



Etude de l'évolution de l'imperméabilisation du sol en Région de Bruxelles-Capitale

Etude réalisée par l'ULB/IGEAT pour le Ministère de la
Région de Bruxelles-Capitale, Administration de
l'Equipement et des Déplacements/Direction de l'Eau

Sabine Vanhuyse
Jeanne Depireux
Eléonore Wolff

Octobre 2006

Table des matières

1	Introduction	3
2	Données et méthodes.....	4
2.1	Première période : 1955 – 1985	4
2.1.1	Données	4
2.1.2	Méthode.....	7
2.2	Deuxième période : 1986 – 2006	10
2.2.1	Données	10
2.2.2	Méthode.....	13
3	Résultats	22
3.1	Résultats sur l'ensemble de la zone d'étude.....	22
3.2	Résultats sur des zones d'intérêts particulières.....	32
3.2.1	Communes.....	32
3.2.2	Détail pour Bruxelles, trois zones distinctes	34
3.2.3	Bassins d'eaux usées.....	35
3.2.4	Bassins d'eaux de surface	36
3.2.5	Zone du bassin d'orage Flagey	37
3.2.6	Zone du bassin d'orage de Forest	38
3.2.7	Bassin de la Woluwe, zone du Woluwé Shopping Center.....	39
4	Conclusion.....	40
5	Annexe 1 : Liste des cartes topographiques et photos aériennes utilisées pour estimer le pourcentage d'imperméabilisation des classes d'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND	41
5.1	Cartes topographiques au 1 : 25 000	41
5.2	Cartes topographiques au 1 : 5 000	41
5.3	Photos aériennes.....	41
6	Annexe 2 : Fiche descriptive QuickBird.....	42
7	Annexe 3 : Informations relatives aux pré-traitements des données de télédétection.....	43
7.1	Datum et projection utilisés.....	43
7.2	Atténuation de la brume sur l'image QuickBird.....	43
7.3	Orthorectification de l'image QuickBird.....	44
7.4	Géoréférencement et co-registation des images à haute résolution	44
7.5	Normalisation radiométrique des images Landsat	45
8	Annexe 4 : Classification 2006	47
8.1	Paramètres de segmentation	47
8.2	Paramètres de classification	47
8.3	Légendes.....	48
8.4	Evaluation.....	49
9	Annexe 5 : Indices calculés sur les images Landsat.....	50
10	Annexe 6 : Modélisation par arbre de régression.....	52
10.1	Paramètres d'entrée.....	52
10.2	Evaluation du modèle.....	52
10.3	Modèle.....	52

1 Introduction

Suite à l'imperméabilisation croissante du milieu urbain et périurbain à Bruxelles depuis les années 1950, la part des précipitations qui ruissellent dans le réseau d'égouttage est de plus en plus importante. Lors de fortes averses, celles-ci se concentrent dans les vallées du territoire bruxellois, conduisant à des inondations comme celles de juillet et septembre 2005, et celles de juillet 2006, lorsque le réseau d'égouttage et les bassins d'orage sont saturés.

Jusqu'à présent, les politiques visaient à accroître le débit du réseau d'égouttage et à construire des bassins d'orage (ex : place Flagey). La présente étude s'inscrit dans une prise de conscience politique de la nécessité de changer la tendance à l'imperméabilisation des sols. Dans cette optique, un bilan de l'évolution passée est une base de réflexion indispensable.

Cette étude a pour but d'évaluer depuis les années 1950 (date de l'accélération de la croissance urbaine liée à la généralisation de la voiture comme moyen de transport) l'imperméabilisation des sols du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale.

La zone d'étude s'étend sur environ 270 km². Elle couvre la région de Bruxelles, étendue aux limites de ses bassins versants, c'est-à-dire avec des extensions vers l'Ouest, le Sud en Forêt de Soignes et le Nord-est vers Zaventem. La zone d'étude est délimitée sur base d'une carte fournie par l'AED sous format numérique.

L'utilisation de données de télédétection à très haute résolution constitue un moyen rapide et efficace pour estimer l'étendue des surfaces imperméables. Cependant, étant donné le fait que de telles données ne sont pas disponibles pour la totalité de la période à étudier, nous avons divisé celle-ci en deux (une première période couvrant 1955-1985 et une deuxième période couvrant 1986-2006), et utilisé différents autres types de données en fonction de leur disponibilité et de leur pertinence.

Pour la première période, nous avons utilisé la base de données de l'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND, disponible pour 1955, 1970 et 1985. La méthode mise en œuvre consiste à échantillonner chaque classe d'utilisation du sol pour en estimer le coefficient d'imperméabilisation, à l'aide de cartes topographiques et de photos aériennes.

Pour la deuxième période, nous avons effectué une classification de l'utilisation du sol sur base d'une image satellitaire à très haute résolution datant de 2006. En partant de la classification binaire (surfaces perméables et surfaces imperméables) nous avons modélisé une relation entre le pourcentage de surfaces imperméables et différentes variables spectrales dérivées d'images à haute résolution. Ceci nous a permis d'estimer le pourcentage de surfaces imperméables à 2 dates antérieures pour lesquelles nous disposons d'images à haute résolution (1993 et 1986).

2 Données et méthodes

La zone couverte par la présente étude a été définie par l'AED comme étant la région de Bruxelles, étendue à l'ensemble de ses bassins versants d'eaux usées et pluviales. Elle représente une superficie d'environ 270 km².

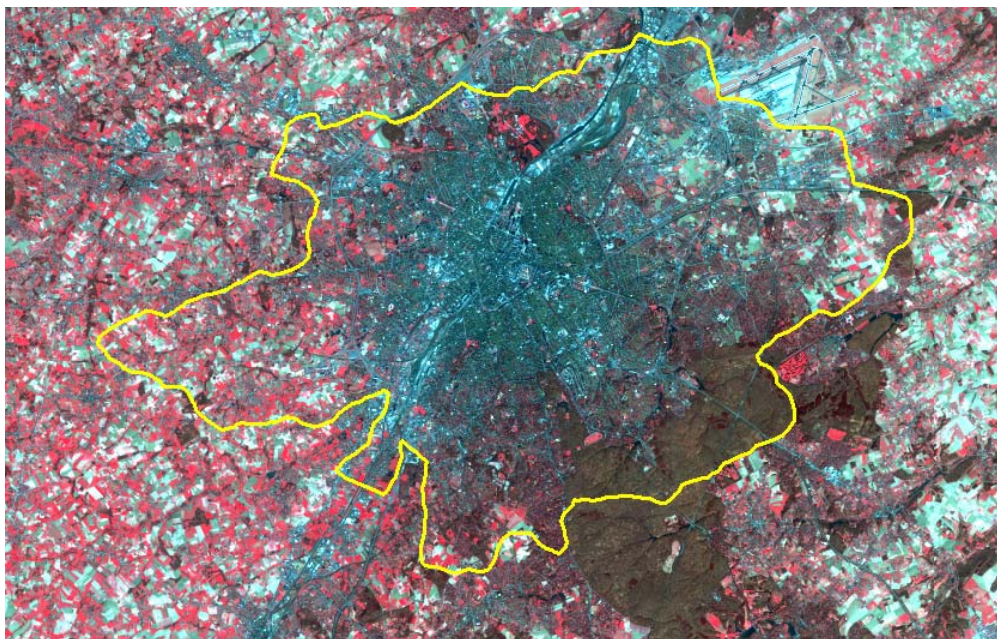


Figure 1 : Contour de la zone d'étude (en jaune), superposé à une composition colorée SPOT (fausses couleurs – proche infra-rouge/rouge/vert)

2.1 Première période : 1955 – 1985

2.1.1 Données

Pour couvrir la première période, trois dates ont été retenues : 1955, 1970 et 1985. Les données utilisées sont d'une part la base de données d'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND, et d'autre part des cartes topographiques et des photos aériennes scannées et géoréférencées.

La base de données MURBANDY/MOLAND couvrant la région de Bruxelles a été réalisée par l'IGEAT, dans le cadre de la convention n° 14674-1998-12 F1PC ISP BE¹. Dans un premier temps, une interprétation de l'utilisation du sol en 1997 a été effectuée visuellement, à l'écran, sur base d'images satellitaires IRS/1C (résolution spatiale de 5,8 m), et d'orthophotos aériennes (résolution spatiale de 5 m). La légende de référence est dérivée du programme CORINE Land Cover mais comporte un degré de détail plus élevé pour les surfaces artificialisées. La surface minimale cartographiée est de 1ha pour les surfaces

¹ Pour de plus amples informations concernant MURBANDY/MOLAND, consulter <http://moland.jrc.it/>

artificialisées et de 3ha pour les autres surfaces. Ensuite, pour 1955, 1970 et 1985, la base de données de 1997 a été mise à jour rétrospectivement grâce aux informations tirées de cartes et de photos aériennes d'époque.

Dans la zone d'étude, la légende de l'inventaire de l'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND comporte 33 classes, dont 18 sont partiellement imperméables. Ce sont ces dernières qui sont étudiées ici afin d'estimer leur pourcentage d'imperméabilisation respectif.

La figure ci-dessous illustre l'inventaire complet; les classes partiellement imperméables et la superficie qu'elles couvrent sont reprises dans le tableau 1.

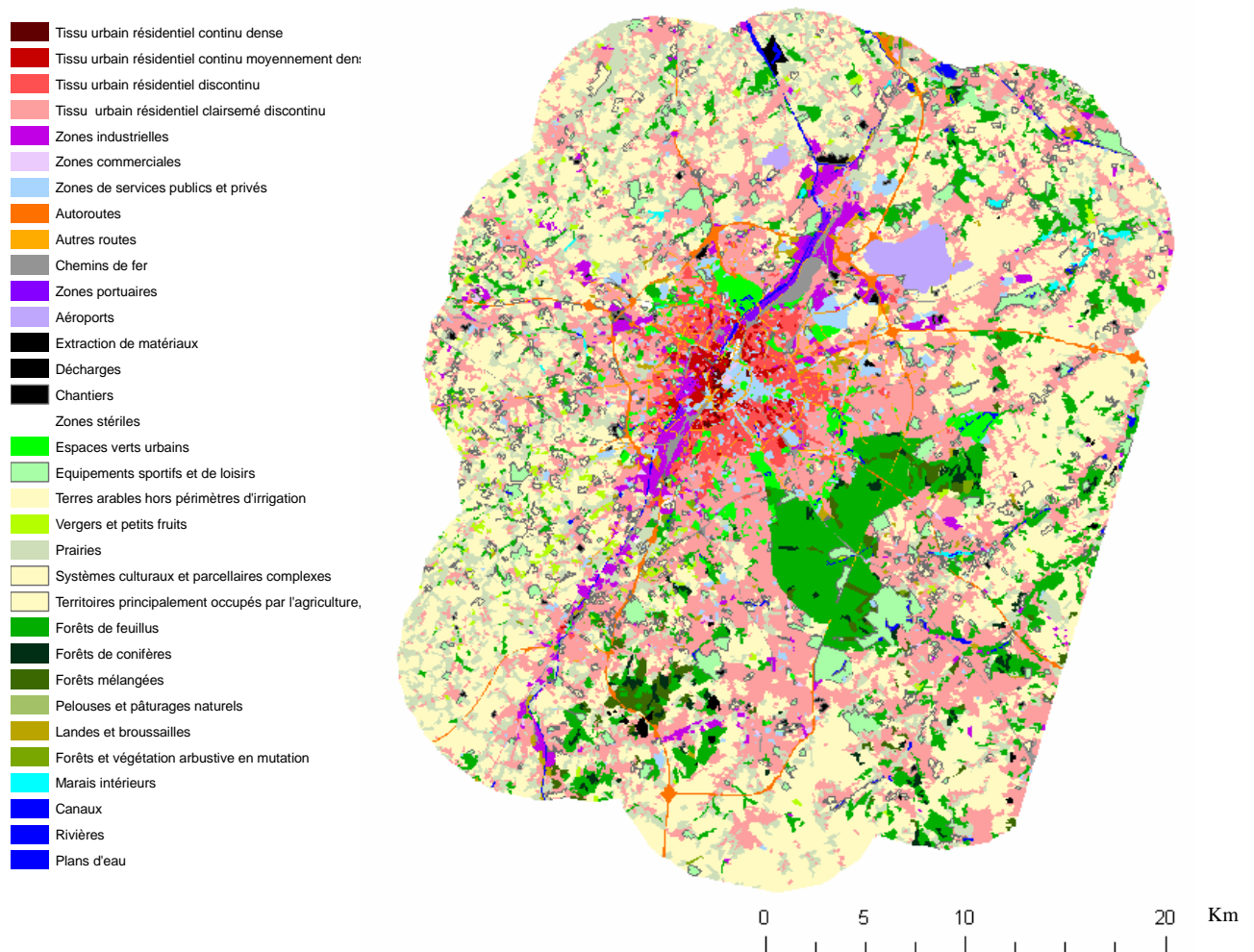


Figure 2 : Inventaire de l'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND pour Bruxelles et ses alentours: les polygones de 1985. La zone couvre 1600 km² ; elle a été délimitée autour de la ville morphologique.

En termes de superficie couverte, la classe "Tissu urbain résidentiel clairsemé discontinu" est la plus importante, suivie de la classe "Tissu urbain résidentiel discontinu". Selon les résultats de MURBANDY/MOLAND, l'importance de ces 2 classes croît au fil du temps, au détriment des classes perméables.

	1955		1970		1985	
	Ha	% du total	Ha	% du total	Ha	% du total
Classes perméables	13148	48.9	9908	36.8	7815	29.0
1111 Tissu urbain résidentiel continu dense	166	0.6	132	0.5	93	0.3
1112 Tissu urbain résidentiel continu moyennement dense	761	2.8	778	2.9	719	2.7
1121 Tissu urbain résidentiel discontinu	2031	7.5	2607	9.7	2661	9.9
1122 Tissu urbain résidentiel clairsemé discontinu	4862	18.1	6228	23.1	7418	27.6
1211 Zones industrielles	836	3.1	1101	4.1	1333	5.0
1212 Zones commerciales	33	0.1	87	0.3	158	0.6
1213 Zones de services publics et privés	755	2.8	1258	4.7	1774	6.6
1221 Autoroutes	0	0.0	100	0.4	573	2.1
1222 Autres routes	651	2.4	831	3.1	910	3.4
1223 Chemins de fer	772	2.9	757	2.8	727	2.7
123 Zones portuaires	180	0.7	210	0.8	210	0.8
124 Aéroports	286	1.1	118	0.4	136	0.5
131 Extraction de matériaux	38	0.1	13	0.0	15	0.1
132 Décharges	0	0.0	15	0.1	3	0.0
133 Chantiers	488	1.8	634	2.4	155	0.6
134 Zones stériles	2	0.0	113	0.4	36	0.1
141 Espaces verts urbains	1320	4.9	1429	5.3	1483	5.5
142 Equipements sportifs et de loisirs	577	2.1	585	2.2	686	2.5
Total	26905	100.0	26905	100.0	26905	100.0

Tableau 1: MURBANDY/MOLAND - importance des classes partiellement imperméables

Pour chacune des trois dates, des cartes topographiques au 1 : 25 000 et au 1 : 5 000 ont été scannées, géoréférencées et découpées afin de pouvoir les superposer aux données MURBANDY/MOLAND et effectuer une interprétation visuelle dans un système d'information géographique (ArcGIS v9.1). L'échelle 1 : 25 000 est suffisante pour l'interprétation, exception faite des zones densément bâties qui sont symbolisées par des polygones hachurés. Dans un premier temps, nous avons tenté d'interpréter des photos aériennes dans ces zones, mais pour les années 1950 et 1970, leur qualité s'est révélée insuffisante au vu du degré de détail à obtenir. C'est pour cette raison que nous avons utilisé des cartes au 1 : 5 000. Pour 1985 cependant, la couverture cartographique au 1 : 5 000 n'est pas suffisamment exhaustive et a dû être complétée par des photos aériennes. La liste des cartes et photos aériennes utilisées se trouve en annexe 1.

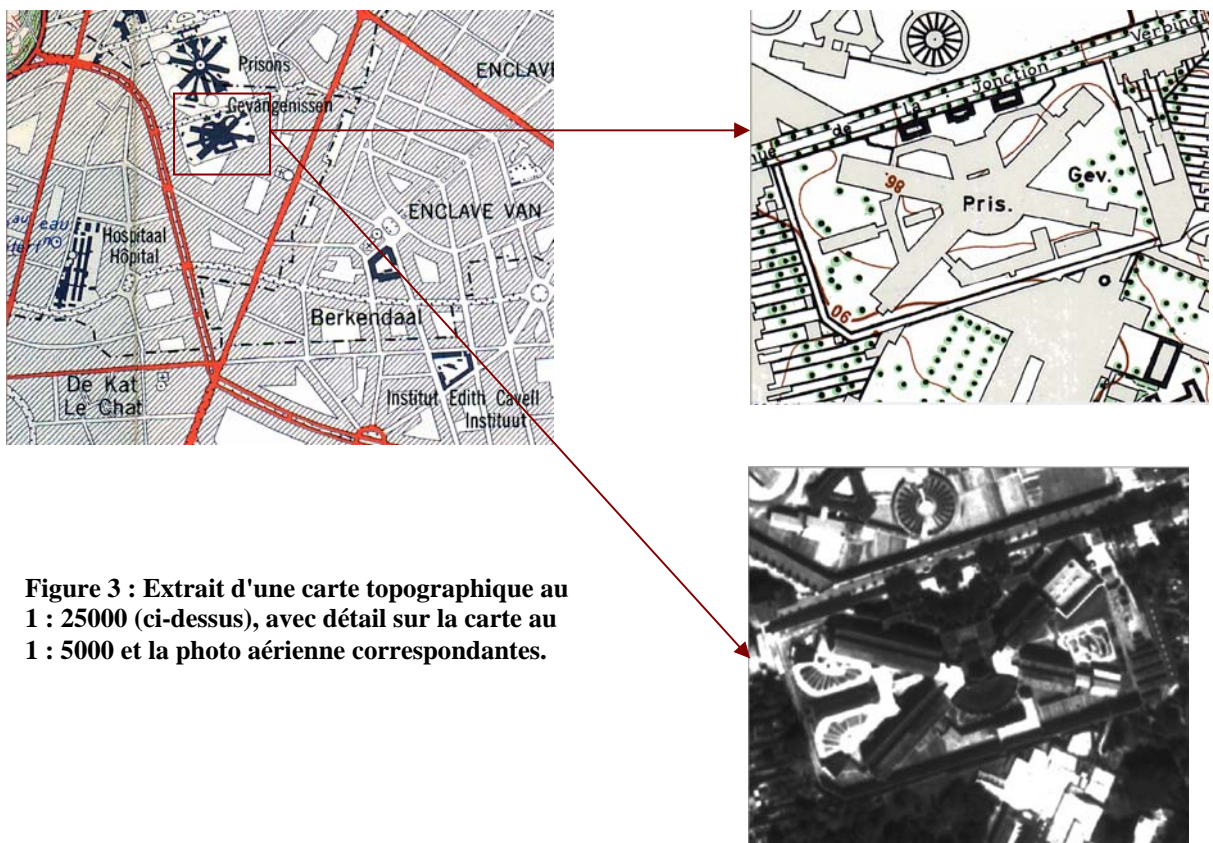


Figure 3 : Extrait d'une carte topographique au 1 : 25000 (ci-dessus), avec détail sur la carte au 1 : 5000 et la photo aérienne correspondantes.

2.1.2 Méthode

L'objectif consiste à estimer le coefficient d'imperméabilisation respectif des classes d'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND, grâce aux cartes topographiques et aux photos aériennes. Une interprétation visuelle de ces données a été réalisée dans des échantillons de mailles carrés.

Nous avons généré deux grilles de mailles couvrant l'ensemble de la zone d'étude. La première, constituée de mailles de 100m*100m, a été utilisée pour échantillonner la plupart des classes d'utilisation du sol, alors que la deuxième, faite de mailles de 25m*25m, n'a servi que pour échantillonner les classes présentant des polygones trop petits ou trop étroits pour contenir suffisamment de mailles d'un hectare.

Au sein de chaque classe d'utilisation du sol, un échantillon de minimum 10 mailles a été pris aléatoirement. Dans certains cas, la taille de l'échantillon a dû être augmentée pour stabiliser les résultats. D'autre part, la classe "Tissu urbain résidentiel clairsemé discontinu (1122)" a fait l'objet d'un échantillonnage plus étendu (N = 30 pour chaque date), étant donné l'importance de la superficie qu'elle recouvre et par conséquent son influence sur les résultats.

	1955		1970		1985	
	Mailles 100*100	Mailles 25*25	Mailles 100*100	Mailles 25*25	Mailles 100*100	Mailles 25*25
1111 Tissu urbain résidentiel continu dense	10		10		10	
1112 Tissu urbain résidentiel continu moyennement dense	10		10		10	
1121 Tissu urbain résidentiel discontinu	10		30		10	
1122 Tissu urbain résidentiel clairsemé discontinu	30		30		30	
1211 Zones industrielles	10		10		10	
1212 Zones commerciales		10		10	10	
1213 Zones de services publics et privés	19		30		10	
1221 Autoroutes				30		10
1222 Autres routes		10		18		10
1223 Chemins de fer		10		10		10
123 Zones portuaires	10		14		10	
124 Aéroports	10		10		10	
131 Extraction de matériaux		10		10		10
132 Décharges				10		10
133 Chantiers	10		10		10	
134 Zones stériles		10	10			10
141 Espaces verts urbains	10		10		10	
142 Equipements sportifs et de loisirs	10		10		10	

Tableau 2 : Taille de l'échantillon pour chaque classe d'utilisation du sol

Dans chaque maille, des polygones représentant soit les surfaces imperméables, soit les surfaces perméables ont été tracés pour constituer une couche vectorielle.

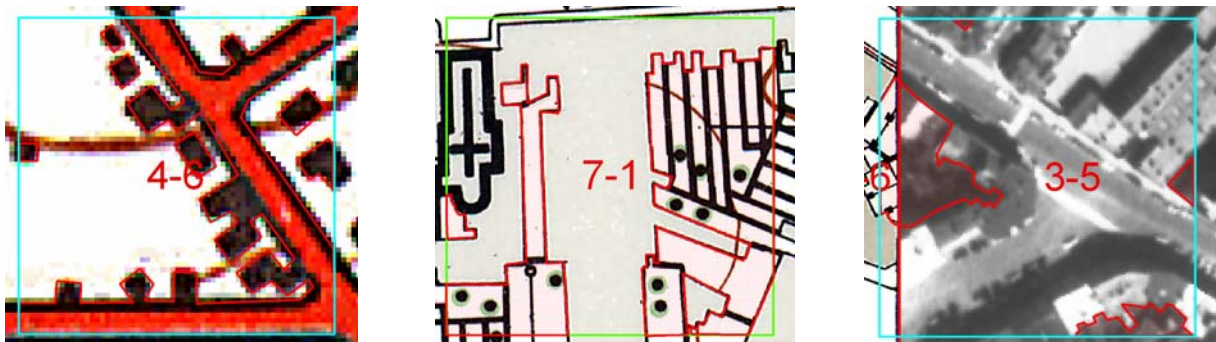


Figure 4 : Polygones représentant soit les surfaces imperméables, soit les surfaces perméables, sur 3 types de données différents (carte 1 : 25 000, carte 1 : 5 000, photo aérienne).

