



HAL
open science

URBANISATION ET CHANGEMENT DU PAYSAGE A STRASBOURG ENTRE 1986 ET 2006

Christiane Weber, Thi Dong Binh Tran, Grégoire Skupinski

► **To cite this version:**

Christiane Weber, Thi Dong Binh Tran, Grégoire Skupinski. URBANISATION ET CHANGEMENT DU PAYSAGE A STRASBOURG ENTRE 1986 ET 2006. 2012. hal-00659493

HAL Id: hal-00659493

<https://hal.science/hal-00659493>

Submitted on 12 Jan 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Image
Ville
Environnement

Laboratoire Image, Ville
et Environnement
ERL 7230

Faculté de Géographie
3 rue de l'Argonne
67000 STRASBOURG
Tél. +33 (0)3 68 85 09 51
Fax +33 (0)3 68 85 09 50
<http://imaville.u-strasbg.fr/>

Programme National de Télédétection Spatiale - PNTS

URBANISATION ET CHANGEMENT DU PAYSAGE A STRASBOURG ENTRE 1986 ET 2006



Responsable scientifique : **Christiane WEBER**

Avec la participation de

Thi Dong Binh TRAN
Grégoire SKUPINSKI

RAPPORT FINAL

Strasbourg - 2010



Table des matières

PRESENTATION GENERALE	5
Partie 1_ IMAGES MULTI-TEMPORELLES SPOT A HAUTE RESOLUTION SPATIALE ET SPECTRALE POUR L'ETUDE DE LA PERIURBANISATION ET DU CHANGEMENT DU PAYSAGE URBAIN.....	8
1. Qualité spectrale.....	9
1.1. Méthodes.....	9
1.1.1 Méthode d'analyse de mixture spectrale linéaire (LSU - Linear Spectral Unmixing) .	9
1.1.2 Méthode du Spectral angle mapper (SAM).....	10
1.2. Données et traitements.....	11
1.2.1 Méthodes de sélection des signatures prototypes : Indice de Pureté du pixel (Pure Pixel Index - PPI).....	12
1.2.2 Résultats et discussions	13
2. Approche du changement de l'occupation du sol à partir des images satellites multi-dates	17
2.1 Identification, caractérisation de la périurbanisation à Strasbourg.....	18
2.1.1 Données disponibles	18
2.1.2 Zone d'étude	20
2.1.3 Classification	21
2.1.4 Evolution spatio-temporelle des espaces urbains.....	27
Partie 2 _ CHANGEMENT DU PAYSAGE DANS L'AIRE URBAINE DE STRASBOURG – APPROCHE DE LA METRIQUE SPATIALE.....	32
1. INTRODUCTION.....	33
2. ZONE D'ETUDE.....	36
3. INDICES DU PAYSAGE	39
3.1 Les indices de densité, surface et bordure.....	40
3.1.1 Densité des composants (Patch density, PD).....	40
3.1.2 La taille moyenne des composants (Mean Patch Size, MPS).....	40
3.1.3 Indice de composant majeur (Largest Patch Index, LPI) et mesure de la fragmentation	41
3.1.4 Pourcentage du paysage (Percent of landscape, PLAND).....	41
3.2 Les indices de contagion et d'intersection	42
3.2.1 Contagion (CONTAG).....	42
3.2.2 Indice d'Agrégation (AI).....	42
3.3 Indice de diversité.....	43
3.3.1 L'indice Shannon d'équitabilité (Shannon's Evenness Index, SHEI).....	43
4. RESULTATS D'ANALYSE	44
4.1 A l'échelle du paysage	44
4.2 A l'échelle de la classe.....	46
4.2.1 Analyse.....	47
4.2.2 Distribution des composants paysagers en 2006.....	50
5. CONCLUSION.....	54
CONCLUSION GENERALE	58
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	59

Liste des figures

Figure 1. Zone de test, secteur sud-est de Strasbourg	11
Figure 2. Signature spectrale prototypes des pixels extraites à partir de l'image SPOT 5 par la méthode de PPI (Pure Pixel Index).....	12
Figure 3. Les composantes de MNF (<i>Minimum noise fraction</i>): a) à d) quatre images de MNF obtenues par transformation des quatre bandes SPOT5 ; e) composée en (RVB) des trois premières de MNF ; h) la variance en fonction du nombre de MNF.....	13
Figure 4. Résultats de la méthode de LSU utilisant les signatures prototypes issues de la méthode de PPI : a) proportion de l'espace urbain et sol nu (haut albédo) ; b) proportion des zones humides et eaux (bas albédo) ; c) proportion de la végétation; d) erreur quadratique moyenne (RMSE); e) composé coloré (RVB) des proportions des classes urbaines ; et f) l'histogramme de la RMSE. Les tons clairs correspondent à une forte abondance et les tons sombres à une faible abondance.....	14
Figure 5. Résultats de classification issus de la méthode a- LSU, b- SAM	15
Figure 6. Composition de fausse couleur de trois images SPOT acquise en 1986, 1996 et 2006	19
Figure 7. Zone d'étude – partie commune de trois images et compose essentiellement des communes de l'aire urbaine de Strasbourg.....	20
Figure 8. Résultats de classification de trois images SPOT - Occupation du sol dans l'aire urbaine de Strasbourg : a- en 1986, b- en 1996 et c- en 2006	26
Figure 9. Changement de l'occupation du sol dans l'aire urbaine de Strasbourg entre 1986 et 2006	27
Figure 10. Evolution urbaine dans l'aire urbaine de Strasbourg : a- période 1986-1996, b- période 1996-2006 et c- période 1986-2006.....	30
Figure 11. Niveau d'urbanisation en accord avec le niveau de fragmentation et diversité du paysage (Weng, 2007).....	35
Figure 12. Les directions d'évolution de l'occupation du sol sont contraintes par la frontière à l'Est mais aussi par la présence d'une activité de production agricole à l'Ouest et Nord Est et Sud	37
Figure 13. Comportement des indices métriques PD, MPS, CONGTAG et SHEI appliqués à l'étude du paysage de l'aire urbaine de Strasbourg.....	44
Figure 14. Comportement de l'indice PLAND pour 4 classes d'occupation du sol	47
Figure 15. Comportement de l'indice de composant majeur (LPI) pour les classes d'occupation du sol	48
Figure 16. Comportement de l'indice d'Agrégation (AI) pour les classes d'occupation du sol.....	49
Figure 17. Les fenêtres d'analyse surfacique variées de taille 100x100 pixels à 1100x1100 pixels par un pas de 100 pixels.....	50
Figure 18. Comportement des indices PD, LPI et PLAND des classes d'occupation du sol en fonction de la distance à partir du centre-ville	51
Figure 19. Comportement des indices PD et LPI des classes d'occupation du sol en fonction de la résolution spatiale	53

Liste des tableaux

Tableau 1. Précision et indice de Kappa	14
Tableau 2. Erreurs de commission et d'omission	16
Tableau 3. Statistiques issues de classification de deux méthodes LSU et SAM.....	16
Tableau 4. Caractéristiques techniques des images SPOT	18
Tableau 5. Classes thématiques	22
Tableau 6. Précision globale et Indice Kappa de la classification de trois images SPOT.....	23
Tableau 7. Indices métriques pour caractériser la structure du paysage	44
Tableau 8. Variation de AI Bâti entre 1986 et 2006	50

Liste des équations

Équation 1. Transformation de la réflectance selon la méthode LSU.....	9
Équation 2. Erreur moyenne quadratique (RMSE).....	10
Équation 3. Angle spectral	10
Équation 4. Densité des composants dans le paysage.....	40
Équation 5. Densité des composants dans la classe.....	40
Équation 6. Taille moyenne des composants	40
Équation 7. Le composant majeur	41
Équation 8. Pourcentage du paysage	41
Équation 9. Indice de contagion	42
Équation 10. Indice de l'agrégation.....	42
Équation 11. Indice d'équitabilité de Shannon.....	43

PRESENTATION GENERALE

La logique du développement durable et l'application des mesures contenues dans les textes des Grenelle I et II ont conduit à une réflexion renouvelée sur les relations entre la « ville » (prise en tant qu'entité globale, souvent sans définition précise en terme de fonctionnement (Collins et al., 2000 ; Corbyn, 2010) et son environnement (là encore, vue de manière générale sans toujours prendre en compte les relations systémiques entre les différents compartiments naturels). Pourtant la variété des formes de développement des systèmes urbains est suffisamment importante pour que l'on s'attache à en décrire les processus, les révélateurs et éventuellement les limites.

Dans un tel contexte les documents d'urbanisme (SCoTs et PLUs) ont mis en exergue la problématique de la maîtrise foncière, problématique emblématique des dynamiques de peuplement depuis une dizaine d'années. Cette question reste centrale dans le processus d'urbanisation et en particulier dans le cadre de l'accroissement périphérique et du desserrement du peuplement urbain. Ainsi durant les deux dernières décennies (1990-2010) la périurbanisation, modèle de développement urbain largement répandu, a été étudiée, et dernièrement dénoncée pour ses impacts négatifs, induisant des gaspillages de ressources (environnementales, économiques, foncières etc.), une ségrégation socio-spatiale accrue et des externalités économiques négatives (NcIntyre et al., 2000 ; Schubarth, 2008). Pour aborder ces impacts diverses approches sont développées, car la périurbanisation s'affirme par des modes d'habiter ou de se déplacer différents de ce que l'on observait jusqu'alors. « *Il n'existe pas de définition commune, ni de bonne manière d'appréhender spatialement ou de qualifier le système périurbain* » précisait Roux et Vanier en 2008. Parmi ces approches l'usage de série cartographiques ou d'images satellites permet d'observer les transitions d'un état du sol à un autre, de quantifier ces changements et de caractériser les formes de paysage induites, tant pour le paysage « naturel » que pour les formes de peuplement. Ces transformations se réalisent en particulier dans des zones de tension, de confrontation d'usage, de compétition selon des gradients centre-périphérie, entre matrice urbaine dominée par le bâti et les zones minérales, et matrice naturelle et agricole (Forman and Godron 1986 ; McDonnell et al. 1997 ; McDonnell and Pickett 1991).

Les travaux ci-après, abordent ces espaces particuliers au travers du suivi des processus de peuplement (urbanisation et périurbanisation) et de l'évolution de la structure des paysages. Ce décryptage permet d'identifier les différentes phases d'urbanisation et les modifications paysagères induites selon la cinétique de chaque ensemble (urbain – naturel) et d'aborder les relations fonctionnelles des systèmes analysés.

En effet, l'étude des changements de la forme du paysage constitue une étape importante dans la compréhension des conséquences tant sociales qu'écologiques induites (Savard et al., 2000), tant dans les fonctions urbaines que dans les processus écologiques eux-mêmes (Weng, 2007). La prise en compte de la « ville » en tant qu'éco-socio système, intégrant les dynamiques socio-économiques et les processus écologiques (Douglas 1981; Millennium Ecosystem

Assessment 2005; Sterns and Montag 1974 ; Machlis en al., 1997) fonde une telle approche. En conséquence plutôt que d'explorer uniquement la contribution de l'urbanisation aux impacts environnementaux, il devient pertinent d'étudier les relations complexes qui se jouent tout particulièrement dans ces espaces « d'entre-deux » faits de formes urbaines en émergence, des zonages agricoles parfois enclavés, des espaces « naturels » convoités ou patrimonialisés ou appauvri (Bastin et Thomas, 1999 ; Mortberg, 2001 ; Olf et Ritchie, 2002).

L'observation des changements du paysage au cours du temps permet d'estimer la nature et la cinétique des processus naturels et anthropiques en jeu et d'en évaluer les enjeux de gestion des ressources naturelles et des territoires. Le suivi de ces changements est effectué depuis une vingtaine d'années à partir de données satellites (Landsat MSS, TM, ETM, Spot, Ikonos, Quickbird, etc.) grâce à leurs résolutions spatiales, spectrale et temporelle de plus en plus performantes. L'utilisation conjointe de la télédétection et de métriques paysagères (Macgarigal et Mark, 1994) ne s'est répandue que récemment pour l'étude des changements du paysage urbain et périurbain (Dietzel et al., 2005 ; Herold et al., 2002, Herold et al., 2003 ; Herold et al., 2005 ; Leitão et Ahern, 2002 ; Weng, 2007 ; Skupinski et al., 2009). En effet, cette approche issue de l'écologie du paysage (Gustafson, 1998 ; McGarigal et al., 2002) permet d'aborder des formes complexes et de les rendre identifiables et quantifiables. Elle favorise par ailleurs la révélation de propriétés de l'écosystème non observables *a priori* (Antrop et Van Eetvelde, 2000). *La métrique paysagère ou métrique spatiale est une mesure de la forme et de la distribution des structures spatiales (ou éléments comme la végétation)*. Cet outil méthodologique autorise ainsi la mesure (1) des modifications des formes du paysage, notamment en fonction du niveau d'urbanisation - la tâche ou le patch - (Luck et Wu, 2002) ainsi que (2) de la dynamique temporelle de ces changements (Dietzel, *et al.*, 2005 ; Herold, *et al.*, 2003). Cependant, le potentiel de telles analyses quantitatives dépend fondamentalement des données géographiques disponibles, notamment les données spatiales (cartographique, photographique ou satellite) et de la résolution spatiale de celles-ci.

L'objectif de ce travail est d'identifier, de caractériser et de quantifier les modifications paysagères qu'entraîne l'avancée du front d'urbanisation sur l'arrière-pays de Strasbourg et de la Communauté Urbaine (CUS) sur une durée de 20 ans entre 1986 et 2006 à partir des images satellites et d'indices de métrique paysagère. Ces résultats peuvent fournir des éléments de réflexion supplémentaire aux débats actuels sur les scénarios prospectifs d'évolution des relations villes/campagnes dans la veine de ceux initiés par la DATAR (2007) et l'INRA (2009). Comme toutes les agglomérations régionales, Strasbourg connaît à la fois (1) un mouvement d'étalement urbain certes contraint par le relief, les caractéristiques hydrologiques (fleuve frontière, zones humides, remontée de nappe, etc.), dynamisé par les facteurs démographiques et économiques et (2) un processus de renouvellement urbain interne (réhabilitation ou densification). Ainsi l'observatoire du foncier et des évolutions des territoires note-t-il qu'entre 1976 et 2002 la tache urbaine s'est accrue de 56% soit 530ha transformés par an.

Ce projet vise en particulier à répondre à diverses questions concernant : les transformations du paysage pendant deux décennies et leurs caractéristiques, la description du processus d'urbanisation dans la périphérie proche de Strasbourg (dynamique et intensité) et l'intérêt des informations paysagères en tant que complément à l'étude usuelle de celui-ci à partir de

données satellites. Il est structuré en quatre parties. Après l'introduction, nous abordons les applications des images satellites provenant du capteur SPOT dans l'étude urbaine par la qualité spectrale dans l'extraction des informations urbaines et la qualité temporelle pour l'étude du changement de l'occupation du sol. Les analyses paysagères par les métriques spatiales font l'objet de recherche de troisième partie. Nous présentons dans chaque étape l'état de recherche, les méthodes et les résultats obtenus ainsi que les points de discussion. La dernière partie propose des conclusions et des perspectives.

Partie 1

IMAGES MULTI-TEMPORELLES SPOT A HAUTE RESOLUTION SPATIALE ET SPECTRALE POUR L'ETUDE DE LA PERIURBANISATION ET DU CHANGEMENT DU PAYSAGE URBAIN

La question cruciale de cette étude est « Comment identifier et quantifier le changement spatio-temporel du paysage urbain et périurbain à partir des données satellites ? ». Deux types de méthodes sont utilisés afin d'extraire des connaissances urbaines à partir des données satellites (ex. les changements entre différents types d'occupation du sol) : la première quantifie la qualité spectrale des images utilisées et la deuxième met en valeur les changements de l'occupation du sol par le traitement d'images satellites multi-dates.

1. Qualité spectrale

La réponse spatiale d'un capteur de télédétection entraîne une intégration pondérée de la radiance spectrale dans sa dimension spatiale et constitue une source majeure de mixage spectral des différents matériaux à l'intérieur d'un pixel. Une approche pour l'inclusion de la réponse spatiale dans les algorithmes de démixage spectral paraît très importante. Nous testons deux méthodes de démixage suivantes :

1.1. Méthodes

1.1.1 Méthode d'analyse de mixture spectrale linéaire (LSU - Linear Spectral Unmixing)

Cette approche de l'analyse de mixture spectrale linéaire est un modèle physique qui considère la signature spectrale des pixels comme étant un mélange de quelques signatures pures. Ces signatures pures sont les contributions spectrales propres des objets rencontrés dans l'image (Bahri *et al.*, 2007). En première approximation, le mélange spectral peut être modélisé comme une combinaison linéaire de composantes spectrales homogènes (Joseph *et al.*, 1998 ; Adams *et al.*, 1989) :

Équation 1. Transformation de la réflectance selon la méthode LSU

$$R_i = \sum_{j=1}^n F_j RC_{ij} + \varepsilon_i \quad \text{avec} \quad \sum_{j=1}^n F_j = 1 \quad \text{et} \quad 0 \leq F_j \leq 1$$

où :

R_i : réflectance dans la bande i ;

RC_{ij} : réflectance de la signature pure j dans la bande i ;

F_j : proportion de la surface représentée par la signature pure j ;

ε_i : erreur résiduelle dans la bande i ;

n : nombre total de signatures pures j ;

Le nombre de signatures pures doit être inférieur ou égal au nombre de bandes plus un. Ceci permettra de trouver les proportions optimales des signatures pures qui offrent le meilleur ajustement entre les signatures spectrales mesurées et celles qui sont modélisées (mélange). La validité du modèle LSU sera évaluée par le biais de l'erreur moyenne quadratique (RMSE) (Joseph, *et al.*, 1998, Adams, *et al.*, 1989) :

Équation 2. Erreur moyenne quadratique (RMSE)

$$RMSE = \sum_k^m \left(\sqrt{\left(\sum_{j=1}^n (R_{jk} - R'_{jk})^2 \right)} \right) \times \frac{1}{n} \times \frac{1}{m}$$

où :

R_{jk} , R'_{jk} : respectivement la réflectance modélisée et la réflectance mesurée du pixel k ;

n, m : respectivement le nombre de bandes spectrales et le nombre de pixels de l'image.

Cette étape a pour objectif d'identifier la proportion des entités de réflectance dans un pixel : végétation, haut albédo (surface imperméable : bâti, sol nu, zone commerciale et industrielle, etc.) bas albédo (surface en eau, humide). LSU utilise la technique floue pour déterminer le pourcentage des endmembers contenant dans un pixel. Ridd, 1995), Small, 2001, 2003) et Phinn *et al.*, 2002 trouvent que LSU est capable de définir les composants en milieu urbain. Par exemple : un pixel urbain peut contenir 30% de végétation, 65% de bâti et 5% de l'eau. Nous utilisons cette méthode pour estimer la proportion de trois entités de réflectance : végétation, haut albédo (surface imperméable : bâti, sol nu, zone commerciale et industrielle, etc.) et bas albédo (surface en eau, humide) dans des pixels urbains.

1.1.2 Méthode du Spectral angle mapper (SAM)

La méthode du SAM est une approche de classification basée sur la similarité angulaire entre les spectres de l'image et des spectres de référence. Ceux-ci sont considérés comme des vecteurs ayant des valeurs dans un espace de dimension égale au nombre de bandes de l'image utilisée. Cette méthode permet de mesurer l'écart angulaire entre eux dans un espace multidimensionnel. Cet angle spectral α est calculé à l'aide de l'équation suivante (Kruse *et al.*, 1993) :

Équation 3. Angle spectral

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\mathbf{r}_s \cdot \mathbf{r}_t}{\|\mathbf{r}_s\| \|\mathbf{r}_t\|} \right)$$

où :

r_s est le spectre de référence,

r_t est le spectre évalué.

Un pixel est affecté à une classe prédéfini en référant à l'angle α qui sépare le vecteur du spectre de référence et celui de l'image. La similarité entre le spectre du pixel examiné et le spectre de référence est grande si l'angle est petit. Selon Cròsta *et al.*, 1998, le choix de l'angle α constitue une étape primordiale car elle peut produire des erreurs concernant le nombre de classe ou bien le nombre de pixels non classifiés.

1.2. Données et traitements

Spot 5 HRG2	03 juin 2005	10 m	0,50-0,59 μ m 0,61-0,68 μ m 0,79- 0,89 μ m 1,58 – 1,75 μ m	NTF, Paris, France 1
----------------	--------------	------	-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------

Nous testons cette méthode pour l'image SPOT5 de 4 bandes sur une zone de test (**Figure 1**). L'objectif est de tester la faisabilité de détection des objets urbains avec le capteur de SPOT5 de quatre bandes allant du visible au infra-rouge. Cette richesse spectrale va nous permettre d'extraire des connaissances intéressantes dans le contexte urbanistique de Strasbourg.

