

Roel Plant, Pierre Maurel, Éric Barbe et Jane Brennan (dir.)

Les terres agricoles face à l'urbanisation
De la donnée à l'action, quels rôles pour l'information ?

Éditions Quæ

Chapitre 6 - Techniques géospatiales et de télédétection pour le suivi de l'état et des dynamiques des terres agricoles périurbaines

Paras Sidiqi, Rakesh Devadas et Alfredo Huete

Éditeur : Éditions Quæ
Lieu d'édition : Éditions Quæ
Année d'édition : 2018
Date de mise en ligne : 23 février 2021
Collection : Update Sciences & Technologie
ISBN électronique : 9782759230297



<http://books.openedition.org>

Référence électronique

SIDIQI, Paras ; DEVADAS, Rakesh ; et HUETE, Alfredo. *Chapitre 6 - Techniques géospatiales et de télédétection pour le suivi de l'état et des dynamiques des terres agricoles périurbaines* In : *Les terres agricoles face à l'urbanisation : De la donnée à l'action, quels rôles pour l'information ?* [en ligne]. Versailles : Éditions Quæ, 2018 (généré le 03 mars 2021). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/quaef/28400>>. ISBN : 9782759230297.

Chapitre 6

Techniques géospatiales et de télédétection pour le suivi de l'état et des dynamiques des terres agricoles périurbaines

PARAS SIDIQI, RAKHESH DEVADAS, ALFREDO HUETE

Introduction

Depuis toujours, les sociétés humaines modifient l'environnement dans lequel elles évoluent. Des villes de plus en plus étendues, à l'échelle mondiale, accueillent actuellement plus de 50 % de la population mondiale, et ce pourcentage continue d'augmenter (DESA, 2012). L'étalement urbain rapide exerce des pressions sur les zones périurbaines et rurales environnantes, menant à la perte d'espaces et d'activités agricoles. De plus, l'urbanisation est un facteur majeur de perte de biodiversité et d'homogénéisation biologique.

Les zones périurbaines sont situées immédiatement au sortir des périphéries urbaines en expansion et sont caractérisées par une population moins dense et un nombre réduit d'infrastructures par rapport aux zones urbaines. Dans beaucoup de villes, les zones périurbaines accueillent des activités agricoles plus ou moins intensives, qui répondent aux besoins de production alimentaire locale et de sécurité alimentaire des villes avoisinantes. Ces zones peuvent même abriter, dans certains cas, l'essentiel des ressources en nourriture, en fibres et en énergie d'un pays (Verburg *et al.*, 2009). Les zones périurbaines jouent aussi un rôle important dans la préservation de la biodiversité, du patrimoine culturel et de la beauté d'une région, et ont des caractéristiques socio-économiques, politiques et écologiques uniques (Pauchard *et al.*, 2006).

Au-delà des zones périurbaines, les zones rurales comprennent des paysages naturels et des zones naturelles protégées qui constituent un réservoir de ressources pour des services et des fonctions écosystémiques vitales pour les populations périurbaines et urbaines. Ainsi, les zones périurbaines peuvent être définies comme des « zones de transition » entre les villes et les espaces ruraux, soumises à des changements rapides de leurs paysages (Pauchard *et al.*, 2006).

L'urbanisation croissante exerce une pression grandissante sur les producteurs locaux (producteurs laitiers, arboriculteurs et maraîchers) ainsi que sur d'autres types d'activités agricoles. L'étalement urbain conduit au déplacement, à la perte et à la fragmentation des terres agricoles et des espaces naturels. À leur tour, ces phénomènes perturbent les fonctions des écosystèmes, les services écosystémiques ainsi que la production agricole. De

plus, l'urbanisation croissante peut altérer les propriétés physiques d'un paysage, comme l'albédo, le bilan de rayonnement à la surface et le bilan énergétique, affectant ainsi le climat régional et global (Zhai *et al.*, 2014). La magnitude du forçage radiatif induit par le changement de couverture du sol peut aggraver l'effet d'îlot de chaleur urbain dans les villes en modifiant les températures locales.

La cartographie et le suivi des activités agricoles ainsi que d'autres activités, dans les zones périurbaines, ont principalement reposé sur des approches conventionnelles exigeant une main-d'œuvre importante et impliquant du travail de terrain et le recueil d'échantillons de données pour la préparation des cartes. Ces approches sont onéreuses et ne peuvent être répétées que tous les cinq ou dix ans. À l'inverse, les données de télédétection permettent de faire des observations synoptiques, cohérentes et reproductibles avec de l'information spatiale précise. Ces jeux de données peuvent facilement produire des informations sur les configurations et les processus de transformation des paysages ainsi que des métriques paysagères pointues (Peng *et al.*, 2007 ; Tang *et al.*, 2006).

Quarante ans d'archives d'images satellites permettent de mener une analyse historique des données pour retracer les dynamiques passées des paysages périurbains et mieux comprendre les changements des trajectoires agricoles en réponse à l'urbanisation. La télédétection offre de nombreuses possibilités de suivi des dynamiques passées, présentes et en temps réel des activités agricoles afin de mieux appréhender les processus environnementaux dans les zones périurbaines, et ainsi d'améliorer la gestion et l'aménagement du territoire.

Dans ce chapitre, nous explorons comment la télédétection et les technologies géospatiales nous permettent de cartographier et de quantifier l'urbanisation ainsi que les changements paysagers au sein des espaces agricoles dans les zones périurbaines. Les mêmes outils et images sont utilisés pour déterminer les impacts de l'urbanisation sur les terres agricoles périurbaines. L'accent est mis sur les données satellitaires disponibles publiquement et gratuitement. Ces dernières sont utilisables pour offrir des solutions durables pour une gestion et une planification plus efficaces des zones urbaines et périurbaines. Après avoir introduit brièvement les techniques disponibles et les utilisations possibles de la télédétection et des systèmes d'information géographique (SIG) pour le suivi de ces zones, nous présentons l'étude de cas de la métropole de Sydney en Australie. Nous y décrivons les utilisations possibles de la télédétection et des SIG pour la classification des terres et l'analyse historique des changements du paysage durant les vingt dernières années.

Télédétection et techniques géospatiales

La télédétection et les SIG offrent la possibilité de cartographier et de faire un suivi régional à des échelles synoptiques. « Le format numérique peut apporter des bénéfices supplémentaires, tels que des changements d'échelles simples, l'agrégation et la désagrégation, un accès facile aux statistiques et aux valeurs attributaires, ainsi que l'intégration aisée d'autres données SIG numériques » (Ridd, 1995, p. 2175).

La télédétection consiste à détecter des objets sur des surfaces terrestres et aquatiques, sans contact physique, par des mesures à distance, et à enregistrer des données au moyen de capteurs qui ne sont pas en contact avec les surfaces observées. Si l'on s'en tient à cette définition générale, l'œil humain est un exemple de système imageur de détection à distance. Le signal détecté est transmis sous la forme d'énergie électromagnétique lorsqu'il est réfléchi et/ou émis par la surface, en direction du capteur. Le résultat final est souvent une image numérique représentant la scène observée. Plusieurs étapes

de traitement et d'interprétation de l'image sont la plupart du temps nécessaires pour extraire de l'image des données et des informations de qualité suffisante. Prise au sens restreint du terme, la télédétection désigne la technologie d'acquisition d'informations à l'aide de capteurs embarqués sur des plateformes aéroportées (avions, ballons, drones) ou spatiales (satellites, navettes spatiales). Dans la section qui suit, nous présentons des capteurs de télédétection qui peuvent être utiles pour le suivi des zones périurbaines, ainsi que certaines de leurs applications.

Tableau 6.1. Exemples de satellites et de capteurs pouvant être utilisés pour l'analyse des espaces périurbains

Satellite/ capteur	Début de disponibilité des archives	Résolution spatiale au nadir ¹ (en mode multi- spectral)	Résolution temporelle à l'équateur	Applications
Open Source Data				
Série satellites NOAA/ AVHRR	1979	1,1 km	1 jour	Suivi de la température de surface (Kidder et Wu, 1987 ; Streutker, 2002)
Série satellites Landsat	1987	30 m-60 m	16 jours	Suivi des changements de la température de surface ; cartographie de la couverture du sol ; cartographie de l'albédo et de la sécheresse de la végétation (Aniello <i>et al.</i> , 1995 ; Odindi <i>et al.</i> , 2015)
ASTER	1999	15 m-90 m	16 jours	Suivi des changements de la température de surface ; cartographie de l'occupation du sol (Chrysoulakis, 2003 ; Zhu et Blumberg, 2002)
Satellites Aqua/Terra (MODIS)	2000	1 km	4 images/jour	Suivi de la température de surface et de la température de l'air ; cartographie de l'occupation du sol ; cartographie des caractéristiques des matériaux, de l'albédo et de la végétation
Sentinel-2	2015	10 m	10 jours	Détection de changements d'occupation du sol (Wang <i>et al.</i> , 2016)
Himawari 8 et 9	2016	0,5-2 km	15 minutes	Suivi des précipitations, de la température de surface de la mer, et de l'atmosphère (Kurihara <i>et al.</i> , 2016 ; Yumimoto <i>et al.</i> , 2016)
Données commerciales				
Ikonos, QuickBird, GeoEye-1, WorldView (1, 2, 3, 4)	1999	0,4-1,24 m	Programmable	Classification de l'occupation du sol urbaine ; détection d'éléments urbains, cartographie de la végétation en ville (Davis et Wang, 2002 ; Grau <i>et al.</i> , 2008)
Série satellites SPOT (5, 6, 7)	2002	6-10 m	Programmable	Occupation du sol (Durieux <i>et al.</i> , 2008)

¹ Le point le plus bas.

