information contenue dans la matrice de données, en fonction des composantes principales portant une part d'inertie, plus ou moins importante en fonction de la structuration du jeu de données. Dans le cas de métriques paysagères, les premiers axes peuvent rendre compte de façon synthétique des gradients environnementaux, discriminant au mieux les sites. Les coordonnées de ces derniers sur les deux premiers axes ont été récupérées et considérées comme deux nouvelles métriques synthétiques décrivant le gradient paysager entre nos sites. L'interprétation de ces gradients/axes s'est faite au regard de la répartition des sites dans l'espace factoriel et des variables de paysage dans le cercle des corrélations.

Dans un second temps, nous avons réalisé des régressions entre les coordonnées des sites et chacun des trois indices de biodiversité. L'objectif était d'étudier si les gradients environnementaux obtenus, traduisant la morphologie urbaine, avaient un effet sur la structure des communautés de carabes, en fonction des trois types de capteurs et donc du grain.

3.3.2 Relation entre les indices de biodiversité et les échelles des métriques paysagères

L'utilisation d'un modèle multi-interférence, MMI, (Burnham et Anderson, 2002) a permis de comparer les régressions réalisées entre toutes les combinaisons possibles de variables explicatives, c'est-à-dire les métriques paysagères calculées à différentes échelles, et les variables à expliquer que sont les indices biologiques. Cette méthode statistique permet ainsi de mettre en évidence le modèle, c'est-à-dire la combinaison de variables, qui explique le mieux les indices biologiques sur le critère d'un AICc le plus faible et de comparer les différents modèles sur la base de l'analyse du Δ AIC (Akaike's information criterion corrigé pour petits échantillons ; Burnham et Anderson, 2002). Le delta AIC et le poids d'Akaike ont également été analysé pour comparer les modèles dérivés de l'AIC. Le delta AIC correspond à la différence entre l'AIC du modèle considéré et l'AIC du meilleur modèle, et le poids d'Akaike renseigne sur la probabilité que le modèle soit le meilleur (Burnham et Anderson, 2002).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

4 Les résultats

4.1 Organisation des communautés de carabes

Au total, 586 individus représentant 34 espèces différentes ont été capturés. L'espèce dominante est *Nebria brevicollis,* qui représente 48% de l'abondance totale et qui est présente sur tous les sites (Figure 8.7). Elle est suivie de *Pterostichus madidus* représentant 22% des effectifs totaux, présente majoritairement dans les sites 01 et 05, mais absente dans les sites 04, 06, 07 et 09. Ces deux espèces ont comme habitats préférentiels les haies, les bandes enherbées et les boisements (Jeannel, 1941). Ces espèces dominantes ne sont pas spécialistes d'habitat de type forêt et sont considérée comme généralistes. Au contraire, les familles des Amaras, des Leistus et les espèces telles que *Bembidion lunulatum*, *Brachinus sclopeta, Clivina fossor, Metabletus obscurogattus et Ptérostichus cupreus,* sont rares dans notre étude (Figure 8.7).

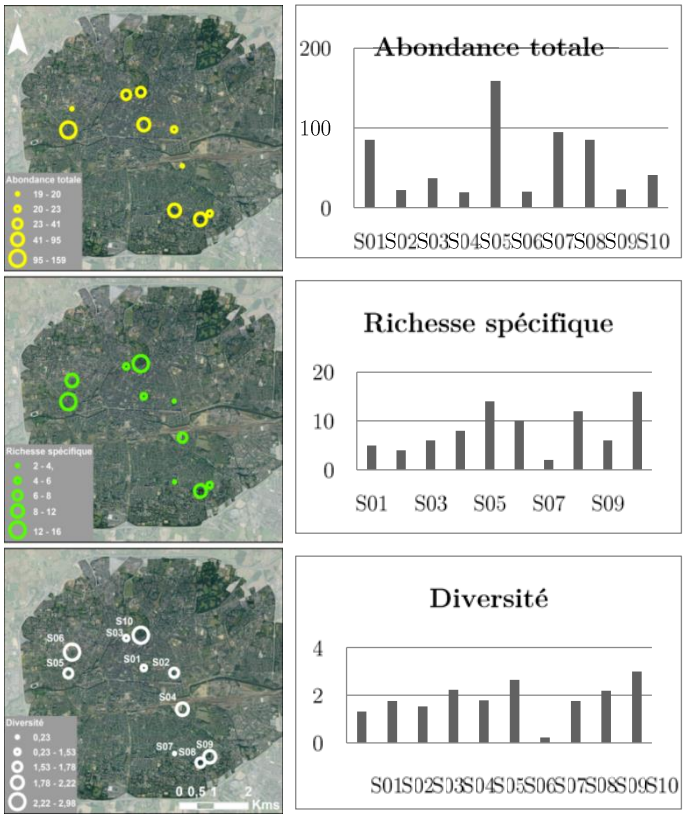


Figure 8.7 : Présentation des données biologiques

L'abondance par site varie de 19 individus, pour le site 04, à 159, pour le site 05. La richesse spécifique quant à elle varie de 2 espèces pour le site 07, à 16 pour le site 10. La plus grande diversité est observée dans le site 10 (H'=2,98) et la plus faible dans

le site 07 (H'=0,23). Certains sites présentent à la fois une forte abondance et une faible richesse spécifique, comme par exemple le site 07, ou la situation inverse, avec une faible abondance et une forte richesse pour le site 04.

4.2 Relation entre les indices de biodiversité et la morphologie urbaine

4.2.1 Analyse pour le capteur Landsat 8 OLI

Les axes 1 et 2 de l'ACP portent respectivement 47% et 26% de l'inertie (Figure 8.8).

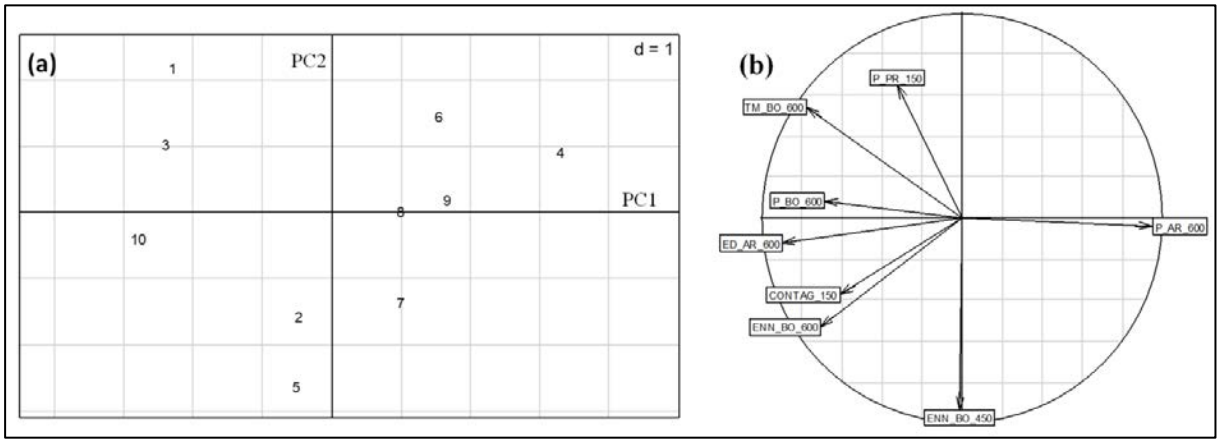


Figure 8.8 : Représentation graphique de l'ACP réalisée sur les variables paysagères issues des cartographies réalisées à partir de données Landsat 8. A. Espace factoriel, B. Cercle des corrélations.

L'axe 1 est corrélé positivement au pourcentage de surfaces artificialisées à 600m (P_AR_600) et négativement à l'indice de lisière de cette même surface (ED_AR_600), au pourcentage de bois (P_BO_600) ainsi qu'à leurs tailles moyennes (TM_BO_600) à cette même échelle de 600m. Cet axe représente ainsi un gradient d'artificialisation du paysage au détriment des espaces boisés. Il discrimine les sites 01, 03 et 10, qui ont des contextes paysagers contenant plus de boisements que les autres sites, en particulier le site 04. Concernant l'axe 2, ce dernier est corrélé négativement à la distance entre les boisements (ENN_BO_450). Il correspond à un gradient d'isolement spatial des bois, plus élevé dans les sites 02, 05 et 07. Ainsi, avec Landsat 8, l'artificialisation du paysage s'accompagne d'une diminution des surfaces boisées, mais est indépendante de leur isolement spatial. Enfin, on remarque que l'échelle de 600 mètres prédomine dans ces résultats.

Les régressions linéaires, réalisées entre les coordonnées des axes factoriels 1 et 2 et les indices de biodiversité, ne présentent aucun résultat significatif (toutes les p-value $> 0{,}2$).

4.2.2 Analyse pour le capteur SPOT 6

Les axes 1 et 2 de l'ACP portent respectivement 43% et 30% de l'inertie (Figure 8.9).

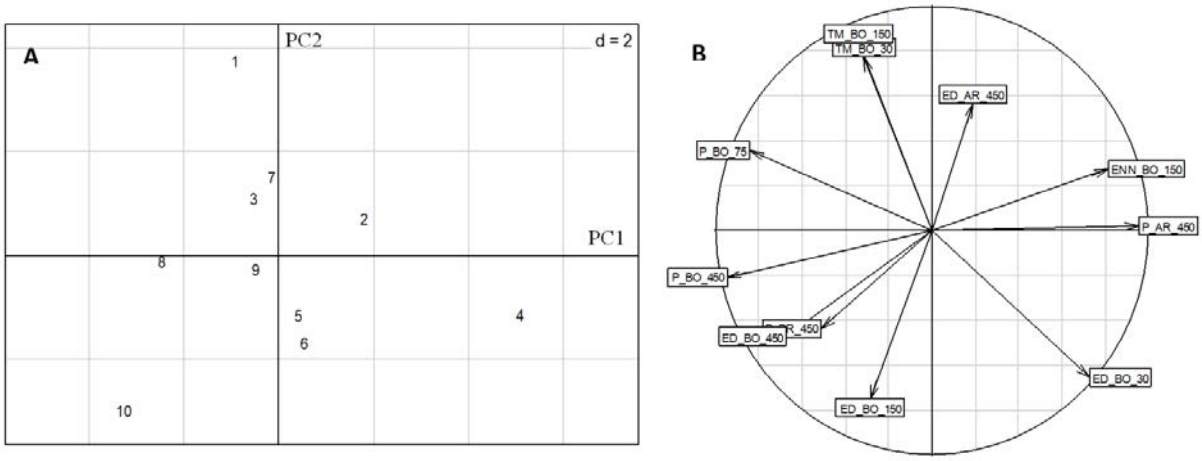


Figure 8.9: Représentation graphique de l'ACP réalisée sur les variables paysagères issues des cartographies réalisées à partir de données Spot 6. A. Espace factoriel, B. Cercle des corrélations

L'axe 1 est corrélé positivement au pourcentage de surfaces artificialisées (P_AR_450) et à la distance entre les boisements (ENN_BO_150) mais est négativement corrélé au pourcentage de boisements (P_BO_75 et P_BO_450) et de prairies (P_PR_450) et à la densité de lisière des bois (ED_BO_450). Cet axe représente un gradient d'artificialisation ici associé à un isolement spatial croissant des surfaces boisées, opposant principalement les sites 10 et 04. L'axe 2 est corrélé positivement à la taille moyenne des bois (TM_BO_150 et TM_BO_30) et négativement à l'indice de lisière des bois (ED_BO_150 et ED_BO_30). Celui-ci renseigne sur la configuration des tâches d'habitat boisé au sein des paysages. Il oppose des contextes paysagers où les surfaces artificialisées sont fragmentées, permettant une augmentation de la surface des bois (sites 01, 03 et 07), à des contextes paysagers où les surfaces boisées sont plus contraintes par la matrice urbaine et donc de forme plus complexe (sites 05, 06 et 10) (les autres sites sont placés au centre de l'espace factoriel). Cet axe 2 pourrait être interprété comme un gradient de fragmentation des habitats de type boisement. Enfin, on remarque que les échelles les plus fines, de 450 et 150 mètres prédominent dans ces résultats.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

L'analyse par régression de la richesse spécifique et de la diversité spécifique, avec les coordonnées sur les axes factoriels, présente des résultats significatifs (Table 8.4). Les coordonnées des sites sur l'axe 2, et donc le gradient de compacité des habitats, explique 52% de la variabilité de la richesse spécifique observée entre sites (Figure 8.10a). Il en est de même pour la diversité, expliquée à 55% (Figure 8.10b). On observe, que plus la fragmentation des bois diminue et que la compacité des surfaces artificielles augmente, plus la richesse spécifique et la diversité diminue. Plus précisément, la richesse et la diversité diminue lorsque l'on tend vers des sites tel que le site S01 (le parc du Thabor), présentant une surface boisée importante mais dans un contexte très minéralisé et donc moins fragmenté que les autres sites urbain. Réciproquement celles-ci augmentent quand l'on tend vers des sites tel que le S10 (le parc des Prairies St Martin) composé de boisements plus petits et plus abondants dans une matrice paysagère moins minérale. Ces résultats sont opposés à ce que l'on pourrait observer sur un gradient urbain- rural où la richesse et la diversité diminueraient avec la fragmentation du boisement.

Dans cette étude, seul des boisements au sein de la matrice urbaine ont été échantillonné. L'analyse des données biologique n'a pas identifié d'espèce spécialiste « du milieu forestier », mais plutôt des espèces généralistes. Il semble que dans une matrice paysagère très contrainte, ces espèces sont plus sensibles à une fragmentation et une dispersion plus importante des boisements, permettant leur déplacement, plutôt, qu'a la disponibilité d'un boisement de grande dimension mais fortement contraint par son environnement proche.

Table 8.4 : Résultats statistiques des régressions linéaires entre les indices biologiques et les valeurs propres des deux axes factoriels de l'ACP

Indices Biologiques	Axes	R^2	P-value
Abondance totale	Axe 1	0,01	NS
	Axe 2	-0,04	NS
Richesse spécifique	Axe 1	0,02	NS
	Axe 2	**0,52**	**0,01075**
Diversité spécifique	Axe 1	-12	NS
	Axe 2	**0,55**	**0,008779**

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

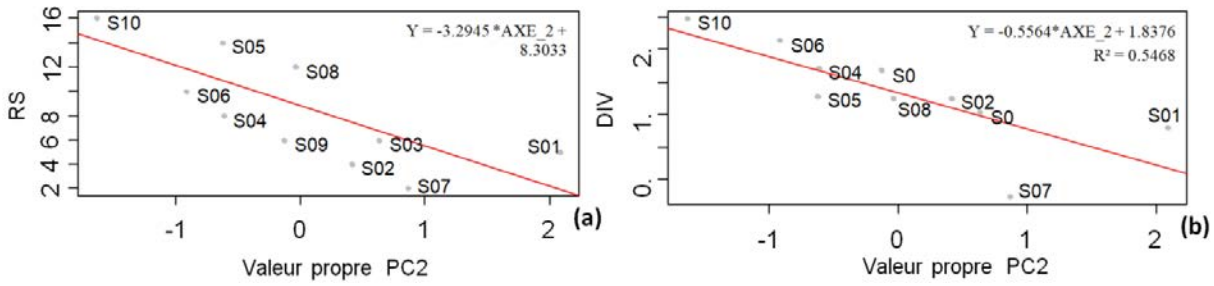


Figure 8.10 : Représentation graphique des régressions linéaires. (a) pour la richesse, (b) pour la diversité

4.2.3 Analyse pour le capteur Worldview II

Les axes 1 et 2 de l'ACP portent respectivement 49% et 25% de l'inertie (Figure 8.11).

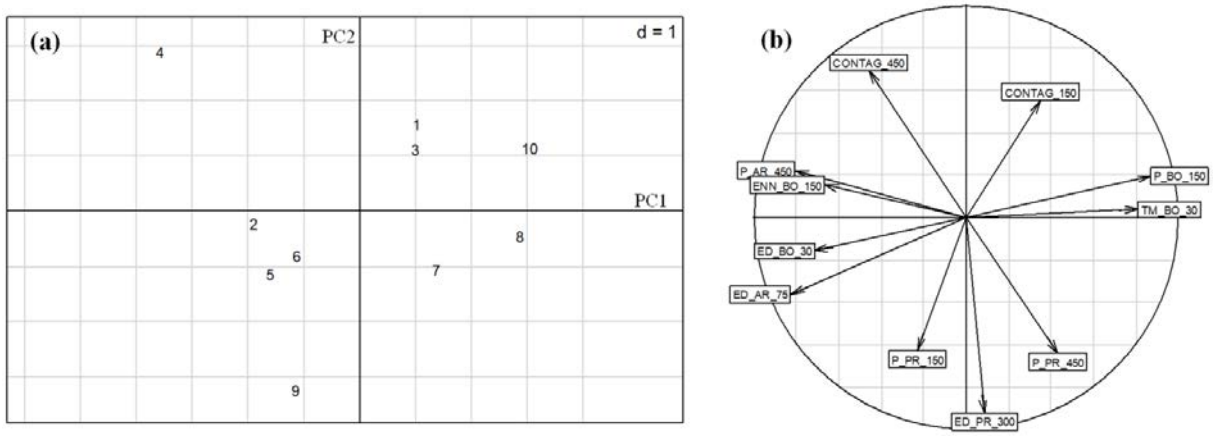


Figure 8.11 : Représentation graphique de l'ACP réalisée sur les variables paysagères issues des cartographies réalisées à partir de données Worldview II. (a) Espace factoriel, (b) Cercle des corrélations

L'axe 1 est corrélé positivement avec le pourcentage de bois (P_BO_150) et la taille moyenne du bois (TM_BO_30), et négativement avec le pourcentage des surfaces artificialisées (P_AR_450), leur densité de lisières (ED_AR_75), la distance séparant les bois (ENN_BO_150) et leur densité de lisières (ED_BO_30). On retrouve une troisième fois un gradient d'artificialisation associé à une fragmentation des boisements sur cet axe 1. Il discrimine d'une part, les sites au contexte paysager les plus artificialisés et les surfaces boisées les plus fragmentées (sites 04, 02, 05, 06 et 09), et d'autre part, des sites au contexte présentant davantage de boisements de plus grandes surfaces (sites 01, 03, 07, 08 et 10). Enfin, l'axe 2 est corrélé positivement aux variables d'agrégation (CONTAG_150, CONTAG_450) et négativement au pourcentage des prairies (P_PR_150 et P_PR_450) ainsi qu'à leur densité de lisières (ED_PR_300). Ainsi, ce deuxième axe correspond à un gradient d'agrégation des

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

types d'occupation du sol (agrégation calculée à l'échelle du paysage), laquelle diminue en raison de l'augmentation des surfaces en herbe au sein des paysages et de leur fragmentation. Les données biologiques ne semblent corréler à aucune des échelles spatiale d'analyse testée dans cette étude.

Enfin, il faut souligner le fait que l'analyse par régression linéaire réalisée entre, les coordonnées des sites sur les axes factoriels de l'ACP, et les indices de biodiversités, ne présentent aucun résultat significatif (toutes les p-values $> 0{,}32$).

4.3 Relation entre les indices de biodiversité et les échelles des métriques paysagères

4.3.1 Modèle pour Landsat 8 OLI

Le modèle multi-inférence utilisé pour les métriques issues de Landsat 8 a mis en évidence la complexité des relations entre représentation des paysages et indices biologiques. Les modèles retenus pour cette analyse présentent tous un $\Delta\,\mathrm{AICc} < 2$. Ils ont permis de mesurer l'importance des métriques de structure du paysage pour expliquer les indices biologiques. Pour l'ensemble des modèles, seule une métrique exprime la composition paysagère (TM_BO pour Taille Moyenne des bois), avec un poids relativement faible (Imp = 0,17). Il faut également noter que la très grande majorité des variables retenues, reflète la configuration des éléments semi-naturels et que les éléments artificiels ne sont représentés qu'une seule fois.

La lecture de la table 8.5 illustre que l'approche par MMI dans le cas de l'abondance n'apporte pas d'information supplémentaire par rapport à une approche univariée. Elle permet néanmoins d'analyser plus finement l'apport des différentes métriques paysagères pour la richesse spécifique et pour la diversité spécifique. Ainsi, on peut noter l'importance des variables de configuration telle que ED_PR, ou ENN_BO dans les différents modèles.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 8.5 : Résultats des MMI pour Landsat 8 OLI

	Modèle	Variable 1	Variable 2	Variable 3	Variable 4	df	AICc	Δ_AICc	Poids
Abondance	1	**(+)ENN_BO_600**				**3**	**54,4**	**0,62**	**0,27**
	2	**(+)CONTAG_150**				3	54,9	1,12	0,21
	3	**(+)ENN_BO_450**				3	55,5	1,63	0,16
Richesse spécifique	1	**(+)ED_PR_600**	**(-)ED_BO_150**			**4**	**54,36**	**0**	**0,46**
	2	(+)ED_PR_600	(-)ENN_BO_450	(-)ED_BO_150		5	54,98	0,61	0,34
	3	(+)ED_PR_600	(-)ENN_BO_450	(+)CONTAG_150	(-) ED_BO_150	6	55,97	1,6	0,21
Diversité spécifique	1	**(+)ED_PR_300**				**3**	**27,05**	**0**	**0,18**
	2	(+)ED_PR_300	(-)TM_BO_600			4	27,22	0,17	0,17
	3	(+)ED_PR_300	(-)ENN_BO_600			4	27,44	0,40	0,15
	4	(+)ED_PR_600				3	27,63	0,58	0,14
	5	(+)ED_PR_300	(-)ED_AR_600			4	27,82	0,77	0,12

Une analyse plus poussée de la table 8.5, et plus particulièrement du poids de chaque modèle, nous indique que les modèles ne présentent pas de différence significative entre eux dans leur capacité à expliquer nos variables biologiques. Ainsi, seul le modèle 1 pour la variable richesse spécifique présente une différence significative avec le deuxième modèle (Δpoid = 0,12).

L'analyse par MMI permet également de structurer l'importance des métriques paysagères (table 8.6) en fonction de l'échelle. Ainsi, deux types échelles ressortent de cette analyse l'échelle de 150m et de 600m.

Table 8.6 : Importance des variables paysagères par variable biologique pour Landsat mesurée par MMI

Diversité spécifique	**Indice paysager**	ED_PR_300	ENN_BO_600	ED_PR_600	TM_BO_600	ED_AR_600
	Importance	0.62	0.25	0.24	0.17	0.12

Abondance	**Indice paysager**	ENN_BO_600	CONTAG_150	ENN_BO_450
	Importance	0.27	0.21	0.16

Richesse spécifique	**Indice paysager**	ED_PR_600	ED_BO_150	ENN_BO_450	CONTAG_150
	Importance	1.00	1.00	0.54	0.21

4.3.2 Modèle pour SPOT 6

Les résultats du MMI pour les données de SPOT 6 sont présentés dans la table 8.7. Ce tableau illustre l'importance significative des métriques de structure du paysage avec seulement 2 variables de composition (TM_BO et P_BO pour pourcentage de bois). Il montre également le faible intérêt de cette approche pour la variable biologique d'abondance, puisque seuls des modèles univariés présentent un Δ AICc < 2.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 8.7 : Résultats des MMI pour SPOT 6

	Modèle	Variable 1	Variable 2	df	AICc	Δ_AICc	Poids
Abondance	**1**	**(+) CONTAG_30**		**2**	**55,02**	**1,19**	**0,24**
	2	(-) ENN_BO_150		3	55,67	1,84	0,17
	3	(+) TM_BO_30		3	55,78	1,95	0,16
Richesse spécifique	**1**	**(+) ED_BO_30**	**(+) P_BO_450**	**4**	**58,03**	**0**	**0,65**
	2	(-) ED_AR_450	(+) ED_BO_450	4	59,29	1,26	0,35
Diversité spécifique	**1**	**(+) P_BO_450**	**(-) CONTAG_30**	**4**	**24,04**	**0**	**0,29**
	2	(+) ED_BO_30	(+) P_BO_450	4	24,30	0,25	0,25
	3	(-) ED_AR_30	(-) CONTAG_30	4	24,80	0,76	0,2
	4	(-) TM_BO_30		3	25,22	1,17	0,16
	5	(-) ED_AR_450		3	26	1,96	0,11

L'approche par MMI semble plus pertinente pour les métriques de richesse et de diversité spécifique. En effet, dans le cas de la richesse spécifique, le meilleur modèle est composé de deux métriques : une métrique de composition (P_BO) et une métrique de structure (ED_BO). Ce modèle présente un AICc de 58,03 avec un poids de 0,65. Pour ce modèle, la différence avec le second modèle est significative puisque le ratio poids du modèle 1 sur le modèle 2 illustre que celui-ci à 1,9 fois plus de probabilité d'être le plus explicatif. Pour la diversité spécifique, 5 modèles présentent un Δ AICc<2, et seuls les trois premiers sont bivariés. Les 3 premiers modèles présentent des AICc et des poids très proches qui tendent à exprimer le fait que ces modèles sont similaires dans leur part d'explication de la métrique richesse spécifique.

L'analyse de la table 8.8 illustre la forte participation des variables calculées à des échelles de 30m et de 450m dans les différents modèles.

Table 8.8 : Importance des variables paysagères par variable biologique pour SPOT 6 mesurée par MMI

Diversité spécifique	**Indice paysager**	P_BO_450	CONTAG_30	ED_BO_30	ED_AR_30	TM_BO_30	ED_AR_450
	Importance	0.54	0.48	0.25	0.20	0.16	0.11
Abondance	**Indice paysager**	CONTAG_30	ENN_BO_150	TM_BO_30			
	Importance	0.24	0.17	0.16			
Richesse spécifique	**Indice paysager**	ED_BO_30	P_BO_450	ED_AR_450	ED_BO_450		
	Importance	0.65	0.65	0.35	0.35		

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

4.3.3 Modèle pour Worldview II

Les résultats du modèle multi-inférence appliqué aux données worldview II n'illustre pas de relation multivariée exceptée pour la métrique de richesse spécifique (Table 8.9). En effet, les relations mises en évidence entre l'abondance et la diversité ne relèvent que de relations univariées. Ainsi, l'abondance est liée essentiellement à l'indice de lisière (ED_BO) et à la taille moyenne des bois (TM_BO) à une échelle de 30m, avec des AICc respectives de 53,04 et 53,16. La diversité spécifique est liée uniquement à l'indice d'hétérogénéité à 150m (CONTAG). On peut également noter que l'échelle majoritaire, pour la plupart des relations, est l'échelle de 30m, avec une très large prédominance des métriques de configuration avec une seule variable de composition, la taille moyenne des bois en lien avec l'abondance.

Table 8.9 : Résultats des MMI pour Worldview II

	Modèle	Variable 1	Variable 2	df	AICc	Δ_AICc	Poids
Abondance	1	(-) **ED_BO_30**		**3**	**53,04**	**0**	**0,33**
	2	(+) TM_BO_30		3	53,16	0,12	0,31
	3	(+) CONTAG_30		3	54,94	1,9	0,13
Richesse spécifique	1	(+) **ED_AR_75**	(+) **CONTAG_150**	**4**	**20,71**	**0**	**0,63**
	2	(+) ED_BO_30	(+) CONTAG_150	4	21,77	1,06	0,37
Diversité spécifique	1	(+) **CONTAG_150**		**3**	**64,64**	**0**	**1**

Cette observation est à modérer avec les observations que l'on peut effectuer à partir de la table 8.10, qui présente l'importance de chaque métrique en fonction des variables biologiques. En effet, la métrique la plus pertinente au regard de la MMI, est l'indice d'agrégation à 150m pour la diversité, et l'indice de lisière boisée à 30m pour la variable d'abondance.

Table 8.10 : Importance des variables paysagères par variable biologique pour SPOT 6 mesurée par MMI

Diversité spécifique	**Indice paysager**	CONTAG_150	ED_AR_75	ED_BO_30
	Importance	1.00	0.63	0.37
Abondance	**Indice paysager**	ED_BO_30	TM_BO_30	CONTAG_30
	Importance	0.33	0.31	0.13

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

5 Discussions et perspectives

5.1 Effet du grain sur la représentation des gradients environnementaux en ville et impacts sur les communautés de carabes

Notre première analyse a mis en évidence des gradients environnementaux différents pour chacun des capteurs. Ceci est lié, entre autre, au fait que les métriques paysagères les plus discriminantes sélectionnées préalablement, sont différentes d'un capteur à l'autre. Ce choix ayant été fait pour prendre en compte les caractéristiques des modes de représentation du paysage propre à chaque capteur.

Cependant, nous pouvons souligner que les premières composantes des ACP calculées pour chaque capteur sont fortement portées par des indices d'artificialisation, et que les secondes composantes de ces ACP sont étroitement liées à des métriques de configuration de l'habitat. Il est intéressant de noter qu'aucune variable biologique ne réagit à aucun des 3 gradients d'artificialisation mis en évidence pour chaque capteur (les axes 1 des ACP) et que le seul résultat significatif concerne un gradient de configuration de l'habitat (axe 2 avec Spot 6). Cette première observation suggère une plus grande sensibilité des communautés de carabes, non pas à l'artificialisation du paysage (plus ou moins de surfaces minéralisées, lesquelles peuvent être plus ou moins fragmentées), mais à la distribution de leurs habitats au sein des paysages artificialisés. Plus spécifiquement, nos résultats illustrent une réponse significative entre, le gradient de configuration de l'habitat au sein des paysages, exprimé par l'axe 2 de l'ACP du capteur Spot 6, et la richesse spécifique ainsi que la diversité. Nos résultats mettent en évidence une richesse et une diversité moins grande dans des sites correspondant aux boisements les moins fragmentés (plus grands boisements et moins de lisière). Ceci semble en contradiction avec la littérature (Croci *et al.,* 2008 ; Fujita *et al.,* 2008 ; Vergnes *et al.,* 2014).Toutefois, cette littérature porte souvent sur des études réalisées le d'un gradient rural-urbain. Si on considère notre gradient étudié, qui est restreint à la ville, nos résultats s'interprètent plus aisément. En effet, nous avons échantillonné un gradient intra-urbain, où les communautés de carabes sont soumises à de fortes pressions anthropiques. Dans nos boisements en ville, nous n'avons pas trouvé d'espèces spécialistes « forestières » comme nous aurions pu en trouver dans des boisements de taille similaires en contexte rural (pers. com. Solène Croci, Croci, 2007). Bien qu'étant en boisement, nous avons malgré tout, trouvé des espèces généralistes, et un nombre d'espèce assez faible (une trentaine d'espèces au total, cohérent avec Croci *et al.*, 2008, et 16 au maximum dans un site). Sur ce gradient « intra-urbain », les espèces

dominant nos communautés de boisements sont principalement des espèces généralistes. Ceci est cohérent avec les travaux montrant que l'urbain tend en effet, à favoriser les espèces généralistes (Vergnes, 2012). Pour ces dernières, il semble que plusieurs petits boisements favorisent un plus grand nombre d'espèces. Nos données restent de plus cohérentes avec une plus faible richesse spécifique en ville qu'en milieu rural (une soixantaine d'espèces recensées dans des boisements aux alentours de Rennes en 2004-2005, Croci *et al.*, 2008).Cette première approche confirme qu'il existe bien un effet du grain sur la représentation du paysage (variables discriminantes et ACP différentes par capteurs) et que ces représentations ont un effet sur notre compréhension de la distribution des espèces. Le seul capteur présentant des résultats significatifs est Spot 6 qui a une résolution de 6 mètres, et des échelles d'analyse comprises entre 150 et 450 mètres. Cela est cohérent avec les faibles distances de dispersion moyennes des carabes dans une journée, soit 1,8 mètres (Betbeder, 2015). Les autres résolutions utilisées sont peut-être trop grossières (Landsat 8, 30m) ou trop fines (Worldview 2, 50 cm) pour être pertinentes au regard des échelles de perception de leur environnement et de déplacement par les carabes. Cette approche montre également un effet des morphologies urbaines sur les carabes, en raison des différentes organisations spatiales des habitats naturels qu'elles présentent.

Cette étude ne permet pas d'établir un lien entre les métriques paysagères et les variables biologiques étudiées pour tous les capteurs. Il est possible que notre étude considère des sites dans un contexte paysager dont le seuil d'artificialisation est peut-être déjà trop important pour observer son effet sur la distribution des communautés de carabes. Cela rejoint notre résultat sur une composition des communautés urbaines de carabes, dominée par des espèces généralistes bien qu'échantillonnées au sein de boisements. Une hypothèse, non exclusive, serait qu'il existe un effet important de la qualité intrinsèque de l'habitat, paramètre que nous n'avons pas pris en compte. En effet, nous observons une augmentation de la richesse et de la diversité le long d'un gradient de fragmentation de l'habitat. Ainsi, les sites suburbains (par ex. 05, 06 et 10) ayant un contexte paysager où les bois sont plus fragmentés, présentent une richesse et une diversité plus importante que des sites en centre-ville (par ex. 01), où les bois couvrent de plus grandes surfaces. Ces derniers sites sont soumis à une gestion plus importante que des sites moins entretenus et plus naturels de la zone suburbaine (cf : Chapitre 3). Il serait donc intéressant d'intégrer des variables de qualité d'habitat (par ex. le pH du sol, son taux d'humidité, son pourcentage en matière organique) pour vérifier cet effet. Des études utilisant ce types de variables montrent un effet important de ces paramètres sur la richesse et la diversité (Magura *et al.*, 2004 ; Sadler *et al.*, 2006).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

5.2 Effet du grain sur les échelles d'analyses pertinentes pour les communautés de carabes

Notre seconde analyse a consisté à déterminer, par une méthode de type multi-inférence, les paramètres des modèles exprimant le mieux le lien entre les indices biologiques et les métriques paysagères, pour chacun des capteurs. Les résultats obtenus montrent que les meilleurs modèles auxquels répondent les espèces font appel à des échelles différentes selon le capteur considéré. En effet, pour Landsat 8, notre analyse met en évidence des échelles larges allant de 150 à 600m (Figure 8.12). Au contraire, Spot 6 et Worldview 2 sont associés à des échelles plus fines comprises entre 30 et 150m pour Worldview et 30m et 350m pour SPOT6.