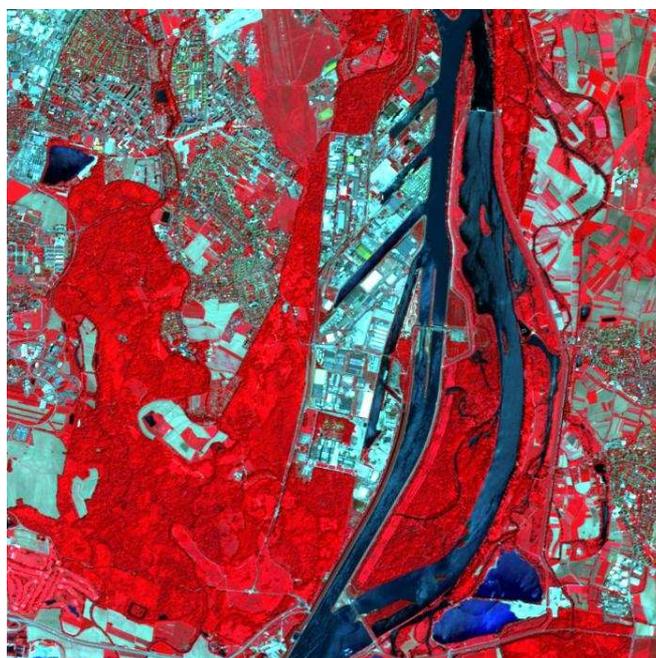


Figure 1. Zone de test, secteur sud-est de Strasbourg

La sélection d'une méthode cohérente et efficace passe par une série des traitements :

1. Calcul de MNF (Minimum noise fraction) : déterminer la dimensionnalité inhérente,
2. PPI (Pure pixel index) : permettre d'identifier des pixels purs,
3. Tester deux méthodes de LSU qui détermine la proportion des entités de réflectance, contenant dans un pixel et de SAM qui détermine l'angle entre le vecteur du spectre de référence et celui de chaque vecteur dans l'image,
4. Classification,
5. Comparaison entre deux méthodes.

1.2.1 Méthodes de sélection des signatures prototypes : Indice de Pureté du pixel (Pure Pixel Index - PPI)

L'indice de pureté du pixel PPI est un indicateur mesurant la pureté des pixels qui représentent des composantes spectrales homogènes au sol. Il s'agit d'un processus de sélection des pixels purs par des opérations répétitifs (Green *et al.*, 1988). Les valeurs extrêmes sont considérées comme seuil minimum et maximum. Cette approche permet d'obtenir une image ayant la valeur du pixel représente le nombre de fois que le pixel a été identifié comme extrême. Ces extrêmes représentent les pixels purs de l'image et, donc, les signatures prototypes recherchées (Green, *et al.*, 1988 ; Boardman et Kruse, 1994).

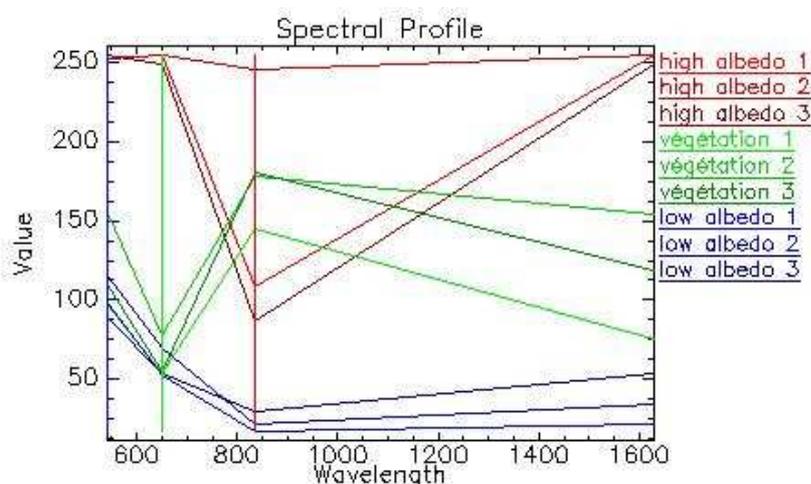


Figure 2. Signature spectrale prototypes des pixels extraites à partir de l'image SPOT 5 par la méthode de PPI (Pure Pixel Index)

Les signatures prototypes extraites par la méthode de l'indice PPI sont présentées sur la **Figure 2**. Il s'agit de spectres représentant trois catégories des bâtiments ou sols nus très réfléchissants (haut albédo), eau du lac (bas albédo) et forêts, végétation arborée ou herbacée (végétation) (**Figure 2**).

Afin d'extraire les signatures prototypes, il est judicieux d'effectuer le calcul de dimensionnalité inhérente (MNF - Minimum noise fraction) existante dans l'image. C'est une analyse en composant principale qui détermine la variance de l'image. Cette transformation qui consiste à minimiser le bruit en comprimant l'information dans un nombre fini de bandes

de MNF (Green, *et al.*, 1988, Boardman et Kruse, 1994). Elle permet d'identifier les pixels purs potentiels. Cette méthode permet de prendre en compte que des trois premières composantes sont jugées significatives et sont illustrées sur les **Figure 3a à d**.

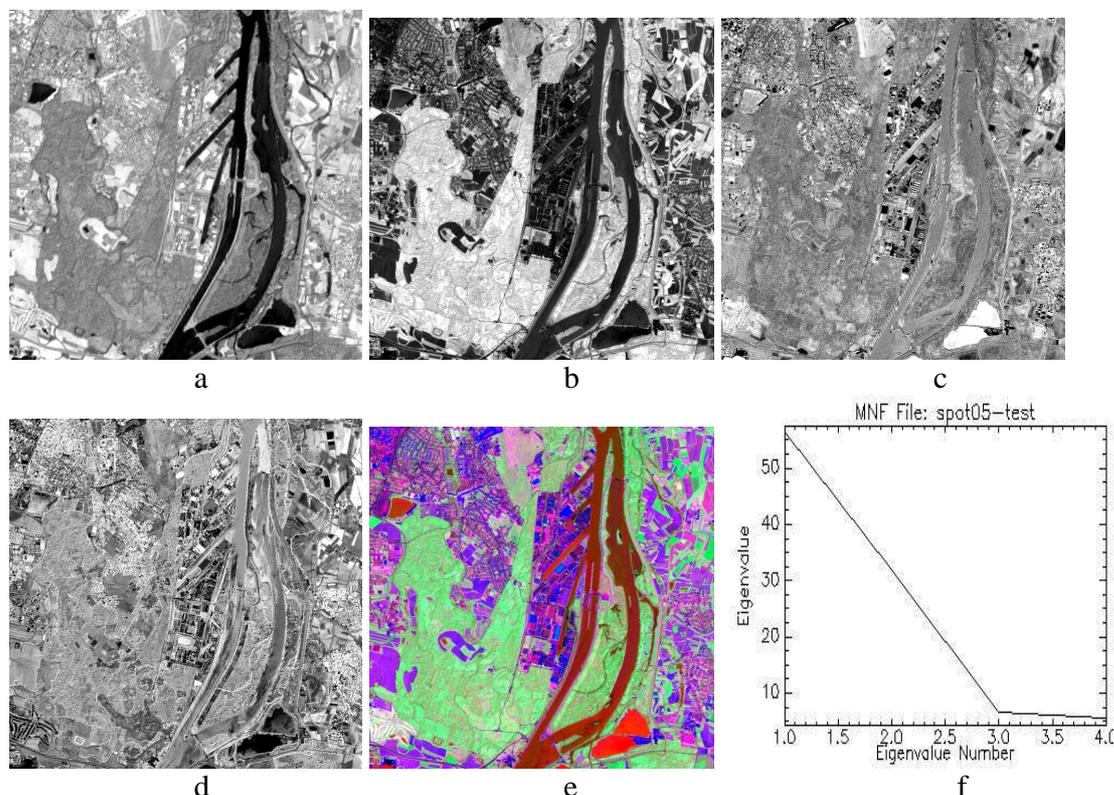


Figure 3. Les composantes de MNF (*Minimum noise fraction*): a) à d) quatre images de MNF obtenues par transformation des quatre bandes SPOT5 ; e) composée en (RVB) des trois premières de MNF ; h) la variance en fonction du nombre de MNF.

1.2.2 Résultats et discussions

L'ensemble de signatures prototypes issu de l'analyse de PPI a été utilisé pour effectuer le démixage spectral de l'image SPOT5 à l'aide de deux méthodes LSU et SAM. La méthode de LSU permet d'obtenir des résultats de la modélisation sous forme d'images de proportions relatives des catégories d'occupation du sol et de l'erreur quadratique moyenne (**Figure 4a à f**). Chaque image de proportions représente l'abondance relative d'une composante homogène donnée. Elle exprime sa répartition proportionnellement aux autres composantes impliquées dans le modèle. Elle traduit donc son taux d'occupation du sol.

En ce qui concerne l'erreur quadratique moyenne (RMSE) obtenue par la méthode de LSU, elle permet, en général, une meilleure répartition des zones. L'erreur quadratique moyenne obtenue pour notre image est très élevée (**Figure 4f**) ce qui présente une faible séparation entre les pixels de SPOT5 qui sont naturellement des mixels.

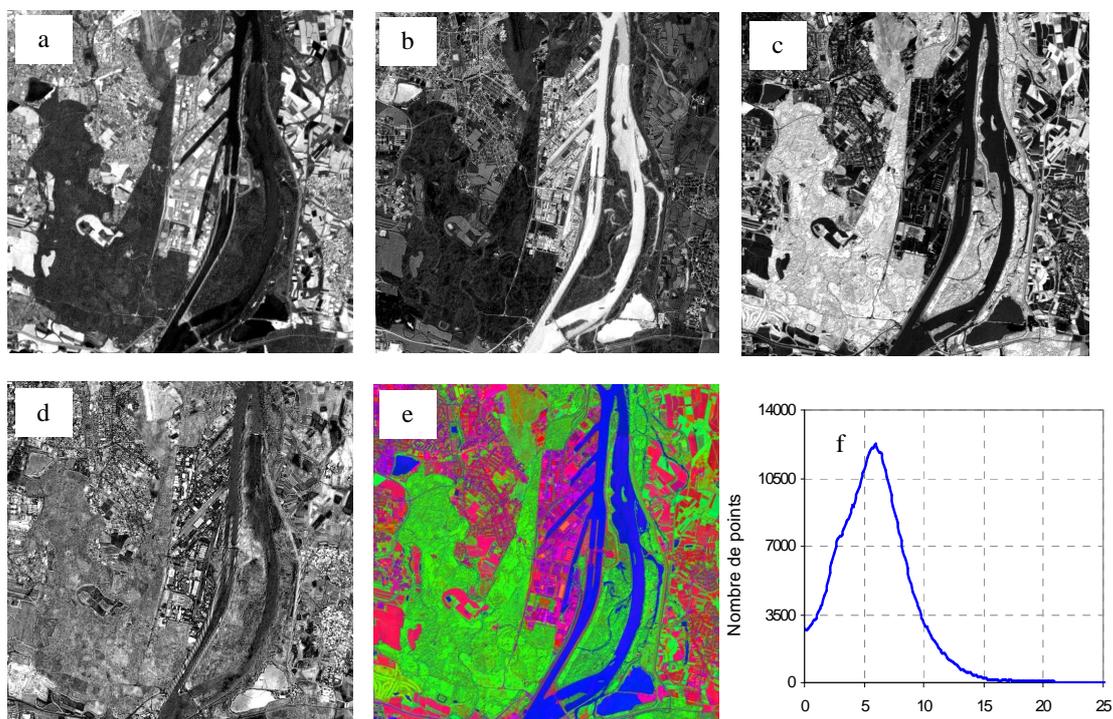


Figure 4. Résultats de la méthode de LSU utilisant les signatures prototypes issues de la méthode de PPI : a) proportion de l'espace urbain et sol nu (haut albédo) ; b) proportion des zones humides et eaux (bas albédo) ; c) proportion de la végétation; d) erreur quadratique moyenne (RMSE); e) composé coloré (RVB) des proportions des classes urbaines ; et f) l'histogramme de la RMSE. Les tons clairs correspondent à une forte abondance et les tons sombres à une faible abondance.

En ce qui concerne l'approche du SAM, nous avons basé sur la combinaison entre l'angle spectral optimal et les signatures prototypes issues de PPI pour sélectionner un angle optimal. Le meilleur résultat est obtenu pour un angle de 0,20 radians en combinaison avec les signatures prototypes, ce qui permet de distinguer les classes d'occupation du sol. La méthode du SAM ne fournit pas des images d'abondance relative aux catégories d'occupation du sol, mais elle permet d'obtenir une image unique correspondant à la classification des classes basée sur la similarité spectrale. Les résultats obtenus sont illustrés dans la **Figure 5**.

Méthode	Précision globale	Kappa
SAM	85,44%	79,4%
LSU	85,92%	78,62%

Tableau 1. Précision et indice de Kappa

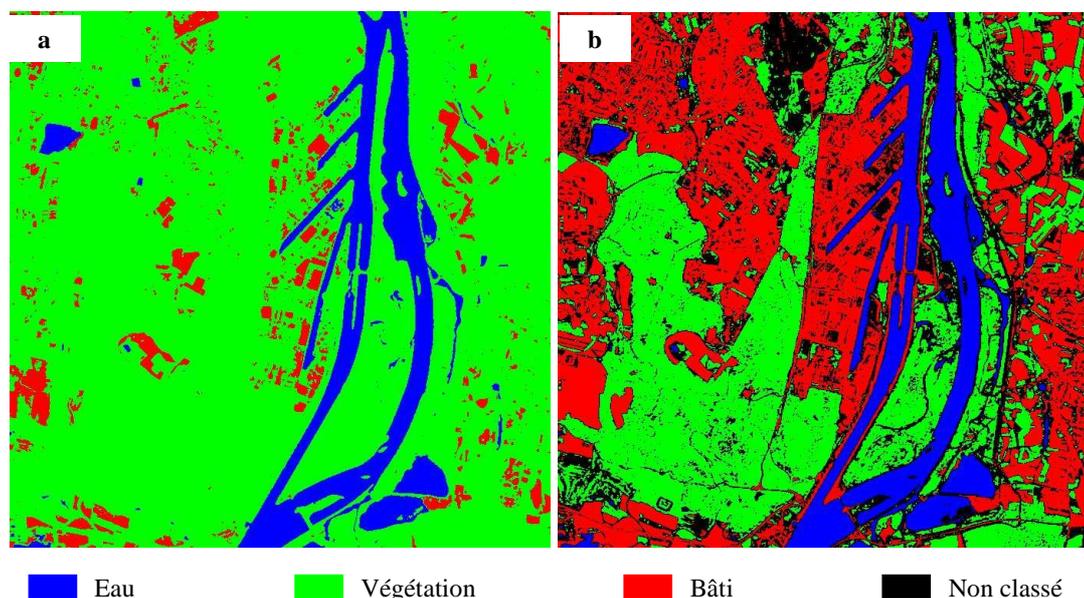


Figure 5. Résultats de classification issus de la méthode a- LSU, b- SAM

En général, les classifications de l'occupation du sol issues de LSU et SAM présentent une certaine similarité du point de vue statistique et de la répartition globale des catégories d'occupation du sol dépendant du milieu d'étude (Bahri, *et al.*, 2007). Dans le cas de l'agglomération de Strasbourg, nous avons relevé certaines différences significatives (**Tableau 1, Tableau 2, Tableau 3, Figure 5**) :

- La précision globale et l'indice de Kappa présentent une forte similarité dans le processus de classification entre les deux méthodes. Ils sont respectivement 85,44 et 79,4 pour la méthode de SAM et 85,92 et 78,62 pour la méthode de LSU. Malgré tout, elles sont forte différentes en termes de distribution spatiale et d'appartenance ;
-
- La superficie occupée par la classe végétation semble beaucoup plus grande dans le cas du LSU que de SAM (82,9% contre 39,57%); cela s'explique par la prise en compte de l'ombre dans le cas de la méthode de LSU. En effet, la différence est plus marquée sur les bâtis discontinus qui contiennent de différents matériaux de construction. Ces zones sont considérées comme végétation dans le cas LSU ;
- Quant à la méthode du SAM, elle classe les pixels mixtes représentant à la fois le bâti et la végétation comme non classifié. Elle sépare correctement les objets à haut albédo de ceux à bas albédo et de la végétation (**Figure 5b**) selon l'angle accordé.

Les résultats montrent la distinction des différents objets urbains de nature composée. Ils ont permis de comparer des méthodes développées pour prendre en compte les problèmes d'hétérogénéité spatiale et de complexité spectrale caractéristiques de l'espace urbain très complexe. Il s'agit des méthodes d'extraction des signatures pures à partir des images de

télédéttection (indice de pureté du pixel) et des approches mesurant la ressemblance des vecteurs spectraux (LSU et SAM). On a constaté que le choix des signatures prototypes est une étape primordiale dans la mise en œuvre des méthodes d'extraction de l'information, basées sur la similarité spectrale à partir des données multibandes de SPOT.

Méthode SAM		
Classe	Commission (%)	Omission (%)
high albedo	0,00	20,00
low albedo	0,00	7,32
végétation	0,00	18,75

Méthode LSU		
Classe	Commission (%)	Omission (%)
high albedo	0,00	45,00
low albedo	0,00	2,44
végétation	31,18	0,00

Tableau 2. Erreurs de commission et d'omission

Méthode SAM		
Classe	Npts	%
Non classify	119070	24,3000
high albedo	164692	33,6106
low albedo	49648	10,1322
végétation	156590	39,571

Méthode LSU		
Classe	Npts	%
high albedo	31494	6,4273
low albedo	52165	10,6459
végétation	406341	82,9267

Tableau 3. Statistiques issues de classification de deux méthodes LSU et SAM

Par ailleurs, les méthodes de LSU et du SAM ont produit chacune une classification de l'espace urbain différente. D'abord, nous confirmons que la précision de ces deux méthodes

dépend essentiellement de la sélection des signatures prototypes. La méthode de LSU présente davantage des possibilités en termes d'images de résultats qui montrent séparément l'abondance de chaque type d'occupation du sol sur une image. La comparaison des résultats issus de ces deux méthodes permet de confirmer que SAM donne un meilleur résultat et classe correctement les classes urbaines dominantes grâce à la performance du spectre angulaire attribué.

2. Approche du changement de l'occupation du sol à partir des images satellites multi-dates

Les données satellites, à l'heure actuelle, deviennent un outil incontournable pour la planification et l'aménagement du territoire en raison de la périodicité des prises de vue et de résolutions spatiales de plus en plus performantes. Les résolutions spatiale et temporelle jouent un rôle important dans l'identification des modifications de la surface terrestre (Ridd et Liu, 1998). Le suivi de la croissance des espaces urbanisés impose une connaissance périodique de l'occupation du sol. Les techniques de détection de changement (soustraction d'images, corrélation, rectification spatiale etc.) sur les images numériques ont été mises en œuvre par Lillestrand dès 1972 (Lillestrand, 1972). Elles intègrent les techniques du traitement de données satellites : correction radiométrique, géométrique, classification et extraction des formes, etc. (Ashbindu, 1989). Elles permettent de déterminer l'évolution du périmètre de la ville (contenant) et le « taux de remplissage » de la ville (contenu).

La détermination de l'évolution du périmètre de la ville (contenant) repose sur le changement de la couverture végétale et sur les rapports de densité entre l'affectation urbaine et rurale. Certains critères permettent de définir le périmètre d'agglomération sur l'image satellite, tels que la variation nette dans la densité de l'habitat, le desserrement du réseau de voies de communication, le changement dans l'affectation du sol, etc. La détermination du « taux de remplissage » de la ville (contenu) à partir des données satellitaires requiert souvent la prise en compte de deux critères essentiels : la taille du pixel (la résolution spatiale au sol) et l'hétérogénéité de l'espace. La croissance urbaine procède ainsi à la fois par une densification de l'occupation du bâti existant et par l'extension des limites du bâti plus ou moins continu. La détection des changements d'occupation du sol est un processus fondé sur l'identification des différences d'état d'objets ou de phénomènes à travers des observations à des moments différents (Singh, 1989). La situation idéale est bien entendu de pouvoir utiliser des images obtenues par le même capteur avec la même géométrie d'observation et à des dates similaires d'acquisition (Lillesand *et al.*, 2004). Cela permet de minimiser les erreurs provoquées par les variations saisonnières et l'angle solaire.

Il existe de nombreuses méthodes pour la détection de changements comme l'analyse de la différence entre images (Ballut et Nguyen, 1984 ; Ridd et Liu, 1998), la soustraction d'images (Fung, 1990 ; Zhang *et al.*, 2002), l'étude des modifications de la morphologie urbaine (Baudot, 1994 ; Dureau, 1990 ; Terrettaz, 1998), les indices de différence végétale (Masek *et al.*, 2000), le seuillage d'images (Fung, 1990), l'usage de filtre de passe-haut (Fung, 1990 ; Kwarteng et Chavez, 1998), l'analyse en composantes principales, l'application des réseaux

neuronaux (Chen *et al.*, 2004), la régression (Ridd et Liu, 1998), la classification spectrale/temporelle (Xiao *et al.*, 2005 ; Yin *et al.*, 2005 ; Zhang, *et al.*, 2002), la comparaison post-classification (Yang et Lo, 2002) ou encore l'approche orientée-objet (Puissant, 2003, He *et al.*, 2005).

Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre pour détecter des changements d'occupation du sol n'est pas évident. La sélection dépend, entre autres, du paysage, des types de changements et des résolutions spatiales et temporelles des données à utiliser. Parmi les méthodes existantes, la comparaison post classification s'avère souvent la plus appropriée pour un inventaire notamment dans le cadre de la constitution d'une base de données, sans objectif de simulation d'une situation future. Nous utilisons cette méthode pour notre travail, tout en sachant que l'efficacité de cette méthode est basée sur la qualité de la classification des images.

2.1 Identification, caractérisation de la périurbanisation à Strasbourg

2.1.1 Données disponibles

Les principales sources de données utilisées dans cette étude sont trois images multispectrales Spot et des données ancillaires (cartes, orthophotos IGN et relevés terrain) (**Tableau 4**). Les compositions de fausse couleur des trois images sont présentées sur la **Figure 6**.

Image	Date d'acquisition	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Projection
Spot 1 HRV2	28 juin 1986	20 m	0,50-0,59µm 0,61-0,68µm 0,79- 0,89 µm	NTF, Paris, France 1
Spot 3 HRV2	22 juillet 1996	20 m	0,50-0,59µm 0,61-0,68µm 0,79- 0,89 µm	NTF, Paris, France 1
Spot 2 HRV2	16 juillet 2006	20 m	0,50-0,59µm 0,61-0,68µm 0,79- 0,89 µm	NTF, Paris, France 1

Tableau 4. Caractéristiques techniques des images SPOT

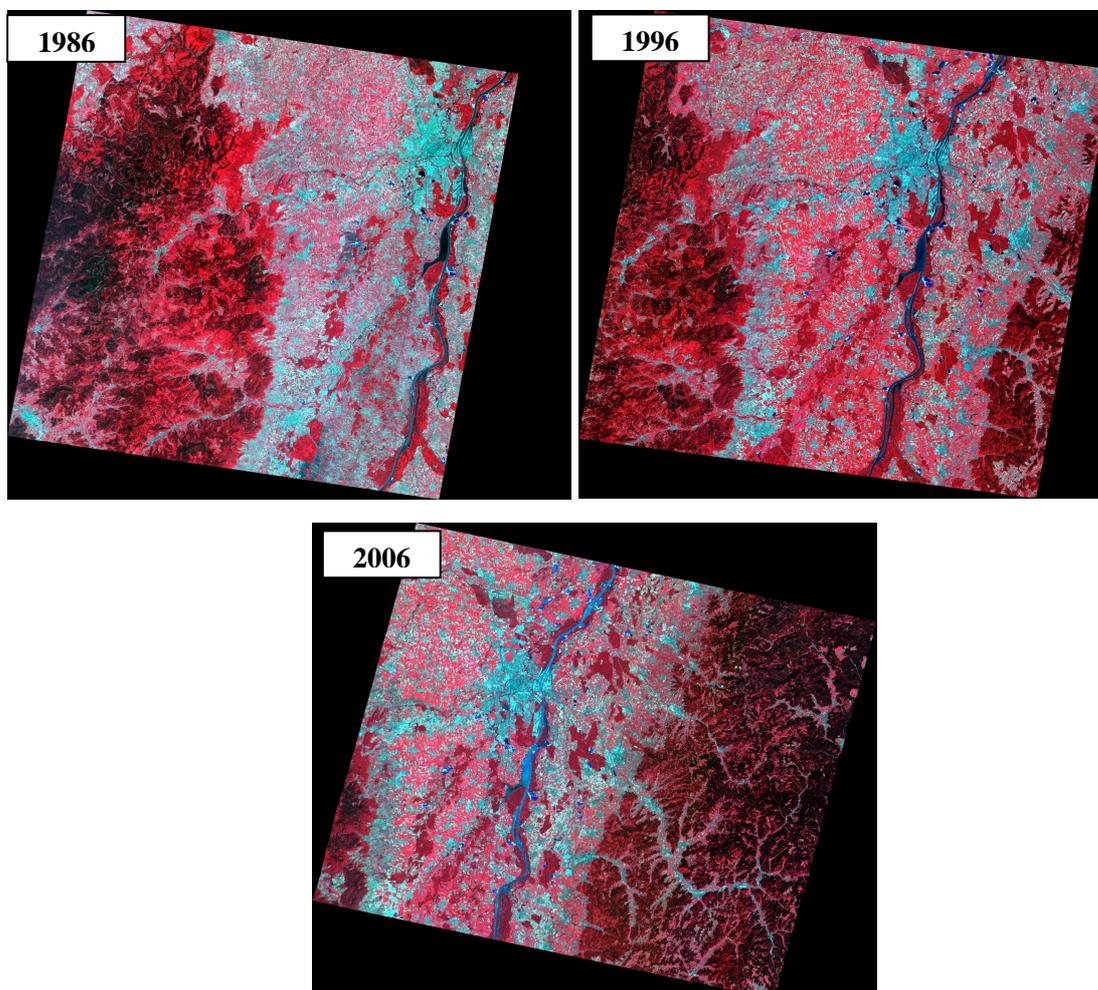


Figure 6. Composition de fausse couleur de trois images SPOT acquise en 1986, 1996 et 2006

La période d'acquisition des images paraît très importante dans l'étude des changements du paysage à partir des données satellitaires. Jensen, 1983 a constaté que les images prises pendant les mois ensoleillés présentent un très bon contraste entre objets urbains et non-urbains et l'utilisation des images acquises dans la même période de l'année pour l'étude diachronique peut réduire les problèmes liés aux différences d'angles solaires, au changement phénologique de la végétation et à la différence d'humidité des sols. Les images utilisées pour cette étude sont cohérentes en termes de période d'acquisition ensoleillée (en juin et en juillet) et de hauteur du soleil (très peu décalée, entre 58° et 62°). Ces images n'ont pratiquement pas de couvert nuageux. Ces paramètres physiques permettent de considérer que les ombres portées sont négligeables et les conditions d'acquisition d'images sont similaires.

Le thème principal de notre étude est axé sur l'évolution du front urbain dans la vallée de la Bruche entre les trois dates de 1986, 1996 et 2006. L'espace urbain, par sa nature très

hétérogène, se complexifie par la présence au sol d'objets différents dans leur forme, direction, taille, matériaux et de dimension très variée selon le type d'habitat. A cette complexité s'ajoutent les contraintes inhérentes à la taille du pixel. En effet, la résolution spatiale de ces images est à 20 m. La combinaison des textures et structures dans les images disponibles permet d'extraire des types urbains similaires grâce à la densité des constructions et la nature de celles-ci. Cependant, les sols nus qui présentent une forte réflectance, peuvent induire des confusions avec les zones industrielles, les quartiers résidentiels ou encore les zones en construction lors de l'interprétation, voire de l'extraction automatique.

2.1.2 Zone d'étude

L'objectif de cette étude est l'observation du processus d'urbanisation dans l'aire urbaine de Strasbourg. Elle est basée sur le résultat de classification de trois images SPOT acquises en 1986, 1996 et 2006. La zone d'étude est essentiellement la partie commune existante dans ces trois images. Elle est concentrée sur la plupart des communes de l'aire urbaine de Strasbourg (voir **Figure 7**).

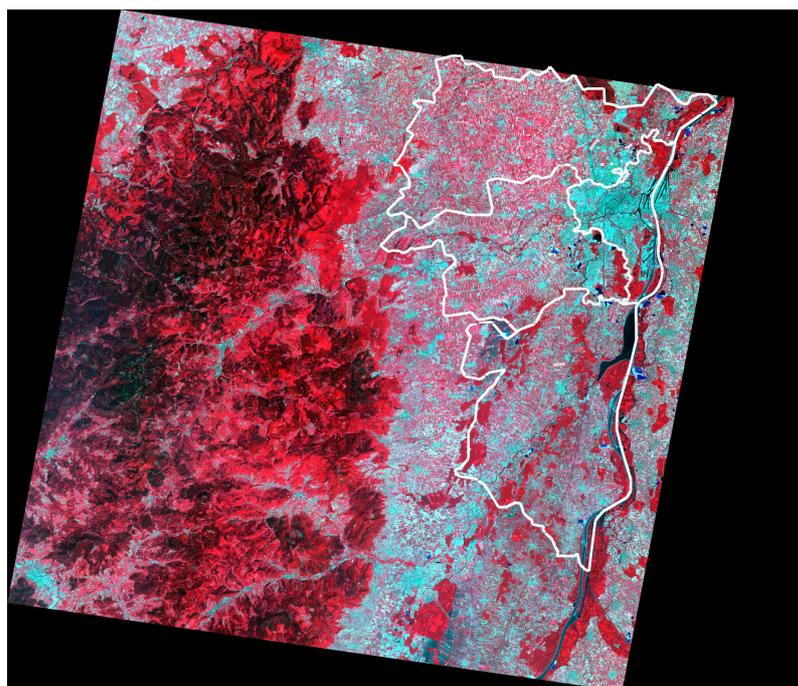


Figure 7. Zone d'étude – partie commune de trois images et compose essentiellement des communes de l'aire urbaine de Strasbourg

2.1.3 Classification

Les classifications de l'occupation du sol de la ville de Strasbourg et ses régions périphériques sont effectuées à partir des images SPOT acquises en 1986, 1996 et 2006 à notre disposition. Elles constituent une étape préparatoire primordiale pour l'analyse du processus d'urbanisation et de périurbanisation.

Nous utilisons la classification supervisée selon l'algorithme de maximum de vraisemblance pour trois bandes de SPOT. La démarche d'une telle classification se décompose en trois étapes : le choix des zones d'entraînement (échantillons) représentatives des thèmes recherchés, l'apprentissage de l'algorithme pour une généralisation sur tous les pixels de l'image et la validation (ou post-classification). La sélection des zones d'entraînement paraît très importante et influence directement les résultats de classification et elle est basée sur la séparabilité entre les zones d'entraînement en utilisant la méthode de divergence transformée. Cet indice est compris entre 0 et 2, où 2 correspond à la séparabilité maximale. Les classes les moins séparables entre elles sont les zones industrielles et commerciales et les espaces nus urbains ou ruraux, la végétation arborée et la végétation herbacée et cultures et, enfin, la végétation herbacée et cultures et les espaces nus urbains ou ruraux (espaces ouverts).

Le choix des zones d'entraînement s'accorde aux classes urbaines recherchées. La représentativité des zones d'entraînement influence directement et forcément sur la qualité du résultat de classification. Les critères de couleur et de texture, qui apparaissent sur une composition colorée, seront pris en compte lors de la sélection des zones d'entraînement. En effet, nous partons de l'idée que chaque variation de couleur ou de teinte correspond nécessairement à un changement de la signature spectrale d'un pixel ou d'un groupe de pixels. L'analyse de graphiques des zones d'entraînement permet de mettre en évidence l'homogénéité de celles-ci.

Le choix des classes thématiques constitue une étape cruciale dans cette opération. Les classes doivent, à la fois, être bien discriminées entre elles et communes aux trois images. Ces objectifs posent un problème concernant la séparabilité spectrale des classes, notamment pour les zones couvertes de végétation ou entre les espaces nus et zones industrielles et commerciales. Les réponses spectrales des différentes cultures sont souvent très proches de la végétation herbacée (Skupinski, *et al.*, 2009).

Nous définissons tout d'abord des classes urbaines. Il s'agit de 7 classes : eau, sol nu, végétation, agriculture, bâti, industrie et commerce Les classes présentées dans le

Tableau 5 sont les résultats d'une confrontation des objectifs avec les possibilités techniques d'extraction des classes thématiques.

Classe	Description
1 Bâti	Espaces dominés par des bâtiments et résidences. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes coexistent avec des surfaces végétalisées et du sol nu, qui occupent de manière discontinue des surfaces importantes.
2 Zones industrielles et commerciales	Zones recouvertes artificiellement par une surface importante (zones cimentées, goudronnées, asphaltées ou stabilisées). Elles comprennent aussi des bâtiments, infrastructures des zones portuaires et infrastructures des aéroports
3 Végétation arborée et herbacée	Formations végétales principalement constituées par des arbres et arbustes ; des plantes à fleurs, de fougères ainsi que des petits végétaux ligneux sous-arbustifs
4 Espaces nus urbains ou ruraux	Espaces ouverts non-bâties et sans végétation
5 Cours et plans d'eau	Cours et étendus d'eau, naturels ou artificiels
6 Agriculture	Espaces présentant des cultures
7 Ombre	Zones de faible niveau d'illumination et obscurcissement consécutif située à des endroits de relief.

Tableau 5. Classes thématiques

La sélection des échantillons pour chaque classe est réalisée comme indiqué ci-dessous :

1. Classe Bâti : c'est la classe présentant essentiellement le centre-ville et les quartiers de résidence (individuel, collectif) à Strasbourg (Hautepière, Cronembourg, Neudorf, Neuhof, Robersau, etc.) et les villes autour qui constituent des quartiers très denses ou dense et continus ou discontinus. Cette classe comprend les espaces résidentiels occupant à plus de 90 % la surface artificialisée, y compris les voies d'accès (réseau de voiries) et des surfaces à revêtement artificiel. On voit sur l'image en composition de vraies couleurs des surfaces du gris sombre au clair. Elle coexiste avec des surfaces végétales et des sols nus et se situe à la périphérie immédiate.
2. Classe Espace industriel et commercial : elle se compose des surfaces des usines, des zones artisanales et industrielles, des zones d'équipements portuaire et aéroportuaire, des quais, des routes des villes. Cette classe est caractérisée par des grandes surfaces ayant des valeurs de réflectance très élevées. Elle a des valeurs de réflectance semblables à celles de classe Sol nu.
3. Classe Eau : c'est une classe composée de l'eau des lacs, des étangs, des rivières.

4. Classe Sol nu : ce sont des terrains libres sans affectation et non bâtis. Il s'agit de sols nus avec des surfaces sans couverture artificielle, des friches industrielles, des zones de construction en cours et des zones naturelles couvertes de sable ou des carrières.
5. Classe Végétation : c'est la classe ayant la surface la plus grande après la classe Agriculture. Nous regroupons dans cette classe les forêts, les zones arborées ou herbacées en ville (jardin, stade, terrains de sport, etc.) et au long des rivières et des îles.
6. Classe Agriculture : ce sont des espaces couverts par les cultures et se situent en dehors de la ville.
7. Classe Ombre : ce sont des surfaces absentes de l'illumination situées à des zones de forte altitude.

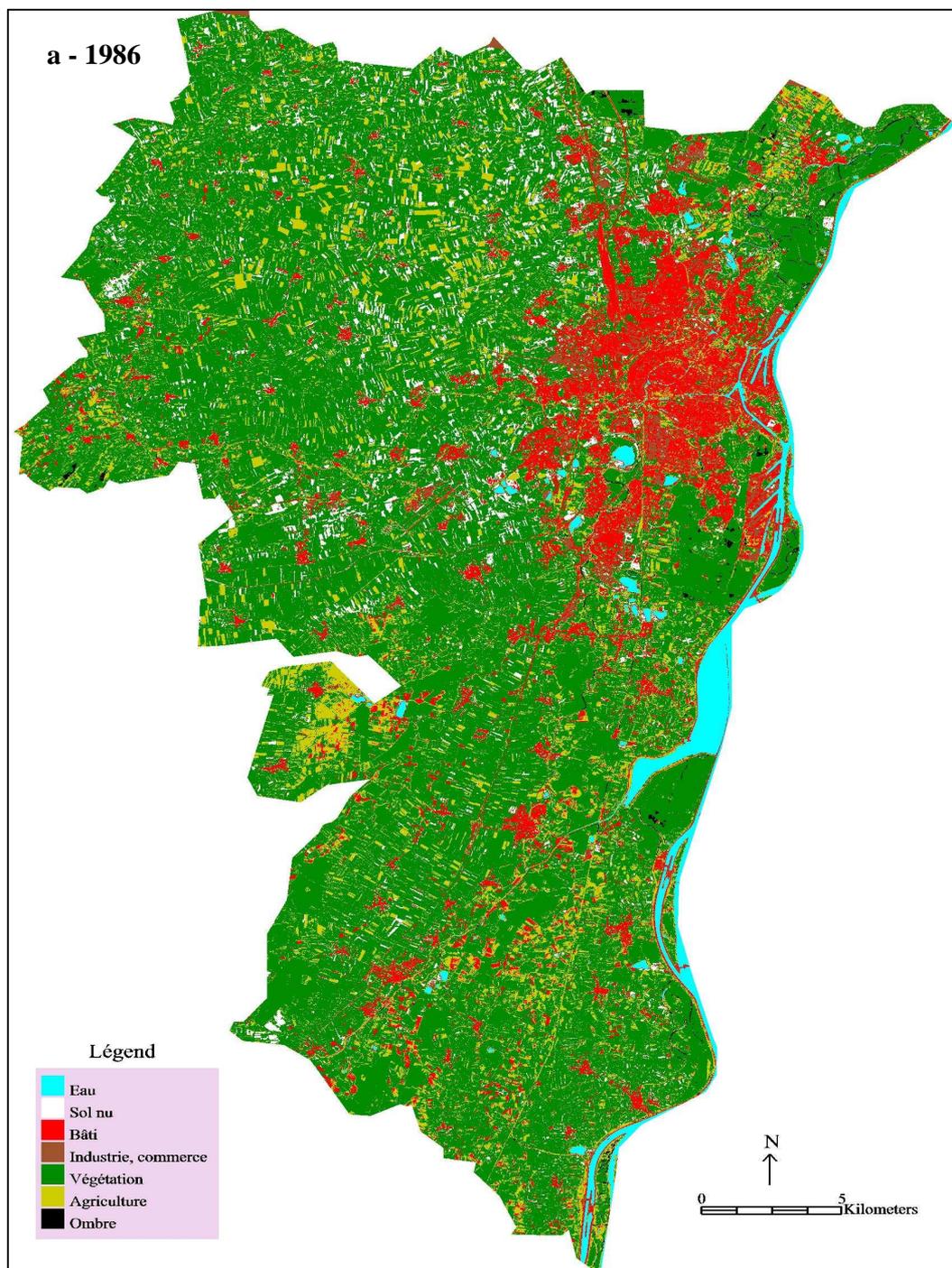
Après la classification des trois images, l'évaluation des résultats a été effectuée par des méthodes quantitatives et qualitatives. Le **Tableau 6** montre la précision élevée obtenue pour la classification des trois images.

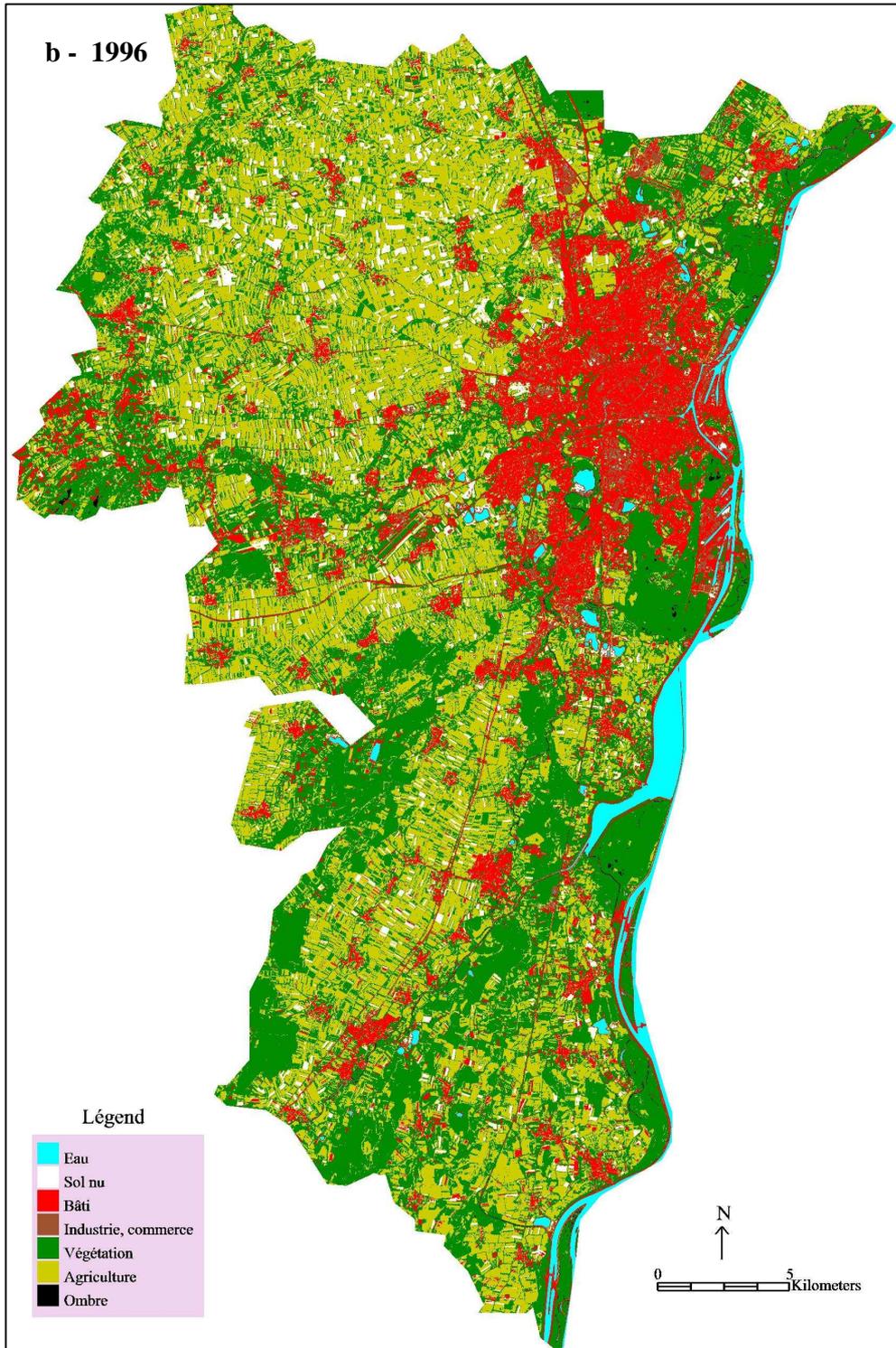
	Précision globale (%)	Kappa (%)
1986	84,24	81,37
1996	81,83	78,4
2006	82,22	79,1

Tableau 6. Précision globale et Indice Kappa de la classification de trois images SPOT

Les premières observations permettent d'analyser les erreurs soulignées au sein des matrices de confusion et de les expliciter à partir de la documentation disponible. Deux grands types d'erreurs ont été relevés : tout d'abord la confusion entre les espaces nus et ceux industriels et commerciaux et ensuite la différence de qualité de détection de la végétation arborée et herbacée et donc sa confusion avec la végétation et les cultures, surtout entre les deux dernières images et celle de 1986. Ceci traduit une sur-présence de la végétation dans l'image 1986.