Sur cette base, la moyenne des surfaces imperméables a été estimée pour chaque classe. A titre d'exemple, la figure 5 présente les moyennes pour la classe "Tissu urbain résidentiel clairsemé discontinu (1122)" (N = 30 pour chaque date),.

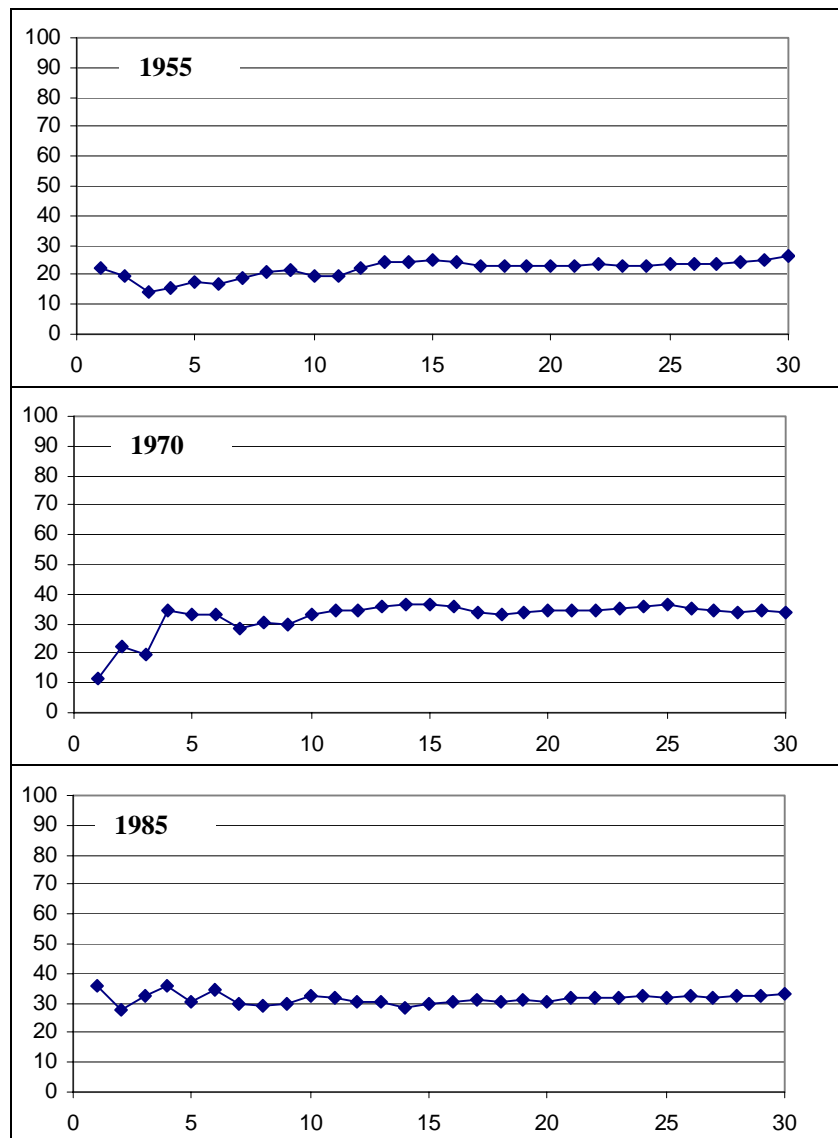


Figure 5 : Moyennes des pourcentages de surfaces imperméables pour la classe 1122.
En abscisse, le nombre de mailles (N=30) ; en ordonnée le pourcentage.

Le calcul des surfaces imperméables au sein de l'échantillon de mailles dans les classes MURBANDY/MOLAND nous permet de dégager une estimation du pourcentage de surfaces imperméables par classe (cf. tableau 3).

	1955	1970	1985
1111 Tissu urbain résidentiel continu dense	90	91	87
1112 Tissu urbain résidentiel continu moyennement dense	88	82	81
1121 Tissu urbain résidentiel discontinu	64	66	68
1122 Tissu urbain résidentiel clairsemé discontinu	26	33	33
1211 Zones industrielles	30	40	61
1212 Zones commerciales	68	75	82
1213 Zones de services publics et privés	56	58	53
1221 Autoroutes	N/A	41	34
1222 Autres routes	52	81	86
1223 Chemins de fer	19	10	16
123 Zones portuaires	28	27	98
124 Aéroports	11	34	37
131 Extraction de matériaux	2	8	4
132 Décharges	N/A	0	0
133 Chantiers	32	25	12
134 Zones stériles	0	4	0
141 Espaces verts urbains	10	7	6
142 Equipements sportifs et de loisirs	2	3	2

Tableau 3 : Estimation du pourcentage de surfaces imperméables au sein de chaque classe d'utilisation du sol.

On remarquera que ce pourcentage n'augmente pas nécessairement avec le temps au sein d'une même classe. Ceci est normal si on considère la manière dont la légende MURBANDY/MOLAND a été conçue. D'une manière générale, une classe peut augmenter en superficie entre deux dates, parce qu'elle inclut des zones nouvellement artificialisées, et de ce fait éventuellement subir une baisse du pourcentage moyen de surfaces imperméables. Par ailleurs, pour les classes de tissu urbain résidentiel, si dans un polygone une modification importante de la proportion de surface bâtie est survenue entre deux dates, ce polygone change simplement de classe. Enfin, un polygone peut également changer de classe en raison d'une modification de l'utilisation du sol. Ceci garantit une certaine homogénéité au sein des classes.

Selon notre estimation, la superficie couverte par les surfaces imperméables dans la zone d'étude augmente considérablement pendant la période 1955-1985, comme on peut le constater à la lecture du tableau suivant. En effet, on passe au total de 4946 ha en 1955 à 8276 ha en 1985, soit une augmentation de 3330ha. Exprimée en pourcentage, il s'agit d'une augmentation de 67 %.

	1955	1970	1985
1111 Tissu urbain résidentiel continu dense	149	120	81
1112 Tissu urbain résidentiel continu moyennement dense	670	638	583
1121 Tissu urbain résidentiel discontinu	1300	1721	1809
1122 Tissu urbain résidentiel clairsemé discontinu	1264	2055	2448
1211 Zones industrielles	251	440	813
1212 Zones commerciales	23	65	130
1213 Zones de services publics et privés	423	730	940
1221 Autoroutes	N/A	41	195
1222 Autres routes	338	673	783
1223 Chemins de fer	147	76	116
123 Zones portuaires	50	57	206
124 Aéroports	31	40	50
131 Extraction de matériaux	1	1	1
132 Décharges	N/A	0	0
133 Chantiers	156	159	19
134 Zones stériles	0	5	0
141 Espaces verts urbains	132	100	89
142 Equipements sportifs et de loisirs	12	18	14
	4946	6938	8276

Tableau 4 : Estimation de la superficie (en ha) couverte par les surfaces imperméables au sein de chaque classe d'utilisation du sol.

2.2 Deuxième période : 1986 – 2006

2.2.1 Données

Pour couvrir la deuxième période, des images satellitaires à haute résolution (HR) spatiale ont été commandées, soit via les catalogues des distributeurs, soit via la Politique Scientifique Fédérale qui propose des images d'archives gratuites dans le cadre des projets de recherche.

Différentes contraintes ont guidé nos choix. Les dates d'acquisition, tout d'abord, doivent couvrir toute la période avec une première date vers 1985, une deuxième vers 1995 et une troisième vers 2006. Ensuite, la période d'acquisition dans l'année doit être similaire pour toutes les images et se situer au printemps, alors que les feuilles n'ont pas encore commencé à pousser (leaf-off) et que les ombres ne sont plus aussi longues qu'en hiver. La qualité des données est également un facteur à prendre en compte, aussi bien du point de vue de la radiométrie des images que des conditions atmosphériques (absence de nuages). Enfin, les résolutions spatiale et spectrale des images doivent être similaires pour les images destinées à faire l'objet d'une analyse de régression (cf. section 2.2.2.2). Notons que pour les années 1980, une image de 1987 satisfaisant tous les critères a pu être trouvée, mais celle-ci ne couvre pas l'entièreté de la zone d'étude. Elle a donc dû être complétée par une image acquise en juin 1986, présentant une végétation plus abondante (leaf-on).

Par ailleurs, nous avons également programmé l'acquisition d'une image à très haute résolution (THR) spatiale QuickBird en mars 2006. Cette image a été acquise par le satellite le 22 mars 2006 et satisfait aux critères de la commande, mais en raison de la présence de brume sur cette image - brume n'ayant pu être atténuée sur la bande panchromatique - une mosaïque d'orthophotos UrbIS[®] (Urbortho) a été utilisée en complément. Les orthophotos sont des photos aériennes qui ont été traitées pour éliminer les déformations dues au relief et à la perspective. Mosaïquées, elles sont assemblées pour former des orthophotoplans qui permettent de couvrir des territoires plus vastes, tels que les communes et la Région entière¹.

Outre les images de télédétection spatiale et aéroportée, plusieurs couches vectorielles de la base de données UrbIS[®]², version 2.3.0 ont également été utilisées (cf. figure 8). Il s'agit des couches :

- Ss : Surfaces de rues;
- Bu : Bâtiments;
- Rb : Zones de chemin de fer;
- Wb : Zones d'eau;
- Gb : Zones vertes.

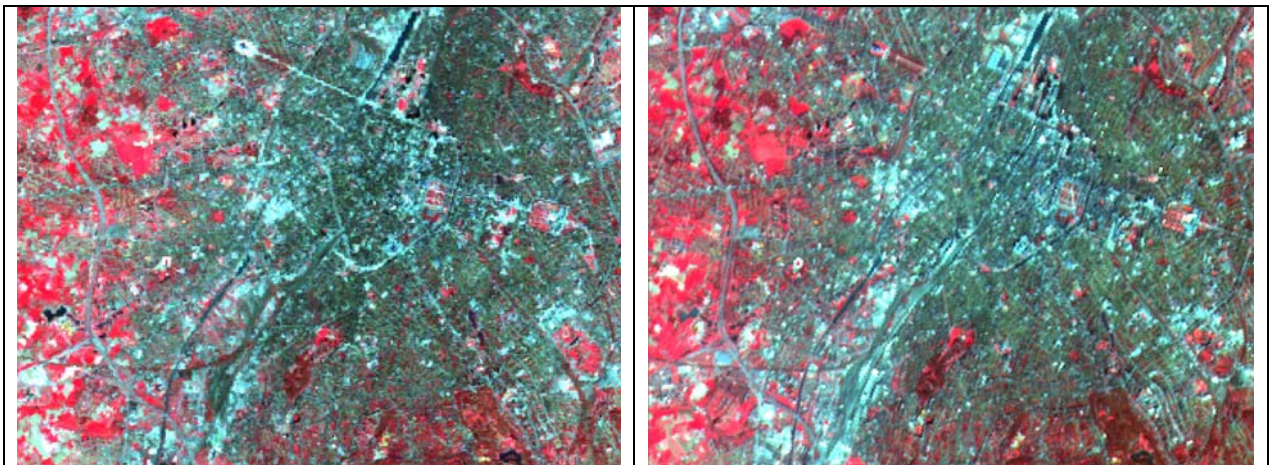
Le tableau présenté ci-dessous synthétise les informations relatives aux données de télédétection qui ont été utilisées.

¹ Source : Site du CIRB, http://www.irisnet.be/site/fr/departements/geomat/UrbIS-Ortho/index_htm

² Distribution & Copyright CIRB

Année	Image(s)	Résolution spatiale	HR/THR
1986	Landsat TM	30m (B, V, R, PIR, MIR), 120m (TIR)	HR
1987	Landsat TM	30m (B, V, R, PIR, MIR), 120m (TIR)	HR
1993	Landsat TM	30m (V, R, PIR, MIR), 120m (TIR)	HR
2003	Landsat ETM+	30m (B, V, R, PIR, MIR), 60m (TIR), 15m (pan)	HR
2005	Spot HRV	20m (V, R, PIR)	HR
2003	Spot HRG	2,5m (pan - supermode)	HR
2006/2004	QuickBird UrbOrtho	2,4m (B,V,R, PIR), 0,6m (pan) 0,6 m (B,V,R)	THR THR

Tableau 5 : Synthèse des images satellitaires utilisées.



**Figure 6 : Haute résolution - compositions colorées fausses couleurs
Landsat 30m (à g.) et SPOT 20m (à dr.).**



**Figure 7 : Très haute résolution - QuickBird panchromatique 0,60m (à g.) et UrbOrtho composition
colorée vraies couleurs 0,60 m (à dr.).**

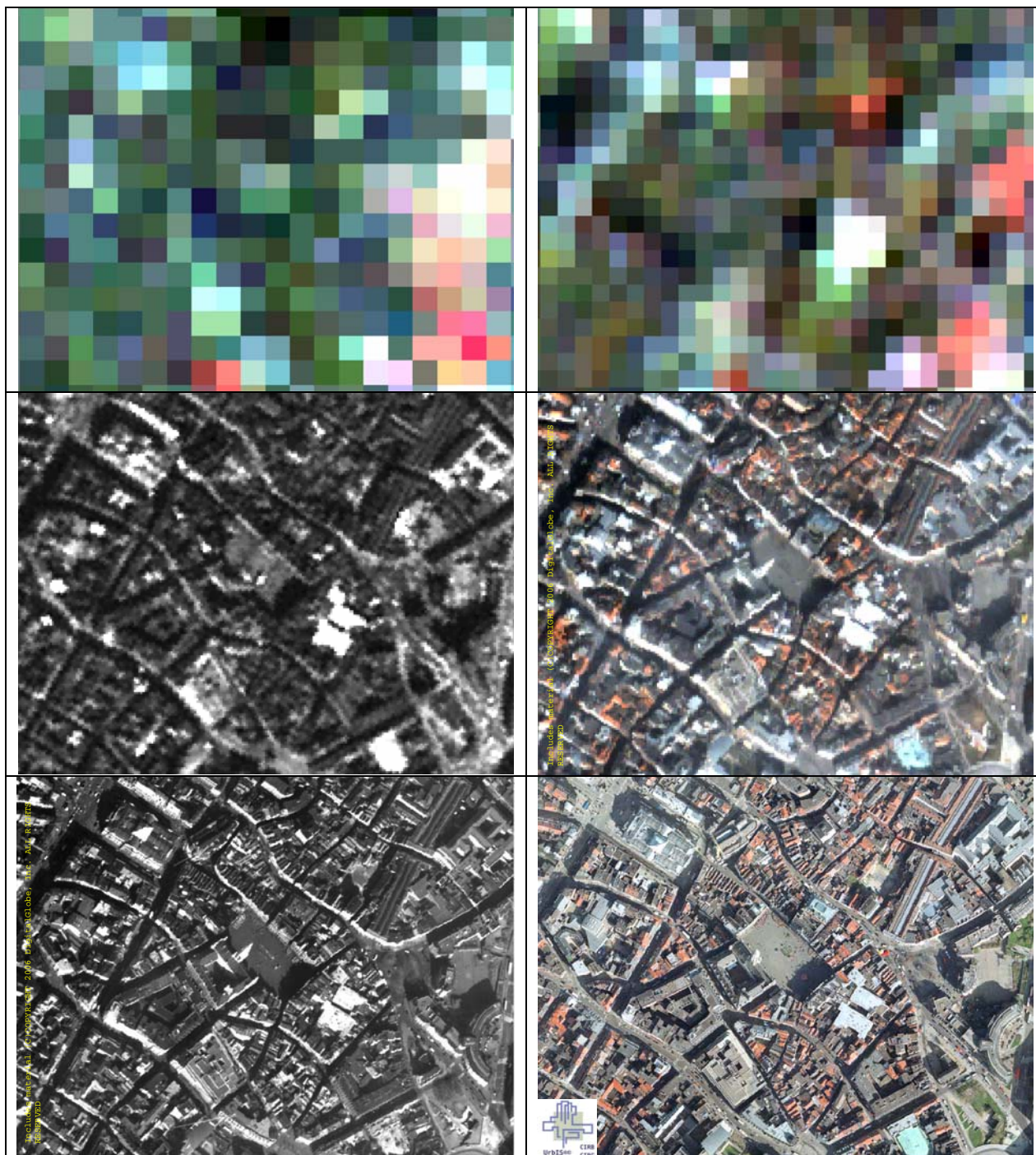


Figure 8 : De haut en bas et de gauche à droite, la zone de la Grand Place vue par Landsat (fausses couleurs 30m), SPOT (fausses couleurs 20m), SPOT (panchromatique 2,50m), QuickBird (vraies couleurs 2,40m), QuickBird (panchromatique 0,60m) et orthophotoplan UrbIS[®] (vraies couleurs 0,60m).

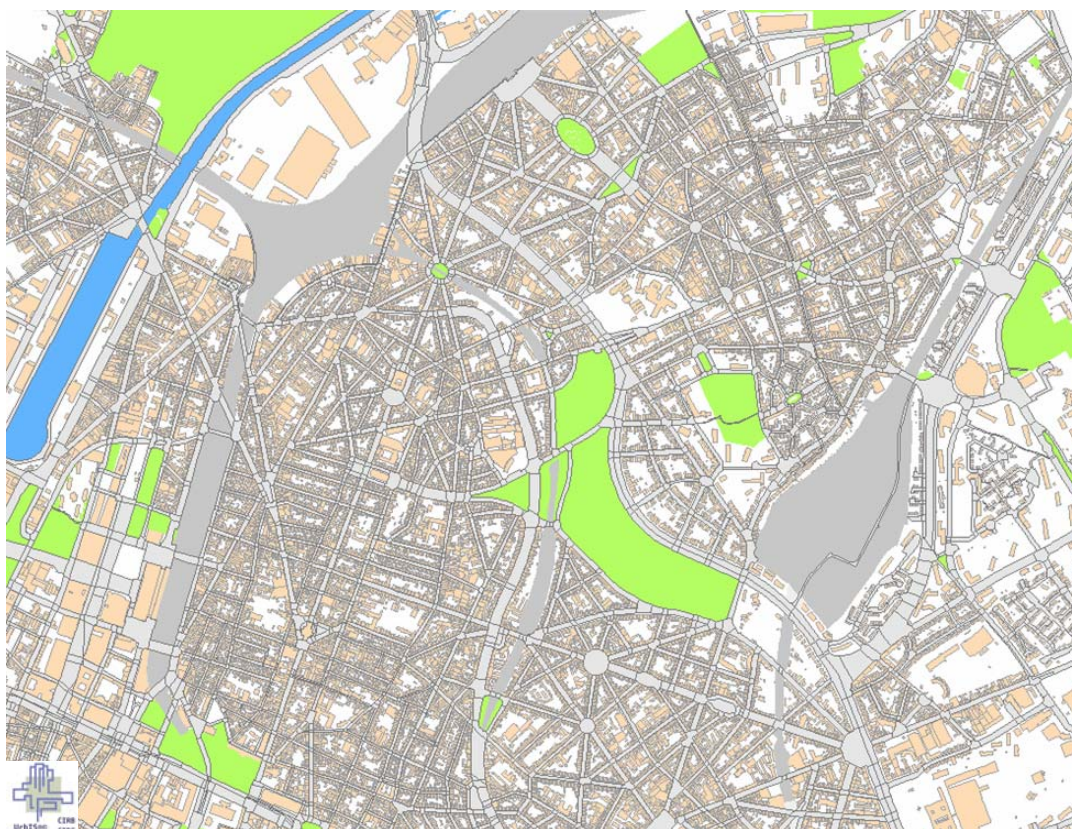


Figure 9 : Vecteurs UrbIS® (extrait) : les surfaces de rues sont en gris clair, les bâtiments en saumon, les zones de chemin de fer en gris moyen, les zones d'eau en bleu, et les zones vertes en vert.

2.2.2 Méthode

2.2.2.1 Synthèse de la méthode

Nous disposons d'une seule image à très haute résolution spatiale, datant de 2006. Par classification de l'utilisation du sol, nous pouvons estimer le pourcentage de surfaces imperméables à cette date. En revanche, les images à haute résolution spatiale sont disponibles sur l'ensemble de la période, mais ne permettent pas d'estimer directement le pourcentage de surfaces imperméables. L'objectif est donc de parvenir à dégager une estimation pour les dates antérieures à 2006, par modélisation d'une relation entre les résultats obtenus pour 2006 et les données à haute résolution spatiale.

Pour 2006, nous avons réalisé une classification sur base des données à très haute résolution, que nous avons ensuite binarisée (surfaces perméables/surfaces imperméables) pour calculer le pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles carrées.

Pour 1993, les données à haute résolution n'atteignant pas un degré de détail suffisant pour permettre une classification des surfaces imperméables en milieu urbain (cf. figure 7), nous avons opté pour une approche appelée *sub-pixel mapping*. Celle-ci consiste à trouver une relation entre le pourcentage de surfaces imperméables calculé au départ de l'image QuickBird d'une part, et des variables spectrales dérivées de l'image Landsat de 2003 d'autre

part, pour un ensemble de pixels déterminé. Le modèle résultant peut alors être appliqué à l'image Landsat de 1993 pour estimer le pourcentage de surfaces imperméables à cette date.

Nous avons également appliqué ce modèle aux images Landsat de 1986/1987, afin de l'évaluer en comparant le résultat obtenu à celui de 1985, selon la méthode utilisée pour la première période (qui s'appuie sur la base de données MURBANDY/MOLAND). Nous l'avons enfin appliqué à l'image Landsat, de 2006 toujours dans un but d'évaluation par comparaison des résultats. La figure 10 en page suivante présente une vue synthétique de la méthode.

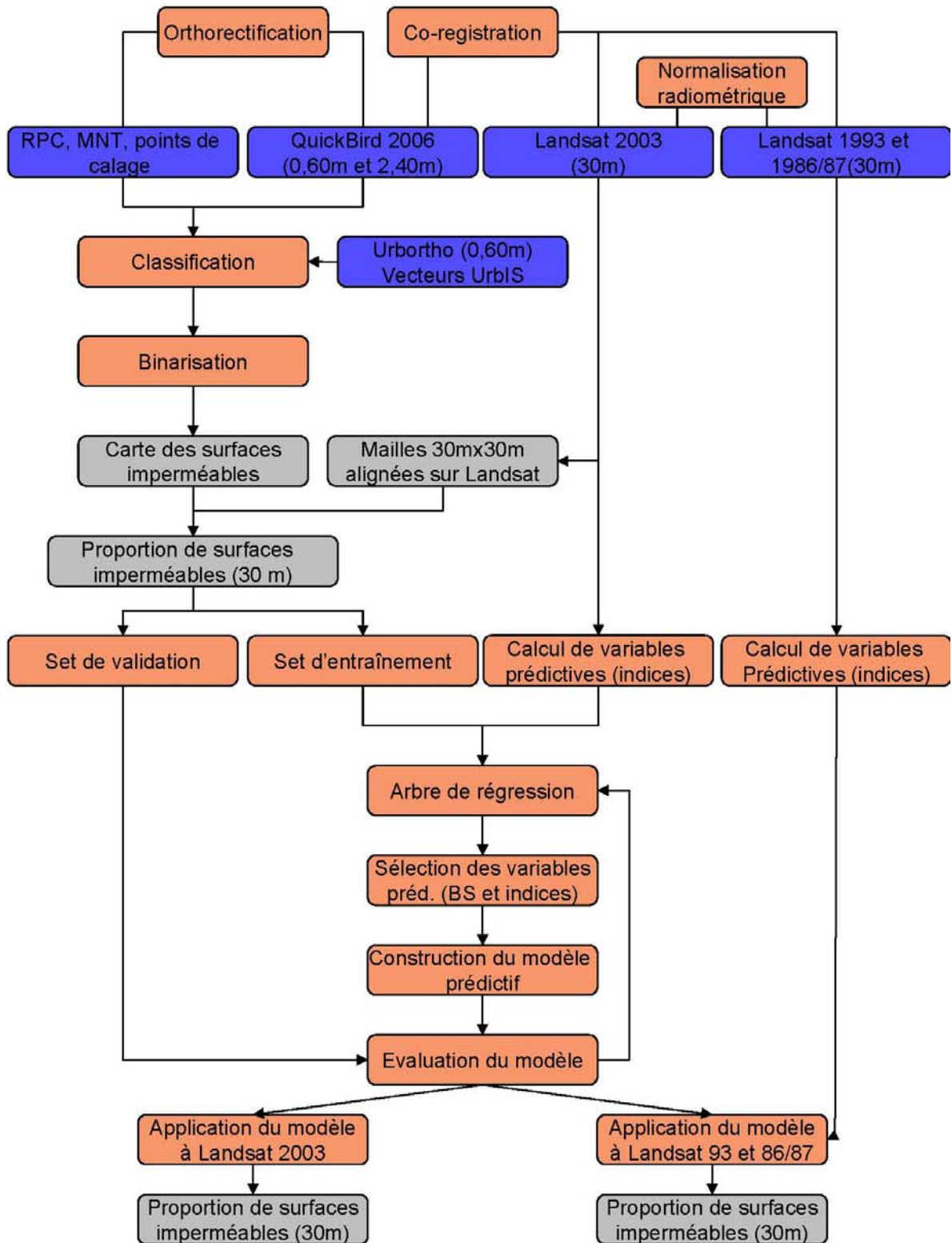


Figure 10 : Diagramme des principales étapes de la méthode mise en oeuvre.

