

MASTER 2
Observation de la Terre et Géomatique
2017 - 2018

SIG Géohistorique et dynamiques urbaines

Nord de l'Eurométropole de Strasbourg de 1956 à 2013

Santiago MEDINA-KENNEDY
Quentin POTEREK
Aurore SINDT

Encadrant-e-s
Anne PUISSANT – Maître de conférences HDR – LIVE
Grzegorz SKUPINSKI – Ingénieur d'étude – LIVE

TABLE DES MATIÈRES

Liste des acronymes.....	3
Liste des illustrations.....	4
Introduction.....	5
1. État de l'art.....	6
1.1. Phénomène urbain et anthropisation.....	6
1.2. Niveaux géographiques pour l'étude des espaces urbains.....	6
1.3. Des indicateurs pour caractériser les îlots.....	6
2. Zone d'étude, données et prétraitements.....	9
2.1. Zone d'étude.....	9
2.2. Exploration de la base de données historiques.....	9
2.2.1. <i>Présentation de la base de données.....</i>	9
2.3. Correction et nettoyage de la base de données historiques.....	14
2.4. Incorporation de nouvelles dimensions à la base de données historiques.....	16
2.4.1. <i>La hauteur du bâti.....</i>	16
2.4.2. <i>La végétation arborée.....</i>	16
3. Méthodologie.....	19
3.1. Calcul d'indicateurs morphologiques.....	19
3.1.1. <i>Indicateurs pour la végétation arborée.....</i>	19
3.1.2. <i>Indicateurs pour le bâti.....</i>	20
3.1.3. <i>Indicateurs pour le vide.....</i>	21
3.1.4. <i>Traitements réalisés suite au calcul des indicateurs.....</i>	22
3.2. Définition <i>a priori</i> d'une typologie d'évolutions des îlots.....	22
3.3. Classification des îlots historiques.....	22
3.3.1. <i>Extraction de connaissances à l'aide de l'algorithme k-moyennes.....</i>	22
3.3.2. <i>Choix du nombre de clusters pour l'initialisation de l'algorithme k-moyennes.....</i>	25
4. Résultats.....	27
4.1. Dynamiques de la végétation arborée.....	27
4.2. Calcul d'indicateurs morphologiques.....	31
4.2.1. <i>Analyse des indicateurs calculés pour la végétation arborée.....</i>	42
4.2.2. <i>Analyse des indicateurs calculés pour le bâti.....</i>	42
4.2.3. <i>Analyse des indicateurs calculés pour le vide.....</i>	43
4.3. Définition d'une typologie <i>a priori</i>	43
4.4. Classification des îlots historiques.....	44
5. Discussion.....	53
Conclusion.....	56
Bibliographie.....	57
Annexes.....	59

LISTE DES ACRONYMES

EMS	Eurométropole de Strasbourg
LIVE	Laboratoire Image, Ville et Environnement
IGN	Institut Géographique National
CIGAL	Coopération pour l'Information Géographique en Alsace
CES	Coefficient d'emprise au sol
DP	Densité de patchs
DivS	Diversité de surface
DivH	Diversité de hauteur
Hmax	Hauteur maximale
Hmed	Hauteur médiane
Cmed	Compacité médiane
LiDAR	Light Detection And Ranging
UST	Urban Structure Type
IMU	Îlot Morphologique Urbain
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MNS	Modèle Numérique de Surface

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Tableaux

Tableau 1: Produits rasters contenus dans la base de fichiers.....	13
Tableau 2: Produits vectoriels contenus dans la base de fichiers.....	14
Tableau 3 : Erreurs de géométrie et de topologie pour les couches vectorielles.....	17
Tableau 4 : Discréétisation des valeurs de surface pour les éléments arborés.....	22
Tableau 5 : Discréétisation des valeurs de hauteur pour les bâtiments.....	23
Tableau 6 : Discréétisation des valeurs de surface pour les bâtiments.....	24
Tableau 7: Dictionnaire des îlots historiques classifiés.....	55
Tableau 8 : Quantité des éléments arborés disparaissant pour différents seuils de surface.....	56
Tableau 9 : Exemple d'îlot mixte, avec emprises spécialisées, habitat individuel et collectif.....	57

Figures

Figure 1 : Territoire de l'Eurométropole de Strasbourg et délimitation de la zone d'étude.....	15
Figure 2 : Limites imposées par l'utilisation des orthophotographies.....	16
Figure 3 : Cartographie des erreurs de topologie et corrections apportées pour les îlots historiques.....	18
Figure 4 : Distribution des îlots en chantiers pour la digitalisation de la végétation arborée.....	20
Figure 5 : Localisation des îlots témoins utilisés pour le suivi a priori des dynamiques de l'Eurométropole.....	26
Figure 6 : Principe de fonctionnement de la méthode k-moyennes.....	27
Figure 7: Méthode d'interprétation des silhouettes.....	28
Figure 8 : Variation absolue de la part de l'arboré dans les îlots, entre 1956 et 2013.....	31
Figure 9 : Augmentation de la part de l'arboré dans les îlots, entre 1956 et 2013.....	32
Figure 10 : Diminution de la part de l'arboré dans les îlots, entre 1956 et 2013.....	33
Figure 11 : Coefficients de corrélation entre les indicateurs mesurés pour 1956 et 2013 respectivement.....	34
Figure 12 : Variance expliquée en fonction du nombre de clusters.....	47
Figure 13 : Figure des silhouettes pour k = 15.....	47
Figure 14 : Résultat de la classification des îlots historiques avec k = 15.....	49

Annexes

Annexe 1 : Bibliothèques Python et fonctions utilisées dans le cadre du mémoire.....	60
Annexe 2 : Organigramme des traitements.....	61
Annexe 3 : Classification avec indicateurs de bâti seulement, sur petits et grands îlots.....	62
Annexe 4 : Classification avec indicateurs de végétation seulement, sur petits et grands îlots.....	63
Annexe 5 : Classification avec tous les indicateurs sur petits et grands îlots.....	64
Annexe 6 : Classification avec indicateurs de bâti puis de végétation, sur tous les îlots.....	65
Annexe 7 : Valeurs de la série temporelle d'indicateurs pour chaque classe (Partie 1).....	66
Annexe 8 : Valeurs de la série temporelle d'indicateurs pour chaque classe (Partie 2).....	67
Annexe 9 : Valeurs de la série temporelle d'indicateurs pour chaque classe (Partie 3).....	68

INTRODUCTION

Autrefois considérée comme témoin du progrès et du développement, la ville suscite aujourd’hui de nombreuses interrogations. Il existe en effet une production urbaine indéniable, générée par un apport de population, qui génère un certain nombre de processus ayant des conséquences sur l’environnement et l’espace d’une manière générale.

Les mécanismes mis en jeu, ainsi que leurs conséquences, sont cependant difficiles à cerner puis à gérer. Parmi ceux-ci, certains sont particulièrement préoccupants et peuvent devenir de réels enjeux de santé publique, comme la pollution de l’air ou les phénomènes d’îlots de chaleur urbain. D’autres font écho aux grands enjeux environnementaux de notre temps et sont également fondamentalement liés à l’évolution de la ville, comme l’efficacité énergétique des bâtiments, l’artificialisation des sols ou la question de la place de la biodiversité urbaine (Cordeau *et al.*, 2016).

Ces problèmes que pose la ville incitent les pouvoirs publics à réagir, et à comprendre les phénomènes qui en sont à l’origine. Pour cela, différentes grilles de lectures sont envisagées, l’une d’entre elles consistant à étudier le phénomène d’artificialisation et ses dynamiques dans le temps et dans l’espace. Historiquement, le développement urbain s’organise en plusieurs phases, dont la première consiste en une révolution industrielle qui, dès le XIXe siècle, est venue alimenter la ville en néo-urbains (Dumont, 2016). Le taux d’urbanisation, qui était alors inférieur à 10 % (Dumont, 2016), a ensuite augmenté si bien qu’aujourd’hui plus de trois français-e-s sur quatre habite en ville (Guérin-Pace & Pumain, 1990). Les évolutions qu’ont connu les territoires du fait de cette production urbaine sont multiples, et s’organisent sur des pas de temps variés, avec des phases successives d’accélération et de ralentissement. Compte-tenu de cette temporalité, la ville et son espace périphérique ont évolué au gré des pratiques de différentes générations de politiques et d’urbanistes, avec la mise en place de tissus urbains particuliers. A l’échelle de la ville, Bessy-Pietri (2000) met ainsi en évidence différents schémas de développement, avec des dynamiques d’étalement, de retrait, ou encore de polarisation, relatifs à l’artificialisation, qu’il est intéressant de retracer afin de comprendre notre impact sur un territoire donné.

Afin d’étudier les espaces artificialisés, qui résultent aujourd’hui souvent d’un processus d’étalement dans le cas les villes françaises, différentes bases de données millésimées décrivant les modes d’occupation et d’usage du sol sont disponibles, telles que Corine Land Cover à un niveau européen, ou plus récemment OCS GE pour la France. D’autres méthodes, plus centrées sur l’objet ville lui-même, ont également fait leur apparition ces dernières années avec le développement d’une maille plus fine pour décrire le territoire, l’îlot par exemple.

L’étude présentée dans ce mémoire utilise cette unité qu’est l’îlot urbain, et vise à qualifier les évolutions d’îlots historiques situés au Nord de l’Eurométropole de Strasbourg, entre 1956 et 2013. La base de données géohistorique développée par le Laboratoire Image, Ville et Environnement et la Faculté de Géographie de Strasbourg a constitué la base de cette étude. Régulièrement enrichie, elle se compose d’îlots historiques, d’orthophotographies et de données vectorielles sur le bâti et la voirie, depuis les années 1930.

Dans le cadre de ce mémoire, plusieurs aspects sont présentés, avec (1) un état de l’art des travaux menés sur l’urbain, notamment au travers des îlots morphologiques et historiques, avec un intérêt pour les indicateurs calculés sur ces derniers, (2) une présentation des données issues de la base géohistorique utilisée pour ce travail, ainsi que les corrections et compléments apportés, (3) le calcul d’indicateurs pour l’échelle d’analyse retenue, (4) puis la mise en œuvre d’une classification des îlots historiques, dont les résultats sont exposés puis discutés.

1. ÉTAT DE L'ART

1.1. Phénomène urbain et anthropisation

La consommation d'espaces pour la production urbaine est bénéfique aux populations et aux activités qu'accueillent ces territoires issus de l'artificialisation, au moins sur le court terme. En effet, ce processus aboutit à l'accroissement des surfaces artificialisées, qui correspondent à l'ensemble des zones bâties ou non, à vocation résidentielle, de production, de transport, ou encore aux espaces verts urbains, issus de la transformation des espaces naturels et semi-naturels, tels les forêts ou zones agricoles (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, 2017). Ce processus a atteint son paroxysme dans les années 1970, avec l'apparition d'un continuum urbain – rural au sein duquel s'organise une dichotomie centre – périphérie (Bessy-Pietri, 2000 ; Guérin-Pace & Pumain, 1990). Cette distinction entre différents types de tissus urbains se retrouve dans l'arrangement entre les éléments qui les constituent, principalement les éléments verts et gris. Une réflexion sur l'artificialisation nous renvoie ainsi seulement à l'échelle de la ville, niveau d'analyse certes adapté aux études paysagères, mais qui perd de sa pertinence lorsque l'objectif est de reconstituer une typologie de morphotypes urbains ou de dynamiques. En effet, une échelle trop agrégée lisse la diversité des tissus rencontrés au sein de la ville et invite donc à la recherche d'un niveau géographique plus adapté à ce type de travaux (Bourdic, Salat et Nowacki, 2012).

1.2. Niveaux géographiques pour l'étude des espaces urbains

L'étude des espaces urbains suppose le choix d'une échelle adaptée selon les objectifs identifiés. En effet, les données mobilisées, la méthodologie utilisée pour les traiter, ainsi que les résultats espérés, dépendent de cette étape préliminaire. Bourdic *et al.* (2012) identifient ainsi 5 échelles d'analyse pour les espaces urbains : la ville, le district, le quartier, l'îlot et le bâtiment.

Dans le cadre des travaux menés en morphologie urbaine, l'îlot apparaît systématiquement comme étant l'objet le plus intéressant. Généralement délimité par le réseau viaire, l'îlot est témoin d'une certaine homogénéité sur les plans structurel, morphologique et historique. Nous pouvons donc identifier des îlots morphologiques types, cohérents en termes de contenu, pour différentes périodes architecturales ou historiques, par exemple l'habitat continu dense du Moyen-Âge, l'habitat résidentiel individuel et discontinu des années 1970, l'habitat résidentiel collectif et discontinu de la deuxième moitié du XXe siècle (Bourdic, Salat et Nowacki, 2012 ; Vanderhaegen & Canters, 2017)...

Dans le cadre de l'étude ici menée, ce ne sont cependant pas des îlots morphologiques mais historiques qui sont analysés. Définis à l'aide de sections cadastrales, puis complétés par Sauter & Schwartz (2017), nous pouvons partir du postulat qu'ils permettent de rendre compte des dynamiques qu'a connu l'EMS de 1956 à aujourd'hui, compte-tenu d'indicateurs sélectionnés en conséquence pour souligner l'état et les évolutions du tissu urbain.

1.3. Des indicateurs pour caractériser les îlots

L'organisation des espaces reflète les processus qui ont participé à leur production, notamment dans l'urbain, qui concentre une variété importante d'objets aux caractéristiques différentes. Différentes méthodes permettent de rendre compte de cette diversité, avec le développement d'approches en écologie du paysage et en morphologie urbaine par exemple, utiles à la classification des îlots ou autre unités géographiques notamment.

Herold *et al.* (2002) proposent une méthode pour le suivi des dynamiques spatiotemporelles de la ville de Santa Barbara. Après avoir digitalisé les espaces artificialisés pour cinq dates entre 1930 et 2010, les auteurs évaluent l'étalement urbain à l'aide de métriques paysagères calculées sur FRAGSTATS : surface de la tache, nombre de patchs artificialisés, distance moyenne des patchs entre eux, indice de contagion...

Adaptée pour une analyse à l'échelle de la ville, cette méthode perd cependant de sa pertinence au niveau de l'îlot.

Vanderhaegen & Canters (2017) soulignent par ailleurs le fait que les métriques paysagères sont avant tout pensées pour des applications en écologie. L'objet urbain et son contenu requièrent donc de développer des indicateurs adaptés à leur analyse. A l'échelle de l'îlot, de nombreux travaux ont ainsi montré l'intérêt des attributs morphologiques pour décrire la géométrie et l'organisation d'un ensemble de bâtiments, ou d'objets urbains d'une manière générale.

Vanderhaegen & Canters (2010 ; 2017) proposent trois catégories d'indicateurs, calculés (1) sur les bâtiments – tailles maximale et moyenne... – (2) sur les patchs issus de la fusion des bâtiments – coefficient d'emprise au sol, densité de patchs, indice de forme, dimension fractale... – (3) et le long de profils ou de contours – nombre d'alternance entre des éléments bâties et non bâties, pourcentage du périmètre, pourcentage de contour bâti... Ces indicateurs morphologiques leur permettent de mener une classification supervisée à l'aide d'un arbre de décision, puis d'aboutir à une cartographie des îlots selon leurs usages et fonctions. Dans leurs travaux, Vanderhaegen & Canters (2017) ont également testé différents scénarios de classification avec leurs trois catégories de variables utilisées successivement. Les résultats montrent ainsi que les métriques construites à partir du bâti non fusionné possèdent les fréquences d'occurrence les plus élevées au sein des arbres de décision, et soulignent donc leur pertinence pour les problèmes de classification d'unités spatiales en milieu urbain.

Bourdic, Salat & Nowacki (2012) proposent quant à eux une typologie d'indicateurs pour différentes échelles, de la ville au bâtiment. Ces catégories sont les suivantes : intensité, distribution, proximité, connectivité, complexité, diversité et forme. En plus des métriques calculées sur le bâti, les auteurs s'intéressent également à un vaste éventail de variables socio-économiques, et à d'autres objets pour caractériser une unité géographique, tels le réseau viaire, les espaces verts et agricoles. Différents auteurs spécialisés en climatologie urbaine ont ainsi par exemple souligné l'apport de la végétation pour la caractérisation d'îlots morphologiques. C'est notamment le cas de Cordeau (2016), qui a travaillé sur la mise en place d'une chaîne de traitements pour la définition des espaces sujets à l'effet d'îlot de chaleur urbain. A l'aide d'une série d'indicateurs, son objectif a été de caractériser les îlots morphologiques urbains (IMU) de la région Île-de-France. Parmi les variables retenues, nous retrouvons par exemple des coefficients d'emprise au sol pour les surfaces artificialisées et arborées, un mode d'occupation du sol dominant, une densité de bâti volumique ou encore des hauteurs bâties maximale et moyenne... Un seuillage et une combinaison de ces indicateurs permettent d'aboutir à des rugosité minérale et végétale qui, additionnées, donnent une rugosité urbaine. Complétée par la couche des modes d'occupation du sol de l'Île-de-France, elle renseigne finalement sur l'indice typo-morphologique de rugosité urbaine des IMUs, utilisé pour répondre à des enjeux en matière de vulnérabilité climatique, de transition énergétique, ou encore de suivi opérationnel de l'artificialisation des sols.

Les préoccupations récentes en matière d'efficacité énergétique du bâti montrent également un intérêt pour la morphologie urbaine. Il devient alors nécessaire de disposer d'une information sur la ville en trois dimensions cette fois-ci. Bien que Cordeau (2016) et Gauthier (2014) aient par exemple incorporé une information sur la hauteur des bâtiments dans leurs analyses, celle-ci n'est en général qu'une estimation proposée par les fournisseurs de données, tel l'Institut Géographique National (IGN). Plus récemment, la démocratisation de l'usage des LiDAR aéroportés a permis d'obtenir une information à très haute résolution et en trois dimensions sur les espaces urbains. Cette technologie est notamment utilisée par Heiden *et al.* (2012) pour mettre à jour une base de données d'îlots UST (Urban Structure Type), caractérisés par une combinaison de variables physiques, environnementales et fonctionnelles. Les auteurs proposent ainsi de travailler conjointement sur des bases de données topographiques, images hyperspectrales et relevés LiDAR, pour définir une série d'indicateurs pertinents à leur analyse, notamment des coefficients d'emprise au sol pour les espaces bâties, végétalisés et vides, ou encore des densités et volumes de bâtiments et de végétation.

Dans le cadre de cette étude, nous allons nous focaliser sur une lecture historique de l'îlot. L'idée est donc d'aller vers une analyse rétrospective de l'évolution de la maille urbaine strasbourgeoise, à l'aide de métriques paysagères et d'indicateurs morphologiques, calculés dans les plans 2D et 3D, pour le bâti et d'autres objets, tels la végétation arborée ou encore le vide.

2. ZONE D'ÉTUDE, DONNÉES ET PRÉTRAITEMENTS

2.1. Zone d'étude

La zone d'étude est centrée autour de la région strasbourgeoise, située dans la région Grand Est du territoire français, autrefois Alsace. Elle correspondait initialement à l'Eurométropole de Strasbourg composée de 33 communes, dont cinq nouvelles appartenant à la CC Les Châteaux l'ayant rejointe en janvier 2017. Cependant, suite à l'indisponibilité de données pour ces nouveaux territoires, la zone d'étude a été redéfinie comme étant la moitié Nord de l'Eurométropole, emprise représentée sur la Figure 1.

L'agglomération de la ville de Strasbourg, si elle comprend quelques spécificités, possède de grandes similitudes avec l'organisation-type d'une ville européenne telle que présentée par Rousseaux *et al.* (2013) : elle est constituée d'un centre dense, qui concentre de nombreux services et commerces, d'un centre périphérique composé de bâtiments de style haussmannien, et de plusieurs couronnes d'immeubles collectifs et de maisons individuelles, parfois organisées en lotissements. Ce sont également ces espaces périphériques qui concentrent aujourd'hui les centres commerciaux et les industries.

Ces différents tissus ont déjà fait l'objet de plusieurs analyses, réalisées par Moisson (2015), Sauter & Schwartz (2017) puis Humbert (2017). L'objectif de ces travaux a tout d'abord été de constituer une base de données historiques, puis de produire sur celle-ci une série d'indicateurs sélectionnés afin d'extraire ensuite une connaissance sur le territoire à l'aide de méthodes de classification.

2.2. Exploration de la base de données historiques

Dans le cadre de ce travail, nous avons récupéré une base de données historiques développée par différents acteurs, principalement les services de l'EMS, le LIVE et les étudiant-e-s de la Faculté de Géographie et d'Aménagement de Strasbourg. Elle sert à une analyse diachronique, qui s'organise autour de sept années de référence : 1956, 1964, 1978, 1989, 1998, 2002, 2008, 2008 et 2013. Compte-tenu du temps disponible pour l'étude, seules cinq dates ont été retenues pour l'analyse historique : 1956, 1978, 1998, 2008 et 2013. Le contenu de la base de données pour la période considérée est décrit dans les Tableaux 1 et 2.

2.2.1. Présentation de la base de données

Au cours des pré-traitements et de la manipulation de ces différentes couches, plusieurs problèmes de qualité des données ont été identifiés.

En premier lieu, la qualité des orthophotographies ne permettait pas toujours une bonne interprétation, avec des angles de vues qui gênent la visualisation, des problèmes lors du calage des différentes rasters, ou une résolution parfois insuffisante pour distinguer certains éléments. L'orthophotographie mosaïquée de 1978 est également déformée aux jonctions entre les différentes tuiles qui la composent, ce qui a incité à l'utilisation d'un complément d'orthophotographies non mosaïquées pour mieux visualiser ces zones. A noter également que l'orthophotographie de 1956 a été prise en hiver, période à laquelle les éléments arborés ne sont pas forcément identifiables, du fait de l'absence de leur houppier.

Pour les fichiers vectoriels, des erreurs de géométrie et de topologie ont été mises en évidence (Figure 2), la couche de bâti étant celle qui en contient le plus : doublons, superpositions, géométries invalides... Une faible homogénéité et une faible cohérence ont aussi été constatées, à la fois sur les plans morphologique et temporel. En effet, la précision de saisie des bâtiments était variable entre deux dates et les éléments de bâti n'étaient pas toujours considérés ou saisis de la même façon dans le temps et dans l'espace (bâtiments industriels « oubliés », traitement différent des cours intérieures, du bâti léger...). Pour les couches décrivant la voirie, des problèmes d'intersection et de noeuds pendants ont pu être mis en évidence.

	Année	Producteur	Emprise	Résolution (cm)	Commentaire
PRODUITS IMAGES					
Orthophotographies					
1956_Orthophoto_CUS_LACC48	1956	EMS	CUS étendue	50	Prise de vue en hiver
1978_Orthophoto_LIVE_0m3_EMS_CC48_R1	1978	LIVE	CUS étendue	30	Déformations sur la mosaïque aux zones de jonction.
1978_Orthophotos/*.img	1978	IGN	CUS étendue	30	Complément de la mosaïque de 1978 pour les zones avec déformations.
1998_Orthophoto IGN 0m5 CUS CC48 R	1998	IGN	CUS étendue	50	-
2007_Orthophoto IGN 0m5 CUS CC48 View	2007	IGN	CUS étendue	50	-
ortho2013_16cm	2013	EMS	CUS étendue	16	-
Produits LiDAR					
2015_MNS_Trots_EMS_0m5_EMS_CC48	2015	EMS	CUS étendue	50	Seuls les toits sont présents, les autres éléments sont masqués. Manque de certaines tuiles sur l'urbain.
2017_DIF_MNSMNT	2015	G. Skupinski	CUS étendue	50	Les espaces autres que les toits sont dotés d'une valeur de 0. Présence d'artefacts liés aux arbres.