Les images résultant de cette classification (**Figure 8**) servent ensuite à l'étude des changements spatiaux et temporels de l'occupation du sol dans l'agglomération de Strasbourg.





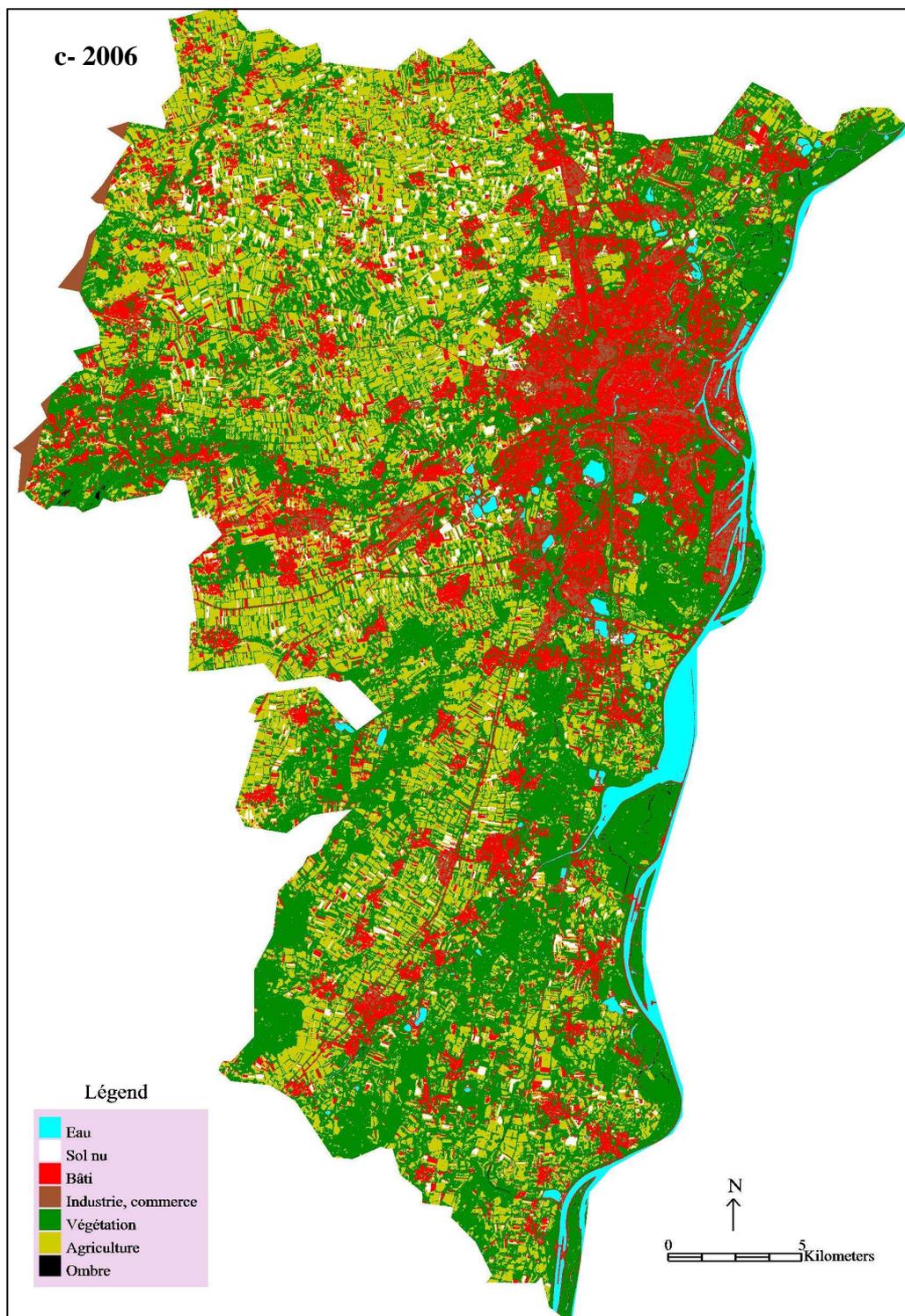


Figure 8. Résultats de classification de trois images SPOT - Occupation du sol dans l'aire urbaine de Strasbourg : a- en 1986, b- en 1996 et c- en 2006

2.1.4 Evolution spatio-temporelle des espaces urbains

L'expansion urbaine apparaît nettement par l'observation visuelle des résultats de la classification en 1986 (**Figure 8a**), en 1996 (**Figure 8b**) et en 2006 (**Figure 8c**). Ces résultats s'accordent aux données statistiques. Cette extension se produit d'abord au centre-ville par l'action de remplissage des espaces vides et végétalisés, et ensuite, dans les communes à proximité de Strasbourg. La carte d'évolution de l'espace urbain permet d'avoir une vision globale de cette croissance (**Figure 10**). Sur une période de 20 ans, nous observons une croissance soutenue depuis les années 1980. Sur une période de 10 ans, la croissance urbaine de la période de 1986-1996 semble plus remarquable que celle de 1996-2006 (**voir Figure 10a et b**) par une forte densification du bâti au sein de l'espace bâti existant et par l'étalement urbain. Ceci correspond à une augmentation de la population des ménages. Lavergne et al. (2007) ont constaté que l'évolution annuelle de la densité de la population sur les deux périodes 1990-1999 et 1999-2005 montre un déplacement du phénomène de densification à l'ouest de la Communauté urbaine de Strasbourg. Dans un rayon de 15 km autour de Strasbourg, le rythme de densification est moindre sur la période récente alors qu'il était soutenu entre 1990 et 1999, notamment sur la première couronne strasbourgeoise.

Cette urbanisation se fait sans doute au bénéfice de dynamiques plus locales autour de villes de la périphérie de l'aire urbaine. Il peut s'agir également d'un étalement plus classique en tâche d'huile de l'aire urbaine strasbourgeoise en rapport avec une plus grande mobilité.

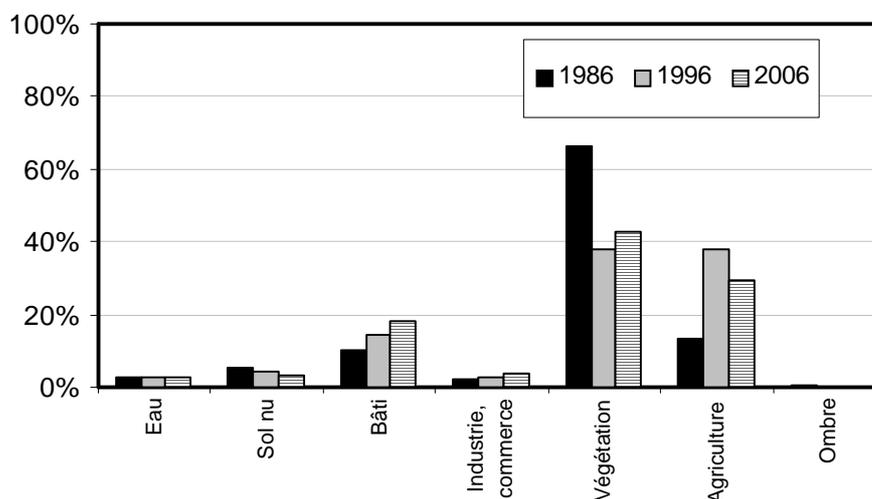


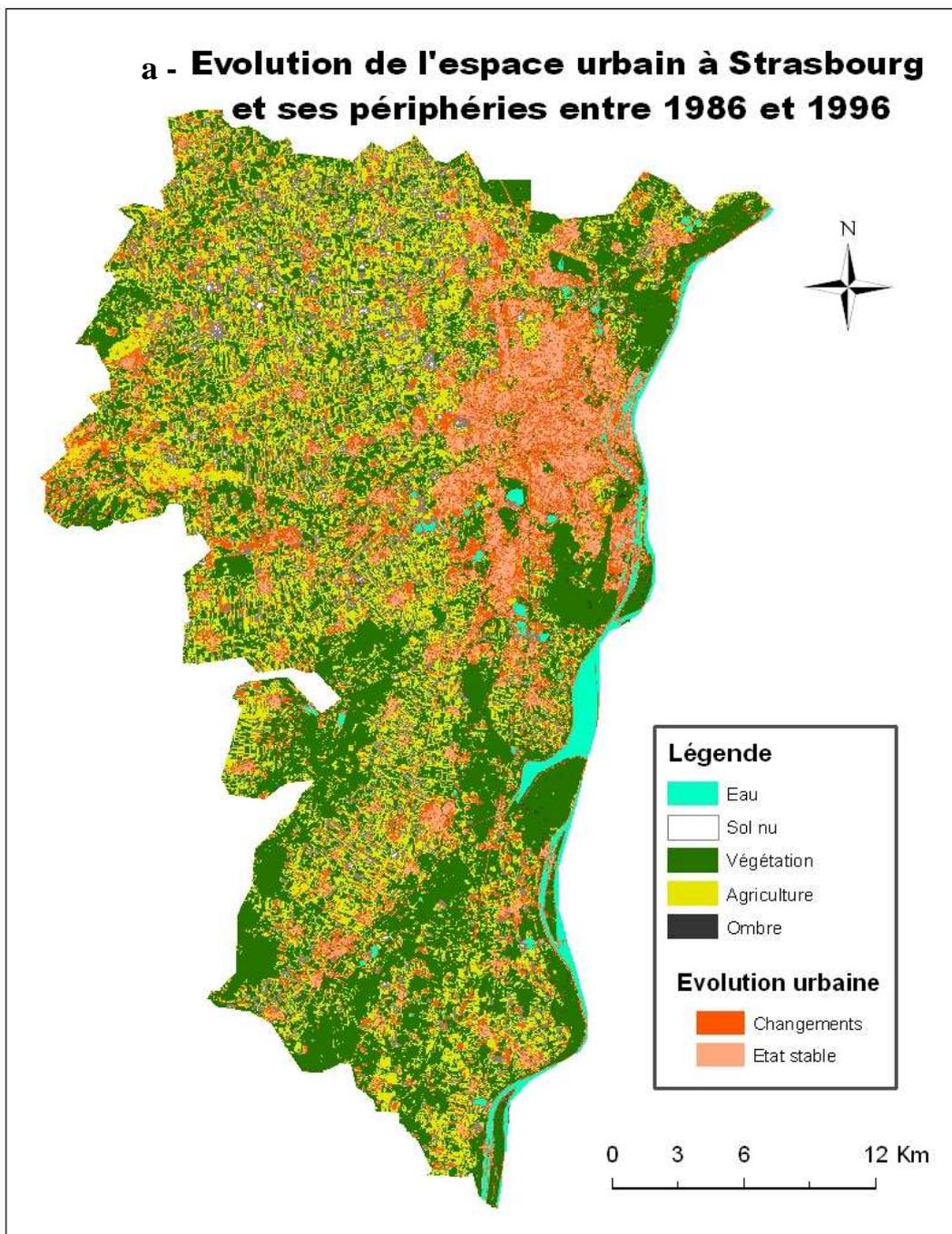
Figure 9. Changement de l'occupation du sol dans l'aire urbaine de Strasbourg entre 1986 et 2006

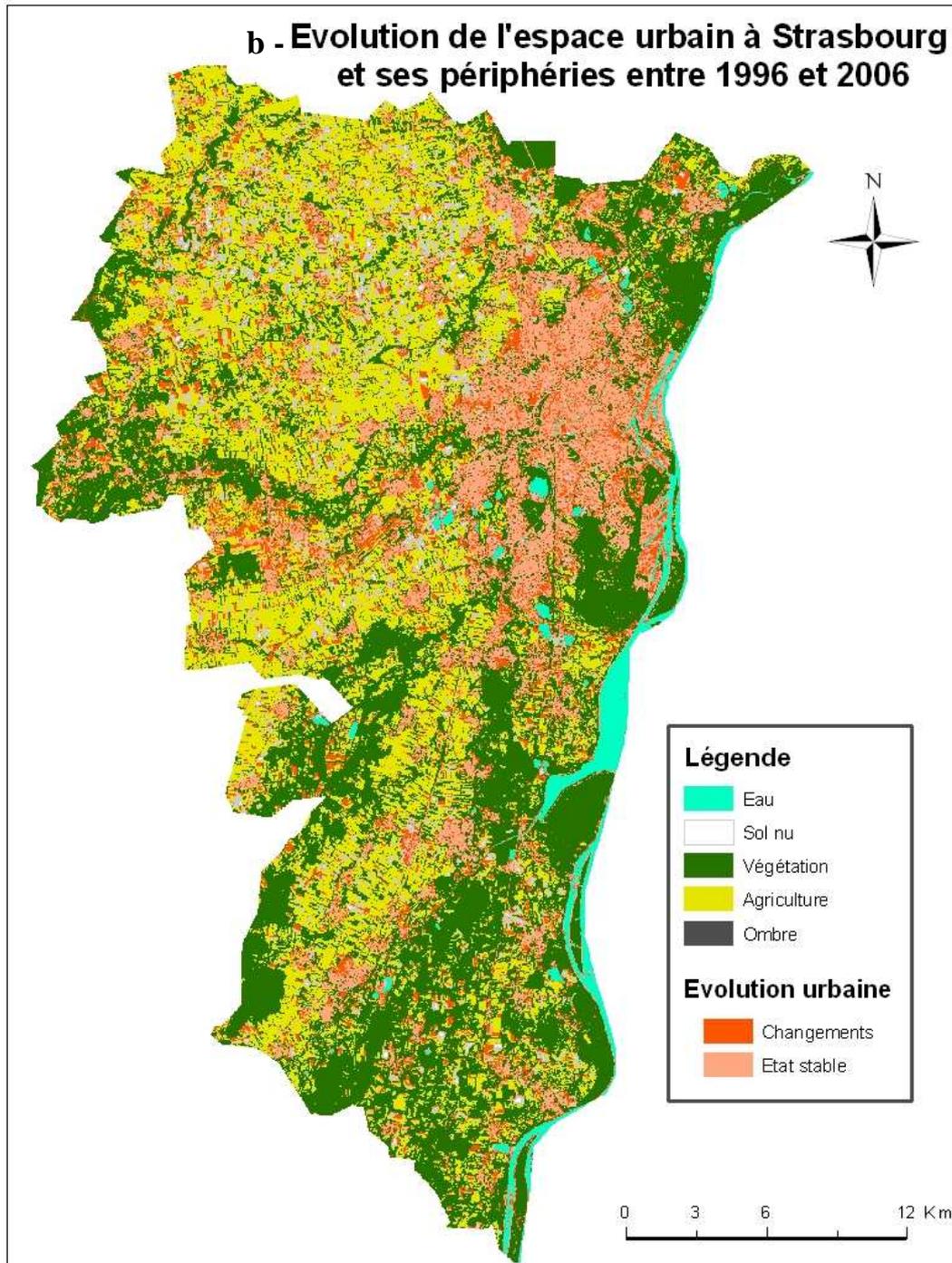
L'extension du bâti montre que les deux classes Bâti et Espace industriel et commercial gagnent leur territoire entre 1986, 1996 et 2006. En moyenne, les surfaces bâties augmentent

4% soit près 124 ha par période de 10 ans. Il s'agit, respectivement, de 10,09% à 14,18% et à 18,28%. Quant aux zones industrielles et commerciales, une croissance de leur surface est moins importante pour la période de 1986-1996 (0,71% soit 6,2 ha) par rapport à la période de 1996-2006 (1,11% soit 9,7 ha).

A l'opposé, les surfaces d'occupation par les classes de Végétation, Sol nu et Agriculture ont diminué (

Figure 9). La sur-présence de la végétation en 1986 résulte de la similarité des pixels agricoles et végétations (voir §1.2.1.3)





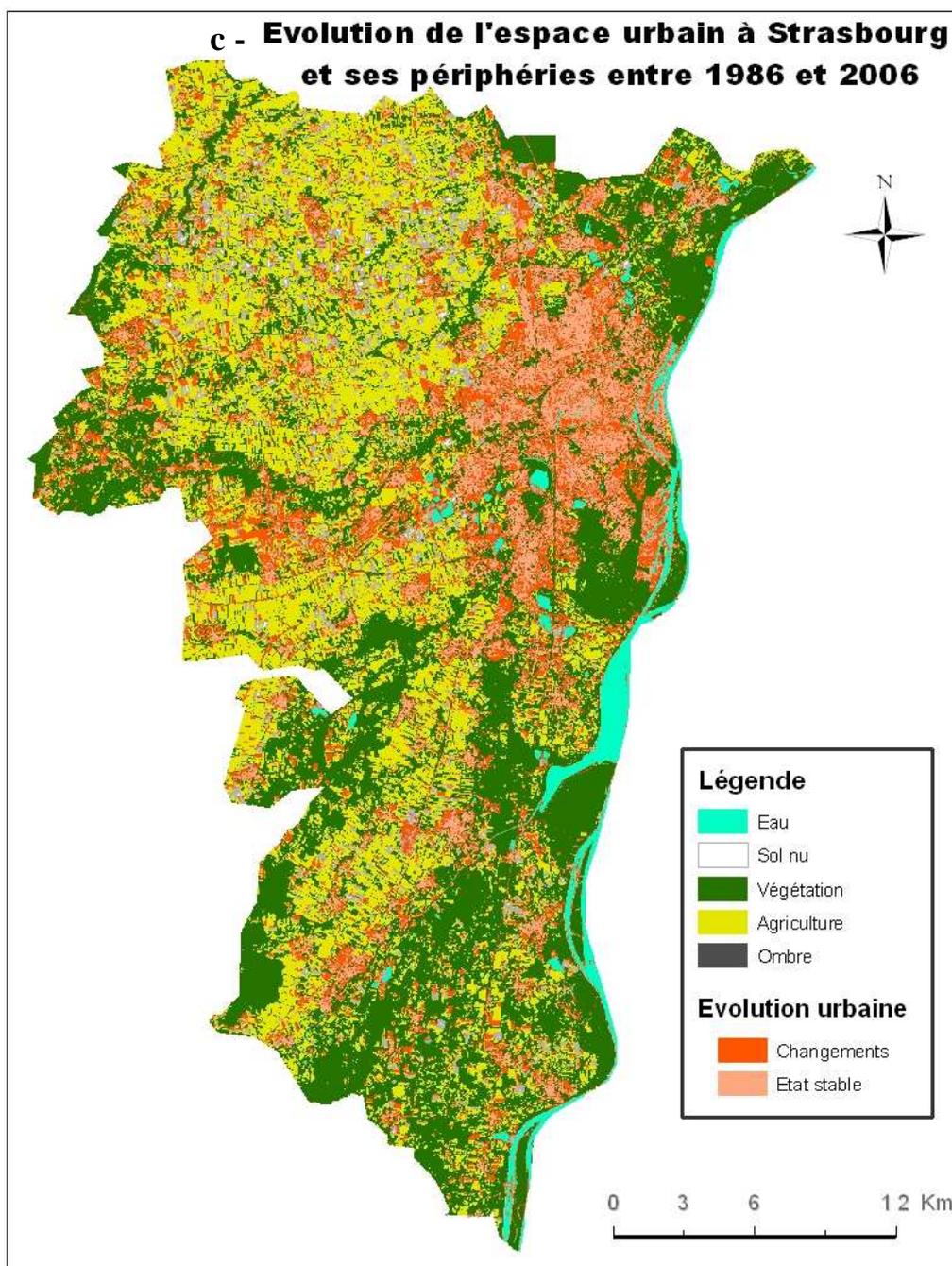


Figure 10. Evolution urbaine dans l'aire urbaine de Strasbourg : a- période 1986-1996, b- période 1996-2006 et c- période 1986-2006

Les résultats de la classification nous permettent un suivi des changements spatiaux et temporels de l'occupation du sol dans la zone d'étude. Nous nous intéressons plutôt à ce qui concerne les dynamiques de l'espace urbain, y compris les zones urbaines couvrant les deux classes Bâti et Espace industriel et commercial. Cette étude est menée à l'échelle de l'aire urbaine de Strasbourg dans l'objectif d'obtenir une vision globale liée à la tendance d'extension spatio-temporelle des surfaces bâties, d'une part et ses impacts sur les autres types de l'occupation du sol, d'autre part.