Données satellitaires

Les capteurs satellitaires enregistrent de l'information sur la surface terrestre, les océans et l'atmosphère dans différentes bandes spectrales pouvant aller, sur le spectre électromagnétique des longueurs d'onde, du domaine du visible jusqu'aux micro-ondes. La résolution spatiale, qui correspond à la taille du pixel, peut aller de quelques centimètres à plusieurs kilomètres, et la fréquence de revisite au-dessus d'un même point peut aller de quinze minutes à plusieurs semaines (Xie *et al.*, 2008). Pour la cartographie de la couverture et de l'occupation du sol dans les zones périurbaines, il existe une série de capteurs satellitaires à haute résolution, comme QuickBird (Grau *et al.*, 2008), Pléiades, SPOT, Sentinel-2 et Landsat. Ces capteurs permettent de faire des cartographies détaillées des états de surface. Le tableau 6.1 liste les satellites les plus utilisés pour l'étude des zones urbaines et périurbaines, ainsi que les caractéristiques de leurs capteurs, leur durée de vie, leurs résolutions, et des exemples d'applications. Cela comprend des satellites à haute résolution temporelle (journalière) tels que MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) et AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), ainsi que des satellites à très haute résolution spatiale (< 1 m) comme QuickBird, WorldView 1-4 ou Pléiades.

Bien que certaines données satellitaires soient uniquement commerciales et payantes, ces dix dernières années ont vu une augmentation importante du nombre de données satellitaires publiques et gratuites, comme les satellites Aqua/Terra, Landsat, ASTER, Himawari et Sentinel-2. Les capteurs MODIS embarqués sur les satellites Aqua/Terra offrent des données multispectrales à 36 bandes, depuis 2000 jusqu'à aujourd'hui. Le satellite Aqua passe à l'équateur à 1 h 30 et 13 h 30 heure locale, tandis que le satellite Terra passe à 10 h 30 et 22 h 30, offrant ainsi une imagerie thermique quatre fois par jour. Ces données sont particulièrement adaptées à la cartographie à des échelles macroscopiques et pour des analyses régionales de température, d'albédo, ainsi que du niveau de sécheresse de la végétation. Les produits dérivés de MODIS sont disponibles sur le site internet de la NASA²⁵. Les données Landsat, qui ont une résolution spatiale de 30 m pour les bandes optiques, de 60 m pour les bandes thermales et une résolution temporelle de 16 jours, sont disponibles sur le site internet de l'USGS²⁶. La mission Sentinel-2 est une constellation de deux satellites destinée au suivi des terres émergées, qui offre une imagerie optique à haute résolution, disponible sur le site internet de l'Agence spatiale européenne (European Space Agency, ESA)²⁷. L'Instrument multispectral (MultiSpectral Instrument, MSI) embarqué sur les satellites Sentinel-2 offre une imagerie optique avec une résolution bien plus élevée (10 m) que les séries Landsat (30 m) et peut fournir des cartes de classification des paysages avec plus de détails et de classes, permettant potentiellement d'améliorer la représentation des impacts de l'urbanisation sur les aires périurbaines environnantes.

Produits satellites et indices spectraux

La télédétection fournit des informations diverses, qui sont utiles pour délimiter et classer la végétation, le bâti, la surface terrestre et les surfaces en eau. Les indices spectraux sont des mesures biophysiques de l'état, de la structure ou de la composition de la surface d'éléments paysagers. Ces indices sont formés en additionnant, en divisant ou en multipliant des bandes spectrales pour détecter diverses caractéristiques d'absorption (ex. : pigments, minéraux, composés organiques) et faire apparaître les propriétés spécifiques

25. <https://urs.earthdata.nasa.gov/> .

26. <http://www.earthexplorer.usgs.gov/> .

27. <https://scihub.copernicus.eu/> .

de la surface terrestre, comme la végétation vivante, la neige, la végétation ligneuse ou l'eau. Le tableau 6.2 dresse la liste des indices spectraux les plus utilisés pour le suivi satellitaire des dynamiques des surfaces terrestres, et disponibles comme produits standard.

Tableau 6.2. Exemples de produits satellitaires adaptés au suivi des aires périurbaines. Les termes « Bleu », « Rouge », « Vert », « proche infrarouge » (PIR) et « infrarouge court » (IRC) indiquent les valeurs de réflectance de la surface telles que mesurées dans des bandes spectrales spécifiques, et T_B représente les températures de brillance mesurées par le satellite.

Indice spectral	Formule	Application
Indice de végétation par différence normalisée	$\text{PIR} - \text{Rouge} / \text{PIR} + \text{Rouge}$ (Rouse Jr <i>et al.</i> , 1974)	Met en valeur la végétation verte et en bonne santé
Indice de végétation amélioré	$G \times \text{PIR} - \text{Rouge} / \text{PIR} + C1 \times \text{Rouge} + C2 \times \text{Bleu} + L$ Avec $G = 2,5$, $C1 = 6$, $C2 = 7,5$ et $L = 1$ (Huete <i>et al.</i> , 2002)	Fait ressortir la végétation/la verdure. La réflectance dans le bleu est utilisée pour éliminer le signal du sol et réduire les effets atmosphériques, y compris la diffusion par les aérosols
Indice de différence normalisée du bâti	$\text{IRC} - \text{PIR} / \text{IRC} - \text{PIR}$ (Zha <i>et al.</i> , 2003)	Met en valeur les caractéristiques urbaines
Indice modifié de différence normalisée de l'eau	$\text{Vert} - \text{IRC} / \text{Vert} + \text{IRC}$ (Xu, 2006)	Met en valeur les caractéristiques des surfaces en eau tout en supprimant le bruit du bâti, de la végétation et du sol
Température de surface	$T_B / 1 + (\lambda \times T_B / c_2) \times \ln(e)$ Avec λ = longueur d'onde du rayonnement émis, et $c_2 = 0,014388$ m K (Weng <i>et al.</i> , 2004)	Permet de mesurer la température de la surface terrestre
Albédo	Radiation sortante à ondes courtes/ radiation entrante à ondes courtes	Permet d'identifier les surfaces et leurs propriétés

Les indices de végétation

Plusieurs indices de végétation fournissent des mesures quantitatives du niveau de sécheresse de la canopée. Ils portent sur la surface foliaire verte, la structure de la canopée et la teneur des feuilles en chlorophylle (Veroustraete *et al.*, 1994). L'un des indices de végétation les plus largement utilisés est l'indice de végétation par différence normalisée (*normalised difference vegetation index*, NDVI) (Tucker, 1979), dont les valeurs vont de -1 à $+1$. L'indice de végétation amélioré (*enhanced vegetation index*, EVI) est un indice de végétation « optimisé » pour améliorer le signal de la végétation grâce à une plus grande sensibilité dans les régions à forte biomasse, et pour mieux suivre l'état de la végétation en découplant le signal de fond de la canopée et en réduisant l'influence de l'atmosphère (Huete *et al.*, 1997). Les indices de végétation sont souvent utilisés pour faire un suivi des écosystèmes dans le temps et pour évaluer les stades phénologiques de la végétation.

L'albédo

L'albédo de surface, défini comme le ratio du rayonnement réfléchi sur la surface hémisphérique et du rayonnement total incident, est une grandeur sans dimension décrivant les caractéristiques du rayonnement de surface et le bilan énergétique. Les changements

de couverture du sol impactent directement l'albédo de surface, altérant ainsi le bilan énergétique et provoquant des effets climatiques à la surface (Zhai *et al.*, 2014). Dans certains cas, la magnitude du forçage radiatif causée par l'albédo peut être plus importante, à l'échelle locale, que les émissions de gaz à effet de serre, et peut ainsi déterminer le climat d'une région (Zhai *et al.*, 2014).

La température de la surface terrestre

Les bandes des capteurs satellitaires dans l'infrarouge thermique sont souvent utilisées pour évaluer les motifs spatiaux et temporels ainsi que les évolutions de la température de la surface terrestre. Les images thermiques qui représentent la température de brillance sont ensuite traitées pour obtenir des valeurs de température de la surface terrestre à partir d'estimations de l'émissivité (Kalma *et al.*, 2008 ; Weng *et al.*, 2004).

L'indice modifié de différence normalisée de l'eau

Les bandes sensibles à l'eau se situent dans la plage spectrale de l'infrarouge à courte longueur d'onde qui est absorbé par l'eau. Elles peuvent être utilisées pour identifier sur les images satellitaires les surfaces en eau et les surfaces inondées. L'indice modifié de différence normalisée de l'eau est souvent utilisé pour aider à la classification des pixels d'eau, mais il peut aussi servir à masquer les surfaces en eau avant une classification de l'occupation du sol (Xu, 2006).

Analyse et cartographie de l'occupation du sol

Dans cette partie, nous présentons des techniques géospatiales et de télédétection utilisées pour la classification des paysages. Les utilisations possibles de ces techniques pour cartographier, faire le suivi et mieux comprendre les dynamiques des surfaces terrestres dans les zones périurbaines, seront illustrées à partir de l'étude de cas de Sydney en Australie.

Les cartes de couverture du sol donnent des informations sur les surfaces couvertes en forêts, en zones humides, en zones imperméabilisées, en zones de végétation ou tout autre élément présent à la surface terrestre. Les cartes d'occupation du sol fournissent quant à elles des informations sur les activités (ou l'absence d'activités) humaines, comme les activités commerciales, résidentielles, agricoles et d'élevage ou les zones de friches dans les zones périurbaines. Les cartes des fonctions des terres intègrent quant à elles davantage d'informations locales fournies par les propriétaires, afin de développer des cartes détaillant l'état et les dynamiques des surfaces terrestres. Les cartes de couverture ou d'occupation du sol à différentes échelles peuvent être utilisées pour mettre et maintenir à jour les informations, et ainsi permettre une meilleure gestion et planification des activités agricoles dans les zones périurbaines. Diverses techniques ont été utilisées par les chercheurs, comme les classifications d'occupation du sol basées sur l'imagerie multispectrale (Atkinson, 2005 ; Dougherty *et al.*, 2004), l'analyse sub-pixellaire des mélanges spectraux (Weng, 2001 ; 2002 ; Wu *et al.*, 2005), ainsi que des méthodes plus perfectionnées reposant sur l'apprentissage machine, les réseaux neuronaux et les classifications orientées objet (Yang *et al.*, 2003).