2.2.2.2 Prétraitements

Dans le diagramme ci-dessus, les principaux prétraitements sont repris dans les trois premières boîtes (orthorectification, co-registation, normalisation radiométrique).

L'image QuickBird acquise le 22 mars 2006 satisfait aux critères imposés lors de la commande, mais présente un voile de brume particulièrement marqué dans le sud de la zone. Pour remédier à ce problème, et à notre demande, le fournisseur des données (GIM – Geographic Information Management) a traité l'image à l'aide d'un algorithme permettant d'effectuer des corrections atmosphériques¹. La brume a pu être atténuée sur les bandes multispectrales, mais pas sur la bande panchromatique. L'image fusionnée (pansharpened) n'a pas non plus pu être corrigée.

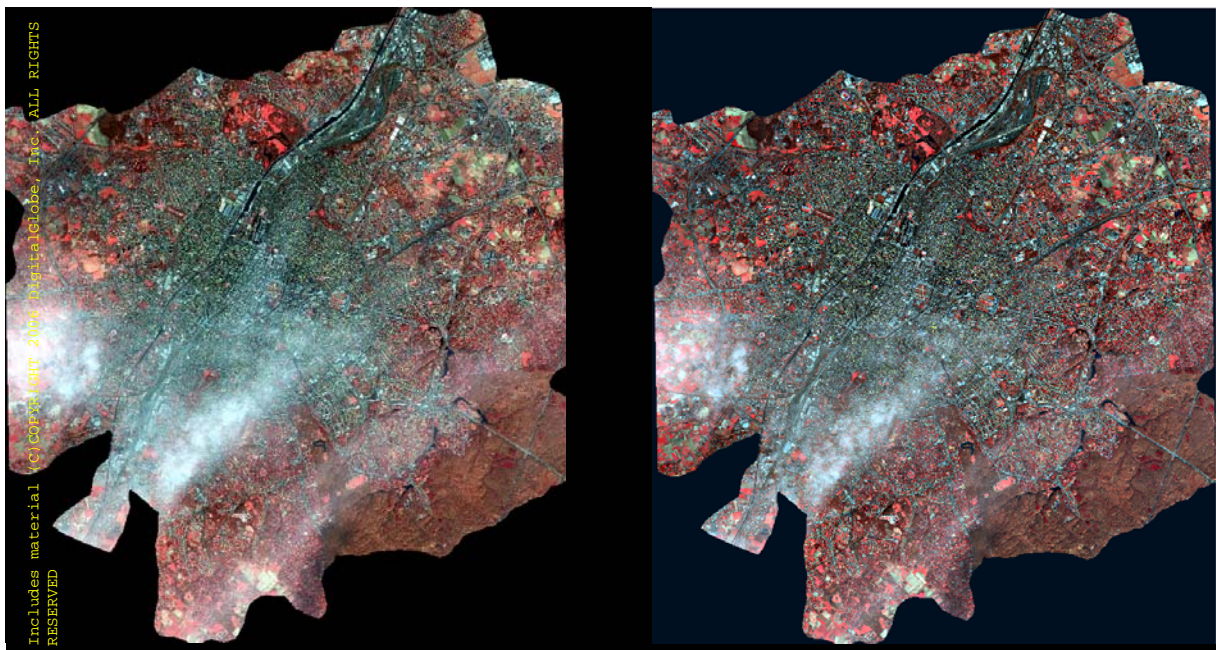


Figure 11 : QuickBird, composition colorée fausses couleurs (PIR, R, V), à gauche avant traitement FLAASH, à droite après traitement FLAASH.

L'image a ensuite été orthorectifiée à l'aide du logiciel ERDAS v.8.7, selon l'approche RPC (Rational Polynomial Coefficients). Cette approche requiert l'usage d'un modèle mathématique de la géométrie de l'image, d'un modèle numérique de terrain pour tenir compte du relief et de points de calages pris sur des données de référence. La fiche descriptive de l'image QuickBird se trouve en annexe 2, et les informations techniques relatives aux prétraitements se trouvent en annexe 3.

En ce qui concerne la haute résolution, l'image SPOT HRG panchromatique à 2,50m de résolution a été géoréférencée en prenant comme données de référence les vecteurs de la base UrbIS[®] pour le territoire de la Région de Bruxelles-Capitale, et des orthophotoplans datant de 1995 pour le reste de la zone. Toutes les autres images à haute résolution ont ensuite été

¹ FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes), algorithme disponible sous forme de plug-in du logiciel de traitement d'images ENVI.

co-registrées sur cette image SPOT HRG pour les rendre superposables, et découpées pour n'en garder qu'une zone rectangulaire comprenant la zone d'étude.

L'image Landsat de 1993 présentant quelques pixels saturés a été traitée en remplaçant les valeurs saturées par la moyenne des valeurs des pixels voisins de la même colonne. Toutes les images Landsat ont ensuite été normalisées d'un point de vue radiométrique. En effet, étant donné que nous construisons un modèle prédictif sur base de l'image Landsat 2003, et que nous devons ensuite appliquer ce modèle à toutes les images Landsat, il est nécessaire, au préalable, de normaliser ces images entre elles d'un point de vue radiométrique. De cette manière, une occupation du sol inchangée au fil du temps produira des valeurs similaires sur toutes les images, ce qui n'est pas nécessairement le cas avant la normalisation en raison des différences liées à la prise de vue, aux conditions atmosphériques, à l'ensoleillement etc. Les paramètres de la normalisation se trouvent en annexe 3.

2.2.2.3 Classification par région, binarisation de la classification et calcul du pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles de 30m de côté

Nous avons privilégié la méthode de classification dite "classification par région" ou "classification orientée-objet". La classification par région, contrairement à la classification par pixel, comporte une étape préliminaire de segmentation de l'image. Une fois l'image segmentée en régions spectralement homogènes, de nombreux attributs être utilisés pour la classification, tels que les attributs liés à la morphologie (forme, taille, orientation, ...), la texture (hétérogénéité au sein de chaque région) et le voisinage des régions.

Nous avons utilisé le logiciel eCognition Professional v4.0, qui permet une classification par région basée sur la logique floue. Les régions sont assignées à une classe en fonction de leur degré d'appartenance à cette classe, déterminé par l'algorithme du plus proche voisin et/ou par des fonctions d'adhésion modélisées par l'utilisateur.

Nous avons réalisé la classification de l'image QuickBird, en utilisant des données complémentaires UrbIS[®], à savoir l'orthophotoplan couleur à 60 cm de résolution couvrant la Région, et un masque des surfaces imperméables dérivé des vecteurs représentant les surfaces de rues, les bâtiments et les zones vertes. Ce masque des surfaces imperméables a été produit en plusieurs étapes:

- superposition des vecteurs bâtiments sur l'image QuickBird pour apporter les modifications nécessaires aux vecteurs (constructions et démolitions récentes);
- soustraction des zones vertes dans les surfaces de rues (ronds points, bermes centrales verdurisées,...);
- fusion des vecteurs bâtiments et surfaces de rues;
- rastérisation des vecteurs.

Pour les zones masquées par des nuages sur l'image QuickBird, nous n'avons utilisé que l'orthophotoplan et le masque des surfaces imperméables. Par ailleurs, pour compléter la classification sur l'ensemble de la zone d'étude, nous avons utilisé les images SPOT. Il en résulte une classification composite (cf. figure 12).

Les paramètres de segmentation et de classification, ainsi que la légende détaillée se trouvent en annexe 4.

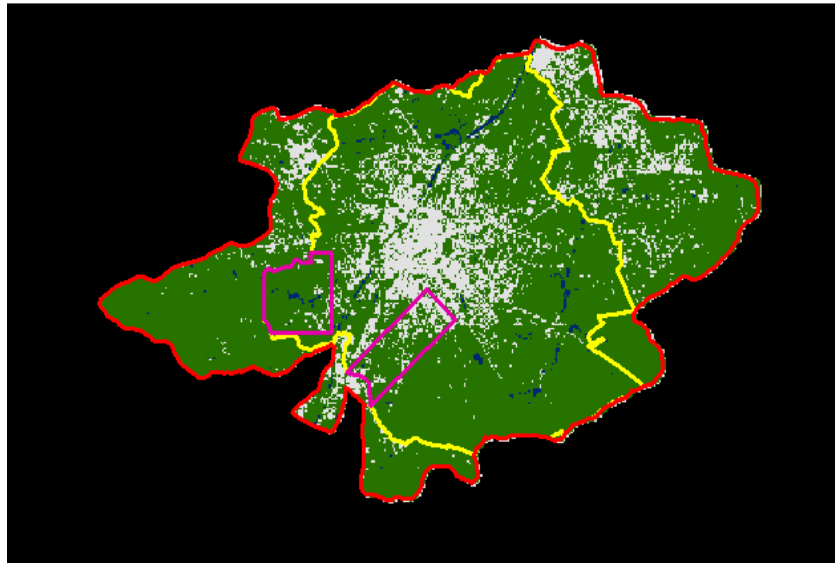


Figure 12 : Classification composite pour 2006
 (surfaces imperméables en gris ,surfaces perméables en vert, eau en bleu)
 polygone jaune : QuickBird + UrbOrtho + vecteurs UrbIS
 polygones fuschia : UrbOrtho + vecteurs UrbIS[®]
 polygone rouge : SPOT

Nous avons ensuite utilisé l'information fournie par les vecteurs UrbIS[®] zones de chemin de fer, zones d'eau et zones vertes pour améliorer la classification. La classification et les vecteurs UrbIS[®] sont complémentaires, comme illustré ci-dessous. En particulier, des omissions de surfaces imperméables ont pu être évitées grâce aux vecteurs, mais d'autre part, ces derniers ne couvrent pas les surfaces imperméables de manière exhaustive. Les parkings, notamment, en sont absents.

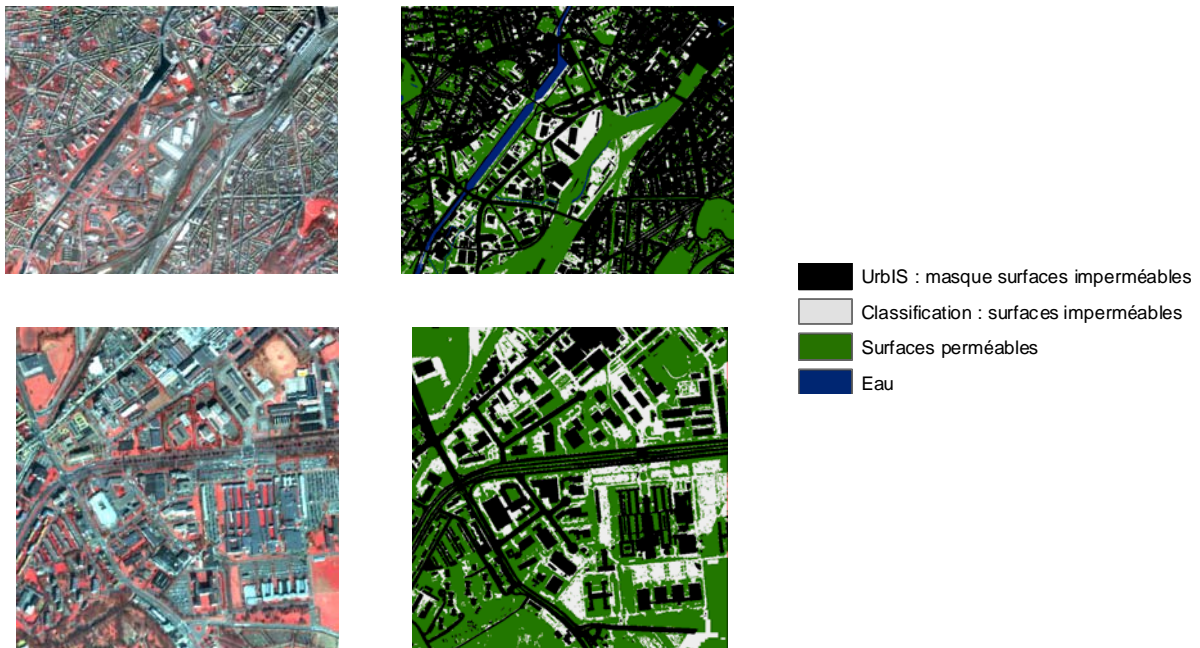


Figure 13 : Complémentarité entre les résultats de la classification et les informations provenant des vecteurs UrbIS

Le degré de détail atteint par la classification est illustré dans les deux figures suivantes.



Figure 14 : Extrait de la classification illustrant le degré de détail atteint dans la zone circonscrite par le polygone jaune de la figure 12

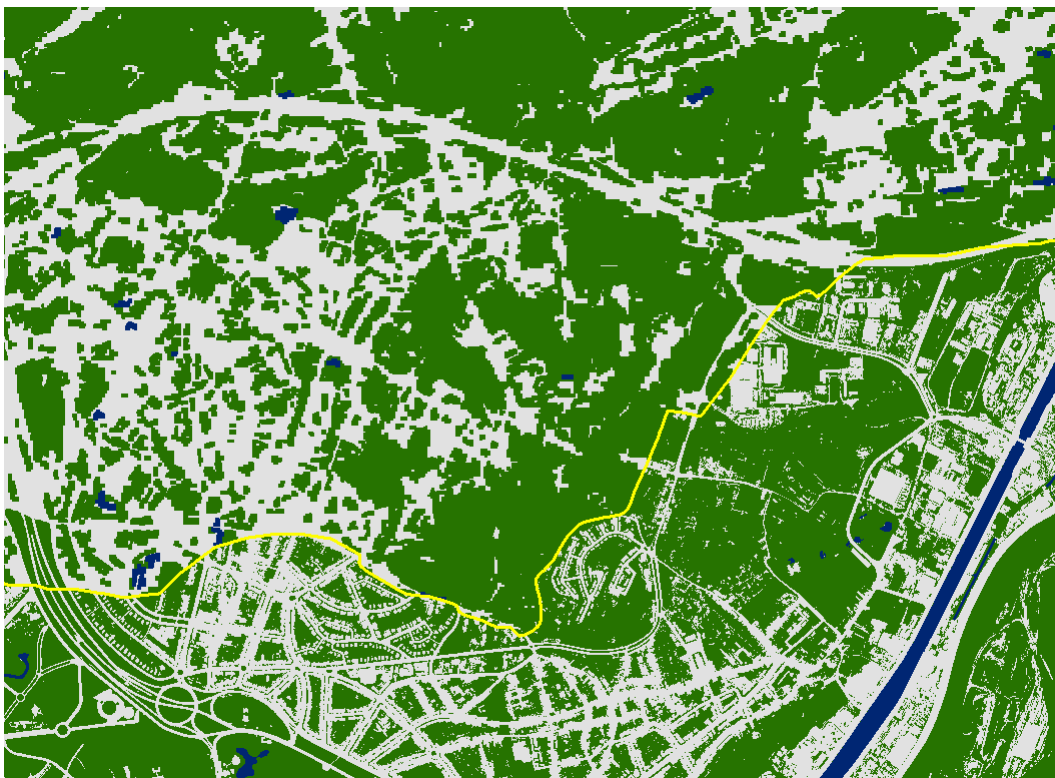
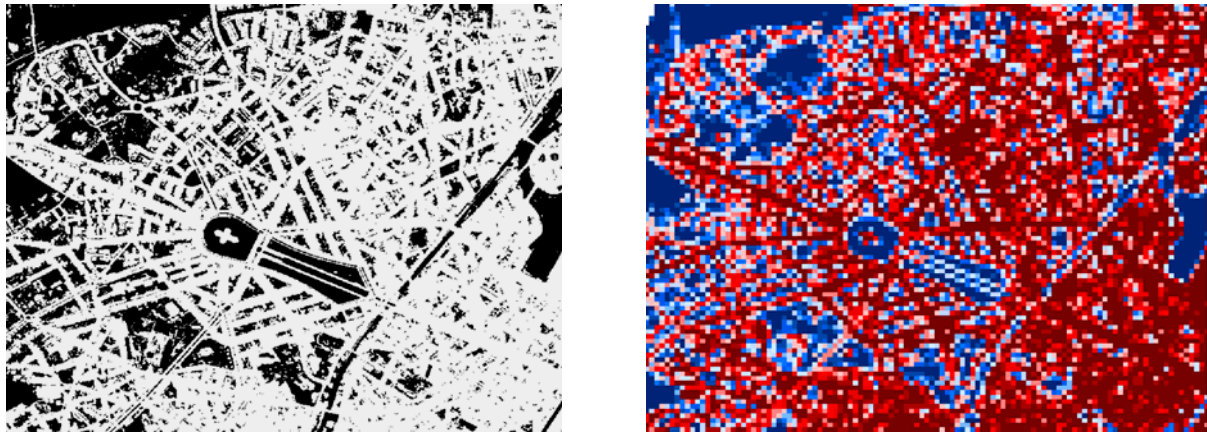


Figure 15 : Extrait de la classification illustrant la différence dans le degré de détail dans et hors du polygone jaune de la figure 12

Le résultat a finalement été rendu binaire pour ne garder que deux classes, à savoir les surfaces perméables d'une part et les surfaces imperméables de l'autre.

Une grille de mailles de 30 mètres de côté à été générée en prenant comme référence les images Landsat, de telle manière que chaque maille recouvre exactement un pixel Landsat. En appliquant cette grille sur la classification binarisée, nous avons pu extraire le pourcentage de surfaces imperméables dans chaque maille, l'objectif étant de trouver une relation entre ce pourcentage et la valeur de différentes variables extraites des images Landsat.



**Figure 16 : A g., classification binaire (surfaces imperméables en blanc, surfaces perméables en noir)
A dr. pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles de 30m de côté (croissant du bleu au rouge)**

2.2.2.4 Calcul d'indices basés sur les images Landsat

Une fois les images Landsat normalisées, cinq indices sont calculés pour chacune d'entre elles: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), MSAVI2 (Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index), BI (Brightness Index).

Ces indices sont calculés de la manière suivante (cf. annexe 5):

- $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$
- $PVI = (PIR - (a * R) - b) / ((a^2 + 1)^{1/2})$
- $SAVI = ((PIR - R) / (PIR + R + 0.5)) * (1 + 0.5)$
- $MSAVI2 = 0.5 * ((2 * (PIR + 1)) - (((2 * PIR) + 1)^2 - 8 * (PIR - R))^{1/2})$
- $BI = (PIR^2 + R^2)^{1/2}$

Ils jouent le rôle de variables prédictives dans le modèle, au même titre que les bandes spectrales. Deux indices sont illustrés ci-dessous (BI et NDVI).

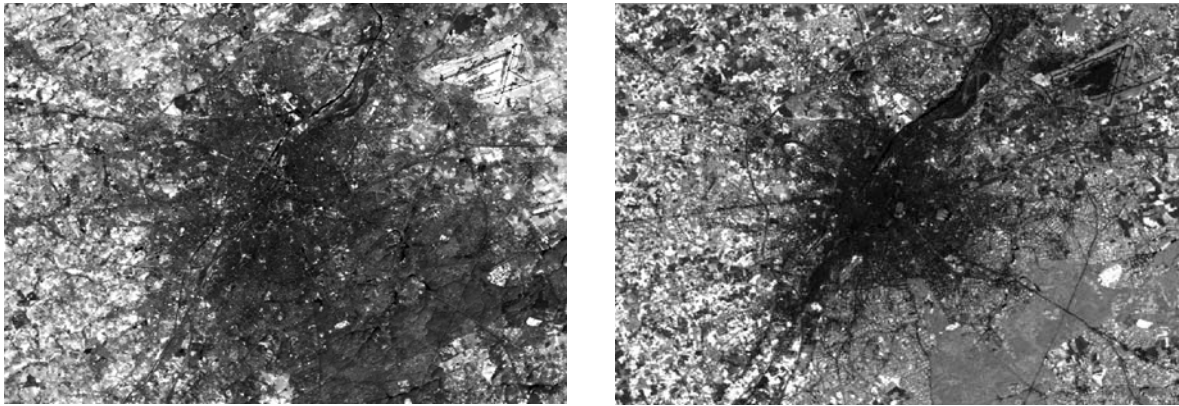


Figure 17 : Deux des indices calculés au départ des images Landsat : l'indice de brillance (à g.) et l'indice normalisé de végétation (à dr.). La palette va du noir au blanc pour des valeurs croissantes.

2.2.2.5 Modélisation par arbre de régression

Un algorithme de la famille des arbres de régression a été utilisé pour établir une relation entre le pourcentage de surfaces imperméables tiré de la classification 2006 et les variables prédictives extraites de l'image Landsat 2003. Cet algorithme effectue une partition binaire récurrente des données, et produit des jeux de règles et de modèles de régression destinés à prédire le pourcentage de surfaces imperméables, sur base de données d'entraînement. Chaque jeu de règles définit les conditions sous lesquelles un modèle de régression linéaire multivariée est établi. Les partitions ont pour objectif de réduire l'erreur résiduelle du modèle, et le résultat est évalué sur des données de validation distinctes des données d'entraînement. L'algorithme que nous avons utilisé est disponible dans le logiciel Cubist v 2.03.

Afin d'introduire la composante spatiale, nous avons également utilisé NLCD Mapping Tool qui est une application développée par MDA Federal Inc. pour le United States Geological Survey (USGS). NLCD Mapping Tool permet de produire les données d'entrée pour Cubist au départ d'images, et également d'appliquer le modèle produit avec Cubist aux images.

Afin d'évaluer les résultats de la régression, nous les avons comparés aux résultats obtenus par les autres méthodes:

- Selon la méthode basée sur la base de données MURBANDY/MOLAND, les surfaces imperméables représentent 31% de la zone d'étude en 1985. Elles en représentent 30 % en 1986 selon la régression.
- Selon la classification 2006, les surfaces imperméables représentent 38 % de la zone d'étude. Elles en représentent 37% en 2003 selon la régression.