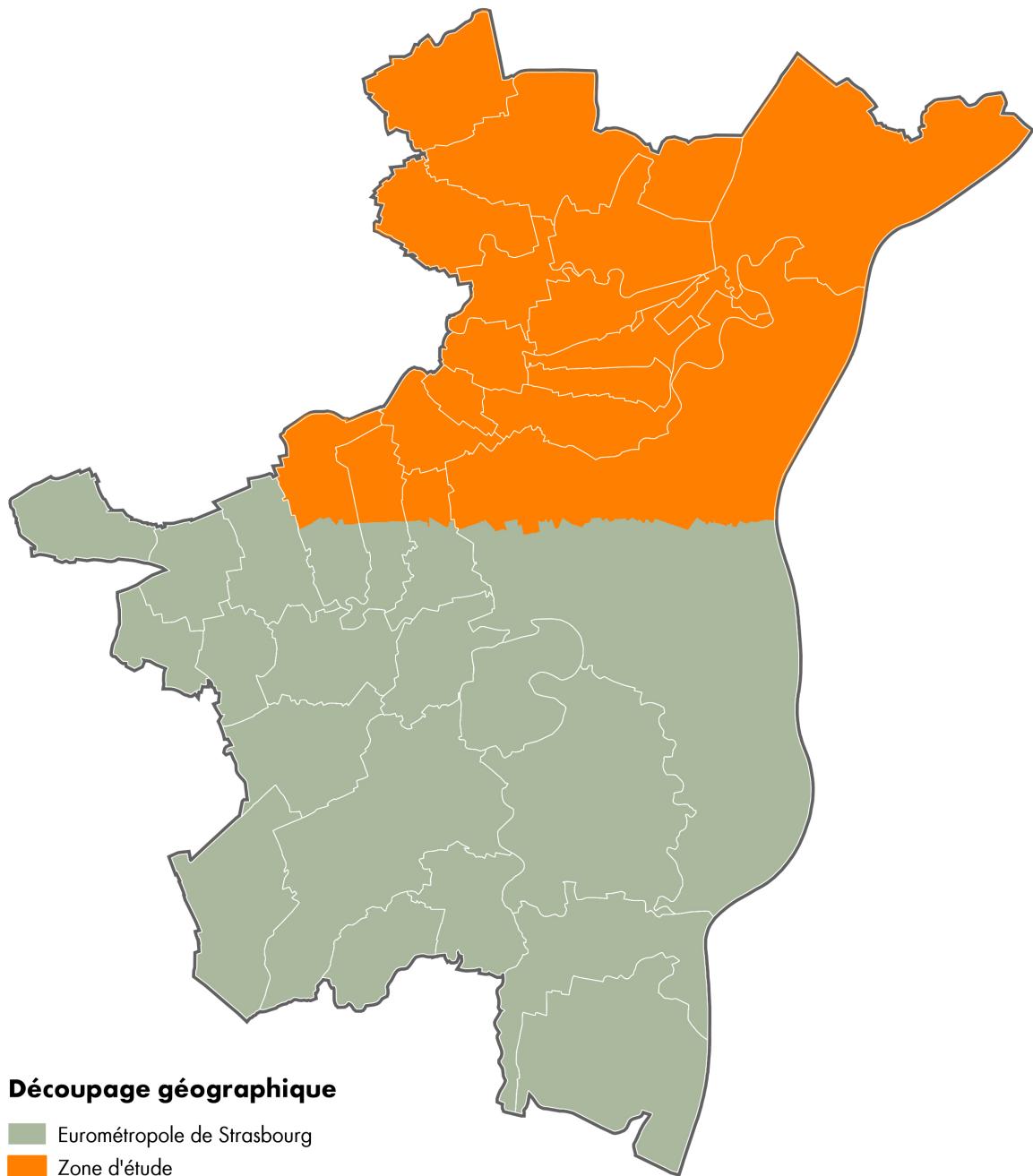
Tableau 1: Produits rasters contenus dans la base de fichiers

	Année	Producteur	Emprise	Échelle	Commentaire
PRODUITS VECTORIELS					
Bâti					
EMS_1956_bati	1956	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_1978_bati	1978	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_1995_bati	1995	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_2008_bati	2008	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_2013_bati	2013	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
Voirie					
EMS_1956_voirie	1956	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_1978_voirie	1978	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_1995_voirie	1995	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_2008_voirie	2008	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
EMS_2013_voirie	2013	IGN et LIVE	CUS	1/10.000	-
Végétation arborée					
1956_VegetationArboree_NordEMS	1956	Medina, Poterek et Sintt	Nord de l'EMS	1/500 au 1/1.000	Partie Nord de l'EMS seulement
1978_VegetationArboree_NordEMS	1978	Medina, Poterek et Sintt	Nord de l'EMS	1/500 au 1/1.000	Partie Nord de l'EMS seulement
1998_VegetationArboree_NordEMS	1998	Medina, Poterek et Sintt	Nord de l'EMS	1/500 au 1/1.000	Partie Nord de l'EMS seulement
2008_VegetationArboree_NordEMS	2008	Medina, Poterek et Sintt	Nord de l'EMS	1/500 au 1/1.000	Partie Nord de l'EMS seulement
2013_VegetationArboree_NordEMS	2013	Medina, Poterek et Sintt	Nord de l'EMS	1/500 au 1/1.000	Partie Nord de l'EMS seulement
Îlots historiques					
EMS_ilots_historiques	-	EMS et LIVE	CUS	-	-

Tableau 2: Produits vectoriels contenus dans la base de fichiers

Eurométropole de Strasbourg

Zone d'étude : Nord de l'Eurométropole de Strasbourg



A. SINDT, 2018.
Sources EMS, LIVE et IGN
Admin Express.

Figure 1 : Territoire de l'Eurométropole de Strasbourg et délimitation de la zone d'étude.

Angle de vue



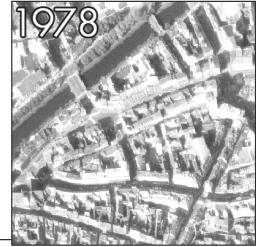
Résolution



Déformation



Mosaïqué

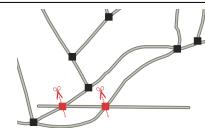
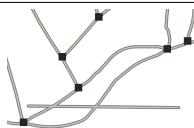


Non mosaïqué

Figure 2 : Limites imposées par l'utilisation des orthophotographies.

Enfin, la couche des îlots historiques comprenait elle aussi de nombreuses erreurs de topologie et de géométrie, avec des superpositions d'entités, trous, et autres problèmes décrits dans le Tableau 3.

Couche	Erreur	Proposition de correction
Combinaison d'erreurs		
<i>Îlots historiques</i>		
	Superposition d'entités, intersections, géométries invalides, trous	[Corrigé] Création d'une géodatabase avec définition de règles de topologie, puis correction manuelle
Intersections		
<i>Bâti</i>		
	Recouvrement des entités avec intersections	[Non corrigé] Création d'une géodatabase, définition de règles de topologie, correction des entités



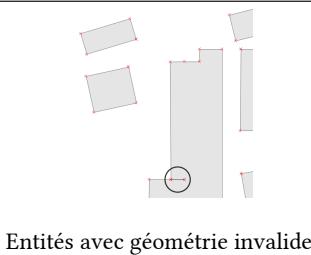
Voirie

Absence de sommets sur les zones d'intersection des entités

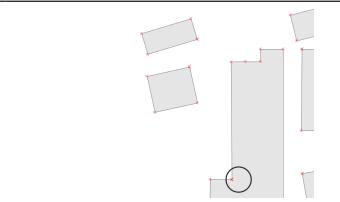
[Non corrigé] Crédit de sommets au niveau des zones d'intersection et des nouvelles entités associées

Géométries invalides

Bâti



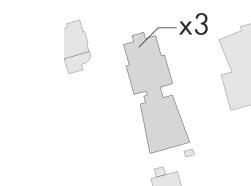
Entités avec géométrie invalide



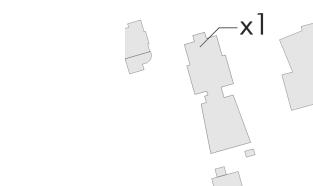
[Corrigé] Correction des géométries par suppression des sommets sur-numériques

Entités doublons

Bâti



Entités dupliquées en plusieurs exemplaires



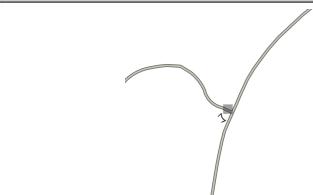
[Corrigé] Suppression manuelle des doublons

Nœuds pendants

Voirie



Entités avec sommets non reliées au reste du réseau



[Non corrigé] Accrochage des sommets à l'entité la plus proche

Tableau 3 : Erreurs de géométrie et de topologie pour les couches vectorielles.

2.3. Correction et nettoyage de la base de données historiques

Compte-tenu de l'état de la base de données, différentes modifications ont été nécessaires pour mener à bien l'analyse des îlots historiques de l'EMS. L'ensemble des corrections apportées sont renseignées dans le Tableau 3. L'Annexe 2 montre également certaines des opérations charnières de correction réalisées.

Dans le cas des îlots historiques plus particulièrement, unité de base pour l'analyse, de nombreuses erreurs de topologie ont été remarquées lors de la digitalisation des éléments arborés. Afin de garantir la qualité des classifications futures, ces erreurs ont été corrigées à l'aide d'une topologie de géodatabase ArcGis, avec les critères suivantes : (1) les entités ne doivent pas se superposer, (2) les entités ne doivent pas avoir de discontinuités. Seule la moitié Nord de l'EMS, concernée par la présente analyse, a été corrigée. La répartition des erreurs avant leur correction est présentée sur la Figure 3. Sur la totalité de l'Eurométropole, 1225 erreurs de topologies étaient présentes, et 671 d'entre elles ont été corrigées pour obtenir une zone d'étude topologiquement correcte.

Correction des erreurs de topologie

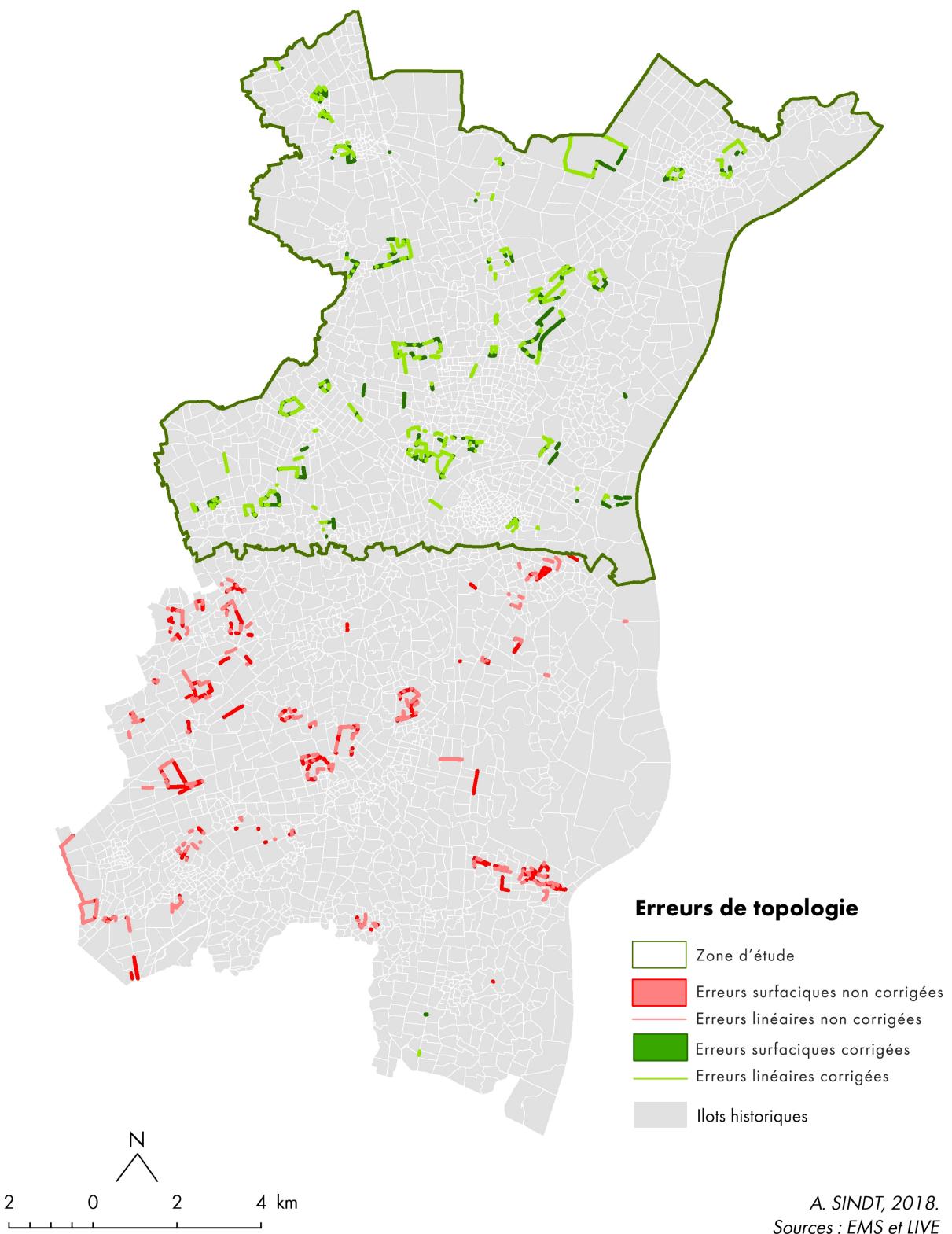


Figure 3 : Cartographie des erreurs de topologie et corrections apportées pour les îlots historiques.

2.4. Incorporation de nouvelles dimensions à la base de données historiques

Une première analyse de la dynamique des îlots historiques de l'EMS a été menée par Humbert (2017), à l'aide de classifications réalisées sur une série d'indicateurs morphologiques, obtenus pour le bâti, dans un espace à deux dimensions. Les résultats ont permis de dégager quatre classes d'îlots, dont trois urbaines, avec une distinction entre le centre dense et les couronnes périphériques plus récentes. D'un point de vue thématique, il en ressort un manque sur les plans morphologique et temporel, qui suscite donc une réflexion sur de nouveaux indicateurs plus discriminants.

Sur ce point, la littérature a déjà permis de démontrer les apports d'une troisième dimension dans l'analyse de l'objet urbain, avec le développement d'indicateurs volumétriques par exemple (Heiden *et al.*, 2012 ; Hermosilla *et al.*, 2014 ; Cordeau, 2016). Une autre piste envisagée consiste en l'exploration du contenu de la maille urbaine, autre que la trame grise. Cordeau (2016) a notamment souligné les apports de la trame verte, de la végétation arborée principalement, pour la distinction de différents types d'îlots morphologiques urbains.

Dans le cadre de cette étude, nous avons donc complété la base de données historiques par une information sur la hauteur des bâtiments, mais également par une série de couches décrivant la végétation pour les différentes dates de référence retenues, comme présenté sur l'Annexe 2.

2.4.1. La hauteur du bâti

Afin de renseigner la hauteur des bâtiments de la base de données historiques, un ensemble de tuiles raster décrivant la hauteur des toits, exprimée en mètres, a été utilisé. Après avoir défini leur emprise et leur projection, ces tuiles ont été mosaïquées pour ne former qu'un seul et même raster (Annexe 1). Certaines portions de la zone d'étude étant absentes sur ce produit, les hauteurs de toits ont été complétées à l'aide d'une couche obtenue par la différence entre un MNT et MNS générés à partir d'un relevé LiDAR sur l'EMS pour l'année 2015-16, opération réalisée par G. Skupinski.

Pour l'année 2013, une information sur la hauteur maximale de chaque entité appartenant à la couche décrivant le bâti a été obtenue à l'aide de statistiques zonales, calculées sur les produits raster issus des relevés LiDAR réalisés en 2015-16.

Pour le rétroportage des hauteurs sur les années de référence antérieures, une réflexion sur la dynamique du bâti a été nécessaire. Pour minimiser les biais liés à la disparition d'entités entre 1956 et 2013, il a été choisi d'extraire l'ensemble des bâtiments qui ont été détruits entre ces deux dates, et d'estimer leur hauteur à partir de la série temporelle d'orthophographies. Cette étape a été réalisée par G. Skupinski, à l'aide de différentes clés d'interprétation, notamment l'angle de vue et, pour chaque bâtiment, une analyse des entités adjacentes. Une fois cette étape accomplie, le rétroportage des hauteurs a été réalisé en effectuant une jointure attributaire sur un champ contenant un identifiant unique multitemporel pour chaque bâtiment et créé par Humbert (2017). Pour certaines entités cependant, la jointure n'a pas donné de résultat satisfaisant, du fait d'une discontinuité dans l'identification des bâtiments.

A noter enfin que le bâti a certainement connu une évolution entre 2013 et 2015-16, moment auquel le relevé LiDAR a été réalisé. Nous pouvons donc supposer que les hauteurs de certaines entités sont erronées, biais dont il faudra tenir compte dans l'interprétation des résultats basés sur ces couches.

2.4.2. La végétation arborée

Afin d'affiner la classification des îlots historiques de l'EMS, un produit vectoriel décrivant les éléments arborés a été constitué sur la partie Nord de l'intercommunalité (Figure 4). Il contribue ainsi au calcul de

nouveaux indicateurs, présentés dans la Partie 3.1., dont le but est d'avoir une meilleure connaissance de la distribution de la trame verte au sein de la matrice urbaine.

Dans un objectif de continuité, et compte-tenu des travaux précédemment menés sur le sujet (Moisson, 2015 ; Sauter & Schwartz, 2017 ; Humbert, 2017), plusieurs millésimes ont été réalisés, pour les années suivantes : 1956, 1978, 1998, 2008, 2013. Le but initial était de disposer également d'un produit pour les années 1964 et 1989, objectif qui n'a finalement pas été tenu faute de temps.

Chacune de ces couches a été constituée par photo-interprétation, à partir d'une série temporelle d'orthophotographies collectées sur l'EMS et mosaïquées. Dans le cadre de ce travail, nous sommes partis de l'occupation du sol produite par le Laboratoire Image, Ville et Environnement (LIVE) sur l'EMS pour l'année 2012. Après en avoir extrait la végétation arborée, celle-ci a été corrigée pour correspondre aux surfaces décrites par l'orthophotographie de 2013. Les corrections apportées consistent en des opérations (1) d'ajout, de suppression ou de déplacement d'entités, (2) d'ajout, de suppression ou de déplacement de sommets, (3) d'ajout ou de suppression de trous, (4) et de correction d'erreurs de topologie ou de géométrie. Cette dernière étape a été indispensable afin de corriger les isthmes, intersections et polygones dupliqués présents sur la couche d'origine. Une fois la végétation arborée préparée pour 2013, celle-ci a été rétropartie successivement sur les orthophotographies des années précédentes. Les mêmes opérations de correction ont été répétées afin d'obtenir une description fine de la végétation pour l'ensemble de la série temporelle.

Afin d'optimiser le temps dédié à la digitalisation, nous avons choisi de partager la zone d'étude en 3 chantiers de difficultés *a priori* égales (Figure 4), compte-tenu de leur surface et des modes d'occupation ou d'usage du sol. Le découpage de l'espace en chantiers s'appuie sur les îlots historiques fournis par l'EMS puis complétés par Sauter & Schwartz (2017).

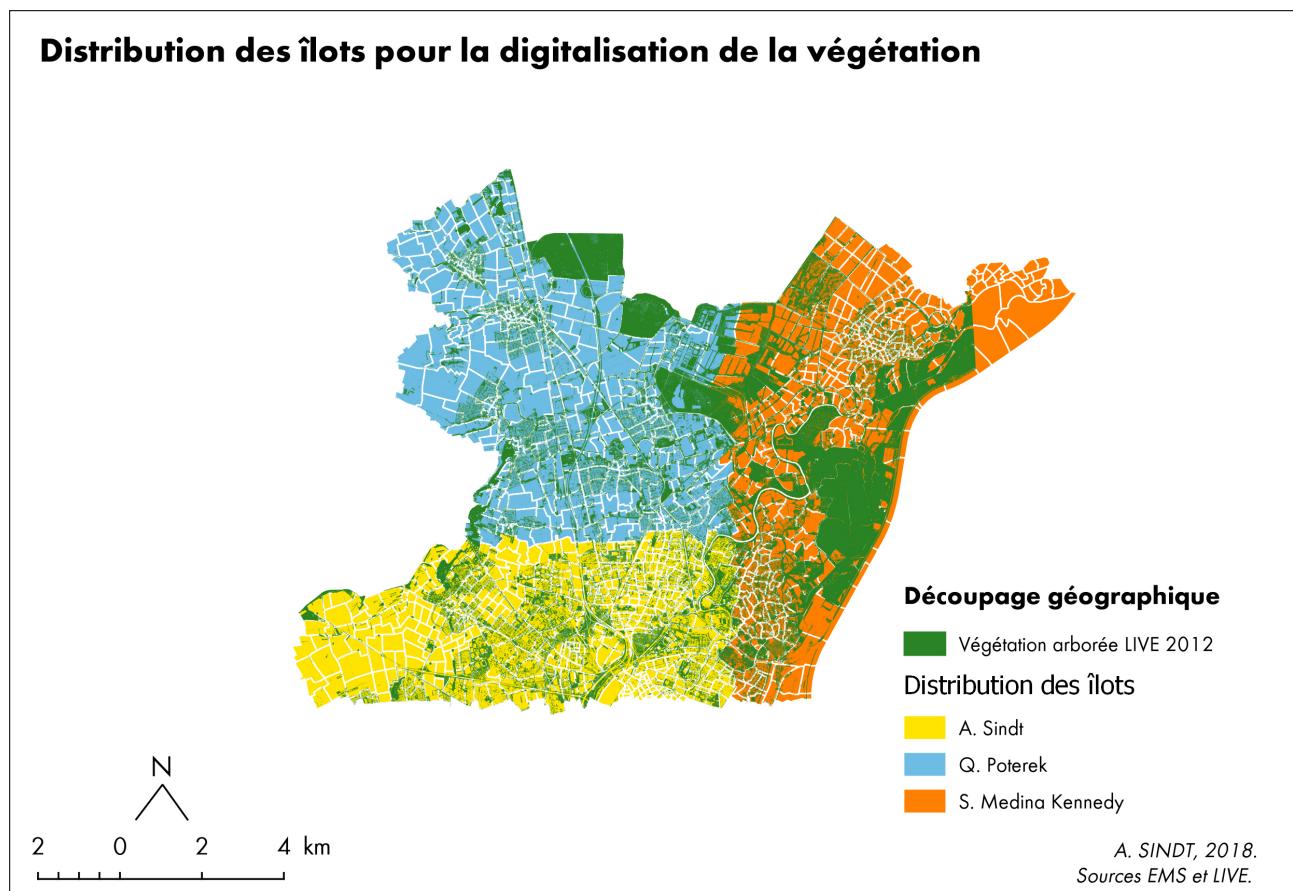


Figure 4 : Distribution des îlots en chantiers pour la digitalisation de la végétation arborée.