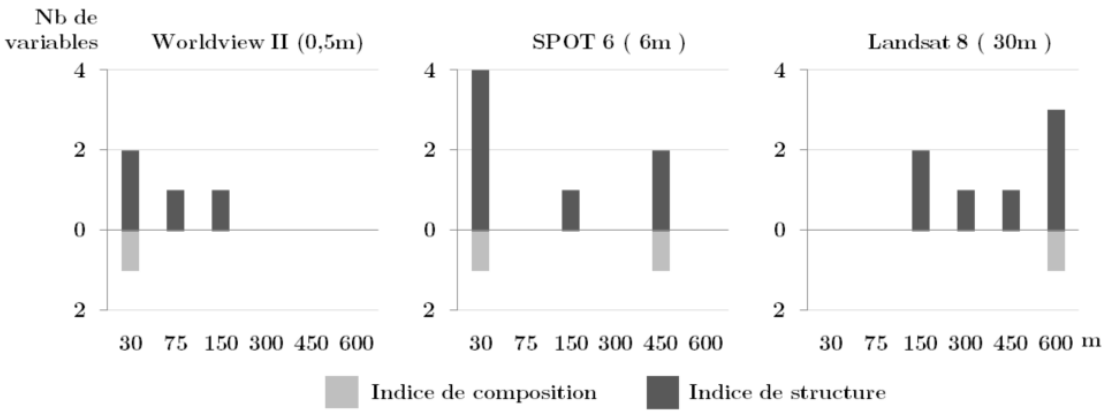


Figure 8.12 : Graphique illustrant le nombre de variables paysagères par échelle et par capteur retenu pour l'ensemble des modèles avec un ΔAICc<2

Bien que les échelles pertinentes mises en évidence varient en fonction des capteurs, certaines variables paysagères sont récurrentes dans les modèles. E, effet, on retrouve, pour les 3 capteurs les variables suivantes : l'indice d'agrégation CONTAG, l'indice de lisière ED_BO. Seul l'indice CONTAG est présent de manière stable pour l'ensemble des capteurs à des niveaux d'échelles similaires (30m et 150m pour Worldview, 30m pour SPOT6 et 150m pour Landsat). A contrario, la variable ED_BO est présente pour l'ensemble des modèles mais à des échelles distinctes : 30m pour Worldview et SPOT, et 150m pour Landsat. Celle-ci influence positivement les variables biologiques à petite échelle pour SPOT et Worldview et négativement à grande échelle pour Landsat. Il faut noter également que l'indice ENN_BO et ED_PR sont uniquement présents pour le capteur Landsat. Ces métriques sont souvent utilisées dans la littérature (Glaublommea *et al.*, 2008 ; Varet *et al.*, 2014) mais calculées à une seule échelle. Notre étude souligne donc l'importance de tester des métriques calculées à

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

différentes échelles pour mieux comprendre l'organisation des communautés de carabes. Ces résultats soulignent également l'importance de l'échelle au regard du grain à considérer pour calculer les variables paysagères. Les échelles pertinentes retenues, auxquelles les espèces de carabes répondent, s'avèrent majoritairement être inférieures à 150m. Nous pouvons également noter que le grain des images utilisées influence le type de variables pertinentes et les échelles pertinentes.

Plus finement, nous pouvons observer à travers ces résultats, une variabilité en fonction des capteurs, des relations entre les indices biologiques et les variables paysagères. Ces différences peuvent, en partie, être imputées aux différentes représentations que permettent de générer ces capteurs. Par exemple, il est attendu un effet négatif de la distance entre les boisements (ENN_BO) sur la structure des communautés car cette distance peut limiter les flux d'individus entre tâches d'habitat. C'est un effet que nous observons pour cette variable extraite de Spot 6 sur l'abondance, et de Landsat 8 sur la diversité et la richesse. Toutefois, cette variable a un effet positif sur les abondances lorsqu'elle est extraite à partir de Worldview II. Là encore, ce résultat inattendu peut-être mieux compris lorsque que l'on considère la représentation des paysages urbains obtenus à partir de ces capteurs. Avec la résolution de Landsat 8, seuls les grands boisements sont bien cartographiés ce qui peut générer une sur-estimation de la distance entre boisements. Ces grands boisements correspondent bien souvent, en milieu urbain, aux grands parcs (ce qui est le cas dans notre étude). Il pourrait donc y avoir un effet confondant, lié à la représentation du paysage, entre taille du boisement, dont l'effet attendu est positif sur les communautés, et la distance entre ces boisements. Le fait que la variable distance entre boisements apparaisse avec un effet négatif sur l'abondance lorsqu'elle est issue de Landsat 6, de résolution plus fine, et que la variable taille moyenne des boisements (TM_BO) apparaisse dans les modèles des MMI, de SPOT 6 et WorldView 2, avec un effet positif sur l'abondance pourrait conforter cette hypothèse. Dans les images à très haute résolution spatiale, les boisements de petites dimensions sont mieux identifiés, rendant plus conforme la cartographie et l'estimation de ces variables de distance entre boisements ou de taille des boisements. En revanche, il faut noter que la diversité augmente avec la distance inter-bois. Ce résultat est contradictoire avec la littérature (Croci, 2007) et nécessiterait d'être approfondit en prenant en compte la qualité intrinsèque des habitats.

De même, les effets des variables de densité de bordures des tâches de boisements et des tâches de surfaces artificielles varient selon les capteurs. Ces deux variables paysagères tiennent compte de la configuration des habitats, et plus

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

particulièrement de la fragmentation des bois et de la matrice paysagère. Il est attendu un effet négatif sur les communautés si la fragmentation des habitats augmente (Burel *et al.,* 1998 ; 2004 ; Croci, 2007 ; Vergnes *et al., 2014*), pourtant nous observons tant cette réponse (Wordlview et abondance, Landsat et richesse) que son inverse (Worldview 2 et diversité, Spot 6 et richesse).

Nos modèles montrent que la densité de bordure des tâches de surfaces enherbées devient une variable d'importance lorsqu'elle est extraite avec Landsat 8. La diversité et la richesse augmentent avec cette fragmentation des surfaces enherbées (ED_PR), ce qui peut être lié au fait que bien qu'échantillonnées dans des bois, nos communautés sont dominées par des espèces généralistes et non des espèces forestières. Les surfaces enherbées, en contexte urbain, sont peut-être un habitat secondaire de bonne qualité pour nos espèces et leurs lisières des éléments paysagers importants pour ces espèces.

Peu de nos résultats sont significatifs, et le faible nombre de sites dans notre étude (lié à un jeu de données pré-existant) peut en partie, en être la cause. Cependant, les deux types d'analyses réalisées au cours de cette étude sont complémentaires et la méthodologie développée peut être appliquée à un plus grand nombre de sites et à d'autres modèles biologiques. Par ailleurs, on remarque tout de même un effet grain sur la représentation de la morphologie urbaine, influençant la distribution des espèces de carabidés, ainsi qu'un effet échelle.

Il serait intéressant de continuer ces travaux, notamment en prenant en compte un nombre plus élevé de sites, en introduisant des variables décrivant la qualité de l'habitat et des paysages périurbains (en dehors de la ville) pour lesquels le grain peut aboutir à des représentations paysagères différentes (Vannier, 2011 ; Betbeder *et al.,* 2015). De nombreuses études sur la biodiversité urbaine utilisent des gradients rural-urbain (McDonnell et Pickett, 1990 ; McDonnel *et al.*, 1997 ; Niemela, 2001 ; Weller Ganzhorn, 2004 ; Sadler *et al.,* 2006 ; Tóthmérész *et al.,* , 2011), cette dimension paysagère supplémentaire serait à l'avenir à prendre en compte pour approfondir cette étude.

Enfin, cette étude illustre l'importance du choix de la donnée cartographique dans l'analyse des relations entre des variables biologiques et les variables paysagères. Il apparait que chaque type de données cartographiques apporte une part d'explication dans la compréhension de la répartition des espèces de carabes. Les différentes données cartographies issues de multiples capteurs présentent des intérêts complémentaires et ce aux différentes échelles d'analyses. Il serait intéressant de tester ce type d'analyse avec

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

d'autres espèces inféodées à des types d'habitats contrastés (oiseaux, micro-mammifères) pour affiner ces résultats.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chapitre 9 : Application à l'étude de la répartition des températures dans un parc urbain en contexte d'îlot de chaleur urbain

1 Introduction 216

2 Le site d'étude 218

2.1 L'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération 219

2.2 Le réseau de mesures 221

2.3 La répartition des températures à l'échelle du site 223

3 Méthodologie 226

3.1 Traitements des données climatiques 226

3.1.1 Les températures du site en situation d'îlot de chaleur urbain 226

3.1.2 Les données de télédétection 231

3.1.2.1 Les traitements de l'information 3D 231

3.1.2.2 La classification des données aéroportées IGN 232

3.1.2.3 Le post-traitement des classifications 233

3.1.3 Le calcul des métriques paysagères 234

3.1.4 Les analyses statistiques 235

4 Les résultats 238

4.1 Les analyses univariées 238

4.1.1 L'analyse pour les situations d'ICU d'été 238

4.1.2 L'analyse pour les situations d'ICU d'hiver 241

4.2 L'analyse par régression multiple 244

4.2.1 L'analyse pour la situation d'ICU d'été 244

4.2.2 L'analyse pour les situations d'ICU d'hiver 248

5 Discussions et perspectives 251

6 Conclusion et perspectives 257

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

1 Introduction

Aujourd'hui, la population urbaine connait une très forte croissance avec un milliard de personnes supplémentaire depuis 10 ans (WUP ONU, 2018). Cette croissance s'accompagne d'un processus d'artificialisation des terres sans précédent (2,8% des terres émergées, WUP ONU, 2018), qui a des impacts importants notamment dans un contexte de changement climatique.

La ville génère naturellement des phénomènes climatiques propres à sa morphologie, entraînant, entre autres, des températures plus élevées en centre-ville. L'îlot de chaleur urbain (ICU) est caractérisé par des températures plus élevées dans la ville par rapport à la zone rurale environnante. Plus qu'une simple distinction "centre/périphérie", l'îlot de chaleur urbain est créé en réponse aux différents types d'occupation du sol. Le centre est généralement caractérisé par des bâtiments hauts et denses, dominés par des surfaces verticales artificialisées, tandis que la périphérie comprend des surfaces horizontales qui sont souvent partiellement végétalisées et plus humides. Entre les deux, la surface urbaine peut être assez complexe avec la juxtaposition de zones d'habitation et de parcs végétalisés et de zones ouvertes qui créent leurs propres effets microclimatiques (Oke, 1987). L'intensité et les caractéristiques de l'ICU dépendent donc de nombreux facteurs liés à la taille et à la configuration (ex : fond de vallée, proximité de l'océan, ...) de la ville mais aussi à la présence de canyons urbains (Landsberg, 1981), l'émissivité des matériaux (Montavez *et al.*, 2000), l'albedo (Akbari et Konopacki, 2005), le niveau des activités humaines (ex : circulation automobile, industries, ...), la présence de végétation (Kurn *et al.*, 1994; Susca *et al.*, 2011) ou encore les conditions météorologiques (type de temps, ...) (Rizwan *et al.*, 2008). L'intensité de l'ICU est également plus importante la nuit que le jour (Cantat, 2004). Les conséquences de l'ICU sont multiples : surmortalité de la population (Tan *et al.*, 2010), diminution du confort des habitants (Lafortezza *et al.*, 2009), avancement des stades phrénologiques de la végétation (Luo *et al.*, 2007 ; Mimet *et al.*, 2009), augmentation de la consommation d'énergie (Rizwan *et al.*, 2008), etc…

De nombreux travaux de recherches ont permis de déterminer des moyens pour atténuer l'intensité de l'ICU comme la modification des formes urbaines, la rénovation urbaine pour limiter les pertes de chaleur des bâtiments, le choix de nouveaux matériaux de construction et la modification des substrats pour les voies de circulation, etc…(Rizwan *et al.*, 2008). Cependant, ces actions ne peuvent être mise en œuvre que dans des quartiers en rénovation ou dans des nouveaux quartiers. Aujourd'hui, l'option

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

privilégiée pour réduire l'intensité de l'ICU est l'implantation de végétation dans les formes urbaines existantes (Rizwan *et al.*, 2008 ; Foissard., 2014 ; Norton *et al.*, 2015).

La végétation permet de modifier différents aspects du bilan énergétique en milieu urbain. Elle joue ainsi un rôle de régulation en limitant la hausse des températures. Cette atténuation est liée à des facteurs telle que l'évapotranspiration ou la modification du bilan radiatif (ombre, absorption du rayonnement) (Rizwan *et al.*, 2008). Ce phénomène d'atténuation par la végétation peut aboutir à la mise en place d'un microclimat que l'on pourrait caractériser comme des îlots de fraîcheur au sein de la matrice urbaine (Cao *et al.*, 2010 ; Vidrih et Medved, 2013 ; Feyisa *et al.*, 2014). L'intensité des îlots de fraîcheur est influencée par la morphologie urbaine environnante ainsi que par la distribution du végétal au sein de l'îlot (Zhou et al., 2011a).

Plusieurs méthodes sont aujourd'hui utilisées pour étudier l'îlot de chaleur urbain dont celles basées sur la physique de l'atmosphère (par exemple le modèle Town Energy Balance développé par V. Masson (2000) ou celles utilisant des approches géostatistiques (méthodes utilisées dans cette thèse). La modélisation statistique de la variabilité spatiale des températures en ville est basée sur la relation statistique entre des métriques paysagères, qui expriment la diversité de l'occupation du sol et la répartition de la température de l'air obtenue par l'intermédiaire d'un réseau de stations ou de capteurs météorologiques. Une très grande diversité de métriques paysagères telles que les métriques de configuration, de composition ou de fragmentation (Zhou *et al.*, 2011a ; Maimaitiyiming *et al.*, 2014) ont déjà été utilisées pour étudier la relation entre le paysage et le climat local à différentes échelles. Les résultats de ces deux études ont montré une corrélation élevée (R^2>0,7) entre la densité de végétation et la température de l'air, et ce aux échelles de 200m et 900m. Les travaux étudiant les îlots de fraîcheur en milieu urbain utilisent majoritairement des données cartographiques issues de données de télédétection à moyenne et haute résolution spatiale pour étudier le paysage urbain (Yuan et Bauer, 2007 ; Li H. *et al.*, 2018). Ces données offrent l'intérêt de couvrir l'ensemble du territoire urbain mais présentent rapidement des limites pour effectuer des analyses à des échelles fines telles que l'échelle du quartier ou du parc urbain (Gunawardena *et al.*, 2017). En effet, les résolutions spatiales des données paysagères utilisées sont souvent supérieures ou égales à l'échelle spatiale de mesure du phénomène climatique local, tel qu'un îlot de fraîcheur. Le rôle de la végétation est donc mis en évidence seulement à l'échelle de grands parcs urbains ou au grandes « masses » de végétation urbaine, ce qui restreint la quantification de l'effet de la végétation.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Favoriser le développement des îlots de fraîcheur est donc une question essentielle pour les gestionnaires du territoire. Introduire du végétal dans une matrice urbaine fortement minéralisée est une question complexe. Aujourd'hui, un grand nombre de métropoles se tourne vers les délaissés urbains et anciennes friches industrielles pour réintroduire de la végétation en ville (Bonthoux *et al.*, 2014). Ces anciennes friches représentent parfois des surfaces importantes de végétation en ville qui fonctionnent parfois déjà comme des îlots de fraîcheur urbains. Les réaménagements de ces sites, pour les rendre accessibles aux citoyens, peuvent modifier le climat et donc diminuer la capacité du site à jouer son rôle d'îlot de fraîcheur.

L'ancienne friche industrielle du site des Prairies St Martin de Rennes fait l'objet d'un vaste projet de réaménagement en parc « écologique » urbain. Ce site, labélisé par le CNRS dans le cadre du Dispositif de Partenariat en Ecologie et Environnement (DiPEE) et de la Zone Atelier Armorique (CNRS –ILTER), va être profondément modifié. Il s'agit d'ouvrir des espaces aujourd'hui majoritairement fermés par la végétation, d'assurer la dépollution du site par l'excavation de sols pollués et de rendre le site accessible pour un usage récréatif pour les citoyens. Ces modifications vont modifier le fonctionnement actuel du milieu sur une période de temps très courte. On peut donc se poser la question de l'impact de ces travaux sur le climat actuel et à venir du site et de sa proche périphérie.

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons d'évaluer la cartographie de l'occupation du sol issue de différents types de capteurs THRS 2D et 3D pour la caractérisation de l'îlot de fraîcheur du site des Prairies St Martin de Rennes. L'objectif de ces travaux est 1) d'évaluer l'apport de la végétation dans l'analyse de la variabilité des températures de ce site en situation d'îlot de chaleur urbain, 2) d'évaluer la ou les échelles spatiales les plus pertinentes pour étudier la variable de température de l'air mesurée sur le site et 3) d'évaluer l'apport des données de télédétection THRS 3D dans l'amélioration de la compréhension de la répartition des températures.

2 Le site d'étude

Le site d'étude a été largement détaillé dans le chapitre 3. Pour rappel, il s'agit d'un site de 40ha en proche périphérie du centre-ville de Rennes. Ce site est caractérisé par un relief en dépression d'une trentaine de mètres à l'Est. Dominé par la végétation, il présente un gradient de paysage important allant d'un paysage ouvert à un paysage

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

fermé en passant par des paysages de friches herbacées et de haies vives. Nous ne présenterons ici que les caractéristiques climatiques du site.

2.1 L'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération

L'îlot de chaleur urbain de l'agglomération rennaise a été largement décrit par Foissard (2015). L'auteur s'appuie sur un réseau de 20 stations météorologiques complètes implantées le long d'un gradient ville/campagne initialement dans le cadre du programme ECORURB (Figure 9.2). Les stations ont été déployées en fonction de la diversité morphologique des quartiers et du gradient d'artificialisation entre le centre-ville de Rennes et Melesse, une commune périphérique du Nord de Rennes (Quénol *et al.*, 2010). Les stations présentent donc des contextes paysagers contrastés avec des taux d'artificialisations supérieurs à 20% pour les stations du centre-ville et des taux de végétalisations de 50% à 98% pour les stations les plus rurales.

Les écarts de température entre le centre et périphérie de la ville de Rennes peuvent être particulièrement marqués. La figure 9.1 présente les températures minima et maxima journalier pour l'année 2015, pour la station du centre-ville (Griffon) et les données de la station rurale (Melesse).La station Griffon présente ainsi un écart moyen des températures minimales nocturne de +2,8°C par rapport à la station Melesse pour l'année 2015.

L'ICU est caractérisé par l'écart de température entre la ville et la campagne. Sur l'année 2015, Les écarts de températures les plus intenses ont été mesurés majoritairement de nuit. Dans le cadre de cette thèse, le calcul de l'ICU est réalisé sur les écarts des températures minimales nocturnes, et non, sur le calcul de l'ICU par l'écart maximal instantané. La méthode de calcul basée sur l'écart des températures minimales nocturnes permet de retenir les écarts maximum indépendamment de la variabilité temporelle de l'ICU au cours de la nuit (Foissard, 2015).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

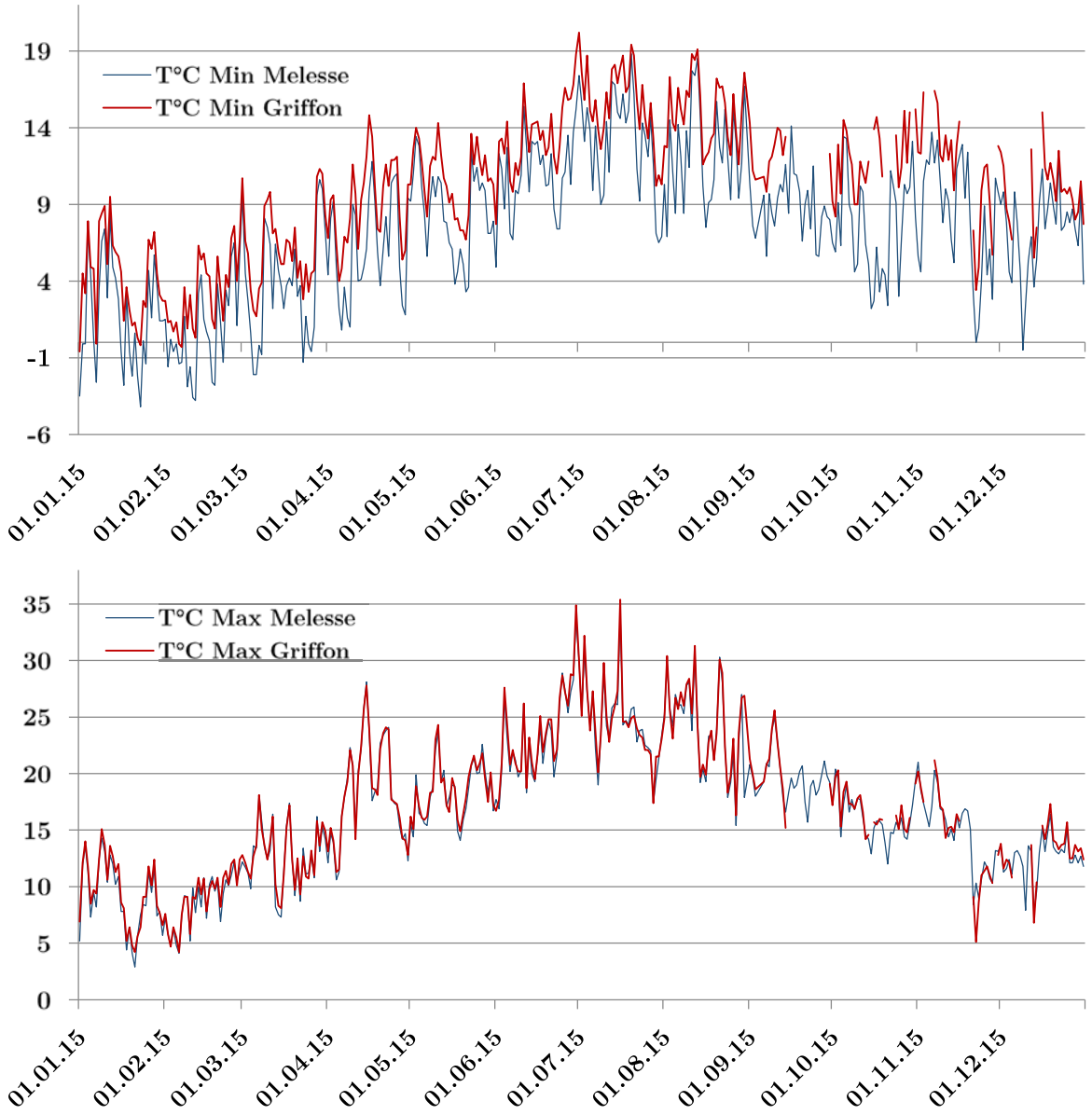


Figure 9.1 : Températures minimales journalières (en haut) et températures maximales journalières (en bas) pour les stations Griffon et Melesse pour l'année 2015

Les précédentes études sur la variabilité de l'ICU sur le site de Rennes ont mis en évidence un lien fort entre cette variabilité des températures et les variables paysagères dérivées des données d'occupation du sol étudiées à différentes échelles spatiales. La figure 9.2 présente les résultats de la modélisation de l'intensité de l'CU moyen en 2011. Cette cartographie illustre un gradient de température moyen entre la ville et la campagne proche de 5°C calculé sur la base d'une analyse multicritère (Foissard, 2015). Ces travaux ont montré que l'approche géostatistique à l'échelle de la métropole, basée sur des métriques du paysage calculées à 200m et 900m permettait

une bonne spatialisation de l'intensité de l'îlot de chaleur, à l'exception de certain site tel que le site des Prairies St Martin. L'analyse des résidus du modèle utilisé dans le cadre de ses travaux montre une surestimation de l'intensité de l'îlot de chaleur de +1,6 à +1,8°C suivant la période d'étude.

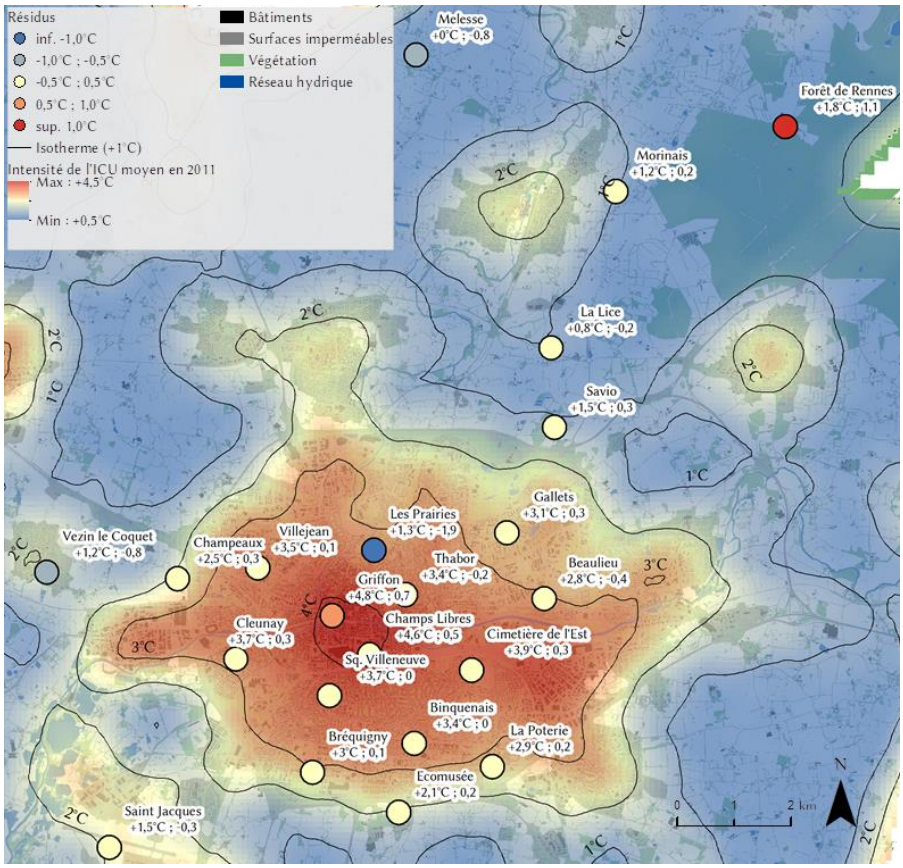


Figure 9.2 : Carte de l'ICU moyen en 2011 (Foissard, 2015)

2.2 Le réseau de mesures

Pour étudier les spécificités climatiques du site, un réseau de capteurs enregistrant la température de l'air a été implanté *in situ* en Avril 2014 dans le cadre de la Zone Atelier Armorique. Il s'agit de capteurs de température de type *TinyTag Talk 2* disposés dans des abris ventilés RS3 (Figure 9.3). L'ensemble des capteurs ont été implantés dans des configurations similaires, c'est-à-dire à une hauteur entre 2,5m et 3m et selon une orientation Nord. Le positionnement précis a été défini en fonction du mobilier urbain disponible pour installer le capteur (poteau téléphonique ou électrique, candélabre,...) ou de la configuration du site qui n'a pas toujours été optimale. Le choix d'une hauteur de 3m environ est essentiellement lié aux multiples dégradations le réseau de mesures a subi depuis sa mise en œuvre.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Le choix des sites d'implantation des capteurs a été réalisé en fonction de deux critères, 1) le gradient de paysage et d'artificialisation (Table 9.1) la pérennité des points de mesure pendant et après les travaux de réaménagement du site en parc urbain. Cette distribution a pour objectif d'étudier la mesure de la variabilité locale du climat en fonction du contexte paysager présent et à venir (Figure 9.4).



Figure 9.3 : Illustration de la diversité des sites d'implantation des capteurs de température

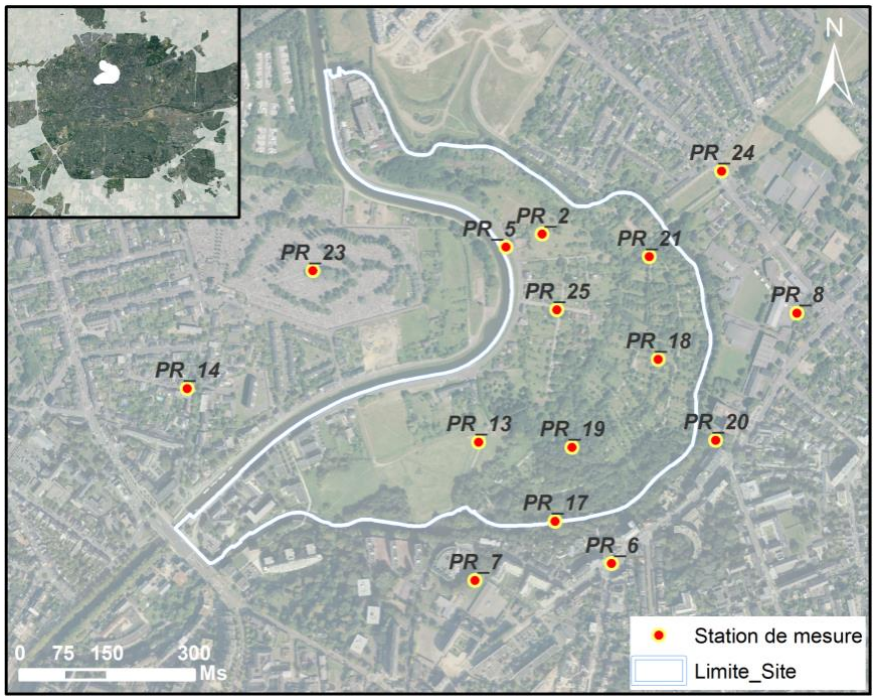


Figure 9.4 : Réseau des capteurs de température implantés sur le site des PSM

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 9.1 : Caractéristiques paysagères des stations de mesure

Station	morphologie urbaine / paysage
PR 19 PR 17	Boisement
PR 18 PR 21	Bocage relictuel ou haie vive
PR 2 PR 13	Espace semi-ouvert à dominante prairial
PR 5	Espace semi-ouvert en bord de canal
PR 24	Espace semi-ouvert mixte
PR_25	Pavillonnaire informel
PR 23	Espace semi-ouvert à dominante artificialisé
PR 7	Activité tertiaire dans des immeubles de moyenne hauteur (Sup. à 5 étages)
PR 8	Activité tertiaire dans des immeubles de faible hauteur (2 étages max.)
PR14	Habitat collectif dans des immeubles de moyenne hauteur
PR 6	Habitat collectif dense dans des immeubles de moyenne hauteur
PR 20	Habitat collectif dans des immeubles de moyenne hauteur

2.3 La répartition des températures à l'échelle du site

Ce site présente sur les années 2014 – 2015 une température moyenne de l'ensemble des capteurs de 14,1°C avec une température moyennes de 13°C pour le point de mesures ayant enregistré les données les plus basses et une température moyenne de 15,2°C pour le point de mesures avec les données les plus élevées.. Les graphiques 9.5 et 9.6 illustrent la variabilité journalière des températures sur les stations PR_6 et PR_18 sur la période de Janvier à Octobre 2015 et montrent ainsi une forte variabilité spatiale des températures selon les postes de mesures.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

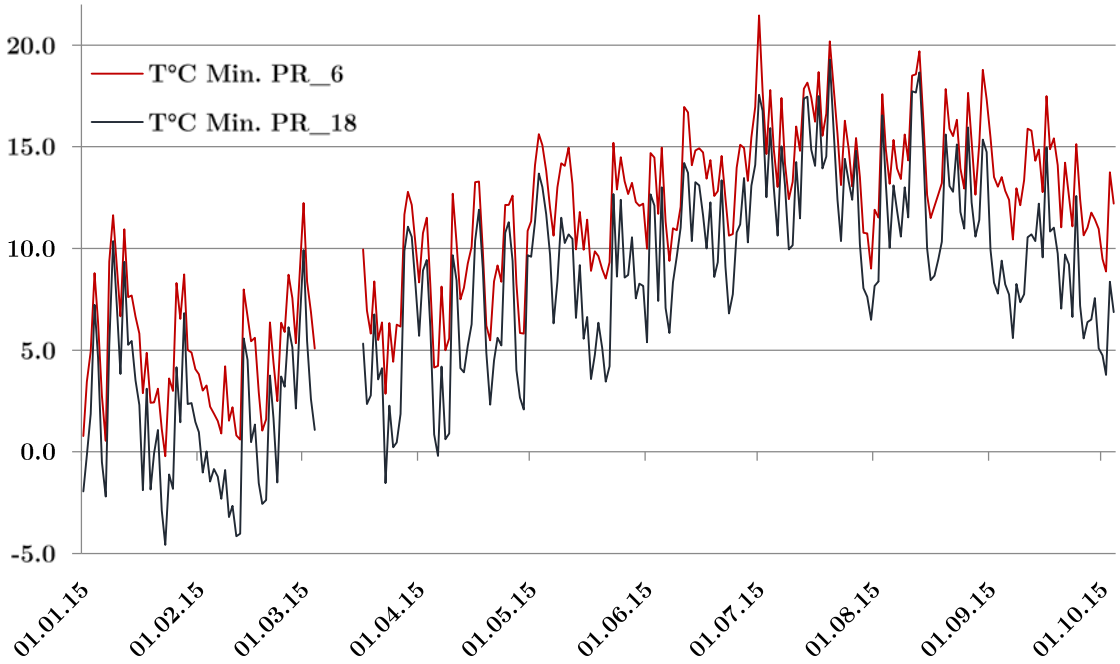


Figure 9.5 : Températures minimales journalières pour les stations PR_6 et PR_18 pour la période Janvier-Octobre 2015