La classification multispectrale

Les outils de télédétection et les SIG peuvent être utilisés pour mieux comprendre et définir les limites des zones urbaines, périurbaines et rurales. Les données satellitaires peuvent servir à catégoriser les paysages en fonction du type de couverture ou d'occupation du sol, à l'aide de techniques de classification d'image. La classification multispectrale peut être décrite comme permettant la catégorisation d'images de la surface

terrestre en différents groupes de couverture et d'occupation du sol, grâce à l'utilisation des propriétés de certaines bandes spectrales. Ce type de classification est la façon la plus simple d'utiliser la télédétection pour classer des surfaces n'ayant qu'une caractéristique : chaque pixel dans une image appartient à une classe particulière, afin de produire une carte finale avec un nombre donné de catégories. Ces méthodes de classification numérique présentent l'avantage d'être reproductibles dans le temps et dans l'espace et de pouvoir faire l'objet de vérifications de terrain.

Il existe deux principaux types de méthodes de classification d'image, l'une appelée « classification non supervisée » et l'autre « classification supervisée ». La classification non supervisée implique la sélection initiale de groupes de pixels sur la base des propriétés spectrales de l'image numérique pour ensuite affecter chaque groupe de pixels à différentes classes de couvertures du sol. Cette approche permet de classer les pixels sans qu'il soit nécessaire d'établir au préalable la liste et les intitulés des classes d'occupation du sol et leurs noms.

À l'inverse, la classification supervisée est basée sur la connaissance préalable des classes d'occupation du sol présentes sur une image. Par conséquent, la classification est dite « guidée » ou « supervisée ». Avec cette méthode, les pixels sont regroupés dans différentes classes d'occupation du sol sur la base d'échantillons. Ces échantillons sont générés en dessinant des zones d'intérêt sur l'image pour que chaque type d'occupation du sol étudié puisse être identifié. L'établissement de ces classes présélectionnées est basé sur des informations et des connaissances recueillies au préalable sur le terrain à l'aide, par exemple, de photographies aériennes, de cartes, d'images Google Earth ou encore d'une analyse spectrale des images à classer.

Les informations sur les surfaces végétales et non végétales obtenues en se servant de l'indice de végétation amélioré ou de l'indice de végétation par différence normalisée peuvent aussi être intégrées au processus de détermination des classes. D'autres caractéristiques de l'image comme le ton, la couleur, la texture et la forme peuvent également être prises en compte pour définir les attributs des différentes occupations du sol. Des couleurs et des intitulés différents sont alors attribués aux différentes classes durant l'analyse et constituent la légende de la carte. Les classes ainsi générées peuvent ensuite être regroupées dans des classes plus générales selon la nature des applications pour lesquelles les cartes ont été produites. Il existe différents algorithmes de classification, tels que le maximum de vraisemblance, la distance minimale ou l'approche par parallélépipède, le plus utilisé étant cependant le maximum de vraisemblance. Pour plus d'informations sur les méthodes de classification, il est possible de se référer à l'ouvrage *Remote Sensing and Image Interpretation*, de Lillesand *et al.* (2014).

L'analyse linéaire des mélanges spectraux

Une autre approche de classification repose sur l'hypothèse que la plupart des pixels sur une image satellite contiennent des signatures spectrales mélangées appartenant à deux catégories d'occupation du sol ou plus. Par exemple, un pixel peut contenir à la fois du sol nu et des plantes, ou un toit de maison avec des arbres. Cette méthode de classification d'occupation des sols sur des pixels mélangés est appelée « analyse linéaire de mélange spectral » (Garcia-Haro *et al.*, 1996).

L'analyse linéaire de mélange spectral est une méthode de traitement d'image basée sur la physique du signal qui considère le spectre mesuré par un capteur d'image comme étant une combinaison linéaire des spectres de tous les composants à l'intérieur d'un pixel. Les résultats obtenus sont des images fractionnaires qui représentent la quantité de chaque composant dans l'image. Cette méthode modélise la réflectance de chaque pixel

comme une combinaison linéaire de la réflectance de chaque composant présent dans le pixel. Dans cette approche, le calcul des images fractionnaires se fait en plusieurs étapes : traitement de l'image d'origine, choix des composants des pixels, opération de démélange linéaire et évaluation des images fractionnaires obtenues. De toutes ces étapes, le choix des composants les plus appropriés est la plus critique pour obtenir des images fractionnaires de bonne qualité.

Dans les études urbaines, cette technique est souvent utilisée pour classifier et quantifier les zones imperméabilisées qui empêchent l'infiltration de l'eau comme par exemple les rues, les routes, les parkings, les trottoirs et les bâtiments (Hu et Weng, 2009). Généralement, trois types de composants sont identifiés au départ sur une image multispectrale : la végétation chlorophylliennement active, les sols et les infrastructures urbaines (surfaces bétonnées, parkings, bâtiments/immeubles, maisons, aéroports, etc.) (Hu et Weng, 2009). La classe « végétation » peut être caractérisée à partir de zones d'herbe dense ou de pâture ; la classe « sols » à partir de parcelles en sol nu parmi les terres agricoles ; et les différents types de surfaces bâties (résidentielles et non résidentielles) à partir de toits de bâtiments, de pistes de décollage d'aéroports ou de croisements de routes principales. Le résultat du démélange est une série d'images montrant l'abondance fractionnaire dans chaque pixel d'un type d'occupation du sol donné (Garcia-Haro *et al.*, 1996). Afin d'arriver à la meilleure qualité possible d'images fractionnaires pour l'estimation des surfaces bâties et des éléments de végétation, différentes combinaisons de composants sont souvent examinées et comparées.

Autres méthodes

Il existe d'autres approches de cartographie et de suivi de l'occupation du sol, telles que la classification par régression sous pixels (Song *et al.*, 2005), la classification par réseau neuronal (Civco et Hurd, 1997), les régressions multiples (Bauer et Curran, 2005) ou encore les classifications orientées objet (Blaschke, 2010). Dans les classifications orientées objet, les pixels sont regroupés en objets homogènes résultant d'une segmentation des images. Cette méthode mène à la création d'objets à différentes échelles qui représentent différents éléments de l'image. Pour plus d'informations sur les classifications orientées objet, il est possible de se référer à l'ouvrage de Blaschke *et al.* (2008) intitulé *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*.

La fragmentation des paysages

La fragmentation des paysages correspond au fractionnement et à la perte de connectivité de zones d'occupation du sol contiguës, liés soit à des processus perturbateurs, soit à certaines pratiques d'usage du sol (Saunders *et al.*, 1991). La fragmentation de zones de végétation endémique a des impacts significatifs sur le fonctionnement des écosystèmes et sur la diversité biologique et paysagère (Fahrig, 2003). La caractérisation détaillée des formes de l'étalement urbain et de la fragmentation qui l'accompagne dans les zones périurbaines a progressé du fait de l'accessibilité croissante à des données spatiales et du développement de métriques spatiales adaptées de l'écologie du paysage (Kane *et al.*, 2014 ; Turner *et al.*, 1989). Les métriques paysagères sont dérivées de l'analyse de cartes thématiques-catégorielles qui, dans un premier temps, divisent le paysage étudié en taches de pixels contigus d'une même classe, puis utilisent cette information pour quantifier différents motifs paysagers (Kane *et al.*, 2014). Les métriques spatiales communément utilisées incluent : le nombre de taches (densité des taches), la superficie totale des taches ; la densité des bordures (somme de toutes les longueurs des côtés des taches divisée par la superficie totale du paysage) ; la richesse des taches, des métriques, des

formes et des bordures ; ainsi qu'un indice d'agrégation (He *et al.*, 2000). Il a été prouvé que la surface totale des taches est étroitement liée aux questions de sécurité alimentaire et de durabilité (Su *et al.*, 2011).

Pour quantifier l'étendue et le degré de fragmentation du paysage, la composition ainsi que la configuration des composants doivent toutes deux être prises en compte (Munroe *et al.*, 2005 ; Neill *et al.*, 1997). Le nombre de taches et leur densité sont un indice de l'hétérogénéité spatiale du paysage. La diminution au cours du temps de la densité des taches de végétation native révèle généralement une réaffectation de l'occupation du sol, tandis qu'une augmentation de la densité de ces taches traduit une fragmentation de l'occupation du sol au sein d'une même zone (Schneider et Woodcock, 2008). L'indice de diversité de Shannon est un exemple de métrique de diversité. Cet indice est basé sur les informations contenues dans chaque type de tache (Saunders *et al.*, 1991).

L'indice d'agrégation constitue un indicateur global de l'étendue des modifications subies par un paysage du fait de perturbations telles que l'urbanisation (Su *et al.*, 2011). Cet indice est calculé sur la base d'une matrice de contiguïté des taches qui donne la fréquence avec laquelle des paires de taches de types différents se retrouvent côte à côte sur la carte, et quantifie ainsi le degré d'isolement ou de fragmentation d'un type d'occupation du sol (Ji *et al.*, 2006). Le tableau 6.3 donne les formules des métriques paysagères les plus importantes. Lorsque l'on utilise des données satellites d'occupation du sol ou d'autres jeux de données géospatiales, l'indice d'agrégation, le nombre de taches (densité des taches) et la superficie totale peuvent être calculés facilement à l'aide du programme Fragstats dans le logiciel QGIS (McGarigal et Marks, 1995).

Tableau 6.3. Les métriques paysagères et leurs formules, telles que définies dans le programme Fragstats sur QGIS (McGarigal et Marks, 1995).

Métriques paysagères	Formules
Nombre de taches	n_i n_i = nombre de taches de classe i dans le paysage
Surface totale	$A \times (1/1\ 000)^2$ Avec A = surface totale du paysage (m^2)
Indice d'agrégation	$100 \times (g_{ii}/\max - g_{ii})^2$ Avec g_{ii} = nombre d'adjacences similaires entre pixels d'une classe de type i , et $\max - g_{ii}$ = nombre d'adjacences similaires entre classes de type i

Étude de cas : Sydney, Australie

En Australie, 89 % de la population vit en zone urbaine, et il est prévu que cette part atteigne 93 % en 2050. La population australienne est de plus en plus concentrée dans les cinq plus grandes villes du pays : Sydney, Melbourne, Brisbane, Perth et Adelaïde (Cleugh *et al.*, 2011), Sydney totalisant à elle seule 20 % de la population. Les zones périurbaines ou rurales dans la zone métropolitaine de Sydney sont d'une importance cruciale, car elles jouent un rôle vital dans l'agriculture australienne. D'après le Département des industries du secteur primaire de Nouvelle-Galles du Sud et le Bureau australien du recensement statistique agricole, 7 % de la production agricole de l'État de Nouvelle-Galles du Sud provient de la région de Sydney. Les rapports montrent également qu'environ la moitié de la valeur de la production maraîchère de Nouvelle-Galles du Sud provient de la région de Sydney.