Chacune des étapes décrites précédemment repose sur des techniques de photo-interprétation, signifiant qu'il a fallu faire des choix en amont afin d'obtenir un produit final harmonisé pour les trois opératrices intervenant sur le sujet. Nous avons donc retenu deux échelles de saisie des entités, fixées au 1/500 et 1/1.000, compte-tenu des résolutions des photographies aériennes de la série temporelle, et de la taille des plus petits éléments visibles ou interprétables comme étant de l'arboré. Le travail d'interprétation a ensuite été réalisé à l'aide de différentes clés de lecture : couleur, texture, ombres portées, environnement... Plusieurs limites ont cependant été cernées au cours de la digitalisation, notamment les changements de résolution, d'angle de prise de vue et de saison, ou le passage de clichés couleurs à des clichés noir et blanc. Lorsque l'interprétation était trop difficile ou incertaine, une hypothèse de non changement a été posée.

A noter également que les changements dans la distribution des éléments arborés entre les moments t et t-1 étaient tels que la quasi-totalité des polygones initiaux ont été supprimés pour les années 1978 et 1956, puis resaisis à la main. Ces différents points sous-entendent donc l'existence possible d'un biais dans l'évolution de la surface des éléments arborés. En effet, pour les 3 premières dates, nous avons essayé tant que faire se peut de conserver les polygones issus de la correction de l'occupation du sol fournie par le LIVE, chose qui n'a pas pu être réalisée pour les deux dernières années. Cela suppose donc une différence notable dans la géométrie des éléments arborés, notamment en termes de précision.

Une fois les produits terminés pour chacun des trois chantiers, les fichiers de végétation ont été assemblés afin de créer une unique couche sur le Nord de l'EMS. Des outils de fusion et d'éclatement des entités multiparties ont également été utilisés afin d'éliminer les éventuels doublons et problèmes d'intersection au niveau des zones de jointure des chantiers. Une fois ces géotraitements réalisés, la table attributaire a été complétée et harmonisée. Les champs suivants ont été retenus et renseignés : (1) 'ID' l'identifiant de l'entité arborée, (2) 'OPERATEUR' qui renseigne sur l'individu ayant digitalisé l'entité, (3) 'DATE_REF' qui renseigne sur l'année de production du référentiel utilisé, (4) 'DATE_DIGIT' qui renseigne sur l'année à laquelle a été saisie l'entité. Une fois toutes ces étapes terminées, une vérification de la géométrie et de la topologie de la végétation arborée a été réalisée pour chaque millésime afin d'assurer sa qualité.

A noter que l'EMS avait également énoncé le besoin de disposer d'une information thématique sur la végétation arborée, répondant à la typologie suivante (SERTIT & CUS, 2013) :

- (1) Forêt (Surface (S) \geq 50 ares, Largeur (La) \geq 20m) ;
- (2) Bois (S \geq 5 ares, La \geq 20m) ;
- (3) Bosquet (S $<$ 5 ares, La \geq 20m) ;
- (4) Haies et arbres d'alignement (Longueur (Lo) \geq 25m, La $<$ 20m) ;
- (5) Arbres isolés.

Compte-tenu du temps nécessaire à la production des couches, nous nous sommes seulement concentrés sur la géométrie des entités, laissant donc de côté la typologie.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Calcul d'indicateurs morphologiques

3.1.1. Indicateurs pour la végétation arborée

Le **coefficent d'emprise au sol** de la végétation arborée (VeCES) représente la surface au sol de la végétation rapportée à la surface de l'îlot. Cet indicateur est obtenu après le calcul de la surface totale de végétation par îlot, qui est rapportée à la surface de l'îlot lui-même, et multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage d'emprise au sol.

$$VeCES = \frac{Aire_{Végétation}}{Aire_{îlot}} \times 100$$

La **densité de patchs** de la végétation arborée (VeDP) représente le nombre d'entités de végétation rapporté à la surface de l'îlot. Cet indicateur est obtenu après le dénombrement du nombre d'entités par îlot, rapporté à la surface de l'îlot lui-même. Son unité est le nombre de patchs par unité de surface.

$$VeDP = \frac{Patchs_{Végétation}}{Aire_{îlot}}$$

La **diversité de la surface** de la végétation arborée (VeDivS) représente la variabilité de la surface de la végétation dans un îlot. Cet indicateur est obtenu après avoir discrétisé les valeurs de surface de chaque élément arboré contenu dans un îlot, en fonction des classes proposées dans le Tableau 4.

Classes de surface (m²)		
Classe	Borne inférieure	Borne supérieure
1	0	500
2	500	2500
3	2500	5000
4	5000	10 000
5	10 000	20 000
6	20 000	∞

Tableau 4 : Discrétisation des valeurs de surface pour les éléments arborés.

Ensuite, l'indice de Simpson est calculé à partir des effectifs pour ces classes. Il est borné entre 0 et 1, où 0 représente une diversité maximale, et 1 une absence de diversité (McGarigal & Marks, 1995). Cet indicateur est traditionnellement utilisé en écologie du paysage, mais a été adapté dans le cas d'études portant sur la morphologie urbaine (Vanderhaegen & Canters, 2017).

$$VeDivS = \sum_{i=1}^n \frac{N_i (N_i - 1)}{N (N - 1)}$$

Plus l'indice tend vers 0, plus les patchs de végétation appartiennent à des classes de surface différentes au sein d'un même îlot. Plus l'indice tend vers 1, plus ils appartiennent à la même classe de surface.

Ces indicateurs d'emprise au sol, de densité de patch et de diversité sont en général traditionnellement utilisés pour le bâti (Bourdic *et al.*, 2012, Cordeau *et al.*, 2016), mais sont également utilisables comme indicateurs de base pour analyser les propriétés de la végétation d'un espace urbain puisque l'organisation de la végétation peut décrire la morphologie d'une ville au même titre que le bâti (Cordeau *et al.*, 2016, Hermosilla *et al.*, 2014).

3.1.2. Indicateurs pour le bâti

Le **coefficent d'emprise au sol** (BCES) représente la surface au sol du bâti rapportée à la surface de l'îlot. Cet indicateur est obtenu après le calcul de la surface totale de bâti par îlot, qui est rapportée à la surface de l'îlot lui-même, et multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage d'emprise au sol.

$$BCES = \frac{Aire_{Bâtiments}}{Aire_{îlot}} \times 100$$

La **diversité de la hauteur** (BDivH) représente la variabilité de la hauteur du bâti dans un îlot. Cet indicateur est obtenu après avoir discrétisé les valeurs de hauteur de chaque bâtiment contenu dans un îlot, en fonction des classes proposées dans le Tableau 5.

Ensuite, l'indice de Simpson est calculé à partir des effectifs pour ces classes. Plus l'indice tend vers 0, plus les bâtiments appartiennent à des classes de hauteur différentes au sein d'un même îlot. Plus il tend vers 1 et plus ils appartiennent à la même classe.

$$BDivH = \sum_{i=1}^n \frac{N_i (N_i - 1)}{N (N - 1)}$$

Classes de hauteur (m)

Classe	Borne inférieure	Borne supérieure
1	0	6
2	6	9.5
3	9.5	13.5
4	13.5	20
5	20	40
6	40	∞

Tableau 5 : Discrétisation des valeurs de hauteur pour les bâtiments.

La **diversité de la surface** (BDivS) représente la variabilité de la surface du bâti dans un îlot. Cet indicateur est obtenu après avoir discrétisé les valeurs de surface de chaque bâtiment contenu dans un îlot, en fonction des classes proposées dans le Tableau 6.

Ensuite, l'indice de Simpson est calculé à partir des effectifs pour ces classes. Plus l'indice tend vers 0, plus les bâtiments appartiennent à des classes de surface différentes au sein d'un même îlot. Plus il tend vers 1 et plus ils appartiennent à la même classe.

$$BDivS = \sum_{i=1}^n \frac{N_i (N_i - 1)}{N (N - 1)}$$

Classes de surface (m²)

Classe	Borne inférieure	Borne supérieure
1	0	80
2	80	260
3	260	1100
4	1100	3040
5	3040	7500
6	7500	∞

Tableau 6 : Discréétisation des valeurs de surface pour les bâtiments.

La **compacité médiane** du bâti (BCmed) représente la médiane de la compacité au sol du bâti, obtenue avec le rapport entre la surface du bâtiment et son périmètre. Cet indicateur est obtenu après le calcul de la compacité de chaque bâtiment de chaque îlot, rapportée à la surface de l'îlot lui-même.

$$BCmed = med \left(\frac{4 \times Aire_{Bâti}}{\text{Périmètre}_{Bâti}} \right)$$

Dans les applications développées en morphologie urbaine, la compacité apparaît comme un indicateur pertinent mais il se décline sous différentes formes (Sauter & Scwhartz, 2017). La formule retenue est celle proposée par Hermosilla *et al.* (2014).

La **hauteur médiane** du bâti (BHmed) représente la médiane de la hauteur du bâti de chaque îlot. Cet indicateur est obtenu après avoir calculé ou estimé la hauteur de chaque bâtiment.

$$BHmed = med (Hauteur_{bâti})$$

La **hauteur maximale** du bâti (Hmax) représente la hauteur du bâtiment le plus haut de chaque îlot. Cet indicateur est obtenu après avoir calculé ou estimé la hauteur de chaque bâtiment.

$$BHmax = max (Hauteur_{bâti})$$

3.1.3. Indicateurs pour le vide

Le vide représente l'espace n'étant occupé ni par la végétation arborée ni par le bâti.

$$Vide = (Végétation arborée \cup Bâti) \Delta \hat{I}lot$$

Le **coefficient d'emprise** au sol du vide (ViCES) représente la surface au sol du vide rapportée à la surface de l'îlot. Cet indicateur est obtenu après le calcul de la surface totale de vide par îlot, qui est rapportée à la surface de l'îlot lui-même, et multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage d'emprise au sol.

$$ViCES = \frac{Aire_{Vide}}{Aire_{îlot}} \times 100$$

3.1.4. Traitements réalisés suite au calcul des indicateurs

Dans le cas des îlots non végétalisés et non artificialisés, le calcul de ces indicateurs renvoie une valeur NaN. Pour les opérations de classification réalisées par après, l'absence d'une information quantitative sur les entités peut poser problème. Différents modes de gestion sont proposés par défaut, par exemple un remplissage automatisé, et réalisé par l'algorithme à l'aide d'estimateurs. Des essais de classification ont été menés et ont finalement montré qu'un remplissage manuel effectué par les opérateurs-trices renvoie de meilleurs résultats que de conserver les valeurs NaN ou de laisser l'algorithme gérer ce manque de données. Les règles de remplissage sont les suivantes :

- (1) Pour les indicateurs de diversité, la valeur de remplissage est de 1 puisqu'elle sous-entend un manque total de diversité ;
- (2) Pour les indicateurs autres que ceux de diversité, la valeur de remplissage est de 0.

Cette étape est ainsi susceptible de générer un biais, à la fois dans l'interprétation faite des évolutions de la maille urbaine, mais également dans les classifications réalisées dans la suite de ce travail.

Finalement, une jointure attributaire a été réalisée sur la couche des îlots, en reprenant leur identifiant unique, afin d'y ajouter l'ensemble des indicateurs calculés, pour les cinq dates sélectionnées. **La table du fichier en sortie est donc constituée d'une série temporelle de 52 champs** : l'identifiant unique de l'îlot, sa surface, puis les 5×10 indicateurs. A noter que les valeurs ont été **centrées et réduites**.

3.2. Définition *a priori* d'une typologie d'évolutions des îlots

Dans une démarche exploratoire, il a été posé comme postulat que la **taille des îlots permet de discriminer différents morphotypes et évolutions**, les **petits îlots** étant plutôt situés dans des espaces urbains et les **grands îlots** dans des espaces ruraux. Deux classes de surface ont donc été créées :

- (1) Les petits îlots, dont la surface est inférieure à 75.000 m² ;
- (2) Les grands îlots, dont la surface supérieure à 75.000m².

Cette distinction, cernée à l'aide d'un histogramme des valeurs de surface, ne sera cependant pas nécessairement conservée par la suite.

La base de données CIGAL 2012 et l'orthophotographie de l'année 2013 ont été utilisées pour identifier le mode d'occupation du sol majoritaire de seize îlots-témoins sur la zone d'étude. Ils se répartissent, pour les petits et grands îlots, en huit classes (Figure 5) : habitat continu, discontinu grands ensembles et discontinu pavillonnaire, zones spécialisées, agricole, forêt, espaces agricoles mixtes contenant de la végétation arborée, zones mixtes.

L'identification de ces îlots a permis de réaliser des profils temporels sur lesquels est représentée l'évolution des valeurs des différents indicateurs dans le temps, pour mieux identifier les morphotypes à l'échelle de la zone d'étude, et distinguer des classes d'évolution en vue de préparer la classification.

3.3. Classification des îlots historiques

3.3.1. Extraction de connaissances à l'aide de l'algorithme k-moyennes

A partir des indicateurs morphologiques calculés pour les îlots sur chaque année de référence, l'objectif est de mettre en œuvre une ou plusieurs méthodes d'extraction de connaissances, pour décrire les dynamiques connues par l'EMS.

Il existe pour cela des méthodes de classification (1) supervisées et (2) non supervisées. L'apprentissage supervisé permet de classer une nouvelle entité, sur la base d'un modèle construit à partir des prédictifs décrivant un ensemble fini de classes connues *a priori*. Extraire des catégories de changement s'avère cependant plus compliqué que pour des modes d'occupation ou d'usage du sol par exemple (Hand, 2007).

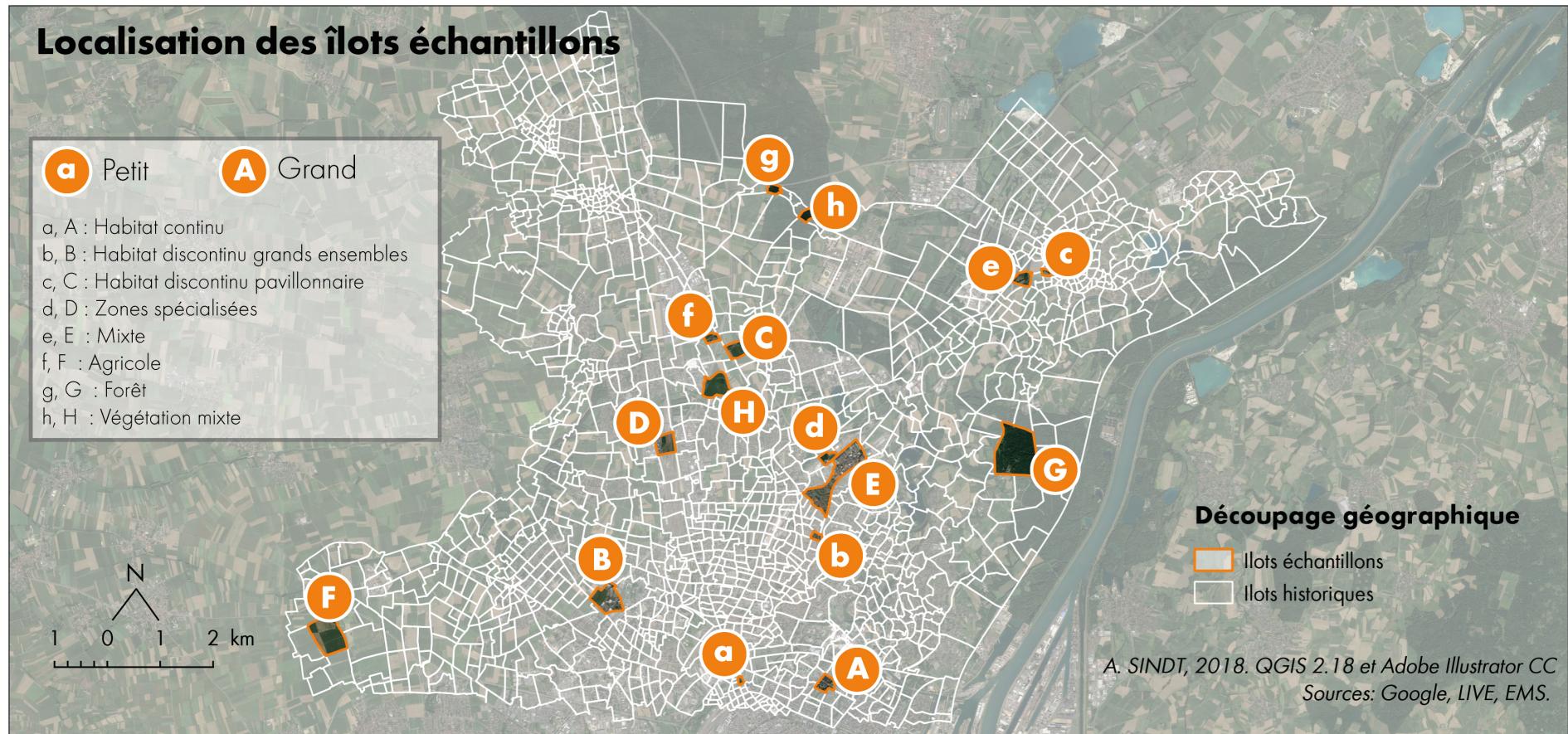


Figure 5 : Localisation des îlots témoins utilisés pour le suivi *a priori* des dynamiques de l'Eurométropole.

En effet, les bases de données qui existent aujourd’hui sur l’urbain proposent avant tout des typologies ponctuelles d’un point de vue temporel, faisant fi des dynamiques qu’ont connu les territoires. Cela s’explique principalement par une difficulté à déterminer, *a priori*, l’histoire d’un îlot par exemple. Il est donc nécessaire d’aller vers des méthodes de fouille de données descriptive, en faisant appel à des algorithmes de classification non supervisée, de *clustering* principalement. En effet, ils permettent d’identifier une structure au sein des données, faisant apparaître des regroupements ensuite interprétables par un-e opérateur-trice (Hand, 2007).

Parmi les méthodes de *clustering* proposées dans la littérature, celle des k-moyennes est aujourd’hui la plus utilisée, du fait de sa facilité de mise en œuvre. En effet, l’algorithme nécessite seulement de renseigner le nombre de classes k souhaité pour le partitionnement des données. Cette méthode a pour objectif de séparer les individus en classes homogènes, de telle sorte que deux objets appartenant à une même classe se ressemblent plus que deux objets de classes différentes. Un critère de distance est donc utilisé, qui consiste à minimiser l’inertie intra-classe, et à maximiser l’inertie inter-classe pour chaque partition (Jain, 2010).

L’algorithme est itératif et s’organise en trois étapes principales (Figure 6), qui sont les suivantes :

- (1) [Non itératif] Sélection aléatoire des k noyaux initiaux, placés dans l’espace des données ;
- (2) [Itératif] Affectation des entités au noyau le plus proche ;
- (3) [Itératif] Création d’un nouveau noyau en prenant les valeurs moyennes des échantillons affectés au précédent noyau.

L’algorithme s’arrête lorsque la distance entre un même noyau à deux itérations successives est inférieure à un seuil fixe ou renseigné par l’opérateur-trice.

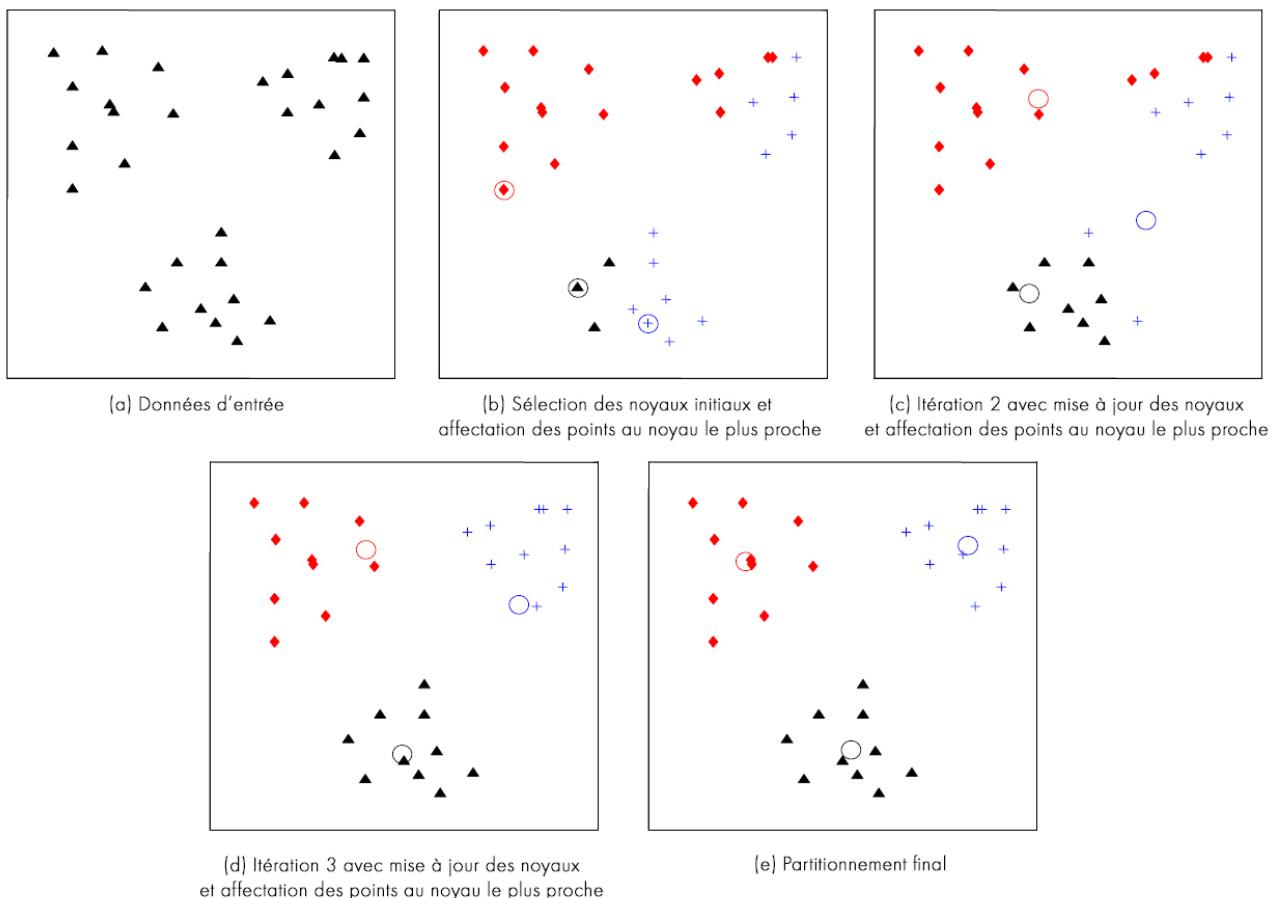


Figure 6 : Principe de fonctionnement de la méthode k-moyennes.

Compte-tenu de sa facilité de mise en œuvre, nous avons choisi d'utiliser l'**algorithme des k-moyennes pour classer les îlots historiques** en fonction de la série temporelle des indicateurs morphologiques qui les caractérisent. Cette méthode présente cependant plusieurs inconvénients, notamment sa sensibilité aux valeurs aberrantes et à l'initialisation des noyaux, ou encore le choix du nombre de classes k.