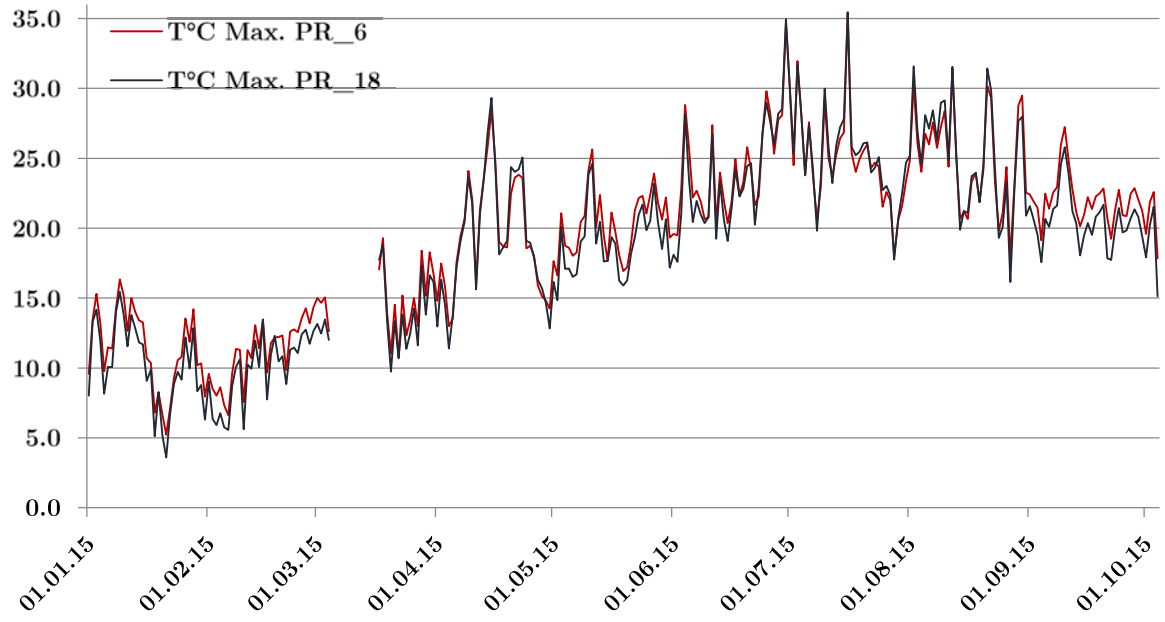


Figure 9.6 : Températures maximales journalières pour les stations PR_6 et PR_18 pour la période Janvier-Octobre 2015

L'analyse des minima journaliers sur la période Avril 2014 - Octobre 2015, permet d'observer un écart moyen de 3°C, avec un écart maximum de 7,1°C entre les stations PR 2 et la station PR_6 dans la nuit du 2 Novembre 2015 (Figure 9.7).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

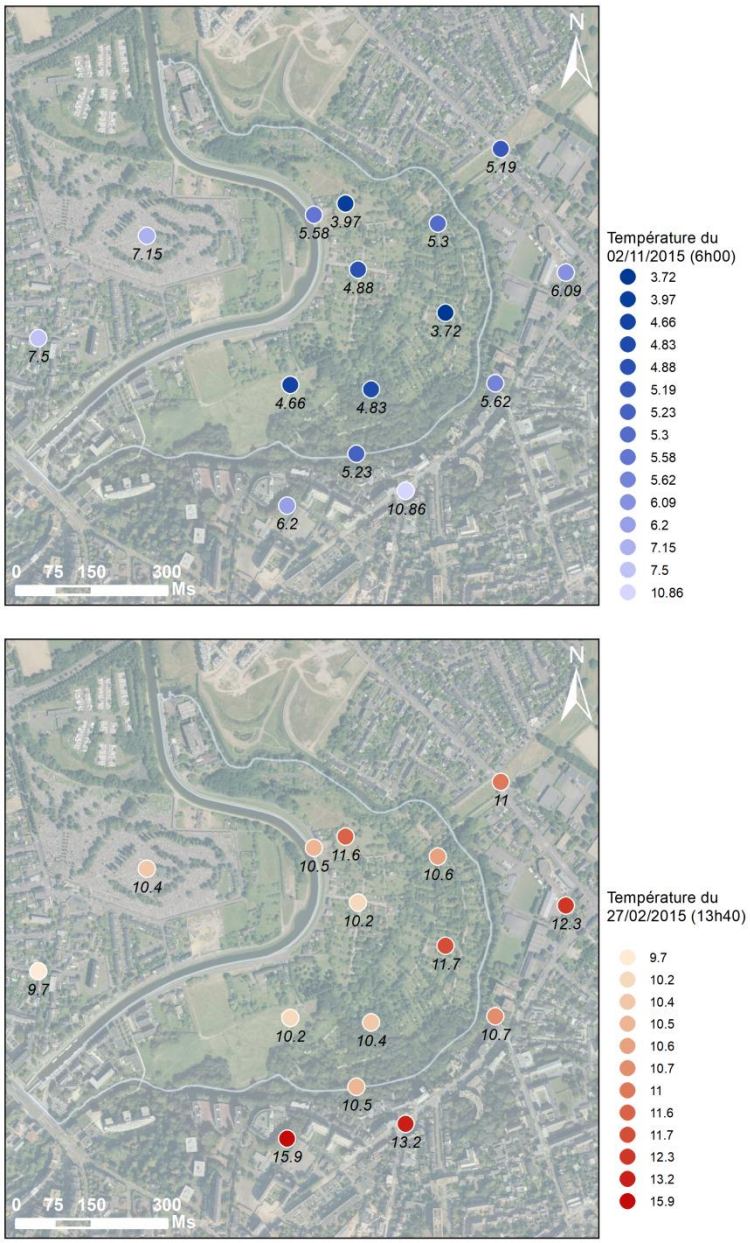


Figure 9.7 : Représentation de la répartition des températures dans la nuit du 2 Novembre 2015 à 6h00 (à droite) et des températures dans la journée du 27 février 2015 (à gauche)

L'analyse des maxima sur la même période illustre une amplitude moyenne des températures de 2.5°C avec un maxima de 6.4°C dans la journée du 27 Février 2015 entre la station la plus froide PR_14 et la station la plus chaude PR_7 (Figure 9.8). La définition des stations les plus chaudes et les plus froides sur la période d'étude est basée sur l'analyse de l'occurrence du nombre de jours où la station enregistrent les températures les plus ou moins élevées (Figure 9.8). Ainsi, les capteurs PR_2 avec 177jr et PR_18 avec 164jr sont les stations de mesures présentant le plus souvent les

valeurs de température les plus faibles. Les capteurs PR_6 avec 200jr et PR_2 avec 174jr sont les stations qui présentent le plus fréquemment les valeurs les plus élevées.

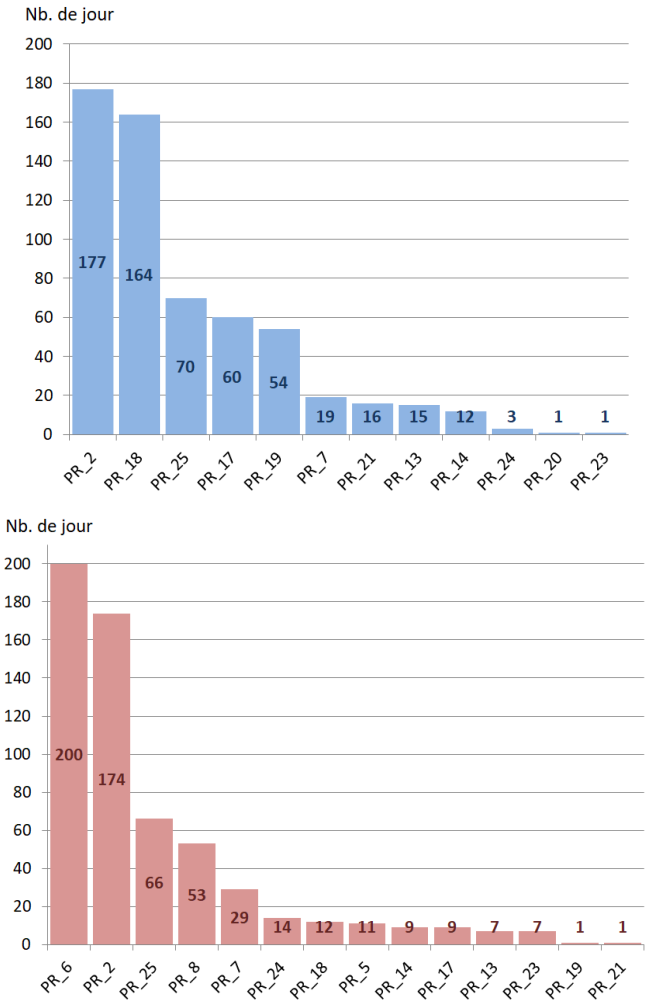


Figure 9.8 : Représentation de la répartition des occurrences de la station la plus froide (à gauche) et de la station la plus chaude (à droite)

3 Méthodologie

3.1 Traitements des données climatiques

3.1.1 Les températures du site en situation d'îlot de chaleur urbain

Le site des Prairies St-Martin représente un îlot de fraîcheur (IF) dans l'ICU de la ville de Rennes. Les températures enregistrées par les capteurs sont similaires à celles enregistrées dans les secteurs ruraux du réseau météorologique installé sur le territoire

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

de Rennes Métropole. Pour mieux comprendre le rôle du paysage de ce site dans la répartition des températures à l'échelle de la ville de Rennes, nous avons sélectionné des nuits où une situation d'ICU a été mesurée sur le gradient ville campagne. Pour cela, nous avons utilisé les données météorologiques issues du réseau de 21 stations météorologiques.

Pour calculer l'intensité de l'ICU, sur la période Avril 2014 – Décembre 2015, nous avons utilisé les mesures de la station la plus proche du centre-ville (Griffons – figure 9.2) et les données de la station de Melesse en périphérie de la métropole rennaise. Le calcul de la différence de température (Δ_{ICU}) entre ces deux stations a été effectué sur des situations nocturnes (périodes où l'ICU est le plus fort) présentant un vent inférieur à 3m/s en moyenne, ainsi qu'une absence de précipitation sur la période 16h-8h. Les nuits présentant une différence de température supérieure à 2°C entre les deux stations de références ont été identifiées comme des situations d'ICU. Sur notre période d'étude, 132 nuits ont donc été retenues.

Les situations moyennes d'été et d'hiver et une situation d'ICU intense d'été et d'hiver sont présentées dans la table 9.2.

Table 9.2 : Caractéristiques des situations d'ICU retenu

		Echelle de la métropole			**Echelle du site des Prairies**	
Saison	**ICU**	**T°c Melesse**	**T°c Griffon**	**Δ_{ICU} (°c)**	**T°cMoy.**	**$\Delta_{if\ Moy.}$ (°c)**
Eté	moyen	10,3	13,9	+3,6	11,6	-2,3
	max.	7,6	13.6	+6,0	9,4	-4,2
Hiver	moyen	-1	2,4	+3,4	-0,3	-2,7
	max.	4,6	12.3	+7,7	5,7	-6,6

Afin d'étudier plus précisément l'IF des Prairies St-Martin, nous avons calculé la différence (Δ_{if} : Delta Îlot de fraîcheur) entre les températures minimales des Prairies St-Martin et celles de la station de référence du centre-ville (station Griffons).

$$\Delta_{if} = (\min T°_{PSM})\ h- (\min T°_{Griffons})$$

Les valeurs étudiées expriment donc l'intensité de cet IF comparativement à la station la plus chaude du réseau (Foissard, 2015).

La figure 9.9 représente la répartition du Δ_{if} des températures observées lors des situations d'ICU définies ci-dessus. L'intensité de l'îlot de fraîcheur varie significativement en fonction de la saison (Table 9.2). L'amplitude thermique moyenne mesurée pour la situation moyenne d'été est de -2.3°C et de -2.7°C pour la situation

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

moyenne d'hiver. Le maxima d'intensité de fraîcheur est mesuré pour la station PR_2 pour les deux situations moyennes avec un Δ_{if} d'été de -5,8°C et un Δ_{if} d'hiver de -3,7°C. Le minima est mesuré pour la station PR_6 avec un Δ_{if} d'été de -2,7°C et un Δ_{if} d'hiver de -0,4°C

Cette amplitude thermique est davantage marquée en situation d'ICU intense. Les maxima des températures de l'IF sont mesurés pour la station PR_18 avec un Δ_{if} de -3,6°C en été et de -8,6°C en hiver, les minima étant mesurés sur la station PR_6 avec un Δ_{if} de -0,8°C en été et de -1,4°C en hiver.

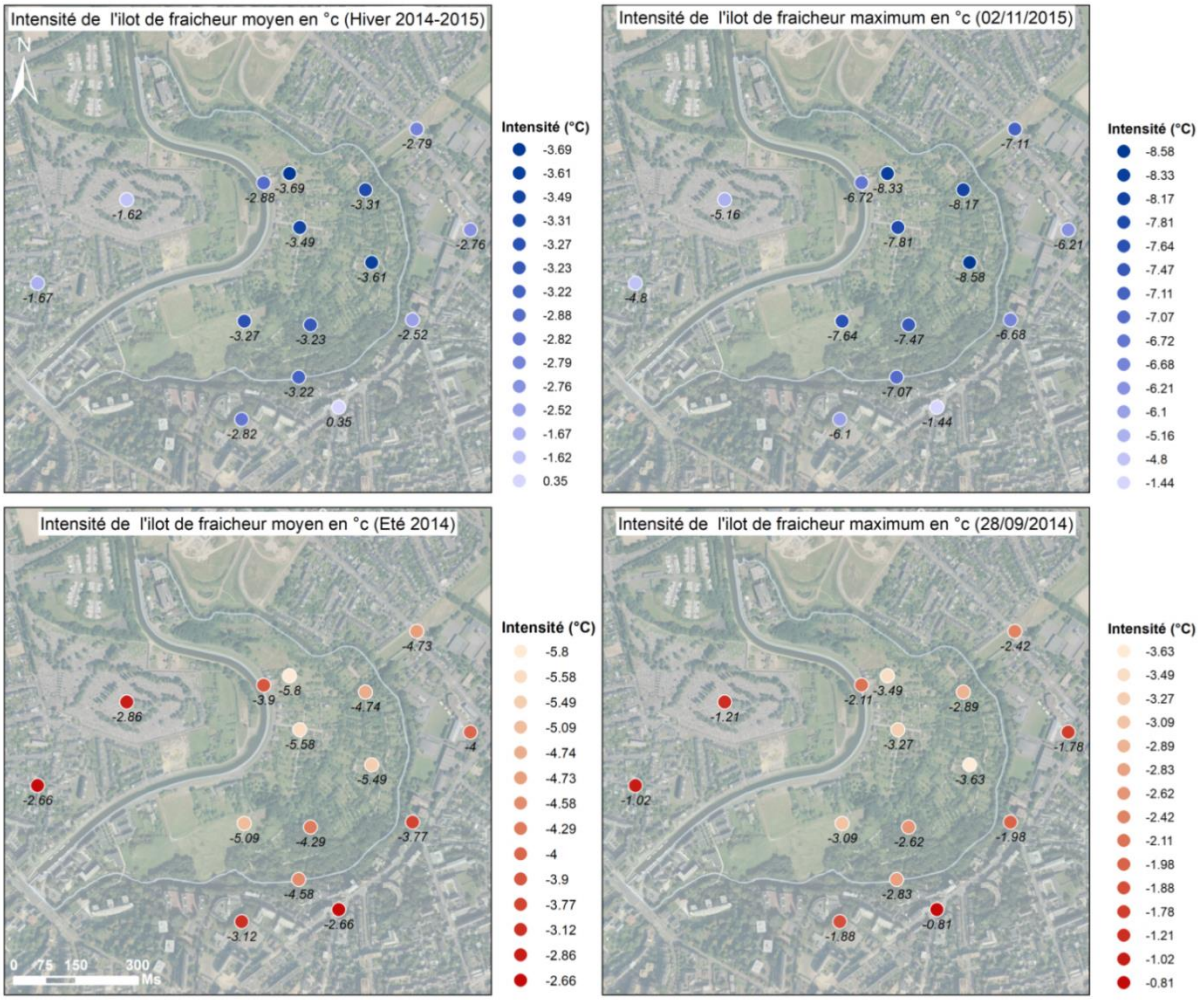


Figure 9.9 : Représentation cartographique de l'intensité de l'îlot de fraîcheur des PSM pour les quatre situations d'ICU retenues

Trois stations de mesures structurent fortement les extrêmes de température du Δ_{if} en condition d'ICU (Figure 9.10). En situation d'hiver et d'été le maxima d'intensité de l'IF sont plus fréquemment mesurés pour les stations PR_2 et PR_18 et les minima pour les stations PR_6 et PR_14.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

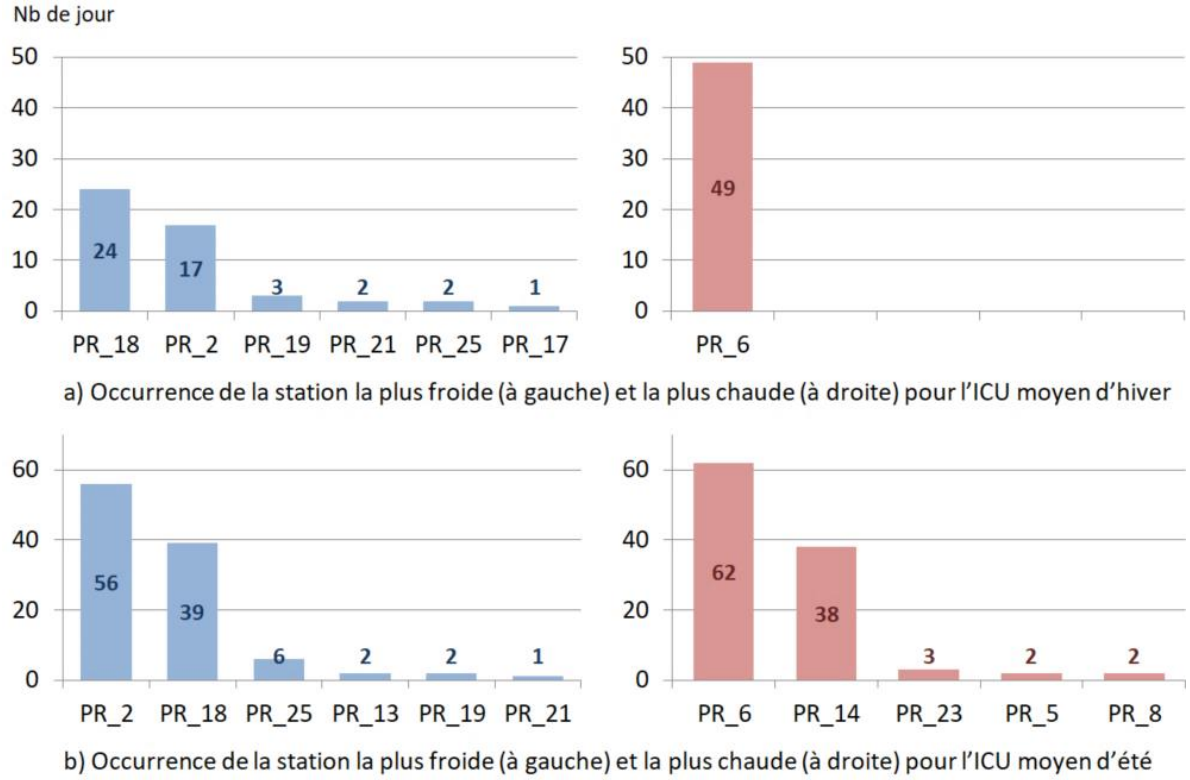


Figure 9.10 : Représentation graphique de l'occurrence de la station la plus froide en situation d'ICU

Nous avons cherché à étudier plus finement la structuration du jeu de données de Δ_{if} en étudiant l'ensemble des situations saisonnières au travers d'une classification hiérarchique ascendante (CAH). Celle-ci a été réalisée suivant la méthode Ward à partir du package *factomine R* sous le logiciel R.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

La CAH des situations estivales est présentée figure 9.11.

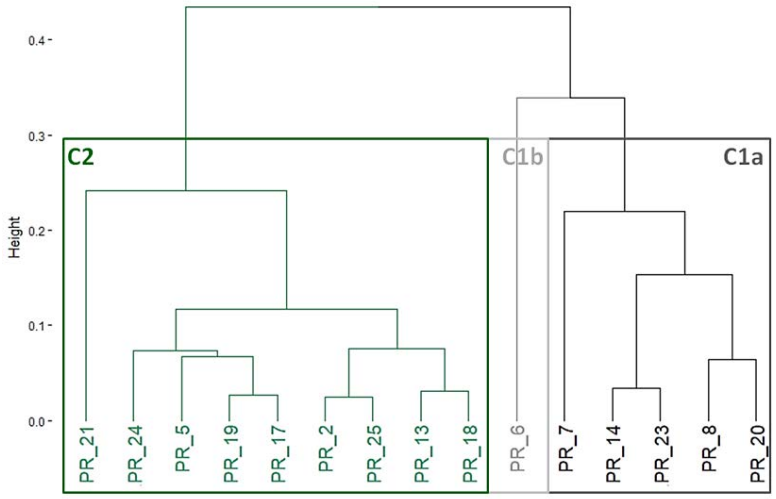


Figure 9.11 : Dendrogramme de la CAH des données Δif en situation d'ICU estivale

La CAH suggère une structuration en 3 classes avec les stations relevant des espaces à dominantes artificialisées (C1a), la station PR_6 (C1b), et la classe regroupant les stations à dominante végétalisée. Les classes C1a et C1b pourraient être regroupées dans la classe à dominante artificialisée. La CAH reflète assez fidèlement les deux grands ensembles paysagers du site des Prairies St-Martin, mais également l'hétérogénéité paysagère plus fine de l'implantation des stations. Ainsi, les stations « arborées» PR_19 et PR_17 dans la classe C2 sont très proches, comme les stations PR8 et PR_20 ou encore les stations PR_6 et PR_7.

La CAH d'hiver (Figure 9.12) montre une structuration des données légèrement différente. 3 classes reflètent également la structuration du paysage avec les classes C1a et C1b représentant les surfaces à dominante artificialisée et la classe C2 représentant les surfaces à dominante végétalisée. Seule la station PR_8 change de classe en basculant de C1a à C2.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

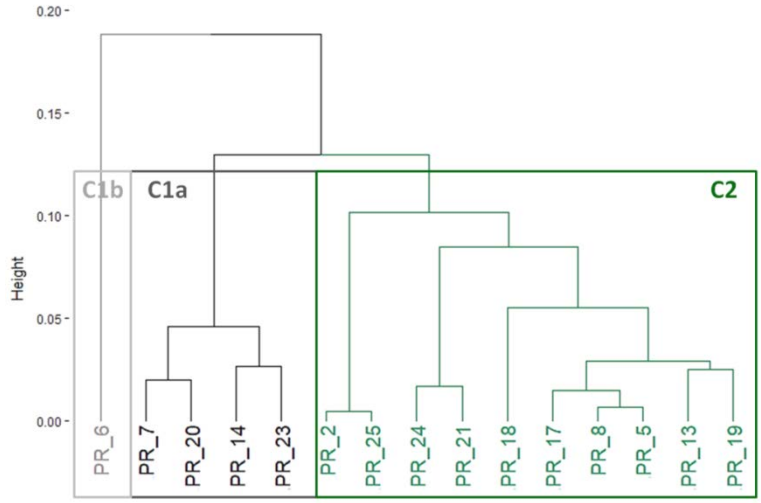


Figure 9.12 : Dendrogramme de la CAH des données Δif en situation d'ICU hivernale

3.1.2 Les données de télédétection

Les données de télédétection ont été présentées dans le chapitre 3 de la partie 1, ainsi que dans les chapitres 6 et 7 de la partie 3. Dans le cadre de cette partie nous exploitons les résultats des chapitres 6 et 7 concernant la classification issue des données Pléiades et des données LiDAR. Seuls les traitements relevant de l'inter-calibration des modèles 3D et de l'analyse des données du vol aéroporté de l'IGN feront l'objet d'une présentation.

3.1.2.1 Les traitements de l'information 3D

Les différentes méthodes de reconstruction des données 3D ont été présentées dans le chapitre 3. Pour rappel, les données LiDAR ont été acquises à partir d'un lidar Optech-titan bi-spectral avec une densité moyenne de 14points/m² pour le nuage de points du PIR et 11points/m² pour celui du vert. Les données stéréo-Pléiades ont été exploitées avec la suite Erdas® imagine en appliquant une méthode SGM (Semi Global Matching) sur les images panchromatiques en mode capteur parfait. Le résultat de la reconstruction 3D est un nuage de points d'une densité moyenne de 4points/m². Enfin, les données photogrammétriques issues du vol de l'IGN à 20cm ont été exploitées avec logiciel Agisoftphotoscan. Le nuage de points ainsi obtenu présente une densité moyenne 25points/m².

Ces différents nuages de points présentaient des précisions altimétriques contrastées (inhérentes au capteur et à la géométrie de la visée, mais également à la méthode de reconstruction). Pour harmoniser l'ensemble du jeu de données, nous avons utilisé le MNT issu du Lidar comme surface de référence pour normaliser les altitudes

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

des données 3D Pléiades et IGN (Figure 9.13). Pour cela, la distance entre le MNT issu des données Lidar et les nuages de points des données IGN et Pléiades a été calculée, puis soustraite aux valeurs d'altitude de ces deux dernières.

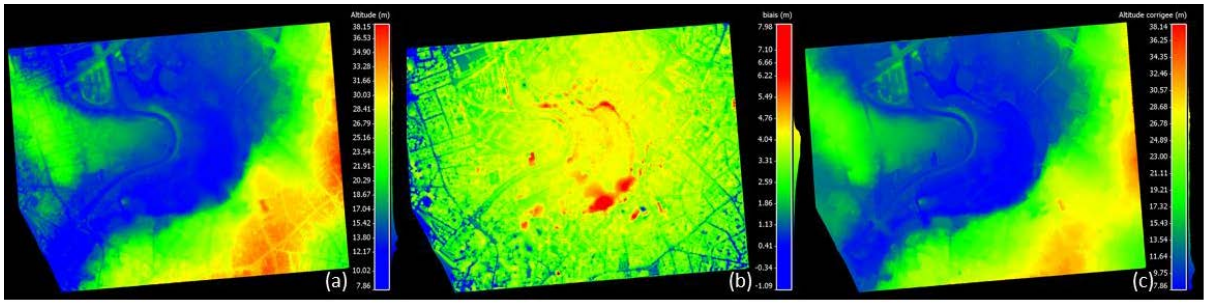


Figure 9.13 : Exemple de la correction du MNT issues des données IGN avec le lidar (a) le MNT initial, (b) le biais IGN/LIDAR, (c) le MNT corrigé

3.1.2.2 La classification des données aéroportées IGN

La reconstruction des données 3D aéroportées IGN a été effectuée avec le logiciel Agisoft, ce qui a permis de conserver les comptes numériques des images. La classification des données 3D IGN a donc été réalisée sur le nuage de points à partir des données d'altimétrie et des données multispectrales des images en utilisant les logiciels Cloudcompare et LASTOOLS ®rapidlasso.

Deux étapes ont été nécessaires pour classer les données. Tout d'abord, la base de données de l'IGN (BD TOPO Volet Bâti) a été utilisée pour masquer les surfaces bâties dans le nuage de points. La géométrie de la base de données de l'IGN étant moins précise que les données 3D aéroportées IGN, une zone tampon de 0,5m a été appliquée autour des bâtiments pour éliminer les erreurs. Les points ainsi extraits ont été classés en bâti. Ensuite, la classe végétation a été extraite par seuillage successif d'indices spectraux calculés à partir du nuage de points (Table 9.3).

Table 9.3 : Indice spectraux calculés sur le nuage de point issue des données IGN

Indices	Formules
Ratio	$\frac{C_n\,Vert}{C_n\,Rouge}$
Indice normalisé	$\frac{C_n\,Rouge\ -\ C_n\,Vert}{C_n\,Rouge\ +\ C_n\,Vert}$

Les classes végétation haute et basse ont enfin été identifiées par seuillage de l'altitude, inférieure à 1m pour la végétation basse et supérieure à 1m pour la végétation « haute» (Figure 9.14).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

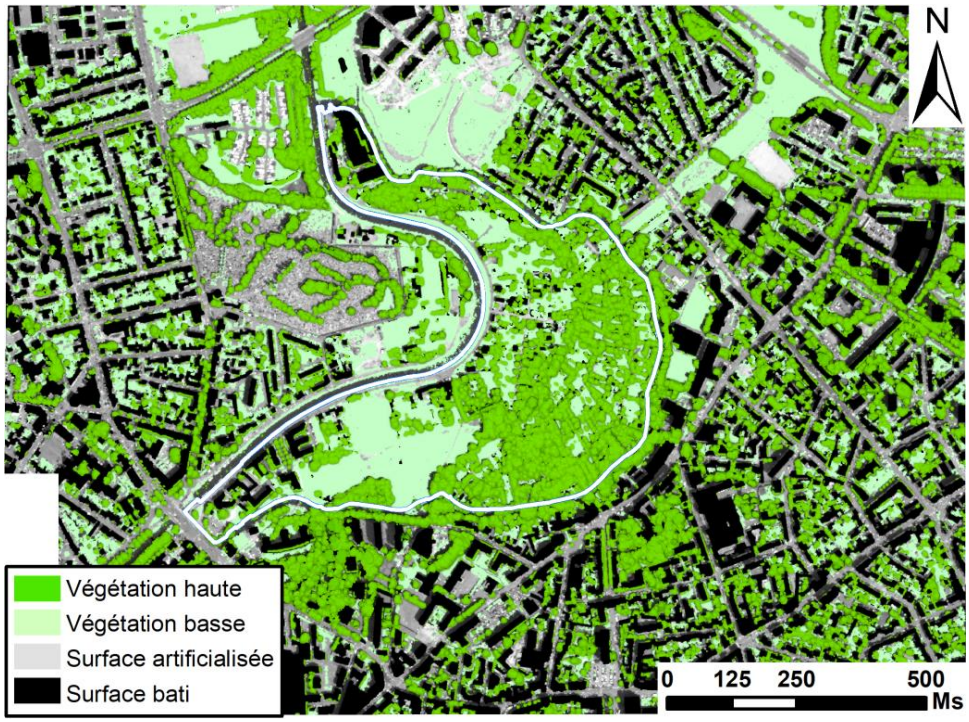


Figure 9.14 : Classification du nuage de points issu des données IGN

3.1.2.3 Le post-traitement des classifications

Les classifications utilisées pour cette étude présentaient des niveaux de nomenclature différents allant de 4 à 7 classes en fonction de la donnée utilisée. Il a donc été nécessaire d'agréger les classes pour pouvoir les comparer entre elles (Figure 9.15). Six classes ont été retenues pour cette étude. La classe végétation a été déclinée en végétation basse et végétation haute, puis les surfaces artificialisées, les routes, les surfaces bâties et les surfaces en eau. Ces trois dernières classes sont issues de la BD TOPO de l'IGN.

Dans le cadre de cette étude, les surfaces artificialisées ont été considérées comme identiques pour l'ensemble des cartographies. Nous avons utilisé pour cela la classe "surfaces artificialisées" dérivée des données LIDAR. Ce choix a été fait pour étudier spécifiquement l'évolution de la variable végétation dans les analyses statistiques, sans être influencé par l'évolution des surfaces artificialisées classées à partir des différentes données utilisées.