Nous allons présenter ci-après une étude de cas des dynamiques des paysages périurbains qui entourent Sydney. Cette étude explore les changements d'usage et d'occupation du sol survenus durant les vingt dernières années, ainsi que les taux de fragmentation et les changements des propriétés de la surface des terres au cours du temps. Le but est de montrer comment plusieurs applications de télédétection et de SIG, telles que présentées plus haut, peuvent être utilisées pour le suivi et la cartographie des zones périurbaines.

Données et zone d'étude

Nous utilisons deux jeux de données, à savoir des images Landsat corrigées des effets atmosphériques et rectifiées géométriquement, et des images Sentinel-2 traitées avec le module d'extension de classification semi-automatique du logiciel QGIS. Des traitements supplémentaires ont été réalisés sur les logiciels ArcGIS, Microsoft Excel et RStudio.

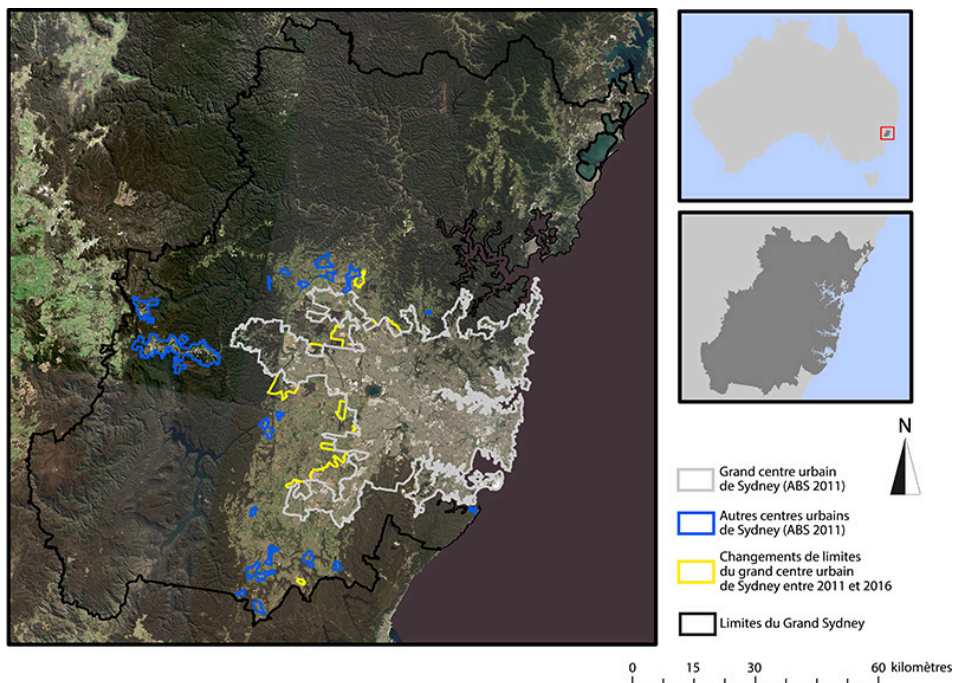


Figure 6.1. Région de Sydney couverte par deux images Landsat-8 respectivement acquises les 8 et 15 septembre 2017. Les polygones en noir et en gris désignent respectivement les limites de la région de Sydney et les limites de la partie urbaine de Sydney (ABS, 2011 ; 2016). Les polygones bleus représentent les zones urbaines à faible densité, tandis que les polygones jaunes représentent les zones urbaines créées entre 2011 et 2016.

La figure 6.1 montre la zone d'étude (région de Sydney) observée par le capteur OLI de Landsat-8 en septembre 2015 avec, en superposition, les limites administratives de la région de Sydney établies par le Bureau australien de statistiques, pour les recensements de 2011 et 2016. La couche correspondant aux limites urbaines a été créée en se basant sur le critère suivant : la densité de population doit être supérieure à 4 personnes par hectare pour qu'une zone soit considérée comme urbaine (ABS, 2016). Cette couche a été produite à partir des données du recensement de population le plus récent, datant de 2016, et est dérivée des données sur la population et le logement (ABS, 2016). Le

Bureau australien des statistiques définit les centres urbains et les localités en fonction de la concentration des développements urbains et de la population. Cet organisme qualifie de « grands centres urbains » les localités de plus de 100 000 habitants, d'« autres centres urbains », celles avec une population comprise entre 1 000 et 100 000 habitants, et de « rurales », celles de moins de 1 000 habitants (ABS, 2016).

La figure 6.1 montre les limites des « grands centres urbains » et des « autres centres urbains », respectivement en gris et bleu, établies à partir du recensement de la population et du logement de 2011. Les traits jaunes représentent les changements des limites des « grands centres urbains » entre 2011 et 2016. Une portion de cette image a été sélectionnée pour faire des analyses plus poussées sur une zone périurbaine de la région de Sydney (figure 6.2).

La figure 6.3 montre l'influence de la résolution spatiale des images sur la perception de l'occupation du sol. Des extraits d'images Sentinel-2 à 10 m de résolution sont comparés aux images Landsat-8 à 30 m de résolution sur une zone de transition entre l'urbain (sous-zone II) et le périurbain (sous-zone I) dans l'ouest de Sydney.

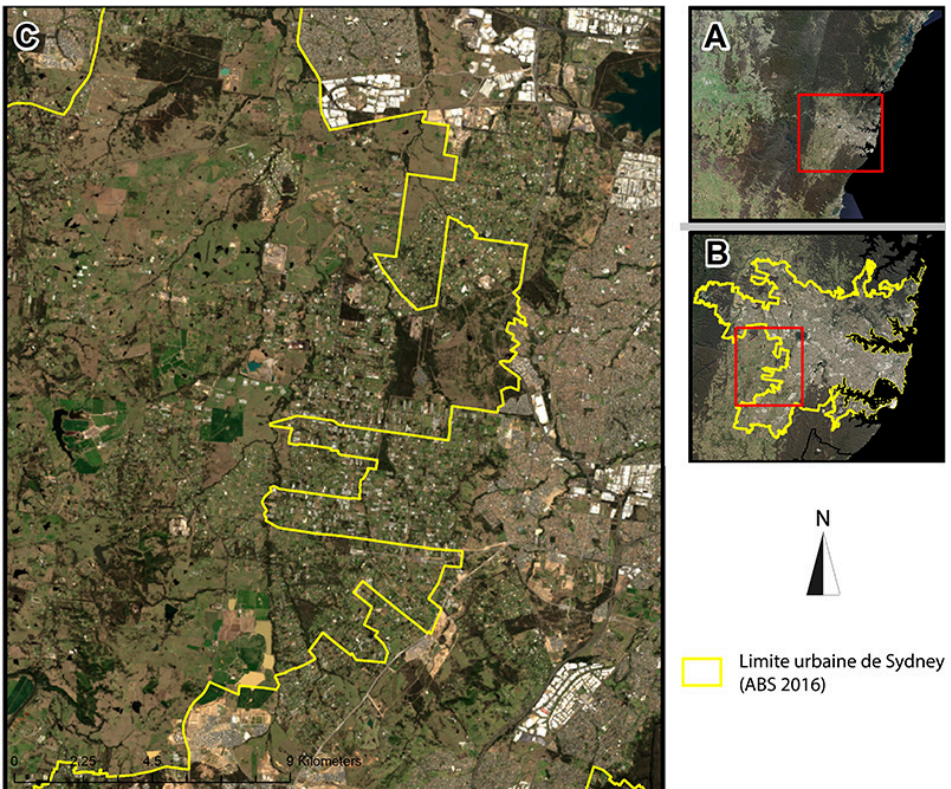


Figure 6.2. Exemple de transition entre l'urbain et le périurbain sur une zone test. La partie A montre la mosaïque des deux images Landsat-8 du 8 et du 15 septembre 2017. Le polygone rouge de la partie A correspond à la sous-zone urbaine et périurbaine de Sydney représentée dans la partie B ; celui de la partie B correspond à la zone périurbaine étudiée dans ce chapitre et agrandie dans la partie C.

La résolution spatiale plus fine proposée par l'imagerie Sentinel-2 (figures 6.3C et 6.3E) fournit plus de détails que les images Landsat et donc plus de possibilités pour catégo-

riser différents composants présents sur le terrain (figures 6.3B et 6.3D). Sur ces images, les structures urbaines apparaissent en blanc, avec un albédo élevé, alors que les prairies et les cultures ressortent en vert et prennent des formes géographiques variées. Les prairies ainsi que d'autres composants du paysage apparaissent plus nettement sur les images Sentinel-2 du fait de la meilleure résolution spatiale (figure 6.3C). Les deux types d'images sont disponibles en accès libre. Les images Landsat, quoique plus grossières, sont disponibles depuis les années 1980, alors que le premier satellite Sentinel-2, offrant des données plus fines, n'a été lancé qu'en 2016. Les deux constituent d'excellents moyens pour mieux comprendre les impacts sur l'agriculture des pressions exercées par une croissance urbaine très dynamique.