3.3.2. Choix du nombre de clusters pour l'initialisation de l'algorithme k-moyennes

Dans le cas des méthodes de *clustering*, le choix du nombre de classes apparaît comme un problème récurrent, puisqu'il requiert une connaissance *a priori* du partitionnement des données (Jain, 2010). Compte-tenu des îlots historiques témoins identifiés grâce à la méthode décrite dans la Partie 3.2., nous disposons déjà d'une base de connaissances sur la manière dont se répartissent en classes les morphotypes et évolutions. Il est cependant hasardeux de supposer que ces seules catégories sont présentes dans les données, dans la mesure où un nombre limité d'îlots a été sélectionné pour produire cette connaissance.

Différentes méthodes existent pour étudier la séparabilité des classes issues d'un algorithme de *clustering*, et donc évaluer le nombre optimal de partitions pour un échantillon donné. Parmi celles-ci, nous retrouvons notamment l'analyse des silhouettes (Rousseeuw, 1978) et la méthode du coude (Ketchen & Shook, 1996).

La méthode du coude permet de représenter la quantité de variance expliquée par un partitionnement (variable dépendante) en fonction du nombre de *clusters* (variable indépendante). L'objectif est d'identifier graphiquement un point d'inflexion, qui représente le nombre de classes au-dessus duquel la quantité d'information apportée par un partitionnement plus fin devient subsidiaire (Ketchen & Shook, 1996).

La méthode des silhouettes permet quant à elle de représenter la proximité d'un individu appartenant à une classe aux individus appartenant à des *clusters* voisins. Cette solution permet de déterminer le nombre optimal de classes visuellement, mais aussi quantitativement. En effet, chaque individu possède un score de silhouette, compris dans l'intervalle $S \in [-1 ; 1]$. Plus S se rapproche de 1, plus l'individu diffère des entités appartenant aux classes voisines, et qu'il a donc été correctement classifié. Plus S se rapproche de -1, plus l'individu ressemble aux entités appartenant aux classes voisines, et qu'il a donc été mal classifié (Rousseeuw, 1978). Une valeur proche de 0 traduit quant à elle une certaine difficulté à assigner l'individu à une classe. Visuellement, nous pouvons ainsi lire les silhouettes comme présenté sur la Figure 7.

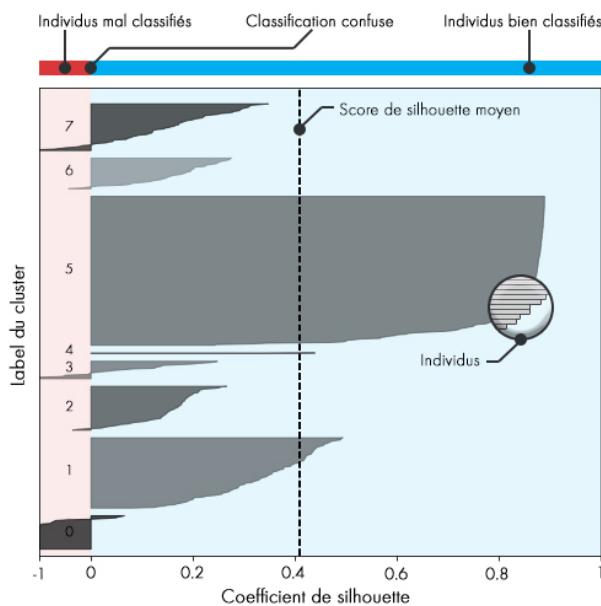


Figure 7: Méthode d'interprétation des silhouettes.

Les **méthodes du coude et des silhouettes** ont ici été utilisées conjointement afin d'**évaluer le nombre optimal de classes** pour le partitionnement. Pour cela, 79 classifications k-moyennes ont été lancées, avec un nombre de classes k incrémenté de 1 à chaque itération, k étant donc compris entre 2 et 80. Les figures ainsi obtenues consistent en : (1) un graphique pour la méthode du coude sur lequel est représenté le pourcentage de variance expliquée en fonction du nombre de *clusters*, (2) un ensemble de 79 graphiques qui représentent les silhouettes pour un nombre de *clusters* croissant, compris entre 2 et 80.

4. RÉSULTATS

4.1. Dynamiques de la végétation arborée

Une fois la digitalisation des éléments arborés réalisée, il a été possible d'étudier l'évolution de leur répartition au sein des îlots historiques de l'EMS (Figure 8, 9, 10).

Une cartographie de la variation absolue des surfaces de végétation permet de mettre en évidence les espaces stables, principalement agricoles et forestiers, avec la forêt de la Robertsau qui a par exemple connu le moins d'évolutions. Le centre ancien, dense et continu, présente lui-aussi un comportement relativement similaire entre 1956 et 2013. D'une manière générale, les dynamiques les plus importantes ont eu lieu pour deux périodes : entre 1956 et 1978, puis 1978 et 1998. Peu de changements sont observés sur les deux dernières périodes, ce qui peut s'expliquer par une différence dans les pas de temps retenus. Globalement, les espaces qui connaissent les variations les plus importantes sont ceux qui ont connu une artificialisation au cours du siècle dernier, dans les première et seconde couronnes périurbaines de l'EMS.

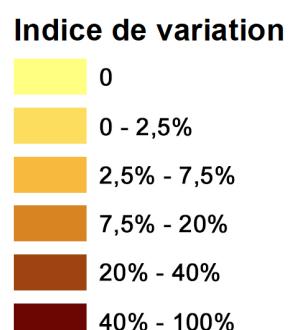
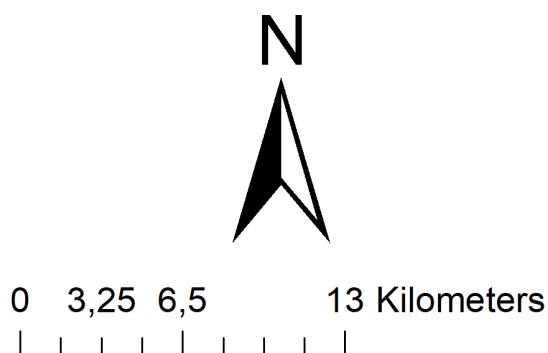
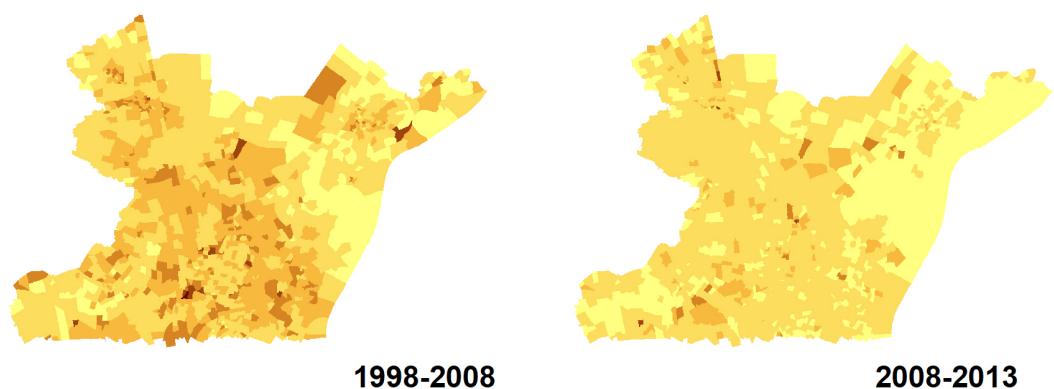
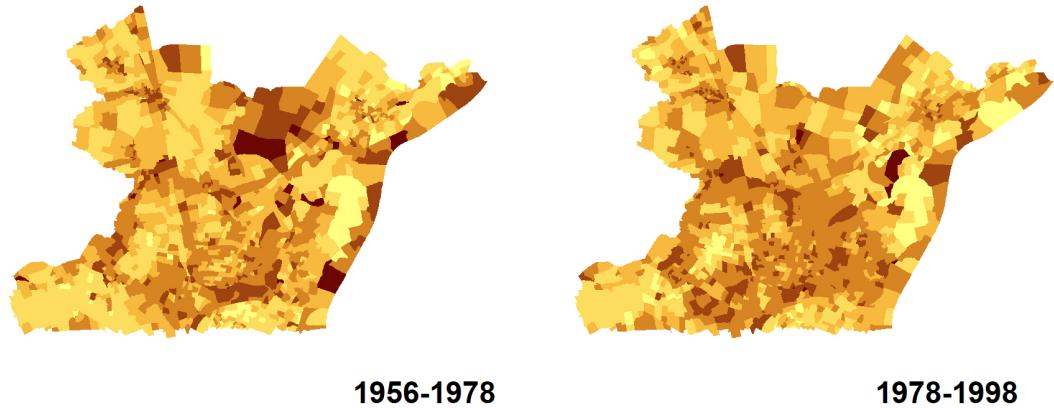
Une variation absolue ne permet cependant pas de faire ressortir localement les pertes et gains en matière d'arboré. Une différence symétrique entre chaque couple d'année a ainsi permis d'extraire cette information, qui une fois ramenée à l'îlot, permet de calculer des pourcentages d'évolutions positive ou négative de la surface de végétation haute.

Une cartographie de l'augmentation de la couverture arborée permet de mettre en évidence les deux couronnes d'étalement successives, dégagées pour les années 1978 et 1998. En effet, la part de l'arboré dans les îlots connaît une évolution substantielle, avec une augmentation de la surface comprise entre 7.5 % et 20 %. Des dynamiques mixtes sont également observées dans les espaces semi-naturels, avec la mise en évidence de phénomènes de fermeture des îlots, et d'avancée de la végétation. A nouveau, les zones les plus stables sont agricoles, forestières, ou encore le centre dense de l'Eurométropole de Strasbourg.

Une cartographie de la perte de couverture arborée traduit quant à elle des phénomènes différents. En effet, la bordure Ouest du Rhin connaît une fragmentation importante entre 1956 et 1978, compensée ensuite par un gain pour les années suivantes. La périphérie directe du centre connaît elle aussi une perte de végétation, plus importante entre 1956 et 1978, ou 1978 et 1998, que pour le reste des années. Cela traduit la disparition d'éléments paysagers, tels les vergers, bosquets ou haies, au profit de la production urbaine issue d'un étalement urbain progressif. A nouveau, nous pouvons noter une stabilisation pour les deux dernières périodes, de 1998 à 2008, puis de 2008 à 2013, qui peut s'expliquer par des pas de temps peu pertinents.

D'une manière générale, une connaissance du territoire sous ses dimensions historique et urbanistique permet de souligner le fait que la présence de l'arboré est avant tout liée à la mise en place de structures urbaines, destinées à l'habitat discontinu ou à la production secondaire et tertiaire. Centre ancien et centres-bourgs possèdent quant à eux une certaine inertie, qui s'explique par un tissu dense, stable et sans évolution, du fait de difficultés à le remanier. Enfin, les espaces semi-naturels ont connu des dynamiques variées, de fermeture, de fragmentation, d'expansion, de recul...

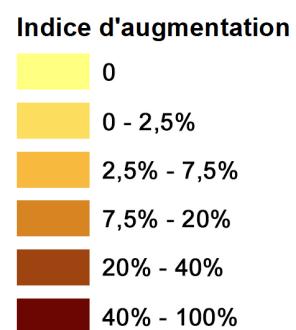
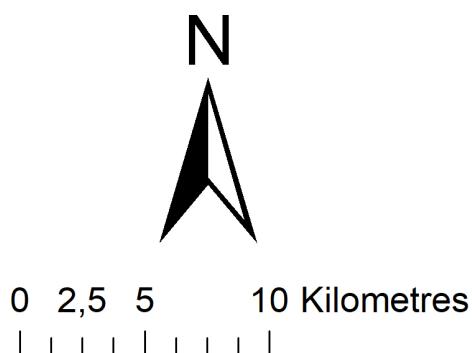
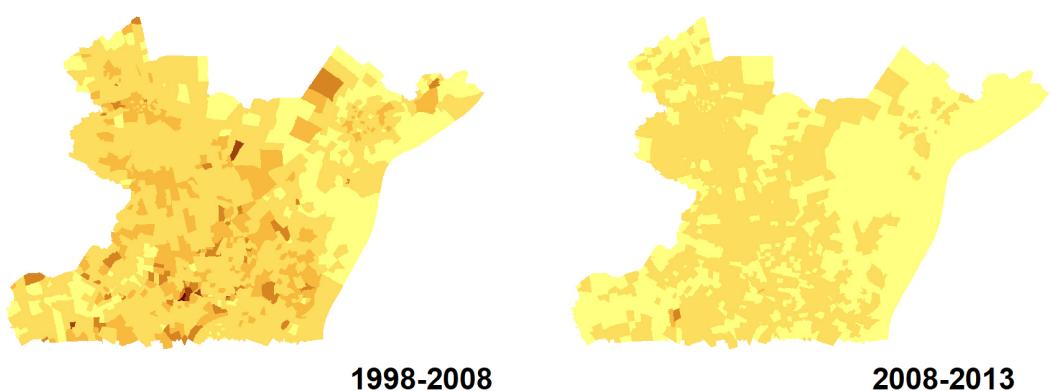
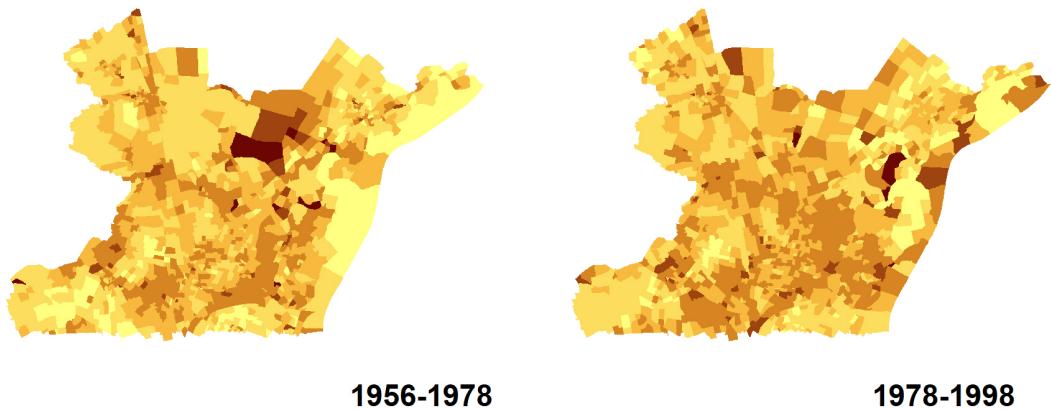
VARIATION DE LA COUVERTURE VEGETALE



Auteur : S. Medina, 2018.
Source : les auteurs.

Figure 8 : Variation absolue de la part de l'arboré dans les îlots, entre 1956 et 2013.

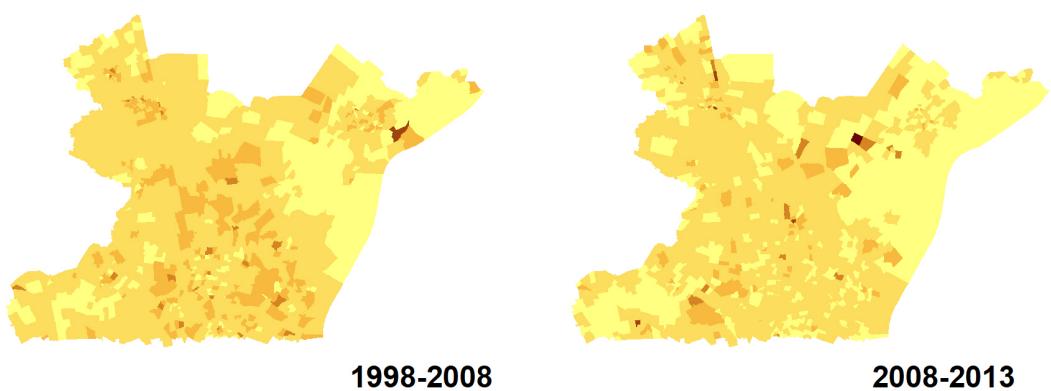
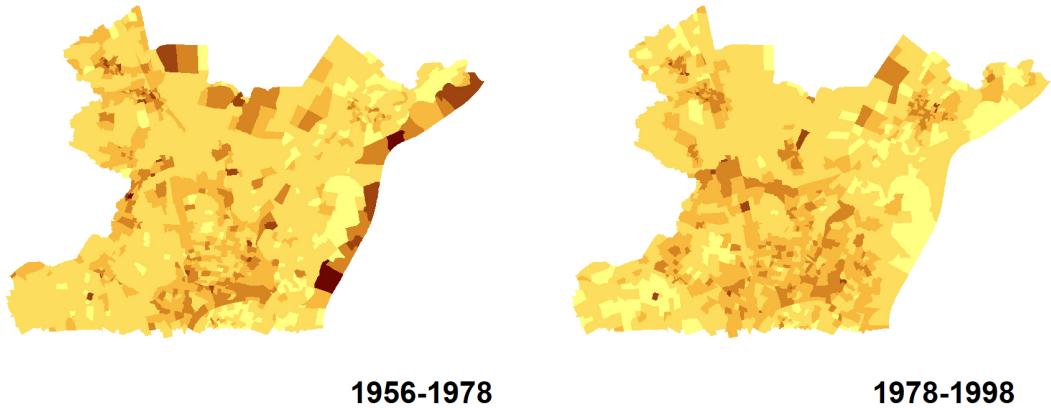
AUGMENTATION DE LA COUVERTURE VEGETALE



Auteur : S. Medina, 2018.
Source : les auteurs.

Figure 9 : Augmentation de la part de l'arboré dans les îlots, entre 1956 et 2013.

PERTE DE LA COUVERTURE VEGETALE



Auteur : S. Medina, 2018.
Source : les auteurs.

Figure 10 : Diminution de la part de l'arboré dans les îlots, entre 1956 et 2013.

4.2. Calcul d'indicateurs morphologiques

Afin de mener une première exploration de la structure des données mobilisées pour la classification, nous avons tout d'abord analysé la corrélation entre les différents indicateurs calculés, pour l'ensemble des îlots, sur les années 1956 et 2013 (Figure 11). Une première grappe ressort pour les variables relatives au bâti, avec une corrélation positive entre les coefficients d'emprise au sol, hauteurs et compacités. Les espaces les plus artificialisés sont donc aussi les plus hauts et les plus compacts, image qui s'apparente au centre dense ancien ou au tissu haussmannien par exemple. Une corrélation négative est également observée entre les indices de diversité et quatre indicateurs : les coefficients d'emprise au sol, hauteurs maximales et moyennes, et compacités. Une seconde grappe apparaît pour les variables relatives à la végétation. Très faiblement corrélées aux indicateurs de bâti en 1956, la corrélation augmente positivement en 2013, ce qui souligne donc la mise en place d'une relation entre artificialisation et apparition d'éléments arborés. Vient enfin le coefficient d'emprise au sol du vide, corrélé négativement à ceux du bâti et de l'arboré, ce qui s'explique simplement par le fait que ces trois variables sont complémentaires.

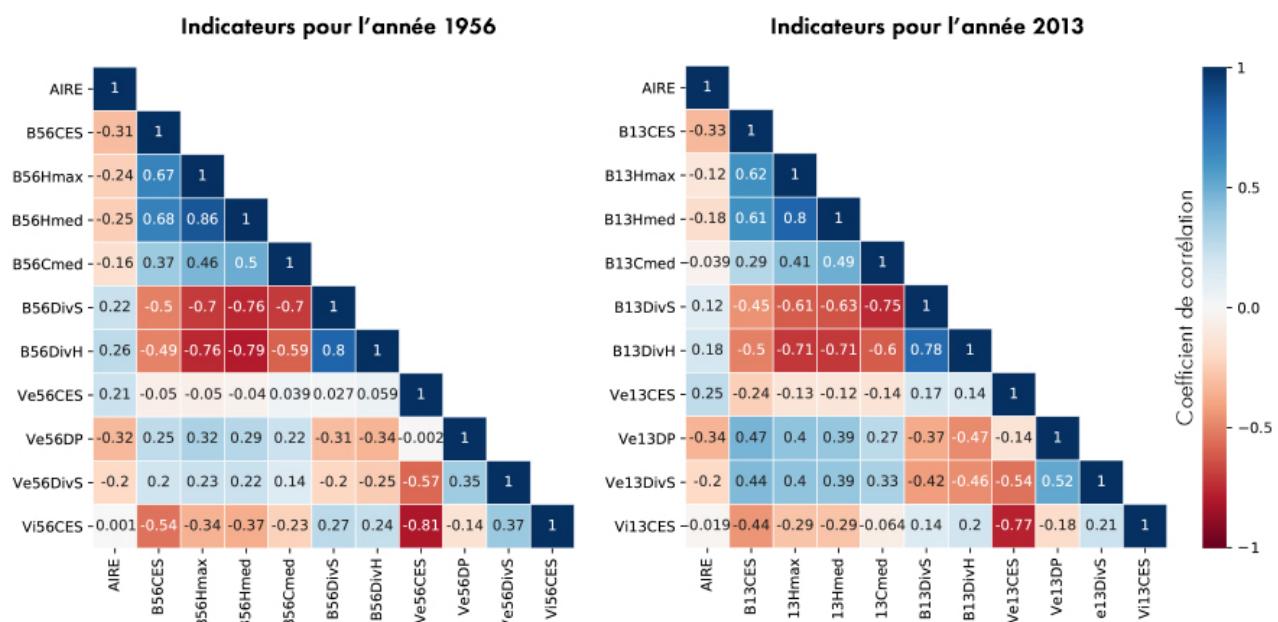


Figure 11 : Coefficients de corrélation entre les indicateurs mesurés pour 1956 et 2013 respectivement.

Une exploration plus détaillée de ces indicateurs est proposée au travers de 10 fiches, présentées ci-après. Différents commentaires suivent ces documents et permettent de cerner les dynamiques majeures qui s'organisent au sein du territoire.

Ces fiches sont ensuite complétées par une analyse, destinée à dégager des morphotypes et classes d'évolution, nous permettant de déterminer *a priori* le nombre de clusters optimal pour un partitionnement par k-moyennes.