L'urbanisation a été accélérée durant cette période avec une extension importante de 8% des espaces bâtis après 20 ans par rapport à la surface totale de l'aire urbaine. Les extensions spatiales vers l'ouest, le nord-ouest, le sud et le sud-est représentent une tendance d'étalement urbain pour la période de 1986 et 2006 (l'apparition des nouveaux quartiers d'habitation, des zones industrielles et des chantiers). Cette observation rejoint celle de l'ADEUS (2007). Selon eux, les surfaces dédiées aux activités entre 1982 et 2000 dans les extensions représentent 37% de la consommation foncière en extensions des 20 dernières années. Le rythme de croissance des surfaces dédiées à l'activité au sein de la tache urbaine a été deux fois et demie plus rapide (+35 %) que celui de la tache urbaine dans sa globalité (+14 %).

A l'échelle intra-urbaine, l'évolution urbaine est omniprésente dans toutes les directions. Cette évolution est en fait une transformation des surfaces végétales ou vides en surfaces bâties afin de répondre aux besoins de logement et d'équipement urbain dus à la croissance démographique. Il s'agit principalement de la densification urbaine produite à cette échelle. Les quartiers le plus remarqué sont Neudorf, Neuhof, Cronembourg, HautePierre avec les projets de réaménagement.

Ces observations viennent de résultats de traitement d'images satellites. Les limites de la classification sont connues : elles sont liées à la méthode employée mais aussi aux limites du capteur et aux choix des échantillons. Sur le plan théorique, celles-ci permettent de confirmer que l'algorithme de classification selon le maximum de vraisemblance fournit de bons résultats. La détection des changements permet alors d'établir des cartes et des statistiques afin de détecter et de localiser les pixels qui ont changé de classe et la nouvelle classe à laquelle ils appartiennent.

Sur le plan thématique, ces résultats permettent d'identifier la direction de la croissance urbaine et mettent en évidence, qualitativement, la transformation entre les catégories d'occupation du sol. Notons que les superficies calculées ne sont pas quantitativement exactes. Il est évident que les contrôles de terrain ainsi que les images à des résolutions spatiales plus élevées (10 m, 5 m, 1 m) ou bien les photos aériennes acquises à la même date sont nécessaires pour vérifier la validité des classifications qui engendrent quelquefois des erreurs d'affectation. Ces classifications et leur comparaison diachronique peuvent être améliorées par l'utilisation de données obtenues à l'aide de capteurs ayant une meilleure résolution spatiale et spectrale.

Ces résultats seront utilisés pour l'analyse de paysage et ses changements spatio-temporels dans la partie suivante par l'approche de la métrique paysagère.

Partie 2

CHANGEMENT DU PAYSAGE DANS L'AIRE URBAINE DE STRASBOURG – APPROCHE DE LA METRIQUE SPATIALE

1. INTRODUCTION

L'urbanisation se fait, en général par deux processus : 1- l'extension urbaine par la construction des lotissements, des zones d'activités. L'urbanisation s'effectue sur d'assez grandes surfaces et 2- La densification par des extensions ponctuelles en bordure des bourgs, des villages et des quartiers ou encore le « remplissage ». Dans ce cas, l'urbanisation se fait à l'intérieur du tissu urbain par remplissage des espaces vides.

Selon l'ADEUS (2009), 14300 hectares ont été consommés entre 1982 et 2000 dans toute la région Alsace pour la construction de bâtiments (logements et locaux d'activité hors infrastructures routières), soit environ 800 ha/an. Cette consommation totale correspond à l'équivalent de deux fois la surface du ban communal de Strasbourg. La consommation foncière s'est nettement ralentie par rapport aux années 1960 et 1970.

Durant les 20 dernières années, l'extension urbaine représente un peu plus de la moitié des surfaces supplémentaires consommées (52%) entre 1982 et 2000. L'autre moitié correspond donc à une consommation par «petites extensions linéaires ou ponctuelles» ou au sein de la tache urbaine (densification).

Les deux tiers de la consommation foncière se sont faites dans le Bas-Rhin (530 ha par an). Le rythme d'accroissement de la tache urbaine est ainsi deux fois plus rapide dans le Bas-Rhin (+31 %) que dans le Haut-Rhin (+18 %). Le Bas-Rhin se caractérise par une plus forte consommation foncière par extensions urbaines significatives (56 %) alors que celle du Haut-Rhin s'est faite majoritairement par «densification» (56 %).

La part des trois grandes agglomérations dans la construction neuve régionale passe de la moitié au tiers en 25 ans. Les communes de moins de 5000 habitants s'accaparent aujourd'hui 60% du volume total de logements construits en Alsace alors qu'elles n'en représentaient que 42% en 1980. Ainsi la pression urbaine s'éloigne des abords des grandes agglomérations, fait tache d'huile et concerne des territoires jusque-là épargnés.

La construction neuve dans la CUS reste, de ce fait, plus faible en 2007. Strasbourg perd du poids par rapport à l'ensemble de la CUS en termes de logements construits, alors que les communes de la première et deuxième couronne augmentent leurs volumes de manière significative.

Dans un tel contexte, la ville de Strasbourg continue à influencer son aire urbaine par sa forte polarisation. C'est pourquoi l'objectif de cette partie est d'identifier et de caractériser le changement du paysage urbain et péri-urbain sous l'effet de l'urbanisation entre 1986 et 2006 à partir des résultats de classifications de trois images satellites de SPOT acquises en 1986, 1996 et 2006 en utilisant la méthode des métriques spatiales.

Plusieurs questions sont posées :

1. Quelle est l'ampleur de l'urbanisation dans les différentes parties de l'aire urbaine entre 1986 et 2006 ?
2. Quelles sont les vitesses de ce processus spatial à chaque période de temps ?
3. Comment se positionne la ville de Strasbourg (Centre) dans ces dynamiques spatio-temporelles de l'espace urbain et périurbain ?
4. Comment la structure du paysage change-t-elle le long d'un gradient urbain-périurbain dans le temps ? Quels changements au sein des paysages urbanisés aux paysages ruraux ?
5. Comment l'extension de l'espace bâti contribue-t-elle au processus d'urbanisation ? Cette extension organise-t-elle la forme de la croissance urbaine ?

L'approche de la métrique spatiale a été développée plus particulièrement en écologie du paysage, dans les années 1980 à partir de la théorie de l'information et de la géométrie fractale (Mandelbrot, 1975 ; Macgarigal et Mark, 1994 ; Herold, *et al.*, 2005). Les mesures sont calculées sur les taches du paysage (patch, ensemble) définies comme des zones homogènes d'un paysage spécifique (par exemple : sols agricoles, zone industrielle, parc, etc.). Elles facilitent la quantification de l'hétérogénéité spatiale des taches ou d'un ensemble de taches appartenant à une classe. Les métriques paysagères (ou indices) se déclinent selon Antrop, 2000 en deux familles aux objectifs distincts : 1) la caractérisation d'attributs additionnels pour la classification des types de paysage ; 2) l'extraction d'indicateurs de changement ou de perturbations du paysage. Comme le soulignent Herold, *et al.*, 2003 « *spatial metrics can be defined as quantitative and aggregate measurements derived from digital analysis of thematic-categorical maps showing spatial heterogeneity at a specific scale and resolution* ». L'usage des métriques spatiales peut ainsi être appliqué pour des analyses multi-échelles et multi-temporelles permettant une extraction des changements fondée sur les modifications du couple homogénéité/hétérogénéité spatiale. Trois échelles d'analyse emboîtée du paysage peuvent être distinguées selon McGarigal, *et al.*, 2002 :

- *des indices de surface, bordure ou forme* peuvent être définis pour chaque composant du paysage ou noyau (patch-level),
- *des indices définis pour des groupes d'un même type*, analysant des propriétés additionnelles résultant de la configuration spatiale du type (class-level) comme la distance moyenne peuvent compléter l'information,
- *des indices calculés sur l'ensemble du paysage*, par l'analyse de propriétés additionnelles résultant de la configuration spatiale de tous les composants (landscape-level) comme la diversité peuvent être calculés.

Ces indices sont déterminés selon des logiques spatiales spécifiques liées soit à l'élément unitaire soit à un groupe à partir duquel sont calculées les relations entre éléments tel l'isolement, la proximité, le contraste, la contagion, l'entremêlement (interspersion), la connectivité ou la diversité.

Il existe de nombreux indices calculés à partir de données spatiales, notamment satellites au niveau du pixel (pixel-based), comme la contagion ou la lacunarité, calculés pour tous les pixels d'une tache (Gustafson, 1998) ou au niveau de la tache (ensemble de pixels) (patch-based), comme la taille, la forme, la longueur de la bordure, la densité de tache ou la dimension fractale.

Appliqués aux espaces anthropiques, diverses stratégies sont développées :

- L'analyse de gradient basée sur la tache permet à Weng (2007) de révéler les effets de l'urbanisation sur les formes de paysage. L'analyse des métriques spatiales permet de relever le niveau de diversité du paysage et de fragmentation paysagère qui est lié au niveau d'urbanisation. La structure paysagère change selon un gradient urbain – rural. Le paysage urbain a sa signature spatiale propre qui fait son identité unique et distinguable à d'autres paysages. De plus, le paysage urbain paraît dynamique et change continuellement en accord avec la croissance urbaine.

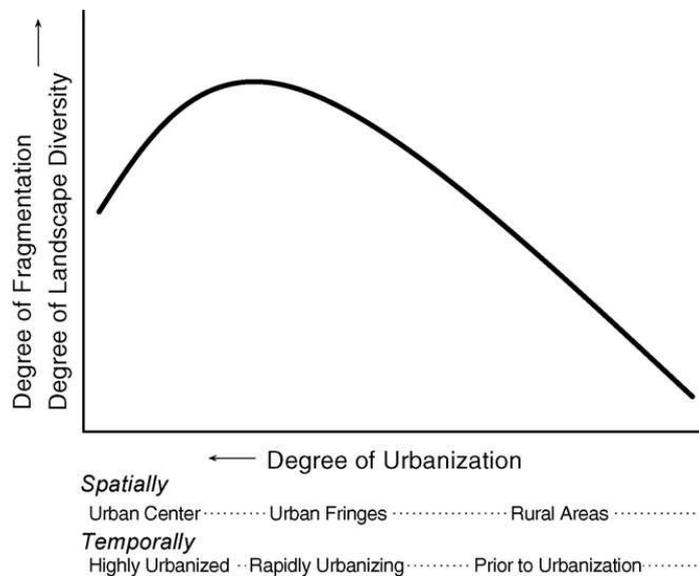


Figure 11. Niveau d'urbanisation en accord avec le niveau de fragmentation et diversité du paysage (Weng, 2007)

Le seuil de fragmentation et de diversité du paysage est en relation avec le niveau d'urbanisation (**Figure 11**). L'espace où se trouve le niveau le plus élevé de fragmentation et de diversité du paysage est la frange urbaine qui connaît une importante urbanisation plus qu'au centre-ville (Weng, 2007). De ce fait, le noyau urbain, la frange « urbain et rural » constituent trois signatures spatiales distinctes et identifiés par leur variété paysagère.

- L'utilisation conjointe des données de télédétection et de métrique spatiales: Antrop et Van Eetvelde (2000) utilisent les photos aériennes et les métriques paysagères pour étudier le paysage suburbain à la ville de Ghent, Belgique. Quant à Herold, *et al.* (2003), ils mettent en valeur des applications plus complexes, intégrant la télédétection, les métriques spatiales et les modèles de croissance urbaine dans le suivi et la planification urbaine à Santa Barbara,

Californie. La tendance du changement temporel du paysage en réponse à l'urbanisation est similaire à l'analyse du gradient spatial. En fait, l'augmentation de la surface bâtie et résidentielle provoque une diversité et une forte fragmentation du paysage. Cependant, certaines études montrent l'intensité du changement paysagère varie durant le processus d'urbanisation (Herold, *et al.*, 2003). Le début d'une urbanisation rapide cause des altérations importantes du paysage mais l'intensité d'urbanisation se réduit proportionnellement à la diminution d'espace libre. La diversité et la fragmentation du paysage baisse là où l'occupation du sol urbain domine.

Tous soulignent cependant la sensibilité des métriques paysagères à la qualité de données utilisées, aux méthodes employées (classification et interprétation) et à la complexité et l'hétérogénéité du paysage. Outre ces limites, Herold, *et al.* (2005) soulignent aussi des problèmes d'application de ces métriques spatiales concernant la précision spatiale et thématique, la sélection des métriques et la définition du domaine spatial de l'étude.

- La précision spatiale est donc, dans une telle approche, un des freins les plus importants à leur utilisation. Plus elle est élevée et plus la structure du paysage a une hétérogénéité forte.
- La précision thématique, elle, est liée à la précision de la classification. Une précision thématique trop importante peut conduire à une perte d'identité des paysages, en accentuant des structures homogènes non caractéristiques.
- La sélection des métriques, pose donc un certain nombre de questions car chacune relève d'une signification spécifique selon le contexte.
- La définition du domaine spatial, quant-à-elle, représente finalement un problème tout aussi crucial car elle concerne à la fois la subdivision spatiale de la zone d'étude (limite administrative, parcelle, etc.) et l'unité spatiale du calcul (grille de calcul des cellules, fenêtre quadratique ou kernel à appliquer).

2. ZONE D'ETUDE

L'objectif de cette étude est l'observation du processus d'urbanisation dans l'aire urbaine de Strasbourg. Elle est basée sur le résultat de classification de trois images SPOT acquises en 1986, 1996 et 2006 (première partie). La zone d'étude est essentiellement la partie commune existante dans ces trois images. Elle est concentrée sur la plupart des communes de l'aire urbaine de Strasbourg.

Dans l'objectif de suivre le processus d'urbanisation et de péri-urbanisation de l'aire urbaine de Strasbourg entre 1986 et 2006, nous divisons la zone d'étude en 4 secteurs : Centre (la ville de Strasbourg), Ouest (des cantons de Mundolsheim, Geispolsheim, Molsheim et Illkirch – Graffenstaden), Nord (des cantons de Brumath, Mundolsheim, Truchtersheim, Bischheim, Schiltigheim et Wasselonne) et Sud (le reste de Geispolsheim, Erstein et Benfeld) (voir **Figure 12**).

Le secteur Centre (la ville de Strasbourg) est considéré comme pôle d'attractivité pour les trois secteurs périphériques Nord, Sud et Ouest avec une forte densité de bâti. Quant aux trois secteurs Nord, Sud et Ouest, ils constituent des périphéries proches et lointaines de Strasbourg et présentent un vaste espace agricole et semi-agricole. Les villes en périphérie proche de Strasbourg paraissent très urbanisées après deux décennies. Les surfaces bâties des villes de ces trois secteurs ont visiblement augmentées. La **Figure 12** illustre la zone d'étude avec à l'Est les quartiers de Strasbourg et les réseaux routiers et autoroutiers qui irriguent les communes périphériques et une vaste zone rurale.

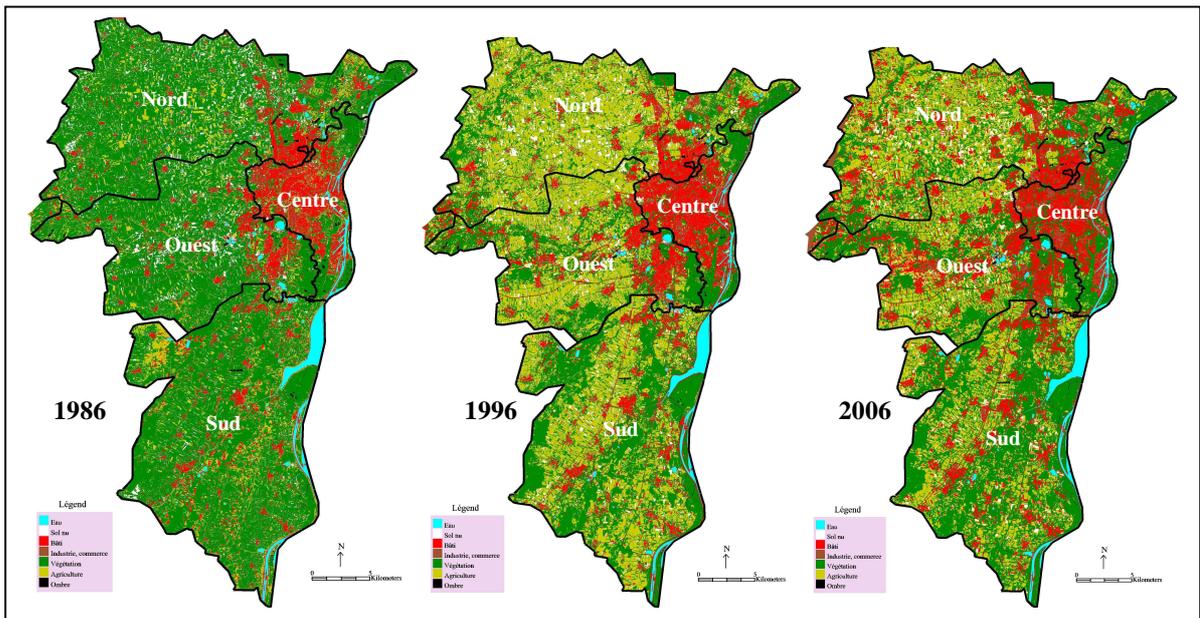


Figure 12. Les directions d'évolution de l'occupation du sol sont contraintes par la frontière à l'Est mais aussi par la présence d'une activité de production agricole à l'Ouest et Nord Est et Sud

Le découpage de l'aire d'étude permet essentiellement :

- D'identifier l'ampleur du processus d'urbanisation et de péri-urbanisation,
- D'identifier les vitesses du processus d'urbanisation pour chaque secteur à chaque période,
- De caractériser le changement de la structure paysagère le long de trajectoires urbain-périurbain,
- De caractériser la forme de l'extension urbaine dans l'aire d'étude.

Le

Tableau 7 illustre une explosion de l'espace bâti et des zones industrielle et commerciale pendant ces 20 ans. La végétation qui occupe une surface très remarquable en 1986 a

fortement diminué après 10 ans. Par contre, l'agriculture comptabilise en conséquence un accroissement une grande surface entre 1986 et 1996 pour ensuite diminuer.

	1986	1996	2006
Sols nus (S)	5759	3530	1667
Cultures (C)	14251	27051	28189
Végétation (V)	52948	36314	33753
Surfaces Industrielles (I)	2085	2996	3244
Bâti (B)	10290	15856	18776

Tableau 7. Surface en hectare des classes d'occupation du sol dans la CUS en 1986, 1996 et 2006

Le **Tableau 8** présente de manière détaillée quels sont les types d'occupation qui ont le plus évolué sur la période. L'extension du bâti montre que les deux classes Bâti et surfaces industrielles et commerciales gagnent en surface entre 1986, 1996 et 2006. En moyenne, les surfaces bâties augmentent de près de 20% par période de 10 ans. Les changements d'occupation entre les dates sont concentrés surtout sur le passage de sols cultivés vers Bâti et végétation vers Bâti, ce qui équivaut à environ 12 000 ha en 20 ans. Ce qui est conforme aux données de l'observatoire du foncier (Notes 25, ADEUS 2010). Quant aux zones industrielles et commerciales, la croissance de leur surface est moins importante pour la période de 1986-1996 (5.3% soit 810 ha) par rapport à la période de 1996-2006 (8.7% soit 810 ha). En contre point, les surfaces de Végétation, Sol nu et Culture ont donc fortement diminué.