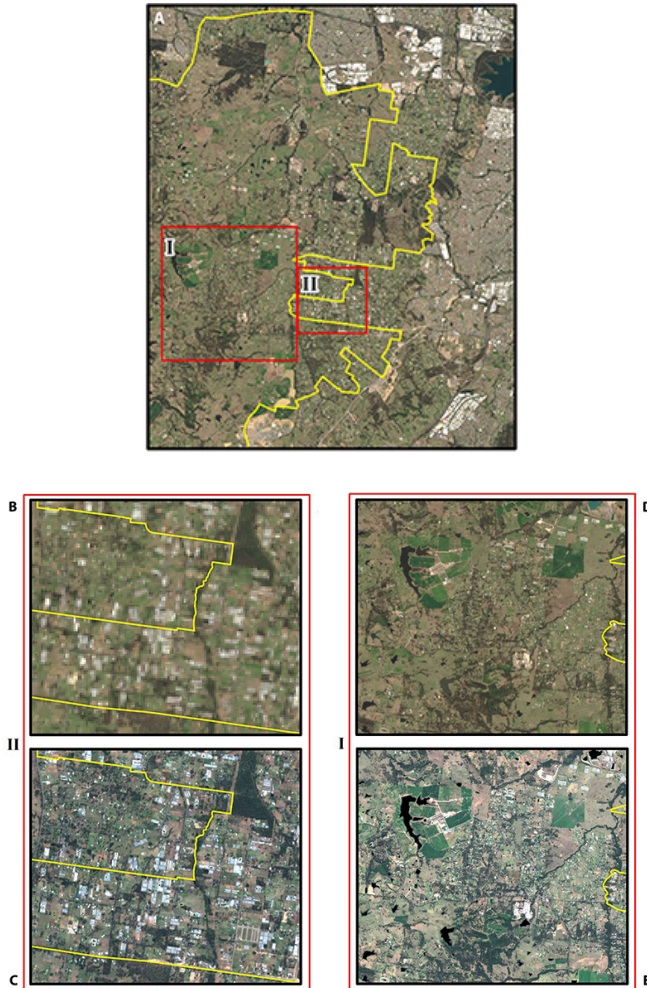


Figure 6.3. (A) Image Landsat-8 (8 septembre 2015) avec deux sous-zones en rouge (I : espace périurbain ; II : espace urbain) ; (B) image Landsat-8, sous-zone I ; (C) image Sentinel-2, sous-zone I ; (D) image Landsat-8, sous-zone II ; (E) image Sentinel-2, sous-zone II.

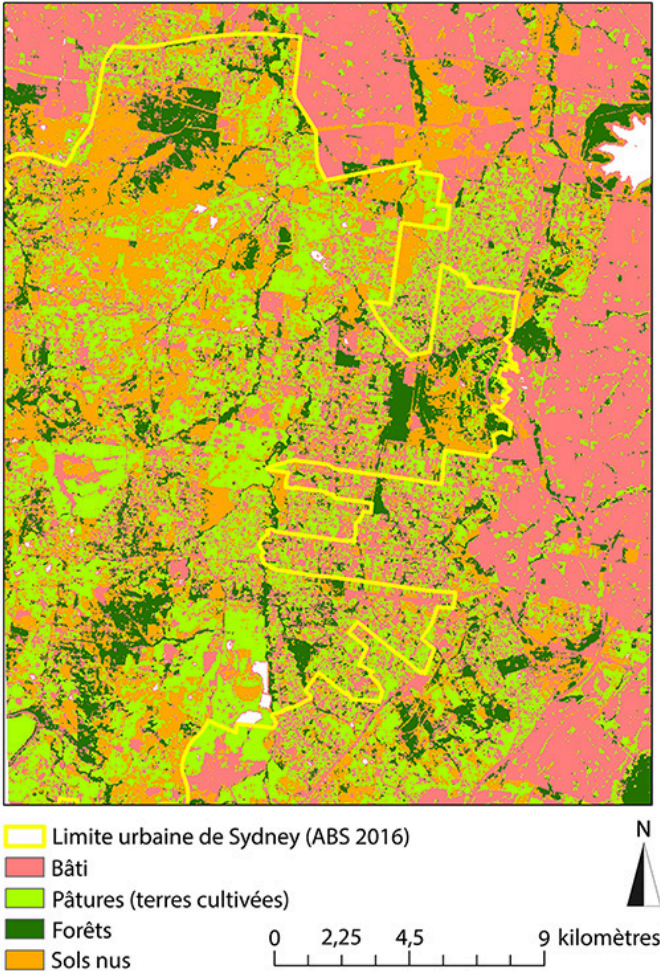


Figure 6.4. Classification multispectrale par maximum de vraisemblance d'une image Landsat-8 (8 septembre 2015) sur une zone de transition périurbaine (partie ouest de Sydney).

La classification multispectrale des zones périurbaines

Des classifications multispectrales par maximum de vraisemblance à partir des jeux de données Landsat-8 et Sentinel-2 ont été faites pour produire des cartes d'occupation du sol de la région de Sydney. La figure 6.4 montre la classification obtenue sur la zone de transition périurbaine sélectionnée à partir des images Landsat-8. Quatre classes principales ont été distinguées : bâtis, pâtures (terres cultivées), sols nus et forêts.

L'application aux images Sentinel-2 d'une classification similaire sur la même zone de transition périurbaine a permis de distinguer sept classes principales (figure 6.5) : pâtures, terres cultivées, sols nus, forêts, routes, zones résidentielles et zones commerciales. Ces résultats confirment l'intérêt de la meilleure résolution spatiale de Sentinel-2 pour distinguer plus de classes d'occupation du sol.

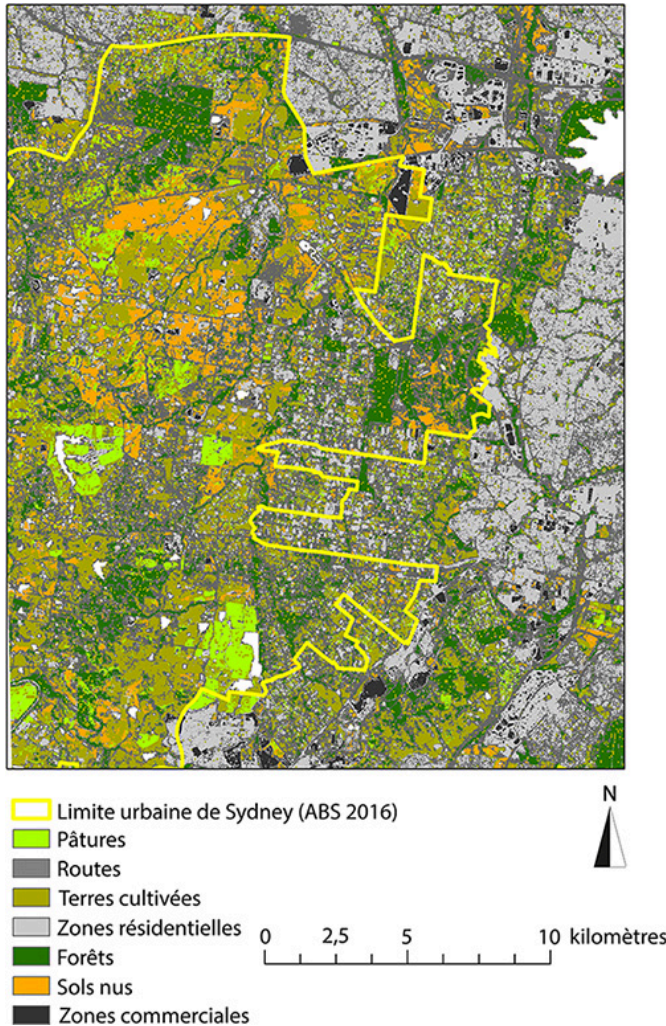


Figure 6.5. Classification multispectrale par maximum de vraisemblance d'une image Sentinel-2 (23 août 2017) sur une zone de transition périurbaine (partie ouest de Sydney).

La détection de changements entre 1989 et 2013 par analyse d'images Landsat

Les changements d'usage et d'occupation du sol

Des images Landsat-5 et Landsat-8 acquises à différentes dates (27 septembre 1987, 10 octobre 1993, 9 octobre 1998, 9 octobre 2003, 18 septembre 2008 et 18 septembre 2013) ont été utilisées pour retracer les changements dynamiques et historiques d'occupation et d'usage du sol. Les principales classes identifiées ont été : forêts, sols nus, pâtures/terres cultivées et zones urbaines.

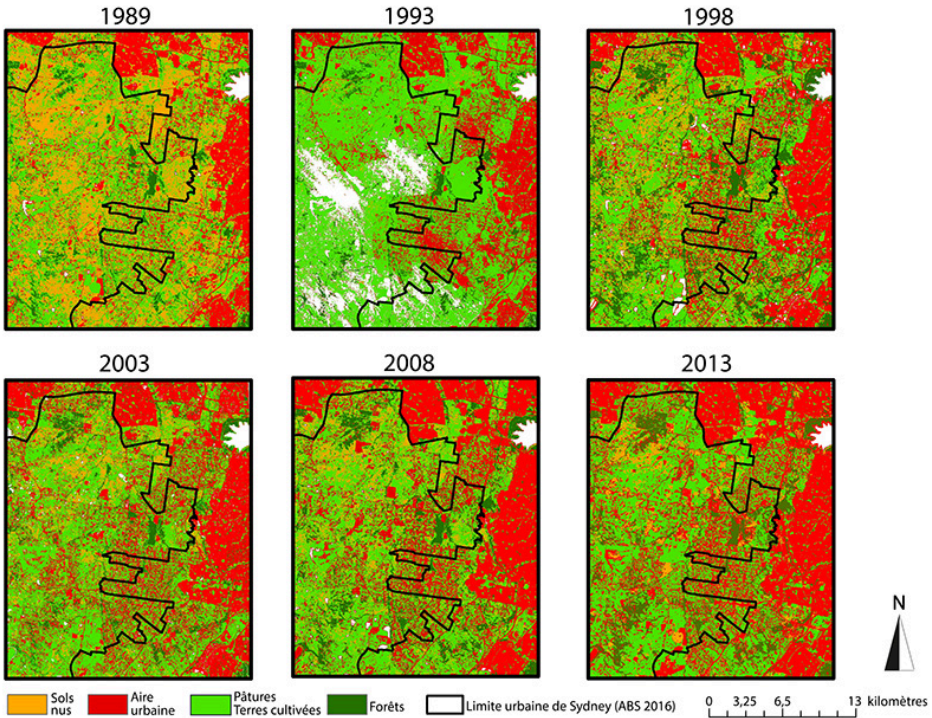


Figure 6.6. Série de classification d'images Landsat (5 et 8) sur vingt-cinq ans (1989 à 2013) montrant les changements d'occupation du sol dans la zone de transition périurbaine de Sydney.