Coefficient d'emprise au sol de la végétation

Nom du champ : VeYYCES

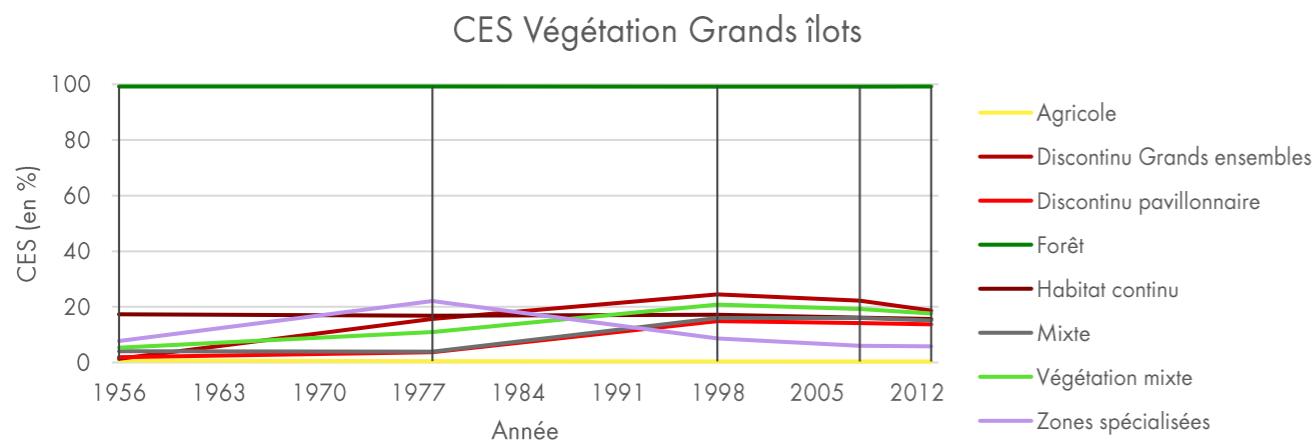
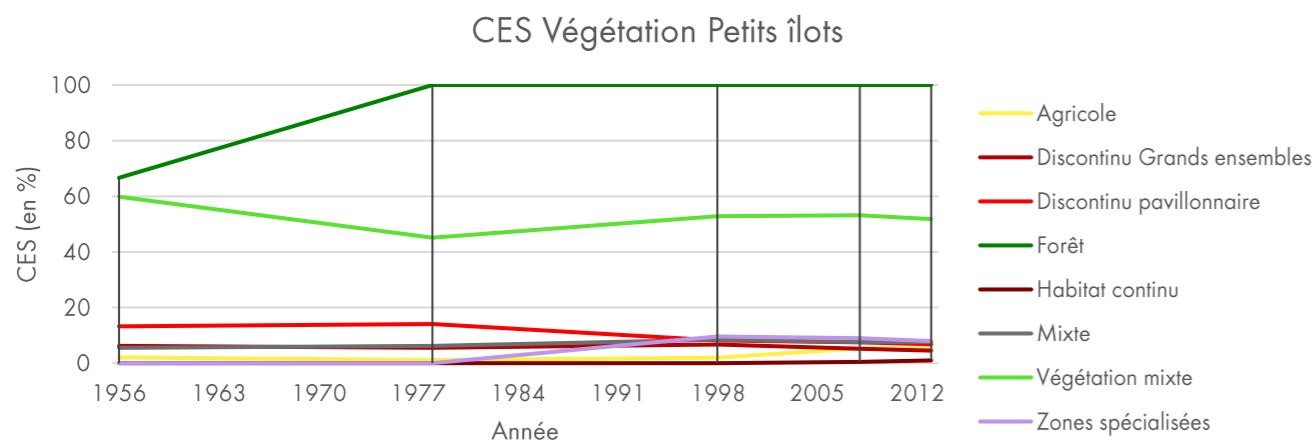
Unité : % (coefficients entre 0 et 100)

Définition : Surface au sol de la végétation rapportée à la surface de l'îlot.

Source : Cordeau et al., 2016

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après le calcul de la surface totale de végétation par îlot, qui est rapportée à la surface de l'îlot lui-même, et multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage d'emprise au sol.

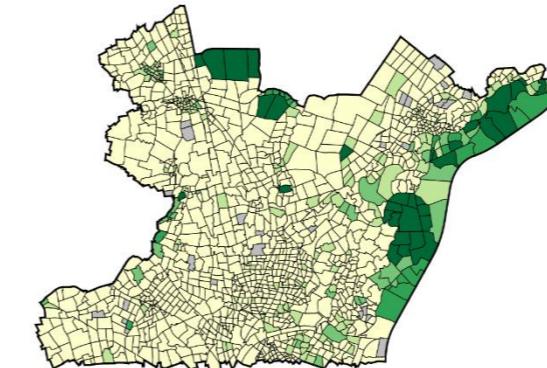
$$Ve_{CES} = \frac{\text{Surf Végétation}}{\text{Surface Ilot}} * 100$$



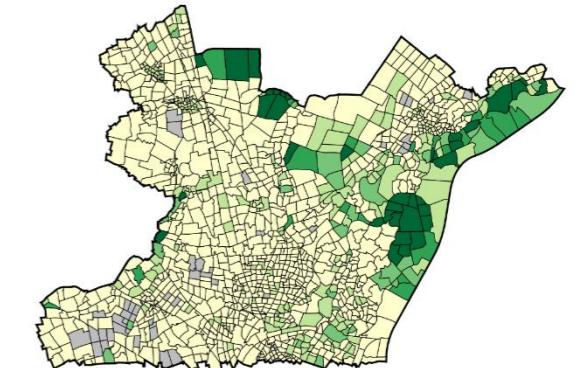
Végétation - Coefficient d'emprise au sol

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

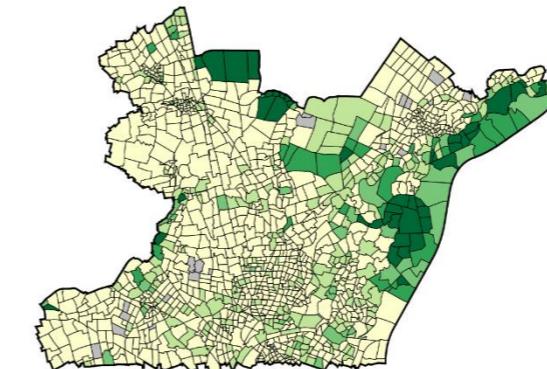
Année 1956



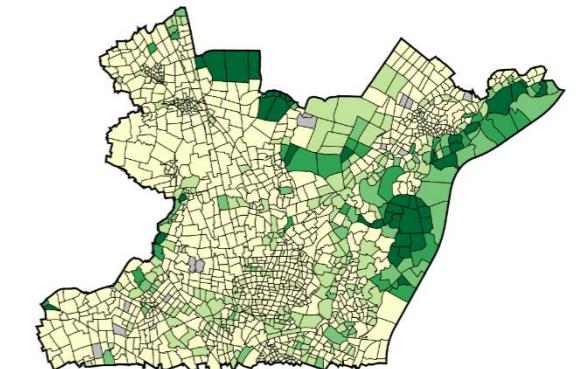
Année 1978



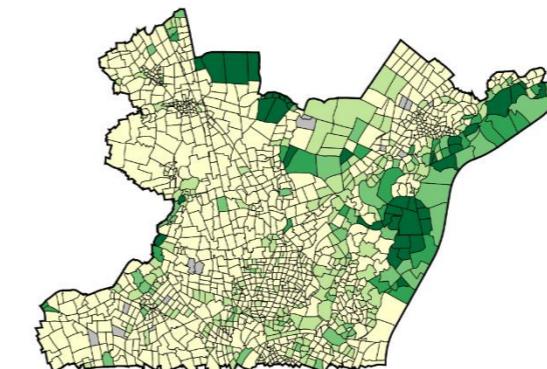
Année 1998



Année 2008



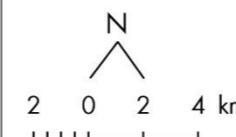
Année 2013



Coefficient d'emprise au sol (%)

Selon des intervalles égaux

Pas de végétation
0 - 20
20 - 40
40 - 60
60 - 80
80 - 100



Q. POTEREK, 2018.
Sources : EMS, LIVE.

Densité de patches de végétation

Nom du champ : VeYYDP

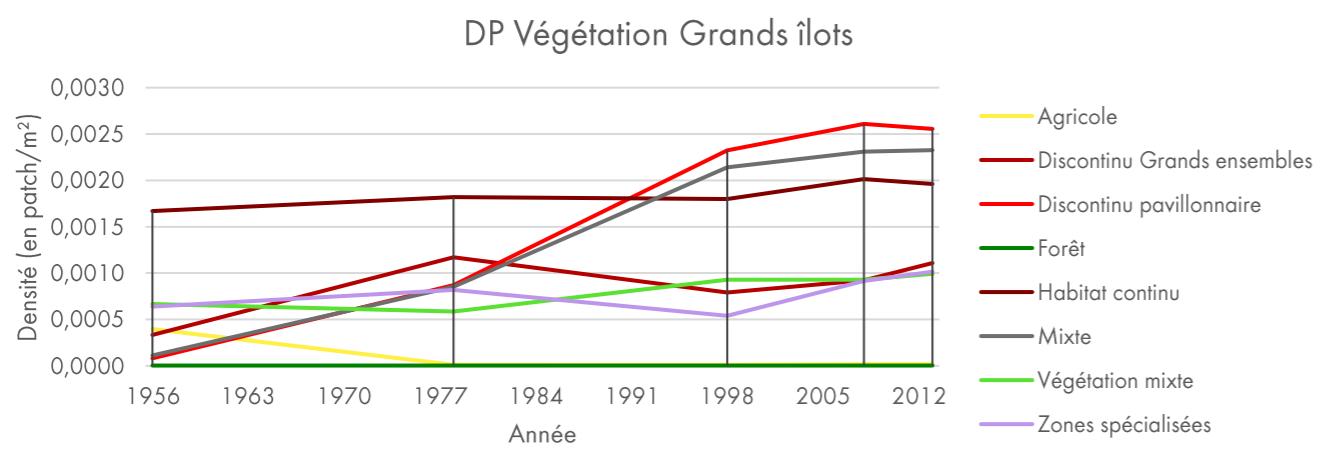
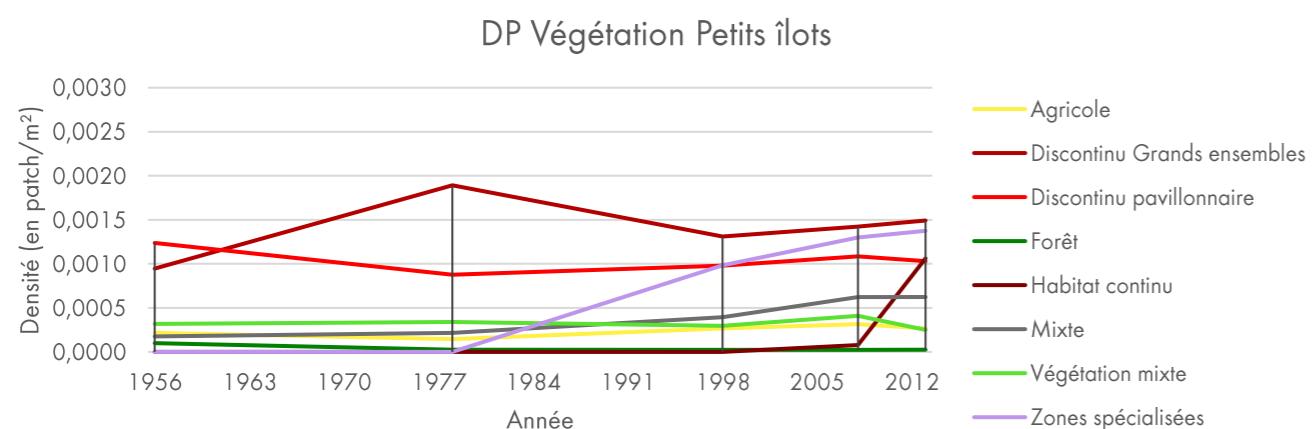
Unité : patch/m²

Définition : Nombre de patch (ou entité) de végétation rapporté à la surface de l'îlot.

Source : Medina-Kennedy, Poterek, Sindt

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après le dénombrement du nombre d'entités par îlot, rapporté à la surface de l'îlot lui-même.

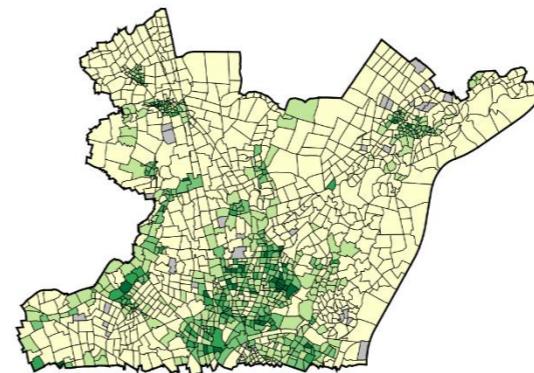
$$Ve_{DP} = \frac{Nb \text{ patch Végétation}}{\text{Surface Ilot}}$$



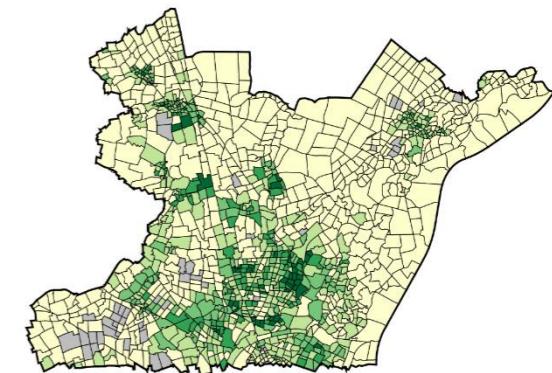
Végétation - Densité de patchs

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

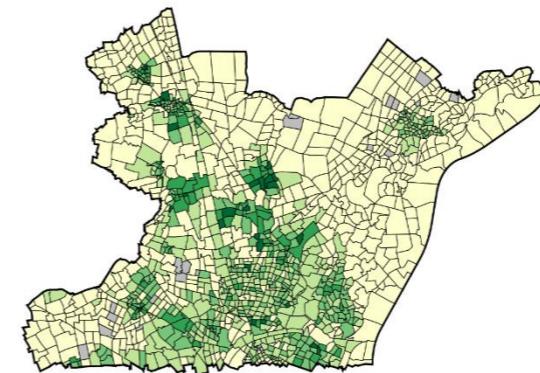
Année 1956



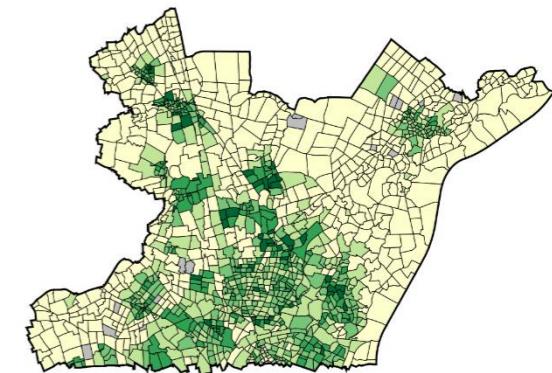
Année 1978



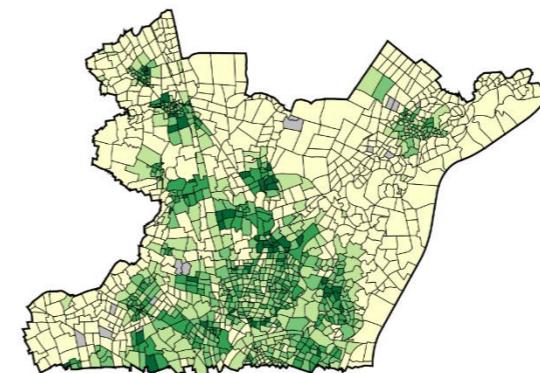
Année 1998



Année 2008



Année 2013



Densité de patchs (patchs/ha)

Selon la méthode de Jenks

0 - 5
5 - 12
12 - 18
18 - 27
27 - 75
Pas de végétation



Q. POTEREK, 2018.
Sources : EMS, LIVE.

Diversité de la surface de la végétation

Nom du champ : VeYYDIFS

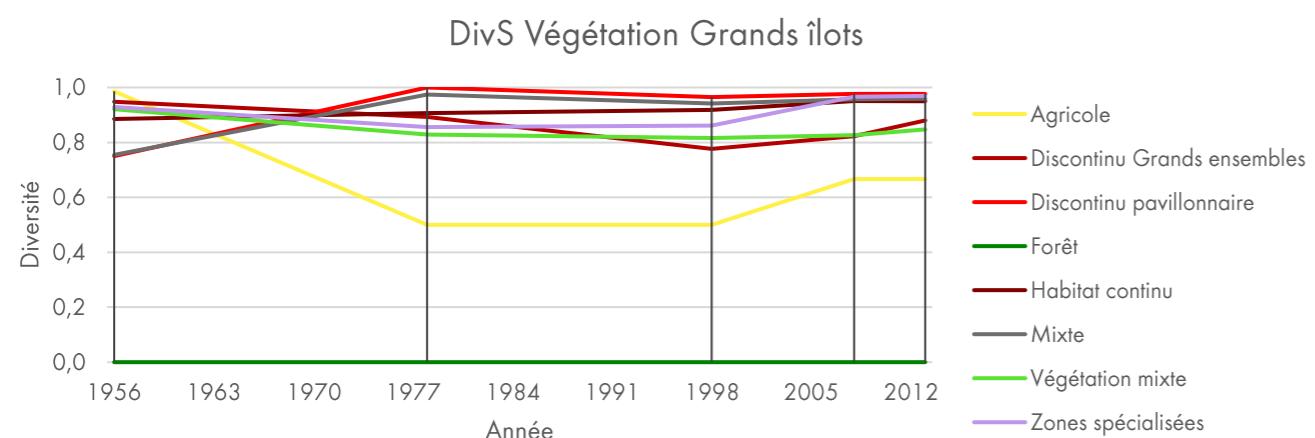
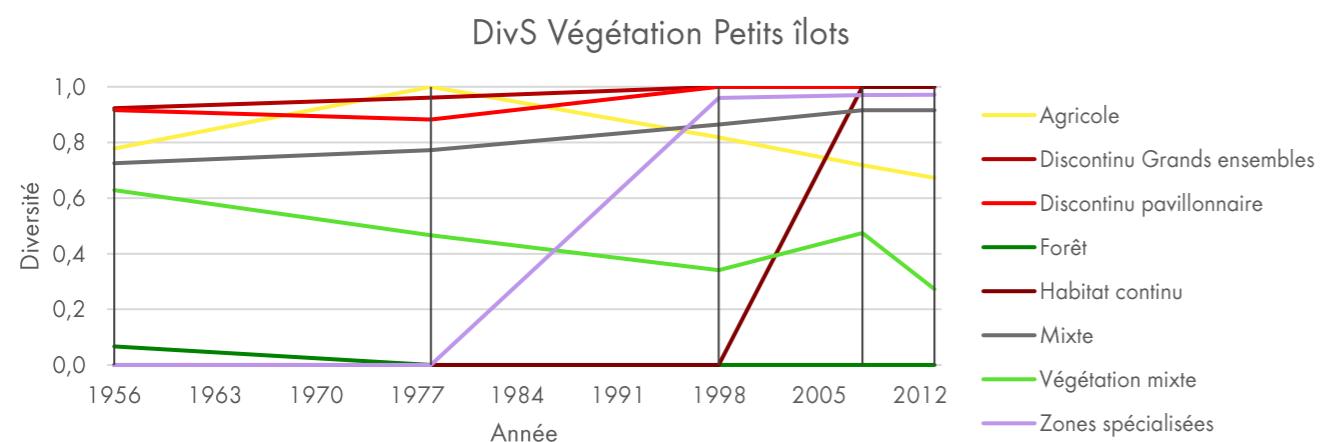
Unité : sans unité (compris entre 0 : très diversifié et 1 : peu diversifié)

Définition : Variabilité de la surface de végétation dans un îlot.

Source : Bourdic et al., 2012, Medina-Kennedy, Poterek, Sindt

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après calcul de la surface de chaque patch de végétation, classement de ces patchs dans une classe de surface et calcul de l'Indice de Simpson.

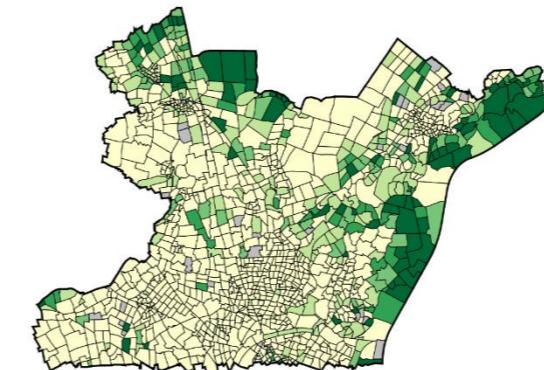
$$Ve_{DIVS} = \sum \frac{Ni(Ni - 1)}{N(N - 1)}$$