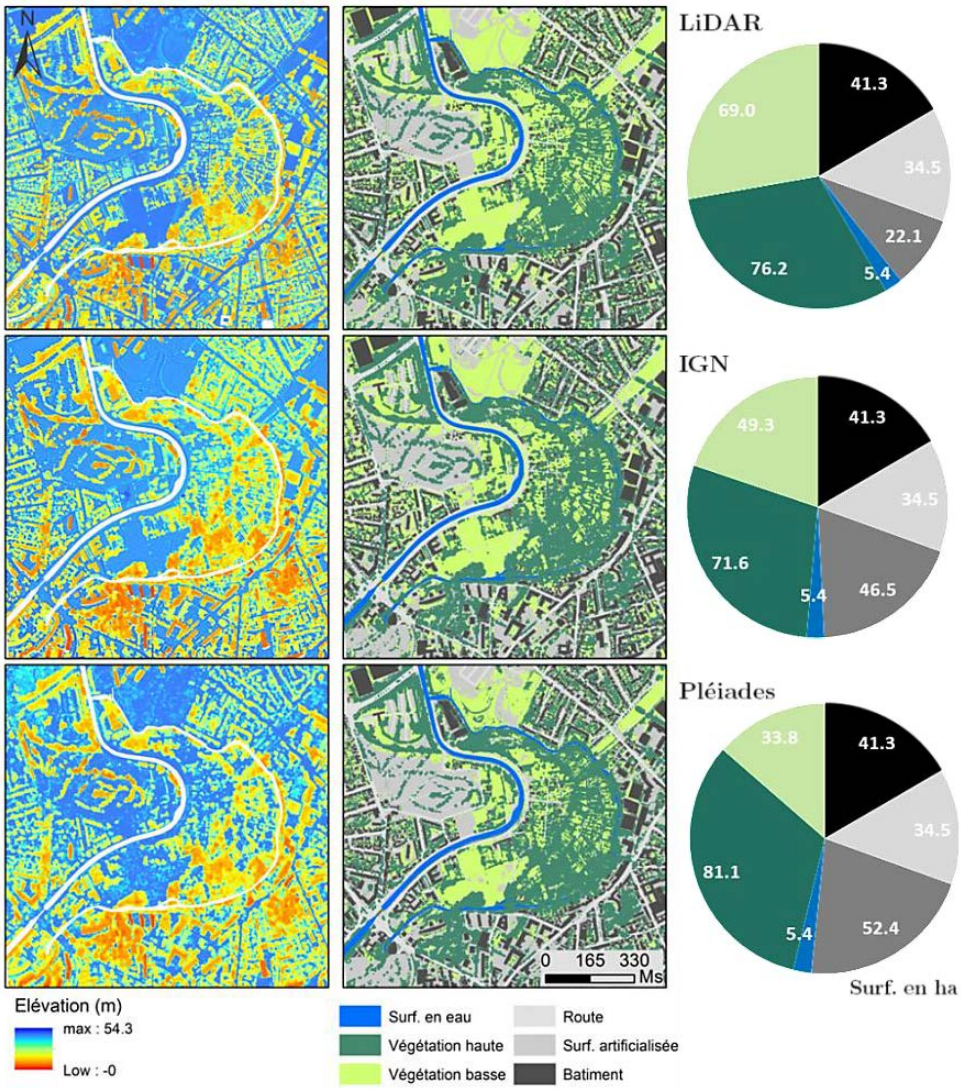


Figure 9.15 : Extraits des 3 classifications après homogénéisation de la nomenclature

3.1.3 Le calcul des métriques paysagères

Les métriques paysagères ont été calculées à 4 échelles d'analyse de 25 à 150m autour des stations de mesure. Cette analyse par zones tampon permet de tester le lien entre la mesure de température et l'hétérogénéité de la matrice paysagère environnante en fonction de l'échelle spatiale de la donnée cartographique considérée. Afin de retenir les plus pertinentes – celles qui illustrent l'effet de la composition et de la structure 2D et 3D du paysage- une analyse bibliographique détaillée a été réalisée (Xiao R. *et al.*, 2007 ; Zhou *et al.*, 2011b ; Maimaitiyiming *et al.*, 2014 ; Estoque *et al.*, 2017). Cinq métriques paysagères ont été retenues et calculées à partir des logiciels ArcGIS (ESRI ®), CHLOE (Boussard *et al.*, 2014) et SAGA (Conrad *et al.*, 2015).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 9.4 : Liste des métriques paysagères

Catégorie des indices	Indices Calculés	Formule	Logiciel utilisé
Situation	Altitude (Alt) Pente (Pt) Orientation (Or)		ArcGIS
Composition	Pourcentage par classe par site (P)	$\frac{Sfclasse}{Sftotale}$	ArcGIS
Structure	Distance (Dist)		ArcGIS
	Le grain du paysage par classe (LG)*	$\frac{Pcnc + \sum_{i=2}^{nc-1}(i-1) * Pci}{(nc-1)-(nc-2) * Pcnc}$	Chloé (INRA)
Structure3D	Volume moyen par classe (Vol)*	$\sum Cn * Sf$	SAGA
	Sky view factor moyen (SVF)*	$= \sum_{i=1}^{n} dF_{dX \to dY_i} \cdot v_i$	

* Uniquement pour les classes « bâti » et « végétation haute »

Quatre classes de métriques paysagères ont été calculées sous SIG à partir du logiciel ArcGIS@ESRI (Table 9.4) :

- les métriques topographiques qui décrivent le relief du site,
- les métriques de composition du paysage, basées sur la proportion de chaque classe d'occupation du sol,
- les métriques de structure 2D du paysage, calculées à partir de la distance entre la station et les classes de l'eau et du bâti, ainsi que par le grain du paysage qui étudie l'organisation spatiale des classes d'occupation du sol (Boussard *et al*, 2012),
- les indices de structure 3D : volume et SkyView Factor (fraction d'ouverture du ciel) (Boehner et Antonie 2009), calculés uniquement sur les classes bâties et végétation haute. Dans ce cas, le volume a été calculé en 2,5D à partir des modèles numériques d'élévation des différents capteurs, et le SVF à partir des modèles numériques de surface, intégrant donc le bâti et la végétation haute dans le calcul (Kastendeuch, 2013).

3.1.4 Les analyses statistiques

Afin d'étudier les relations entre les températures et le paysage, trois types d'analyses statistiques ont été utilisées : les analyses univariées, les analyses multi-inférences, et les régressions multiples basées sur les composantes de l'analyse en composante principale (ACP).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Premièrement, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les valeurs du Δ_{if} et les variables paysagères pour chaque échelle et pour les différents capteurs (Figure 9.16). Ces premières analyses ont permis d'étudier pour les 4 situations d'ICU, la relation entre les différentes variables par l'analyse du R^2 et de la p-value. L'objectif est ici d'effectuer une première lecture du jeu de données et de sélectionner les variables les plus significatives pour la suite des analyses.

Deuxièmement, nous avons développé une approche basée sur une synthèse de l'information par une analyse en composante principale (ACP) puis sur l'analyse d'une régression multiple réalisée sur les composantes de l'ACP (Figure 9.16). L'objectif est d'étudier la relation entre les classes d'occupation et les données de température du $\Delta_{if,}$ par type de données cartographiques.

Afin de mieux évaluer l'apport des différents types de végétation dans notre compréhension de la répartition du $\Delta_{if,}$ 3 ACP ont été réalisées par niveau d'échelle d'analyse et par capteur. Pour cela, les variables ont été regroupées en 3 classes :

Classe 1 : les variables relatives à l'altitude et au bâti (« ACP bâti »)
Classe 2 : la classe 1 plus les variables dérivées de la végétation basse (« ACP végétation basse »)
Classe 3 : la classe 2 plus les variables relatives à la végétation haute (« ACP végétation haute »).

Les 5 premières composantes de l'ACP ont ensuite été utilisées dans une régression multiple pour étudier la relation entre la synthèse réalisée par l'ACP et les valeurs de $\Delta_{if.}$ Les 5 premières composantes expliquent systématiquement plus de 96% de la variance globale de l'ensemble des variables (valeur minimum de variance expliquée obtenue pour les variables dérivées de la carte obtenue à partir du capteur Pléiades).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

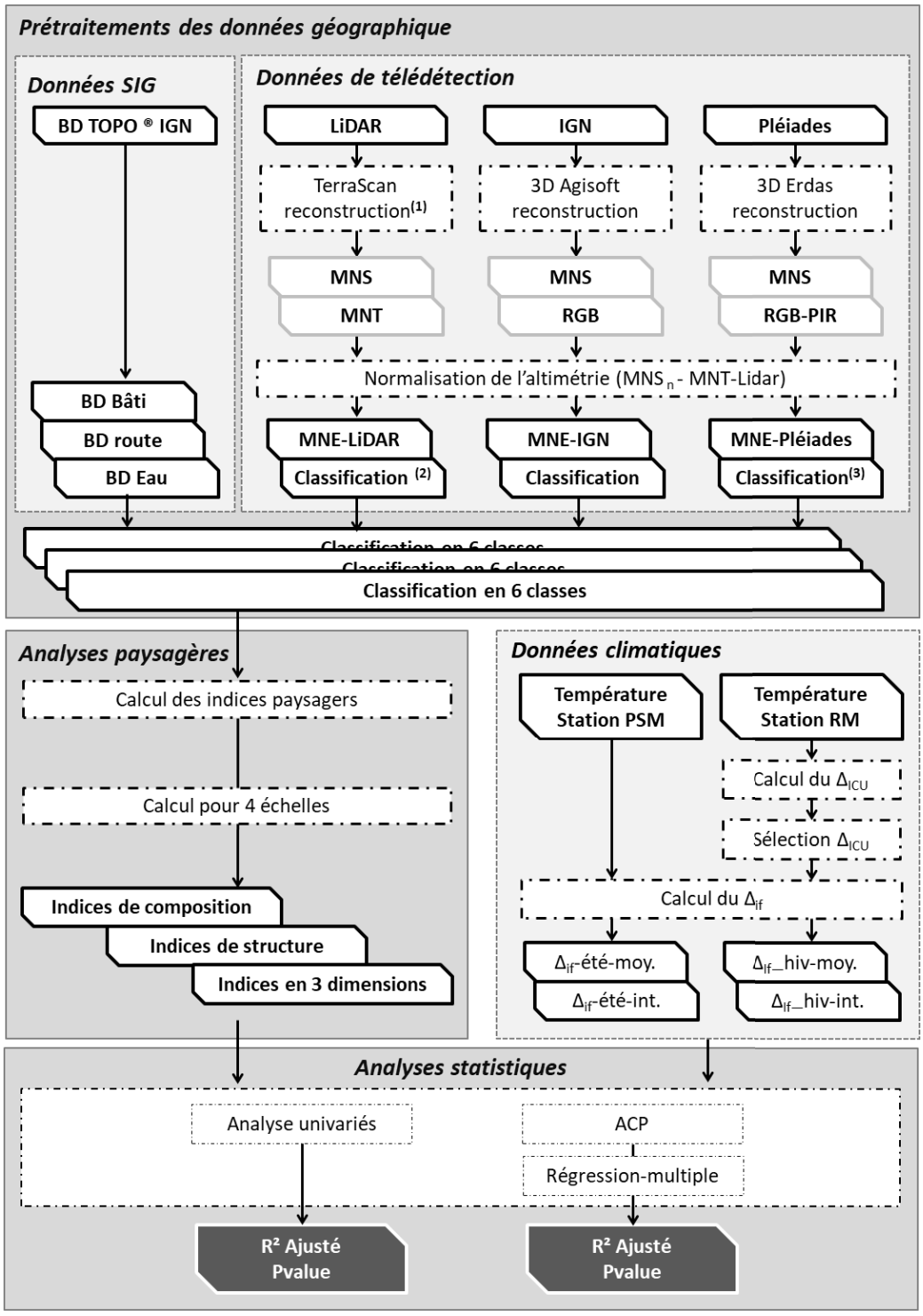


Figure 9.16 : Organigramme de traitement des données

4 Les résultats

4.1 Les analyses univariées

L'analyse des résultats des corrélations entre les données de température du Δ_{if} , pour les situations d'ICU d'hiver et d'été, et les variables paysagères sont présentées ci-dessous. Pour cette analyse, les régressions présentant une P-value significative (inf. à 0,03) ont été retenues.

4.1.1 L'analyse pour les situations d'ICU d'été

Les résultats des corrélations entre les données de température du Δ_{if} pour la situation d'ICU d'été et les variables paysagères sont présentés dans la table 9.5.

D'une manière générale, une forte corrélation entre les valeurs du Δ_{if} et les variables altitude, surface bâti (Sfbati), végétation basse (SfVeg basse) et volume de bâti (VolBat) est observée. Cette observation est la même pour les différentes échelles d'analyses et les différents types de données cartographiques.

Plus précisément, les résultats illustrent les corrélations les plus élevées :

- entre les variables paysagères dérivées des classes d'occupation du sol "bâti" ou "surfaces artificialisées" et les données de température du Δ_{if} en condition d'ICU moyen,
- entre les variables paysagères dérivées de la végétation basse et les données de température du Δ_{if} en condition d'ICU intense

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 9.5 : Résultats statistiques des régressions linéaires entre les valeurs du Δif et les variables paysagères

		Altitude	25				50				100				150				
			Sfbati	SfVeg Basse	VlBat	Sfbati	SfVeg Basse	SfVeg Hte	VlBat	SVF	Sfbati	SfVeg Basse	SfVeg Hte	Grain	VlBat	SVF	Sfbati	Sfarti f	SfVeg Basse	SfVeg Hte	Grain	VlBat
R^2	Été_Max	0.57	0.36	0.32	0.36	0.46	0.54	0.07	0.38	0.19	0.36	0.55	0.13	0.19	0.38	0.19	0.31	0.37	0.58	0.16	0.28	0.36
Lidar	Été_Moy	0.60	0.37	0.36	0.38	0.55	0.53	0.17	0.48	0.11	0.45	0.50	0.23	0.25	0.43	0.10	0.39	0.56	0.53	0.27	0.35	0.39
P value	Été_Max	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.33	0.02	0.11	0.02	0.00	0.19	0.10	0.01	0.10	0.03	0.01	0.00	0.14	0.04	0.02
Lidar	Été_Moy	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.13	0.00	0.24	0.01	0.00	0.07	0.06	0.01	0.25	0.01	0.02	0.00	0.05	0.02	0.01
R^2	Été_Max	0.57	0.36	0.31	0.35	0.46	0.42	0.16	0.40	0.20	0.36	0.36	0.26	0.36	0.39	0.21	0.31	0.37	0.35	0.32	0.48	0.39
IGN	Été_Moy	0.60	0.37	0.26	0.36	0.55	0.36	0.29	0.49	0.12	0.45	0.30	0.40	0.42	0.44	0.12	0.39	0.56	0.30	0.46	0.54	0.42
P value	Été_Max	0.00	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.14	0.01	0.10	0.02	0.02	0.05	0.02	0.01	0.08	0.03	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01
IGN	Été_Moy	0.00	0.02	0.05	0.02	0.00	0.02	0.04	0.00	0.21	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.21	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01
R^2	Été_Max	0.57	0.36	0.51	0.37	0.46	0.58	0.15	0.38	0.38	0.36	0.46	0.24	0.39	0.39	0.35	0.31	0.37	0.47	0.29	0.49	0.36
Pléiades	Été_Moy	0.60	0.37	0.43	0.39	0.55	0.48	0.30	0.47	0.26	0.45	0.39	0.38	0.50	0.43	0.24	0.39	0.56	0.41	0.42	0.58	0.38
P value	Été_Max	0.00	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.15	0.01	0.02	0.02	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.04	0.00	0.02
Pléiades	Été_Moy	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.05	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.07	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

L'analyse des résultats obtenus pour les indices topographiques montre que seule la variable altitude présente une relation significative (p-value<0 ,001) avec les valeurs du Δ_{if}. Le R^2 est ainsi de 0,57 pour la situation d'ICU intense et de 0,6 pour la situation moyenne estivale.

Les résultats des régressions obtenues avec les indices de composition illustrent l'importance de la variable surface bâtie, présente de manière significative à toutes les échelles d'analyse. Le R^2 est maximum pour l'échelle de 50m avec une valeur de 0,46 et 0,55 pour les situations intenses et moyennes de l'ICU. La variable surface artificialisée (sfartif) n'est significative qu'à l'échelle de 150m avec un coefficient R^2 de 0,56 (p-value<0,02) pour la situation d'ICU moyen.

Malgré une relation significative, une forte variabilité du R^2 pour les différentes sources cartographiques et les différentes échelles est observée entre la végétation basse et les valeurs du Δ_{if}. Le R^2 maximum est obtenu pour les données issues du lidar en condition d'ICU intense à une échelle de 150m (R^2=0,58). Les échelles de 50m et 100m présentent respectivement des R^2 de 0,54 et 0,55, le minimum étant mesuré à une échelle de 25m (R^2=0,36). Les résultats des régressions obtenues avec les données cartographiques dérivées du vol IGN, bien que significatifs, sont nettement plus faibles que ceux obtenus avec les données dérivées du lidar. Le R^2 maximum est de 0,42 pour la situation d'ICU intense et 0,36 pour l'ICU moyen à l'échelle de 50m. Les échelles 100m et 150m présentent des valeurs de R^2 relativement proches avec un R^2 de 0,36 et 0,35. Le coefficient R^2 pour les données issues de la classification du capteur Pléiades est maximum pour la situation d'ICU intense à une échelle de 50m avec un R^2 de 0,58 (p-value<0.0001), contre 0,48 pour la situation d'ICU moyen. Contrairement aux deux capteurs précédents, les surfaces de végétation basse à l'échelle de 25m sont corrélées aux données de température avec un R^2 de 0,51. Les échelles 100m et 150m présentent des R^2 de 0,46 et 0,47 pour la situation d'ICU intense. Au regard de ces premiers résultats, on constate que la relation entre la végétation basse et l'IF semble être indépendante de l'échelle d'analyse (les R^2 étant finalement assez stables d'une échelle à l'autre), mais présente une forte sensibilité à la représentation de la classe en fonction des données cartographiques utilisées.

Les résultats statistiques des relations entre la végétation haute (SfVeg Haute) et la distribution des températures du Δ_{if} montrent une absence de relation aux échelles de 25m et 50m. Pour les variables issues des données lidar, aucune échelle n'est significative, seules les échelles de 100m et 150m pour la situation d'ICU moyen présentent des résultats significatifs pour les données cartographiques IGN et Pléiades.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Pour la situation estivale d'ICU moyen les R^2 des données IGN et Pléiades dépassent les R^2 de la variable végétation basse.

L'analyse des indices de structure du paysage se limite aux résultats obtenus avec l'indice du grain du paysage (Grain) aux échelles de 100m et de 150m. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les données issues du capteur Pléiades avec un R^2 de 0,58 (p-value<0.001) pour l'échelle 150m contre R^2=0,5 (p-value<0.003) pour l'échelle 100m pour l'ICU moyen. Les résultats obtenus avec les données cartographiques IGN suivent la même distribution avec des R^2 supérieurs pour la situation d'ICU moyen, de 0,54 pour l'échelle de 150m et de 0,42 pour l'échelle de 100m. Les températures mesurées de l'îlot de fraicheur semblent donc pour partie liées à la structure du paysage mesurées à des échelles de 100m et plus. Cette relation évolue également en fonction de la représentation du paysage les R^2 étant plus élevés pour les données cartographiques les moins précises

Enfin, les résultats des régressions avec les indices paysagers calculés sur les données 3D se résument essentiellement à l'analyse du volume du bâti. Le SkyView Factor est significatif (p-value > 0.02) uniquement pour les données pléiades aux échelles de 50m et 100m pour la situation d'ICU intense. *A contrario* la variable "volume de bâti" présente des résultats significatifs pour l'ensemble des situations et des échelles. Les résultats sont très proches d'une donnée cartographique à une autre, avec des R^2 systématiquement plus élevés pour la situation d'ICU moyen. L'échelle de 50m présente les R^2 les plus élevés avec une valeur de 0,48 pour les données issues du lidar, de 0,49 pour les données issues de l'IGN et de 0,47 pour les données issues de Pléiades. La faible variabilité des résultats obtenus pour la variable volume de bâti, malgré des précisions altimétriques contrastées entre les capteurs, peut-être davantage liée aux surfaces bâties elles-mêmes qu'à la composante 3D du bâti.

4.1.2 L'analyse pour les situations d'ICU d'hiver

Les résultats des corrélations entre les données de température du Δ_{if} pour la situation d'ICU d'hiver et les variables paysagères sont présentés dans la table 9.6.

L'analyse statistique montre des résultats similaires aux observations de la situation d'ICU d'été, avec une relation très forte entre les valeurs du Δ_{if} et les variables *Altitude*, *Surface bâtie*, et *Volume de bâti* (VolBat) et cela indépendamment de l'échelle d'analyse ou de la donnée cartographique utilisée. Il faut noter que les R^2 sont toujours supérieurs pour la situation d'ICU intense que pour la situation moyenne,

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

et ce pour l'ensemble des variables. A l'inverse de la situation d'été, la végétation basse n'apparait plus comme une variable significative aux différentes échelles.

Plus précisément, l'altitude présente un R^2 largement supérieur aux autres variables avec une valeur de 0,67 pour la situation moyenne et de 0,75 pour la situation d'ICU la plus intense.

L'analyse des résultats issue des variables de composition montre une absence de relation significative à l'échelle de 25m toutes variables confondues, et une diminution de la relation avec les variables du paysage entre 50m et 150m. La variable surface bâtie est corrélée significativement aux valeurs du Δ_{if} avec un R^2 qui diminue de l'échelle 50m (R^2 Hiver.max=0,54) à l'échelle de 150 (R^2 hiver.max=0.33). Il faut noter que comme pour la situation estivale les surfaces artificialisées présentent un R^2 supérieur à celui de la variable surface bâtie pour l'échelle de 150m pour les deux situations de Δ_{if}. L'analyse des R^2 pour la variable surface de végétation basse se limite aux données issues de la cartographie du lidar avec un R^2 maximum à l'échelle de 150m (R^2 Hiver.max=0,46) qui décroit jusqu'à l'échelle de 50m (R^2 Hiver.max=0,38).

La seule variable de structure du paysage significative est la métrique du grain du paysage (Grain) à une échelle d'analyse de 150m en situation d'ICU intense. Les données issues du lidar ne sont pas significatives et seules les données IGN (R^2Hiver.Max=0,33) et les données Pléiades(0,38) sont corrélées à la variable Δ_{if}. On constate donc un faible effet de l'agencement spatial de l'occupation du sol sur l'intensité de l'îlot de fraicheur en hiver. Toutefois, celui-ci semble d'autant plus important que l'échelle d'analyse augmente et que la précision des données cartographique diminue.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 9.6 : Résultats statistiques des régressions linéaires entre les valeurs du Δif les variables paysagères

		Altitude	25			50				100					150					
			Sfbati	SfVeg Basse	VlBat	Sfbati	SfVeg Basse	SfVeg Hte	VlBat	SVF	Sfbati	SfVeg Basse	SfVeg Hte	Grain	VlBat	SVF	Sfbati	Sfartif	SfVeg Basse	SfVeg Hte	Grain	VlBat
R^2	Emer-Mass	0.75	0.26	0.26	0.30	0.54	0.38	0.19	0.44	0.10	0.43	0.41	0.16	0.08	0.42	0.12	0.33	0.44	0.46	0.14	0.16	0.38
Lidar	Emer-Mog	0.67	0.25	0.29	0.31	0.45	0.39	0.17	0.38	0.10	0.33	0.39	0.12	0.05	0.33	0.12	0.26	0.42	0.42	0.11	0.13	0.29
P value	Emer-Mass	0.00	0.05	0.05	0.04	0.00	0.01	0.11	0.01	0.24	0.01	0.01	0.14	0.32	0.01	0.20	0.03	0.00	0.01	0.17	0.15	0.01
Lidar	Emer-Mog	0.00	0.06	0.04	0.03	0.01	0.01	0.13	0.01	0.24	0.03	0.01	0.21	0.41	0.03	0.20	0.05	0.01	0.01	0.23	0.20	0.04
R^2	Emer-Mass	0.75	0.26	0.15	0.27	0.54	0.24	0.31	0.45	0.12	0.43	0.25	0.30	0.28	0.43	0.14	0.33	0.44	0.29	0.29	0.33	0.41
IGN	Emer-Mog	0.67	0.25	0.15	0.28	0.45	0.24	0.28	0.40	0.11	0.33	0.26	0.25	0.25	0.34	0.14	0.26	0.42	0.29	0.24	0.28	0.32
P value	Emer-Mass	0.00	0.05	0.15	0.05	0.00	0.06	0.03	0.01	0.22	0.01	0.06	0.03	0.04	0.01	0.17	0.03	0.00	0.04	0.04	0.02	0.01
IGN	Emer-Mog	0.00	0.06	0.15	0.04	0.01	0.06	0.04	0.01	0.22	0.03	0.05	0.06	0.06	0.02	0.17	0.05	0.01	0.04	0.07	0.04	0.03
R^2	Emer-Mass	0.75	0.26	0.26	0.30	0.54	0.31	0.32	0.42	0.24	0.43	0.30	0.28	0.30	0.41	0.23	0.33	0.44	0.36	0.26	0.38	0.37
Pléiades	Emer-Mog	0.67	0.25	0.24	0.32	0.45	0.29	0.31	0.37	0.23	0.33	0.30	0.24	0.27	0.32	0.23	0.26	0.42	0.34	0.22	0.34	0.29
P value	Emer-Mass	0.00	0.05	0.05	0.03	0.00	0.03	0.03	0.01	0.07	0.01	0.03	0.04	0.03	0.01	0.07	0.03	0.00	0.02	0.05	0.01	0.02
Pléiades	Emer-Mog	0.00	0.06	0.06	0.03	0.01	0.04	0.03	0.02	0.07	0.03	0.04	0.07	0.05	0.03	0.07	0.05	0.01	0.02	0.08	0.02	0.04

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Enfin, l'analyse des R^2 pour les variables issues des données 3D, illustre que seule la variable volume du bâti est significative avec des R^2 très proches pour chaque type de données pour chaque échelle de 50m à 150m. L'échelle de 25m ne présente pas de résultat significatif. Les meilleurs résultats sont obtenus pour l'échelle de 50m avec de R^2 de 0,44 en moyenne pour la situation d'ICU intense et de 0,38 pour la situation d'ICU moyen. Le coefficient R^2 diminue légèrement avec l'augmentation de la taille de zone tampon présentant un R^2 moyen de 0,38 pour la situation d'ICU intense, et des p-value non significatives pour la situation d'ICU moyen. La variabilité des résultats est plus contrastée que pour la situation d'été mais semble liée à un effet de l'échelle d'analyse plus qu'à un réel effet de la variable volume du bâti.

4.2 L'analyse par régression multiple

4.2.1 L'analyse pour la situation d'ICU d'été

Les résultats des régressions multiples entre les températures de Δ_{if} en situation estivale et les coordonnées des composantes principales de chaque classe d'ACP sont présentés dans la table 9.7. D'une manière générale, les meilleurs résultats sont obtenus pour la situation d'ICU moyen pour l'ensemble des variables et des capteurs. Cependant, ces résultats illustrent une forte hétérogénéité entre les échelles d'analyse et les différents capteurs.

L'analyse des résultats de l' « ACP Bâti » a montré qu'une grande part de la variance de la température du Δ_{if} est expliquée par les variables relatives aux surfaces bâties et artificialisées ([2]R^2_{lidar}>0,65, R^2_{IGN}>0,59, $R^2_{Pléiades}$>0,52). L'évolution du coefficient R^2 en fonction des échelles est largement dépendante du type de données cartographiques utilisées. Ainsi, pour l'analyse de la régression avec l'« ACP Bâti », on constate que les données issues du lidar présentent les meilleurs résultats par rapport aux autres données cartographiques. Le R^2 des données lidar est maximum à l'échelle de 25m (R^2=0,68) et diminue progressivement jusqu'à l'échelle 150m (figure 9.15).

[2] Coefficient R^2 pour les données cartographiques issues du capteur indiqué

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 9.7 : Résultats statistiques des régressions multiples entre les valeurs du Δij et les coordonnées des axes factorielles des ACP

		ICU Max								ICU Moy							
		R² ajusté				pValue				R² ajusté				pValue			
		25	50	100	150	25	50	100	150	25	50	100	150	25	50	100	150
LIDAR	Regression Niv1	0.68	0.54	0.60	0.60	0.006	0.028	0.015	0.017	0.76	0.71	0.69	0.67	0.002	0.004	0.006	0.007
	Regression Niv2	0.77	0.59	0.62	0.60	0.002	0.018	0.013	0.016	0.91	0.75	0.70	0.66	0.000	0.002	0.005	0.008
	Regression Niv3	0.78	0.58	0.61	0.60	0.001	0.019	0.014	0.016	0.92	0.74	0.69	0.65	0.000	0.003	0.005	0.009
	Δ Niv1 / Niv2	0.09	0.05	0.01	0.01					0.15	0.04	0.01	-0.01				
	Δ Niv2 / Niv3	0.01	-0.01	0.00	0.00					0.01	-0.01	-0.01	-0.01				
IGN	Regression Niv1	0.54	0.58	0.67	0.69	0.029	0.019	0.007	0.005	0.59	0.74	0.72	0.75	0.017	0.003	0.003	0.002
	Regression Niv2	0.57	0.57	0.64	0.63	0.021	0.021	0.011	0.011	0.65	0.75	0.71	0.70	0.009	0.002	0.005	0.005
	Regression Niv3	0.64	0.68	0.65	0.64	0.011	0.006	0.009	0.010	0.74	0.81	0.72	0.70	0.003	0.001	0.003	0.005
	Δ Niv1 / Niv2	0.03	-0.01	-0.04	-0.06					0.06	0.01	-0.02	-0.04				
	Δ Niv2 / Niv3	0.07	0.11	0.02	0.01					0.09	0.06	0.02	0.00				
Pleiades	Regression Niv1	0.53	0.64	0.69	0.63	0.031	0.010	0.006	0.011	0.52	0.78	0.77	0.71	0.034	0.001	0.002	0.004
	Regression Niv2	0.61	0.61	0.66	0.63	0.015	0.014	0.009	0.012	0.60	0.74	0.74	0.70	0.015	0.003	0.003	0.005
	Regression Niv3	0.57	0.67	0.66	0.62	0.021	0.007	0.008	0.013	0.64	0.77	0.74	0.68	0.010	0.002	0.003	0.007
	Δ Niv1 / Niv2	0.08	-0.03	-0.03	-0.01					0.09	-0.03	-0.03	-0.02				
	Δ Niv2 / Niv3	-0.03	0.05	0.00	-0.01					0.04	0.03	0.00	-0.02				

Les résultats obtenus avec les données issues de l'IGN présentent une variabilité plus forte que les résultats obtenus avec le lidar. La figure 9.17 illustre l'évolution du R^2 en fonction de l'échelle pour les situations estivales intenses et moyennes d'ICU. Le R^2 minimum est observé à l'échelle de 25m et le R^2 maximum pour l'échelle de 150m pour les deux situations. Il faut noter que dans ce cas, l'analyse des R^2 en situation d'ICU moyen montre une faible variation aux échelles de 50m à 150m.

Les résultats de l'analyse des données issues de Pléiades présentent également un minimum du R^2 à l'échelle de 25m (P-value>0,03). Les maximums des R^2 sont observés pour les échelles de 100m en situation d'ICU intense et de 50m d'ICU moyen. Les résultats obtenus par les données cartographiques issues de Pléiades sont supérieurs aux résultats des données issues du lidar ou de l'IGN à l'échelle de 50m pour la situation d'ICU Moyen. La variabilité du coefficient R^2 semble diminuer en fonction de l'échelle d'analyse particulièrement en situation d'ICU moyen pour les données Lidar et Pléiades.

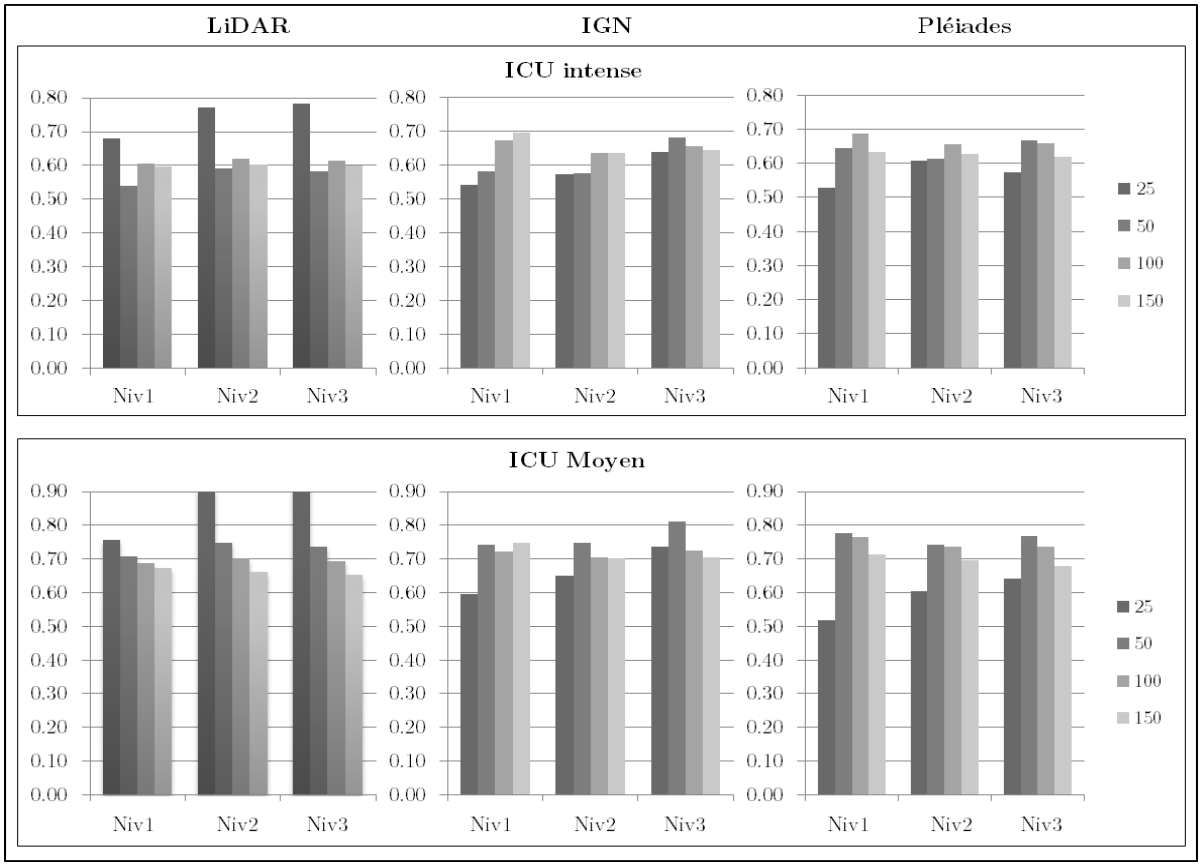


Figure 9.17 : Représentation graphiques des coefficients de détermination par capteur pour la situation d'ICU estivale

L'analyse des régressions obtenues avec les données de « l'ACP végétation basse » montre globalement une augmentation des coefficients R^2 en comparaison de

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

ceux mesurés pour « l'ACP Bâti » (excepté pour les données issues de Pléiades). On peut également noter que l'évolution du R^2 en fonction de l'échelle montre une dynamique similaire à celles observées précédemment.