	Etat stable										Changements											
	S-S		I-I		C-C		V-V		B-B		S-B		V-B		C-B		S-I		V-I		C-I	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%	Ha	%
86-96	436	7,58	1015	48,7	4357	30,6	26841	50,7	5828	56,6	998	17,3	5118	9,7	2959	20,8	216	3,7	322	0,6	272	1,9
96-06	222	6,28	1566	52,3	13273	49,1	21562	59,4	9713	61,3	854	24,2	2845	7,8	4238	15,7	230	6,5	317	0,9	365	1,3
86-06	192	3,3	876	42	4646	32,6	24249	45,8	6062	58,9	1439	25	7075	13,4	3035	21,3	273	4,7	831	1,6	363	2,5

Tableau 8. Transition entre les classes d'occupation importantes dans la CUS entre 1986 et 2006 (ha) Sols nus-Bâti ; Végétation-Bâti ; Cultures –Bâti ; Sols nus-Surfaces Industrielles ; Végétation-Surfaces Industrielles ; Cultures-Surfaces Industrielles

Une zone particulière : la basse vallée de la Bruche constitue un ensemble de communes à l'Ouest de l'agglomération et de sa couronne proche qui couvre environ 3650 hectares. La basse vallée de la Bruche est au centre d'enjeux économiques, écologiques et humains particulièrement forts. L'attractivité des communes placées le long de cette vallée provoque une extension des surfaces bâties dans une zone sensible aux inondations surtout dans les zones de peuplement à proximité de Strasbourg comme Eckbolsheim, Entzheim ou Lingolsheim.

3. INDICES_DU_PAYSAGE

L'analyse du paysage effectuée à partir d'images classées permet d'avoir une information supplémentaire sur les caractéristiques des changements du paysage urbain et périurbain. Bien que l'observation des résultats puisse aboutir à la description des changements au sein des éléments du paysage, elle les laisse difficilement identifiables et quantifiables en termes de formes paysagères, de fragmentation ou de renforcement. Les calculs d'indices du paysage, basés sur un raisonnement systématique appliqué aux éléments de l'image classée fournissent eux une vision plus riche du paysage.

La plupart des mesures quantitatives sont calculées à partir du logiciel FRAGTATS (McGarigal, *et al.*, 2002). Nous utilisons dans ce travail deux échelles d'analyse : le paysage et le composant du paysage à travers l'arrangement spatial des taches adjacentes fondé sur les relations spatiales et fonctionnelles. Les métriques paysagères sont normalement utilisées pour **quantifier les caractéristiques spatiales des composants, classes de composants ou mosaïques complets du paysage** (McGarigal, *et al.*, 2002). Le terme « composant » se réfère à des unités homogènes indépendantes de l'échelle d'observation présentes dans un paysage (par exemple, *forêt, urbain, sol nu*, etc.).

Divers indices spatiaux sont appliqués dans les études d'écologie (McGarigal, *et al.*, 2002). Leurs descriptions exhaustives seraient en dehors du contexte de ce travail de recherche et, pour cette raison, on se réfère uniquement à ceux que nous avons estimés intéressants pour caractériser le changement du paysage et de la forme urbaine de l'aire d'étude dans le processus d'urbanisation de Strasbourg et de ses environs. Les indices sélectionnés pour ce travail ont été déjà utilisés dans d'autres études urbaines (Cabral *et al.*, 2005 ; Herold, *et al.*, 2003; Luck et Wu, 2002 ; Skupinski, *et al.*, 2009)

Trois groupes d'indices sont utilisés :

- (1) Les indices de densité, surface et bordure : densité des composants - PD, taille moyenne des composants – MPS, indice du composant majeur - LPI, pourcentage du paysage – PLAND ;
- (2) L'indice de diversité : Indice d'équitabilité de Shannon - SHEI
- (3) Les indices de contagion et d'intersection : Contagion – CONTAG, Indice d'agrégation - AI.

Les deux premiers rendent compte de la fragmentation du paysage : c'est à dire de la diversité et de la complexité de l'arrangement spatial de l'ensemble des modes d'occupation du sol à l'échelle du paysage ainsi qu'à l'échelle de composant. Le troisième informe sur la continuité et connectivité des composants du paysage.

3.1 Les indices de densité, surface et bordure

3.1.1 Densité des composants (Patch density, PD)

La mesure de la densité des composants est un indicateur reconnu par nombre de composants du paysage sur une unité spatiale (100 ha). Il est pour objectif d'évaluer l'état de fragmentation du paysage.

La formule est selon l'échelle d'analyse:

Équation 4. Densité des composants dans le paysage

Echelle du paysage : $PD = \frac{N}{A} (10000) \times (100)$

Équation 5. Densité des composants dans la classe

Echelle de classe : $PD = \frac{n_i}{A} (10000) \times (100)$

Où :

N : nombre total de composants dans le paysage

n_i : nombre total de composants d'une classe

A : superficie totale du paysage en m²

Il est un bon complément aux autres indicateurs proposés précédemment puisqu'il va permettre d'apprécier la fragmentation ou l'uniformité du paysage. Ainsi, le résultat obtenu est le nombre de composants du paysage ou d'un type d'occupation du sol par rapport à la surface totale du site. L'unité de mesure de cet indice est un nombre de taches pour 100 hectares.

3.1.2 La taille moyenne des composants (Mean Patch Size, MPS)

Équation 6. Taille moyenne des composants

$$MPS = \frac{A}{N} \left(\frac{1}{10000} \right)$$

MPS correspond entre la surface totale par m² des composants du paysage et le nombre des composants dans le paysage divisé par 10000. Comme PD, il renseigne les mêmes informations pour le paysage d'étude mais il permet de relever des caractéristiques propres pour chaque paysage particulier.

3.1.3 Indice de composant majeur (Largest Patch Index, LPI) et mesure de la fragmentation

Cet indice semble encore être relativement peu utilisé dans l'étude des paysages. Cependant, il offre la possibilité d'appréhender l'évolution de la mosaïque du paysage dans son organisation spatiale puisqu'il mesure la part de la tache la plus vaste de chaque habitat dans le paysage.

La formule de cet indice à l'échelle de la classe est :

Équation 7. Le composant majeur

$$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} (100)$$

Où :

A_{ij} = surface en m² du composant ij (composant le plus vaste de chaque classe)

A = surface totale du paysage (m²)

Cet indice se calcule au niveau classe et il permet de mesurer la dominance d'une classe dans le paysage par rapport aux autres. Au niveau de l'évolution spatiale des différents habitats présents, cet indice sera d'une très grande utilité.

3.1.4 Pourcentage du paysage (Percent of landscape, PLAND)

Équation 8. Pourcentage du paysage

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$$

P_i : proportion de paysage occupée par classe i

a_{ij} : surface en m² du composant ij

A : surface totale du paysage (m²)

PLAND mesure l'abondance proportionnelle de chaque classe dans le paysage. Il correspond à la surface totale des composants d'une même classe sur la surface du paysage considéré. Il prend des valeurs entre 0 et 1. Il s'approche à 0 quand la classe occupée est très peu présente dans le paysage et il est égal à 1 quand sa présence est maximale.

3.2 Les indices de contagion et d'intersection

3.2.1 Contagion (CONTAG)

Cet indice mesure la probabilité d'un pixel urbain d'être adjacent aux pixels de la même classe, multipliée par 100. Elle prend des valeurs entre 0 et 100. Une valeur proche de 0 indique que les composants du paysage sont très fragmentés.

Équation 9. Indice de contagion

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \left[P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \times \left[\ln \left(P_i \left(\frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right) \right]}{2 \ln(m)} \right] \times 100$$

où P_i est la proportion du paysage occupée par le composant du type i (classe i); g_{ik} est le nombre d'adjacences entre les pixels des classes i et k (classe *urbain* et *non-urbain*); et m est le nombre de composants d'une classe présents dans le paysage.

3.2.2 Indice d'Agrégation (AI)

Cet indice de configuration spatiale ou d'agrégation spatiale, appelé AI (Aggregation Index), fait référence à l'arrangement spatial et au regroupement des objets sur l'image. Il renseigne sur la fréquence des connexions entre pixels d'une même classe de paysage (Robbez-Masson *et al.*, 1999), se prêtant ainsi à une quantification de l'organisation du paysage. L'indice d'agrégation est calculé à partir d'une matrice d'adjacence (de contiguïté) montrant la fréquence des pixels qui apparaissent côte à côte. L'AI est défini par la formule suivante :

Équation 10. Indice de l'agrégation

$$AI = \left[\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] (100)$$

g_{ii} = nombre de contacts entre les pixels d'une classe i

$\max - g_{ii}$ = nombre maximal de contacts entre les pixels d'une classe i

AI = 0 : il n'y a aucun contact entre chaque composant dans une classe

3.3 Indice de diversité

3.3.1 L'indice Shannon d'équitabilité (Shannon's Evenness Index, SHEI)

Équation 11. Indice d'équitabilité de Shannon

$$SHEI = \frac{-\sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i)}{\ln m}$$

Avec

P_i : l'abondance proportionnelle des composants d'une classe i

m : nombre de classes de composants dans le paysage

C'est un indice complément de la dominance. Il montre la proportion de l'abondance de différents types d'occupation du sol dans le paysage. SHEI est égal à 0 quand le paysage contient un seul composant et égal à 1 quand les abondances proportionnelles entre les types d'occupation du sol sont les mêmes.

Le **Tableau 9** résume les indices utilisés pour cette étude ainsi que leur description, valeur et échelle d'analyse.

Indice	Abréviation	Description	Range	Echelle d'analyse
Densité des composants	PD	Nombre de composants par 100 hectares	PD>0	Paysage
		Nombre de composants de chaque classe par 100 hectares	PD>0	Composant
Taille moyenne des composants	MPS	Taille moyenne pour tous les composants dans le paysage par 100 hectares	MPS>0	Paysage
Indice d'équitabilité de Shannon	SHEI	Distribution de proportion de différents types d'occupation du sol dans le paysage	0≤SHEI≤1	Paysage
Contagion	CONTAG	Probabilité d'un pixel d'être adjacent aux pixels de la même classe	0<CONTAG≤100	Paysage
Composant majeur	LPI	Mesure la part de la tache la plus vaste de chaque classe dans le paysage	0<LPI≤100	Composant
Pourcentage du paysage	PLAND	Mesure la surface occupée par une classe	0<PLAND≤100	Composant

Indice d'agrégation	AI	Arrangement spatial et au regroupement des objets sur l'image	$0 < AI < 1$	Composant
---------------------	----	---------------------------------------------------------------	--------------	-----------

Tableau 9. Indices métriques pour caractériser la structure du paysage

4. RESULTATS D'ANALYSE

4.1 A l'échelle du paysage

Les résultats d'analyse des métriques spatiales à l'échelle du paysage sont présentés dans la **Figure 13**.

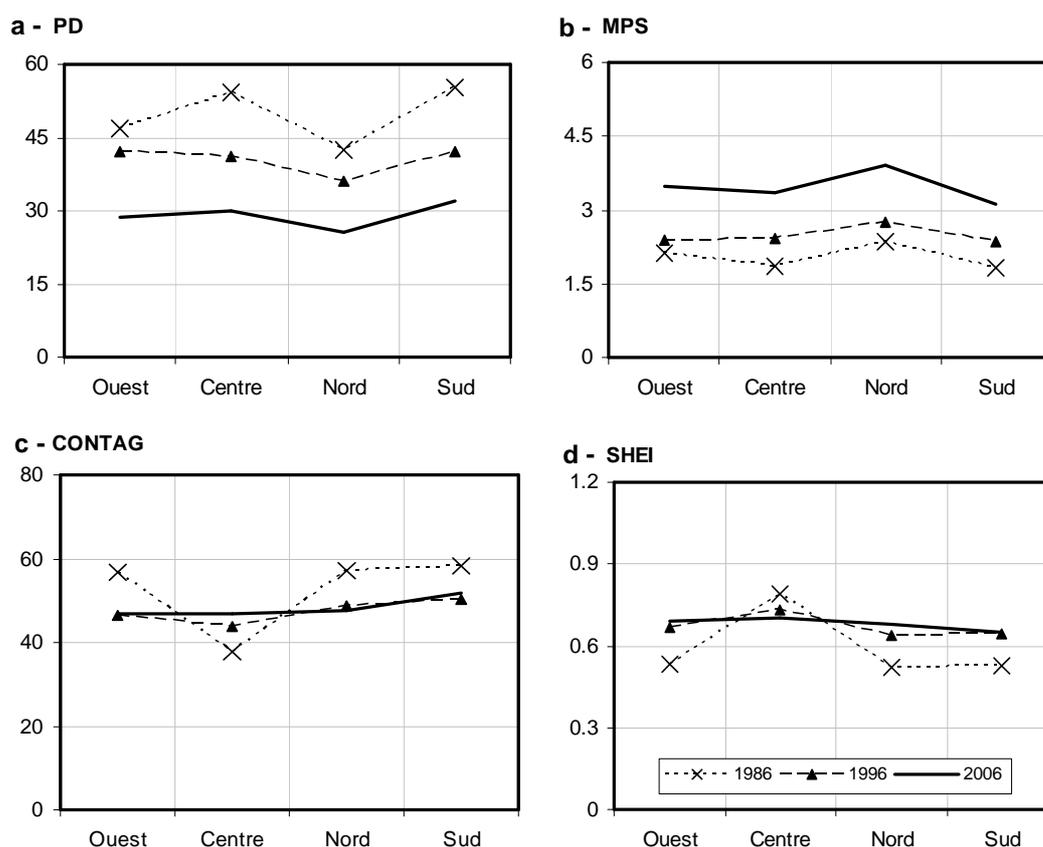


Figure 13. Comportement des indices métriques PD, MPS, CONGTAG et SHEI appliqués à l'étude du paysage de l'aire urbaine de Strasbourg

Les indices ont été appliqués sur l'ensemble d'images pour chaque zone. Les résultats montrent les changements spatiaux et temporels de la structure paysagère d'un composant à travers deux décennies (1986 – 2006). Sur chaque graphique, l'axe horizontal présente l'évolution radiale « périurbain – centre – périurbain » et l'axe verticale montre les valeurs des différentes métriques. Les interprétations permettent de comprendre comment le changement de la structure du paysage est associé au processus d'urbanisation et de périurbanisation. Le comportement des indices dans la **Figure 13** montre l'évolution de valeurs des indices entre 1986 et 2006.

La densité des composants (PD) est un indice basique mais fondamental dans l'étude de la structure paysagère. Cet indice est appliqué à l'ensemble des composants du paysage. Plus cet indice est élevé et plus l'espace est fragmenté. Des valeurs élevées indiquent la présence de forte densité de plusieurs éléments paysagers. A l'inverse, si la valeur est faible la couverture de ces éléments s'accroît par jonction des zones concernées. La diminution temporelle de PD signifie une densification des éléments paysagers de taille de plus en plus importante. La **Figure 13a** présente une vue dynamique sur les quatre secteurs. La tendance générale de diminution des valeurs pour l'ensemble des zones démontre un mouvement général d'augmentation des « patch ». Pour le Centre et le Sud, un tassement s'est opéré plus fortement pendant les 20 dernières années. Mais ces courbes ne recouvrent pas la même réalité : le Centre est contraint par ses limites, les autres zones présentent des surfaces beaucoup plus vastes.

La croissance urbaine s'est réalisée progressivement, par agrégation, les éléments urbains qui existaient avant ont été absorbés de proche en proche. La création des nouvelles aires urbaines devient rare.

MPS nous apporte des informations complémentaires sur l'organisation du paysage. Les valeurs les plus basses de la zone Centre montre un paysage urbain fragmenté par des composants de petite taille (bâti résidentiel, bâti industriel, végétation) par rapport aux mêmes composants en milieu rural de grande taille à la périphérie (**Figure 13**). L'augmentation continue de MPS dans les périphéries à l'Ouest et surtout au Nord représente une croissance de la taille des parcelles quelles qu'elles soient.

L'indice de contagion (CONTAG) est utilisé pour caractériser la connectivité entre les composants. La valeur de l'indice CONTAG a diminué dans toutes les zones pour toutes les périodes considérées sauf au Centre (**Figure 13c**). Cet indice est une mesure en effet de la continuité du paysage. La valeur la plus basse de la ville de Strasbourg en 1986 signifie une fragmentation du paysage urbain. Par contre, de 1986 à 2006, les valeurs se tassent et deviennent comparables. Les valeurs élevées de cet indice signifient que les composants présentent une continuité des paysages. La croissance urbaine s'est réalisée en réduisant le nombre de composants individuels par jonction d'éléments. La continuité de l'espace urbain s'est affirmée comme l'illustre la progression des valeurs de CONTAG. Ceci peut s'interpréter comme une densification de plus en plus importante de l'espace urbain.

L'indice d'Equitabilité de Shannon (SHEI) présente la proportion de différents types d'occupation du sol dans le paysage. Plus les valeurs sont élevées, plus la composition du paysage est variée. Les valeurs de SHEI au Centre montre la forte proportion de différents types d'occupation du sol dans le paysage urbain ; celle-ci est plus importante que dans le paysage rural qui souvent dominé par une seule composante telle l'agriculture (**Figure 13d**). Temporellement, SHEI a augmenté entre 1986 et 2006, introduisant ainsi une variabilité plus grande des paysages. Cela signifie que le paysage en périphérie devient de plus en plus mixte et la progression de la diversité d'occupation du sol en zone périurbaine se poursuit de 1986 à 2006 (extension des zones d'habitation ou équipement urbain, etc.). La distribution spatiale de SHEI semble confirmer un maintien de la diversité de l'occupation du sol de zones.

A l'échelle du paysage, les différents indices : PD, MPS, CONTAG et SHEI ont permis l'étude de l'évolution des structures paysagères de l'aire urbaine de Strasbourg. Les effets de l'urbanisation et de la périurbanisation sont évidents dans la plupart des zones. Le Centre, correspondant à la ville de Strasbourg, est caractérisé par un niveau de diversité marquée dans l'occupation du sol (vers une forte spécialisation des éléments urbains), une croissance de la taille des composants urbains (vers une densification des bâtis) et une forte connectivité entre ses composants (vers une compacité de la forme). Temporellement, les changements les plus significatifs de la structure du paysage dans les deux dernières décennies se répercutent sur la frange urbaine où la structure du paysage transforme le milieu rural en un milieu urbain. Parmi les trois régions périurbaines, le paysage du Nord et Ouest paraît plus urbanisé que celui du Sud par une diversité dans l'occupation du sol de plus en plus prononcée (augmentation temporelle des valeurs de SHEI). En effet, les villes situées dans la périphérie le Nord et Ouest qui font partie de la communauté urbaine de Strasbourg telles que Schiltigheim, Vendenheim, Reichstett, Souffelweyersheim, Bischheim, Mundolsheim, Wolfisheim, Enzheim, Illkirch, Ostwald, Lingolsheim, Geispolsheim, etc. augmentent leur surface bâtie.

Ces résultats d'analyse sont convergents aux observations de l'ADEUS (2009) qui confirme une forte tendance de l'extension urbaine dans les villes de la première couronne de la ville de Strasbourg et puis dans la seconde voire actuellement dans la troisième couronne autour de Strasbourg.

4.2 A l'échelle de la classe

Nous discutons dans cette partie l'analyse des métriques spatiales à l'échelle de classe d'occupation du sol : bâti résidentiel, industriel et commercial, végétation et agriculture. L'analyse des métriques paysagères de chaque classe permet d'obtenir des informations pour répondre à la question : comment le paysage de l'aire urbaine de Strasbourg s'est-il transformé à travers des périodes de temps ?

4.2.1 Analyse

Le pourcentage de la classe au sein du paysage (PLAND) apporte des informations importantes pour la composition du paysage. Il est calculé par le rapport entre les composants d'une classe et le nombre de composants des classes existantes dans le paysage (**Figure 14**).

Nous remarquons que la distribution spatiale des valeurs de PLAND pour les classes de bâti résidentiel et industriel est associée au degré de l'urbanisation. L'augmentation de ces deux classes illustre un paysage de plus en plus urbanisé. Les valeurs de PLAND pour ces deux classes sont élevées au Centre. Par contre, pour les classes Agriculture et Végétation, l'évolution est inversée avec les valeurs faibles dans la zone Centre plus particulièrement. Inversement, les classes de Végétation et Agriculture diminuent leur surface entre 1986 et 2006 même si l'on tient compte des biais liés aux dates des données satellites.