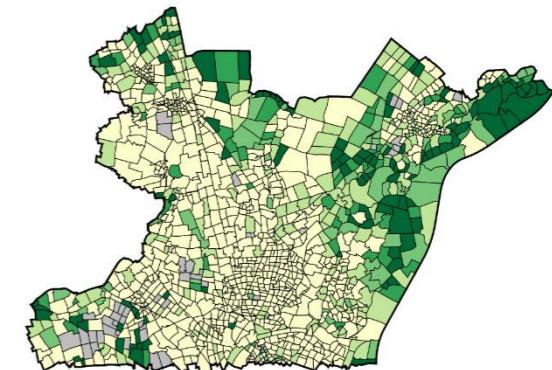
Végétation - Diversité de surfaces

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

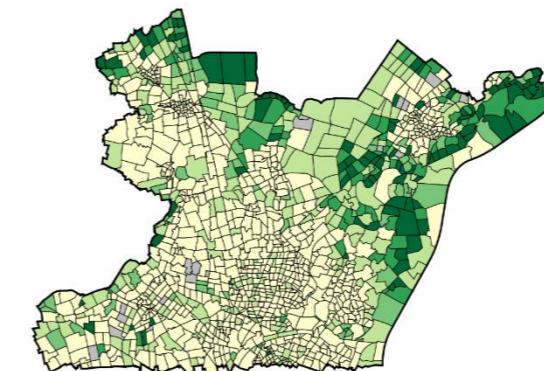
Année 1956



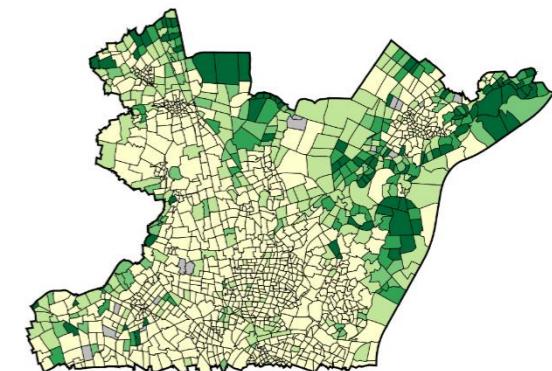
Année 1978



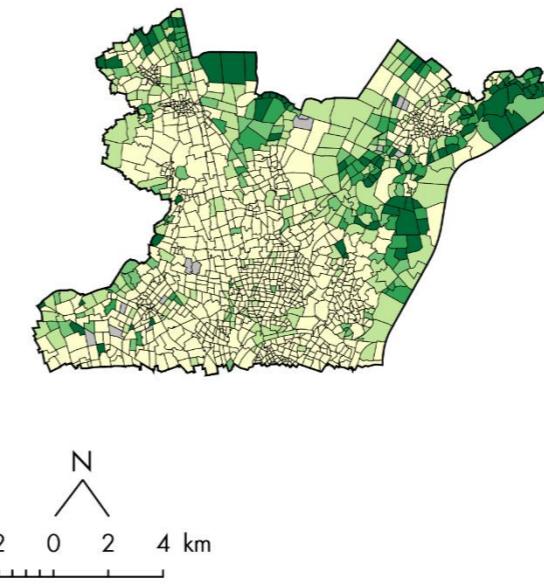
Année 1998



Année 2008

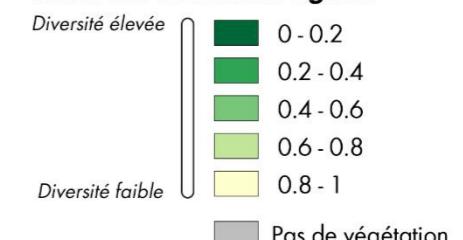


Année 2013



Diversité de surfaces

Selon des intervalles égaux



Q. POTEREK, 2018.
Sources : EMS, LIVE.

Coefficient d'emprise au sol du bâti

Nom du champ : BYYCES

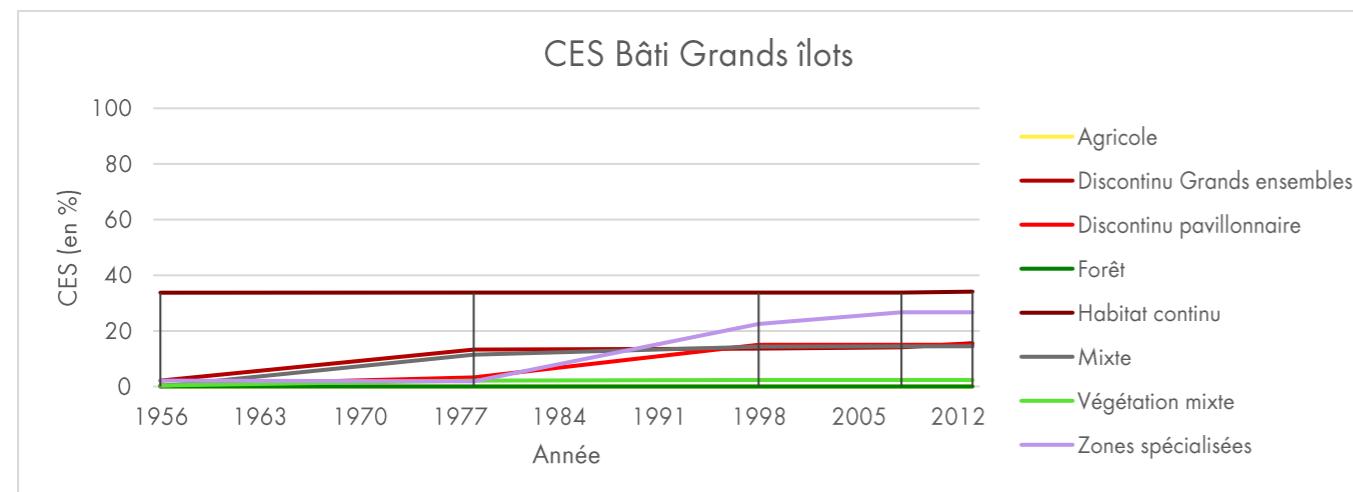
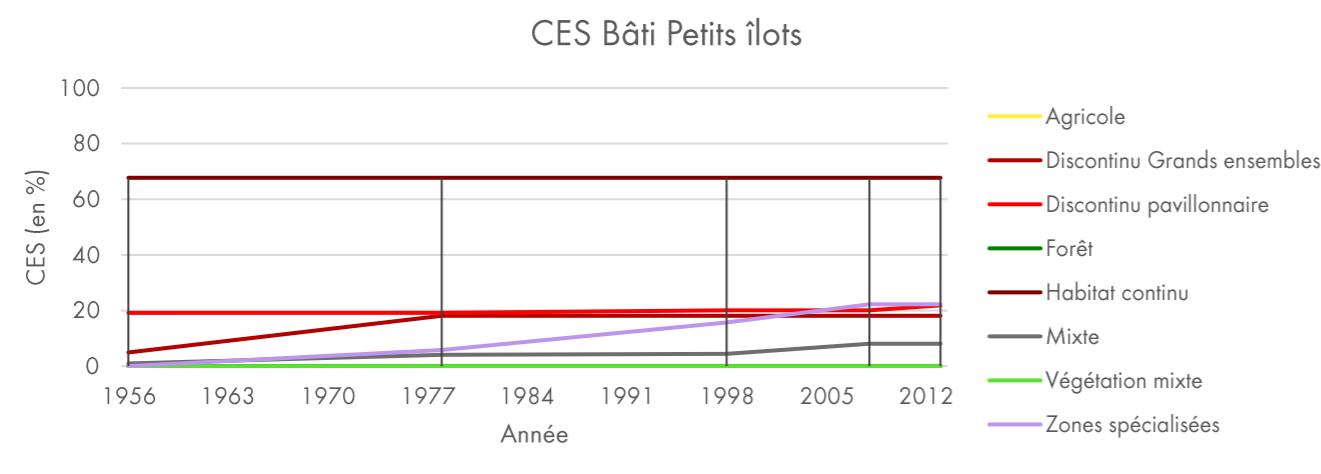
Unité : % (coefficient entre 0 et 100)

Définition : Surface au sol du bâti rapportée à la surface de l'îlot.

Source : Cordeau et al., 2016

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après le calcul de la surface totale de bâti par îlot, qui est rapportée à la surface de l'îlot lui-même, et multiplié par 100 pour obtenir un pourcentage d'emprise au sol.

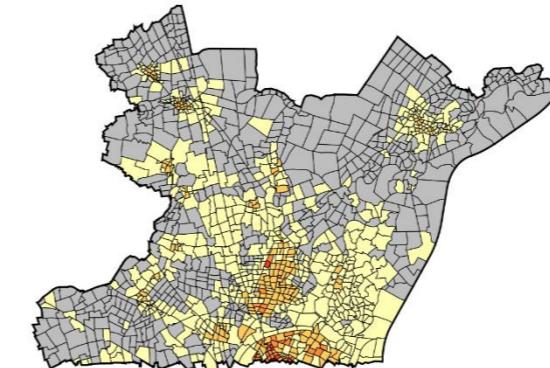
$$B_{CES} = \frac{\text{Surf Bâti}}{\text{Surface Ilot}} * 100$$



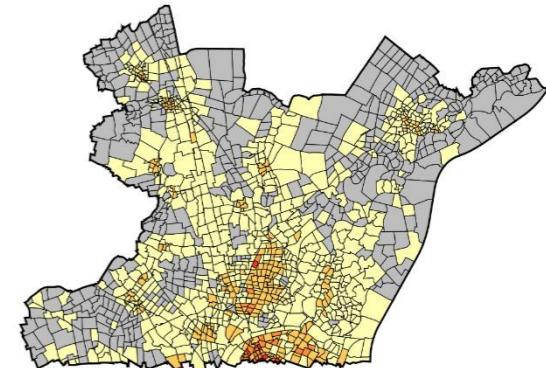
Bâti - Coefficient d'emprise au sol

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

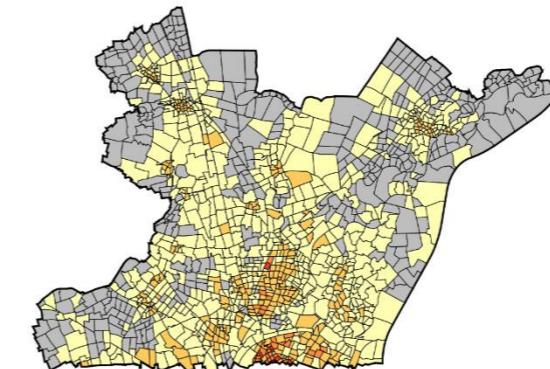
Année 1956



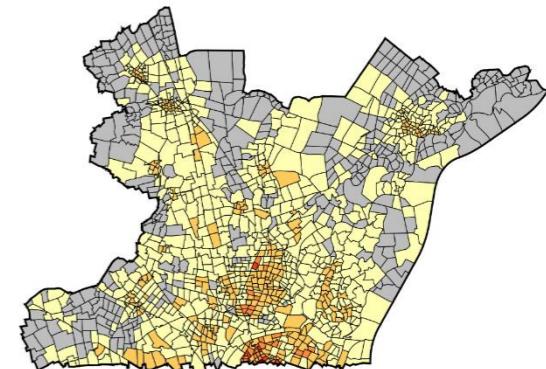
Année 1978



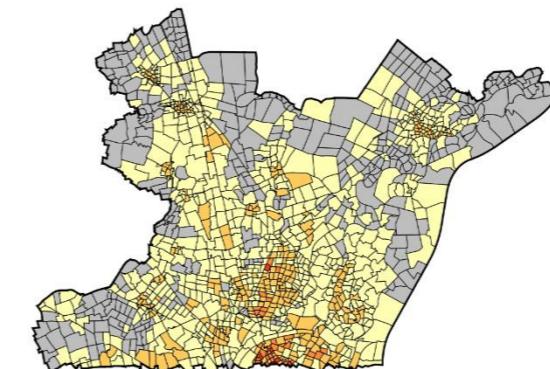
Année 1998



Année 2008



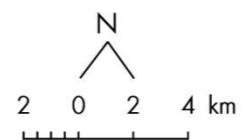
Année 2013



Coefficient d'emprise au sol (%)

Selon des intervalles égaux

Pas de bâti
0 - 20
20 - 40
40 - 60
60 - 80
80 - 100



Diversité de la hauteur du bâti

Nom du champ : BYYDIVH

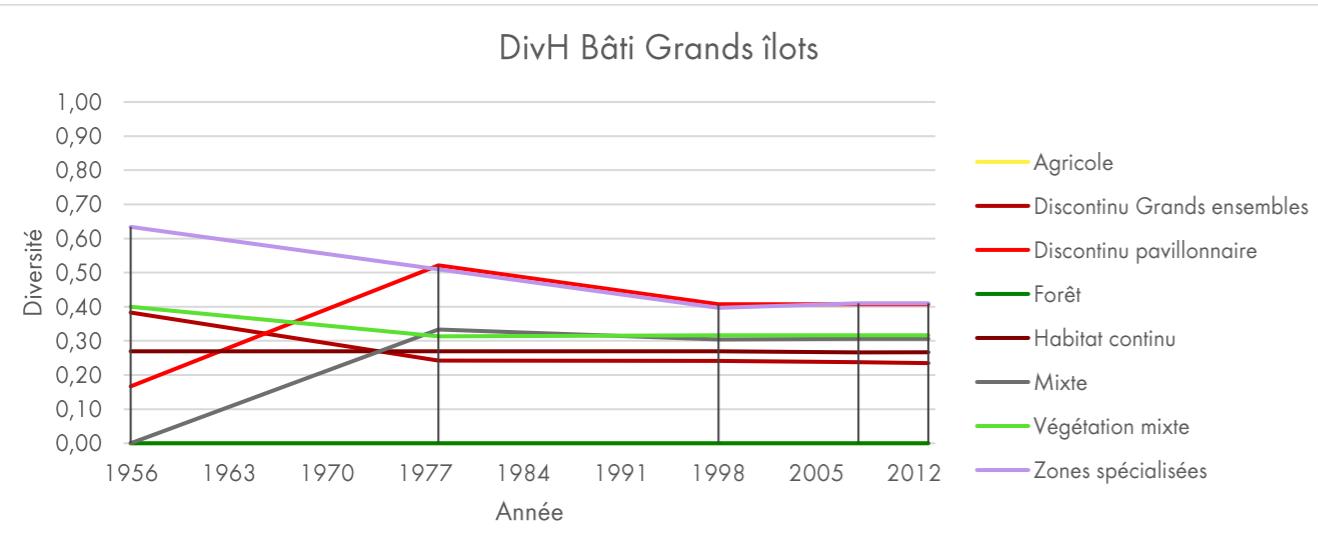
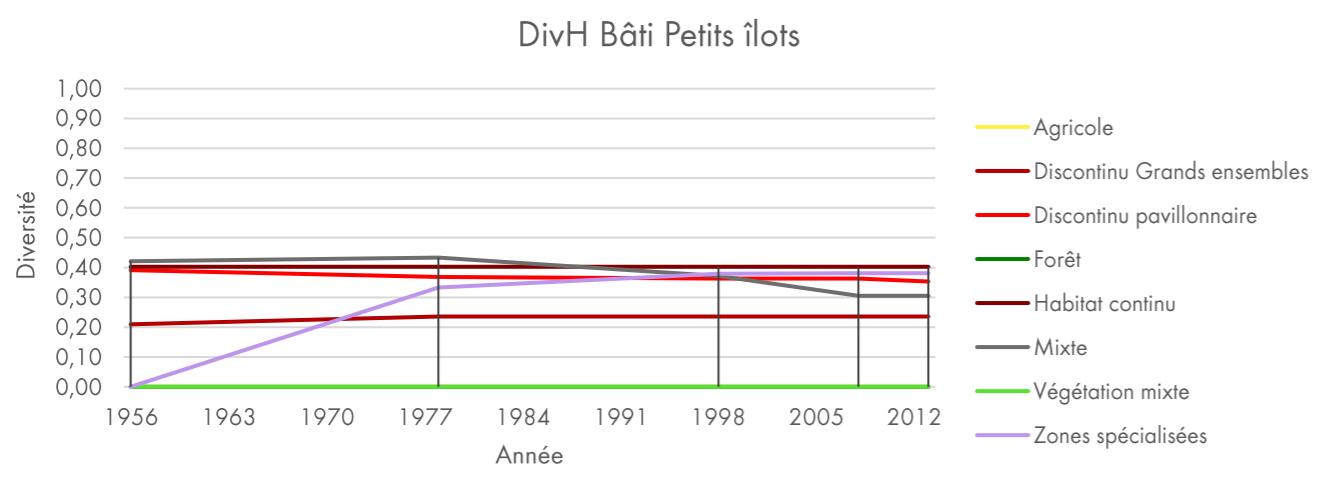
Unité : sans unité (compris entre 0 : très diversifié et 1 : peu diversifié)

Définition : Variabilité de la hauteur du bâti dans un îlot.

Source : Bourdic et al., 2012, Medina-Kennedy, Poterek, Sindt

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après calcul de la hauteur de chaque bâtiment, classement de ces bâtiments dans une classe de hauteur et calcul de l'Indice de Simpson.

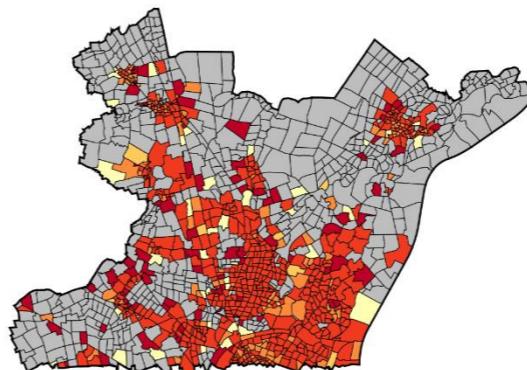
$$B_{DIVS} = \sum \frac{Ni(Ni - 1)}{N(N - 1)}$$



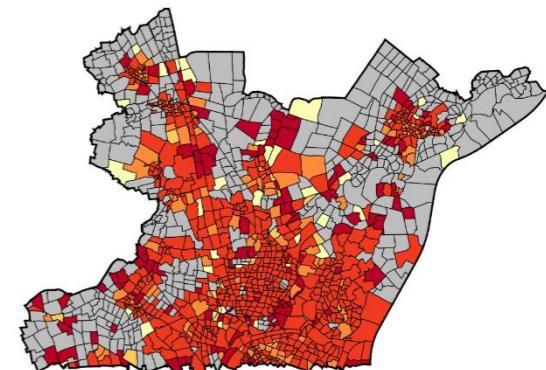
Bâti - Diversité de hauteurs

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

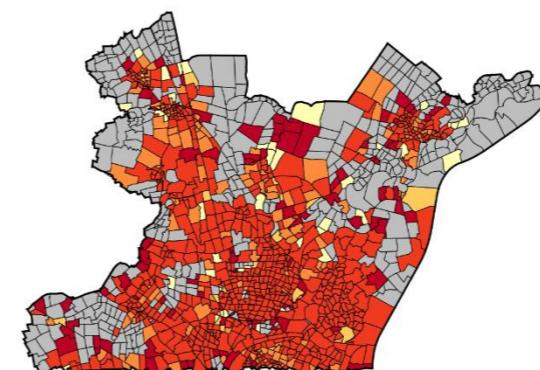
Année 1956



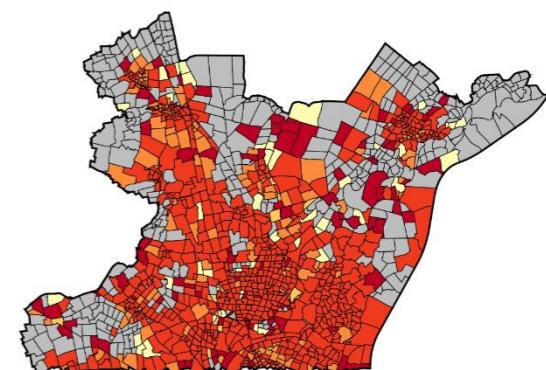
Année 1978



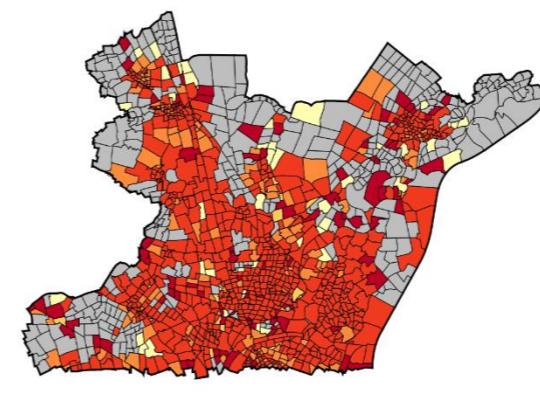
Année 1998



Année 2008

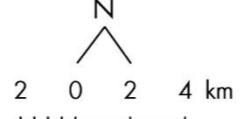
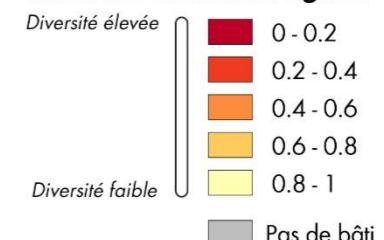


Année 2013



Diversité de hauteurs

Selon des intervalles égaux



Diversité de la surface du bâti

Nom du champ : BYYDIVS

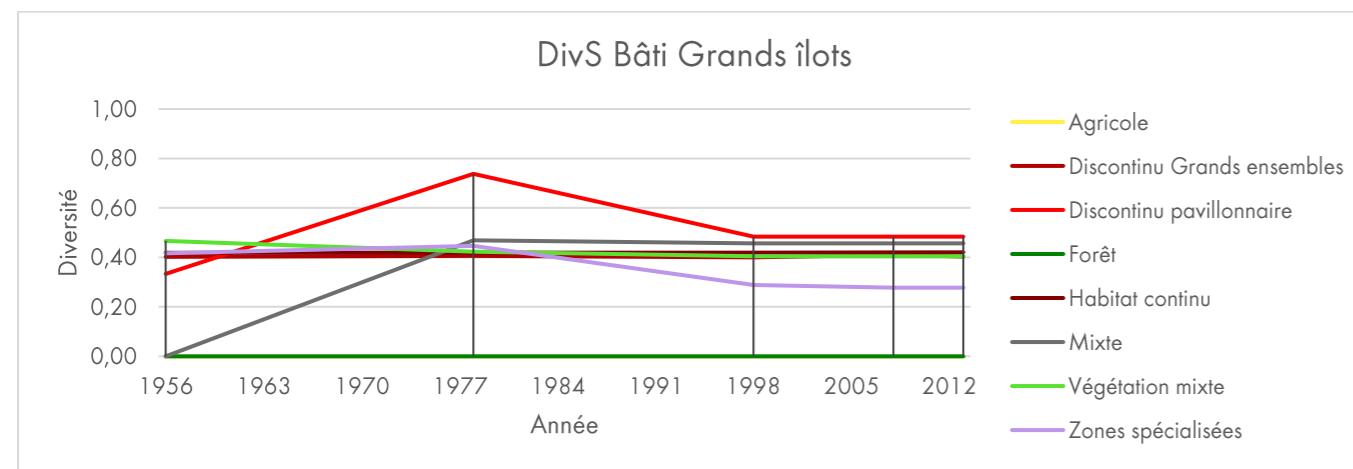
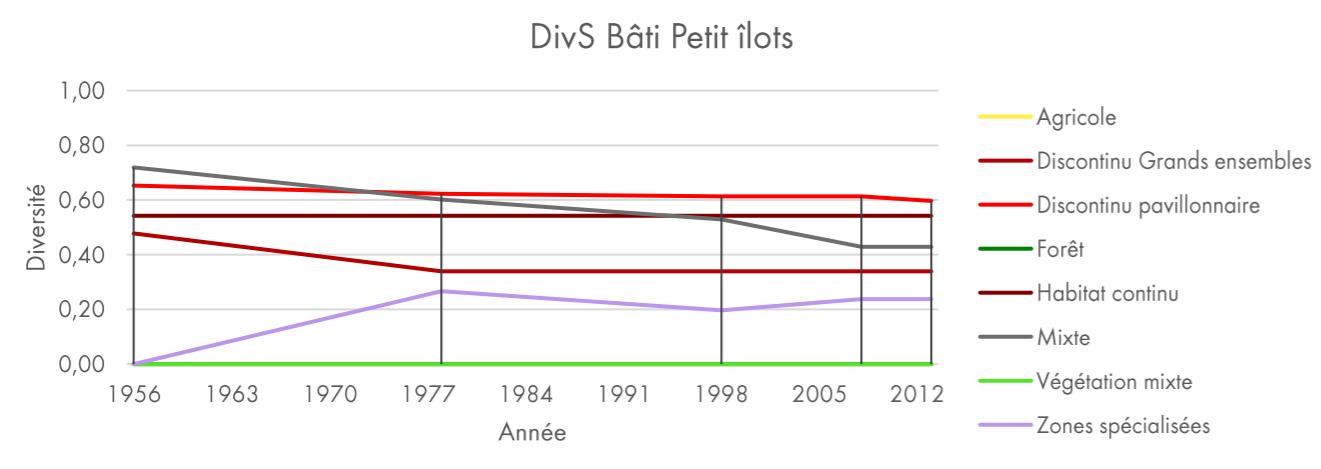
Unité : sans unité (compris entre 0 : très diversifié et 1 : peu diversifié)

Définition : Variabilité de la surface du bâti dans un îlot.

Source : Bourdic et al., 2012, Medina-Kennedy, Poterek, Sindt

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après calcul de la surface de chaque bâtiment, classement de ces bâtiments dans une classe de surface et calcul de l'Indice de Simpson.