Ces résultats sont jugés suffisamment proches pour valider la régression.

On trouvera en annexe 6 les paramètres de la modélisation par arbre de régression ainsi que le modèle en résultant.

3 Résultats

Nous tenons ici à rappeler que notre étude vise à estimer au mieux le pourcentage de surfaces imperméables à différentes dates, et non à le calculer de manière exacte. Les résultats présentés ci-après reflètent la réalité mais doivent être considérés en gardant à l'esprit que nous avons utilisé des données de précisions différentes et des méthodes différentes, et que dès lors il convient de tolérer une marge d'erreur de l'ordre de quelques pour cent sur les zones étudiées.

Par ailleurs si dans une phase ultérieure d'autres zones doivent faire l'objet d'estimations, il faut éviter de les définir de manière trop restreinte en raison du risque de sur- ou sous-estimation sur des petites superficies.

3.1 Résultats sur l'ensemble de la zone d'étude

Sur l'ensemble de la zone d'étude, l'augmentation des surfaces imperméables est très importante depuis les années 1950 puisqu'elle passe de 18 % en 1955 à 37 % en 2006, soit un doublement. L'augmentation la plus importante (tant absolue que relative) se produit entre 1955 et 1970. On constate ensuite un léger fléchissement de la tendance à la hausse, qui reste malgré tout bien présente jusqu'à nos jours.

Superficie totale ha	Superficie imperméable 1955		Superficie imperméable 1970		Superficie imperméable 1985		Superficie imperméable 1993		Superficie imperméable 2006	
	ha	% du total	ha	% du total	ha	% du total	ha	% du total	ha	% du total
26905	4946	18	6938	26	8276	31	9148	34	9955	37

Tableau 6 : Récapitulatif de l'évolution de la superficie imperméable entre 1955 et 2006 sur l'ensemble de la zone d'étude.

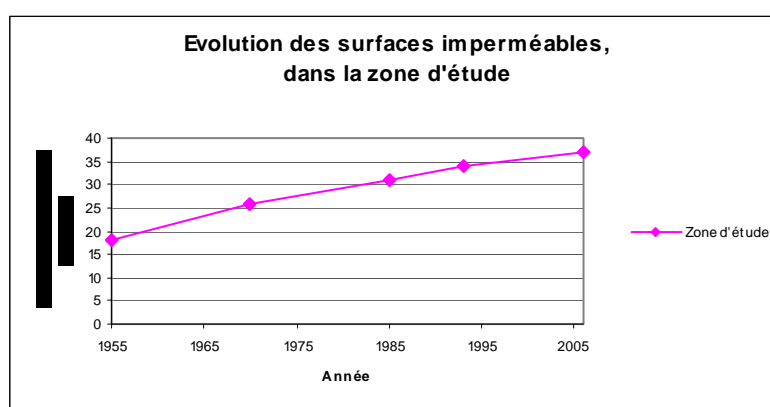


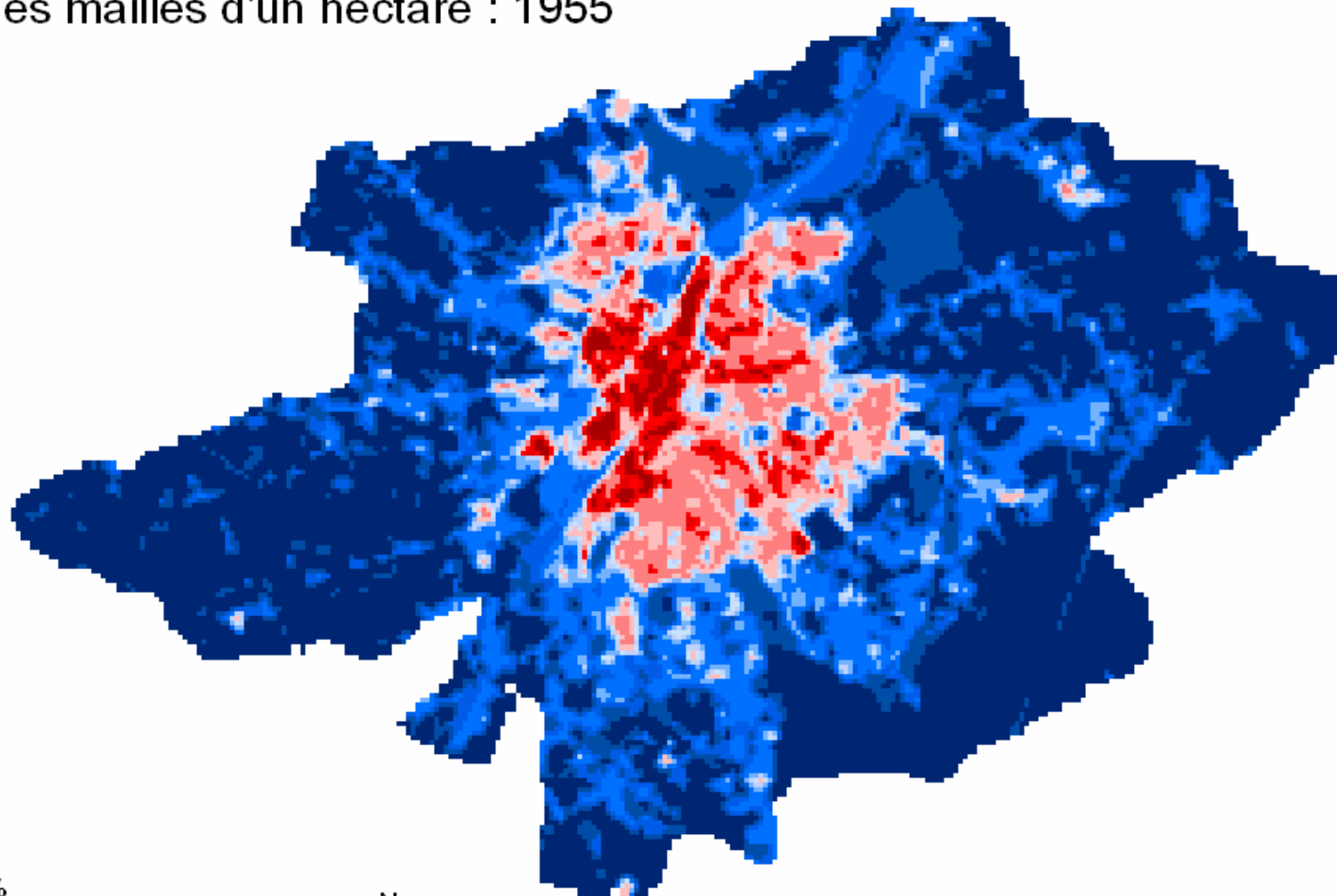
Figure 18 : Graphique de l'évolution des surfaces imperméables dans la zone d'étude

Les pages suivantes présentent les principaux résultats cartographiques obtenus:

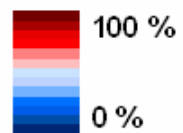
- cartes du pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles de 1 ha, aux 5 dates;

- classification 2006;
- évolution du pourcentage de surfaces imperméables dans les polygones MURBANDY/MOLAND (pour les trois dates de la première période);
- évolution du pourcentage de surfaces imperméables selon la régression (3 dates de la deuxième période).

Pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles d'un hectare : 1955

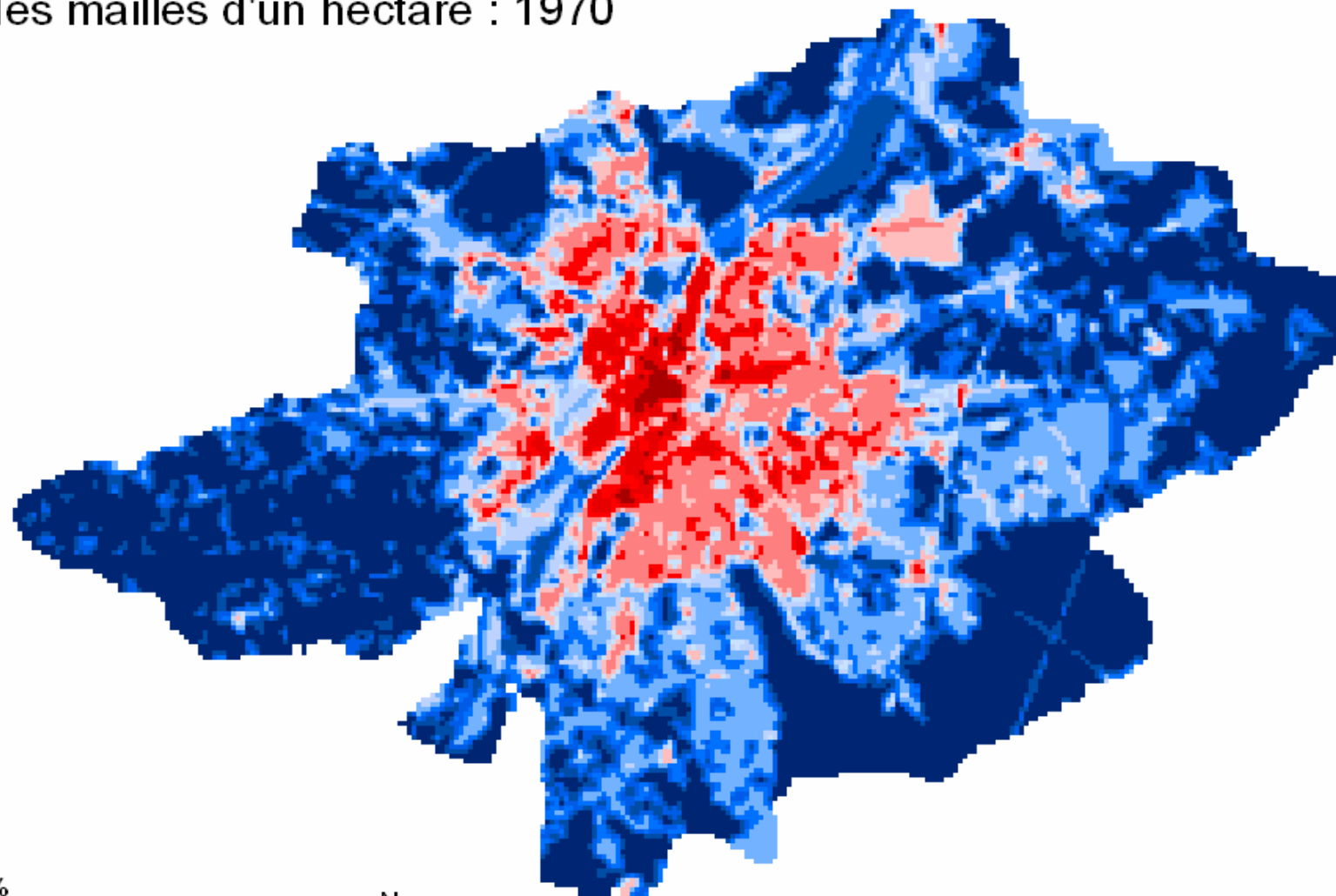


Légende

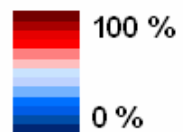


Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

Pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles d'un hectare : 1970

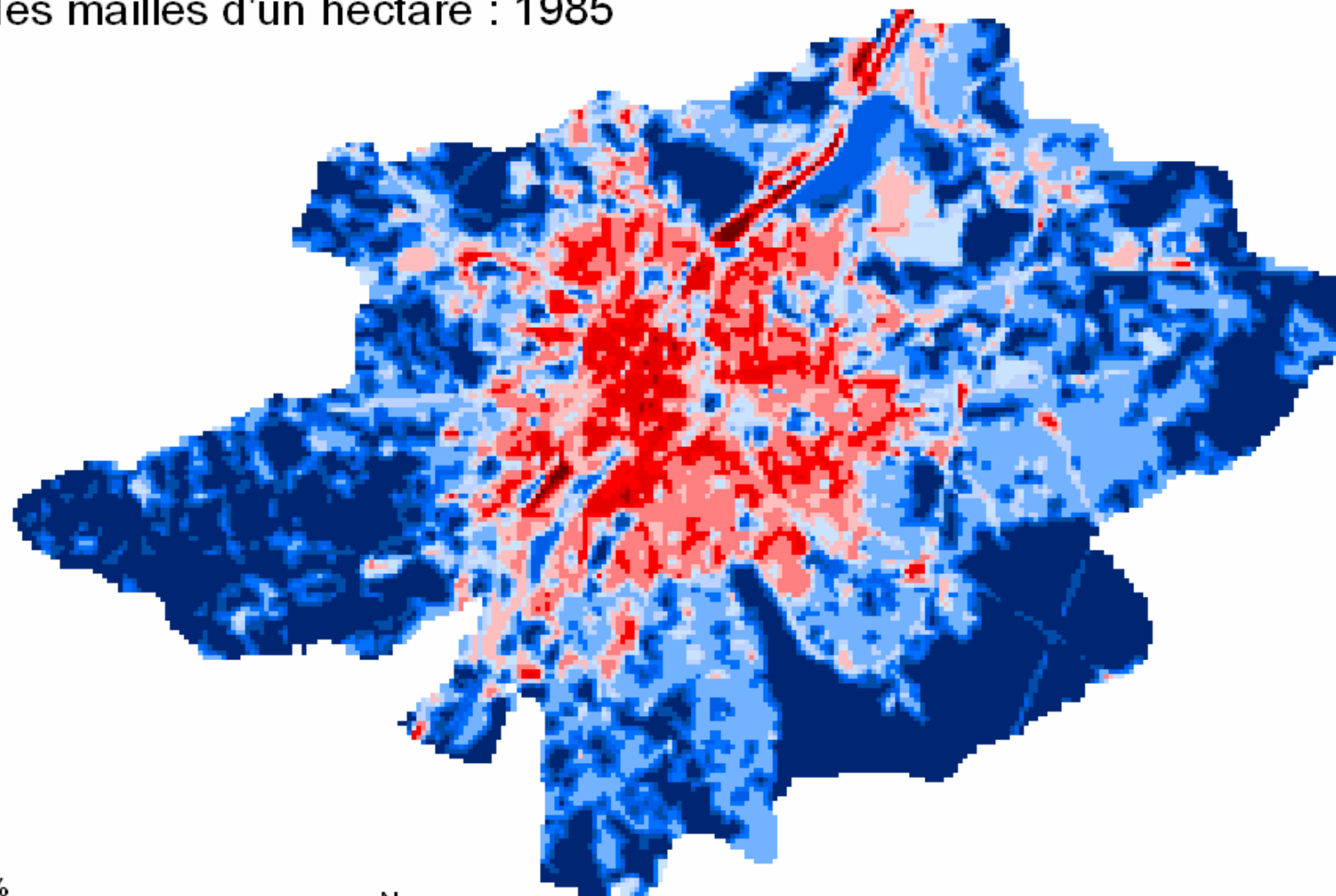


Légende

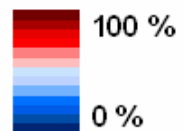


Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

Pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles d'un hectare : 1985

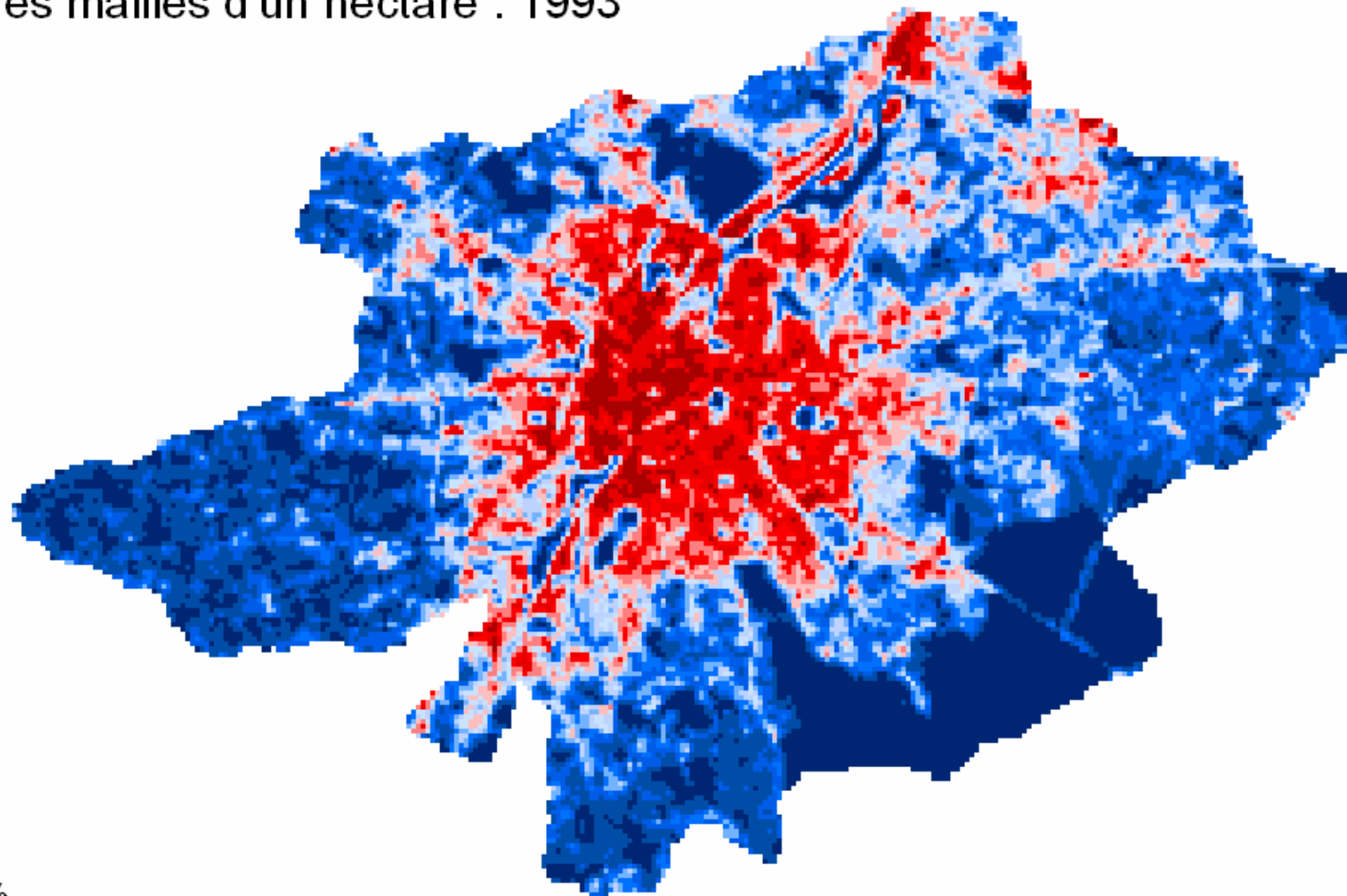


Légende

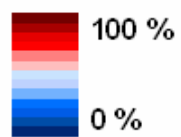


Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

Pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles d'un hectare : 1993

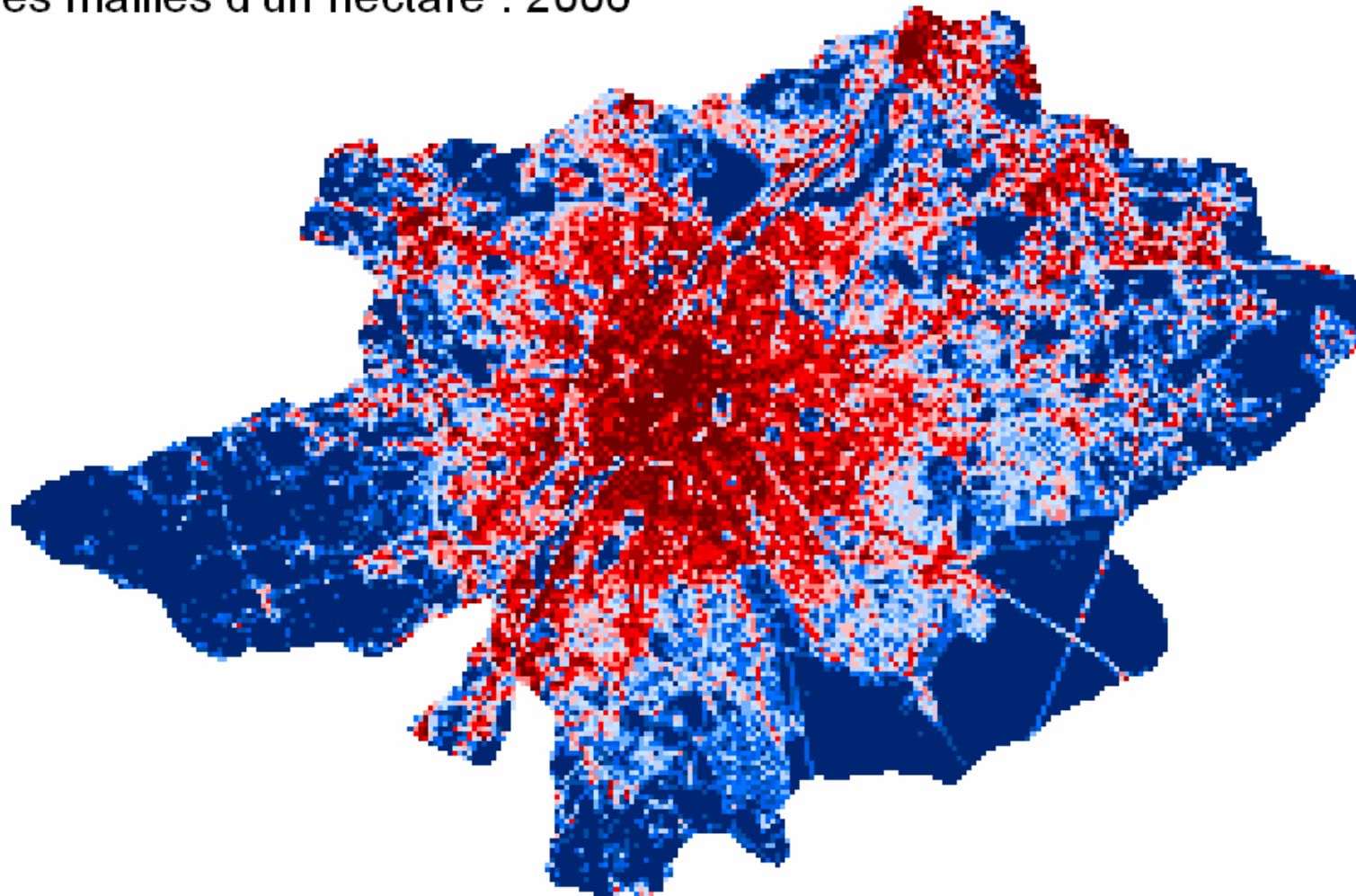


Légende

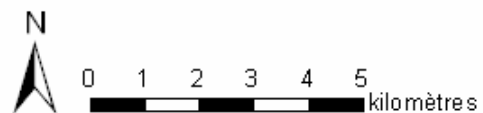
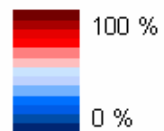


Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

Pourcentage de surfaces imperméables dans des mailles d'un hectare : 2006

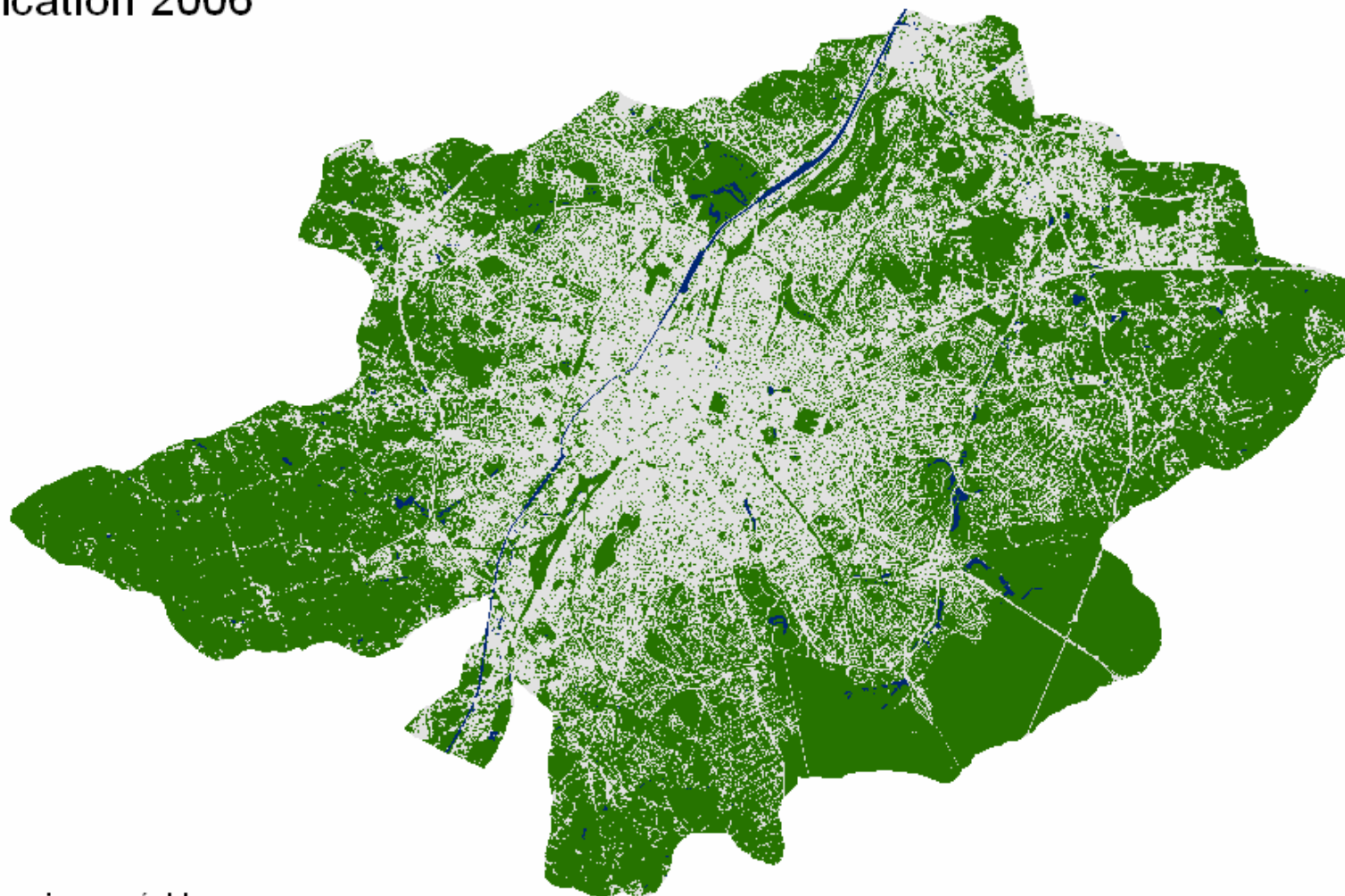


Légende



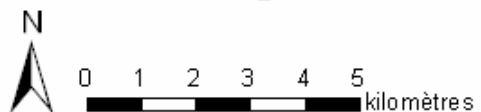
Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

Classification 2006



Légende

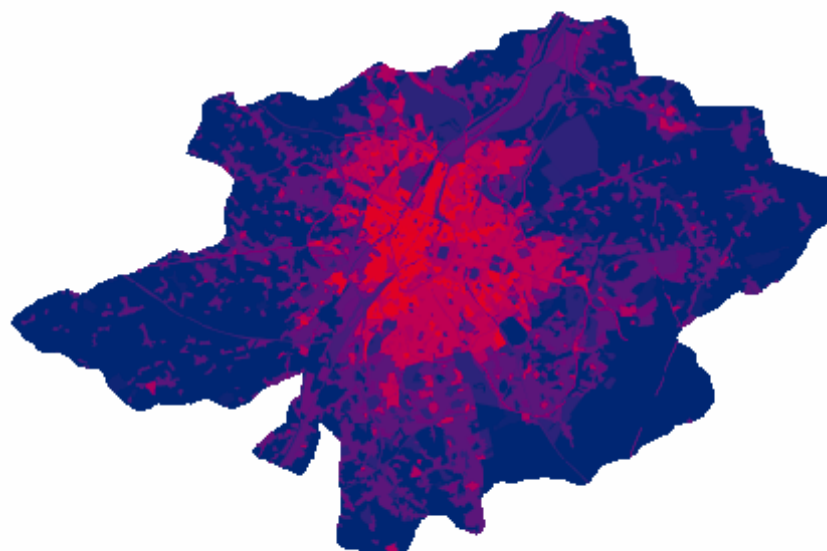
- Surfaces imperméables
- Surfaces perméables
- Eau



Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

Pourcentage de surfaces imperméables dans les polygones MURBANDY/MOLAND : Evolution

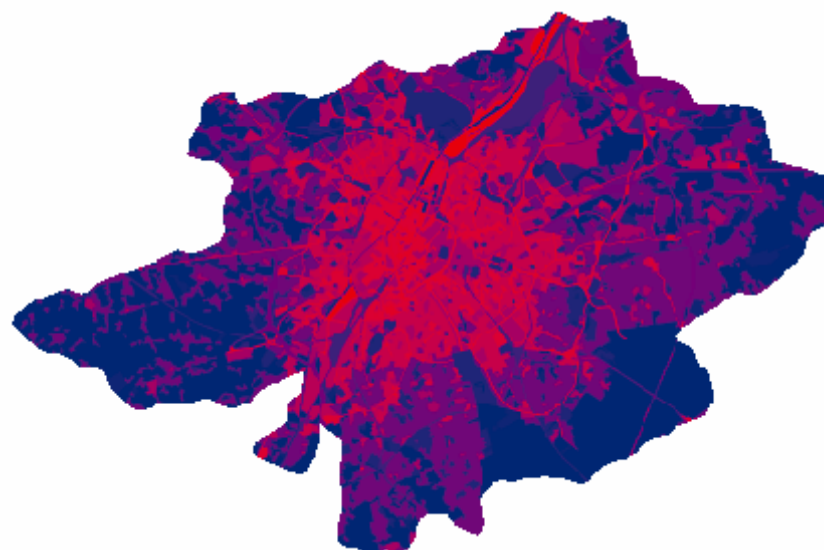
1955



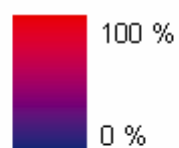
1970



1985



Légende

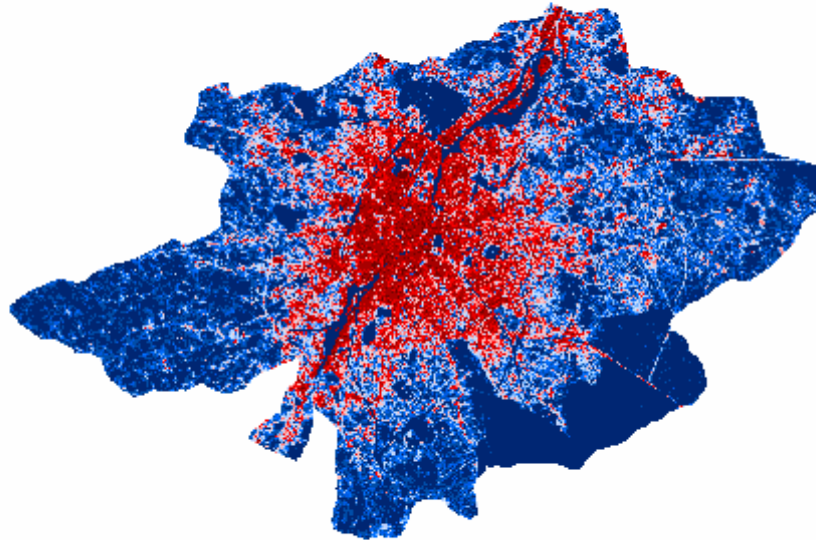


0 1 2 3 4 5
kilomètres

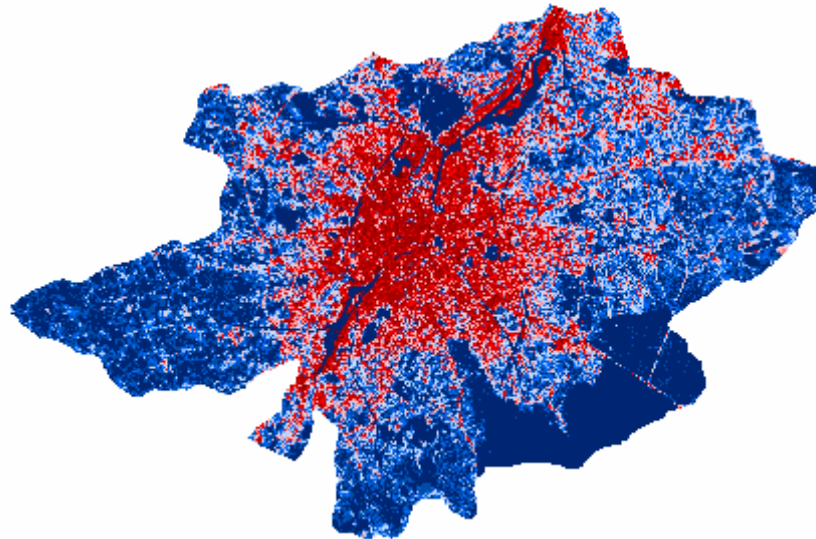
Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

Pourcentage de surfaces imperméables, selon la régression : Evolution

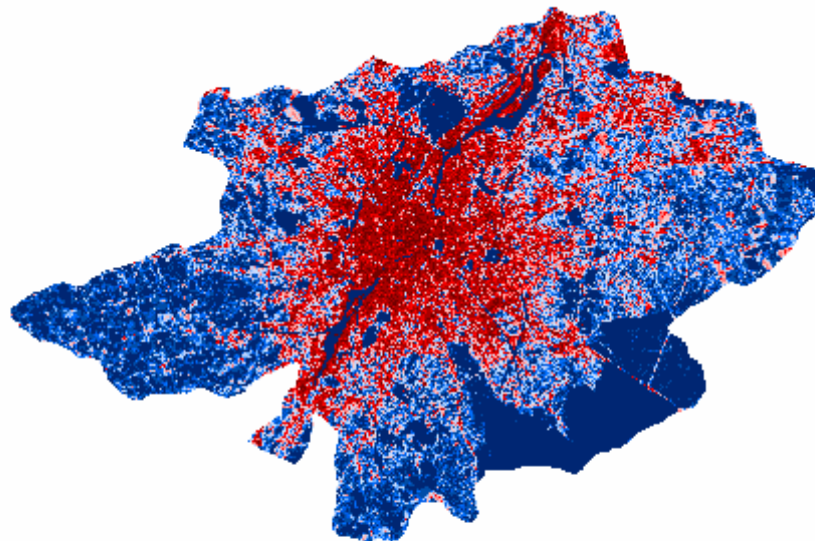
1986



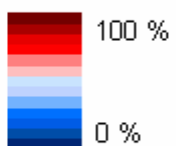
1993



2003



Légende



0 1 2 3 4 5
kilomètres

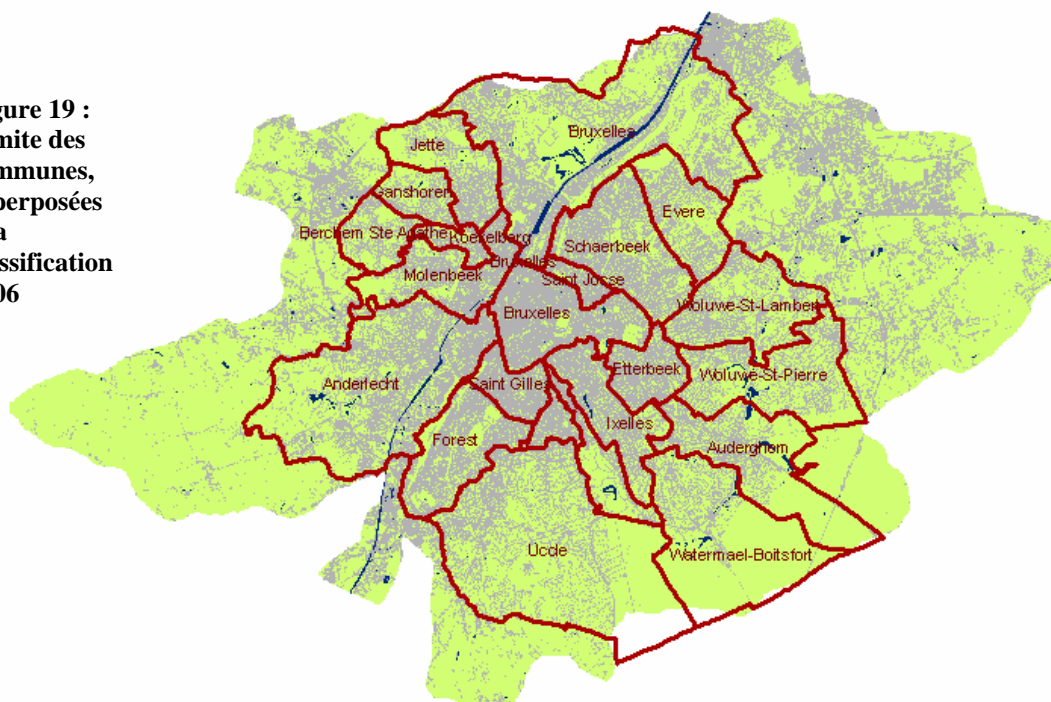
Cartographie : IGEAT - ULB, octobre 2006

3.2 Résultats sur des zones d'intérêts particulières

Le pourcentage de surfaces imperméables a été calculé aux 5 dates étudiées pour une série de zones d'intérêts déterminées par la Direction de l'Eau. Ces zones sont basées sur les communes, les bassins d'eaux usées et les bassins d'eaux de surface. Dans les tableaux, les pourcentages notés en gras marquent une baisse dans une tendance générale à la hausse, très probablement due à une sous-estimation.

3.2.1 Communes

Figure 19 :
Limite des communes, superposées à la classification 2006



	Proportion de surfaces imperméables (en %)				
	1955	1970	1985	1993	2006
Anderlecht	19	29	38	42	49
Auderghem	11	20	22	24	29
Berchem Ste Agathe	19	30	39	40	48
Bruxelles	31	37	44	47	52
Etterbeek	60	65	65	70	76
Evere	16	33	41	41	48
Forest	32	41	49	51	63
Ganshoren	20	35	42	40	48
Ixelles	49	57	59	64	72
Jette	26	33	40	39	47
Koekelberg	48	59	61	62	69
Molenbeek	39	46	52	57	63
Saint Gilles	66	66	66	75	85
Saint Josse	68	67	65	71	80
Schaerbeek	49	56	59	63	68
Uccle	19	26	27	23	32
Watermael-Boitsfort	9	12	13	11	16
Woluwe-St-Lambert	20	34	42	41	50
Woluwe-St-Pierre	19	30	32	28	38

* Communes dont le territoire ne s'inscrit pas entièrement dans la zone d'étude

Tableau 7: Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, par commu

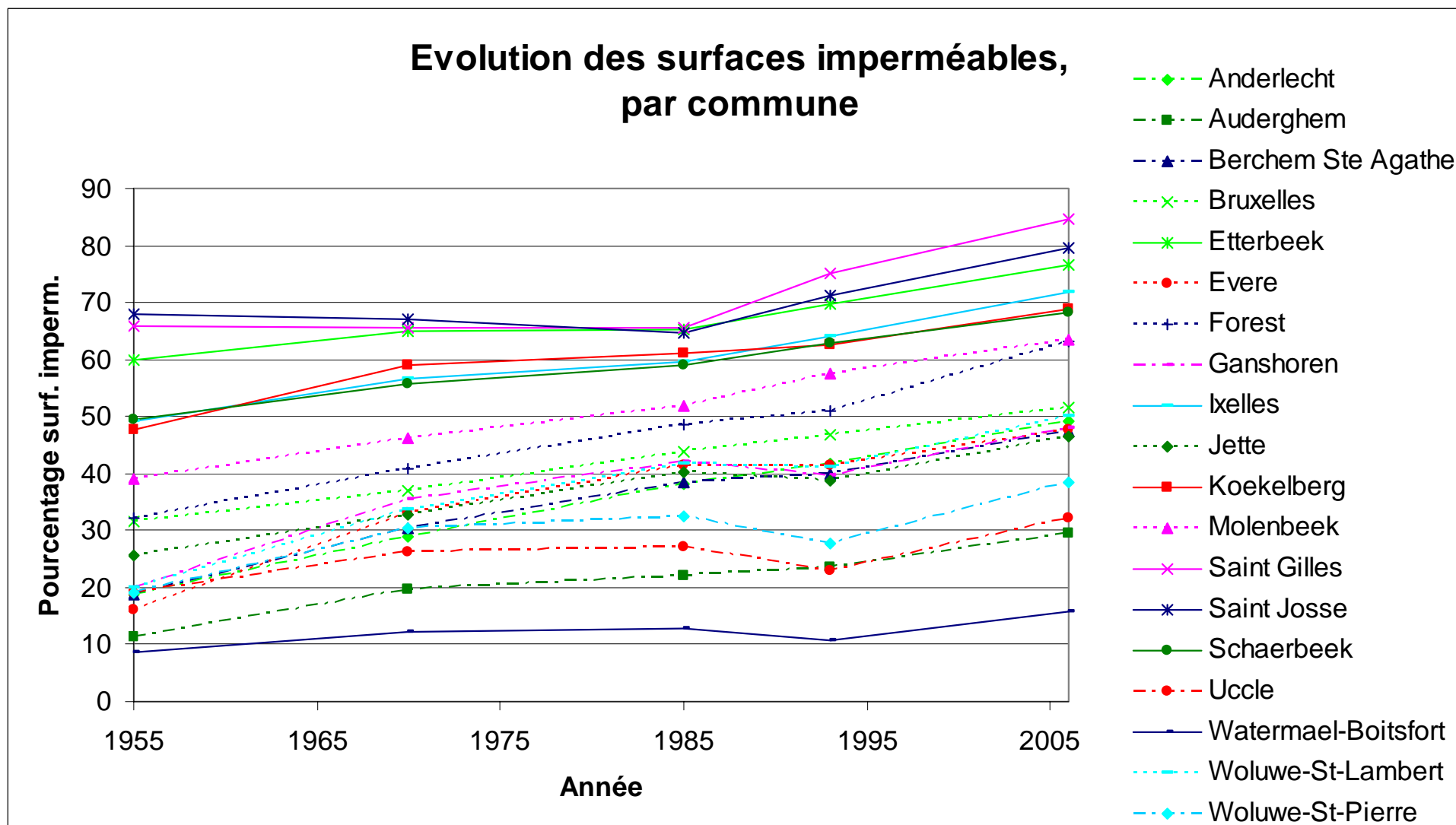


Figure 20 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, par commune

3.2.2 Détail pour Bruxelles, trois zones distinctes

Figure 21 :
Limite de
Bruxelles
(trois zones),
superposées
à la
classification
2006

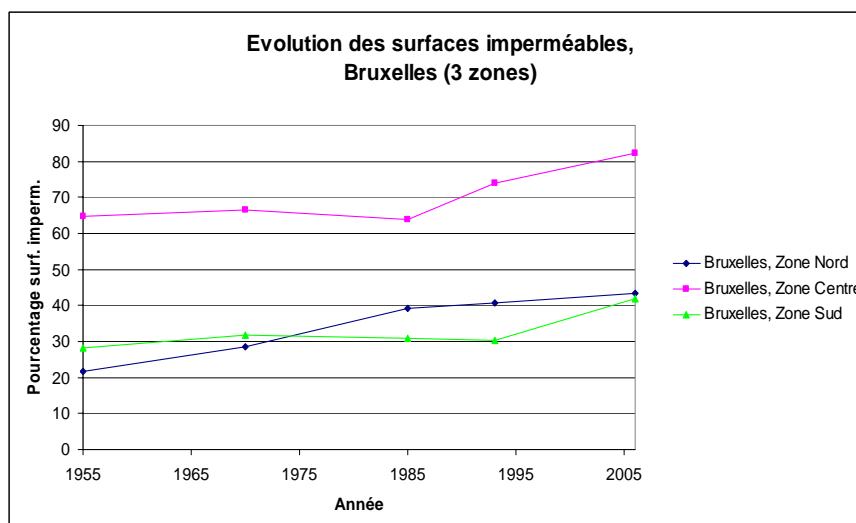
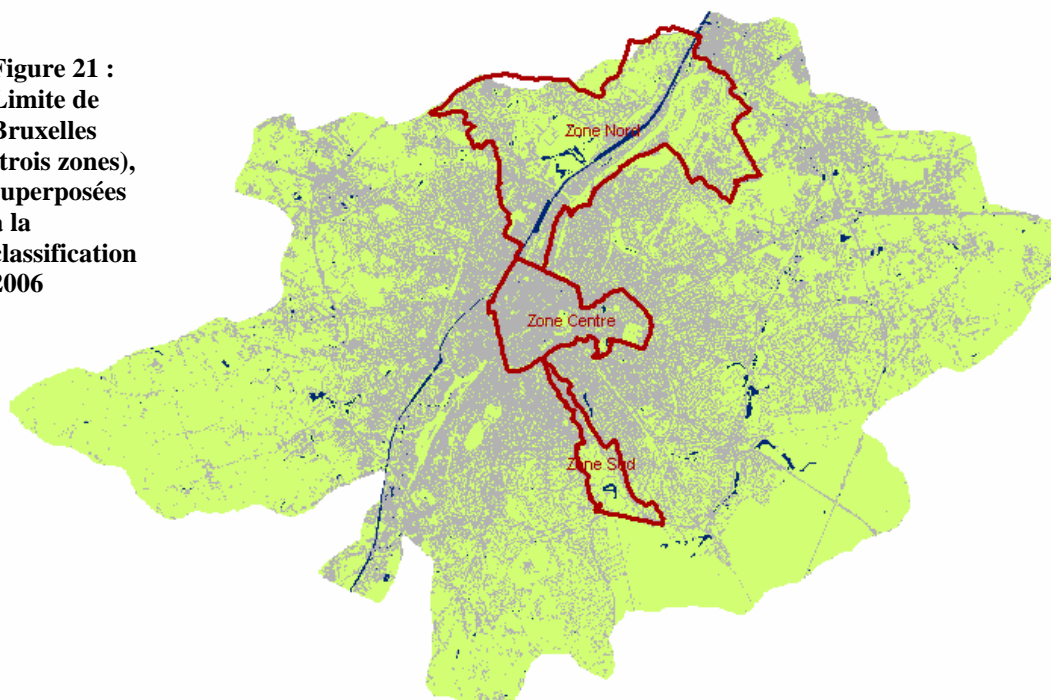