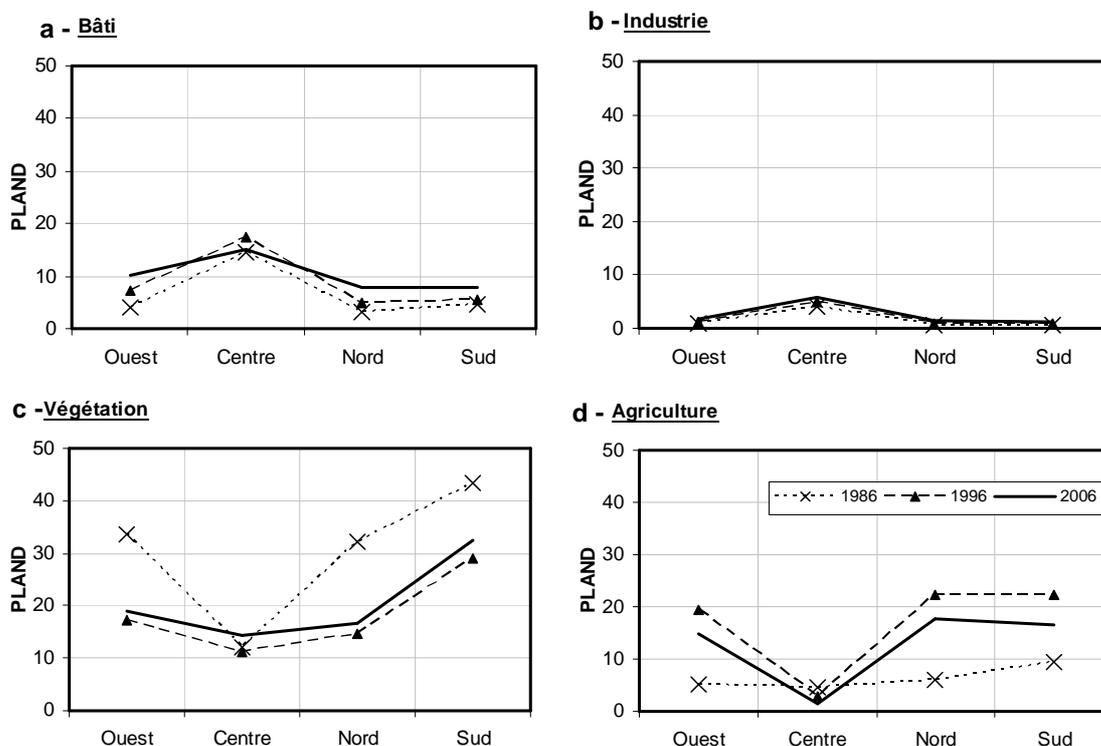


Figure 14. Comportement de l'indice PLAND pour 4 classes d'occupation du sol

L'Indice du composant majeur (LPI) montre clairement la distribution spatiale des composants de différentes classes selon leur domination. LPI de la classe Bâti est le plus fort au Centre (Strasbourg) et diminue progressivement pour les trois aires urbaines au Nord, Sud et Ouest (**Figure 15a**). LPI de la classe Agriculture est plus caractéristique par rapport à celui d'Industrie et Végétation. On constate une forte valeur de LPI Agriculture au Nord et plus faible à Ouest, Sud et très faible au Centre (**Figure 15d**). Cela paraît très logique parce que

l'on est dans un milieu de plus en plus rural et il est convergent avec les valeurs élevées de MPS à l'échelle du paysage. Cette tendance est maintenue malgré une diminution en taille des composants de 1996 à 2006 dans la plupart des zones. La végétation est dominante au Sud où LPI est le plus élevé (**Figure 15c**). Cette domination est très importante en 1986 et beaucoup moins en 1996 et 2006 (notamment à cause de la qualité de l'image (§1.2.1.3)). La classe Industrie s'occupe une surface restreinte et est dispersée dans le paysage ; Elle se concentre surtout à l'intérieur de la zone de Strasbourg et ses alentours proches. C'est pourquoi LPI de la classe Industrie est très faible sauf au Centre (**Figure 15b**).

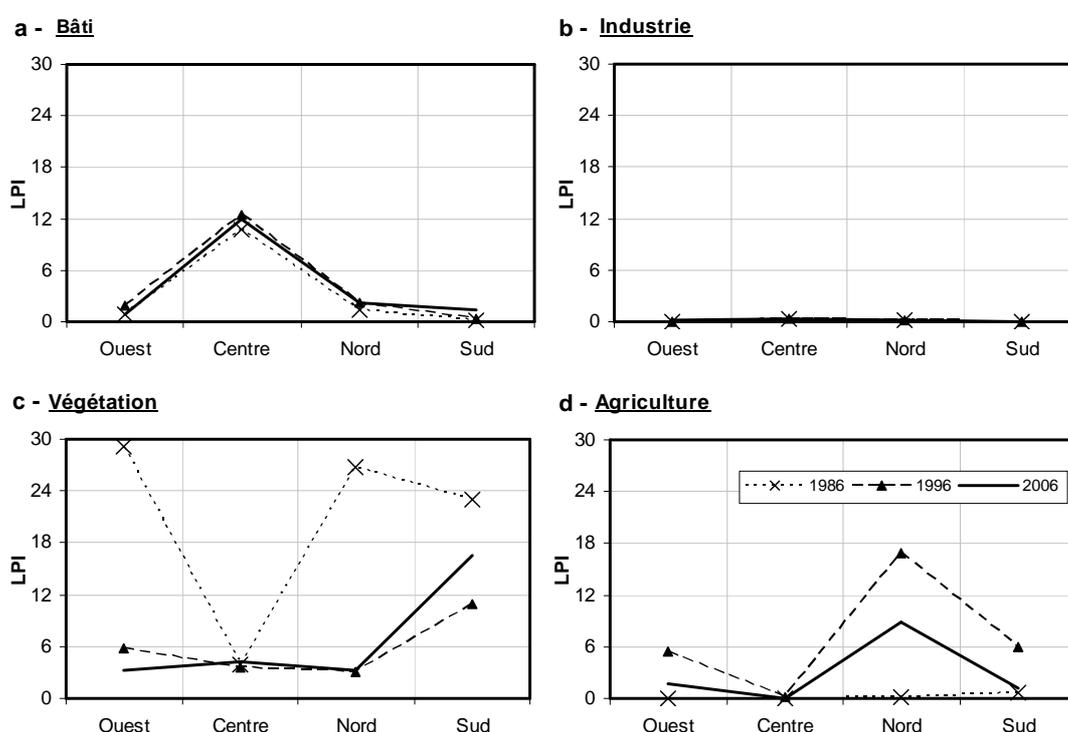


Figure 15. Comportement de l'indice de composant majeur (LPI) pour les classes d'occupation du sol

L'indice d'agrégation (AI) mesure l'arrangement spatial et du regroupement des éléments du paysage. Les valeurs d'AI des classes Bâti, Industrie, Végétation et Agriculture, augmentent globalement dans les quatre aires, entre 1986 et 2006 (voir

Figure 16). L'augmentation du AI Bâti confirme surtout l'hypothèse précédente, à savoir la croissance urbaine s'est faite surtout autour des îlots urbains préexistants par un processus d'absorption. Néanmoins, le comportement de cet indice a des dynamiques différentes à Strasbourg et dans les unités périphéries. À Strasbourg (Centre) on a assisté à une croissance de 8% entre 1986 et 1996 contre une croissance plus faible de 5,3% entre 1986 et 2006 et une diminution de 2,5% dans l'intervalle de 1996 et 2006. Pendant ce temps, la croissance en périphérie de Strasbourg a connu des vitesses différentes. Le Sud paraît le plus urbanisé avec

des augmentations respectivement de 3,5%, 10% et à 13,9% pour les trois périodes 1986-1996, 1996-2006 et 1986-2006. Les valeurs de l'AI sont de l'ordre de 7,4% ; 11,8% et 11,8% pour l'Ouest et 1,4% ; 5,6% et 7% pour le Sud. La variation de cet indice montre que l'urbanisation de la ville de Strasbourg apparaît la plus faible qu'au Nord, au Sud et à l'Ouest pour la période récente 1996-2006 (**Tableau 10**).

Ces constatations montrent que les rythmes de croissance urbaine sont distincts à Strasbourg et ses alentours. Ces augmentations signifient que de l'espace pour créer de nouveaux îlots urbains était disponible absorber la croissance urbaine pendant ces deux décennies.

Les hautes valeurs de AI de Végétation au Sud et de Agriculture au Nord convergent avec les résultats de LPI. Une classe est dominante quand ses composants du paysage ont une connexion maximale.

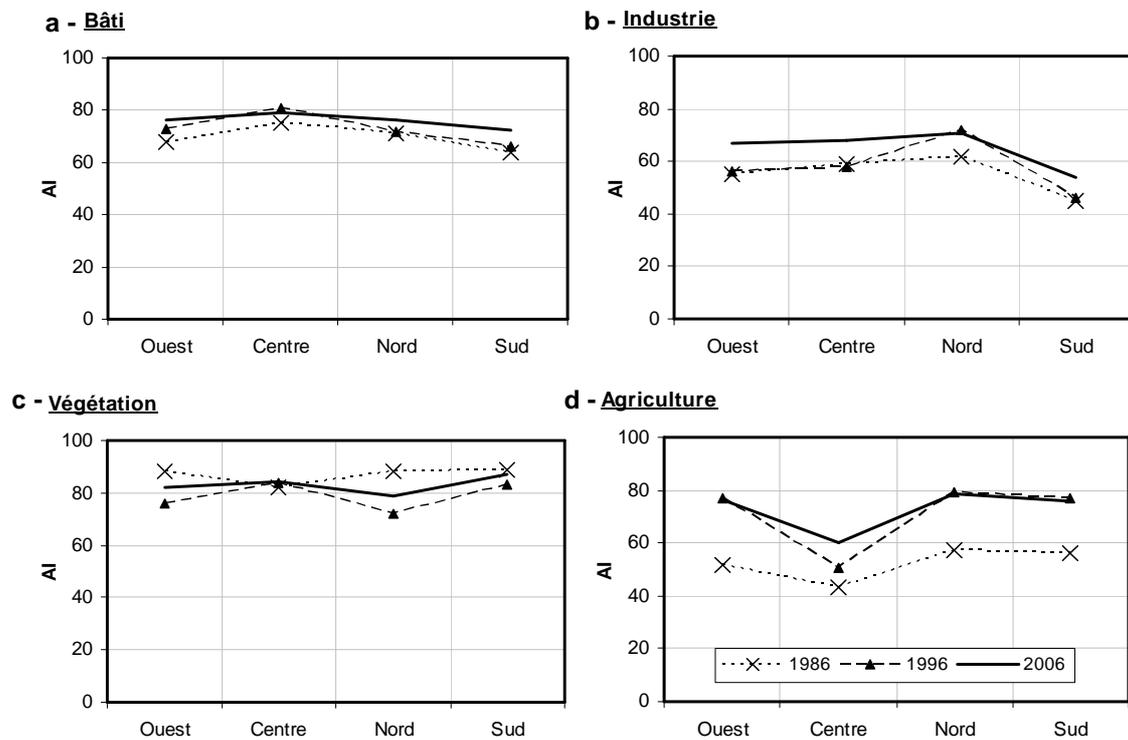


Figure 16. Comportement de l'indice d'Agrégation (AI) pour les classes d'occupation du sol

AI du Bâti	86-96	96-06	86-06
Centre ($\Delta\%$)	+ 8.0	- 2.5	+ 5.3
Ouest ($\Delta\%$)	+ 7.4	+ 11.8	+ 11.8
Nord ($\Delta\%$)	+ 1.4	+ 5.6	+ 7.0
Sud ($\Delta\%$)	+ 3.5	+ 10.0	+ 13.9

Tableau 10. Variation de AI Bâti entre 1986 et 2006

4.2.2 Distribution des composants paysagers en 2006

a Distribution radiale du centre vers périphérie

Nous procédons à une analyse surfacique avec les quatre catégories d'occupation du sol suivantes (bâti résidentiel, bâti industriel et commercial, végétation et agriculture) prenant la place Kléber comme centre-ville et donc centre de l'image. Pour réaliser cette étude l'image originale a été successivement découpée en grilles de taille croissante allant de 100x100 pixels à 1100 pixels ; qui correspondent à des distances sur le terrain allant de 2 km à 22 km (**Figure 17**).

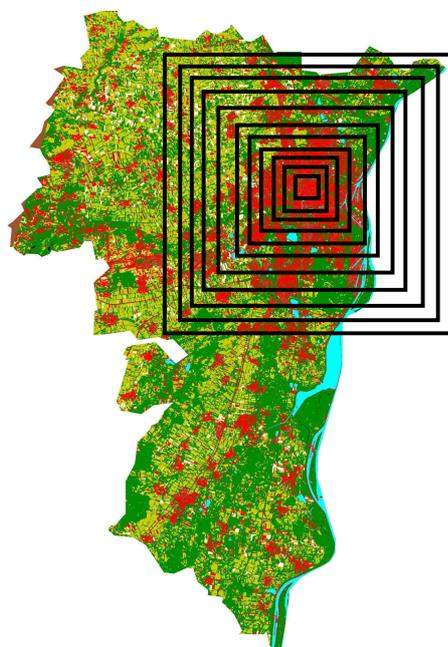


Figure 17. Les fenêtres d'analyse surfacique variées de taille 100x100 pixels à 1100x1100 pixels par un pas de 100 pixels

Nous testons l'image acquise en 2006 pour voir l'organisation spatiale la plus récente de l'aire urbaine de Strasbourg. Le comportement des indices renseigne sur la distribution spatiale du paysage urbain et périurbain. Des seuils spatiaux nous permettent de révéler les caractéristiques de la composition paysagère de l'aire urbaine de Strasbourg.

Les courbes de PLAND montrent la distribution particulière du bâti résidentiel, industriel et commercial à 6, 10, 16 et 22 km en cohérence avec l'évolution des indices pour la végétation et l'agriculture. Ainsi au-delà de 4 km, la distribution spatiale paraît plus aléatoire.

- En général, nous observons une forte présence du bâti résidentiel, industriel et commercial en centre-ville jusqu'à une distance de 6 km (**Figure 18 a, b, c**). Nous ne considérons que la première couronne urbaine en fonction de cette rupture à une distance de 6 km. Les zones d'activité industrielles et commerciales qui s'y trouvent comme la gare de Strasbourg, le port autonome de Strasbourg – zone centrale, le début de la zone d'activité de Plaine de Bouchers (Meinau). L'Hôpital Civil a été pris en compte dans cette catégorie à cause de sa forte réflectance.

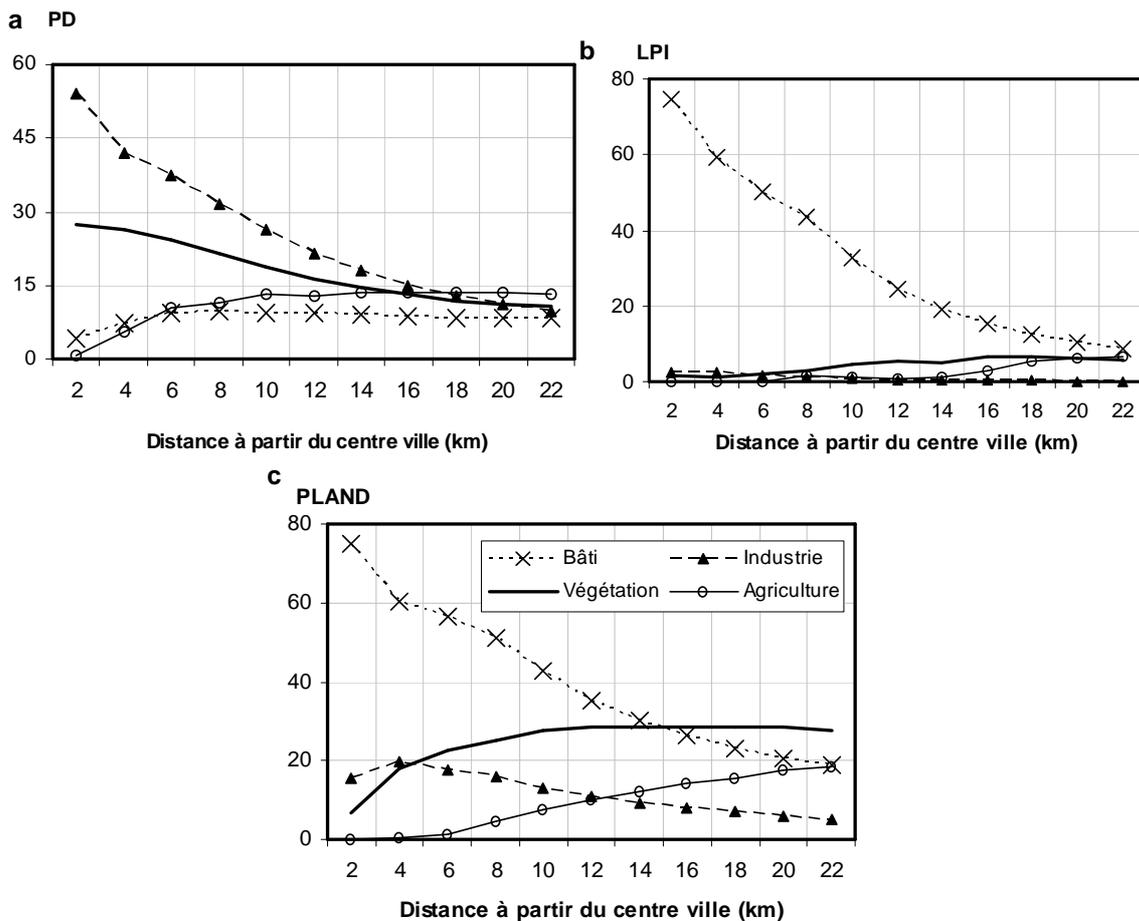


Figure 18. Comportement des indices PD, LPI et PLAND des classes d'occupation du sol en fonction de la distance à partir du centre-ville

- Après cette distance, ces deux classes urbaines perdent leur domination et laisse la place pour les deux autres classes Végétation et Agriculture. La tache urbaine diminue fortement sa surface à une distance de 16 km (**Figure 18b**). Nous supposons une deuxième couronne urbaine se trouve à cette distance-là. Le bâti a une dominance égale à celle de la végétation. L'agriculture augmente continuellement sa surface d'occupation à partir de cette distance par l'intégration des zones agricoles à l'ouest (**Figure 18c**). La distance de 10 km est considérée comme un seuil intermédiaire dans la composition paysagère qui marque une tendance de chute de la dominance du bâti dans le paysage et une présence abondante de la végétation et de l'agriculture. La tache urbaine a une domination forte jusqu'à la distance de 10 km car nous restons encore dans la ville de Strasbourg avec les quartiers Hautepeire, Neuhof, Baggerssée, Robersau. Nous trouvons dans cette distance au Nord la forêt de la Robersau, au Nord-Ouest la zone agricole et au Sud le début de la forêt de Neuhof –Stocfeld –Ganzau, le bois d'Illkirch, etc.
- La troisième couronne urbaine se trouve à la distance de 22 km qui marque une dominance forte de la végétation et de l'agriculture dans l'organisation spatiale. L'agriculture a une occupation égale au bâti. Se trouvent à cette distance au Nord Vendenheim, à l'Ouest Truttenheim, Ittenheim, au Sud Eschau, Fegersheim, Blaesheim, etc.

b Impact de la résolution spatiale sur la structure du paysage

Nous avons utilisé l'image acquise en 2006 pour tester la fragmentation du paysage par dégradation de la résolution spatiale pour voir

- (1) Quelles sont les modifications paysagères à différentes échelles (de la plus fine à la plus grossière) ;
- (2) Les structures paysagères sont-elles stables avec la dégradation de la résolution spatiale
- (3) Les indices métriques sont-ils sensibles à la résolution spatiale à laquelle ils sont calculés.

L'image originale à 20m de résolution spatiale a été rééchantillonnée tous les 10 m, de 20 m à 100 m par la méthode du plus proche de voisin. Les deux indices de PD et LPI ont été testé comme auparavant.

A la résolution spatiale de 20 m, parmi les valeurs de PD de quatre classes d'occupation du sol, celle d'Agriculture est la plus élevée. A l'opposé, les valeurs PD Industrie sont la plus faibles. Les valeurs PD Bâti et Végétation sont égales. En général, les valeurs chutent graduellement de 20 m à 100 m. A la résolution de 50 m, nous observons un resserrement des valeurs de PD des classes d'occupation du sol. A partir de la résolution de 60 m, la classe de Bâti a une densité de composants similaire avec celle de Agriculture et Végétation (**Figure 19a**). Nous remarquons que la dégradation de la résolution spatiale entraîne une agrégation des composants dans le paysage d'une façon plus ou moins régulière et compacte.

LPI a un comportement différent à travers des résolutions spatiales. A la résolution originale, la classe de Végétation constitue la classe ayant de LPI le plus élevée. Viennent ensuite sont les classes Agriculture, Bâti et Industrie. Cet ordre de grandeur de LPI se maintient à travers les résolutions spatiales de plus en plus grossières. Cependant, le comportement de LPI de chaque classe d'occupation du sol est très différent. LPI de Végétation est très caractéristique. Il augmente continuellement de 20 m à 40 m et obtient des valeurs maximales à la résolution de 40 m. Après cela, il chute entre 40 m et 60 m et ensuite augmente à nouveau entre 60 m et 70 m avant de décroître à partir de 80 m (Figure 19b).

LPI de la classe Agriculture a un comportement propre. Dans sa globalité, il augmente sans cesse de 20 m à 100 m et sauf une chute légère à la résolution spatiale de 80 m.

LPI de la classe Bâti reste plus ou moins constant entre 20 m et 80 m. Il diminue légèrement à 90 m et augmente à 100 m de résolution spatiale.

LPI de la classe Industrie est très faible et a un comportement stable quelle que soit la résolution.

Le comportement très caractéristique de PD et LPI de chaque classe du paysage montre des configurations géométriques distinctes et un arrangement spatial particulier entre les classes d'occupation du sol. Tout d'abord, le Bâti constitue la classe la plus compacte au centre-ville de Strasbourg et la tache urbaine est dispersée dans le paysage. Le comportement de LPI explique la résistance de cette forme compacte à la dégradation de la résolution spatiale. Agriculture est distribuée régulièrement en périphérie et occupe une grande surface. La grande connectivité de cette classe permet de maintenir leur forme dans le paysage malgré la dégradation de la résolution spatiale. Par contre, Végétation représente une deuxième grande classe mais sa présence spatiale de manière peu continue ne permet pas semble-t-il une stabilisation des valeurs quelle que soit la résolution. L'indice LPI est donc très sensible à la dégradation de la résolution spatiale lorsque les composants sont dispersés dans l'image.