L'approche par capteur illustre une supériorité des résultats obtenus pas les données issues du lidar à 25m en comparaison des données IGN et Pléiades avec un R^2 de 0,77 pour la situation d'ICU intense et de 0,91 pour la situation de d'ICU moyen. A contrario il faut noter qu'avec l'augmentation de l'échelle d'analyse les capteurs IGN et Pléiades présentent des R^2 supérieur aux résultats des données issues du lidar. Il faut également souligner que l'évolution du R^2, pour les quatre échelles, semble cohérente entre les trois capteurs avec un maximum du coefficient R^2 aux échelles de 25m et 50m (Figure 9.17).

L'analyse de la différence entre les résultats obtenus avec « l'ACP bâti » et « l'ACP végétations basses » montre un apport significatif de la donnée végétation pour les échelles 25m et 50m. Une baisse du coefficient R^2 est observée pour les échelles de 100m et de 150m. Ainsi, l'introduction des variables dérivées de la classe végétation basse permet d'améliorer les régressions de 9% à 15% à une échelle de 25m pour les données issues du lidar, de 3% à 6% pour les données dérivées de l'IGN et de 8% à 9% pour les données dérivées de Pléiades.

Les résultats obtenus pour les analyses de la régression de « l'ACP végétation haute » présentent les mêmes tendances que les résultats précédemment détaillés. Il faut toutefois souligner que les coefficients de corrélation R^2 sont plus élevés pour l'ensemble des capteurs particulièrement pour les échelles de 50m à 100m pour les données issues de l'IGN et de Pléiades (Table 9.6).

Le R^2 maximum est mesuré pour les données issues du lidar à une échelle de 25m pour les deux situations d'ICU (R^2Ete.Moy=0.92, R^2Eté.max= 0,78). Cependant, la relation entre les données de température de l'îlot de fraîcheur et les données issues du lidar diminue, de manière plus marquée que pour les précédentes analyses, aux échelles de 50m à 150m.

L'étude des différences entre les résultats de la précédente ACP et les résultats de « l'ACP végétation haute » illustre un faible apport de la végétation haute dans la régression avec les données issues du lidar. Cette observation n'est pas le cas pour les données issues de l'IGN avec un apport de 2% à 11% en fonction des échelles ou de Pléiades avec une différence de 4% à 5% en fonction du niveau d'échelle.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Une analyse globale de la figure 9.17 montre que plus l'échelle d'analyse augmente et que la diversité de l'occupation du sol est intégrée dans l'ACP, plus les résultats des capteurs tendent à se ressembler. Les R^2 les plus élevés sont mesurés pour l'échelle de 25m avec les données lidar et à une échelle de 50m avec les capteurs de moins bonne précision.

4.2.2 L'analyse pour les situations d'ICU d'hiver

Les résultats des régressions multiples réalisées entre les températures de Δ_{if} en situation hivernale et les coordonnées des composantes principales de chaque classe d'ACP sont détaillés dans le tableau 9.7.

En première lecture, les résultats sont significativement plus faibles pour la situation d'hiver que pour la situations d'été, avec une quasi absence de relation entre les variables aux échelles de 50 m et 150 m pour l'ensemble des données paysagères. Une hétérogénéité plus forte des résultats obtenus pour les différentes sources de données cartographiques est également à noter, les données issues du lidar et de IGN étant statistiquement plus proche que les données issues de Pléiades (Figure 9.18).

L'analyse des résultats des régressions pour « l'ACP bâti » montre des R^2 plus élevés à l'échelle de 25m pour les deux situations d'ICU, pour les données du lidar et de l'IGN. Les résultats calculés à partir des données de pléiades ne sont pas significatifs. L'analyse à l'échelle de 100m illustre des résultats significatifs pour l'ensemble des données cartographiques pour la situation d'ICU intense et seul les données IGN sont significatives pour la situation moyenne.

Les coefficients R^2 présentent une évolution similaire aux situations estivales avec une diminution du R^2 avec l'échelle d'analyse (Figure 9.16), mais les résultats sont tout de même plus contrastés. Ainsi, l'échelle de 25m est identifiée comme très significative pour les données issues des capteurs les plus précis spatialement : le lidar et l'IGN.

La même structuration des résultats est observée pour « l'ACP végétation basse », avec des R^2 identiques ou légèrement plus élevés pour l'échelle de 25m. L'analyse de la différence entre les résultats de « l'ACP bâti » et de « l'ACP végétation basse » montre un apport significatif de la végétation basse (+3%) uniquement à l'échelle de 25m pour la situation d'ICU moyen (Table 9.8).

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 9.8: Résultats statistiques des régressions multiples entre les valeurs du Δif et les coordonnées des axes factorielles des ACP

		ICU Max						ICU Moyen					
		25	50	100	150	25	50	100	150	25	50	100	150
LIDAR	Regression Niv1	0.79	0.41	0.61	0.52	0.001	0.074	0.015	0.034	0.70	0.37	0.47	0.42	0.005	0.095	0.050	0.071
	Regression Niv2	0.79	0.46	0.57	0.46	0.001	0.054	0.021	0.052	0.73	0.43	0.45	0.37	0.003	0.068	0.058	0.099
	Regression Niv3	0.80	0.43	0.57	0.46	0.001	0.067	0.022	0.055	0.75	0.39	0.45	0.36	0.002	0.088	0.060	0.103
	Δ Niv1 / Niv2	0.00	0.05	-0.04	-0.06					**0.03**	0.05	-0.02	-0.05				
	Δ Niv2 / Niv3	0.01	-0.03	0.00	-0.01					0.02	-0.04	0.00	-0.01				
IGN	Regression Niv1	0.72	0.49	0.71	0.60	0.004	0.044	0.004	0.016	0.63	0.43	0.59	0.49	0.011	0.065	0.018	0.044
	Regression Niv2	0.74	0.47	0.65	0.53	0.003	0.048	0.010	0.031	0.65	0.44	0.55	0.44	0.009	0.063	0.027	0.063
	Regression Niv3	0.81	0.47	0.65	0.52	0.001	0.050	0.010	0.034	0.73	0.41	0.54	0.42	0.003	0.077	0.028	0.069
	Δ Niv1 / Niv2	0.02	-0.01	-0.06	-0.07					0.02	0.00	-0.04	-0.05				
	Δ Niv2 / Niv3	**0.07**	0.00	0.00	-0.01					**0.08**	-0.03	0.00	-0.01				
Pleiades	Regression Niv1	0.43	0.54	0.62	0.58	0.066	0.028	0.013	0.019	0.43	0.48	0.53	0.49	0.065	0.045	0.032	0.045
	Regression Niv2	0.44	0.50	0.55	0.54	0.062	0.039	0.026	0.027	0.43	0.45	0.47	0.45	0.064	0.057	0.050	0.056
	Regression Niv3	0.55	0.49	0.56	0.51	0.026	0.044	0.025	0.037	0.54	0.43	0.47	0.42	0.029	0.066	0.051	0.072
	Δ Niv1 / Niv2	0.01	-0.04	-0.07	-0.04					0.00	-0.03	-0.06	-0.03				
	Δ Niv2 / Niv3	**0.11**	-0.02	0.00	-0.04					**0.10**	-0.02	0.00	-0.04				

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Les régressions entre « l'ACP végétation haute » offre les R^2 les plus élevés de cette analyse pour l'ensemble des données cartographiques. La différence de résultats entre les données cartographiques à une échelle de 25m tend à se réduire avec l'introduction de l'ensemble des variables d'occupation du sol dans l'ACP, particulièrement entre les données LiDAR et IGN. Les données cartographiques issues de Pléiades obtiennent les résultats les moins satisfaisants. L'analyse à l'échelle de 100m ne montre aucune évolution par rapport aux résultats de l'ACP précédentes. L'évolution du R^2 en fonction des échelles et par capteur (Figure 9.18) montre une hétérogénéité plus marquée que pour la situation estivale même si on constate également un R^2 maximum pour les échelles fines et minimum pour l'échelle de 150m. On remarque d'ailleurs des évolutions similaires entre les situations d'ICU d'été et d'hiver, avec une augmentation du R^2 aux échelles fines, lors de l'introduction de l'ensemble des variables de l'occupation du sol dans l'ACP, et l'inverse, avec une diminution du R^2 aux échelles de 100 m et 150 m. Il faut noter également que les données cartographiques issues de l'IGN se singularise d'avantage avec un réel apport de l'information à l'échelle de 25m ce qui n'apparaissait pas en situation estivale. Les données issues du capteur Pléiades semblent moins adaptées aux situations d'ICU d'hiver plus contrastée.

L'étude de la différence de résultats entre les deux dernières ACP montre un apport important des indices dérivés de la végétation haute pour les données de l'IGN et de Pléiades avec une hausse de 7% et8% pour les situations d'ICU intense et moyenne pour les données issues de l'IGN, et de 11% et 10% pour les mêmes situations pour les données dérivées de Pléiades. Le rôle de la végétation en hiver est plus limité par rapport à l'été, toutefois ces résultats sont similaires aux observations réalisées pour les situations estivales avec une augmentation plus significative du R^2 pour les données cartographiques les moins précises, en lien avec l'introduction des variables dérivées de la végétation.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

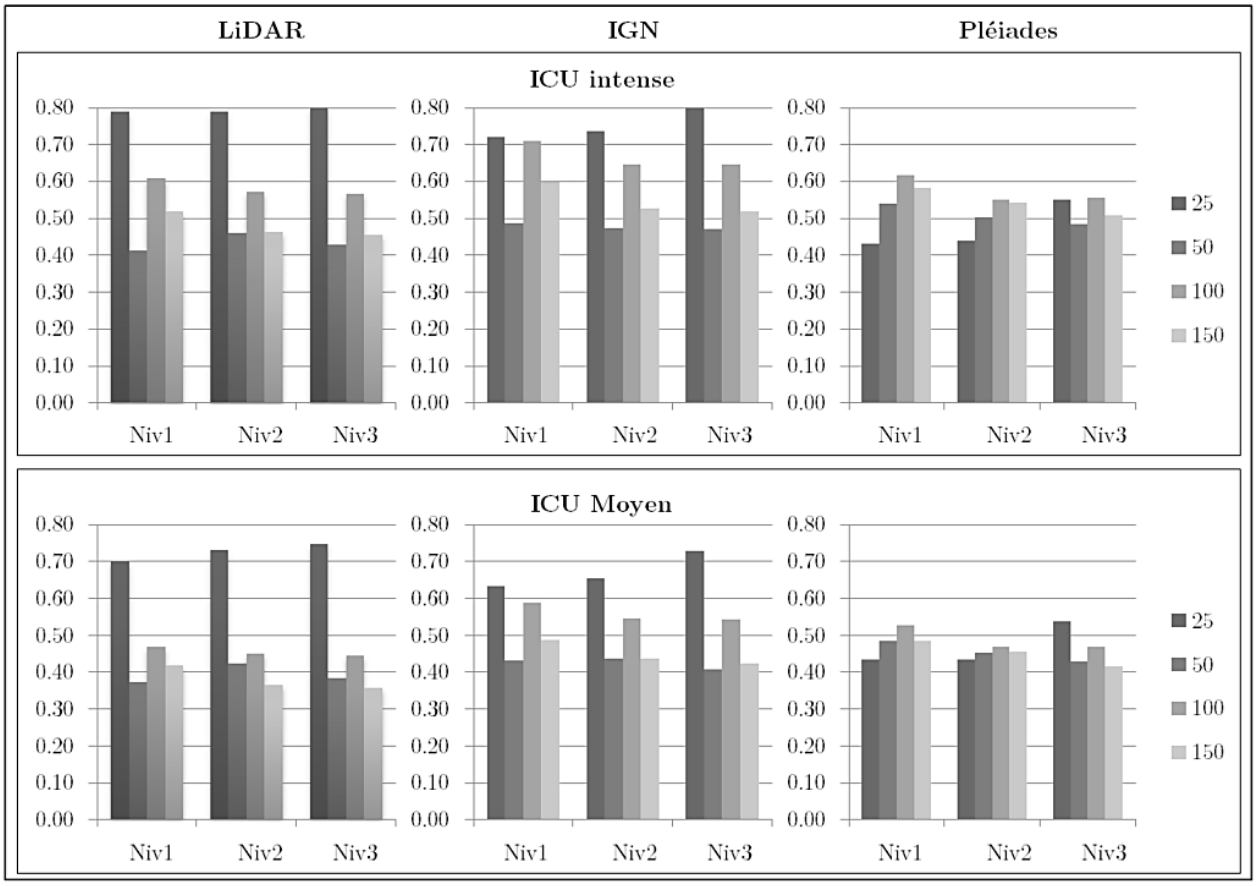


Figure 9.18 : Représentation graphiques des coefficients de détermination par capteur pour la situation d'ICU d'hiver

5 Discussions et perspectives

5.1 Effet de la représentation du paysage et intensité de l'îlot de fraîcheur du parc des Prairies St Martin en situation d'îlot de chaleur urbain

Les différentes analyses réalisées pour étudier la relation entre les températures du Δ_{if} et les variables paysagères ont mis en évidence un effet très structurant de l'altitude et des surfaces bâties dans les situations d'ICU intense et moyenne étudiées. Cette relation est plus marquée en situation hivernale qu'en situation estivale avec un R^2 maximum pour la situation d'ICU intense hivernale (R^2=0,75) et la situation moyenne d'été (R^2=0,6) (résultats confirmés par l'analyse des régressions avec les coordonnées de « l'ACP bâti »). Ces résultats mettent en évidence que malgré une variabilité saisonnière forte de la relation entre température et paysage, les températures sont fortement liées aux facteurs topographiques et morphologiques de la

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

ville. Ces observations sont conformes à d'autres études abordant le lien entre l'ICU et la morphologie urbaine. Par exemple, Van Hove *et al.*, (2015) ont montré une variance expliquée de 50% à 90% de la température de l'air par la variable "Bâti" selon les saisons. Cette relation est plus faible en été à cause de l'augmentation de l'activité de la végétation. Il faut toutefois noter que l'échelle qui offre la plus forte relation avec le bâti est l'échelle de 150m en été et de 50m en hiver pour les régressions linéaire, et de 25m pour l'approche par ACP Bâti.

Ces résultats illustrent, d'une part l'importance des structures paysagères à l'échelle de quelques dizaines de mètres autour du point de mesure et d'autre part la nécessité de développer des approches multicritères pour prendre en compte les interactions entre les différentes échelles. Ces résultats confortent les observations de Kolokotroni et Giridharan (2008) réalisées à Londres. Kolokotroni et Giridharan dans cette étude ont testé la relation entre les variables paysagères calculées à 50m et les mesures de température effectuées en situations d'ICU de jour et de nuit. Ils illustrent que cette analyse réalisée à une échelle de 50m est pertinente pour étudier la variabilité locale des températures avec des R^2>0,77 en situation d'ICU nocturne. De même, Giridharan *et al.,* 2005 ont montré sur la ville de Hong Kong l'intérêt de l'échelle de 30m autour du point de mesure pour étudier la distribution des températures en situation d'ICU. Ils montrent ainsi qu'en condition d'ICU nocturne, 71% de la variance de la variable température de l'air sont expliqués par les variables d'Albdédo, du skyview factor, de la hauteur des bâtiments et de l'altitude mesurées dans un rayon de 30m.

Dans cette étude, la végétation présente une relation plus forte en été qu'en hiver, ceci étant lié à l'activité de la végétation pendant son cycle végétatif. Celle-ci va limiter le bilan énergétique par l'interception du rayonnement solaire par l'ombre, ou encore par son activité d'évapotranspiration au cours de la journée, qui limite le stockage de chaleur dans son environnement proche (Loughner *et al.*, 2012). Toutefois, ces travaux illustrent une distinction majeure entre végétation basse et végétation haute. En effet, nous observons un effet très significatif de la végétation basse avec R^2 de 0,54 à une échelle de 50m pour la situation d'ICU estivale intense, contre seulement 0,07 pour la végétation haute, pour la donnée lidar. Cette observation est confortée par l'analyse du Δ « ACP Niv1/Niv2 », qui illustre pour les données cartographiques issues du lidar, une amélioration de 10% et 15% de la variance expliquée par l'ajout des variables dérivées de la classe végétation basse dans l'ACP (ceci étant cohérent avec les résultats obtenus avec les autres sources de données cartographique). Alors que l'introduction des variables issues de la végétation haute montre un apport plus limité (inférieur à 11%) et dépendant de la source de données cartographiques utilisées

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

($0,01<R^2<0,11$). Un premier élément de réponse est que nous avons étudié des situations nocturnes, où l'influence du rayonnement reçu dans la journée est dissipée en début de nuit. L'atténuation de la température liée à la végétation haute est donc moins importante que la journée. Chandramathy et Kitchley (2018) illustrent par exemple qu'une augmentation de la surface arborée peut engendrer une baisse jusqu'à 1,76°C en contexte urbain moyennement dense. Un second élément de réponse à la faible relation de la végétation haute dans cette étude, est que nous sommes sur un site où la topographie joue un rôle extrêmement structurant. Ce rôle du relief est d'autant plus marqué que la répartition des surfaces bâties et des surfaces végétales sont liées à celui-ci (la végétation haute étant davantage présente dans la dépression et le bâti sur le « plateau »). Les résultats de cette étude reflètent donc un double effet du relief et des surfaces bâties qui domine la relation avec la température de l'air, limitant la perception des effets de la végétation haute.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Foissard (2015) qui ont montré un apport plus important de la végétation basse dans le modèle développé pour modéliser l'ICU à Rennes (R^2 de 0,87 avec la végétation basse et 0,88 pour la somme de végétation basse et haute), ou encore les résultats obtenus par Armson et al. (2012) qui mettent en évidence l'intérêt d'approfondir la question du lien entre les surfaces de végétation basse et le climat aux échelles fines en indiquant que les surfaces enherbées jouent un rôle majeur dans l'interception du rayonnement.

Les analyses des résultats obtenus à partir des indices de structure du paysage mettent en évidence de plus faibles corrélations qu'avec les variables de composition. Zhou et al. (2011b) expliquent que les variables de configuration sont complémentaires avec les variables de composition mais que leur relation univariée avec le climat est faible. Ceci se traduit par une absence de relation à la distance à l'eau et une faible relation avec le grain du paysage (corrélation qui augmente avec une échelle d'analyse qui augmente). Ces résultats confortent les observations effectuées par Van Hove (2015)à Rotterdam qui montrent une absence de lien entre les températures et les surfaces en eau et son agencement spatial. L'analyse du grain du paysage informe sur l'importance de la configuration de la végétation aux échelles de 100m et de 150m. Cette variable est particulièrement intéressante pour les données cartographiques les moins précises en situation d'ICU moyen estival ou intense d'hiver. Cette variable n'a jamais été utilisée dans des études précédentes. Cependant, les travaux de Zhou et al. (2011) menés sur l'importance des variables de configuration illustrent que la variable Distance Euclidienne, mesurée entre la station de mesure et le bâti, est corrélée à -32% avec les températures de surface. Dans notre cas, le grain du paysage a été calculé à

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

partir de la classe végétation haute, nous avons donc une corrélation significative entre l'organisation de la végétation haute et les températures de l'air. Cette relation est davantage marquée en situation d'été que d'hiver.

Les résultats obtenus avec les données dérivées des indices issues du 3D sont conformes à ce qui est noté dans la littérature. Ainsi le SkyView Factor (SVF) étudié de manière univariée n'apporte pas beaucoup d'information pour expliquer la répartition des températures. Ceci est essentiellement lié au fait que le SVF n'informe que sur le degré d'ouverture du ciel et ne tient pas compte de l'émissivité des matériaux de l'environnement qui l'entoure (Blankenstein et Kuttler, 2004). Les résultats des corrélations entre le volume des bâtiments et la température mesurée montrent une relation significative avec un R^2 compris entre 0,4 et 0,5 suivant les situations. Ces résultats présentent des corrélations plus faibles que l'étude de Van Hove (2012) qui obtenait un R^2 de 0,69 à 0,8. Cette différence peut être liée au fait que le contexte urbain étudié était de l'urbain dense. Nous n'observons donc pas d'effet explicitement 3D de la végétation, excepté au travers du grain du paysage dérivé de la végétation haute. Il serait intéressant d'approfondir les analyses concernant le lien entre la végétation basse et la variable de température de l'air en étudiant les formes de végétation et leur organisation spatiale (Armson *et al.*, 2012). L'étude de la combinaison de strates de végétation à partir des données lidar permettrait également de mieux comprendre la complémentarité des éléments de végétation dans la régulation des températures aux échelles fines. Enfin, dans le but de tester de nouvelles métriques une campagne de mesures thermique aéroportée a été réalisée sur le site, pour étudier l'apport de la réponse spectrale dans le domaine infrarouge thermique pour l'analyse de la variabilité climatique à l'échelle de la métropole

5.2 Effet de la résolution spatiale des données cartographiques sur les échelles d'analyses pertinentes pour l'étude de la répartition de l'intensité de l'îlot de Fraîcheur

Notre deuxième analyse basée sur l'analyse des composantes principales des 3 classes de variables (bâti, végétation basse et végétation haute) a permis de montrer l'intérêt et les limites des différents types de données cartographiques en fonction de l'échelle d'analyse et de la situation d'ICU.

Les résultats obtenus montrent que l'échelle la plus pertinente pour étudier les températures à échelle fine est de 25m avec les données Lidar et 50m pour les données IGN et Pléiades pour la situation d'ICU d'été. Ceci s'explique par une représentation

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

plus fine du paysage avec la classification issue des données lidar. Les données 3D issues du lidar offrent une plus grande précision X,Y et Z que les données 2,5D IGN ou Pléiades. Elles permettent donc une meilleure représentation de la matrice paysagère aux échelles fines. *A contrario*, les résultats des méthodes de reconstruction photogrammétrique des données de l'IGN et Pléiades présentent un certain nombre de limites pour représenter les éléments fins du paysage. Ces méthodes sont dépendantes des angles de prise et vue et du recouvrement des images pour assurer une reconstruction 3D fidèle à la réalité (Lucie et al., 2017). Ainsi, les arbres isolés, les haies arbustives ou autres éléments fins constitutifs des classes de végétation sont moins bien discriminés sur les données IGN et Pléiades.

Cette approche met en évidence une variabilité importante du R^2 en fonction de la source de données cartographique utilisée pour représenter le paysage, et donc un effet de la résolution spatiale des données sur l'analyse de la répartition des températures. Ce résultat est particulièrement vrai aux échelles fines (25m), mais est à nuancer avec l'analyse de la figure 9.19 qui illustre une diminution de l'écart-type des valeurs de R^2 en fonction de l'échelle à partir de 50m. Cela signifie que les différentes sources de données présentent de réelles différences à une échelle de 25 m et que très rapidement les différentes données cartographiques présentent des résultats similaires.

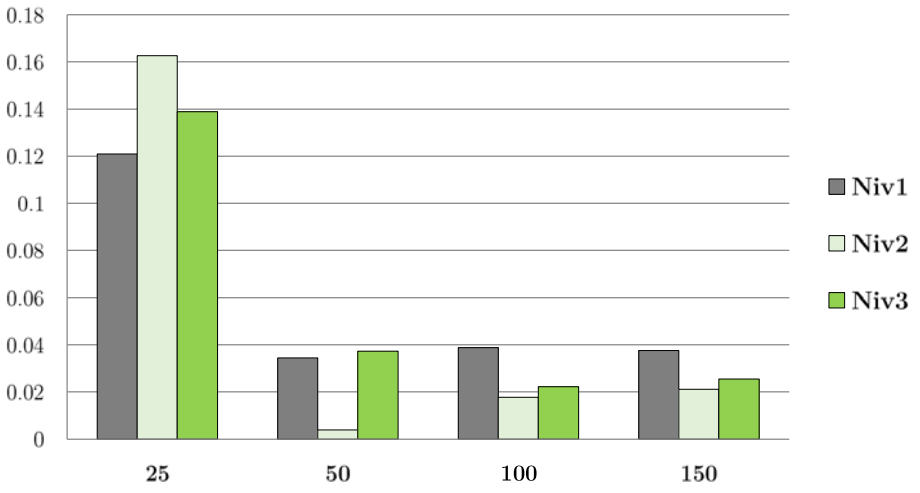


Figure 9.19 : Représentation graphiques des écart-types des coefficients de détermination, calculés sur les trois sources de données cartographiques pour la situation d'ICU moyenne d'été

L'analyse réalisée à partir de la différence des R^2 entre les données lidar et les deux autres capteurs apporte un regard complémentaire à l'analyse précédente (Figure 9.20). On peut noter que le lidar offre les meilleurs résultats à une échelle de 25m mais que pour les échelles de 50 à 100m, les données IGN et Pléiades ont de meilleurs résultats. Cette analyse permet d'illustrer le fait que la nature des éléments représentés

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

par les données IGN et Pléiades est plus cohérente avec les données climatiques malgré une plus grande imprécision (toute proportion gardée la différence étant inférieure à 10% de variance).

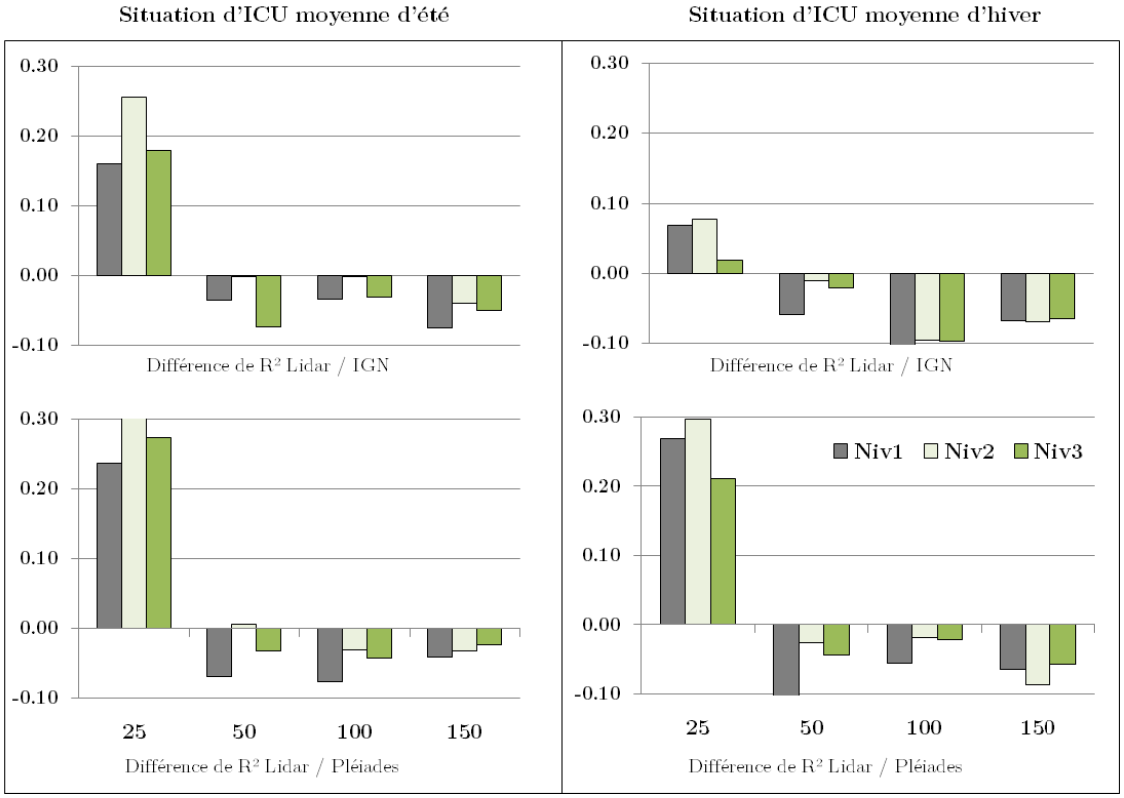


Figure 9.20 : Représentation graphique de la différence des R^2 issus des régressions linéaires entre les coordonnées des ACP et le Δif pour les données Lidar/IGN (à gauche) et Lidar/Pléiades (à droite)

Cette variabilité inter-capteurs s'accompagne également de différences saisonnières. La situation hivernale de l'ICU présente des résultats intéressants et complémentaires aux observations précédentes. Ainsi, on peut constater que les données Lidar et IGN ont des résultats significatifs (p-value<0,03) à l'échelle de 25m contrairement à Pléiades. Cette information nous informe sur un éventuel effet seuil entre les représentations issues des données IGN et Pléiades. En effet, l'ensemble des capteurs suivent des distributions assez similaires pour l'ensemble des situations mais Pléiades est le seul à présenter des valeurs de R^2 non significatives à l'échelle de 25m pour la situation d'ICU hivernale. Cela pourrait s'expliquer par la plus faible résolution spatiale de la donnée Pléiades (50cm), par rapport à la donnée IGN (20cm), qui ne permettrait pas de classer les éléments fins du paysage, ceci étant inférieur au seuil de détection de la donnée Pléiades. Il y aurait donc un effet seuil de détection entre les échelles de cartographie de Pléiades et de l'IGN.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Il serait donc intéressant de d'évaluer plus finement la représentation des données cartographiques des différents capteurs pour évaluer quelle part de l'information n'est pas présente dans les données Pléiades. De précédent travaux ont également testé ce type de question mais essentiellement en milieu forestier pour évaluer l'apport de différents types de capteurs pour la discrimination de certains éléments de suivi du milieu forestier (Matese *et al.*, 2015 ; Lucie *et al.*, 2017)

6 Conclusion et perspectives

Cette étude a eu pour objectif d'évaluer la cartographie de l'occupation du sol issue de différents types de capteurs THRS 2D et 3D pour la caractérisation de l'îlot de fraîcheur d'un parc urbain.

Un réseau de mesure spécifique de capteur de température a été déployé sur le site d'étude des prairies St Martin de Rennes afin d'étudier la variabilité climatique en fonction de l'hétérogénéité du paysage en condition d'îlot de chaleur urbain. Ces données ont ensuite été analysées pour étudier la relation avec quatre types de variables paysagères (topographique, composition, structure, 3D) dérivées des données cartographiques issues de trois capteurs THRS 3D ou 2,5D (lidar, vol aéroporté IGN, Pléiades).

Les résultats de la première analyse statistique a permis de mettre en évidence une influence majeure de l'altitude et des surfaces bâties (R^2>0,46) pour les différentes situations d'ICU étudiées. Ces résultats illustrent également l'importance des surfaces en végétation basse comme variable explicative plus particulièrement pour la situation estivale. Les autres variables tels que les indices de structure ou les indices 3D ont montré une influence très ponctuelle suivant le type de situation avec des relations assez faibles excepté pour le volume du bâti. Enfin les résultats obtenus avec les différentes variables ont défini une échelle pertinente de 50m pour les 3 capteurs. Même si l'apport des variables paysagères à haute résolution en 3D ne semble pas prépondérant pour cette approche géostatistique de la modélisation de l'Ilot de chaleur urbain, il l'est certainement beaucoup plus pour les modèles atmosphériques urbains basés sur les échanges énergétiques entre l'atmosphère et l'environnement urbain. La construction de ce type de modèle nécessite l'utilisation des données 3D de la géométrie de la ville, c'est-à-dire, le bâti mais également tout type de végétation (Lemonsu *et al.*, 2012). Il faut également noter que malgré le caractère paysager assez binaire du site caractérisé par un parc urbain fortement végétalisé et une zone urbaine périphérique

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

fortement minéralisée, le réseau de mesures déployé a montré sa capacité à exprimer la très forte variabilité du climat local, celle-ci pouvant être du même ordre que la variabilité observée à l'échelle Ville/Périphérie.

La seconde analyse a permis : 1) d'illustrer la nécessité d'étudier la variable de température de manière multivariée pour intégrer les interactions entre les différentes variables paysagères et 2) d'évaluer l'apport des différentes composantes de la végétation pour la compréhension de la répartition des températures. Cette analyse a mis en évidence un apport très significatif de la végétation basse avec une augmentation de près de 15% de l'indice de corrélation pour la situation d'ICU moyen estivale. Elle a également montré que la végétation haute n'apportait que peu d'information pour les régressions des données cartographiques les plus précises (LiDAR) ; 2) d'illustrer que la précision des données cartographiques utilisées est essentielle aux échelles fines (inf. à 25m), mais que l'importance de celle-ci diminue rapidement avec l'augmentation des échelles d'analyse.

Dans la continuité de ces travaux, il serait intéressant d'appliquer cette méthodologie à d'autres parcs urbains où l'effet de la topographie serait moins marqué afin de pouvoir mettre plus en évidence l'impact des différents types de végétation. Il s'agirait de travailler sur l'influence des formes de végétation efficaces pour la réduction de l'îlot de chaleur urbain. Il serait également intéressant de travailler sur les modes de gestion du végétal en ville par exemple sur l'apport des modes de gestion différentiés ou encore sur les modes d'implantation du végétal (multi-strates, implantation de plusieurs espèces de plantes, etc) et le climat a une échelle locale. Des premiers travaux ont été initiés avec la ville de Rennes dans le cadre du réaménagement du quartier EuroRennes et plus précisément de l'avenue de Janvier. L'objectif est ici de simuler les différents modes d'implantation de la végétation envisagés (2D et 3D) et d'étudier l'impact climatique de ceux-ci à l'échelle de la rue et du quartier.

Enfin les données de télédétection utilisées dans ce chapitre relevaient du domaine spectral visible et proche-infrarouge. Le domaine l'infrarouge thermique reste à donc exploiter. Aussi, dans le cadre de la Zone Atelier Armorique, une acquisition aéroportée d'image à très haute résolution spatiale dans le domaine de l'infrarouge thermique a été réalisée de nuit. Il s'agit d'étudier la variabilité de l'émissivité des matériaux et le gradient de température de surface mesuré par imagerie, en lien avec les températures de l'air mesurées par les réseaux de stations climatiques à l'échelle de la ville et du quartier.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Synthèse de la quatrième partie

Dans cette quatrième partie, nous avons étudié l'impact de l'intégration des informations sur la végétation dérivées de données de télédétection THRS dans des modèles environnementaux. L'objectif de cette partie était double : (1) Tester l'impact de la résolution spatiale des images THRS pour étudier la relation paysage-biodiversité; (2) Evaluer l'apport de l'altimétrie dérivée de données THRS pour analyser la relation paysage-îlot de chaleur urbain.