Figure 22 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour Bruxelles

	Proportion de surfaces imperméables (en %)				
	1955	1970	1985	1993	2006
Bruxelles, Zone Nord*	22	29	39	41	43
Bruxelles, Zone Centre	65	67	64	74	82
Bruxelles, Zone Sud	28	32	31	30	42

* Zone dont le territoire ne s'inscrit pas entièrement dans la zone d'étude

Tableau 8 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables pour Bruxelles

3.2.3 Bassins d'eaux usées

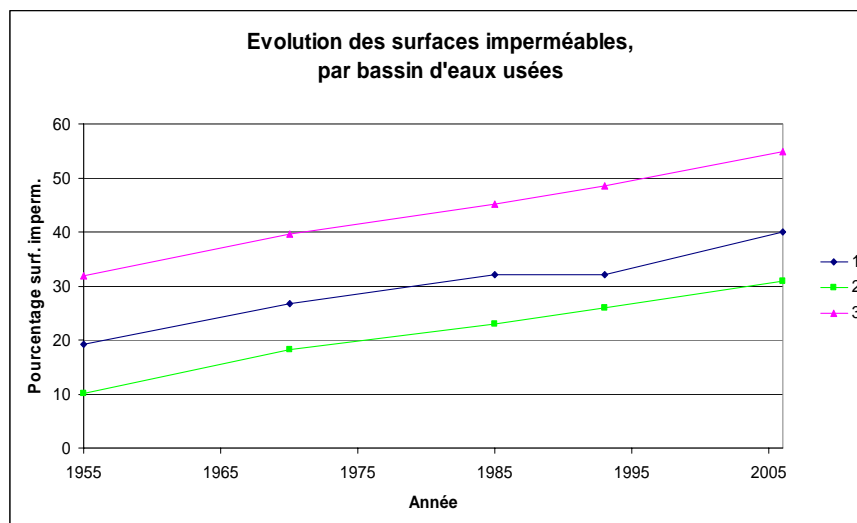
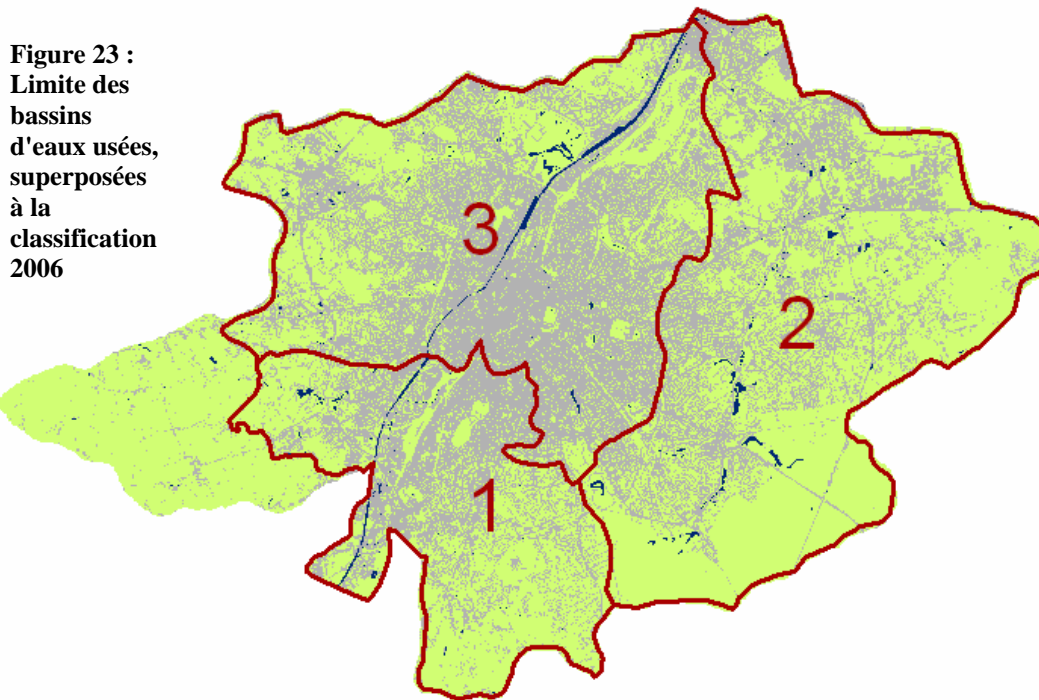


Figure 24 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, par bassin d'eaux usées

	Proportion de surfaces imperméables (en %)				
	1955	1970	1985	1993	2006
1	19	27	32	32	40
2	10	18	23	26	31
3	32	40	45	49	55

Tableau 9 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, par bassin d'eaux usées

3.2.4 Bassins d'eaux de surface

Figure 25:
Limite des
bassins d'eaux
de surface,
superposées à
la classification
2006

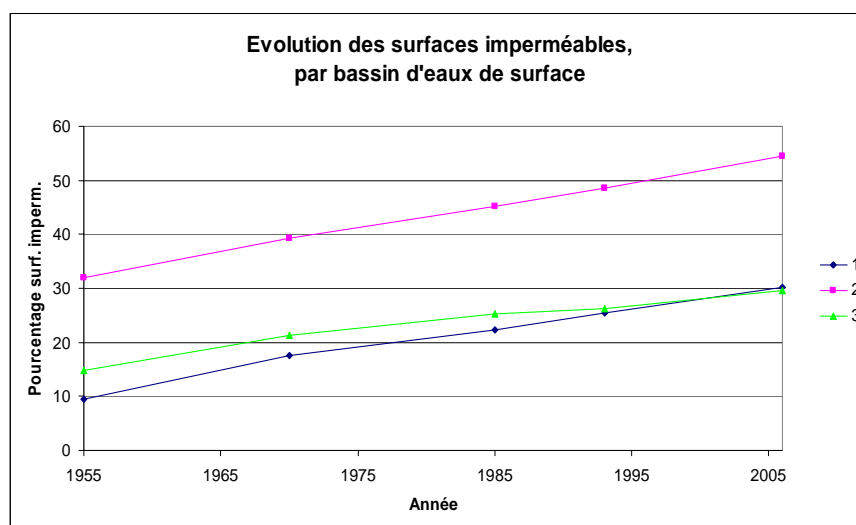
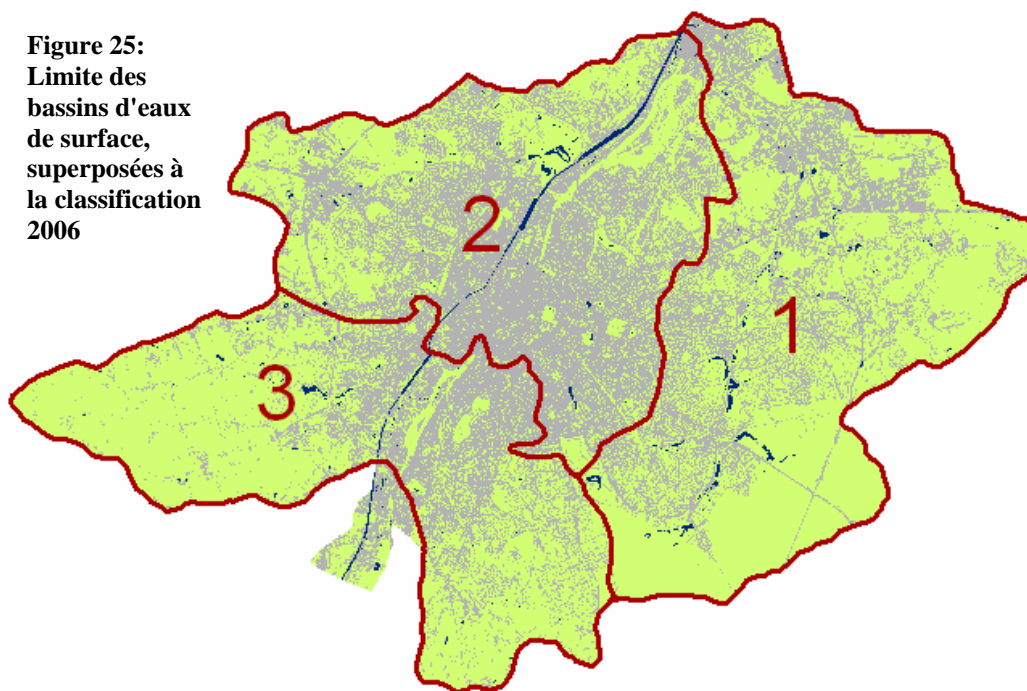


Figure 26 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, par bassin d'eaux de surface

	Proportion de surfaces imperméables (en %)				
	1955	1970	1985	1993	2006
1	10	18	22	26	30
2	32	39	45	49	55
3	15	21	25	26	30

Tableau 10 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables par bassin d'eaux de surface

3.2.5 Zone du bassin d'orage Flagey

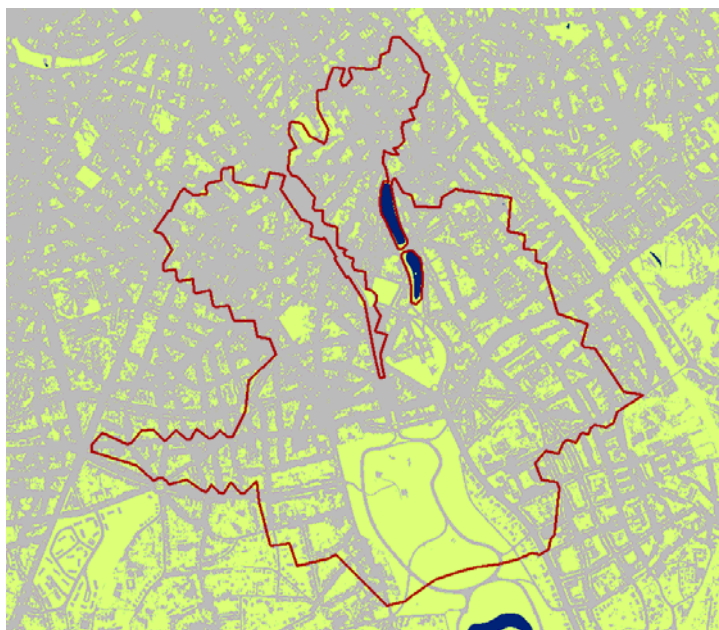


Figure 27 : Limite de la zone du bassin d'orage Flagey, superposée à la classification 2006

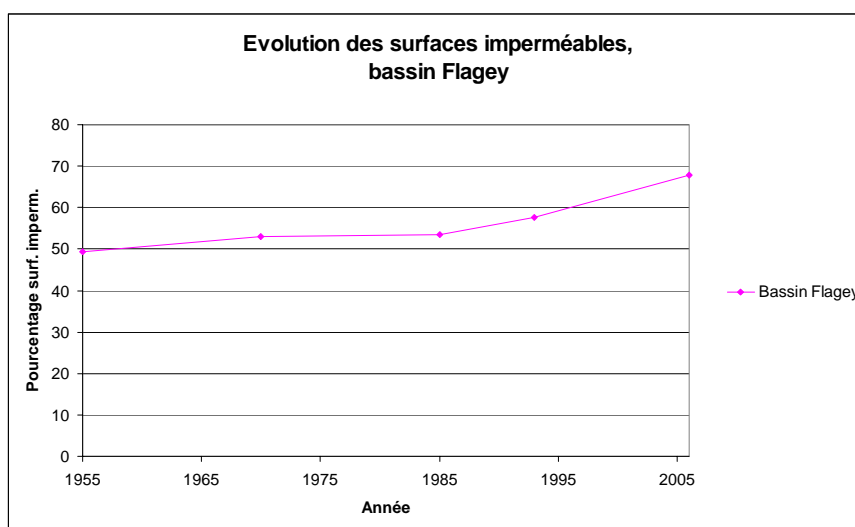


Figure 28 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage Flagey

	Proportion de surfaces imperméables (en %)				
	1955	1970	1985	1993	2006
Bassin Flagey	49	53	53	58	68

Tableau 11 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage Flagey

3.2.6 Zone du bassin d'orage de Forest

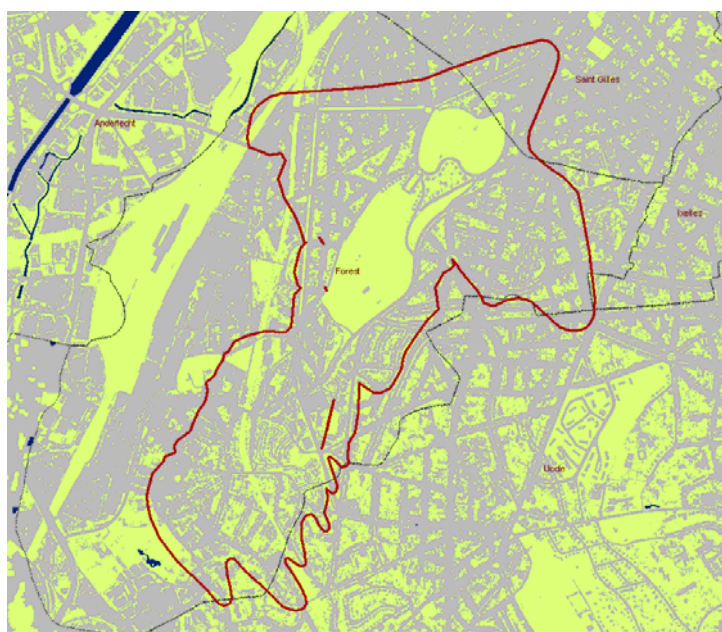


Figure 29 : Limite de la zone du bassin d'orage de Forest, superposée à la classification 2006

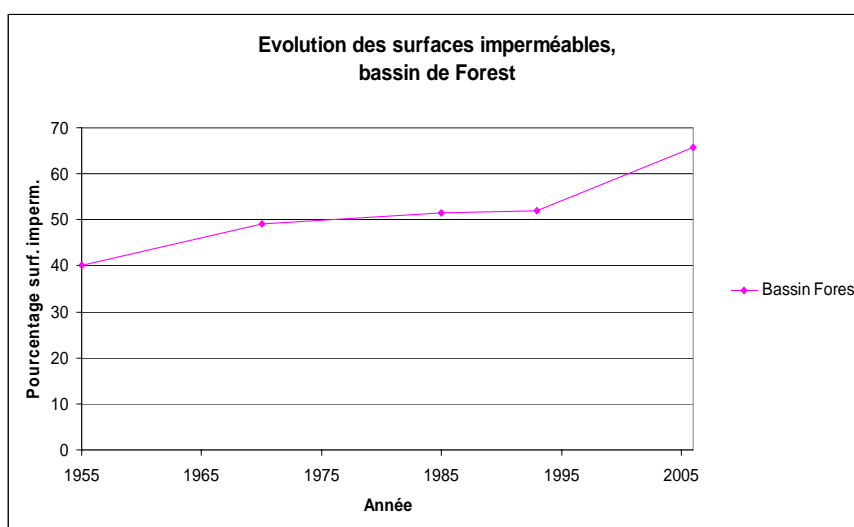


Figure 30 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage Flagey

	Proportion de surfaces imperméables (en %)				
	1955	1970	1985	1993	2006
Bassin Forest	40	49	51	52	66

Tableau 12 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage de Forest

3.2.7 Bassin de la Woluwe, zone du Woluwé Shopping Center

Le bassin de la Woluwe, dans la zone du Woluwé Shopping Center, est sujet aux inondations, la dernière en date étant celle de juillet 2006. Le bassin est ici limité au nord par le territoire de la commune de Woluwé-Saint-Lambert et au sud par celui de Woluwé-Saint-Pierre.

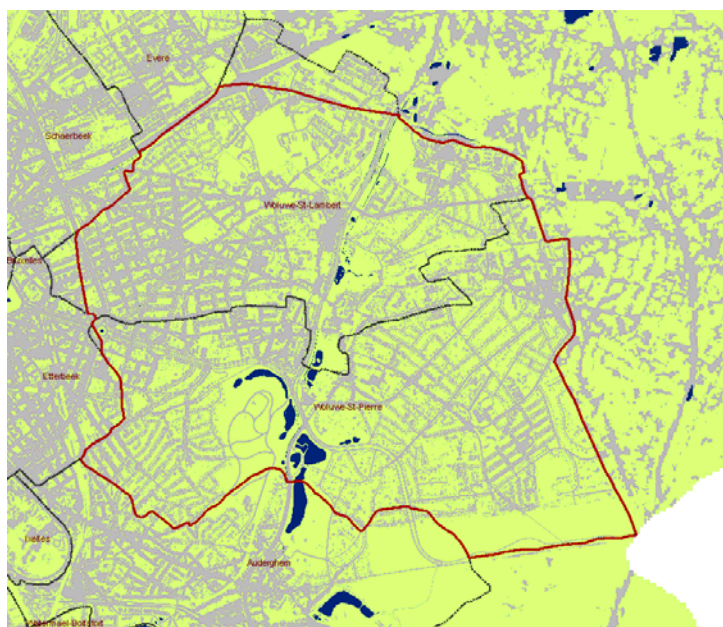


Figure 31 : Limite du bassin de la Woluwe (limité), superposée à la classification 2006

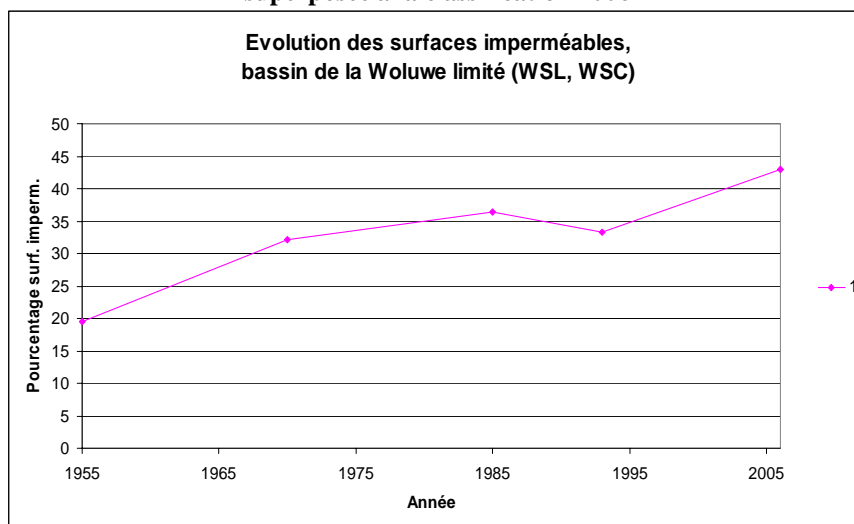


Figure 32 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour le bassin de la Woluwe (limité)

	Proportion de surfaces imperméables (en %)				
	1955	1970	1985	1993	2006
Bassin Woluwe limité	20	32	36	33	43

Tableau 13 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour le bassin de la Woluwe (limité)

4 Conclusion

En se basant sur différents types de données et en mettant en œuvre deux méthodes distinctes, la présente étude a permis d'évaluer l'évolution de l'imperméabilisation des sols du territoire de la Région de Bruxelles-Capitale depuis les années 1950 jusqu'à nos jours. Comme énoncé précédemment, les résultats présentés reflètent la réalité mais doivent être considérés en gardant à l'esprit que nous avons utilisé des données de précisions différentes et des méthodes différentes, et que dès lors il convient de tolérer une marge d'erreur de l'ordre de quelques pour cent sur les zones étudiées. Par ailleurs si dans une phase ultérieure d'autres zones doivent faire l'objet d'estimations, il faut éviter de les définir de manière trop restreinte en raison du risque de sur- ou sous-estimation sur des petites superficies.

Pour la première période, nous avons utilisé la base de données de l'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND, disponible pour 1955, 1970 et 1985 et estimé le coefficient d'imperméabilisation des différentes classes, à l'aide de cartes topographiques et de photos aériennes. Sur l'ensemble de la zone d'étude, notre estimation indique que le pourcentage de surfaces imperméables est passé de 18% en 1955 à 31% en 1985, ce qui représente une augmentation très importante.

Pour la deuxième période, nous avons effectué une classification de l'utilisation du sol sur base d'une image satellitaire à très haute résolution datant de 2006. En partant de la classification binaire (surfaces perméables et surfaces imperméables) nous avons modélisé une relation entre le pourcentage de surfaces imperméables et différentes variables spectrales dérivées d'images à haute résolution. Ceci nous a permis d'estimer le pourcentage de surfaces imperméables à 2 dates antérieures pour lesquelles nous ne disposons que d'images à haute résolution (1993 et 1986). Sur l'ensemble de la zone d'étude, nous estimons que le pourcentage de surfaces imperméables est passé de 31% en 1985 à 37% en 2006.

L'évolution est donc très marquée puisque, sur l'ensemble de la zone d'étude, l'étendue des surfaces imperméables a doublé depuis les années 1950. Par ailleurs, nous constatons que ce phénomène touche toutes les zones d'intérêt que nous avons étudiées, à des degrés divers, et que l'imperméabilisation des sols se poursuit encore actuellement.

Outre le présent rapport, les résultats sont fournis à l'AED/ Direction de l'Eau sous format numérique, afin de permettre l'extraction de statistiques complémentaires si nécessaire. Cette convention de recherche ne couvrant que l'état des lieux de la situation, nous ne fournissons ici que les pourcentages d'imperméabilisation, pour des zones déterminées, mais il est bien entendu que les résultats de la présente étude peuvent constituer une base pour des analyses ultérieures.

5 Annexe 1 : Liste des cartes topographiques et photos aériennes utilisées pour estimer le pourcentage d'imperméabilisation des classes d'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND

5.1 Cartes topographiques au 1 : 25 000

Les cartes topographiques au 1 : 25 000 sont des cartes IGN.

	1955	1970	1985
31 - 1 - 2	L'agglomération Bruxelloise	1969	1979
31 - 3 - 4		1970	1979
31 - 5 - 6		1970	1979
31 - 7 - 8		1969	1979

Tableau 14 : Cartes IGN au 1 : 25 000 utilisées pour la première période

5.2 Cartes topographiques au 1 : 5 000

Les cartes topographiques au 1 : 5 000 sont des cartes du Ministère des Travaux Public.