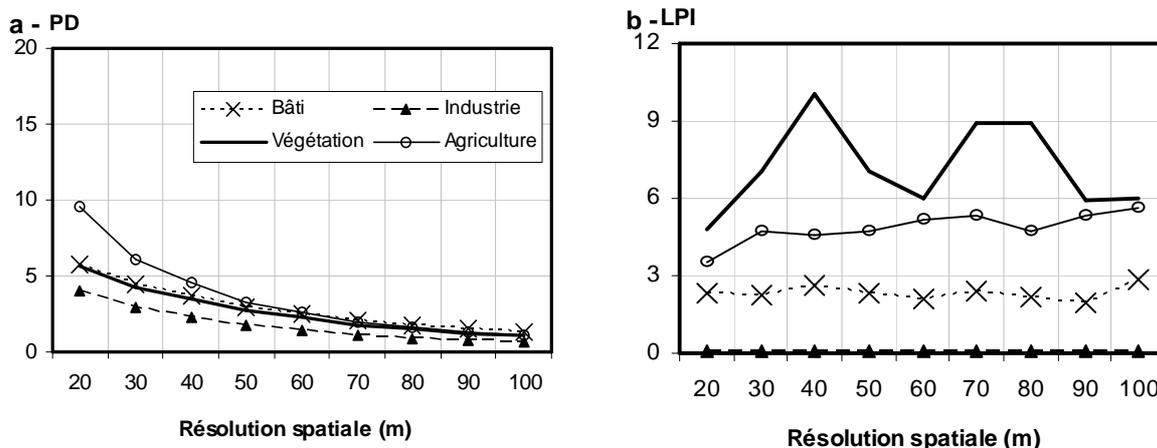


Figure 19. Comportement des indices PD et LPI des classes d'occupation du sol en fonction de la résolution spatiale

5. CONCLUSION

Cette étude a pour objectif d'identifier et de caractériser les changements du paysage urbain et périurbain dans l'aire de Strasbourg pendant une vingtaine d'années en utilisant trois images satellites provenant de capteurs Spot de différentes générations. Les résultats de la classification des images Spot permettent d'analyser la structure du paysage à différentes dates. La qualité des résultats est fortement influencée par les caractéristiques des images originales. Il s'agit surtout de la résolution spatiale (20 m) et du nombre de bandes spectrales disponibles (deux bandes dans le visible et une bande infra-rouge). Ceci limite notamment la capacité d'extraction des classes de végétation (arborée, herbacée) et agriculture.

Les résultats d'analyse du paysage à partir des métriques spatiales nous montrent que la croissance urbaine s'est réalisée par le remplissage des îlots vides et par l'extension des noyaux urbains déjà existants. Le paysage dans l'aire urbaine est à la fois plus continu par l'augmentation des contacts entre les composants urbains et non urbains, et plus compact par la densification progressive de l'espace bâti.

En général, l'utilisation de différents indices : PD, MPS, LPI, CONTAG et SHEI permet d'identifier et caractériser l'ampleur de l'urbanisation et de la périurbanisation entre 1986 et 2006. La ville de Strasbourg est caractérisée par un niveau de diversité de moins en moins marqué dans l'occupation du sol (vers une forte spécialisation urbaine), une croissance de taille des composants urbains (vers une densification des bâtis) et une forte connectivité entre ces composants (vers une compacité de la forme). Temporellement, les changements les plus significatifs de la structure du paysage dans les deux dernières décennies sont les plus visibles dans la zone de frange urbaine où la structure du paysage se transforme d'un milieu rural à un milieu urbain. Parmi les trois régions périurbaines, les paysages du Nord et Ouest paraissent plus urbanisés que celle du Sud avec une diversité dans l'occupation du sol de plus en plus prononcée (augmentation temporelle des valeurs de SHEI). En effet, les villes situées dans la périphérie Nord et Ouest qui font partie de la communauté urbaine de Strasbourg telles que Schiltigheim, Vendenheim, Reichstett, Souffelweyersheim, Bischeim, Mundolsheim, Wolfisheim, Enzheim, Illkirch, Ostwald, Lingolsheim, Geispolsheim, etc. augmentent leur surface bâtie. Ces résultats d'analyse sont convergents avec les observations de l'ADEUS (2009) qui confirme une forte tendance à la densification urbaine dans les villes de la première couronne de la ville de Strasbourg et l'extension dans les deuxième et troisième couronnes.

Cette constatation montre que les rythmes de croissance urbaine sont distincts au sein de la CUS et notamment entre Strasbourg et sa périphérie. La densification s'est poursuivie entre 1986 et 2006. L'espace pour créer de nouveaux îlots urbains est encore disponible mais se réduit fortement. La surface bâtie diminue de 8% entre 1986 et 1996 à 5,3% entre 1986 et 2006 et se réduit à 2,5% dans l'intervalle de 1996 et 2006. Pendant ce temps, la croissance du bâti à l'extérieur de la ville de Strasbourg se diversifie selon les lieux et les périodes. Le Sud est urbanisé passant de 3,5%, 10% et à 13,9% respectivement dans trois périodes 1986-1996,

1996-2006 et 1986-2006 contre 7,4% ; 11,8% et 11,8% pour l'Ouest et 1,4% ; 5,6% et 7% pour le Nord.

L'analyse radiale nous renseigne sur la configuration spatiale du paysage urbain et périurbain à Strasbourg et ses alentours. Nous supposons des couronnes urbaines se situent à certaines distances : 6 km pour la première, 16 km pour la deuxième et 22 km pour la troisième. La zone de frange urbaine située à une distance de 10 km du centre-ville où une concurrence intensive des transformations urbaines se poursuit.

La dégradation de la résolution spatiale de l'image originale nous permet d'examiner la stabilité des formes du paysage et des classes d'occupation du sol à travers le processus d'agrégation spatiale des pixels. Le bâti constitue la classe la plus compacte au centre-ville de Strasbourg. Strasbourg et sa première couronne apparaissent de plus en plus compacts avec des habitats urbains dispersés dans l'ensemble de l'image. Le comportement de LPI illustre la résistance de cette forme compacte à la dégradation de la résolution spatiale. L'agriculture est distribuée régulièrement dans l'ensemble de l'image et occupe une grande surface. La grande connectivité de cette classe permet de maintenir une forme stable dans le paysage malgré la dégradation de la résolution spatiale. Par contre, la végétation représente une deuxième grande classe d'occupation du sol mais sa présence spatiale de manière peu continue n'assume pas la stabilité de la forme. La taille de fenêtre d'analyse de 8 pixels peut ajouter comme deuxième élément qui influence à ce résultat. C'est pourquoi l'indice LPI est donc très sensible à la dégradation de la résolution spatiale selon la catégorie d'occupation du sol.

CONCLUSION GENERALE

Ces travaux ont permis d'identifier et de caractériser les changements des formes paysagères dans la CUS et ses environs. A partir d'une série d'images SPOT s'étalant sur vingt ans des traitements de métriques paysagères ont permis d'identifier, quantifier et suivre les transformations de l'occupation du sol. Bien sûr la qualité des traitements d'image a pu influencer sur les résultats obtenus cependant les vérifications d'usage permettent de considérer une qualité satisfaisante des résultats autour de 78 – 80% de validité(Kappa). Le potentiel de ce type d'analyse dépend non seulement de la qualité des données tant en termes spatial (résolution spatiale) que thématique (nomenclature) (Herold *et al.*, 2005).

De manière générale l'analyse spatiale du paysage réalisée montre que la croissance urbaine articule deux processus : la densification des « trous » au sein des tissus urbains et des zones d'extension soit le long des réseaux soit en sauts (leap frog). Le paysage est donc plus continu en 2006 qu'en 1986 et plus compact selon des vagues progressives de construction.

Chaque mesure choisie a apporté des éléments de compréhension des formes du paysage à diverses échelles. En ce qui concerne l'agglomération de Strasbourg, PD, MPS, CONTAG et SHEI apparaissent comme des mesures efficaces pour appréhender le paysage ; les mesures PLAND, LPI et AI sont, elles, performantes à l'échelle de l'élément du paysage. Ces mesures ont permis d'identifier des processus variés et différents entre le centre Strasbourg et les zones périphériques, opposant un paysage très spécialisé avec une forte densité de bâti et une valeur élevée de connectivité des éléments du paysage à des franges caractérisées par des transformations profondes.

La lecture de ces indices permet d'identifier à la fois la structure urbaine mais aussi l'armature des espaces naturels et agricoles et donc d'identifier les enjeux associés à l'imperméabilisation des surfaces, la destruction des habitats, la fragmentation des paysages, bouleversant le fonctionnement des écosystèmes vivants.

La quantification des structures paysagères est basée sur la dominance des éléments bâtis et leur diversité. L'un des enjeux de la planification urbaine et régionale est le contrôle de l'organisation spatiale de l'urbanisation (Irwin and Bockstael, 2004). L'utilisation des mesures paysagères permet (1) de quantifier à deux échelles complémentaires la configuration et la répartition spatiale des éléments de paysage et (2) d'identifier au sein des mesures développées les repères chronologiques intéressants pour mieux comprendre la cinétique des processus en cours.

Ces résultats peuvent être considérés comme une information supplémentaire pour réfléchir à l'avenir de ces espaces spécifiques que sont les zones périurbaines. En les englobant dans les réflexions de prospective visant un destin commun, la durabilité des territoires, il serait intéressant de faire de ces espaces hybrides des lieux d'opportunités nouvelles pour concilier les enjeux environnementaux, agricoles et urbains.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

Adams, J. B., Smith, M. O., Gillespie, A. R. In Simple models for complex natural surfaces: a strategy for the hyperspectral era remote sensing, Proceedings of IGARSS '89, Geoscience and Remote Sensing Symposium/12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver (C.-B.), 10-14 juillet 1989, 1989; IEEE, New York: Vancouver (C.-B.), 1989; pp 16-21.

ADEUS Se loger dans le Bas-Rhin, les évolutions récentes; Strasbourg, 2009; pp 1-8.

ADEUS, 2010 Les Notes de l'ADEUS n°25.

Alberti, M., Waddell, P., 2000, An integrated urban development and ecological model. *Integrated Ass. Studies* 1, 215-227.

Antrop, M., 2000, Changing patterns in the urbanized countryside of Western Europe. *Landscape Ecol.* 15, 257-270.

Antrop, M., Van Eetvelde, V., 2000, Holistic aspects of suburban landscapes: visual image interpretation and landscape metrics. *Landscape Urban Plan.* 50, 43-58.

Ashbindu, S., 1989, Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data. *int. J. Remote Sens.* 10, 989-1003.

Bahri, E. M., Haboudane, D., Bannari, A., Bonn, F., Chillasse, L., 2007, Essai de cartographie des espèces forestières dominantes dans le Moyen Atlas (maroc) à l'aide des données Aster. *Revue Télédétection* 7, 283-301.

Ballut, A., Nguyen, J. P., 1984, Les besoins d'information pour l'aménagement urbain et régional: apport de la télédétection spatiale à la satisfaction de ces besoins. *S.F.P.T* 93, 21-32.

Barnsley, M. J., Barr, S. L., 1997, Distinguishing urban land-use categories in fine spatial resolution land-cover data using a graph-based, structural pattern recognition system. *Computers, Environment and Urban Systems* 21, 209-225.

Bastin, L., Thomas, C. D., 1999, The distribution of plant species in urban vegetation fragments. *Landscape Ecol.* 14, 493-507.

Baudot, Y., 1994, Télédétection aérospatiale et analyse géographique de la population des villes dans les pays en développement. Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve.

Boardman, J. W., Kruse, F. A. In Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada, Proceedings of ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, Ann Arbor, MI, 1994; Ann Arbor, MI, 1994; pp 407 - 418.

Cabral, P., Gilg, J.-P., Painho, M. In Cabral, P., Gilg, J.-P. and Painho, M., SPIE Optics & Photonics: Remote sensing and modeling of ecosystems for sustainability, San Diego, USA, 2005; W., G., Ed. San Diego, USA, 2005.

Chen, X., Li, X., Ma, J. In Urban change detection based on self-organizing feature map neural network, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, 2004; IEEE International: 2004; pp 3428-3431.

Corbyn, Z., 2010, Ecologists shun the urban jungle; Only one in six papers tackles inhabited areas. *Nature* 16 July (doi:10.1038/news.2010.359)

- Cròsta, A. P., Sabine, C., Taranik, J. V., 1998, Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, using AVIRIS Hyperspectral Data. *Remote Sens E.* 65, 309-319.
- Dietzel, C., Herold, M., Hemphill, J. J., Clarke, K. C., 2005, Spatio-temporal dynamics in California's Central Valley: empirical links to urban theory. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 19, 175-195.
- Douglas, I., 1981, The city as an ecosystem. *Progress in Physical Geography* 5 (3):315-367.
- Dureau, F. Utiliser la télédétection spatiale pour observer les populations citadines. In *Villes et citadins du Tiers Monde*, Bourgeois, L., Duchemin, J. P., E., L. B., Sinou, A., Eds. ORSTOM: Bondy, 1990, pp. 23-55.
- Forman, R. T. T., and M. Godron, 1986, *Landscape Ecology*. New York: John Wiley and Sons.
- Fung, T., 1990, An assessment of TM imagery for land cover change detection. *IEEE Trans Geoscience Remote Sens* 28, 681-684.
- Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., Craig, M. D., 1988, A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Trans Geoscience Remote Sens* 26, 65-74.
- Gustafson, E. J., 1998, Quantifying landscape spatial pattern: What is the state of the art? *Ecosystems* 1, 143-456.
- He, C., Li, J., Zhang, J., Pan, Y., Chen, Y. In *Dynamic monitor on urban expansion based on a object-oriented approach*, IGARSS'05 Geoscience and Remote Sensing Symposium, 25-29, July, 2005; 2005; pp 2850-2853.
- Herold, M., Scepan, J., Clarke, K. C., 2002, The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environ. Plann. A* 34, 1443-1458.
- Herold, M., Goldstein, N. C., Clarke, K. C., 2003, The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. *Remote Sens. Environ.* 86, 286-302.
- Herold, M., Couclelis, H., Clarke, K. C., 2005, The role of spatial metrics in the analysis and modelling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems* 29, 369-399.
- Irwin, E. G., Bockstael, N. E., 2004, Land use externalities, open space preservation and urban sprawl. *Reg. Sci. Urban Econ.* 34, 705-725.
- Jensen, J. R. Urban/suburban land use analysis. In *Manual of remote sensing*, American Society of Photogrammetry: Falls Church, 1983, pp. 1571-1666.
- Joseph, M. P., Derek, R. P., Ellsworth, F. L. D., 1998, Temporal Mixture Analysis of Arctic Sea Ice Imagery: A New Approach for Monitoring Environmental Change. *Remote Sens E.* 63, 195-207.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heiderbrecht, K. B., Shapiro, P. J., Goetz, A. F. H., 1993, The spectral image processing system (SIPS) - interactive visualisation and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sens E.* 44, 145-163.
- Kwarteng, A. Y., Chavez, P. S., 1998, Change detection study of Kuwait City and environs using multi-temporal Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 19, 1651-1662.
- Leitão, A. P., Ahern, J., 2002, Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning. *Landscape Urban Plan.* 59, 65-93.
- Lillestrand, R. L., 1972, Techniques for change detection. *IEEE transactions on Computers* 21, 654-659.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W., 2004; Remote sensing and image interpretation. Wiley: New York.

Luck, M., Wu, J., 2002, A gradient analysis of urban landscape pattern: a case study from Phoenix metropolitan region, Arizona, USA. *Landscape Ecol.* 17, 327-339.

Machlis, G. E., J. E. Force, and J. William R. Burch, 1997, The human ecosystem part I: the human ecosystem as an organization concept in ecosystem management. *Society & Natural Resources* 10:347-367.

Mandelbrot, B., 1975; *Les objets fractals - Forme, hasard et dimension*. Flammarion: Paris.

Masek, J. G., Lindsay, F. E., Goward, S. N., 2000, Dynamics of urban growth in the Washington DC metropolitan area, 1973-1996, from Landsat observations". *Inter. J. Remote Sens.* 21, 3473-3486.

Matsushita, B., Xu, M., Fukushima, T., 2006, Characterizing the changes in landscape structure in the Lake Kasumigaura Basin, Japan using a high-quality GIS dataset. *Landscape Urban Plan* 78, 241-250.

McDonnell, M. J., and S. T. A. Pickett, 1991, Comparative analysis of ecosystems along gradients of urbanization: Opportunities and limitations. In *Comparative Analyses of Ecosystems, Patterns, Mechanisms and Theories*, eds. J. J. Cole, G. M. Lovett and S. E. G. Findlay, 351-255. New York: Springer-Verlag.

McDonnell, M. J., S. T. A. Pickett, P. Groffman, P. Bohlen, R. V. Pouyat, W. C. Zipperer, R. W. Parmelee, M. M. Carreiro, and K. Medley, 1997, Ecosystem processes along an urban-to-rural gradient. *Urban Ecosystems* 1 (1):21-36.

McGarigal, K., Cushman, S. A., Neel, M. C., Ene, E. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst.

Mcgarigal, K., Mark, B. Fragstats - Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure.

Millennium Ecosystem Assessment, 2005, *Ecosystems and Human Well-being, Volume 1 Current State and Trends*. Washington DC: Island Press.

Mortberg, U. M., 2001, Resident bird species in urban forest remnants; landscape and habitat perspectives. *Landscape Ecol.* 16, 193-203.

NcIntyre, N. E., K. Knowles-Yanez, and D. Hope, 2000, Urban ecology a interdisciplinary field: Differences in the use of "urban" between the social and natural sciences. *Urban Ecosystems* 4 (1):5-24.

Olf, H., Ritchie, M. E., 2002, Fragmented nature: consequences for biodiversity. *Landscape Urban Plan.* 58, 83-92.

Phinn, S., Stanford, M., Scarth, P., Murray, A. T., Shyy, P. T., 2002, Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by subpixel analysis techniques. *int. J. Remote Sens.* 23, 4131-4153.

Puissant, A., 2003, *Information géographique et images à très haute résolution: Utilité et applications en milieu urbain*. Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Ridd, M., 1995, Exploring a V-I-S (vegetation-impervious surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. *Int. J. Remote Sens.* 16, 2165-2185.

- Ridd, K. M., Liu, J., 1998, A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sens E.* 63, 95-100.
- Roux et Vanier, 2008, *La périurbanisation : problématiques et perspectives*. Paris DIACT. La Documentation française. Collection Travaux. N°8, 88p.
- Savard, J. P. L., Clergeau, P., Mennechez, G., 2000, Biodiversity concepts and urban ecosystems. *Landscape Urban Plan.* 48, 131-142.
- Schubarth C., 2008, Côté urbain : l'urbain de tous les côtés ? in Monteventi Weber L., Deschenaux C. , Tranda-Pittion M. (dir), *Campagne-ville. Le parc de deux. Enjeux et opportunités des recompositions territoriales*. Lausanne. Presse polytechniques et universitaires romandes. Pp 9-18.
- Singh, A., 1989, Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Int. J. Geographical Information Science*, 651-671.
- Skupinski, G., Tran, D. B., Weber, C. Twenty years of land use land cover changes using Spot images serie and spatial metric - The sub-urban Bruche valley (Bas Rhin France). In *CyberGeo*, 2009; Vol. <http://www.cybergeu.eu/index21995.html>.
- Small, C. Spectral dimensionality and scale of urban radiance. In ftp://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/01_docs/2001Small_web.pdf, 2001; p 11.
- Small, C., 2003, High spatial resolution spectral mixture analysis of urban reflectance. *Remote Sens. Env.* 88, 170-186.
- Sterns, F., and T. Montag, eds., 1974, *The Urban Ecosystem: A Holistic Approach*. Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.
- Terrettaz, P., 1998, *Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellites Spot HRV*. Université de Fribourg, Fribourg, Suisse.
- Weng, Y. C., 2007, Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. *Landscape Urban Plan.* 81, 341-353.
- Xiao, J., Shen, Y., Ge, J., Tateishi, R., Tang, C., Liang, Y., Huang, Z., 2005, Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China by using GIS and remote sensing. *Landscape Urban Plan.* 75, 69-80.
- Yang, X., Lo, C. P., 2002, Using a time series of satellite imagery to detect land use and land cover changes in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1775-1798.
- Yin, Z. Y., Stewart, D. J., Bullard, S., MacLachlan, J. T., 2005, Changes in built-up surface and population distribution patterns during 1986-1999: a case study of Cairo, Egypt. *Computers, Environment and Urban Systems* 29, 595-616.
- Zhang, Q., Wang, J., Peng, X., Gong, P., Shi, P., 2002, Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data. *Int. J. Remote Sens.* 23, 3057-3078.