Pour atteindre le premier objectif, nous avons mis en relation des métriques paysagères calculées à différentes échelles et dérivées de cartes d'occupation du sol réalisées sur la ville de Rennes à partir d'images satellites Landsat 8, Spot 6 et Worldview-2 avec des indices biologiques traduisant la distribution de communautés de carabes. Les résultats confirment que la finesse de représentation du paysage (grain) a un effet sur la distribution des espèces de carabes. En l'occurrence, le seul capteur présentant des résultats significatifs est Spot 6 (résolution de 6 mètres) pour des échelles d'analyse du paysage comprises entre 150 et 450 mètres. Ils montrent aussi une plus grande sensibilité des carabes à la distribution de leur habitat au sein des paysages artificialisés qu'à l'artificialisation du paysage mais à la distribution de son habitat au sein des paysages artificialisés, ce qui est conforme à la littérature. Enfin, nos résultats mettent aussi en évidence que les modèles exprimant le mieux le lien entre les indices biologiques et les métriques paysagères correspondent à des échelles différentes selon le capteur considéré : de 150 et 600m pour Landsat 8 contre 30 et 150m pour Worldview et 30m et 350m pour SPOT6. Les échelles pertinentes auxquelles les espèces de carabes répondent, s'avèrent de petite taille. Nous pouvons également noter que le grain des métriques paysagères dérivées des images satellites a une influence surles variables et les échelles pertinentes.

Pour atteindre le deuxième objectif, nous avons évalué la cartographie de l'occupation du sol réalisée à partir d'images satellites par de différents types de capteurs THRS 2,5D et 3D pour la caractérisation de l'îlot de fraîcheur d'un parc urbain dans le contexte de l'Ilot de Chaleur Urbain de la ville de Rennes. Dans le cadre de cette étude, nous avons montré l'influence majeure de l'altitude et des surfaces bâties sur la variabilité des températures, ainsi que l'importance de la présence de végétation basse en été. On peut remarquer que les variables paysagères à haute résolution en 3D n'ont pas un poids important dans l'explication de la variabilité des

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

températures. Toutefois, si l'information altimétique sur la végétation et le bâti n'apparaît pas essentielle dans cette modélisation géostatistique, elle l'est pour les modèles atmosphériques urbains basés sur les échanges énergétiques entre l'atmosphère et l'environnement urbain. Par ailleurs, d'illustrer que la précision des données cartographiques utilisées est essentielle aux échelles fines (inf. à 25m), mais que l'importance de celle-ci diminue rapidement avec l'augmentation des échelles d'analyse. Les résultats obtenus avec les différentes variables ont montré que l'échelle pertinente est 50m pour les 3 types d'images étudiées.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Conclusion générale

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

La connaissance détaillée et le suivi de la végétation urbaine représentent un enjeu important, tant pour les scientifiques qui étudient les relations paysage-biodiversité ou l'impact de la végétation sur le climat par exemple, que pour les gestionnaires qui sont chargés de l'entretien et de la gestion de la végétation.

La cartographie de la végétation urbaine est généralement effectuée en utilisant des observations réalisées sur le terrain et des bases de données cartographiques, qui, en dépit de leur intérêt manifeste, ne permettent pas d'obtenir une carte détaillée et couvrant de façon homogène tout le territoire urbain. Les images de télédétection ne constituent pas actuellement une source de données privilégiée, à l'exception des orthophotoplans. Or ces derniers présentent aussi des limites pour l'étude de la végétation urbaine, en raison de leur faible résolution spectrale, mais aussi de leur faible disponibilité dans la mesure où ils ne sont produits que tous les trois à quatre ans.

La disponibilité d'images satellites THRS offre désormais la possibilité d'obtenir des informations détaillées sur la végétation en ville à des échelles spatiales fines. Les images multispectrales THRS 2D permettent de fournir des informations sur l'occupation et l'utilisation des sols, sur la structure et certaines propriétés biophysiques de la végétation, tandis que les images superspectrales THRS 2D décrivent de façon plus fine l'état de la végétation (stade phénologique, stress hydrique ...) et permettent d'identifier un plus grand nombre d'espèces. Les données 2,5D telles que les images Pléiades ou les données 3D LIDAR (Light Detection and Ranging) offrent aujourd'hui de nouvelles possibilités pour caractériser la structure de la végétation, notamment à travers des descripteurs tels que la hauteur des arbres ou leur volume.

Toutefois, ces données sont encore peu – voire pas- exploitées pour étudier la végétation en milieu urbain, et ceci pour deux raisons principales : les données aéroportées de type orthophotoplans sont privilégiées car leur usage est aujourd'hui bien maîtrisé, les données hyperspectrales étant quant à elles utilisées plus rarement et pour des besoins ponctuels très spécifiques ; le traitement des données LiDAR est assez complexe, et nécessite encore des développements pour certaines applications.

L'objectif principal de cette thèse était d'évaluer l'intérêt des images optiques THRS pour cartographier la végétation en ville. Plus précisément, elle visait à évaluer le potentiel des images THRS sur trois composantes : la résolution spatiale, la résolution spectrale et l'altimétrie.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons traité plusieurs types de données optiques THRS acquises sur la Ville de Rennes et le Site des Prairies Saint-Martin : des images 2D multispectrales et superspectrales, des images multispectrales 2,5D et des données 3D acquises par un LiDAR bi-spectral.

D'un point de vue thématique, les résultats obtenus à partir du traitement et de l'analyse de ces données ont permis de montrer qu'il est possible de détecter précisément la présence de la végétation en ville, de la caractériser d'un point de vue structurel (identifier des strates) et d'identifier des espèces d'arbres.

Nous avons d'abord évalué l'intérêt d'utiliser des images THRS 2D multispectrales pour identifier et caractériser la végétation et des images THRS superspectrales afin d'identifier les espèces végétales. Les résultats obtenus ont montré que les images multi-spectrales THRS Pléiades permettent d'identifier trois classes de végétation (arborée, arbustive, herbacée) avec un fort niveau de précision (indice de Kappa>0,79), sans toutefois que les espèces au sein de ces classes soient identifiées. Cette étude confirme aussi, s'il en était besoin, de la complémentarité entre les données de télédétection avec les bases de données nationale et internationales et les données *in situ*. Ils ont aussi mis en évidence le fort potentiel des données superspectrales comparativement aux données multispectrales, 19 espèces d'arbres ayant été classées avec un indice de Kappa de 0.72 avec les images super-spectrales contre 0.56 avec les images multispectrales.

Nous avons ensuite évalué l'apport de données multispectrales THRS 2,5D et 3D pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. L'utilisation des variables spectrales, contextuelles et de hauteur dérivées d'images Pléiades a montré l'intérêt de ces données pour la cartographie de la végétation aux échelles fines. En particulier, si nous avons montré que l'utilisation des données 2,5D permettait d'améliorer la classification de la végétation obtenue avec des images 2D, nos résultats révèlent aussi que les variables contextuelles dérivées des données 2D ont un poids plus important dans le processus de classification que les variables de hauteur dérivées de la reconstruction photogrammétrique d'un couple d'images Pléiades. En outre, cette étude a permis d'illustrer la complémentarité entre les types les variables spectrales, contextuelles et de hauteur, et en définitive de la complémentarité entre les données THRS 2,5 D et les données THRS 3D pour l'identification de de la végétation en ville *versus* les surfaces artificialisées et en eau, et plus spécifiquement pour discriminer différentes formes de végétation arborée en ville. Par ailleurs, l'utilisation de données LiDAR bi-spectrales (vert et proche infrarouge) a permis d'identifier les arbres présents en ville avec une précision satisfaisante (Indice de Kappa = 0,88), ce qui confirme

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

l'intérêt d'utiliser l'information altimétrique en complément des variables spectrales issues des données 2D pour discriminer les surfaces végétales et des autres types de surfaces. Enfin, nous avons cherché à étudier la stratification de la végétation à l'échelle de l'arbre, mais les résultats obtenus, non satisfaisants, plaident en faveur de l'acquisition de données LiDAR en hiver, de façon à assurer une meilleure pénétration du signal dans la canopée.

Puis, nous avons cherché à évaluer l'impact de l'intégration des informations sur la végétation dérivées de données de télédétection THRS dans deux modèles environnementaux, un permettant d'étudier la relation paysage-biodiversité, l'autre la relation paysage- îlot de fraîcheur urbain. La mise en relation de métriques paysagères calculées à différentes échelles et dérivées de cartes d'occupation du sol réalisées sur la ville de Rennes à partir d'images satellites Landsat 8, Spot 6 et Worldview-2 avec des indices biologiques traduisant la distribution de communautés de carabes a confirmé que la finesse de représentation du paysage (grain) a un effet sur la distribution des espèces de carabes. L'utilisation de la cartographie de l'occupation du sol réalisée à partir d'images satellites par différents types de capteurs THRS 2,5D et 3D pour la caractérisation de l'îlot de fraîcheur d'un parc urbain dans le contexte de l'Ilot de Chaleur Urbain de la ville de Rennes a montré l'influence majeure de l'altitude et des surfaces bâties sur la variabilité des températures, ainsi que l'importance de la présence de végétation basse en été.

Sur le plan méthodologique, les recherches menées dans le cadre de cette thèse sont originales à plusieurs égards : (1) Cette étude est la première, à notre connaissance, à explorer le potentiel des images super spectrales pour discriminer des d'espèces d'arbres en ville. Elle confirme l'hypothèse que les bandes spectrales du violet, du jaune et du red-edge améliorent la discrimination des végétaux en milieu comparativement aux bandes spectrales des capteurs optiques THRS multispectraux. Elle montre aussi que l'utilisation des bandes spectrales seules permet d'identifier la végétation avec une grande précision, l'intégration d'indices de végétation dans la classification n'améliorant pas vraiment les résultats ; (2) L'intégration de variables de hauteur, dérivées par photogrammétrie de couples d'images multispectrales 2D ou par réduction de dimensions de données 3D LIDAR, dans le processus de classification afin d'identifier la végétation n'avait pas été effectué en milieu urbain ; (3) L'évaluation de données LiDAR bi-spectrales pour identifier des strates de végétation en ville n'avait pas encore, à notre connaissance, été effectuée.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Plusieurs perspectives peuvent être dégagées à partir de ce travail, tant sur le plan méthodologique que sur le plan thématique.

D'un point de vue méthodologique, les données THRS ont été évaluées en analysant leurs dimensions spatiale, spectrale et altimétrique.

Sur le plan spectral, dans cette thèse, nous avons évalué la capacité de données superspectrales à discriminer des espèces d'arbres, mais en utilisant uniquement les bandes du visible et du proche infrarouge (de 0,4 à 1 µm). D'une part, il serait intéressant de tester aussi les bandes spectrales de l'infrarouge moyen (de 1 à 2,5 µm) qui présentent un intérêt certain pour l'étude de l'état et du suivi de la végétation. D'autre part, l'approche que nous avons développée pourrait être appliquée pour discriminer des espèces relevant des strates arbustive et herbacée. Enfin, les observations que nous avons effectuées pourraient contribuer aux réflexions menées pour définir les caractéristiques des prochaines missions spatiales d'observation de la Terre, par exemple la prochaine génération Sentinel.

Sur le plan altimétrique, nous avons évalué l'intérêt de l'utilisation des données LiDAR bi-spectrales pour discriminer la végétation et identifier des strates de végétation. Les données LiDAR que nous avons exploitées ont été acquises en été. Il serait intéressant d'évaluer des données LiDAR acquises en hiver, lorsque le signal peut pénétrer la canopée. En outre, nous avons traité des données multi-échos, alors que les résultats pourraient être grandement améliorés en utilisant des données LiDAR acquises en mode full-wave vegetation. Cependant extraire les informations souhaitées sur la végétation à partir des retours d'onde complets nécessite encore des développements méthodologiques comme en témoignent les premiers tests que nous avons effectués pour identifier des espèces végétales sur la ville de Rennes.

D'un point de vue thématique, les informations que nous pouvons extraire sur la végétation urbaine à partir des images THRS multispectrales 2D, 2,5D et des images 3D LiDAR peuvent répondre à certains besoins exprimés par les scientifiques et les gestionnaires.

Les cartes détaillées de la végétation couvrant tout le terrain urbain peuvent être utilisées de façon opérationnelle par les gestionnaires. Certaines des cartes que nous avons produites à partir d'images multispectrales 2D ont d'ailleurs d'ores et déjà été exploitées par l'AUDIAR dans le cadre de la révision de documents d'urbanisme (PLU, SCOT), notamment pour définir les territoires à préserver prioritairement dans le cadre de la Trame Verte et Bleue. D'autres cartes que nous avons aussi produites toujours à partir d'images multispectrales 2D ont été exploitées par Rennes Métropole,

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

notamment dans le cadre de programmes d'action de la maîtrise de la consommation foncière. La composante 3D de la cartographie de la végétation (hauteur, forme, volume) pourrait être intégrée dans les bases de données des services des villes pour contribuer à gérer la végétation plus efficacement. Cette composante 3D est d'ailleurs actuellement mobilisée dans le cadre d'un projet de recherche portant sur le renouvellement urbain et mené en partenariat avec la ville de Rennes afin d'évaluer l'impact de la modification de la végétation sur le climat à l'échelle d'une rue située au centre de la ville.

Ces cartes détaillées de la végétation peuvent donc être aussi utilisées par la communauté scientifique. Nous l'avons montré dans cette thèse à travers deux applications l'une portant sur la biodiversité, l'autre sur le climat. Ces cartes pourraient être aussi utilisées d'une part dans des modèles physiques de fonctionnement des surfaces, mettant en œuvre des processus tels que le stockage de carbone, le ruissellement, ou les bilans énergétiques et d'autre part dans des modèles de prédiction de changements d'occupation des sols en relation avec le changement climatique.

Plus généralement, nous pouvons souligner que même si les méthodes développées dans cette thèse ont été appliquées pour identifier et caractériser la végétation sur une ville de taille moyenne de la France de l'Ouest, elles peuvent être reproduites dans d'autres environnements urbains.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Références bibliographiques

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Références bibliographiques

Abohela, I., Hamza, N., Dudek, S., 2013. Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. Renewable Energy 50, 1106–1118. https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.068

Aguejdad, R., 2011. Etalement urbain et évaluation de son impact sur la biodiversité, de la reconstitution des trajectoires à la modélisation prospective. Application à une agglomération de taille moyenne: Rennes Métropole. Rennes II.

Aguejdad, R., Hubert-Moy, L., 2016. Suivi de l'artificialisation du territoire en milieu urbain par télédétection et à l'aide de métriques paysagères. Application à une agglomération de taille moyenne, Rennes Métropole. Cybergeo. https://doi.org/10.4000/cybergeo.27465

Aguejdad, R., Houet, T., Hubert-Moy, L., 2017. Spatial validation of land use change models using multiple assessment techniques: a case study of transition potential models. Environmental Modeling & Assessment 22, 591–606. https://doi.org/10.1007/s10666-017-9564-4

Aguilar, M. A., Saldana, M. M., Aguilar, F. J., 2013. GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classi cation in urban environments. International Journal of Remote Sensing 34, 2583-2606. https://doi.org/10.1080/01431161.2012.747018

Akbari, H., Konopacki, S., 2005. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. Energy Policy 33, 721–756. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.001

Aksoy, S., Akcay, H., Wassenaar, T., 2010. Automatic mapping of linear woody vegetation features in agricultural landscapes using very high resolution imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 48, 511-522.

Ali-Toudert, F., Mayer, H., 2007. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. Solar Energy 81, 742–754. https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Alonzo, M., Roth, K., Roberts, D., 2013. Identifying Santa Barbara's urban tree species from AVIRIS imagery using canonical discriminant analysis. Remote Sensing Letters 4, 513–521. https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.764027

Alonzo, M., Bookhagen, B., Roberts, D.A., 2014. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. Remote Sensing of Environment 148, 70–83. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.018

Alonzo, M., Bookhagen, B., McFadden, J. P., Sun, A., Roberts, D.A., 2015. Mapping urban forest leaf area index with airborne lidar using penetration metrics and allometry. Remote Sensing of Environment 162, 141–153. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.025

Alonso, R., Vivanco, M.G., González-Fernández, I., Bermejo, V., Palomino, I., Garrido, J.L., Elvira, S., Salvador, P., Artíñano, B., 2011. Modelling the influence of peri-urban trees in the air quality of Madrid region (Spain). Environmental Pollution 159, 2138–2147. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.12.005

APPANPC, 2014. Vegetation urbaine les enjeux pour l'environnement et la santé.

Armson, D., Stringer, P., Ennos, A.R., 2012. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. Urban Forestry & Urban Greening 11, 245–255. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002

Audebert, N., Boulch, A., Lagrange, A., Saux, B.L., 2016. Deep Learning for Remote Sensing 8.

AUDIAR, Bouriau, E., 2015. Nature en ville à rennes : Contribution au projet urbain Rennes 2030.

Aviron, S., Burel, F., Baudry, J., Schermann, N., 2005. Carabid assemblages in agricultural landscapes : impact of habitat features, landscape context at different spatial scales and farming intensity. Agriculture, Ecosystems and Environnement 108, 205-217.

Aziz, O.A., Brice, S., Ismaïla, T.I., 2014. Analyse des contraintes de viabilité de la végétation urbaine : cas des arbres d'alignement dans la ville de Porto-Novo au Benin 15.

Baatz, M., Schape, A., 2000. Multiresolution segmentation : an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. Strobl, J. (Ed.). XII., 12–23.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Baltsavias, E.P., Gruen, A., 2003. A comparison of aerial photos, LIDAR and IKONOS for monitoring cities. Remotely-Sensed Cities 47–82.

Baltsavias, E., Gruen, A., Eisenbeiss, H., Zhang, L., Waser, L.T., 2008. High-quality image matching and automated generation of 3D tree models. International Journal of Remote Sensing 29, 1243–1259. Https://doi.org/10.1080/01431160701736513

Bartens, J., Day, S.D., Harris, J.R., Dove, J.E., Wynn, T.M., 2008. Can urban tree roots improve infiltration through compacted subsoils for stormwater management. Journal of Environment Quality 37, 2048. https://doi.org/10.2134/jeq2008.0117

Bastian, O., Haase, D., Grunewald, K., 2012. Ecosystem properties, potentials and services – The EPPS conceptual framework and an urban application example. Ecological Indicators 21, 7–16. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.014

Belgiu, M., Drăguţ, L., 2014. Comparing supervised and unsupervised multiresolution segmentation approaches for extracting buildings from very high resolution imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 96, 67–75.

Betbeder, J., Nabucet, J., Pottier, E., Baudry, J., Corgne, S., Hubert-Moy, L., 2014. Detection and characterization of hedgerows using terrasar-x imagery. Remote Sensing 6, 3752–3769. https://doi.org/10.3390/rs6053752

Betbeder, J., 2015. Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuées écologiques. Géographie - Université Rennes 2, p.373.

Birds, W., 2007. Investigating the links between the natural environment, Biodiversity and Mental Health.

Birds, W., 2004. Can green space and biodiversity increase levels of physical activity.

Blackburn, G.A., 1998. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. International Journal of Remote Sensing 19, 657–675. https://doi.org/10.1080/014311698215919

Blankenstein, S., Kuttler, W., 2004. Impact of street geometry on downward longwave radiation and air temperature in an urban environment. Meteorologische Zeitschrift 13, 373–379. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2004/0013-0373

Boehner, J., Antonic, O., 2009. Land-surface parameters specific to topo-climatology. Geomorphometry - Concepts, Software, Applications'. Developments in Soil Science, Volume 33, p.195-226, Elsevier

Bolund, P., Hunhammar, S., 1999. Ecosystem services in urban areas. Ecological Economics 29, 293–301. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0

Borengasser, M., Hungate, W.S., Watkins, R., 2007. Hyperspectral Remote Sensing Principles and Applications. Taylor and Francis Group.

Boulanger, P.-M., 2004. Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique 24.

Bouriau, E., Nabucet, J., Hubert-Moy, L., 2014. Place de la nature en ville à rennes.

Bournérias, M., Arnal, G., Bock, C., 2001. Guide des Groupements végétaux de la région parisienne. Belin, Paris.

Boussard, H., Baudry, J., 2014. A software for landscape pattern analysis, p.26.

Bonthoux, S., Brun, M., Di Pietro, F., Greulich, S., Bouché-Pillon, S., 2014. How can wastelands promote biodiversity in cities? A review. Landscape and Urban Planning 132, 79–88. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.08.010

Breiman, L., 1996. Bagging Predictors. Machine Learning 24, 123-140.

Breiman, L., 2001. Random Forests. Machine Learning 45, 5–32.

Bretar, F., Chehata, N., 2007. Digital terrain model on vegetated areas : Joint use of airborne lidar data and optical images. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36.

Briese, C., Pfennigbauer, M., Lehner, H., Ullrich, A., Wagner, W., Pfeifer, N., 2012. Radiometric calibration of multi-wavelength airborne laser scanning data. ISPRS, Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences I–7, 335–340. https://doi.org/10.5194/isprsannals-I-7-335-2012

Brodu, N., Lague, D., 2011. 3D Terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology.

Brodu, N., Lague, D., 2012. 3D terrestrial lidar data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion : Applications in geomorphology. ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing 68, 121–134.

Brown, C., 2007. Natural medicine for planners 4.

Bruzzone, L., Persello, C., 2009. Approaches based on support vector machine to classification of remote sensing data. Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision. World Scientific, pp. 329–352. https://doi.org/10.1142/9789814273398_0014

Burel, F., Baudry, J., Butet, A., Clergeau, P., Delettre, Y., Le Cœur, D., Dubs, F., Morvan N., Paillat, G., Petit, S., Thenail, C., Brunel, E., Lefeuvre, J., 1998. Comparative biodiversity along gradient of agricultural landscapes. Acta Oecologica - International Journal Of Ecology 19, 47-60.

Burel, F., Baudry, J., 2003. Landscape Ecology : concepts, methods, and applications. Boca Raton.

Burnett, C., Blaschke, T., 2003. A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. Ecological Modelling 168, 233–249.

Burnham, K., Anderson, D., 2002. Model selection and inference : a practical information - theoretic approach. 2nd Edition, Springer, New York, p.355.

Cadenasso, M.L., Pickett, S.T.A., Schwarz, K., 2007. Spatial heterogeneity in urban ecosystems: reconceptualizing land cover and a framework for classification. Frontiers in Ecology and the Environment 5, 80–88.

Calfapietra, C., Peñuelas, J., Niinemets, Ü., 2015. Urban plant physiology : adaptation-mitigation strategies under permanent stress. Trends in Plant Science 20, 72–75. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.11.001

Camps-Calvet, M., Langemeyer, J., Calvet-Mir, L., Gómez-Baggethun, E., 2016. Ecosystem services provided by urban gardens in Barcelona, Spain : Insights for policy and planning. Environmental Science & Policy 62, 14–23. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.01.007

Cantat, 0., 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, Norois, 191 | 2004, 75-102.

Cao, X., Onishi, A., Chen, J., Imura, H., 2010. Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data. Landscape and Urban Planning 96, 224–231. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.008

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Carleer, A., Wolff, E., 2004. Exploitation of very high resolution satellite data for tree species identification. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 70, 135–140. https://doi.org/10.14358/PERS.70.1.135

Carleer, A. P., Wol, E., 2006. Urban land cover multi-level region-based classification of VHR data by selecting relevant features. International Journal of Remote Sensing 27, 1035-1051.

Caynes, R.J.C., Mitchell, M.G.E., Wu, D.S., Johansen, K., Rhodes, J.R., 2016. Using high-resolution LiDAR data to quantify the three-dimensional structure of vegetation in urban green space. Urban Ecosystems 19, 1749–1765. https://doi.org/10.1007/s11252-016-0571-z

Chalmandrier, M., Canavese, M., Petit-Berghem, Y., Rémy, É., 2017. « L'agriculture urbaine », entre concept scientifique et modèle d'action: Une notion mise à l'épreuve par le jardinage et le sol urbains. Géographie et cultures 119–138. https://doi.org/10.4000/gc.5052

Chandramathy, I., Kitchley, J.L., 2018. Study and analysis of efficient green cover types for mitigating the air temperature and urban heat island effect. International Journal of Global Warming 14, 238. https://doi.org/10.1504/IJGW.2018.090182

Chanussot, J., Benediktsson, J. A., Fauvel, M., 2006. Classification of remote sensing images from urban areas using a fuzzy possibilistic model. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 3, 40-44.

Chen, F., Jiang, H., Van de Voorde, T., Lu, S., Xu, W., Zhou, Y., 2018. Land cover mapping in urban environments using hyperspectral apex data: a study case in Baden, Switzerland. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 71, 70–82. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.04.011

Chen, Q., Baldocchi, D., Gong, P., Kelly, M., 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72, 923–932.

Chepesiuk, R., 2009. Missing the dark: health effects of light pollution. Environmental Health Perspectives 117, A20–A27.

Chiesura, A., 2004. The role of urban parks for the sustainable city. Landscape and Urban Planning. 68, 129–138.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Chubey, M.S., Franklin, S.E., Wulder, M.A., 2006. Object-based analysis of ikonos-2 imagery for extraction of forest inventory parameters. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 72, 383–394. https://doi.org/10.14358/PERS.72.4.383

Chun, B., Guldmann, J.-M., 2014. Spatial statistical analysis and simulation of the urban heat island in high-density central cities. Landscape and Urban Planning 125, 76–88. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.016

Clark, M.L., Roberts, D.A., 2012. Species-level differences in hyperspectral metrics among tropical rainforest trees as determined by a tree-based classifier. Remote Sensing 4, 1820–1855. https://doi.org/10.3390/rs406182

Clergeau, P., Désiré, G., 1999. Biodiversité, paysage et aménagement : du corridor biologique à la zone de connexion biologique. Mappe Monde 55, 19-23.

Clergeau, P., Le Lay, G., Hubert-Moy, L., 2001. Computerized map of risk to manage wildlife species in urban areas. environmental management 27, 451–461. https://doi.org/10.1007/s002670010161

Clergeau, P., Blanc, N., 2013. Trames vertes urbaines : de la recherche scientifique au projet urbain. Editions le Moniteur, p.339.

Clinton, N., Holt, A., Scarborough, J., Yan L., Gong, P., 2010. Accuracy assessment measures for object-based image segmentation goodness. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 76, 289–299.

Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment 37, 35–46.

Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., and Böhner, J., 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015

Consalès, J.N., Goiffon, M., Barthélémy, C., 2012. Entre aménagement du paysage et ménagement de la nature à Marseille: la trame verte à l'épreuve du local. Développement durable et territoires. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9268

Cormier, L., 2015. Les urbanistes et l'approche écologique de la nature en ville : une conciliation possible? 12

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Costanza, R., d'Arge, R., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital 387, 8.

Cover, T., Hart, P., 1967. Nearest neighbor pattern classification. Information Theory, IEEE Transactions on Information Theory, 13, 21–27.

Cox, H.M., 2012. A sustainability initiative to quantify carbon sequestration by campus trees. Journal of Geography 111, 173–183. https://doi.org/10.1080/00221341.2011.628046

Croci, S., 2007. Urbanisation et biodiversité : traits biologiques et facteurs environnementaux associés à l'organisation des communautés animales le long d'un gradient rural-urbain. Thèse de doctorat : Ecologie Urbaine - Université Rennes 1, p.214.

Croci, S., Buttet, A., Aguejdad, R., Clergeau, P., 2008. Small urban woodlands as biodiversity conservation hot-spot : a multi-taxon approach. Landscape Ecology 23, 1171-1186.

Crompton, J.L., 2001. The Impact of Parks on Property Values: A Review of the Empirical Evidence. Journal of Leisure Research 33, 1–31. https://doi.org/10.1080/00222216.2001.11949928

Cuny, M.-A., Verrougstraete, L., Thibaudon, M., Bonhême, L., Besancenot, J.-P., Cuny, D., 2015. Effects of urban vegetation on climate, air pollution and health. Environnement Risques Santé 482–489. https://doi.org/10.1684/ers.2015.0817

Dalponte, M., Bruzzone, L., Vescovo, L., Gianelle, D., 2009. The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas. Remote Sensing of Environment 113, 2345–2355. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.013

Dalponte, M., Orka, H.O., Gobakken, T., Gianelle, D., Naesset, E., 2013. Tree species classification in boreal forests with hyperspectral data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 51, 2632–2645. https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2216272

Dan Li, Yinghai Ke, Huili Gong, Beibei Chen, Lin Zhu, 2014. Tree species classification based on WorldView-2 imagery in complex urban environment. Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Applications (EORSA). Presented at the 2014 3rd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA), IEEE, Changsha, China, pp. 326–330. https://doi.org/10.1109/EORSA.2014.6927905

Davern, M., Farrar, A., Kendal, D., Giles corti, billie, 2016. Quality green space supporting health, wellbeing and biodiversity: a literature review. Report prepared for the Heart Foundation, SA Health, Department of Environment, Water and Natural Resources, Office for Recreation and Sport, and Local Government Association (SA). University of Melbourne: Victoria.

Davis, C.H., Wang, X., 2003. Planimetric accuracy of Ikonos 1 m panchromatic orthoimage products and their utility for local government GIS basemap applications. International Journal of Remote Sensing 24, 4267–4288. https://doi.org/10.1080/0143116031000070328

Degerickx, J., Roberts, D.A., McFadden, J.P., Hermy, M., Somers, B., 2018. Urban tree health assessment using airborne hyperspectral and LiDAR imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 73, 26–38. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.021

De Groot, R.S., Wilson, M.A., Boumans, R.M.., 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics 41, 393–408. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7

Dell'Acqua, F., Gamba, P., Ferrari, A., Palmason, J.A., Benediktsson, J.A., Arnason, K., 2004. Exploiting spectral and spatial information in hyperspectral urban data with high resolution. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 1, 322–326. https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.837009

Deng, F., Zhang, Z., Zhang, J., n.d. construction 3d urban model from lidar and image sequence 34, 4.

Deng, Y., Wu, C., Li, M., Chen, R., 2015. RNDSI: A ratio normalized difference soil index for remote sensing of urban/suburban environments. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 39, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.010

Digabel, H., and Lantuejoul, C., 1978. Iterative Algorithms. Proceedings of the 2nd European Symposium Quantitative Analysis of Microstructures in Material Science, Biology and Medicine, 85-89.

Drăguţ, L., Tiede, D., Levick, S.R., 2010. ESP : A tool to estimate scale parameter for multiresolution image segmentation of remotely sensed data. International Journal of Geographical Information Science 24, 859–871.

Durand, A., Michel, J., De Franchis, C., Allenbach, B., Giros, A., 2013. Qualitative assessment of four DSM generation approaches using Pleiades-HR data. Proceedings of the 33th.

Dwyer, J. F., Mcpherson, E. G., Schroeder, H. W., Rowntree, R. A., 1992. Assessing the benefits and costs of the urban forest. Journal of Arboricuture 18, 227-234.

Eisank, C., Rieg, L., Klug, C., Kleindienst, H., Sailer, R., 2015. Semi-global matching of pléiades tri-stereo imagery to generate detailed digital topography for high-alpine regions. GI_Forum 1, 168–177. https://doi.org/10.1553/giscience2015s168

Estoque, R.C., Murayama, Y., Myint, S.W., 2017. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. Science of The Total Environment 577, 349–359. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.195

Fahrig, L., 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. Annual Review Of Ecology Evolution And Systematics 34, 487-515. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419

Falcone, J.A., Gomez, R., 2005. Mapping impervious surface type and sub-pixel abundance using hyperion hyperspectral imagery. Geocarto International 20, 3–10. https://doi.org/10.1080/10106040508542358

Fauvel, M., 2007. Spectral and spatial methods for the classification of urban remote sensing data. PhD thesis, Grenoble Institute of Technology ; Faculty of Engineering - University of Iceland.

Fauvel, M., Arbelot, B., Benediktsson, J. A., Sheeren, D., Chanussot, J., 2013. Detection of hedges in a rural landscape using a local orientation feature : from linear opening to path opening. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 6, 15-26.

Fernandez-Diaz, J., Carter, W., Glennie, C., Shrestha, R., Pan, Z., Ekhtari, N., Singhania, A., Hauser, D., Sartori, M., 2016. Capability assessment and performance metrics for the titan multispectral mapping lidar. Remote Sensing 8, 936. https://doi.org/10.3390/rs8110936

Feyisa, G.L., Dons, K., Meilby, H., 2014. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa. Landscape and Urban Planning 123, 87–95. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.008

Foltete, J., Clauzel, C., Giradet, X., Tourmant, P., Vuidel, G., 2012. La modélisation des réseaux ecologiques par les graphes paysagers. Revue Internationale de Géomatique 22, N°4, 641-658.

Foissard, X., 2015. L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique: application à l'agglomération rennaise. Thèe de doctorat : Géographie, Université Rennes 2, p.248.

Freer-Smith, P.H., Beckett, K.P., Taylor, G., 2005. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides × trichocarpa 'Beaupré', Pinus nigra and × Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. Environmental Pollution 133, 157–167. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.03.031

Fujita, A., Maeto, K., Kagawa, Y., Ito, N., 2008. Effects of forest fragmentation on species richness and composition of ground beetles (Coleoptera: Carabidae and Brachinidae) in urban landscapes. Entomological Science 11. https://doi.org/10.1111/j.1479-8298.2007.00243.x

Fuller, R.A., Gaston, K.J., 2009. The scaling of green space coverage in European cities. Biology Letters 5, 352–355. https://doi.org/10.1098/rsbl.2009.0010

Gao, B., 1996. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment 58, 257–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

Gaublomme, E., Hendrickx, F., Dhuyvetter, H., Desender, K., 2008. The effects of forest patch size and matrix type on changes in carabid beetle assemblages in an urbanized landscape. Biological Conservation 141, 2585–2596.