	1955	1970	1985
31 - 2 - 6	1958	1970	1983
31 - 3 - 1	1957	1970	1982
31 - 3 - 3	1956	1976	
31 - 3 - 4	1957	1976	
31 - 3 - 5	1957	1966	
31 - 3 - 6	1957	1970	
31 - 3 - 7	1957	1966	
31 - 3 - 8	1957	1970	
31 - 7 - 1	1957	1967	1982

Tableau 15 : Cartes au 1 : 5 000 du MTP utilisées pour la première période

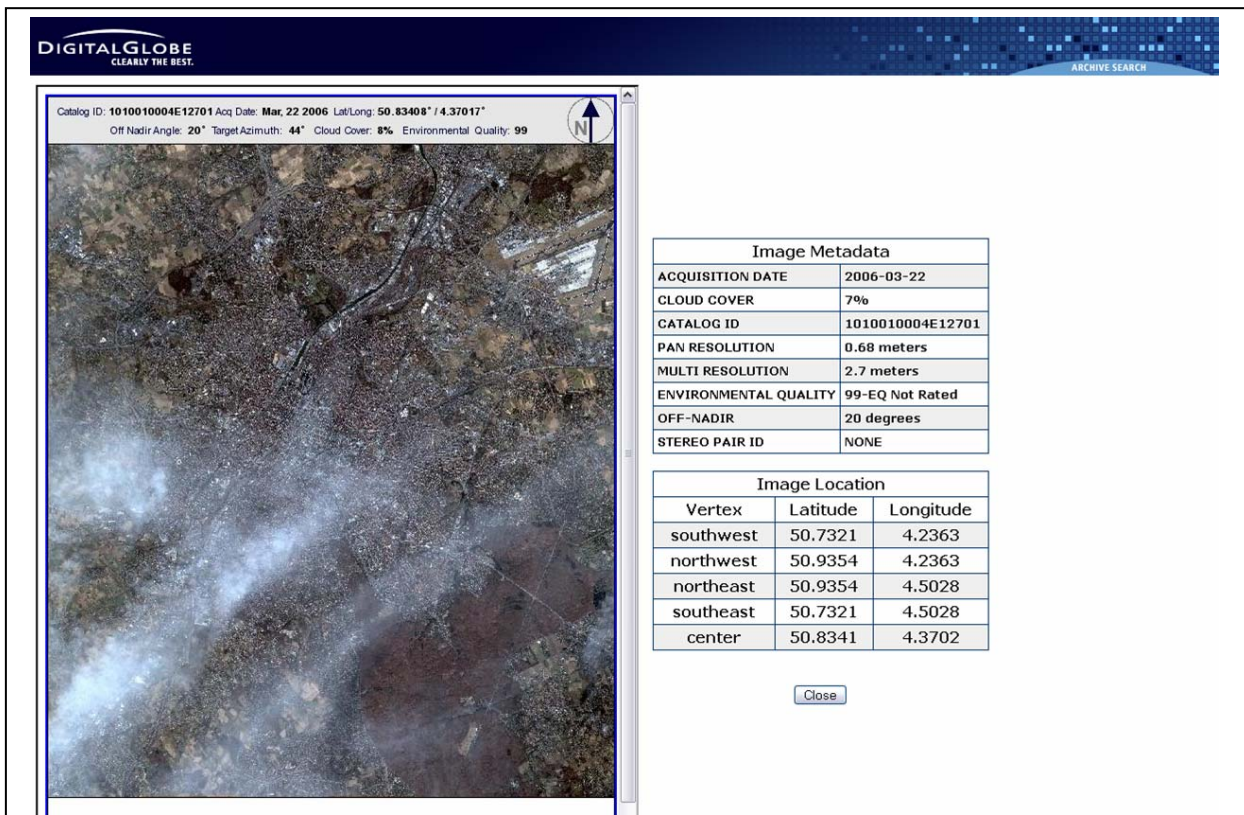
5.3 Photos aériennes

Il s'agit de photos aériennes IGN des années 1980, numéro de vol B(2)8 :

1124b31	1126b31	1128b31	1222a31	1224b31	1226b31	1228b31
1312a31	1314a31	1316b31	1318b31	1320b31	1422d31	1424d31

Tableau 16 : Photos aériennes utilisées pour la première période

6 Annexe 2 : Fiche descriptive QuickBird



The screenshot displays the DigitalGlobe online catalog interface. At the top left, the logo 'DIGITALGLOBE CLEARLY THE BEST.' is visible. The main area shows a satellite image of a landscape with a north arrow and a small 'N' icon. Above the image, the following metadata is displayed: Catalog ID: 1010010004E12701, Acq Date: Mar, 22 2006, Lat/Long: 50.83408° / 4.37017°, Off Nadir Angle: 20°, Target Azimuth: 44°, Cloud Cover: 8%, Environmental Quality: 99. To the right of the image, there are two tables: 'Image Metadata' and 'Image Location'. Below the tables is a 'Close' button.

Image Metadata	
ACQUISITION DATE	2006-03-22
CLOUD COVER	7%
CATALOG ID	1010010004E12701
PAN RESOLUTION	0.68 meters
MULTI RESOLUTION	2.7 meters
ENVIRONMENTAL QUALITY	99-EQ Not Rated
OFF-NADIR	20 degrees
STEREO PAIR ID	NONE

Image Location		
Vertex	Latitude	Longitude
southwest	50.7321	4.2363
northwest	50.9354	4.2363
northeast	50.9354	4.5028
southeast	50.7321	4.5028
center	50.8341	4.3702

Close

Figure 33 : Extrait du catalogue on-line DigitalGlobe

L'image couvre une zone de 220 km². Elle a été commandée en "Priority tasking", avec un maximum de 10% de couverture nuageuse et un angle de prise de vue maximal de 25°.

Type d'image : Standard Orthoready, Bundle – Panchromatic & Multi-spectral
Rééchantillonnage : Plus Proche Voisin
Projection : UTM 31N
Datum : WGS84

Pour une description complète des paramètres de l'image, se référer aux fichiers suivants:
06MAR22110951-P2AS-005544111010_01_P001.XML, pour la bande panchromatique;
06MAR22110951-M2AS-005544111010_01_P001.XML, pour les bandes multispectrales.

7 Annexe 3 : Informations relatives aux pré-traitements des données de télédétection

7.1 Datum et projection utilisés

Modèle géodésique

Datum : Belge 1972-1

Ellipsoïde : International 1924

Demi grand axe de l'ellipsoïde : 6378388.000000

Dénominateur du rapport d'aplatissement de l'ellipsoïde : 297.000000

Type de projection cartographique : Lambert conique conforme

Premier parallèle standard : 49.833334

Deuxième parallèle standard : 51.166667

Longitude du méridien central : 4.367487

Latitude de l'origine de la projection : 90.000000

Décalage vers l'Est de la fausse origine : 150000.012560

Décalage vers le Nord de la fausse origine : 5400088.437800

7.2 Atténuation de la brume sur l'image QuickBird

Les tableaux suivants présentent les statistiques univariées des bandes spectrales, avant et après traitement, ainsi que les corrélations entre les bandes avant et après traitement.

Statistiques univariées sur toute l'image		min	max	moy	ecart-type
Produit non traité	XS1	161	2012	256.1	49.3
	XS2	182	1998	339.4	82.1
	XS3	85	2016	225.4	68.3
	XS4	67	2033	313.8	100.8
		min	max	moy	ecart-type
Après FLAASH pour ENVI	XS1	0	32767	1910.6	2180.1
	XS2	0	32760	2044.9	2036.3
	XS3	0	32749	2310.3	1873.1
	XS4	0	32736	4083.6	2312.1

Tableau 17 : Statistiques univariées sur toute l'image

Statistiques bivariées (corrélations) sur un extrait sans brume				
	XS1 Flaash	XS2 Flaash	XS3 Flaash	XS4 Flaash
XS1	0.908			
XS2		0.939		
XS3			0.960	
XS4				0.967

Tableau 18 : Corrélations sur un extrait exempt de brume

7.3 Orthorectification de l'image QuickBird

Modèle mathématique de la géométrie de l'image

Les informations figurent dans 2 fichiers fournis avec l'image:
06MAR22110951-P2AS-005544111010_01_P001.RPB, pour la bande panchromatique;
06MAR22110951-M2AS-005544111010_01_P001.RPB, pour les bandes multispectrales.

Modèle numérique de terrain (MNT)

Le MNT utilisé a été créé par l'IGEAT dans le cadre de l'*Etude de Faisabilité sur l'utilisation des données à très haute résolution spatiale pour le suivi des espaces de végétation et d'eau en zone urbaine*, réalisée pour l'IBGE en 2001. Les sources en sont d'une part les courbes de niveau à une équidistance de 2m, couvrant la RBC, et d'autre part les courbes de niveau à une équidistance de 10m couvrant une zone d'environ 19,5km x 19,5km, centrée sur la RBC. Ce MNT a une résolution de 5m.

Points de calage

Ayant été acquises simultanément, les bandes panchromatiques et multispectrales ont été calées avec le même jeu de 135 points.

L'erreur quadratique moyenne (EQM) est de 2,36 m en X et 2,10 m en Y, sur base d'une transformation polynomiale du deuxième ordre.

7.4 Géoréférencement et co-registation des images à haute résolution

L'image SPOT HRG panchromatique de 2003 a été géoréférencée sur les vecteurs UrbIS[®] et sur des orthophotos de 1995 à l'aide de 157 points de calage. Toutes les autres images à haute résolution ont ensuite été co-registrées sur cette image pour les rendre superposables.

	Nb points de calage	EQM en X (en pixels 2,5m)	EQM en Y (en pixels 2,5m)
Landsat 1986	53	0,36	0,19
Landsat 1987	45	0,35	0,29
Landsat 1993	55	0,26	0,24
Landsat 2003	30	0,66	0,79
SPOT XS 2003	100	0,28	0,23
SPOT XS 2005	43	0,17	0,19

Tableau 19 : Nombre de points de calage et erreur quadratique moyenne pour chaque image à haute résolution co-registrée sur l'image SPOT HRG panchromatique (2003)

7.5 Normalisation radiométrique des images Landsat

La normalisation radiométrique a été réalisée en prenant comme référence l'image Landsat de 2003. Nous avons utilisé l'algorithme SPLREG (Scatterplot Linear Regression Equation) disponible dans Geomatica v 8.2.1. Afin de calculer les régressions linéaires entre l'image de 2003 et celles des autres dates, il faut créer un fichier contenant toutes les bandes de toutes les images.

Canaux	Bandes	Canaux	Bandes
1	1 de 2003	12	1 de 87
2	2 de 2003	13	2 de 87
3	3 de 2003	14	3 de 87
4	4 de 2003	15	4 de 87
5	5 de 2003	16	5 de 87
6	7 de 2003	17	7 de 87
7	2 de 93	18	1 de 86
8	3 de 93	19	2 de 86
9	4 de 93	20	3 de 86
10	5 de 93	21	4 de 86
11	7 de 93	22	5 de 86
		23	7 de 86

Tableau 20 : Contenu des canaux de l'image contenant toutes les bandes spectrales

La référence étant l'image de 2003 nous aurons les couples de canaux suivants pour le calcul des droites de régression :

19'93 - 2003	1987 - 2003	19'86 - 2003
7 - 2	12 - 1	18 - 1
8 - 3	13 - 2	19 - 2
9 - 4	14 - 3	20 - 3
10 - 5	15 - 4	21 - 4
11 - 6	16 - 5	22 - 5
	17 - 6	23 - 6

Tableau 21 : Couples de canaux pour la régression

Pour chacun de ces couples nous obtenons une droite de régression ($Y=A+BX$) et le coefficient de corrélation (C.C.).

Couple de canaux	Couple de bandes	A	B	C.C.
7 - 2	2 de 93 - 2 de 2003	0.220934794E+01	0.137272063E+01	0.834279
8 - 3	3 de 93 - 3 de 2003	0.334230486E+00	0.134138240E+01	0.870504
9 - 4	4 de 93 - 4 de 2003	0.135577338E+01	0.117472717E+01	0.946791
10 - 5	5 de 93 - 5 de 2003	0.368467611E+01	0.807944538E+00	0.928902
11 - 6	7 de 93 - 7 de 2003	0.489324225E+01	0.110370142E+01	0.927445
12 - 1	1 de 87 - 1 de 2003	0.216793241E+02	0.339169806E+00	0.797074
13 - 2	2 de 87 - 2 de 2003	0.159501336E+02	0.650555665E+00	0.757477
14 - 3	3 de 87 - 3 de 2003	0.158503059E+02	0.620009962E+00	0.770123
15 - 4	4 de 87 - 4 de 2003	0.970076815E+01	0.603556927E+00	0.911134
16 - 5	5 de 87 - 5 de 2003	0.381703791E+01	0.560058108E+00	0.888111
17 - 6	7 de 87 - 7 de 2003	0.476329744E+01	0.755876871E+00	0.907299
18 - 1	1 de 86 - 1 de 2003	0.520809959E+01	0.356673555E+00	0.826659
19 - 2	2 de 86 - 2 de 2003	0.659863007E+01	0.621845691E+00	0.809205
20 - 3	3 de 86 - 3 de 2003	0.658824605E+01	0.549938705E+00	0.833430
21 - 4	4 de 86 - 4 de 2003	0.141539223E+00	0.574655097E+00	0.886535
22 - 5	5 de 86 - 5 de 2003	0.422620783E+01	0.412519606E+00	0.939778
23 - 6	7 de 86 - 7 de 2003	0.696639624E+01	0.537763642E+00	0.932066

Tableau 22 : Pour chaque couple de canaux, coefficients de la droite de régression et coefficient de corrélation

8 Annexe 4 : Classification 2006

Les classifications par régions ont été effectuées avec le logiciel eCognition Professional v4.0.

8.1 Paramètres de segmentation

Les paramètres de segmentation diffèrent selon les données utilisées. Les tableaux ci-dessous en présentent le récapitulatif :

Bandes spectrales	QuickBird panchromatique UrbOrtho R,V,B (sans pondération)
Paramètre d'échelle	20
Critère d'homogénéité	Facteur de forme = 0

Tableau 23 : Paramètres de segmentation QuickBird + UrbOrtho + masque UrbIS

Bandes spectrales	SPOT HRG panchromatique, pond.= 3 SPOT HRG multispectral, pond. = 1 pour chaque bande
Paramètre d'échelle	10
Critère d'homogénéité	Facteur de forme = 0

Tableau 24 : Paramètres de segmentation SPOT

8.2 Paramètres de classification

Il en va de même pour les paramètres de classification, qui sont présentés ci-dessous:

	QuickBird Rouge	QuickBird PIR	QuickBird NDVI ⁵	UrbOrtho Bleu	UrbOrtho Vert	UrbOrtho Rouge	Brillance
Plus proche voisin Moyenne				x	x	x	x
Plus proche voisin Ecart-type				x	x	x	
Plus proche voisin Ratio				x	x	x	
Fonction d'adhésion (Eau)		<500					
Fonctions d'adhésion (Surfaces grises)	>7000		<0.24				
Fonction d'adhésion (Surfaces rouges)	>4000		<0.24				

Tableau 25 : Paramètres de classification QuickBird + UrbOrtho + masque UrbIS

⁵ NDVI : Normalized Difference Vegetation Index (indice de végétation normalisé)

Notons que les paramètres basés sur l'image QuickBird n'ont pas été utilisés dans les deux zones où cette image présente des nuages.

	SPOT HRG panchro	SPOT HRV Vert	SPOT HRV Rouge	SPOT HRV PIR	Brillance
Plus proche voisin Moyenne	x	x	x	x	x
Plus proche voisin Ecart-type	x	x	x	x	
Plus proche voisin Ratio	x	x	x	x	
Fonctions d'adhésion (Surfaces imperméables)	Plus proche voisin OU (longueur/largeur > 5 ET NDVI < 0,5)				

Tableau 26 : Paramètres de classification SPOT

Les zones d'entraînement sont des régions de l'image sélectionnées directement dans eCognition.

8.3 Légendes

La légende détaillée utilisée pour la classification à très haute résolution spatiale est la suivante :

- Surfaces imperméables
 - o Surfaces grises imperméables
 - o Surfaces rouges imperméables
 - o Ombre sur surfaces imperméables
- Surfaces perméables
 - o Végétation verte
 - o Sol nu et végétation non photosynthétique
 - o Surfaces rouges perméables (terrains de sport)
 - o Ombre sur surfaces perméables
- Eau

Pour la haute résolution, les classes sont moins nombreuses:

- Surfaces imperméables
- Surfaces perméables
 - o Sol nu
 - o Végétation non-photosynthétique et conifères
 - o Végétation verte
- Eau

Ces classes ont été agrégées pour ne garder que le premier niveau, soit trois classes (surfaces imperméables, surfaces perméables et eau).

8.4 Evaluation

Les classifications sont évaluées sur base d'un ensemble de points aléatoires dont la classe est connue. Les matrices de confusion ci-dessous présentent le nombre absolu de pixels, avec en colonne la référence, et en ligne le résultat de la classification. Les pixels correctement classés se trouvent donc sur la diagonale..

	Surfaces imperméables	Surfaces perméables	Eau
Surfaces imperméables	367	6	1
Surfaces perméables	40	244	3
Eau	1	1	26
Non classé	3	0	0
Total	411	251	30
Précision globale : 92%, pour un ensemble de 692 points aléatoires			

Tableau 27 : Matrice de confusion de la classification QuickBird + UrbOrtho + masque UrbIS

	Surfaces imperméables	Surfaces perméables	Eau
Surfaces imperméables	28	0	0
Surfaces perméables	4	47	0
Eau	0	0	10
Non classé	1	0	0
Total	33	47	10
Précision globale : 94%, pour un ensemble de 90 points aléatoires			

Tableau 28 : Matrice de confusion de la classification SPOT

9 Annexe 5 : Indices calculés sur les images Landsat

Une fois les images normalisées, cinq indices ont été calculés pour chacune d'entre elles: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), MSAVI2 (Second Modified Soil Adjusted Vegetation Index), BI (Brightness Index).

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R})$$

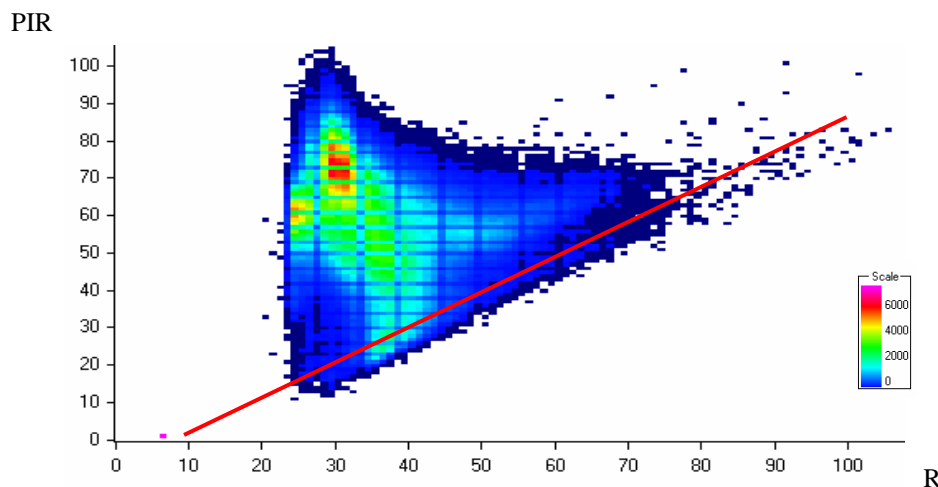
Le NDVI est l'indice de végétation le plus fréquemment utilisé en télédétection. Il est dit normalisé car il s'exprime par rapport à la somme des valeurs dans les deux canaux considérés.

$$\text{PVI} = (\text{PIR} - (a * \text{R}) - b) / ((a^2 + 1)^{1/2})$$

avec a et b, respectivement, la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite des sols.

Le PVI mesure la distance euclidienne à la droite des sols des pixels caractéristiques des surfaces végétales. Il revient à déduire de la valeur multispectrale du pixel végétation la part propre au sol qui la supporte, définie par la ligne des sols.

Exemple – Landsat 1986



**Figure 34 : Valeur des pixels dans le proche infra-rouge et dans le rouge.
La couleur varie en fonction du nombre de pixels**

L'équation de la droite qui représente le mieux les sols (proche de la quasi-droite qui délimite le nuage de points en bas) est $y = 0.89x - 6.69$,
et donc le $\text{PVI} = (\text{PIR} - (0.89 * \text{R}) + 6.69) / ((0.89^2 + 1)^{1/2})$

$$\text{SAVI} = ((\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R} + 0.5)) * (1 + 0.5)$$

Le SAVI est un indice hybride, entre les indices de type rapport et les indices de type perpendiculaire.

$$\text{MSAVI2} = 0.5 * ((2 * (\text{PIR} + 1)) - (((2 * \text{PIR}) + 1)^2 - 8 * (\text{PIR} - \text{R}))^{1/2})$$

Cet indice, dérivé du SAVI, tente de minimiser l'effet du sol nu.

$$\text{BI} = (\text{PIR}^2 + \text{R}^2)^{1/2}$$

Le BI définit la brillance d'un point de l'image comme sa distance à l'origine des axes rouge et infra-rouge.

10 Annexe 6 : Modélisation par arbre de régression

10.1 Paramètres d'entrée

Les données d'entrée ont été préparées à l'aide de NLCD mapping tool. Les paramètres régissant le modèle créé avec Cubist sont présentés dans le tableau suivant.

Form of model		
Rules alone		yes
Instances and rules	no	
Let Cubist decide	no	
Use nearest	0	instances
Committee of	0	members
Cross validate	0	folds
Use sample of	0	% cases
Lock sample	no	
Maximum rules	100	
Extrapolation allowed	10	

Tableau 29 : Paramètres de la modélisation par arbre de régression (Cubist)

10.2 Evaluation du modèle

Afin d'évaluer le modèle, l'erreur est calculée sur les données d'entraînement et également sur les données de validation. Les deux jeux de données sont indépendants.

Evaluation sur les données d'entraînement (88370 mailles)	
Erreur moyenne	17.20
Erreur relative	0.50
Coefficient de corrélation	0.77
Evaluation sur les données de validation (88370 mailles)	
Erreur moyenne	17.30
Erreur relative	0.51
Coefficient de corrélation	0.77

Tableau 30 : Résultat de l'évaluation du modèle sur les données d'entraînement et sur les données de validation

10.3 Modèle

Le modèle est constitué de 62 règles; il est présenté dans les pages suivantes.