La figure 6.6 montre que la zone périurbaine de Sydney Ouest a connu des changements très dynamiques de l'occupation du sol entre 1989 et 2013. L'étalement urbain est clairement visible dans l'expansion vers l'ouest de la zone urbaine de Sydney. La classe « sols nus » correspond aux terres arables ou à des zones ouvertes qui n'avaient pas de couvert végétal au moment où les images ont été acquises. L'analyse de cette séquence d'images révèle une augmentation générale des zones bâties et une diminution des terres agricoles (pâtures et terres cultivées) (figure 6.7). En surface, les zones urbaines ont progressé de 38 % à 50 % sur vingt-cinq ans, alors que les activités agricoles dans les zones périurbaines ont baissé de 35 % à 25 %. En revanche, peu de changements ont été observés dans la classe « forêts ». La croissance des zones urbaines impacte donc surtout les zones périurbaines où se développent la plupart des activités agricoles. La poursuite de l'urbanisation amènera, *in fine*, à la disparition de zones périurbaines, à une pression accrue sur les forêts naturelles et les espaces ruraux, et à d'autres types de changements environnementaux.

La fragmentation des paysages

La fragmentation des paysages sur vingt-cinq ans a été analysée à l'aide de métriques paysagères appliquées à des cartes d'occupation du sol faites à partir d'images Landsat de 1989 et 2013. Un échantillonnage concentrique a été utilisé le long d'un transect urbain/périurbain allant du centre-ville de Sydney jusqu'à l'extérieur de la ville. Cet échantillonnage est constitué de cercles allant de 10 à 60 km de rayon et espacés de 10 km (figure 6.8). Plusieurs métriques paysagères ont ensuite été calculées pour six zones

échantillons, situées respectivement dans le cercle central et dans les cinq intervalles de 10 km de large (10 à 20 km, 20 à 30 km, 30 à 40 km, 40 à 50 km et 50 à 60 km).

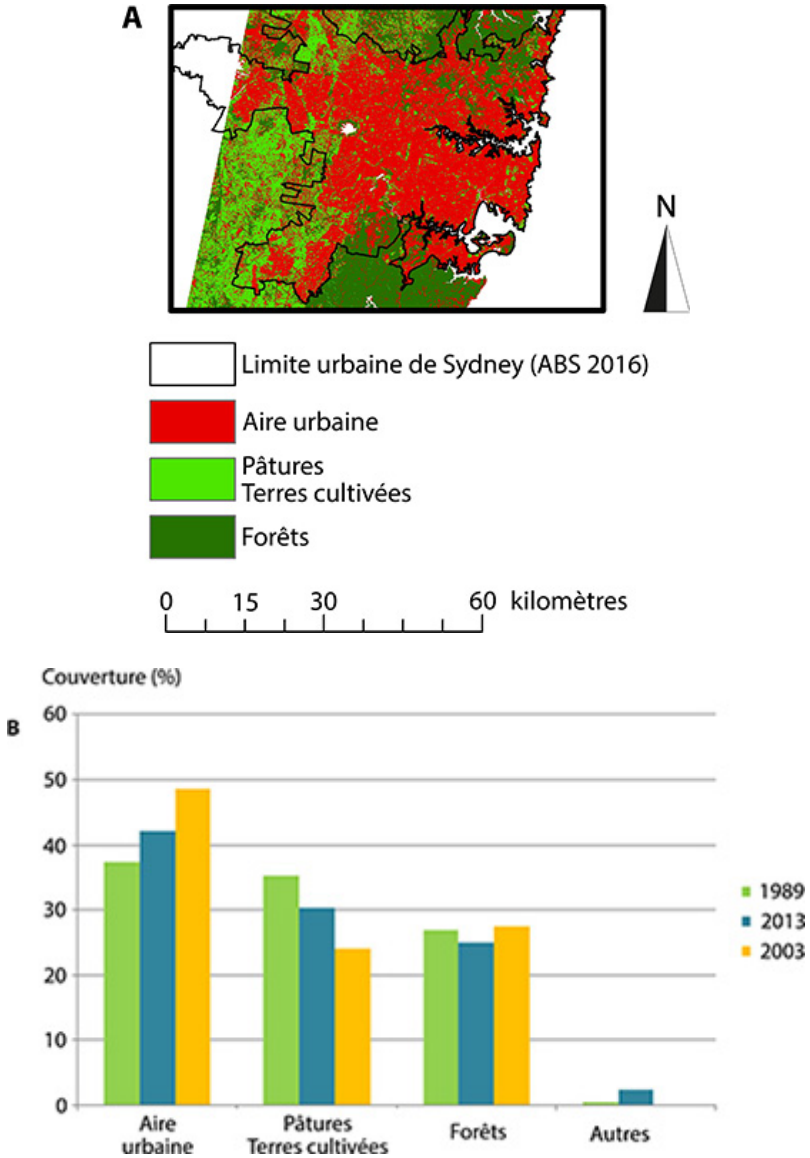


Figure 6.7. Dynamique des changements d'occupation du sol dans la région de Sydney entre 1989 et 2013. (A) Localisation de la zone d'étude ; (B) Évolution en % des surfaces de quatre classes d'occupation du sol entre 1989, 2003 et 2013.

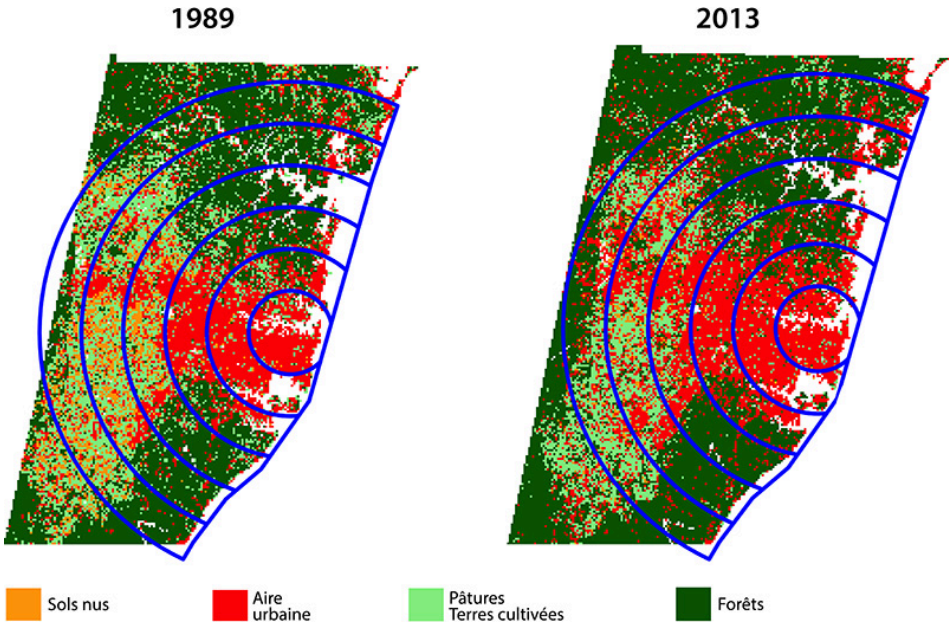


Figure 6.8. Échantillons en cercles concentriques sur une image de couverture du sol Landsat de 1989 (A) et 2013 (B). Les cercles bleus sont dessinés tous les 10 km à partir du centre-ville de Sydney.

L'analyse montre que sur l'ensemble des zones échantillons, le nombre de taches de pâtures/terres cultivées était plus élevé en 2013 qu'en 1989, alors que le nombre de taches urbaines a diminué sur la même période (figure 6.9). Le nombre de taches urbaines dans le cercle externe était plus élevé en 1989, indiquant l'agrégation de zones urbaines à l'extérieur de Sydney et la formation de taches urbaines plus grandes (figure 6.9A). L'augmentation de la densité des taches de pâtures/terres cultivées entre 1989 et 2013 indique la nature de plus en plus épars et fragmentée du paysage. La plus faible densité des taches représentant les zones urbaines en 2013 traduit une diminution du caractère épars du développement urbain et suggère l'urbanisation des zones interstitielles au fil du temps. Ainsi, les zones périurbaines périphériques, autrefois utilisées pour des activités agricoles, ont été progressivement converties en espaces urbains (figure 6.9A). Les résultats montrent aussi que le caractère épars des zones urbaines est peu présent près du centre-ville et qu'elles deviennent moins denses et plus fragmentées lorsque l'on s'éloigne du centre-ville (figure 6.9A). Les surfaces urbanisées ont globalement augmenté dans tous les échantillons entre 1989 et 2013, alors que celles en pâtures/terres cultivées ont diminué (figure 6.9B). Ceci indique une augmentation de l'isolement et de la fragmentation de la classe pâtures/terres cultivées au fil du temps. Enfin, l'index d'agrégation démontre que la perte globale de pâtures/terres cultivées est déterminée par l'urbanisation progressive (figure 6.9C). Ces métriques paysagères fournissent des analyses précieuses concernant l'impact du développement urbain sur l'agriculture périurbaine et constituent autant d'opportunités pour leur gestion durable.