Gevaert, C.M., Persello, C., Sliuzas, R., Vosselman, G., 2016. Classification of informal settlements through the integration of 2d and 3d features extracted from uav data. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III–3, 317–324. https://doi.org/10.5194/isprsannals-III-3-317-2016

Gianinetto, M., Lechi, G., 2004. The development of superspectral approaches for the improvement of land cover classification. IEEE Transactions on Geoscience

and Remote Sensing 42, 2670–2679. https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.835347

Giridharan, R., Lau, S.S.Y., Ganesan, S., 2005. Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong. Energy and Buildings 37, 964–971. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.005

Goddard, M.A., Dougill, A.J., Benton, T.G., 2010. Scaling up from gardens: biodiversity conservation in urban environments. Trends in Ecology & Evolution 25, 90–98. https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.07.016

Goodwin, N., Turner, R., Merton, R., 2005. Classifying Eucalyptus forests with high spatial and spectral resolution imagery: an investigation of individual species and vegetation communities. Australian Journal of Botany 53, 337. https://doi.org/10.1071/BT04085

Goodwin, N.R., Coops, N.C., Tooke, T.R., Christen, A., Voogt, J.A., 2009. Characterizing urban surface cover and structure with airborne lidar technology. Canadian Journal of Remote Sensing 35, 297–309. https://doi.org/10.5589/m09-015

Gourmelon, F., Rouan, M., Nabucet, J., 2017. Infrastructures de Données Géographiques et observatoires de recherche en environnement: un exemple de mise en oeuvre. Revue international de géomatique 27, 15.

Graça, M., Alves, P., Gonçalves, J., Nowak, D.J., Hoehn, R., Farinha-Marques, P., Cunha, M., 2018. Assessing how green space types affect ecosystem services delivery in Porto, Portugal. Landscape and Urban Planning 170, 195–208. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.007

Greiwe, A., Ehlers, M., 2005. Combined analysis of hyperspectral and high resolution image data in an object oriented classification approach. Proceedings of 3rd International Symposium on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas 13–15.

Gross, H., 2005. 3D-Modeling of Urban Structures 6.

Guégan-Roué, A., 1994. Dynamique spatiale de l'agglomération rennaise : la télédétection, un outil d'analyse et de gestion de l'espace. Thèe de doctorat : Géographie. Rennes II.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Guérois, M., 2003. Les formes des villes européennes vues du ciel. Une contribution de l'image Corine Land Cover à la comparaison morphologique des grandes villes d'Europe occidentale. Paris I.

Gunawardena, K.R., Wells, M.J., Kershaw, T., 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. Science of The Total Environment 584–585, 1040–1055. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158

Guo, L., Chehata, N., Mallet, C., Boukir, S., 2011. Relevance of airborne lidar and multispectral image data for urban scene classification using Random Forests. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66, 56–66. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.08.007

Haala, N., Kada, M., 2010. An update on automatic 3D building reconstruction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 65, 570–580. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.09.006

Han, W., Zhao, S., Feng, X., Chen, L., 2014. Extraction of multilayer vegetation coverage using airborne LiDAR discrete points with intensity information in urban areas: A case study in Nanjing City, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 30, 56–64. https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.016

Hardin, P., Hardin, A., 2013. Hyperspectral remote sensing of urban areas: hyperspectral remote sensing. Geography Compass 7, 7–21. https://doi.org/10.1111/gec3.12017

Hasega'wa, H., 2006. Evaluations of LEEAR reflectance amplitude sensitivity towards land cover conditions. Bulletin of Geographical Survey Institue 53.

He, H., Garcia E.A., 2009. Learning from imbalanced data. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 21, 1263 –1284.

Heiple, S., Sailor, D.J., 2008. Using building energy simulation and geospatial modeling techniques to determine high resolution building sector energy consumption profiles. Energy Build. 40, 1426–1436.

Heinzel, J., Koch, B., 2011. Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13, 152–160. https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.09.010

Herold, M., Scepan, J., Müller, A., Günther, S., 2003. Object-oriented mapping and analysis of urban land use/cover using IKONOS data 8.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Herold, M., Hemphill J., Dietzel C., Clarke K.C, 2005. Remote sensing derived mapping to support urban growth theory, Proceedings of ISPRS, XXXVI-8/W27, 6p.

Hirschmugl, M., Ofner, M., Raggam, J., Schardt, M., 2007. Single tree detection in very high resolution remote sensing data. Remote Sensing of Environment 110, 533–544.

Hirschmuller, H., 2008. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30, 328–341. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2007.1166

Höfle, B., Hollaus, M., Hagenauer, J., 2012. Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 67, 134–147. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.12.003

Hölker, F., Wolter, C., Perkin, E.K., Tockner, K., 2010. Light pollution as a biodiversity threat. Trends in Ecology & Evolution 25, 681–682. https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.09.007

Hong, Z., Xu, S., Wang, J., Xiao, P., 2009. Extraction of urban street trees from high resolution remote sensing image. IEEE, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/URS.2009.5137724

Huang, X., Zhang, L., 2009. A comparative study of spatial approaches for urban mapping using hyperspectral ROSIS images over Pavia City, northern Italy. International Journal of Remote Sensing 30, 3205–3221. https://doi.org/10.1080/01431160802559046

Huang, X., Zhang, L., 2008. An adaptive mean-shift analysis approach for object extraction and classification from urban hyperspectral imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 46, 4173–4185. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002577

Huang, Y., Yu, B., Zhou, J., Hu, C., Tan, W., Hu, Z., Wu, J., 2013. Toward automatic estimation of urban green volume using airborne LiDAR data and high resolution Remote Sensing images. Frontiers of Earth Science 7, 43–54. https://doi.org/10.1007/s11707-012-0339-6

Immitzer, M., Atzberger, C., Koukal, T., 2012. Tree Species Classification with Random Forest Using Very High Spatial Resolution 8-Band WorldView-2

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Satellite Data. Remote Sensing 4, 2661–2693. https://doi.org/10.3390/rs4092661

INSEE : Recensement générale de la population, 2015.

Iovan, C., Boldo, D., Cord, M., 2008. Detection, characterization, and modeling vegetation in urban areas from high-resolution aerial imagery. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sansing 1, 206–213.

Ishitani, M., Kotze, D., Niemela, J., 2003. Changes in carabid beetle assemblages across an urban-rural gradient in Japan. Ecography 26, 481-489.

Jarzabek-Rychard, M., Karpina, M., 2016. Quality analysis on 3d buidling models reconstructed from uav imagery. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B1, 1121–1126. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1121-2016

Jeannel, R., 1941. Coleoptères carabiques, faune de France. Librairie de la Faculté Des Sciences, Paris, Vol. 39-40.

Jensen, R.R., Hardin, P.J., Bekker, M., Farnes, D.S., Lulla, V., Hardin, A., 2009. Modeling urban leaf area index with AISA+ hyperspectral data. Applied Geography 29, 320–332. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.10.001

Jensen, R.R., Hardin, P.J., Hardin, A.J., 2012. Estimating urban leaf area index (LAI) of individual trees with hyperspectral data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 78, 495–504. https://doi.org/10.14358/PERS.78.5.495

Jensen, R.R., Hardin, P.J., Hardin, A.J., 2012. Classification of urban tree species using hyperspectral imagery. Geocarto International 27, 443–458. https://doi.org/10.1080/10106049.2011.638989

Jim, C.Y., Chen, W.Y., 2008. Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). Journal of Environmental Management 88, 665–676. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.035

Jing, L., Hu, B., Noland, T., Li, J., 2012. An individual tree crown delineation method based on multi-scale segmentation of imagery. ISPRS Journal Photogrammetry Remote Sensing 70, 88–98.

Johansen, K., Phinn, S., 2006. Mapping structural parameters and species composition of riparian vegetation using ikonos and landsat etm+ data in australian

tropical savannahs. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 72, 71–80. https://doi.org/10.14358/PERS.72.1.71

Kaasalainen, S., Hyyppa, H., Kukko, A., Litkey, P., Ahokas, E., Hyyppa, J., Lehner, H., Jaakkola, A., Suomalainen, J., Akujarvi, A., Kaasalainen, M., Pyysalo, U., 2009. Radiometric calibration of LIDAR intensity with commercially available reference targets. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 47, 588–598. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2003351

Kastendeuch, P.P., 2013. A method to estimate sky view factors from digital elevation models. International Journal of Climatology 33, 1574–1578. https://doi.org/10.1002/joc.3523

Kazemipour, F., 2010. Caractérisation hyperspectrale des biofilms microphytobentiques : cartographie de la biomasse de la micro à la macro échelle. Nantes.

Ke, Y., Quackenbush, L.J., 2007. Forest species classification and tree crown delineation using quickbird imagery 9.

Keller, I., Nentwig, W., Largiader, C., 2004. Recent habitat fragmentation due to roads can lead to significant genetic differentiation in an abundant flightless ground beetle. Molecular Ecology 13, 2983-2994.

Kent, M., 2012. Vegetation description and data analysis - a Practical Approach, 2nd ed. Wiley-Blackwell.

Klingberg, J., Broberg, M., Strandberg, B., Thorsson, P., Pleijel, H., 2017. Influence of urban vegetation on air pollution and noise exposure – A case study in Gothenburg, Sweden. Science of The Total Environment 599–600, 1728–1739. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.051

Koc, C.B., Osmond, P., Peters, A., 2016. A green infrastructure typology matrix to support urban microclimate studies. Procedia Engineering 169, 183–190. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.022

Kohavi, R., 1995. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. Presented at the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), San mateo, CA, pp. 1137–1141.

Kolokotroni, M., Giridharan, R., 2008. Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air

temperature during summer. Solar Energy 82, 986–998. https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004.

Körting, T.S., Garcia Fonseca, L.M., Câmara, G., 2013. Geodma—geographic data mining analyst. Computers & Geosciences 57, 133–145. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.02.007

Kothencz, G., Kulessa, K., Anyyeva, A., Lang, S., 2018. Urban vegetation extraction from VHR (tri-)stereo imagery – a comparative study in two central European cities. European Journal of Remote Sensing 51, 285–300. https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1431057

Kulessa, K., Lang, S., 2016. 3D object-based feature extraction from 3-stereo DSM in urban context, in: GEOBIA 2016 : Solutions and Synergies. Presented at the GEOBIA 2016 : Solutions and Synergies, University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation (ITC). https://doi.org/10.3990/2.409

Kurn, D.M., Bretz, S.E., Huang, B., Akbari, H., 1994. The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling (No. LBL--35320, 10180633). https://doi.org/10.2172/10180633

Laben, C.., Brower, B.., 2000. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. U.S. Patent 6, 011,875.

Lafortezza, R., Carrus, G., Sanesi, G., Davies, C., 2009. Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress. Urban Forestry & Urban Greening 8, 97–108. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.02.003

Landsberg, H.E., 1981. The urban climate. International Geographic Series, 28.

Launeau, P., 2017. Airborne hyperspectral mapping of trees in an urban area 38, 1277–1311.

Lefebvre, A., 2011. Contribution de la texture pour l'analyse d'images à très haute résolution spatiale: application à la détection de changement en milieu périurbain. Thèe de doctorat : Géographie. Rennes II.

Lefebvre, A., Corpetti, T., Hubert-Moy, L., 2011. Estimation of the orientation of textured patterns via wavelet analysis. pattern recognition letters 32, 190-196.

Lefebvre, A., Sannier, C., 2015. Mapping tree cover in European cities : comparison of classification algorithms for an operational production framework. Urban Remote Sensing Event.

Lefebvre, A., Nabucet, J., Corpetti, T., Courty, N., Hubert-Moy, L., 2016. Extraction of urban vegetation with Pleiades multiangular images Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments. https://doi.org/10.1117/12.2241162

Lefebvre, A., Sannier, C., Corpetti, T., 2016. Monitoring urban areas with sentinel-2a data : application to the update of the copernicus high resolution layer imperviousness degree. Remote Sensing 8, 606.

Legendre, P., Legendre, L., 2012. Complex ecological data sets. Developments in Environmental Modelling 24, 1-57.

Lehmann, I., Mathey, J., Rößler, S., Bräuer, A., Goldberg, V., 2014. Urban vegetation structure types as a methodological approach for identifying ecosystem services – Application to the analysis of micro-climatic effects. Ecological Indicators 42, 58–72. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.036

Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. Geoscientific Model Development 5, 1377–1393.

Levine, M.D., Nazif, A.M., 1985. Dynamic measurement of computer generated image segmentations. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on PAMI 7, 155–164.

Li, D., Ke, Y., Gong, H., Li, X., 2015. Object-Based Urban Tree Species Classification Using Bi-Temporal WorldView-2 and WorldView-3 Images. Remote Sensing 7, 16917–16937. https://doi.org/10.3390/rs71215861

Li, H., Zhou, Y., Li, X., Meng, L., Wang, X., Wu, S., Sodoudi, S., 2018. A new method to quantify surface urban heat island intensity. Science of The Total Environment 624, 262–272. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.360

Liu, L., Coops, N.C., Aven, N.W., Pang, Y., 2017. Mapping urban tree species using integrated airborne hyperspectral and LiDAR remote sensing data. Remote Sensing of Environment 200, 170–182. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.010

Loghin, A.-M., Oniga, V.E., Giurma-Handley, C.-R., 2018. 3D Point Cloud Classification of Natural Environments Using Airborne Laser Scanning Data. American Journal of Engineering Research 7.

Long, N., Tonini, B., 2012. Les espaces verts urbains : étude exploratoire des pratiques et du ressenti des usagers. VertigO. https://doi.org/10.4000/vertigo.12931

Loram, A., Thompson, K., Warren, P.H., Gaston, K.J., 2008. urban domestic gardens (xii): the richness and composition of the flora in five UK Cities. Journal of Vegetation Science 19, 321–330.

Loriot, P., 2008. Etude expérimentale : détermination d'un MOS et calcul d'une tache urbaine à partir de la BD TOPO® d'IGN. CETE du Sud Ouest, 70p

Loughner, C.P., Allen, D.J., Zhang, D.-L., Pickering, K.E., Dickerson, R.R., Landry, L., 2012. Roles of urban tree canopy and buildings in urban heat island effects: parameterization and preliminary results. Journal of Applied Meteorology and Climatology 51, 1775–1793. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0228.1

Lu, M.L., Kieloch, Z., 2008. Accuracy of transmission line modeling based on aerial lidar survey. IEEE Transactions on Power Delivery 23, 1655–1663. https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911164

Lu, Z., Im, J., Quackenbush, L., 2011. A volumetric approach to population estimation using lidar remote sensing. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 77, 1145–1156. https://doi.org/10.14358/PERS.77.11.1145

Lucie, X., Durrieu, S., Anne, jolly, Labbé, S., Renaud, J.-P., 2017. Comparaison de modèles numériques de surface photogrammétriques de différentes résolutions en forêt mixte. Société fraçaise de Télédétection 213, 9.

Luo, Z., Sun, O.J., Ge, Q., Xu, W., Zheng, J., 2007. Phenological responses of plants to climate change in an urban environment. Ecological Research 22, 507–514. https://doi.org/10.1007/s11284-006-0044-6

Lukac, R., 2003. Adaptive vector median filtering. Pattern Recognition Letters 24, 1889–1899.

Ma, J., Ju, W., 2011. Mapping leaf area index for the urban area of Nanjing city, China using IKONOS remote sensing data. IEEE, pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/GeoInformatics.2011.5980881

Macnaghten, P., Urry, J., 2000. Bodies in the woodsi. Body and Society 6, 166–82.

MacFarlane, D.W., 2009. Potential availability of urban wood biomass in Michigan: Implications for energy production, carbon sequestration and sustainable forest management in the U.S.A. Biomass and Bioenergy 33, 628–634. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.10.004

Magurran, E.A., 1988. Ecological diversity and its measurements. Princeton University Press, p.215.

Magura, T. Tóthmérész, B., Molnár, T., 2004. Changes in carabid beetle assemblages along an urbanisation gradient in the city of Debrecen, Hungary. Landcape Ecology 19, 747-759.

Maimaitiyiming, M., Ghulam, A., Tiyip, T., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Halik, Ü., Sawut, M., Caetano, M., 2014. Effects of green space spatial pattern on land surface temperature: Implications for sustainable urban planning and climate change adaptation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 89, 59–66. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.12.010

Mallet, C., 2010. Analyse de données lidar à retour d'onde complète pour la classification en milieu urbain (Signal et image). Telecom ParisTech.

Mallet, C., Bretar, F., Roux, M., Soergel, U., Heipke, C., 2011. Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66, S71–S84.

Martinuzzi, S., Vierling, L.A., Gould, W.A., Falkowski, M.J., Evans, J.S., Hudak, A.T., Vierling, K.T., 2009. Mapping snags and understory shrubs for a LiDAR-based assessment of wildlife habitat suitability. Remote Sensing of Environment 113, 2533–2546. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.002

Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Boundary-Layer Meteorology 94, 357–397. https://doi.org/10.1023/A:1002463829265

Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S., Genesio, L., Vaccari, F., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., Bianconi, R., Gioli, B., 2015. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. Remote Sensing 7, 2971–2990. https://doi.org/10.3390/rs70302971

Mazzarini, F., Pareschi, M. T., Favalli, M., Isola, I., Tarquini, S., Boschi, E., 2006. Lava flow identification and ageing by means of LiDAR intensity : the Mont. Etna case. Journal of Geophysical Research. |https://doi.org/10.1029/2005JB004166.

McDonnell, M.J., Pickett, S.T.A., 1990. Ecosystem structure and function along urban–rural gradients : an unexploited opportunity for ecology. Ecology 71,1232–1237.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

McDonnell, M.J., Pickett, S.T.A., Groffman, P., Bohlen, P., Pouyat, R.V., Zipperer,W.C., et al., 1997. Ecosystem processes along an urban-to-rural gradient. Urban Ecosystems 1, 21–36.

McFeeters, S. K., 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing 17, 1425–1432.

McGarigal, K., Cushman, S., Ene, E., 2002. Fragstats V4 : spatial pattern analysis program for categorical and continuous maps. University Of Massachusetts. Http://Www.Umass.Edu/Landeco/Research/Fragstats/Fragstats.Html

McKinney, M.L., 2002. Urbanization, biodiversity, and conservation: the impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems. Bioscience 52, 883–890. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2

Mehdi, L., Weber, C., Pietro, F.D., Selmi, W., 2012. Évolution de la place du végétal dans la ville, de l'espace vert a la trame verte. VertigO. https://doi.org/10.4000/vertigo.12670

Mimet, A., Pellissier, V., Quénol, H., Aguejdad, R., Dubreuil, V., Rozé, F., 2009. Urbanisation induces early flowering: evidence from Platanus acerifolia and Prunus cerasus. International Journal of Biometeorology 53, 287–298. https://doi.org/10.1007/s00484-009-0214-7

Mingxing Hu, 2011. Extraction of trees and grasses in urban green land based on texture character of high resolution remote sensing image. IEEE, pp. 2178–2181. https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5964740

Momeni, R., Aplin, P., Boyd, D., 2016. Mapping complex urban land cover from spaceborne imagery : the influence of spatial resolution, spectral band set and classification approach. Remote Sensing 8, 88. https://doi.org/10.3390/rs8020088

Montavez, J.P., Rodriguez, A., Jiménez, J.I., 2000. A study of the urban heat island of granada. International Journal of Climatology 20, 899–911. https://doi.org/10.1002/1097-0088(20000630)20:8<899::AID-JOC433>3.0.CO;2-I

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Morikawa, H., Takahashi, M., Hakata, M., Sakamoto, A., 2003. Screening and genetic manipulation of plants for decontamination of pollutants from the environments. Biotechnology Advances 22, 9–15. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2003.08.013

Morsy, S., Shaker, A., El-Rabbany, A., LaRocque, P. E., 2016. Airborne multispectral lidar data for land-cover classification and land/water mapping using different spectral indexes. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-3, 217–224.

Mullaney, J., Lucke, T., Trueman, S.J., 2015. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. Landscape and Urban Planning 134, 157–166. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.013

Müller, J., Brandl, R., 2009. Assessing biodiversity by remote sensing in mountainous terrain: the potential of LiDAR to predict forest beetle assemblages. Journal of Applied Ecology 46, 897–905. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01677.x

Musy, M., Bozonnet, E., Briottet, X., Gutleben, C., Lagouarde, J.-P., Launeau, P., Lemonsu, A., Maro, D., Rodriguez, F., Sabre, M., 2009. Rapport final Projet ANR-VegDUD Programme Villes Durables.

Myint, S.W., Gober, P., Brazel, A., Grossman-Clarke, S., Weng, Q., 2011. Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. Remote Sensing of Environment 115, 1145–1161. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.017

Nabucet, J., Rougier, S., Deniau, J., Vétillard, L., Hanson, E., Benarchid, O., Wolff, E., Hubert-Moy, L., Puissant, A., 2015. Multi-scale methodology to map grey and green structures in urban areas using Pléiades images and existing geographic data. RFPT 209, 95-101. http://www.sfpt.fr/rfpt/index.php/RFPT/article/view/237

Nex, F., Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics 6, 1–15. https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x

Nichol, J., Lee, C. M., 2005. Urban vegetation monitoring in Hong Kong using high resolution multispectral images. International Journal of Remote Sensing 26, 903-918.

Niemela, J., 1999. Ecology and urban planning. Biodiversity & Conservation 8, 119–131.

Niemelä, J., 2001. Carabid beetles (Carabidae) and habitat fragmentation: a review. European Journal of Entomology 98, 127–132.

Niemela, J., Kotze, D., Venn, S., Penev, L., Stoyanov, I., Spence, J., Hartley, D., Oca, E., 2002. Carabid beetle assemblages (coleoptera, carabidae) across urban-rural gradients : an international comparison. Landscape Ecology 17, 387-401.

Niemelä, J., Saarela, S.-R., Söderman, T., Kopperoinen, L., Yli-Pelkonen, V., Väre, S., Kotze, D.J., 2010. Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: a Finland case study. Biodiversity and Conservation 19, 3225–3243. https://doi.org/10.1007/s10531-010-9888-8

Norton, B.A., Coutts, A.M., Livesley, S.J., Harris, R.J., Hunter, A.M., Williams, N.S.G., 2015. Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. Landscape and Urban Planning 134, 127–138. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018

Nouri, H., Beecham, S., Anderson, S., Nagler, P., 2014. High spatial resolution worldview-2 imagery for mapping ndvi and its relationship to temporal urban landscape evapotranspiration factors. Remote Sensing 6, 580–602. https://doi.org/10.3390/rs6010580

Novack, T., Esch, T., Kux, H., Stilla, U., 2011. Machine learning comparison between Worldview-2 and Quickbird-2-simulated imagery regarding object-based urban land cover classification. Remote Sensing 3, 2263–2282. https://doi.org/10.3390/rs3102263

Nowak, D.J., Kuroda, M., Crane, D.E., 2004. Tree mortality rates and tree population projections in Baltimore, Maryland, USA. Urban Forestry & Urban Greening 2, 139–147. https://doi.org/10.1078/1618-8667-00030

Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C., 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. Urban Forestry & Urban Greening 4, 115-123.

Okada, S., Takai, N., 2000. Classifications of structural types and damage patterns of buildings for earthquake field investigation. In Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

Oke, T. R., 1987, Boundary Layer Climates. Second edition (London: Methuen).

ONU, 2018. Revision of World Urbanization Prospects.

Ouma, Y.O., Tateishi, R., 2008. Urban-trees extraction from Quickbird imagery using multiscale spectex-filtering and non-parametric classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 63, 333–351.

Ow, L.F., Ghosh, S., 2017. Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. Applied Acoustics 120, 15–20. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.01.007

Panagiotakis, E., Chrysoulakis, N., Charalampopoulou, V., Poursanidis, D., 2018. Validation of Pleiades tri-stereo dsm in urban areas. ISPRS International Journal of Geo-Information 7, 118. https://doi.org/10.3390/ijgi7030118

Pays de Rennes., 2015. Rapport de présentation du SCoT

Perini, K., Magliocco, A., 2014. Effects of vegetation, urban density, building height, and atmospheric conditions on local temperatures and thermal comfort. Urban Forestry & Urban Greening 13, 495–506. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.003

Perko, R., Raggam, H., Gutjahr, K., Schardt, M., 2014. Assessment of the mapping potential of Pleiades stereo and triplet data. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3, 103-109.

Perko, R., Raggam, H., Gutjahr, K.H., Schardt, M., 2015. Advanced dtm generation from very high resolution satellite stereo images. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3/W4, 165–172. https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W4-165-2015

Pesaresi, M., Benediktsson, J. A., 2001. A new approach for the morphological segmentation of high-resolution satellite imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39, 309-320.

Pesaresi, M., Gerhardinger, A., Kayitakire, F., 2008. A robust built-up area presence index by anisotropic rotation-invariant textural measure. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 1,180-192.

Poli, D., Remondino, F., Angiuli, E., Agugiaro, G., 2015. Radiometric and geometric evaluation of GeoEye-1, WorldView-2 and Pléiades-1A stereo images for 3D information extraction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 100, 35–47. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.04.007

Potwarka, L.R., Kaczynski, A.T., Flack, A.L., 2008. Places to Play: Association of park space and facilities with healthy weight status among children. Journal of Community Health 33, 344–350. https://doi.org/10.1007/s10900-008-9104-x

Pu, R., 2009. Broadleaf species recognition with in situ hyperspectral data. International Journal of Remote Sensing 30, 2759–2779. https://doi.org/10.1080/01431160802555820

Pu, R., Liu, D., 2011. Segmented canonical discriminant analysis of in situ hyperspectral data for identifying 13 urban tree species. International Journal of Remote Sensing 32, 2207–2226. https://doi.org/10.1080/01431161003692040

Pu, R., Landry, S., 2012. A comparative analysis of high spatial resolution IKONOS and WorldView-2 imagery for mapping urban tree species. Remote Sensing of Environment 124, 516-533. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.011.

Pu, R., Cheng, J., 2015. Mapping forest leaf area index using reflectance and textural information derived from Worldview-2 imagery in a mixed natural forest area in Florida, US. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 42, 11–23. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.05.004

Puissant, A., 2003. Information géographique et images à très haute résolution : utilité et application en milieu urbain. Université Louis Pasteur - Strasbourg I.

Puissant, A., Hirsch, J., Weber, C., 2005. The utility of texture analysis to improve per-pixel classification for high to very high spatial resolution imagery. International Journal of Remote Sensing 26, 733–745.

Puissant, A., Rougier, S., Stumpf, A., 2014. Object-oriented mapping of urban trees using Random Forest classifiers. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 26, 235–245. https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.07.002

Quénol H. et Dubreuil V., 2010 : Climatologie urbaine et phénologie à Rennes : exemple du programme ECORURB. Séminaire du GDR RICLIM « risques climatiques urbains », 25 mai 2010, Turin (Italie), (communication orale).

Qi Chen, 2011. Comparison of Worldview-2 and ikonos-2 imagery for identifying tree species in the habitat of an endangered bird species. Hawaii 8-Band Research Challenge. DigitalGlobe: Longmont, CO, USA.

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

R Development Core Team, 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN: 3-900051-07-0. http://www.R-project.org.

Ramdani, F., 2013. Urban vegetation mapping from fused hyperspectral image and lidar data with application to monitor urban tree heights. Journal of Geographic Information System 5, 404–408. http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2013.54038.

Rapinel, S., Clément, B., Magnanon, S., Sellin, V., Hubert-Moy, L., 2014. Identification and mapping of natural vegetation on a coastal site using a Worldview-2 satellite image. Journal of Environmental Management 144, 236–246. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.027

Richter, R., 1996. Atmospheric correction of satellite data with haze removal including a haze/clear transition region. Computers & Geosciences 22, 675–681. https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00010-6

Rizwan, A.M., Dennis, L.Y.C., Liu, C., 2008. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Sciences 20, 120–128. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4

Rochon, G., Bonn, F., 1996. Precis De Telediction. Volume 1, Principes et méthodes. PU Québec.

Roessner, S., Segl, K., Heiden, U., Kaufmann, H., 2001. Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39, 1525–1532. https://doi.org/10.1109/36.934082

Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2007. Building detection by fusion of airborne laser scanner data and multi-spectral images: Performance evaluation and sensitivity analysis. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 62, 135–149. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.03.001

Roy, S., Byrne, J., Pickering, C., 2012. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. Urban Forestry & Urban Greening 11, 351–363. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006

Rudd, H., Vala, J., Schaefer, V., 2002. Importance of backyard habitat in a comprehensive biodiversity conservation strategy : A Connectivity Analysis of Urban Green Spaces. Restoration Ecology 10, 368–375. https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.02041.x

Sabater, N., 2010. Fiabilité et précision en stéréoscopie: application à l'imagerie aérienne et satellitaire à haute résolution (Mathématiques appliquées). ENS Cachan.

Sabol, J., Patočka, Z., Mikita, T., 2014. Usage of Lidar Data for Leaf Area Index Estimation. GeoScience Engineering 60, 10–18. https://doi.org/10.2478/gse-2014-0013

Sadler, J.P., Small, E.C., Fiszpani, H., Tefler, M., Niemela, J., 2006. Investigating environmental variation and landscape characteristics of an urban–rural gradient using woodland carabid assemblages. Journal Of Biogeography 33, 1126-1138.

Salehi, B., Zhang, Y., Zhong, M., Dey, V., 2012. Object-based classification of urban areas using VHR imagery and height points ancillary data. Remote Sensing 4, 2256-2276.

Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., Assimakopoulos, D.., 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. Solar Energy 70, 201–216. https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00095-5

Segl, K., Roessner, S., Heiden, U., Kaufmann, H., 2003. Fusion of spectral and shape features for identification of urban surface cover types using reflective and thermal hyperspectral data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 58, 99–112. https://doi.org/10.1016/S0924-2716(03)00020-0

Selmi, W., Weber, C., Mehdi, L., 2013. Multifonctionnalité des espaces végétalisés urbains. VertigO. https://doi.org/10.4000/vertigo.14133

Sheets, virgil, Manzer, C., 1991. Affect, cognition, and urban vegetation some effects of adding trees along city streets. Environment and Behavior 23, 20.

Shi, Y., Skidmore, A.K., Wang, T., Holzwarth, S., Heiden, U., Pinnel, N., Zhu, X., Heurich, M., 2018. Tree species classification using plant functional traits from LiDAR and hyperspectral data. International Journal of Applied Earth

Observation and Geoinformation 73, 207–219. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.018

Shojanoori, R., Shafri, H.Z.M., 2016. Review on the Use of Remote Sensing for Urban Forest Monitoring 19.

Soergel, U., 2010. Review of radar remote sensing on urban areas. Radar Remote Sensing of Urban Areas. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 1–47. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3751-0_1

Soga, A., Kanno, N., Yamaura A., Koike, S., 2013. Patch size determines the strength of edge effects on carabid beetle assemblages in urban remnant forests. Journal of Insect Conservation 17, 421–428. https://doi.org/10.1007/s10841-012-9524-x

Soulard, C.-T., Margetic, C., Valette, É., 2011. Introduction : Innovations et agricultures urbaines durables. Norois 7–10. https://doi.org/10.4000/norois.3816

Spence, J., Niemela, J., 1994. Sampling carabid assemblages with pitfall traps – the madness and the method. Canadian Entomologist 126, 881-894.

Stal, C., Tack, F., De Maeyer, P., De Wulf, A., Goossens, R., 2013. Airborne photogrammetry and lidar for DSM extraction and 3D change detection over an urban area – a comparative study. International Journal of Remote Sensing 34, 1087–1110. https://doi.org/10.1080/01431161.2012.717183

Steffan-Dewenter, I., Münzenberg, U., Bürger, C., Thies, C., Tscharntke, T., 2002. The Ecological Society Of America 83, 1421-1432. https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[1421:SDEOLC]2.0.CO;2

Susca, T., Gaffin, S.R., Dell'Osso, G.R., 2011. Positive effects of vegetation : Urban heat island and green roofs. Environmental Pollution 159, 2119–2126. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007

Takahashi, M., Higaki, A., Nohno, M., Kamada, M., Okamura, Y., Matsui, K., Kitani, S., Morikawa, H., 2005. Differential assimilation of nitrogen dioxide by 70 taxa of roadside trees at an urban pollution level. Chemosphere 61, 633–639. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.03.033

Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., Freer-Smith, P., 2011. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. Landscape and Urban Planning 103, 129–138. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.003

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Tan, J., Zheng, Y., Tang, X., Guo, C., Li, L., Song, G., Zhen, X., Yuan, D., Kalkstein, A.J., Li, F., Chen, H., 2010. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai. International Journal of Biometeorology 54, 75–84. https://doi.org/10.1007/s00484-009-0256-x

Taylor, L., Hochuli, D.F., 2017. Defining greenspace: Multiple uses across multiple disciplines. Landscape and Urban Planning 158, 25–38. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.09.024

Thiele, H.U., 1997. Carabid Beetles in their Environments, a study on habitat selection by adaptations in physiology and behaviour. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Threlfall, C.G., Williams, N.S.G., Hahs, A.K., Livesley, S.J., 2016. Approaches to urban vegetation management and the impacts on urban bird and bat assemblages. Landscape and Urban Planning 153, 28–39. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.011

Tian, J., Cui, S., Reinartz, P., 2014. Building change detection based on satellite stereo imagery and digital surface models. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 52, 406–417. https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2240692

Tóthmérész, B., Máthé, I.,Balázs, E., Magura, T., 2011. Responses of carabid beetles to urbanization in Transylvania (Romania). Landscape and Urban Planning 101, 330-337. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.038

Tubby, K.V., Webber, J.F., 2010. Pests and diseases threatening urban trees under a changing climate. Forestry 83, 451–459. https://doi.org/10.1093/forestry/cpq027

Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., James, P., 2007. Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure : a literature review. Landscape and Urban Planning 81, 167–178. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001

Ucar, Z., Bettinger, P., Merry, K., Akbulut, R., Siry, J., 2018. Estimation of urban woody vegetation cover using multispectral imagery and LiDAR. Urban Forestry & Urban Greening 29, 248–260. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.001

Ustin, S.L., Gitelson, A.A., Jacquemoud, S., Schaepman, M., Asner, G.P., Gamon, J.A., Zarco-Tejada, P., 2009. Retrieval of foliar information about plant

pigment systems from high resolution spectroscopy. Remote Sensing of Environment 113, S67–S77. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.019

Van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., van Driel, B.L., Holtslag, A.A.M., 2015. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. Building and Environment 83, 91–103. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029

Vannier, C., 2011. Analyse spatiale de structures paysagères : Identification, caractérisation et modélisation multi-niveaux, application en contexte agricole bocager. Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage, article 607. http://cybergeo.revues.org/25354 ; DOI : 10.4000/cybergeo.2535

Vapnik, V.N., 1998. Statistical Learning Theory. Wiley (Ed.), 768p, New York.