Rule 1: [4444 cases, mean 4.0, range 0 to 100, est err 6.0]

```
if
  band01 <= 29
  band04 > 33
then
  dep = -6 - 0.79 band04 +
0.7 band05 + 0.9 band01 - 0.14
band03
```

Rule 2: [752 cases, mean 4.2, range 0 to 80, est err 6.4]

```
if
  band01 > 31
  band01 <= 32
  band04 > 44
  band07 > 10
  band07 <= 27
then
  dep = 14.1 - 1.57 band04 +
1.7 band05 + 0.8 band07 - 0.16
band03
  + 0.09 band10
```

Rule 3: [1659 cases, mean 5.1, range 0 to 88, est err 7.7]

```
if
  band01 > 31
  band07 > 27
then
  dep = 7.6 + 1.2 band05 -
0.76 band04
```

Rule 4: [251 cases, mean 6.0, range 0 to 100, est err 7.7]

```
if
  band02 <= 22
then
  dep = 2.5
```

Rule 5: [878 cases, mean 7.4, range 0 to 84, est err 9.8]

```
if
  band01 > 30
  band01 <= 31
  band04 > 39
  band04 <= 44
  band07 > 10
then
  dep = 64.1 - 2.49 band04 +
2 band05 + 0.9 band07 - 0.47
band10
```

Rule 6: [2283 cases, mean 7.5, range 0 to 100, est err 10.0]

```
if
  band01 > 29
  band01 <= 31
  band04 > 36
  band05 <= 28
then
  dep = -134.3 + 7.7 band01 -
2.67 band04 + 2 band03 - 2.3
band07
  - 2.4 band02 + 1.3
band05
```

Rule 7: [450 cases, mean 7.9, range 0 to 100, est err 16.5]

```
if
  band02 <= 23
```

```
band05 > 11
band07 > 0
then
  dep = 85.8 - 5.16 band04 -
2.87 band03 + 2.34 band10 + 0.3
band05
  + 0.3 band02
```

Rule 8: [7113 cases, mean 8.0, range 0 to 100, est err 8.6]

```
if
  band01 <= 30
  band04 <= 44
  band07 > 10
then
  dep = 5.7 - 0.5 band02 +
0.23 band10
```

Rule 9: [12333 cases, mean 9.0, range 0 to 100, est err 9.7]

```
if
  band01 <= 31
  band07 > 10
then
  dep = 19.3 - 0.9 band02 +
0.2 band10
```

Rule 10: [1684 cases, mean 11.4, range 0 to 100, est err 13.7]

```
if
  band01 <= 28
  band04 > 19
  band07 > 2
  band07 <= 10
then
```

```
dep = 33.2 - 3.82 band04 +
4.9 band05 - 3.2 band07 - 0.15
band03
  + 0.2 band02 + 0.2
band01
```

Rule 11: [9450 cases, mean 11.6, range 0 to 100, est err 11.9]

```
if
  band04 > 44
  band07 > 10
then
  dep = 1.1
```

Rule 12: [151 cases, mean 11.9, range 0 to 100, est err 15.4]

```
if
  band02 > 25
  band04 <= 19
  band05 <= 10
  band07 <= 0
then
  dep = 13.6 + 5.17 band03 -
7 band02 - 3.7 band07 + 2.7 band04
  + 2.63 band10 - 0.8
band01 + 0.3 band05
```

Rule 13: [11662 cases, mean 12.0, range 0 to 100, est err 12.6]

```
if
  band04 > 40
  band05 <= 36
  band07 > 10
then
```

$dep = -68.4 + 6.13 \text{ band10} - 8.2 \text{ band02} - 6.5 \text{ band07} + 3.6 \text{ band01} - 0.13 \text{ band04} - 0.11 \text{ band03} + 0.1 \text{ band05}$

Rule 14: [7885 cases, mean 13.2, range 0 to 100, est err 13.4]

if $\text{band07} > 16$
 then
 $dep = 28.8 - 0.46 \text{ band03} - 0.12 \text{ band04} + 0.2 \text{ band01} + 0.1 \text{ band05} - 0.1 \text{ band07}$

Rule 15: [204 cases, mean 13.9, range 0 to 100, est err 18.5]

if $\text{band05} \leq 11$ and $\text{band07} > 0$
 then
 $dep = -0.6 + 6.85 \text{ band10} - 5.9 \text{ band03} - 3.3 \text{ band01} + 0.4 \text{ band05} + 0.3 \text{ band02} + 0.18 \text{ band04}$

Rule 16: [776 cases, mean 14.7, range 0 to 98, est err 17.1]

if $\text{band01} \leq 29$, $\text{band04} \leq 33$, $\text{band05} > 22$, and $\text{band07} > 8$
 then

$dep = -9.6 + 10.57 \text{ band03} - 11.4 \text{ band07} - 7.94 \text{ band10} - 4.13 \text{ band04} + 3.1 \text{ band05} + 4.5 \text{ band01} + 2.1 \text{ band02}$

Rule 17: [3901 cases, mean 16.2, range 0 to 100, est err 14.6]

if $\text{band01} \leq 31$, $\text{band04} \leq 34$, and $\text{band07} > 10$
 then
 $dep = -77.3 + 3.2 \text{ band01} - 1.47 \text{ band04} + 1.33 \text{ band10} - 1.33 \text{ band03} + 1.4 \text{ band05}$

Rule 18: [1015 cases, mean 16.8, range 0 to 100, est err 15.1]

if $\text{band01} > 29$, $\text{band01} \leq 32$, $\text{band04} > 39$, $\text{band05} > 22$, and $\text{band07} \leq 10$
 then
 $dep = -132.3 + 3.5 \text{ band05} - 2.59 \text{ band04} + 4.7 \text{ band01}$

Rule 19: [803 cases, mean 18.3, range 0 to 100, est err 18.3]

if $\text{band01} > 31$, $\text{band04} > 53$, and $\text{band05} > 42$

$\text{band07} > 10$
 then
 $dep = 14.2 - 0.87 \text{ band10} + 1.5 \text{ band01} + 1 \text{ band05} - 0.76 \text{ band04}$

Rule 20: [3054 cases, mean 18.5, range 0 to 100, est err 16.5]

if $\text{band01} > 31$, $\text{band04} \leq 53$, $\text{band05} \leq 31$, $\text{band07} > 15$, and $\text{band07} \leq 27$
 then
 $dep = -19.5 + 2.2 \text{ band05} - 1.71 \text{ band04} + 1.9 \text{ band02} + 1.6 \text{ band07} - 1.07 \text{ band03} - 0.91 \text{ band10} + 1.7 \text{ band01}$

Rule 21: [10102 cases, mean 18.9, range 0 to 100, est err 16.3]

if $\text{band01} \leq 32$, $\text{band04} \leq 39$, $\text{band05} > 22$, and $\text{band07} > 8$
 then
 $dep = -121.4 - 4.23 \text{ band04} + 6.7 \text{ band01} + 4 \text{ band05} - 2.29 \text{ band03} + 2 \text{ band02}$

Rule 22: [2883 cases, mean 20.8, range 0 to 100, est err 17.0]

if $\text{band01} > 29$, $\text{band01} \leq 31$, $\text{band04} \leq 36$, and $\text{band07} > 10$
 then
 $dep = -123.5 + 3.82 \text{ band03} - 2.93 \text{ band10} - 2.61 \text{ band04} + 4.3 \text{ band01} + 2.6 \text{ band05} - 2.4 \text{ band07} + 2.3 \text{ band02}$

Rule 23: [7808 cases, mean 21.8, range 0 to 100, est err 17.6]

if $\text{band01} > 32$, $\text{band02} \leq 42$, $\text{band04} > 42$, $\text{band04} \leq 62$, $\text{band05} \leq 44$, and $\text{band07} > 7$
 then
 $dep = 30.7 + 5.72 \text{ band10} - 5.06 \text{ band03} - 3.17 \text{ band04} - 3.5 \text{ band02} + 2.2 \text{ band05} + 2.6 \text{ band01}$

Rule 24: [1384 cases, mean 21.8, range 0 to 100, est err 18.4]

if $\text{band01} \leq 32$, $\text{band04} > 19$, $\text{band05} \leq 22$, $\text{band07} > 7$, and $\text{band07} \leq 10$
 then

dep = -98.4 + 4.1 band02 -
2.62 band10 - 2.48 band04 + 3
band05

+ 4.3 band01

Rule 25: [3724 cases, mean 23.0,
range 0 to 100, est err 18.2]

if

band04 > 53

then

dep = -1.8 + 1.34 band10 -
1.25 band03 - 0.78 band04 + 1.3
band01

- 0.8 band02 + 0.4

band05

Rule 26: [2550 cases, mean 24.1,
range 0 to 100, est err 19.4]

if

band01 > 31

band01 <= 32

band04 <= 44

band07 > 10

band07 <= 27

then

dep = -22.1 - 7.45 band03 +
5.37 band10 + 4.4 band05 - 2.63
band04

+ 2.9 band07

Rule 27: [406 cases, mean 27.0,
range 0 to 99, est err 21.0]

if

band01 > 29

band01 <= 31

band04 <= 39

band05 > 28

band07 > 10

then

dep = -328.1 + 11.5 band01
- 0.12 band04 + 0.1 band03 + 0.1
band05

Rule 28: [13221 cases, mean 27.6,
range 0 to 100, est err 19.3]

if

band01 > 31

band04 <= 53

band07 > 10

band07 <= 27

then

dep = -28.2 - 3.22 band04 +
3 band05 - 1.91 band03 + 2.9
band01

+ 1.45 band10

Rule 29: [3505 cases, mean 30.8,
range 0 to 100, est err 20.6]

if

band01 > 33

band04 <= 53

band05 <= 31

band07 > 10

band07 <= 27

then

dep = 6.5 - 2.27 band04 +
2.7 band05 - 1.9 band07 + 1.8
band01

Rule 30: [2937 cases, mean 32.1,
range 0 to 100, est err 21.5]

if

band01 > 32

band04 > 40

band04 <= 49

band05 > 31

band07 > 10

then

dep = 12.3 - 3.91 band03 -
3.02 band04 + 3 band05 + 2.1
band10

+ 2.3 band07 + 2

band01

Rule 31: [1086 cases, mean 33.9,
range 0 to 100, est err 22.5]

if

band01 > 32

band04 > 40

band04 <= 53

band05 > 36

band07 > 10

then

dep = 105.6 - 3.16 band04
+ 2.84 band10 - 2.7 band02 - 1.5
band07

- 1.16 band03 + 1.6

band01 + 0.8 band05

Rule 32: [7018 cases, mean 35.7,
range 0 to 100, est err 20.6]

if

band01 <= 32

band04 > 19

band05 <= 22

then

dep = -157.7 - 8.77 band03
+ 7 band02 - 4.63 band04 + 4.16
band10

+ 5.1 band05 + 3.5
band07 + 2.9 band01

Rule 33: [9683 cases, mean 38.7,
range 0 to 100, est err 19.8]

if

band01 > 28

band01 <= 32

band05 > 22

band07 > 2

band07 <= 10

then

dep = -79.1 - 4.27 band04 +
5.9 band02 - 4.04 band10 + 4.4

band05

+ 4.5 band01

Rule 34: [1688 cases, mean 40.3,
range 0 to 100, est err 26.8]

if

band01 > 32

band05 > 44

band07 > 1

then

dep = 129.5 - 8.62 band03
+ 4.2 band07 + 2.5 band02 + 2.9
band01

- 1.41 band04 + 1.41

band10

Rule 35: [262 cases, mean 43.1,
range 0 to 100, est err 24.7]

if

band02 <= 63

band04 > 62

band07 <= 10

```

then
  dep = 120.4 - 6.84 band03
+ 7.1 band02 + 4.5 band07 - 3.15
band10
  + 1.4 band01 - 0.7
band04 + 0.7 band05

```

Rule 36: [15240 cases, mean 43.5, range 0 to 100, est err 22.2]

```

if
  band01 > 32
  band04 > 38
  band05 > 31
  band07 > 1
then
  dep = 77.2 - 2.75 band04 +
2.7 band05 - 2.7 band07 + 1.3
band01
  - 0.56 band10

```

Rule 37: [768 cases, mean 44.7, range 0 to 100, est err 23.0]

```

if
  band04 <= 40
  band05 > 31
  band07 > 10
then
  dep = 41.7 - 1.9 band07 +
0.65 band10 - 0.09 band04

```

Rule 38: [113 cases, mean 46.7, range 0 to 100, est err 28.4]

```

if
  band04 > 30
  band05 <= 22
  band07 <= 7

```

```

then
  dep = -119.2 - 12.2 band07
+ 6.52 band03 + 0.7 band02 + 0.8
band01
  + 0.5 band05 - 0.26
band04

```

Rule 39: [7290 cases, mean 47.9, range 0 to 100, est err 22.5]

```

if
  band01 > 28
  band01 <= 32
  band04 > 19
  band04 <= 33
  band07 > 2
  band07 <= 10
then
  dep = -101 + 3.8 band05 -
2.9 band04 - 2.94 band03 + 4.6
band01
  + 2.9 band02

```

Rule 40: [375 cases, mean 49.3, range 0 to 100, est err 23.6]

```

if
  band01 <= 32
  band02 > 25
  band04 <= 19
  band07 <= 0
then
  dep = 100.6 + 22.8 band07
+ 10 band02 - 6.58 band03 - 6.4
band01
  + 3.04 band04 - 0.75
band10 + 0.4 band05

```

Rule 41: [3147 cases, mean 49.8, range 0 to 100, est err 24.0]

```

if
  band01 > 32
  band01 <= 39
  band04 > 35
  band05 <= 31
  band07 > 1
  band07 <= 10
then

```

```

  dep = 34 - 3.17 band04 +
2.1 band05 - 1.56 band03 + 2.8
band01
  + 0.8 band02

```

Rule 42: [23616 cases, mean 54.2, range 0 to 100, est err 20.5]

```

if
  band01 > 32
  band04 > 20
  band05 <= 31
  band07 > 1
then

```

```

  dep = 56.4 - 2.68 band04 +
3.3 band05 + 2.1 band02 - 1.32
band10
  - 1.01 band03 - 1
band07 + 0.9 band01

```

Rule 43: [108 cases, mean 57.0, range 0 to 100, est err 27.9]

```

if
  band01 > 32
  band04 <= 20
  band07 > 1
  band07 <= 10

```

```

then
  dep = 0.8 - 11 band03 +
10.15 band10 + 2.85 band04 - 3.9
band02
  + 0.4 band05 - 0.1
band07

```

Rule 44: [456 cases, mean 57.8, range 0 to 100, est err 26.8]

```

if
  band02 > 23
  band04 <= 19
  band05 > 11
  band07 > 0
then

```

```

  dep = -72.5 - 8.8 band03 +
5.41 band10 + 4.3 band01 + 0.3
band05
  + 0.3 band02

```

Rule 45: [591 cases, mean 59.9, range 0 to 100, est err 24.0]

```

if
  band07 <= -2
then
  dep = -68.7 + 6.33 band03 -
1.17 band10 + 1.2 band05

```

Rule 46: [192 cases, mean 60.3, range 0 to 100, est err 23.7]

```

if
  band04 <= 34
  band05 > 31
  band07 > 4
then

```


dep = -30.1 - 16.38 band10
+ 13.2 band02 + 8.65 band03 + 4.12
band04

Rule 47: [3364 cases, mean 60.4,
range 0 to 100, est err 23.3]

if
band02 > 42
band07 > 1
band07 <= 10
then
dep = 48.9 - 6.19 band03 +
5.33 band10 - 1.98 band04 - 2.8
band02
+ 1.6 band05 + 2.1
band01

Rule 48: [2991 cases, mean 61.3,
range 0 to 100, est err 24.9]

if
band01 > 32
band04 > 42
band07 > 1
band07 <= 7
then
dep = 51.9 - 3.1 band07 -
2.32 band10 - 2.2 band04 + 2.7
band05
+ 2 band02 + 1.8
band01 - 0.11 band03

Rule 49: [4073 cases, mean 61.9,
range 0 to 100, est err 20.7]

if
band01 > 32
band04 > 34

band04 <= 42
band05 > 31
band07 > 4
band07 <= 10
then
dep = 38.1 - 2.56 band10 -
2.27 band04 + 2.6 band05 + 2.9
band02
+ 1.4 band01

Rule 50: [319 cases, mean 64.4,
range 0 to 100, est err 28.5]

if
band01 > 32
band05 <= 17
band07 > -2
band07 <= 10
then
dep = 12.6 + 18.43 band03
- 19.1 band07 - 7.18 band10 + 5.6
band05
- 5.3 band02

Rule 51: [5049 cases, mean 65.1,
range 0 to 100, est err 23.0]

if
band01 > 39
band07 > 1
band07 <= 10
then
dep = 123.8 - 3.79 band10
+ 3.9 band02 - 0.16 band04 - 0.09
band03
+ 0.1 band05

Rule 52: [42337 cases, mean 72.3,
range 0 to 100, est err 21.8]

if
band02 > 26
band04 > 19
band07 <= 7
then
dep = -28.3 - 3.58 band03 -
3.1 band04 + 3.9 band05 + 3.5
band01
+ 2.4 band02

Rule 53: [168 cases, mean 73.8,
range 0 to 100, est err 19.9]

if
band02 > 63
band07 > 1
band07 <= 10
then
dep = 80.9 - 7.75 band10 +
10.8 band02 - 1.33 band03 + 0.3
band01
- 0.09 band04

Rule 54: [1522 cases, mean 77.1,
range 0 to 100, est err 26.1]

if
band01 > 34
band03 <= 27
band04 <= 30
band05 > 17
band07 <= 1
then
dep = 22.5 - 1.81 band04 +
2.2 band07 + 2.3 band02 + 0.9
band05

Rule 55: [6310 cases, mean 78.6,
range 0 to 100, est err 28.2]

if
band02 > 22
band07 <= 0
then
dep = -132.1 + 10.7 band02
+ 6.2 band05 - 4.9 band01 + 1.3
band07
- 0.75 band10 + 0.35
band04 + 0.14 band03

Rule 56: [596 cases, mean 78.8,
range 0 to 100, est err 16.5]

if
band04 <= 38
band05 > 35
then
dep = 113 - 4.95 band03 +
3.9 band02 - 0.51 band10 + 0.2
band01

Rule 57: [23279 cases, mean 79.1,
range 0 to 100, est err 17.7]

if
band01 > 32
band07 <= 4
then
dep = 98.1 - 3.55 band03 +
2.5 band02

Rule 58: [4486 cases, mean 81.1,
range 0 to 100, est err 17.4]

if
band01 <= 32

```

    band04 > 19
    band07 <= 2
then
    dep = 63.7 - 3.19 band03 +
3.1 band02 - 1.78 band04 + 1.9
band05

```

Rule 59: [9320 cases, mean 82.3,
range 0 to 100, est err 19.7]

```

if
    band01 > 32
    band05 > 17
    band07 <= 1
then
    dep = 67.8 - 3.89 band10 +
2.61 band03 + 3.1 band02 + 1.5
band05
    - 1.13 band04

```

Rule 60: [3450 cases, mean 82.4,
range 0 to 100, est err 19.6]

```

if
    band01 > 35
    band04 > 30
    band07 <= 1
then
    dep = 69.7 + 4.1 band07 -
2.66 band03 + 1.8 band02 - 0.42
band04
    + 0.4 band05 + 0.5
band01

```

Rule 61: [12353 cases, mean 82.6,
range 0 to 100, est err 18.1]

```

if
    band05 > 17

```

```

    band07 <= 1
then
    dep = 85.5

Rule 62: [7271 cases, mean 83.0,
range 0 to 100, est err 16.5]

if
    band01 <= 35
    band05 > 17
    band07 <= 1
then
    dep = 97.3 - 2.22 band10 +
2.4 band02 - 0.91 band04 + 1.1
band05

```

Table des illustrations

Figure 1 : Contour de la zone d'étude (en jaune), superposé à une composition colorée	4
Figure 2 : Inventaire de l'utilisation du sol MURBANDY/MOLAND pour Bruxelles et ses alentours: les polygones de 1985. La zone couvre 1600 km ² ; elle a été délimitée autour de la ville morphologique.....	5
Figure 4 : Polygones représentant soit les surfaces imperméables, soit les surfaces perméables, sur 3 types de données différents (carte 1 : 25 000, carte 1 : 5 000, photo aérienne).....	7
Figure 5 : Moyennes des pourcentages de surfaces imperméables pour la classe 1122.....	8
Figure 6 : Haute résolution - compositions colorées fausses couleurs.....	11
Figure 7 : Très haute résolution - QuickBird panchromatique 0,60m (à g.) et UrbOrtho composition colorée vraies couleurs 0,60 m (à dr.).....	11
Figure 8 : De haut en bas et de gauche à droite, la zone de la Grand Place vue par Landsat (fausses couleurs 30m), SPOT (fausses couleurs 20m), SPOT (panchromatique 2,50m), QuickBird (vraies couleurs 2,40m), QuickBird (panchromatique 0,60m) et orthophotoplan UrbIS [®] (vraies couleurs 0,60m).....	12
Figure 9 : Vecteurs UrbIS [®] (extrait) : les surfaces de rues sont en gris clair, les bâtiments en saumon, les zones de chemin de fer en gris moyen, les zones d'eau en bleu, et les zones vertes en vert.....	13
Figure 10 : Diagramme des principales étapes de la méthode mise en oeuvre.....	15
Figure 11 : QuickBird, composition colorée fausses couleurs (PIR, R, V), à gauche avant traitement FLAASH, à droite après traitement FLAASH.....	16
Figure 12 : Classification composite pour 2006.....	18
Figure 13 : Complémentarité entre les résultats de la classification et les informations provenant des vecteurs UrbIS	18
Figure 14 : Extrait de la classification illustrant le degré de détail atteint dans la zone circonscrite par le polygone jaune de la figure 12	19
Figure 15 : Extrait de la classification illustrant la différence dans le degré de détail dans et hors du polygone jaune de la figure 12	19
Figure 16 : A g., classification binaire (surfaces imperméables en blanc, surfaces perméables en noir)	20
Figure 17 : Deux des indices calculés au départ des images Landsat : l'indice de brillance (à g.) et l'indice normalisé de végétation (à dr.). La palette va du noir au blanc pour des valeurs croissantes.....	21
Figure 18 : Graphique de l'évolution des surfaces imperméables dans la zone d'étude.....	22
Figure 20 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, par commune	33
Figure 22 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour Bruxelles.....	34
Figure 24 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, par bassin d'eaux usées	35
Figure 26 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, par bassin d'eaux de surface	36
Figure 27 : Limite de la zone du bassin d'orage Flagey,	37
Figure 28 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage Flagey	37
Figure 29 : Limite de la zone du bassin d'orage de Forest,	38
Figure 30 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage Flagey	38

Figure 31 : Limite du bassin de la Woluwe (limité),	39
Figure 32 : Graphique de l'évolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour le bassin de la Woluwe (limité).....	39
Figure 33 : Extrait du catalogue on-line DigitalGlobe.....	42
Figure 34 : Valeur des pixels dans le proche infra-rouge et dans le rouge.	50
Tableau 1: MURBANDY/MOLAND - importance des classes partiellement imperméables...	6
Tableau 2 : Taille de l'échantillon pour chaque classe d'utilisation du sol.....	7
Tableau 3 : Estimation du pourcentage de surfaces imperméables au sein de chaque classe d'utilisation du sol.....	9
Tableau 4 : Estimation de la superficie (en ha) couverte par les surfaces imperméables au sein de chaque classe d'utilisation du sol.....	9
Tableau 5 : Synthèse des images satellitaires utilisées.	11
Tableau 6 : Récapitulatif de l'évolution de la superficie imperméable entre 1955 et 2006 sur l'ensemble de la zone d'étude.	22
Tableau 7: Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, par commu	32
Tableau 8 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables pour Bruxelles.....	34
Tableau 9 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, par bassin d'eaux usées	35
Tableau 10 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables par bassin d'eaux de surface	36
Tableau 11 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage Flagey	37
Tableau 12 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour la zone du bassin d'orage de Forest.....	38
Tableau 13 : Evolution du pourcentage de surfaces imperméables, pour le bassin de la Woluwe (limité)	39
Tableau 14 : Cartes IGN au 1 : 25 000 utilisées pour la première période	41
Tableau 15 : Cartes au 1 : 5 000 du MTP utilisées pour la première période	41
Tableau 16 : Photos aériennes utilisées pour la première période	41
Tableau 17 : Statistiques univariées sur toute l'image.....	43
Tableau 18 : Corrélations sur un extrait exempt de brume	43
Tableau 19 : Nombre de points de calage et erreur quadratique moyenne pour chaque image à haute résolution co-registrée sur l'image SPOT HRG panchromatique (2003)	44
Tableau 20 : Contenu des canaux de l'image contenant toutes les bandes spectrales.....	45
Tableau 21 : Couples de canaux pour la régression	45
Tableau 22 : Pour chaque couple de canaux, coefficients de la droite de régression et coefficient de corrélation.....	46
Tableau 23 : Paramètres de segmentation QuickBird + UrbOrtho + masque UrbIS	47
Tableau 24 : Paramètres de segmentation SPOT	47
Tableau 25 : Paramètres de classification QuickBird + UrbOrtho + masque UrbIS	47
Tableau 26 : Paramètres de classification SPOT	48
Tableau 27 : Matrice de confusion de la classification QuickBird + UrbOrtho + masque UrbIS	49
Tableau 28 : Matrice de confusion de la classification SPOT	49
Tableau 29 : Paramètres de la modélisation par arbre de régression (Cubist).....	52
Tableau 30 : Résultat de l'évaluation du modèle sur les données d'entraînement.....	52