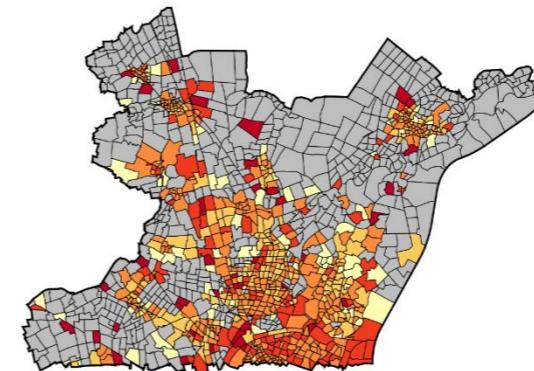
$$B_{DIVS} = \sum \frac{Ni(Ni - 1)}{N(N - 1)}$$



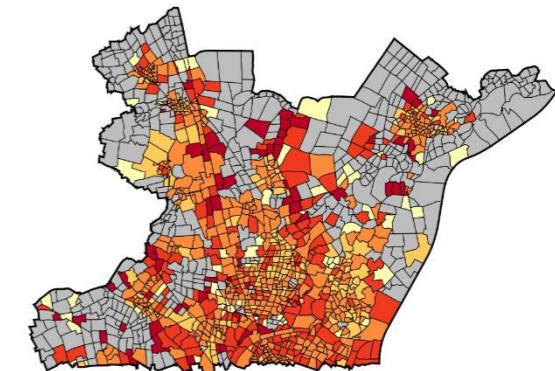
Bâti - Diversité de surfaces

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

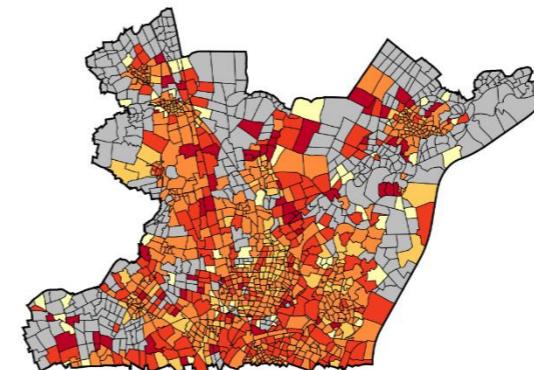
Année 1956



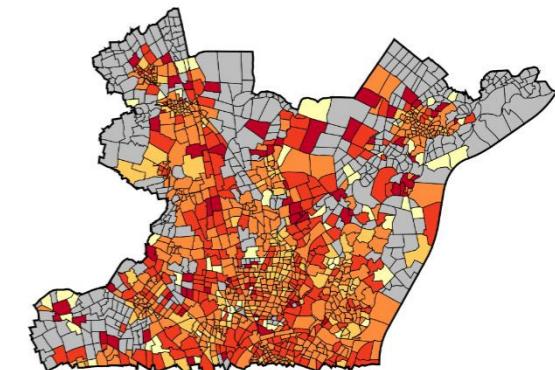
Année 1978



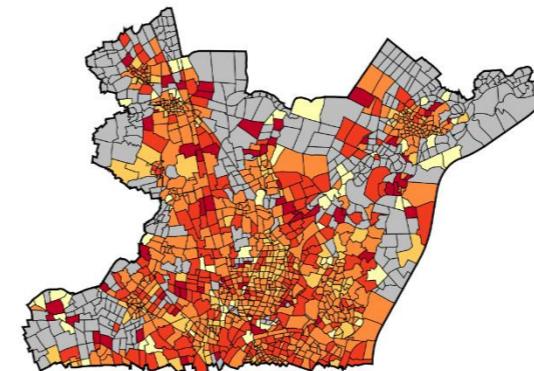
Année 1998



Année 2008

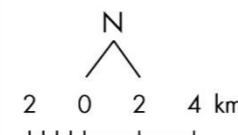
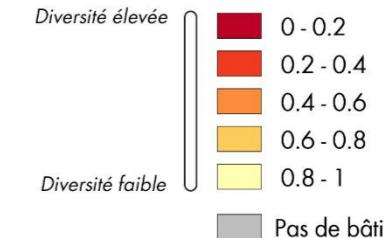


Année 2013



Diversité de surfaces

Selon des intervalles égaux



Compacité médiane du bâti

Nom du champ : BYYCMed

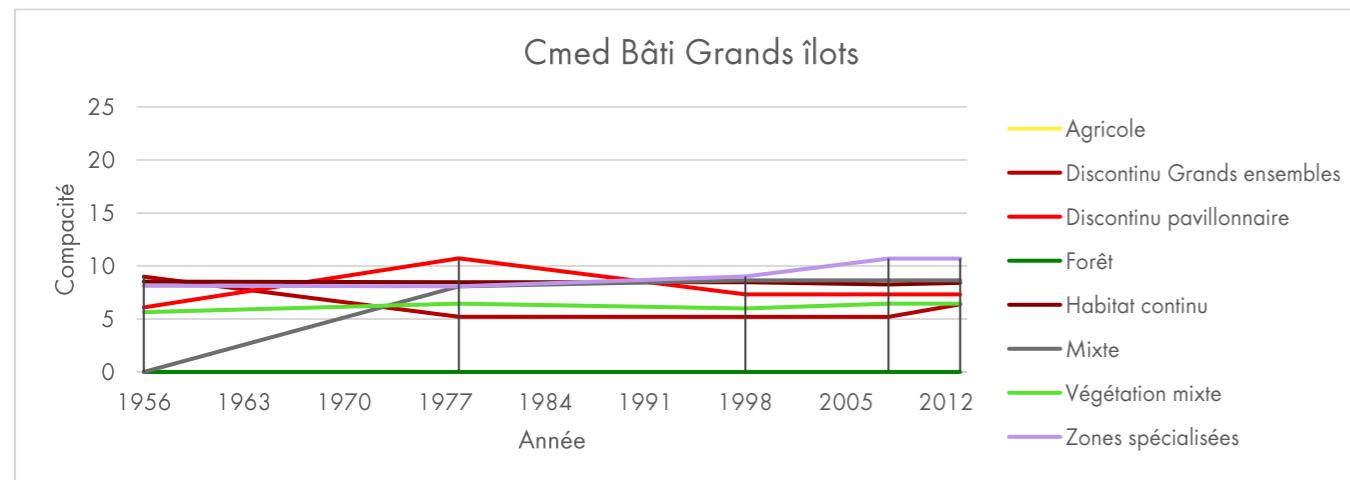
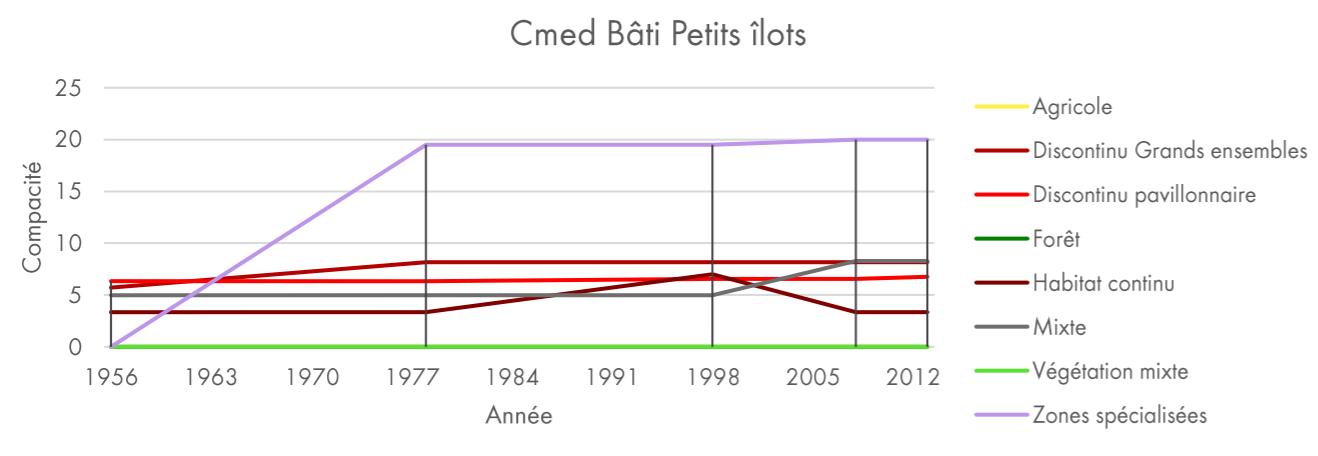
Unité : sans unité (échelle ouverte)

Définition : Médiane de la compacité du bâti obtenue avec le rapport entre la surface du bâtiment et son périmètre.

Source : Hermosilla et al, 2014

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après le calcul de la compacité de chaque bâtiment de chaque îlot, rapportée à la surface de l'îlot lui-même.

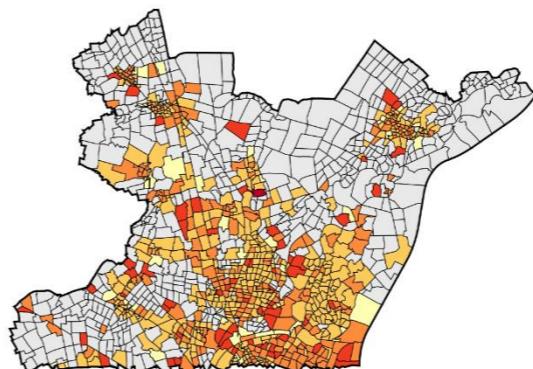
$$C = \frac{4 * \text{Surf Bâti}}{\text{Perimètre}}$$



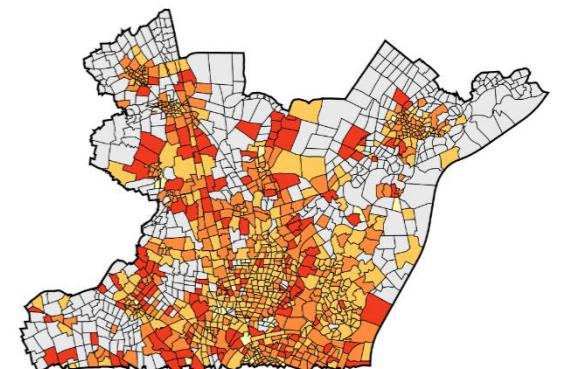
Bâti - Compacité médiane

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

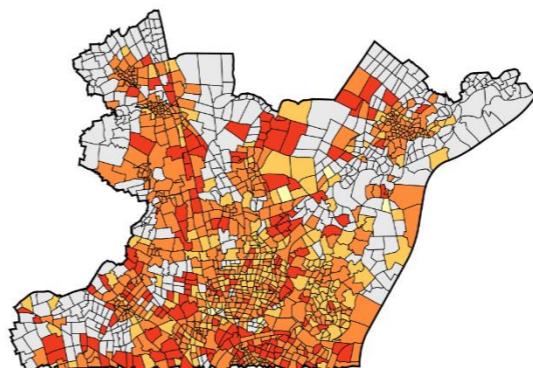
Année 1956



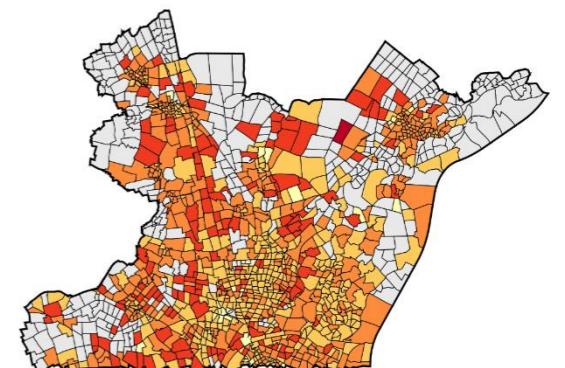
Année 1978



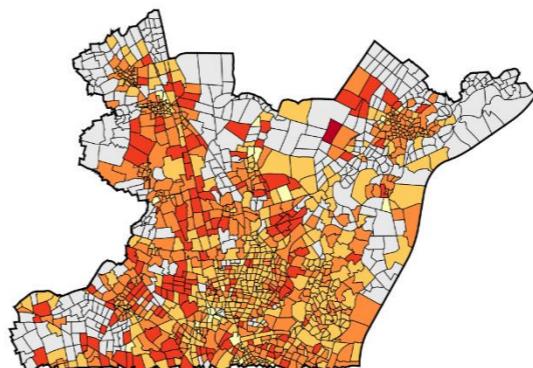
Année 1998



Année 2008



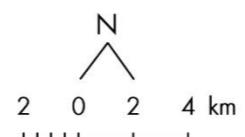
Année 2013



Compacité médiane du bâti

Selon la méthode de Jenks

Pas de bâti
0 - 2
2 - 6
6 - 10
10 - 56
56 - 135



A. SINDT, 2018.

Sources : EMS, LIVE.

Hauteur médiane du bâti

Nom du champ : BYYHMed

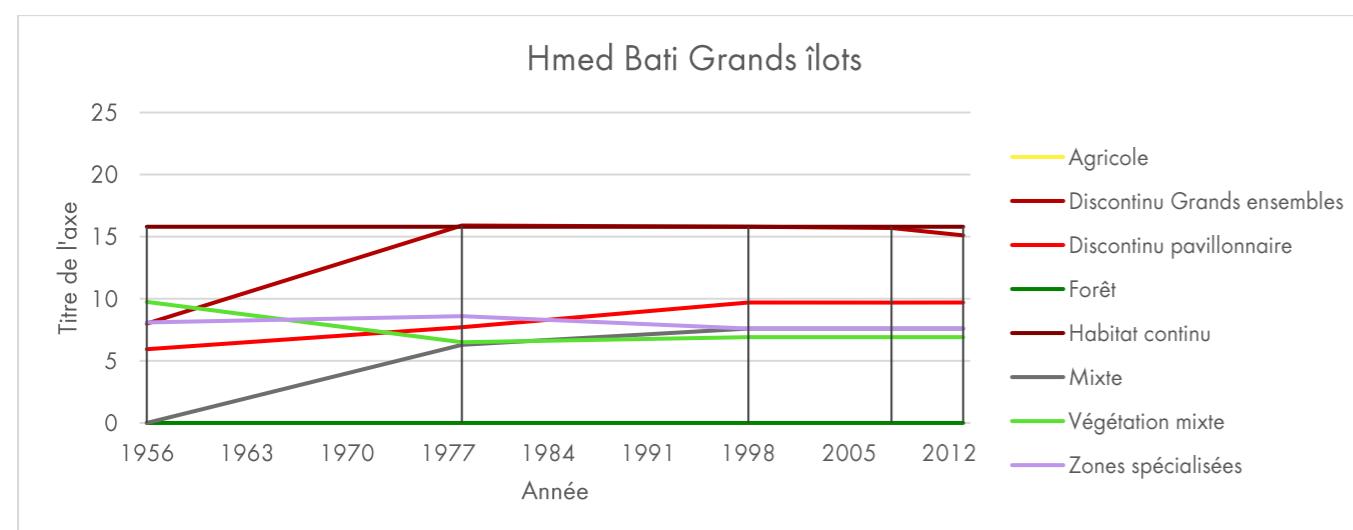
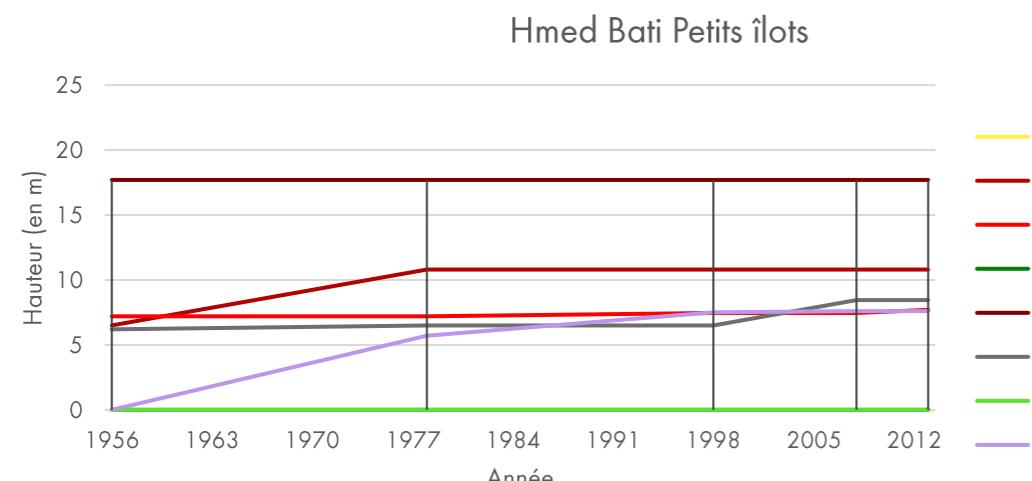
Unité : Mètres

Définition : Médiane de la hauteur du bâti de chaque îlot.

Source : Hermosilla et al, 2014, Medina-Kennedy, Poterek, Sindt

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après calcul ou estimation de la hauteur de chaque bâtiment et du calcul de la médiane de la hauteur du bâti dans chaque îlot.

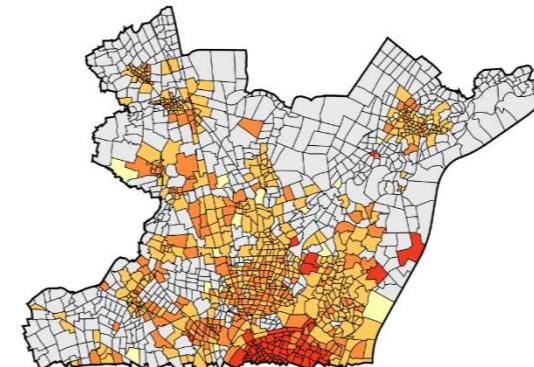
$$B_{HMed} = med(H)$$



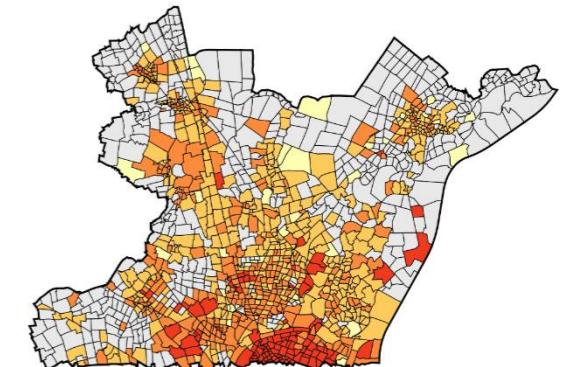
Bâti - Hauteur médiane

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

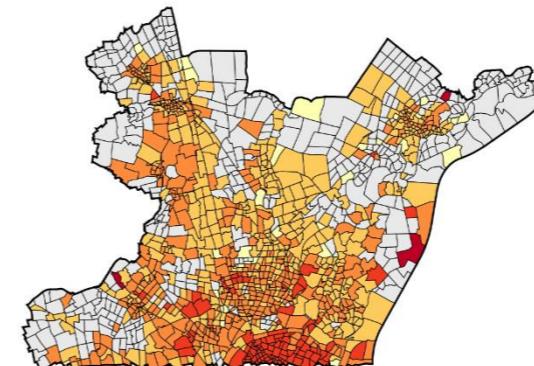
Année 1956



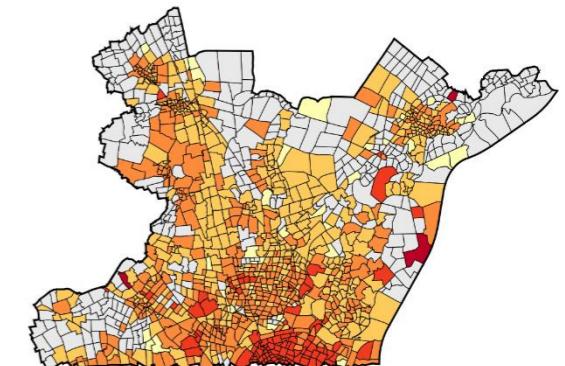
Année 1978



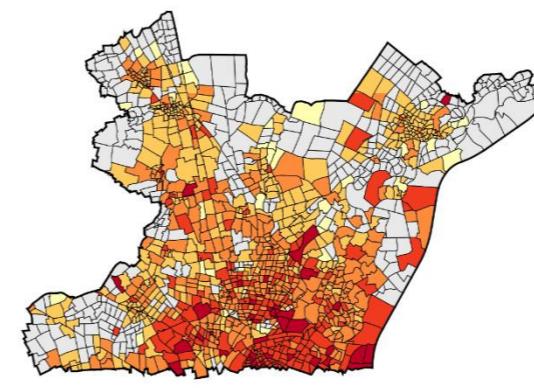
Année 1998



Année 2008



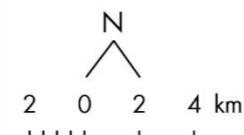
Année 2013



Hauteur médiane du bâti (m)

Selon la méthode de Jenks

Pas de bâti
0 - 6
6 - 15
15 - 24
24 - 40
40 - 73



A. SINDT, 2018.

Sources : EMS, LIVE.

Hauteur maximale du bâti

Nom du champ : BYYMax

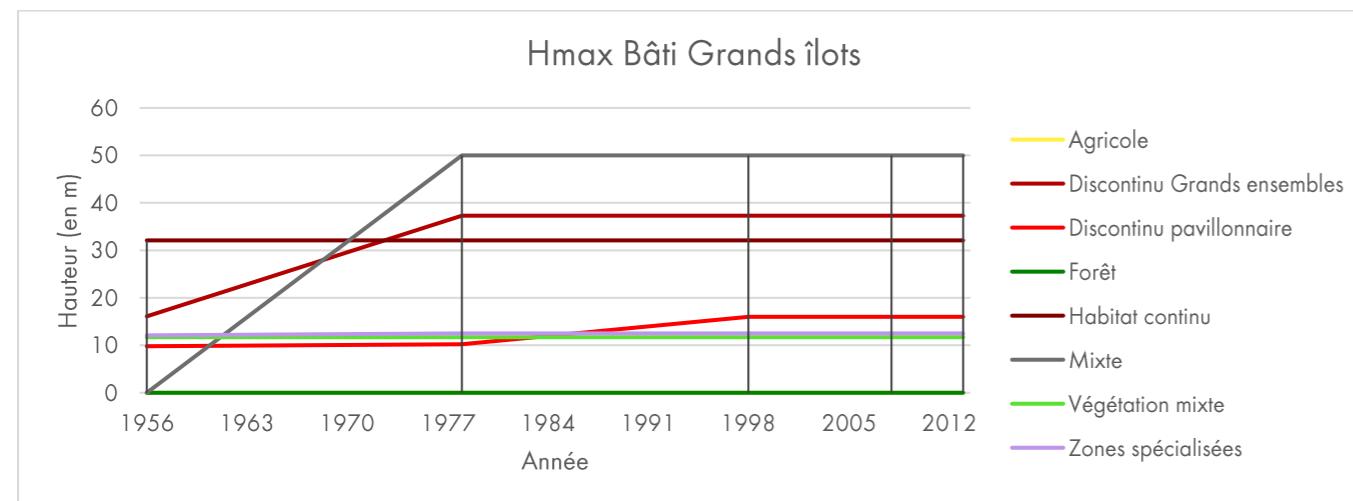
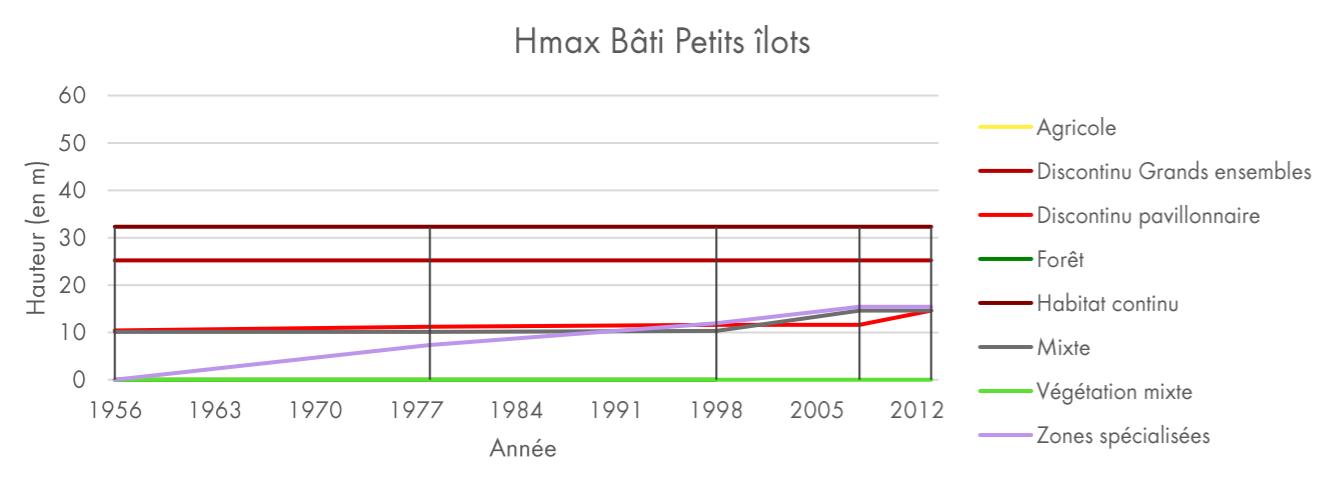
Unité : Mètres

Définition : Hauteur du bâtiment le plus haut de chaque îlot.