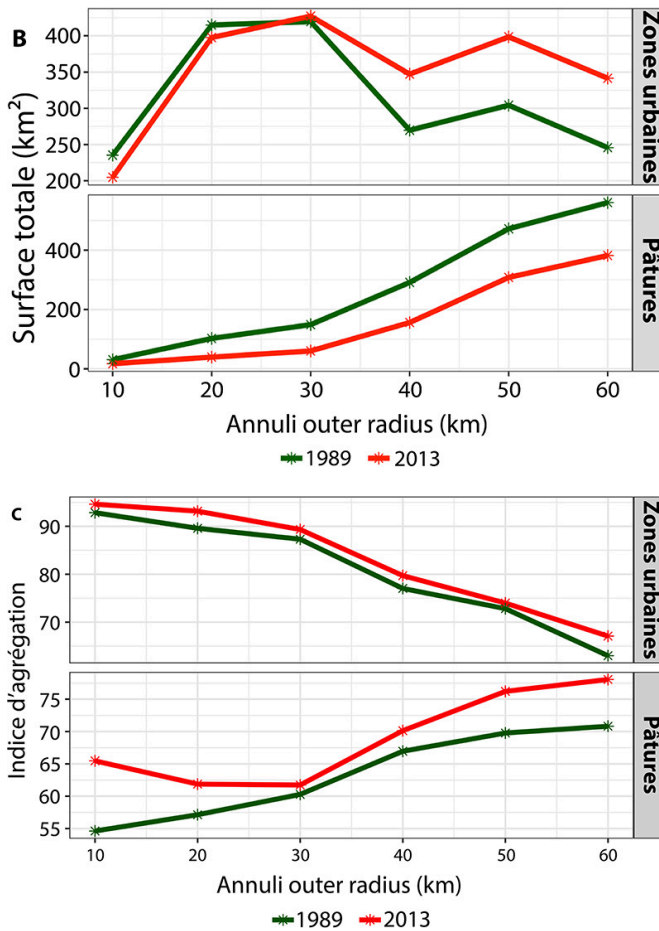


Figure 6.9. Changements dans la fragmentation du paysage entre 1989 et 2013 dans les différents cercles concentriques du transect d'échantillonnage. (A) nombre de taches en zones urbaines et en pâtures ; (B) surface totale des zones urbaines et de pâtures ; (C) indice d'agrégation mesurant la fragmentation.

L'analyse linéaire de mélange spectral

Les méthodes d'analyse linéaire de mélange spectral appliquées aux images multispectrales permettent de déterminer la proportion de chaque type d'occupation du sol à l'intérieur d'un pixel. Ces méthodes ont été appliquées à des données Landsat pour cartographier des indicateurs urbains, dont le pourcentage de surface en zones imperméables (% ISA, *impervious surface area*), et mesurer leur évolution au fil du temps (Hu et Weng, 2009). L'indicateur % ISA est particulièrement important pour la modélisation du ruissellement des eaux et des inondations en milieu urbain. Il peut aussi être utilisé pour distinguer les zones urbaines des zones périurbaines et rurales grâce à des mesures de l'étendue des infrastructures. Différents seuils ont été utilisés pour cartographier la limite entre l'urbain et le rural sur la base de l'indicateur % ISA. Par exemple, Yuan et Bauer (2007) ont utilisé des seuils d'ISA $\geq 25\%$ pour définir la classe « urbain », $< 25\%$ pour la classe « autre urbain » et $< 5\%$ pour la classe « rural ».

Nous avons appliqué cette technique d'analyse linéaire de mélange spectral à l'image Landsat-8 pour produire une carte de l'indicateur % ISA pour la région de Sydney

(figure 6.10). Nous avons défini les zones urbaines et les banlieues comme ayant un ISA > 12 %, et les zones rurales comme ayant un ISA < 12 %. Nous avons trouvé des similarités entre nos résultats et les cartes des limites urbaines développées par le Bureau australien des statistiques (figure 6.10). Toutefois, les cartes basées sur l'ISA ont fourni des informations supplémentaires sur le développement urbain en lien avec la densité de population, et nous avons localisé plusieurs zones avec un ISA faible, alors qu'elles étaient considérées par le Bureau australien des statistiques comme des zones urbaines (figure 6.10). Ceci s'explique par le fait que les résultats des cartes des % ISA sont basés sur une approche physique des infrastructures, alors que les limites établies par le Bureau australien des statistiques sont déterminées sur des critères statistiques et de population dans les localités.

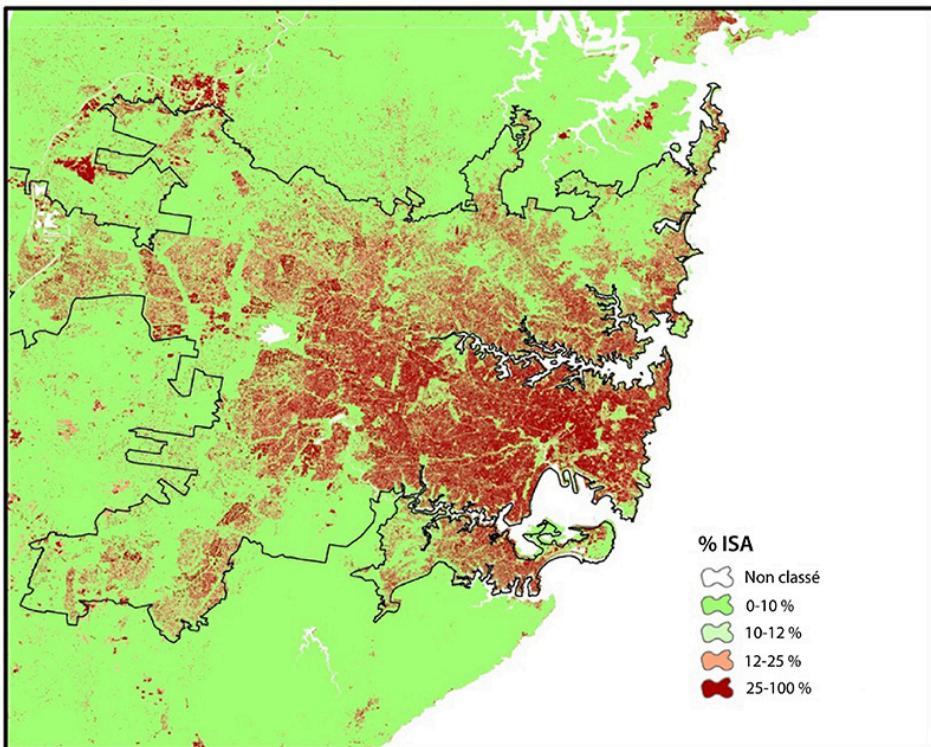


Figure 6.10. Carte des zones imperméables (*impervious surface area*, ISA) de la région de Sydney.

Cette carte a été produite au moyen d'une analyse linéaire de mélange spectral appliquée à une image Landsat-8 (17 septembre 2013) afin d'extraire une classe urbaine en niveaux d'ISA. Le polygone noir montre les limites du centre urbain principal de Sydney telles que définies par le Bureau australien des statistiques (ABS, 2016).

Conclusion

L'agriculture périurbaine apporte d'importants bénéfices aux zones métropolitaines en satisfaisant à des besoins commerciaux et récréatifs en matière d'alimentation. Elle constitue aussi une source d'emploi, améliore les moyens d'existence et fournit des services écosystémiques (Appenning, 2010). Dans la région de Sydney, la périphérie urbaine et les zones périurbaines sont des zones de transition extrêmement dynamiques.

Elles subissent des changements qui sont difficiles à quantifier par des relevés de terrain et des recensements, car la collecte de ces données demande beaucoup de main-d'œuvre, a un coût prohibitif et ne peut être mise à jour que tous les cinq ans ou plus. À l'inverse, les techniques satellitaires et géomatiques constituent des moyens économiques et efficaces pour le suivi et la cartographie à intervalles réguliers de l'évolution des pâtures et des terres cultivées dans les zones périurbaines. Les données satellitaires fournissent des informations spatiales cohérentes, une vue synoptique, un niveau de détail élevé, avec un accès gratuit aux images ayant des résolutions spatiales de 10 à 30 mètres. Quarante années d'imagerie Landsat sont disponibles pour retracer les changements d'occupation du sol et documenter les changements dans les zones cultivables et de pâtures. Cette source d'information potentiellement riche permet une meilleure planification et une gestion durable des activités agricoles en milieu périurbain, sur la base d'informations géospatiales précises (Appeaning, 2010).

Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs utilisations géospatiales potentielles des données satellitaires ainsi que des algorithmes et des outils pour le suivi, l'évaluation et la gestion des terres agricoles périurbaines. Nous avons montré que les images des satellites Landsat et Sentinel-2 pouvaient être utilisées pour comprendre les dynamiques périurbaines au moyen de classifications et de suivis de l'occupation du sol ainsi que d'outils pour détecter les changements d'occupation du sol. Une série temporelle d'images sur vingt-cinq ans, extraite des archives des satellites Landsat, a permis de retracer et de mieux comprendre les changements et les tendances en matière d'occupation du sol.

Comme nous l'avons montré dans notre étude de cas sur Sydney en Australie, les zones périurbaines sont constamment soumises à la fragmentation induite par l'urbanisation. Cette fragmentation s'accompagne d'une perte de pâtures et de terres cultivables et d'un déplacement continu de la limite urbain/périurbain vers l'ouest de la métropole. Quelques années seulement après la création ou la mise à jour des tracés de la limite urbaine (ex. : ABS, 2011 ; 2016), l'imagerie satellite a permis de mettre en évidence la perte de nouvelles zones périurbaines récemment converties à l'usage urbain. Cela démontre que la mise à jour tous les cinq ans de la délimitation de la bordure urbaine est inadaptée. De plus, la méthodologie basée sur l'indicateur % ISA apporte une mesure plus physique de la croissance urbaine, qui peut être particulièrement précise pour détecter et suivre l'étalement urbain ainsi que la perte de terres cultivables et de pâtures.

Malgré les nombreuses avancées faites dans les études sur l'occupation du sol dans les milieux urbains et périurbains, les recherches utilisant l'imagerie satellitaire et aéroportée en sont encore à leurs débuts et requièrent plus d'attention, particulièrement si l'on tient compte de l'intérêt croissant pour le devenir des paysages périurbains et des activités agricoles (Weng, 2009). Des avancées supplémentaires en télédétection et en analyse d'images seront nécessaires pour obtenir un meilleur suivi et une meilleure gestion des paysages dans les zones de transition entre l'urbain et le périurbain. Les données images acquises en mode maillé offrent la possibilité d'extraire des informations spatiales plus complexes, notamment des métriques paysagères sur les taches, les bordures, la diversité et la fragmentation des paysages. Comme illustré dans notre étude de cas sur Sydney, les mesures de fragmentation peuvent aider à représenter le caractère éparé des zones périurbaines, avec la perte de pâtures et de terres cultivables, ainsi que la consolidation des zones urbaines résultant de l'aménagement des zones interstitielles.