Varet, M., Burel, F., Petillon, J., 2014. Can urban consolidation limit local biodiversity erosion? Responses from carabid beetle and spider assemblages in Western France. Urban Ecosystems 17, 23-137.

Vergnes, A., Le Viol, I., Clergeau, P., 2012. Green corridors in urban landscapes affect the arthropod communities of domestic gardens. Biological Conservation 145, 171–178.

Vergnes, A., Pellissier, V., Lemperiere, G., Rollard, C., Clergeau, P., 2014. Urban densification causes the decline of ground-dwelling arthropods. Biodivers Conserv. 23,1859–1877.

Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., Morcette, J.-J., 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6s : an overview. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 35, 675–686.

Vidrih, B., Medved, S., 2013. Multiparametric model of urban park cooling island. Urban Forestry & Urban Greening 12, 220–229. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.01.002

Vilà, M., Espinar, J.L., Hejda, M., Hulme, P.E., Jarošík, V., Maron, J.L., Pergl, J., Schaffner, U., Sun, Y., Pyšek, P., 2011. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems: Ecological impacts of invasive alien plants. Ecology Letters 14, 702–708. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01628.x

Viollon, S., Lavandier, C., Drake, C., 2002. Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment. Applied Acoustics 63, 493–511. https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00053-6

Voegtle, T., Steinle, E., Tóvári, D., 2005. Airborne laserscanning data for determination of suitable areas for photovoltaics 6.

Vosselman, G., 2000. Slope based ltering of laser altimetry data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33, 678-684.

Walker, D.I., Kendrick, G.A., 1998. Threats to Macroalgal Diversity: Marine Habitat Destruction and Fragmentation, Pollution and Introduced Species. Botanica Marina 41, 8.

Wang, H.F., López-Pujol, J., 2015. Espacios verdes urbanos y diversidad vegetal a diferentes escalas espacio-temporales: el ejemplo de Beijing, China. Collectanea Botanica 34, 008. https://doi.org/10.3989/collectbot.2015.v34.008

Wang, L., Sousa, W.P., Gong, P., 2004. Integration of object-based and pixel-based classification for mapping mangroves with IKONOS imagery. International Journal of Remote Sensing 25, 5655–5668. https://doi.org/10.1080/014311602331291215

Wang, R., 2013. 3D building modeling using images and LiDAR: a review. International Journal of Image and Data Fusion 4, 273–292. https://doi.org/10.1080/19479832.2013.811124

Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wörtche, H., 2014. Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment : A literature review. Building and Environment 77, 88–100. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.021

Wang, Y.-C., Lin, J.-C., 2012. Air quality enhancement zones in Taiwan: A carbon reduction benefit assessment. Forest Policy and Economics 23, 40–45. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.07.009

Waser, L., Küchler, M., Jütte, K., Stampfer, T., 2014. Evaluating the Potential of WorldView-2 Data to Classify Tree Species and Different Levels of Ash Mortality. Remote Sensing 6, 4515–4545. https://doi.org/10.3390/rs6054515

Weber, C., Hirsch, J., 1992. Some urban measurements from SPOT data : urban life quality indices. International Journal of Remote Sensing 13, 3251-3261.

Weller, B., Ganzhorn J.U., 2004. Carabid beetle community composition, body size, and fluctuating asymmetry along an urban-rural gradient. Basic and Applied Ecology 5, 193-201.

Weng, Q., Hu, X., Lu, D., 2008. Extracting impervious surfaces from medium spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery : a comparison. International Journal of Remote Sensing 29, 3209–3232. https://doi.org/10.1080/01431160701469024

Weng, Q., 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. Remote Sensing of Environment 117, 34–49. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030

Wichmann, V., Bremer, M., Lindenberger, J., Rutzinger, M., Georges, C., Petrini-Monteferri, F., 2015. Evaluating the potential of multispectral airborne lidar for topographic mapping and land cover classification. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences II-3/W5, 113–119. https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W5-113-2015

Xiao, Q., Ustin, S.L., McPherson, E.G., 2004. Using AVIRIS data and multiple-masking techniques to map urban forest tree species. International Journal of Remote Sensing 25, 5637–5654. https://doi.org/10.1080/01431160412331291224

Xiao, Q., McPherson, E.G., 2005. Tree health mapping with multispectral remote sensing data at UC Davis, California. Urban Ecosystems 8, 349–361. https://doi.org/10.1007/s11252-005-4867-7

Xiao, R., Ouyang, Z., Zheng, H., Li, W., Schienke, E.W., Wang, X., 2007. Spatial pattern of impervious surfaces and their impacts on land surface temperature in Beijing, China. Journal of Environmental Sciences 19, 250–256. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60041-2

Xiu, N., Ignatieva, M., Bosch, C.K. van den, 2016. The challenges of planning and designing urban green networks in scandinavian and chinese cities. Journal of Architecture and Urbanism 40, 163–176. https://doi.org/10.3846/20297955.2016.1210047

Yan, J., Zhou, W., Han, L., Qian, Y., 2018. Mapping vegetation functional types in urban areas with WorldView-2 imagery: Integrating object-based classification with phenology. Urban Forestry & Urban Greening 31, 230–240. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.021

Yan, W.Y., Shaker, A., El-Ashmawy, N., 2015. Urban land cover classification using airborne LiDAR data : a review. Remote Sensing of Environment 158, 295–310. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.11.001

Yang, J., McBride, J., Zhou, J., Sun, Z., 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. Urban Forestry & Urban Greening 3, 65–78. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2004.09.001

Yang, J., 2009. Assessing the impact of climate change on urban tree species selection: a case study in philadelphia. Journal of Forestry 10.

Yang, J., He, Y., 2017. Automated mapping of impervious surfaces in urban and suburban areas: Linear spectral unmixing of high spatial resolution imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 54, 53–64. https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.006

Yuan, F., Bauer, M.E., 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. Remote Sensing of Environment 106, 375–386. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003

Zeleňáková, M., Diaconu, D.C., Haarstad, K., 2017. Urban water retention measures. Procedia Engineering 190, 419–426. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.358

Zhang, K., Hu, B., 2012. Individual urban tree species classification using very high spatial resolution airborne multi-spectral imagery using longitudinal profiles. Remote Sensing 4, 1741–1757. https://doi.org/10.3390/rs4061741

Zhang, L., Sun, X., Wu, T., Zhang, H., 2015. An analysis of shadow effects on spectral vegetation indexes using a ground-based imaging spectrometer. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 12, 2188-2192.

Zhang, X., Feng, X., Jiang, H., 2010. Object-oriented method for urban vegetation mapping using IKONOS imagery. International Journal of Remote Sensing 31, 177–196. https://doi.org/10.1080/01431160902882602

Zhao, K., Popescu, S., 2007. Hierarchical watershed segmentation of canopy height model for multi-scale forest inventory. Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning, 436–442.

Zhao, H., Li, X., Wang, X., Tian, D., 2010. Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Beijing, China. Journal of Hazardous Materials 183, 203–210. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.012

Zhou, W., Troy, A., 2008. An object-oriented approach for analysing and characterizing urban landscape at the parcel level. International Journal of Remote Sensing 29, 3119–3135. https://doi.org/10.1080/01431160701469065

Zhou, W., Huang, G., Cadenasso, M.L., 2011a. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. Landscape and Urban Planning 102, 54–63. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009

Zhou, X., Parves Rana, M., 2012. Social benefits of urban green space: A conceptual framework of valuation and accessibility measurements. Management of Environmental Quality: An International Journal 23, 173–189. https://doi.org/10.1108/14777831211204921

Zhou, W., Huang, G., Cadenasso, M.L., 2011b. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. Landscape and Urban Planning 102, 54–63. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009

Zou, X., Zhao, G., Li, J., Yang, Y., Fang, Y., 2016. 3D land cover classification based on multispectral lidar point clouds. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B1, 741–747. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-741-2016

http ://www.trameverteurbaine.com/

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Tables des illustrations

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Liste des figures

Figure 1.1 : Représentation des quatre strates de la végétation que l'on peut trouver en milieu urbain (source : Clergeau, 2013) 18

Figure 1.2 : Les trois piliers du développement durable....20

Figure 1.3 : Processus physique de régulation radiatif et thermique de la végétation 21

Figure 1.4 : Prélèvement mensuel des polluants atmosphériques par arbre pour la ville de Beijing en 2002 (Yang et al., 2005) 23

Figure 2.1 : Extrait de la base de données Corine Land Cover sur la ville de Rennes (Source : CLC2012)....31

Figure 2.2 : Extrait de la carte d'occupation des sols sur la ville de Rennes (2017) (Source : CES-OSO)....33

Figure 2.3 : Extrait de la BD Végétation sur la ville de Rennes (Source : IGN) 34

Figure 2.4 : Extrait de la base de données Open Street Map sur la ville de Rennes (Source : OSM 2018)....35

Figure 2.5 : Extrait de la base de données de l'Urban Atlas sur la ville de Rennes (EEA, 2006) 36

Figure 2.6 : Extrait de la donnée Street Tree Layer de l'urban Atlas sur la ville de Rennes 37

Figure 2.7 : Extrait de la base de données du service des espaces verts de la ville de Rennes 38

Figure 2.8 : Extrait de l'orthophotoplan sur la ville de Rennes (a) et largeur de bande de la caméra V2 (b) 40

Figure 2.9 : Extrait d'une image Pléiades sur la ville de Rennes en mode panchromatique en haut et en mode multi-spectral en bas (Kalideos, CNES) 41

Figure 2.10 : Largeur de bandes de Pléiades (Source : CNES) 41

Figure 2.11 : Largeur de bandes spectrales de Worldview II (Source : DigitalGlobe) 42

Figure 2.12 : Extrait d'une image hyper-spectrale sur la ville de Rennes (à gauche) et de signatures spectrales de matériaux qui en sont dérivées (à droite) 44

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Figure 2.13 : Volume et résolution des images drone (cercle rouge) comparés à ceux des autres données permettant d'effectuer de la reconstruction 3D (Source : Nex., 2014) 46

Figure 2.14 : Plan de vol d'une mission stéréoscopique de l'IGN ©) (a) et extraits du MNT (b) et du MNS (c) qui en sont dérivés 49

Figure 2.15 : Illustration d'une acquisition « Along track » en mode stéréoscopique (a gauche) et tristéréoscopique (à droite) (Source : CNES) 49

Figure 2.16 : Principes de fonctionnement du LiDAR (Source : OPALS - Université technique de Vienne) 51

Figure 2.17 changer la figure pour intensité élévation mnt mns 51

Figure 3.1: Cadre conceptuel de la Zone Atelier Armorique en 2017 57

Figure 3.2 : Carte de localisation du site d'étude. 58

Figure 3.3 : Rennes métropole dans le contexte national des métropoles (AUDIAR, 2015) 59

Figure 3.4 : Modèle de développement de la tache urbaine de la métropole rennaise (AUDIAR, 2015) 59

Figure 3.5 : Indice d'artificialisation de Rennes Métropole (HR imperviousness, EEA) 61

Figure 3.6 : Espaces verts entretenus par la ville de Rennes en 2015 65

Figure 3.7 : Statistiques de la répartition du végétal par quartier (AUDIAR-LETG 2014) 68

Figure 3.8 : Part des surfaces végétales par quartier (AUDIAR-LETG, 2014) ... 69

Figure 3.9 : Carte de localisation du site des prairies St martin de Rennes 70

Figure 3.10 : Présentation du site des Prairies St Martin 70

Figure 3.11 : 11 Mosaïque de photographies aériennes 71

Figure 3.12 : Cycles de stabilité et d'instabilité du site des Prairies Saint-Martin de Rennes (1900 - 2020) 72

Figure 3.13 : Acquisition Pléiades : Illustration du rapport base/hauteur (Source : CNES) 76

Figure 3.14 : Exemple d'un couple stéréoscopique Pléiades (en haut) et les produits 3D extraits en bas. 77

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Figure 3.15 : Exemple de couples stéréoscopiques de photographies aériennes (en haut) et les produits 3D extraits (en bas). 79

Figure 3.16 : Couverture et trajectographie des deux vols de la mission hyperspectrale effectuée sur le site atelier de Rennes en 2015 81

Figure 3.17 : Correction des valeurs de réflectances....82

Figure 3.18 : Extrait de variables issue des données lidar de Rennes 84

Figure 3.19 : Mesure de la précision relative des deux nuages de points dans les canaux verts et PIR....85

Figure 3.20 : Spectre de référence sur sable....86

Figure 3.21 : Carte de localisation des points de mesures spectroradiométriques 86

Figure 3.22 : Carte de localisation des points de mesures de la structure de la végétation 87

Figure 3.23 : Illustration du résultat du traitement des photographies hémisphériques....89

Figure 4.1 : Location of the study sites. Pleiades images are displayed as a true color composition (RGB)....102

Figure 4.2 : Typology of urban patterns (urban fabrics). 103

Figure 4.3 : Flowchart of the general methodology....105

Figure 4.4 : Comparison of MUAs on Rennes The MUA produced using OSM/ BD TOPO ® IGN databases and the MUA provided by the planning agency (AUDIAR). 109

Figure 4.5 : Comparison of the classified images produced in Rennes (a) RGB original image of Rennes, (b) classification map using RF, (c)) classification map using KNN, (d)) classification map using SVM....110

Figure 4.6 : Composition of urban fabrics characterized by three metrics....112

Figure 5.1 Nombre d'individus par genre référencés dans la base « arbre » de la ville (Source : Rennes Métropole)....121

Figure 5.2 Nombre d'individus des 19 espèces retenues pour cette étude....122

Figure 6.1 : Presentation of the 4 urban landscapes with combination Pleiades pan-sharpened bands (Green, Red, Near-infrared)....150

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Figure 6.2 : Example of nDSM obtained with ERDAS eATE and slope based smoothing on the University Campus. 151

Figure 6.3 : Example of texture features compute on the University Campus study site. 153

Figure 6.4 : Example of DMP on the University Campus of Rennes, France...154

Figure 6.5 : Kappa index for the 4 urban landscapes and the overall study site with different features selection....155

Figure 6.6 : Classifications on the four urban elements using four combinations of features. 156

Figure 6.7 : Commission and omission errors of high vegetation class for the 4 urban landscapes and the overall study site with different features selection 157

Figure 6.8 : Omission errors for 5 high vegetation classes with di erent features selection. 157

Figure 7.1 : Study site 165

Figure 7.2 : The work flow chart methodology 167

Figure 7.3 : Histogram of the green and NIR intensity images....168

Figure 7.4 : Classification vegetation / no vegetation based on intensity index 171

Figure 7.5 : Tree multilayer classification 173

Figure 8.1 : Carte de localisation des sites de piégeages 190

Figure 8.2 : A. Représentation schématique d'un pot-piège. B. Photos des différentes étapes de mise en place des pièges: 1 mise en place de la gaine de PVC, 2 mise en place du pilulier, 3 mise en place de l'entonnoir, 4 mise en place du toit. (D'après Croci, 2007)....192

Figure 8.3 : Extraits des 3 classifications après homogénéisation de la nomenclature sur le S10 (PSM)....195

Figure 8.4 : Zone tampon pour chaque site....195

Figure 8.5 : Illustration des calculs des métriques paysagères par zone tampon 197

Figure 8.6 : Organigramme de traitement des données....198

Figure 8.7 : Présentation des données biologiques....200

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Figure 8.8 : Représentation graphique de l'ACP réalisée sur les variables paysagères issues des cartographies réalisées à partir de données Landsat 8. A. Espace factoriel, B. Cercle des corrélations. 201

Figure 8.9: Représentation graphique de l'ACP réalisée sur les variables paysagères issues des cartographies réalisées à partir de données Spot 6. A. Espace factoriel, B. Cercle des corrélations 202

Figure 8.10 : Représentation graphique des régressions linéaires. (a) pour la richesse, (b) pour la diversité 204

Figure 8.11 : Représentation graphique de l'ACP réalisée sur les variables paysagères issues des cartographies réalisées à partir de données Worldview II. (a) Espace factoriel, (b) Cercle des corrélations..... 204

Figure 8.12 : Graphique illustrant le nombre de variables paysagères par échelle et par capteur retenu pour l'ensemble des modèles avec un ΔAICc<2 211

Figure 9.1 : Températures minimales journalières (en haut) et températures maximales journalières (en bas) pour les stations Griffon et Melesse pour l'année 2015 220

Figure 9.2 : Carte de l'ICU moyen en 2011 (Foissard, 2015) 221

Figure 9.3 : Illustration de la diversité des sites d'implantation des capteurs de température 222

Figure 9.4 : Réseau des capteurs de température implantés sur le site des PSM 222

Figure 9.5 : Températures minimales journalières pour les stations PR_6 et PR_18 pour la période Janvier-Octobre 2015..... 224

Figure 9.6 : Températures maximales journalières pour les stations PR_6 et PR_18 pour la période Janvier-Octobre 2015..... 224

Figure 9.7 : Représentation de la répartition des températures dans la nuit du 2 Novembre 2015 à 6h00 (à droite) et des températures dans la journée du 27 février 2015 (à gauche) 225

Figure 9.8 : Représentation de la répartition des occurrences de la station la plus froide (à gauche) et de la station la plus chaude (à droite) 226

Figure 9.9 : Représentation cartographique de l'intensité de l'îlot de fraîcheur des PSM pour les quatre situations d'ICU retenues..... 228

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Figure 9.10 : Représentation graphique de l'occurrence de la station la plus froide en situation d'ICU 229

Figure 9.11 : Dendrogramme de la CAH des données Δif en situation d'ICU estivale 230

Figure 9.12 : Dendrogramme de la CAH des données Δif en situation d'ICU hivernale 231

Figure 9.13 : Exemple de la correction du MNT issues des données IGN avec le lidar (a) le MNT initial, (b) le biais IGN/LIDAR, (c) le MNT corrigé 232

Figure 9.14 : Classification du nuage de points issu des données IGN 233

Figure 9.15 : Extraits des 3 classifications après homogénéisation de la nomenclature 234

Figure 9.16 : Organigramme de traitement des données 237

Figure 9.17 : Représentation graphiques des coefficients de détermination par capteur pour la situation d'ICU estivale 246

Figure 9.18 : Représentation graphiques des coefficients de détermination par capteur pour la situation d'ICU d'hiver 251

Figure 9.19 : Représentation graphiques des écart-types des coefficients de détermination, calculés sur les trois sources de données cartographiques pour la situation d'ICU moyenne d'été. 255

Figure 9.20 : Représentation graphique de la différence des R^2 issus des régressions linéaires entre les coordonnées des ACP et le Δif pour les données Lidar/IGN (à gauche) et Lidar/Pléiades (à droite) 256

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Liste des tableaux

Table 2.1: Bases de données utilisées aux échelles nationale et internationale ...30

Table 2.2 : Liste des capteurs THRS présentant un mode stéréo ou tri-stéréoscopique(Source : Panagiotakis et al., 2018) 50

Table 3.1 : Caractéristiques des données spatiales utilisées 74

Table 3.2 : Caractéristiques des données aéroportées utilisées 78

Table 3.3 Exemple d'informations présentes dans l'exif des images aériennes....78

Table 3.4 : Caractéristiques des paramètres d'acquisition de la caméra Hyspex 80

Table 3.5 : Présentation des caractéristiques du vol hyper-spectral 80

Table 3.6 : Caractéristiques des données LIDAR utilisées 83

Table 3.7 Classe de hauteur de végétation (Kent., 2012)....87

Table 3.8 : Classe de hauteur de végétation (Kent., 2012) 88

Table 4.1 : Characteristics of Pléiades images (MS –Multispectral / P – Panchromatic). 103

Table 4.2 : Nomenclature of urban objects in four level (in grey – typology used for the land cover classification). 104

Table 4.3 : Optimal segmentation parameters 107

Table 4.4 : Test of segmentation parameters 107

Table 4.5 : Classification Kappa values....109

Table 4.6 : Classification F-measures. 110

Table 4.7 : Composition of urban blocks....111

Table 4.8 : Composition of urban fabrics characterized by three metrics....112

Table 5.1 : Extrait de la base de données arbre 121

Table 5.2 : Liste des indices de végétation utilisés....125

Table 5.3 : Qualité des classifications par mode et type de classification pour chaque capteur....129

Table 6.1 : Acquisition parameters of Pleiades data. 150

Table 7.1 : Bi-spectral LiDAR Optech titan point cloud information 166

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 7.2 : Threshold of stratum of vegetation.....170

Table 7.3 : The accuracy statistics of the tree crown maps.....172

Table 7.4 : The accuracy statistics of the multilayer tree classification.....172

Table 7.5 : The accuracy statistics of the multilayer tree classification without the lowest stratum under high tree.....173

Table 8.1 : Présentation des sites de piégeages.....191

Table 8.2 : Caractéristiques des données de télédétection utilisées et typologie de l'occupation des sols associée à chaque source d'images.....194

Table 8.3 : Listes des métriques paysagères.....196

Table 8.4 : Résultats statistiques des régressions linéaires entre les indices biologiques et les valeurs propres des deux axes factoriels de l'ACP.....203

Table 8.5 : Résultats des MMI pour Landsat 8 OLI.....206

Table 8.6 : Importance des variables paysagères par variable biologique pour Landsat mesurée par MMI.....206

Table 8.7 : Résultats des MMI pour SPOT 6.....207

Table 8.8 : Importance des variables paysagères par variable biologique pour SPOT 6 mesurée par MMI.....207

Table 8.9 : Résultats des MMI pour Worldview II.....208

Table 8.10 : Importance des variables paysagères par variable biologique pour SPOT 6 mesurée par MMI.....208

Table 9.1 : Caractéristiques paysagères des stations de mesure.....223

Table 9.2 : Caractéristiques des situations d'ICU retenu.....227

Table 9.3 : Indice spectraux calculés sur le nuage de point issue des données IGN.....232

Table 9.4 : Liste des métriques paysagères.....235

Table 9.5 : Résultats statistiques des régressions linéaires entre les valeurs du Δifet les variables paysagères.....239

Table 9.6 : Résultats statistiques des régressions linéaires entre les valeurs du Δif les variables paysagères.....243

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table 9.7 : Résultats statistiques des régressions multiples entre les valeurs du Δif et les coordonnées des axes factorielles des ACP 245

Table 9.8 : Résultats statistiques des régressions multiples entre les valeurs du Δif et les coordonnées des axes factorielles des ACP 249

Table des matières

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Table des matières

REMERCIEMENTS 1

LISTE DES SIGLES ET DES ACRONYMES 4

SOMMAIRE 7

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

PREMIÈRE PARTIE : CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART 9

INTRODUCTION DE LA PREMIÈRE PARTIE 11

CHAPITRE 1 : LES ENJEUX DE LA CARTOGRAPHIE DE LA VÉGÉTATION EN MILIEU URBAIN 13

1 La végétation en milieu urbain : spécificités et caractéristiques 14
1.1 Les spécificités du milieu urbain 14
1.2 Les formes de végétation urbaine : diversité et modes de représentation 15

2 Les fonctions et services apportés par la végétation urbaine 19
2.1 Pour l'environnement 21
2.2 Pour l'homme et la société 24
2.3 Pour l'économie 26

CHAPITRE 2 : UTILISATION DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION À TRÈS HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA VÉGÉTATION EN MILIEU URBAIN 29

1 Intérêts et limites des cartes existantes 30
1.1 Les cartes issues des bases de données nationales et internationales 30
1.2 Les cartes réalisées à des échelles locales 37

2 Les données de télédétection THRS 2D 39
2.1 Du visible à l'infrarouge moyen 39

3 Les données de télédétection THRS 3D 45

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

3.1 En mode passif : les données stéréoscopiques 45
3.2 En mode actif : les données LiDAR 50

CHAPITRE 3 : SITE D'ÉTUDE ET DONNÉES 55

1 Contexte des recherches en télédétection urbaine à Rennes 56

2 Les sites d'étude 58
2.1 Le site atelier urbain 58
2.2 Rennes : La place du végétal dans la ville 63
2.3 A l'échelle locale du site des prairies St Martin 69

3 Les données 73
3.1 Les données à très haute résolution spatiale 75
3.2 Les données aéroportées 78
3.3 Les mesures au sol 85

SYNTHÈSE DE LA PREMIÈRE PARTIE 91

DEUXIÈME PARTIE : ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA RÉSOLUTION SPATIALE POUR L'ÉTUDE DE LA VÉGÉTATION URBAINE : DU MULTI-SPECTRALE AU SUPER-SPECTRALE 95

INTRODUCTION DE LA DEUXIÈME PARTIE 97

CHAPITRE 4 : EXPLOITATION DES DONNÉES À THRS MULTI-SPECTRALE 99

1 Introduction 100

2 Context of the study 101

3 Study sites and datasets 101

4 Methodology 105
4.1 Training and validation steps 106
4.2 Segmentation and classification methods 107

5 Résultats et discussions 108
5.1 Morphological Urban Area with ancillary data 108
5.2 Classification results 109

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

6 Conclusions....113

CHAPITRE 5 : COMPARAISON D'IMAGES MULTI-SPECTRALES ET SUPER-SPECTRALES POUR IDENTIFIER LES ESPÈCES D'ARBRES EN MILIEU URBAIN....115

1 Introduction....116

2 Les données....119

2.1 La base de données « arbre » de la ville de Rennes....120

2.2 Les données de télédétection....123

3 Les traitements....125

3.1 La détermination de l'importance des variables....125

3.2 La classification des variables....126

4 Résultats....127

4.1 Analyse de l'importance des variables utilisées pour classer les images....127

4.2 Les résultats des classifications....129

5 Discussions....133

5.1 Contribution des bandes spectrales à la classification des espèces d'arbres....133

5.2 Contribution des indices de végétation à la classification des espèces d'arbres....134

5.3 Comparaison des algorithmes de classification....135

6 Conclusion et perspectives....136

SYNTHÈSE DE LA DEUXIÈME PARTIE....139

TROISIÈME PARTIE : EXPLOITATION DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA VÉGÉTATION URBAINE : DE LA 2D À LA 3D....143

INTRODUCTION DE LA TROISIÈME PARTIE....145

CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DES DONNÉES MULTI-SPECTRALES STÉRÉOSCOPIQUES POUR L'ÉTUDE DE LA VÉGÉTATION EN VILLE 147

1 Introduction....149

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

2 Study area and data 149

3 Features computation 151

3.1 Normalized Digital Surface Model 151

3.2 Features based on spectral bands 151

3.3 Contextual features 152

3.4 Classification of urban vegetation 154

3.5 Reference data validation 154

4 Results and discussion 155

5 Conclusion 157

6 Discussion étendue 159

CHAPITRE 7 : ÉVALUATION DES DONNÉES LIDAR POUR L'ÉTUDE DE LA VÉGÉTATION EN VILLE 163

1 Introduction 164

2 Study area and data 165

3 Methodology 167

3.1 Pre-processing LiDAR point cloud 168

3.2 Classification of tree 169

3.3 Segmentation of tree crown 169

3.4 Multi layer classification 170

4 Results and discussion 170

4.1 Classification vegetation / non-vegetation 170

4.2 Classification tree / no tree 171

4.3 Segmentation of crown 172

4.4 Multilayer tree classification 172

5 Conclusion 174

6 Discussion étendue 175

SYNTHÈSE DE LA TROISIÈME PARTIE 179

QUATRIÈME PARTIE : INTÉGRATION DES INFORMATIONS SUR LA VÉGÉTATION DÉRIVÉES DES DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION THRS DANS DES MODÈLES ENVIRONNEMENTAUX 183

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

INTRODUCTION DE LA QUATRIÈME PARTIE..... 185

CHAPITRE 8 : APPLICATION À L'ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DES COMMUNAUTÉS DE CARABIDÉS FORESTIERS EN VILLE 187

1 Introduction..... 188

2 Site d'étude..... 190

3 Méthodologie 192

3.1 Traitement des données biologiques 192

3.2 Traitement des données géographiques 193

3.3 Les analyses statistiques 199

4 Les résultats..... 200

4.1 Organisation des communautés de carabes 200

4.2 Relation entre les indices de biodiversité et la morphologie urbaine..... 201

4.3 Relation entre les indices de biodiversité et les échelles des métriques paysagères 205

5 Discussions et perspectives..... 209

5.1 Effet du grain sur la représentation des gradients environnementaux en ville et impacts sur les communautés de carabes 209

5.2 Effet du grain sur les échelles d'analyses pertinentes pour les communautés de carabes..... 211

CHAPITRE 9 : APPLICATION À L'ÉTUDE DE LA RÉPARTITION DES TEMPÉRATURES DANS UN PARC URBAIN EN CONTEXTE D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN..... 215

1 Introduction..... 216

2 Le site d'étude 218

2.1 L'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'agglomération..... 219

2.2 Le réseau de mesures..... 221

2.3 La répartition des températures à l'échelle du site..... 223

3 Méthodologie 226

3.1 Traitements des données climatiques 226

4 Les résultats..... 238

4.1 Les analyses univariées..... 238

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

4.2 L'analyse par régression multiple 244

5 Discussions et perspectives 251

5.1 Effet de la représentation du paysage et intensité de l'îlot de fraîcheur du parc des Prairies St Martin en situation d'îlot de chaleur urbain 251

5.2 Effet de la résolution spatiale des données cartographiques sur les échelles d'analyses pertinentes pour l'étude de la répartition de l'intensité de l'îlot de Fraîcheur 254

6 Conclusion et perspectives 257

SYNTHÈSE DE LA QUATRIÈME PARTIE 261

CONCLUSION GÉNÉRALE 265

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 273

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 274

TABLES DES ILLUSTRATIONS 309

LISTE DES FIGURES 310

LISTE DES TABLEAUX 316

TABLE DES MATIÈRES 319

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Nabucet, Jean. Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain - 2018

Apport des données de télédétection à très haute résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain

Résumé : La connaissance détaillée et le suivi de la végétation urbaine représentent un enjeu important, tant pour les scientifiques qui étudient les relations paysage-écosystème, que pour les gestionnaires qui sont chargés de l'entretien et de la gestion de la végétation. Le principal objectif de cette thèse est d'évaluer l'intérêt des images à THRS pour cartographier la végétation en ville. Plus précisément, elle vise à évaluer le potentiel des images THRS sur trois composantes : la résolution spatiale, la résolution spectrale et l'altimétrie. Pour cela, nous avons traité plusieurs types de données optiques THRS acquises sur la Ville de Rennes et le Site des Prairies Saint-Martin : des images 2D multispectrales et superspectrales, des images multispectrales 2,5D et des données 3D acquises par un LiDAR bi-spectral. Dans un premier temps, nous avons évalué l'intérêt d'utiliser des images THRS 2D multispectrales pour identifier et caractériser la végétation et des images THRS super spectrales afin d'identifier les espèces végétales. Dans un second temps, nous avons évalué l'apport de données multispectrales THRS 2,5D et 3D pour cartographier les formes de végétation en milieu urbain en utilisant des variables spectrales, contextuelles et de hauteur. Dans un troisième temps, avons cherché à évaluer l'impact de l'intégration des informations sur la végétation dérivées de données de télédétection THRS dans deux modèles environnementaux, un permettant d'étudier la relation paysage-biodiversité, l'autre la relation paysage- îlot de chaleur urbain.

Mots clés: images multispectrales, images superspectrales, LiDAR, paysage urbain, biodiversité, climat urbain,

Evaluation of very high spatial resolution remote sensing data for urban vegetation mapping

Abstract: Detailed knowledge and monitoring of urban vegetation is an important issue, both for scientists studying landscape-ecosystems relationships, and for the managers who are in charge of the vegetation management. The main objective of this thesis is to evaluate the interest of THRS images to map urban vegetation. More specifically, it aims to evaluate the potential of THRS images on three components: spatial resolution, spectral resolution and altimetry. For this purpose, we processed several types of THRS optical data acquired on the City of Rennes and the Prairies Saint-Martin Site: multispectral and superspectral 2D images, 2.5D multispectral images and 3D data acquired with a bi-spectralLiDAR. Firstly, we assessed the interest of using 2D multispectral THRS images to identify and characterize vegetation and superspectral THRS images to discriminate plant species. Secondly, we assessed the contribution of THRS 2.5D and 3D multispectral data to map vegetation patterns in urban areas using spectral, contextual and height variables. Thirdly, we sought to evaluate the impact of the integration of vegetation information derived from THRS remote sensing data into two environmental models, one to study the landscape-biodiversity relationship, the other to analyze the landscape- urban cool island relationship.

Keywords: multispectral images, superspectral images, LiDAR, urban landscape, biodiversity, urban climate.

Imp. Service Reprographie - Rennes 2