Les mesures de diversité paysagère semblent prometteuses et pourraient permettre une meilleure compréhension des impacts des changements de composition et de configuration dans les zones périurbaines sur la productivité agricole et les services écosystémiques qui lui sont associés. Néanmoins, l'utilisation de métriques spatiales paysagères

reste encore relativement peu exploitée en écologie des paysages dans les milieux urbains et périurbains. Les processus et les relations spatiales de fragmentation dus à des perturbations, l'occupation du sol et ses dynamiques, le fonctionnement de l'agriculture et la sécurité alimentaire restent encore mal compris et mériteraient que l'on s'y attarde plus longuement. D'autres avancées prometteuses sont à venir dans ce domaine, notamment grâce aux algorithmes d'apprentissage automatique et aux méthodes de classification orientées objet. Elles permettront, en effet, une distinction plus précise et détaillée des types d'occupation du sol. Cependant, à l'heure actuelle, elles reposent encore sur l'utilisation d'images satellitaires onéreuses et de logiciels commerciaux.

Remerciements

Ce chapitre est le résultat d'un travail d'équipe incluant tous les auteurs. Il est né des suites d'un atelier franco-australien qui s'est tenu à Sydney en octobre 2013.

Références bibliographiques

- Aniello C., Morgan K., Busbey A., Newland L., 1995. Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and a GIS. *Computers and Geosciences*, 21 (8), 965-969.
- Appeaning K., 2010. Urban and peri-urban agriculture in developing countries studied using remote sensing and *in situ* methods. *Remote Sensing*, 2 (2), 497-513.
- Atkinson P.M., 2005. Sub-pixel target mapping from soft-classified, remotely sensed imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71 (7), 839-846.
- Australian Bureau of Statistics (ABS), 2011. *Australian Statistical Geography Standards 2011 ABS Structures*. <http://stat.abs.gov.au/itt/r.jsp?ABSMaps> (consulté le 8 décembre 2018).
- Australian Bureau of Statistics (ABS), 2016. *Australian Statistical Geography Structures 2016 ABS Structures*. <http://stat.abs.gov.au/itt/r.jsp?ABSMaps> (consulté le 8 décembre 2018).
- Bauer D.J., Curran P.J., 2005. Probing interactions in fixed and multilevel regression: Inferential and graphical techniques. *Multivariate Behavioral Research*, 40 (3), 373-400.
- Blaschke T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65 (1), 2-16.
- Blaschke T., Lang S., Hay G., 2008. *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*, Springer Science and Business Media.
- Chrysoulakis N., 2003. Estimation of the all-wave urban surface radiation balance by use of ASTER multispectral imagery and *in situ* spatial data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012)*, 108 (D18).
- Civco D.L., Hurd J.D., 1997. Impervious surface mapping for the state of Connecticut. *Proceedings of the 1997 ASPRS Annual Conference*, 124-135.
- Cleugh H., Smith M.S., Battaglia M., Graham P., 2011. *Climate Change: Science and Solutions for Australia*, CSIRO.
- Davis C.H., Wang X., 2002. Urban land cover classification from high resolution multi-spectral IKONOS imagery. In: *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IGARSS'02*. 2002 IEEE International, vol. 2, IEEE, 1204-6.
- DESA, 2012. World urbanization prospects, the 2011 Revision, ST/ESA/SER.A/319, United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, viewed 05-06-2015, http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/WUP2011_Report.pdf.
- Dougherty M., Dymond R.L., Goetz S.J., Jantz C.A., Goulet N., 2004. Evaluation of impervious surface estimates in a rapidly urbanizing watershed. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (11), 1275-84.

- Durieux L., Lagabrielle E., Nelson A., 2008. A method for monitoring building construction in urban sprawl areas using object-based analysis of Spot 5 images and existing GIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63 (4), 399-408.
- Fahrig L., 2003. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34 (1), 487-515.
- Garcia-Haro F., Gilabert M., Melia J., 1996. Linear spectral mixture modelling to estimate vegetation amount from optical spectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (17), 3373-400.
- Grau H., Hernández M., Gutierrez J., Gasparri N., Casavecchia M., Flores-Ivaldi E., Paolini L., 2008. A peri-urban neotropical forest transition and its consequences for environmental services. *Ecology and Society*, 13 (1).
- He H.S., Dezonio B.E., Mladenoff D.J., 2000. An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes. *Landscape Ecology*, 15 (7), 591-601.
- Hu X., Weng Q., 2009. Estimating impervious surfaces from medium spatial resolution imagery using the self-organizing map and multi-layer perceptron neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 113 (10), 2089-2102.
- Huete A., Liu H., Batchily K., Van Leeuwen W., 1997. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59 (3), 440-51.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1), 195-213.
- Ji W., Ma J., Twibell R.W., Underhill K., 2006. Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30 (6), 861-879.
- Kalma J.D., McVicar T.R., McCabe M.F., 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29 (4-5), 421-469.
- Kane K., Connors J.P., Galletti C.S., 2014. Beyond fragmentation at the fringe: a path-dependent, high-resolution analysis of urban land cover in Phoenix, Arizona. *Applied Geography*, 52, 123-134.
- Kidder S.Q., Wu H.-T., 1987. A multispectral study of the St. Louis area under snow-covered conditions using NOAA-7 AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 22 (2), 159-172.
- Kurihara Y., Murakami H., Kachi M., 2016. Sea surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite. *Geophysical Research Letters*, 43 (3), 1234-1240.
- Lillesand T., Kiefer R.W., Chipman J., 2014. *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley and Sons.
- McGarigal K., Marks B.J., 1995. FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Munroe D.K., Croissant C., York A.M., 2005. Land use policy and landscape fragmentation in an urbanizing region: assessing the impact of zoning. *Applied Geography*, 25 (2), 121-141.
- Neill R.V., Hunsaker C.T., Jones K.B., Riitters K.H., Wickham J.D., Schwartz P.M., Goodman I.A., Jackson B.L., Baillargeon W.S., 1997. Monitoring environmental quality at the landscape scale. *BioScience*, 47 (8), 513-519.
- Odindi J., Bangamwabo V., Mutanga O., 2015. Assessing the value of urban green spaces in mitigating multi-seasonal urban heat using MODIS Land Surface Temperature (LST) and Landsat 8 data. *International Journal of Environmental Research*, 9 (1), 9-18.

- Pauchard A., Aguayo M., Peña E., Urrutia R., 2006. Multiple effects of urbanization on the biodiversity of developing countries: the case of a fast-growing metropolitan area (Concepción, Chile). *Biological Conservation*, 127 (3), 272-281.
- Peng J., Wang Y., Ye M., Wu J., Zhang Y., 2007. Effects of land-use categorization on landscape metrics: a case study in urban landscape of Shenzhen, China. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (21), 4877-4895.
- Ridd M.K., 1995. Exploring a VIS (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 16 (12), 2165-85.
- Rouse Jr J.W., Haas R., Schell J., Deering D., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA special publication*, 351, 309.
- Saunders D., Hobbs R., Margules C., 1991. Biological Consequences of Ecosystem Fragmentation: A Review. *Conservation Biology*, 5 (1), 18-32.
- Schneider A., Woodcock C.E., 2008. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. *Urban Studies*, 45 (3), 659-692.
- Song M., Civco D., Hurd J., 2005. A competitive pixel-object approach for land cover classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (22), 4981-4997.
- Streutker D.R., 2002. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (13), 2595-2608.
- Su S., Jiang Z., Zhang Q., Zhang Y., 2011. Transformation of agricultural landscapes under rapid urbanization: a threat to sustainability in Hang-Jia-Hu region, China. *Applied Geography*, 31 (2), 439-449.
- Tang J., Wang L., Yao Z., 2006. Analyzing urban sprawl spatial fragmentation using multi-temporal satellite images. *GIScience and Remote Sensing*, 43 (3), 218-232.
- Tucker C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8 (2), 127-150.
- Turner M.G., O'Neill R.V., Gardner R.H., Milne B.T., 1989. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 3 (3-4), 153-162.
- Verburg P.H., Van De Steeg J., Veldkamp A., Willems L., 2009. From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 90 (3), 1327-1335.
- Veroustraete F., Patyn J., Myneni R., 1994. *Application of remote sensing in regional scale estimates of vegetation carbon budgets: the Belfix project*. Technical Report, Federal Office for Scientific, Technical and Cultural Affairs, Space Scientific Research in Belgium. Volume 3: Earth Observations, Part 2; pp. 191-21.
- Wang Q., Shi W., Li Z., Atkinson P.M., 2016. Fusion of Sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 187, 241-252.
- Weng Q., 2001. A remote sensing? GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 22 (10), 1999-2014.
- Weng Q., 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of Environmental Management*, 64 (3), 273-284.
- Weng Q., 2009. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (4), 335-344.

- Weng Q., Lu D., Schubring J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89 (4), 467-483.
- Wu J., Xu J., Yue W., 2005. VIS model for cities that are experiencing rapid urbanization and development. *IGARSS*, 1503-1506.
- Xie Y., Sha Z., Yu M., 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, 1 (1), 9-23.
- Xu H., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (14), 3025-3033.
- Yang Y., Titus S.J., Huang S., 2003. Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. *Ecological Modelling*, 163 (3), 209-222.
- 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.
- Yumimoto K., Nagao T., Kikuchi M., Sekiyama T., Murakami H., Tanaka T., Ogi A., Irie H., Khatri P., Okumura H., 2016. Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation geostationary meteorological satellite. *Geophysical Research Letters*, 43 (11), 5886-5894.
- Zha Y., Gao J., Ni S., 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (3), 583-594.
- Zhai J., Liu R., Liu J., Zhao G., Huang L., 2014. Radiative forcing over China due to albedo change caused by land cover change during 1990-2010. *Journal of Geographical Sciences*, 24 (5), 789-801.
- Zhu G., Blumberg D.G., 2002. Classification using ASTER data and SVM algorithms: the case study of Beer Sheva, Israel. *Remote Sensing of Environment*, 80 (2), 233-240.