Source : Hermosilla et al., 2014

Méthodologie : Cet indicateur est obtenu après calcul ou estimation de la hauteur de chaque bâtiment et l'identification de la hauteur du bâtiment le plus haut de chaque îlot.

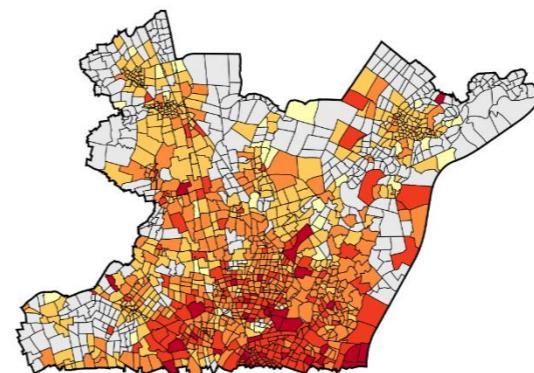
$$B_{HMax} = \max(H)$$



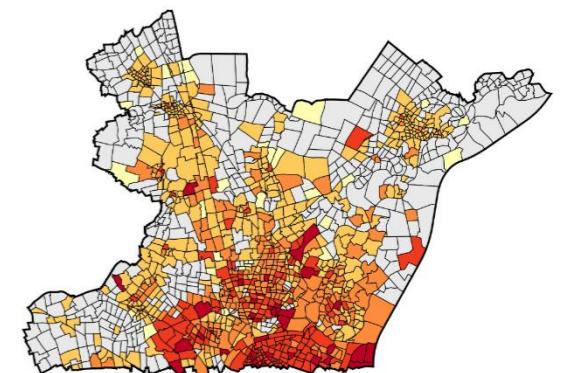
Bâti - Hauteur maximale

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

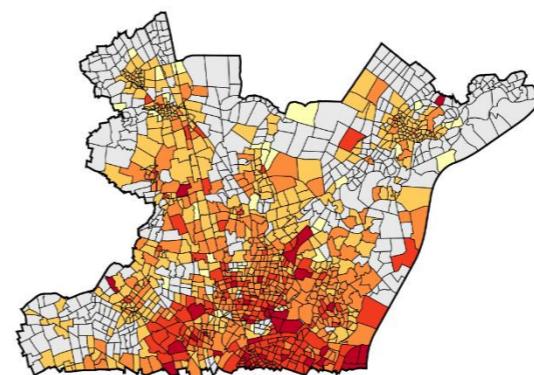
Année 1956



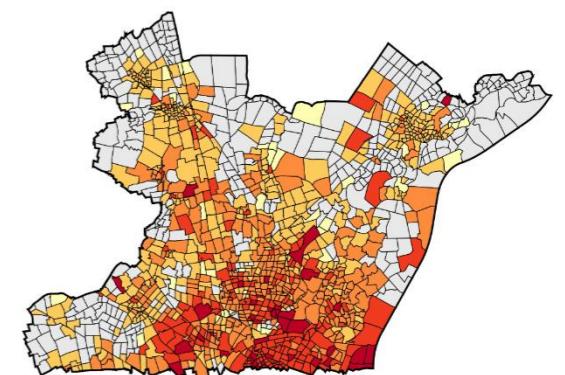
Année 1978



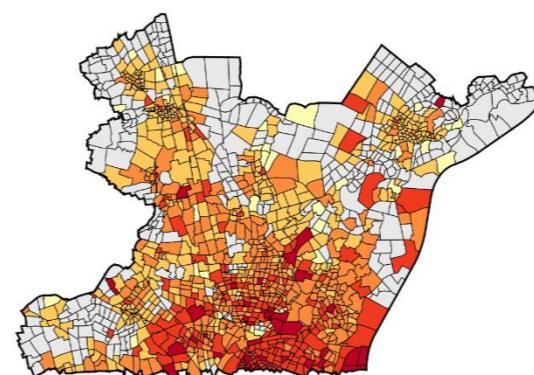
Année 1998



Année 2008



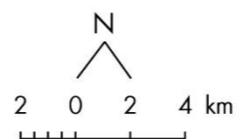
Année 2013



Hauteur maximale du bâti (m)

Selon la méthode de Jenks

Pas de bâti
0 - 6
6 - 15
15 - 24
24 - 40
40 - 73



Coefficient d'emprise au sol du vide

Nom du champ : ViYYCES

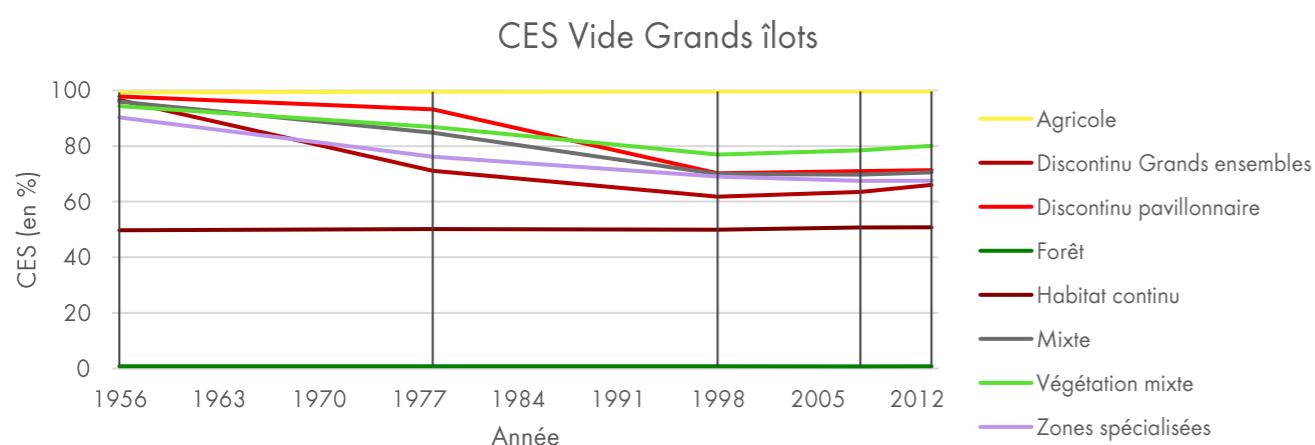
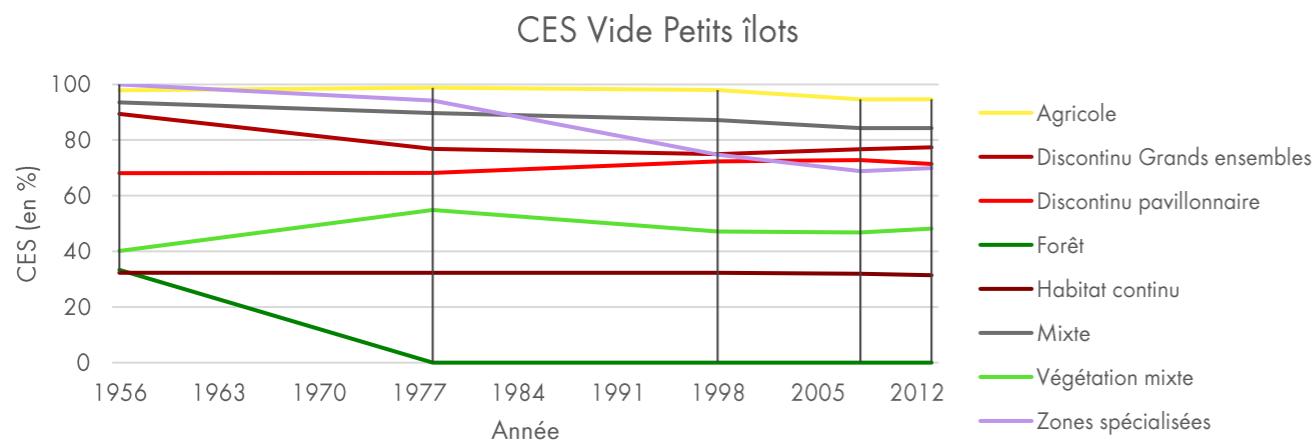
Unité : % (coefficient entre 0 et 100)

Définition : Surface au sol du vide rapportée à la surface de l'îlot.

Source : Cordeau et al., 2016

Méthodologie : Après une intersection entre la couche du vide et la couche des îlots, calcul du rapport entre la surface totale de vide et la surface totale de l'îlot à l'aide d'un résumé statistique.

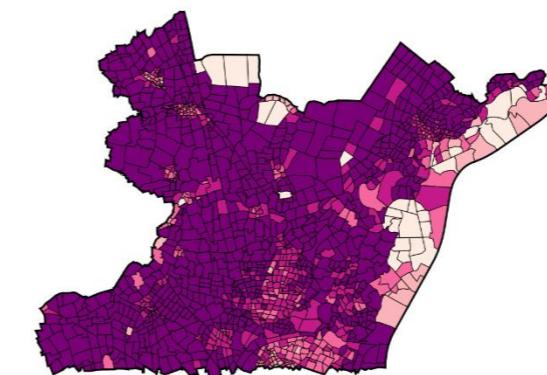
$$Ve_{CES} = \frac{\text{Surf Vide}}{\text{Surface Ilot}} * 100$$



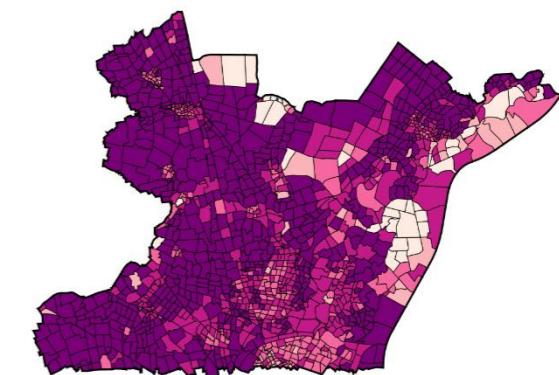
Vide - Coefficient d'emprise au sol

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

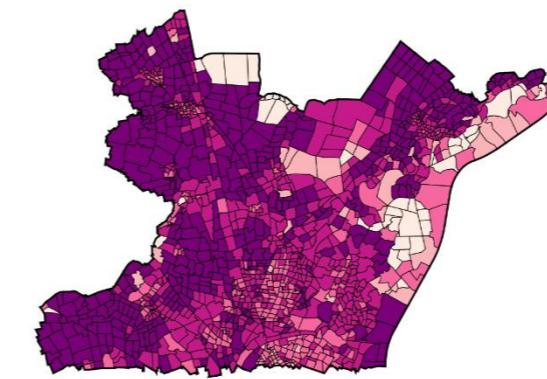
Année 1956



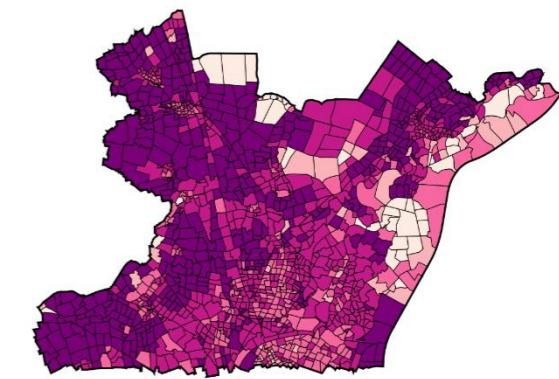
Année 1978



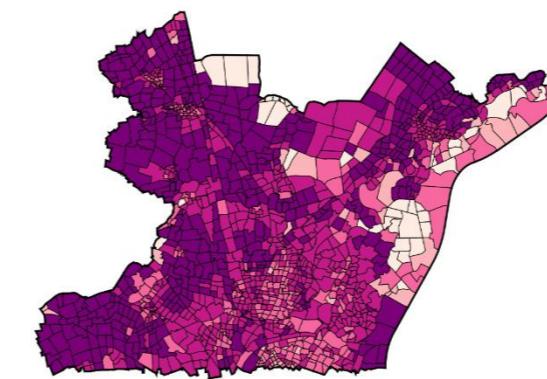
Année 1998



Année 2008



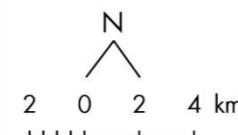
Année 2013



Coefficient d'emprise au sol (%)

Selon des intervalles égaux

0 - 20
20 - 40
40 - 60
60 - 80
80 - 100



A. SINDT, 2018.

Sources : EMS, LIVE.

4.2.1. Analyse des indicateurs calculés pour la végétation arborée

A l'aide du **coefficent d'emprise au sol de la végétation**, il est possible de cerner plusieurs dynamiques entre 1956 et 2013, identifiables notamment sur les profils : fermeture, fragmentation ou maintien dans les espaces naturels forestiers et semi-naturels. Dans l'urbain, des dynamiques croisées sont mises en évidence, avec un léger recul de l'arboré pour les îlots-témoins de petite taille. Pour les grandes entités, une augmentation notable de la part de la végétation est au contraire soulignée. Des changements sont également visibles dans les zones spécialisées, avec une très évolution variable. Spatialement, le CES fait particulièrement ressortir les zones forestières et les autres unités dans lesquels s'organisent par exemple haies ou bosquets. On note de 1956 à 2013 une augmentation de la part de végétation dans les espaces urbains en périphérie du centre, principalement dans les zones spécialisées et d'habitat discontinu.

Concernant la **densité de patchs pour la végétation**, la dynamique est variable dans les petits îlots, avec tout de même une légère tendance à l'augmentation entre 1956 et 2013. Dans les grands îlots au contraire, une dynamique évidente est visible avec une augmentation de la densité de patchs dans les zones d'habitat discontinu et tissus mixtes à partir de 1978, traduisant la mise en place d'une végétation arborée plus isolée. On remarque également un recul des éléments arborés isolés dans les espaces agricoles, ce qui peut correspondre à la disparition de vergers, qui étaient nombreux au début de la période d'étude par exemple. Spatialement, la densité de patchs fait ressortir l'urbain et les zones artificialisées de manière générale, avec des valeurs plus importantes dans ces espaces. Elle permet même de discriminer les lieux centraux, caractérisés par une densité de patchs faible à moyenne, des espaces périphériques où la présence d'éléments isolés est plus importante. En termes d'évolution entre 1956 et 2013, la densité de patchs suit la dynamique d'étalement urbain de l'EMS, avec une stabilisation progressive à partir du début des années 2000.

Pour la **diversité de surface des éléments arborés**, nous pouvons constater des valeurs proches de 1 dans l'urbain, traduisant là un peuplement peu hétérogène, assimilé à des arbres d'alignement compte-tenu des observations faites à partir des indicateurs précédents. Pour les espaces qui ont connu une artificialisation entre 1956 et 2013, nous remarquons une diminution drastique de la diversité des surfaces arborées, tandis que la tendance inverse est observée pour les espaces semi-naturels. Spatialement, les espaces agricoles, mixtes et forestiers se diversifient de plus en plus en termes de surface de végétation, surtout à partir des années 1990, témoignant là de dynamiques de fragmentation ou d'avancée de l'arboré.

4.2.2. Analyse des indicateurs calculés pour le bâti

Le **coefficent d'emprise au sol du bâti** est constant dans l'habitat continu, traduisant l'absence d'un processus de densification dans ces espaces. Pour l'habitat discontinu et les zones spécialisées, nous pouvons noter une artificialisation progressive à partir des années 1970, mais les résultats ne permettent pas d'assurer qu'il s'agit d'étalement ou de densification. Pour certains types d'habitat, une dynamique plus tardive se dégage à partir des années 1990. Ces deux constats permettent de mettre en évidence deux principales périodes d'artificialisation, qui correspondent aux années 1970 et 1990, comme souligné par Bessy-Pietri (2000). Spatialement, nous remarquons un nombre croissant d'îlots urbanisés entre 1956 et 2013. Cela permet de mettre en évidence la dynamique d'étalement urbain avec l'apparition de franges successives depuis les années 1970. Cela fait également ressortir les centres denses et centres-bourgs où le coefficient d'emprise au sol sont les plus élevés (>60%) mais également les zones spécialisées ou d'artificialisation tardive où sa valeur est moyenne (~40%).

Concernant la **diversité de la hauteur du bâti**, les dynamiques sont proches avec une diversité élevée à moyenne. Cet indicateur permet faire ressortir la dichotomie urbain/non urbain, mais aussi les franges générées par la production urbaine.

La **diversité de la surface du bâti** possède des dynamiques proches de celle des hauteurs, avec une diversité faible à moyenne pour les petits îlots témoins, et moyenne pour les grands. Cet indicateur fait particulièrement ressortir les tissus mixtes et espaces spécialisés, pour lesquels la diversité se situe dans la classe 0.2-0.4.

La **compacité médiane du bâti** est relativement proche pour les différentes classes d'habitat, de l'ordre de 5, ce qui traduit une forme relativement proche de celle d'un cercle. Nous pouvons noter que la compacité est plus élevée pour les zones spécialisées, ce qui laisse penser que le bâti qui s'y trouve possède une forme plus allongée. Cet indicateur permet de faire ressortir les zones spécialisées dont les compacités sont élevées, l'Espace Européen de l'Entreprise par exemple, mais aussi les îlots pavillonnaires, qui enregistrent quant à eux de faibles valeurs.

La **hauteur médiane du bâti** a tendance à augmenter entre 1956 et 1978, puis à se stabiliser pour les grands ensembles et les zones spécialisées. Dans les zones d'habitat, continu plus particulièrement, la hauteur médiane est élevée et reste constante. Dans les zones pavillonnaires, nous pouvons noter qu'elle est moins élevée mais se maintient là-aussi. Spatialement, cet indicateur met en exergue le centre ancien et les grands ensembles avec des valeurs élevées, puis souligne l'artificialisation des années 1970, caractérisée par la mise en place d'un habitat discontinu type pavillonnaire, pour lequel les hauteurs sont plus faibles.

La variation de la **hauteur maximale du bâti** suit globalement la même dynamique que celle de la hauteur médiane. Elle est cependant plus discriminante pour les différentes types de bâti : grands ensembles, pavillonnaires et continu dense. Elle met également en évidence le continuum urbain-rural, qui connaît peu d'évolutions.

4.2.3. Analyse des indicateurs calculés pour le vide

Le **coefficient d'emprise au sol** du vide connaît une diminution pour tous les espaces urbains, principalement entre 1978 et 1998. Nous ne notons aucune évolution pour le centre ancien, et une légère diminution pour l'agricole. Spatialement, cet indicateur permet de mettre en évidence les espaces destinés à la production agricole et complètement ouverts, les espaces forestiers qui sont complètement fermés, puis l'urbain en position intermédiaire. Parmi les espaces artificialisés, une dichotomie entre le centre et la périphérie se dégage, caractérisés respectivement par des quantités de vide faible et moyenne.

4.3. Définition d'une typologie *a priori*

L'analyse des séries temporelles et des cartographies a permis de mettre en évidence différents morphotypes et classes d'évolution qui sont les suivants :

- (1) Pour les espaces urbains
 - (a) Centres denses avec pas ou peu d'évolutions ;
 - (b) Espaces périphériques avec une première phase d'artificialisation entre 1956 et 1978, avec mise en place d'un habitat discontinu de type pavillonnaire ou grands ensembles ;
 - (c) Espaces périphériques avec une seconde phase d'artificialisation entre 1978 et 1998, avec apparition de zones spécialisées et progression de l'habitat discontinu ;
- (2) Pour les espaces semi-naturels
 - (a) Espaces semi-naturels avec pas ou peu d'évolutions ;
 - (b) Déprise agricole progressive à partir des années 1970 ;
 - (c) Fermeture progressive des îlots forestiers ;
 - (d) Fragmentation progressive des îlots forestiers ;
 - (e) Espaces semi-naturels avec des dynamiques mixtes.

Une connaissance du territoire permet de confirmer les dynamiques repérées pour cette typologie. Les profils construits pour les fiches indicateurs ont cependant été réalisés sur un nombre limité d'îlots, ce qui

nous a poussé à explorer d'autres méthodes pour déterminer le nombre optimal de classes pour une partition des îlots selon leur évolution et propriétés morphologiques.

4.4. Classification des îlots historiques

Les méthodes des silhouettes et du coude ont été utilisées pour rechercher dans le jeu de données quel pourrait être le nombre optimal de classes à renseigner lors de la classification k-moyennes. Pour une classification réalisée sur **l'ensemble des îlots et des indicateurs**, la Figure 12 permet d'identifier plusieurs coudes pour $k \in \{7, 14, 17\}$, de faibles amplitudes cependant.

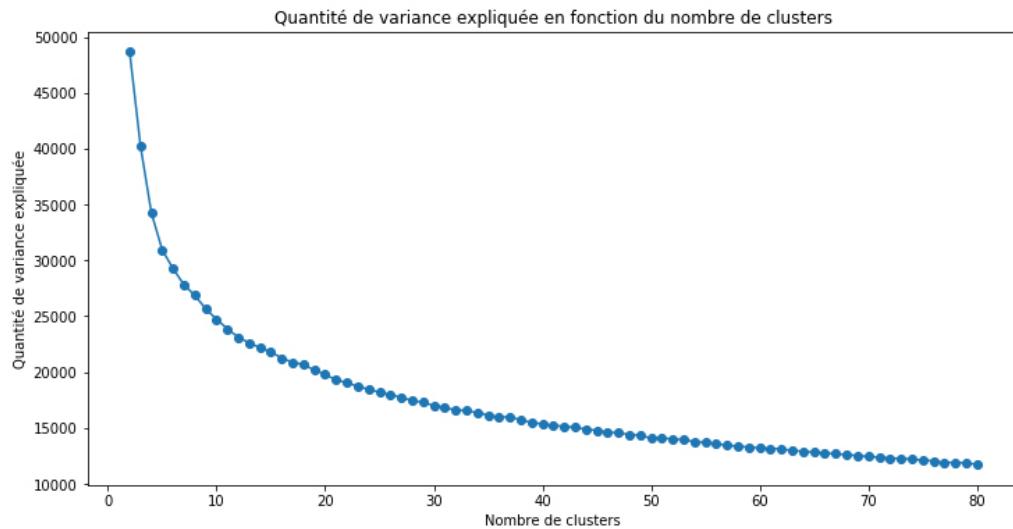


Figure 12 : Variance expliquée en fonction du nombre de clusters.

L'analyse des 79 silhouettes produites pour un nombre de classes k croissant a permis d'éliminer les partitionnements avec 7 et 17 clusters, pour lesquels la compacité des classes n'était pas suffisante. Les résultats ont été les meilleurs pour $k = 14$ et $k = 15$ (Figure 13), ce dernier partitionnement ayant été le plus pertinent d'un point de vue géographique, avec la mise en évidence de structures spatiales connues des opérateurs-trices. C'est donc celui-ci qui a été retenu dans le cadre de cette analyse.

Analyse des silhouettes obtenues avec $k=15$

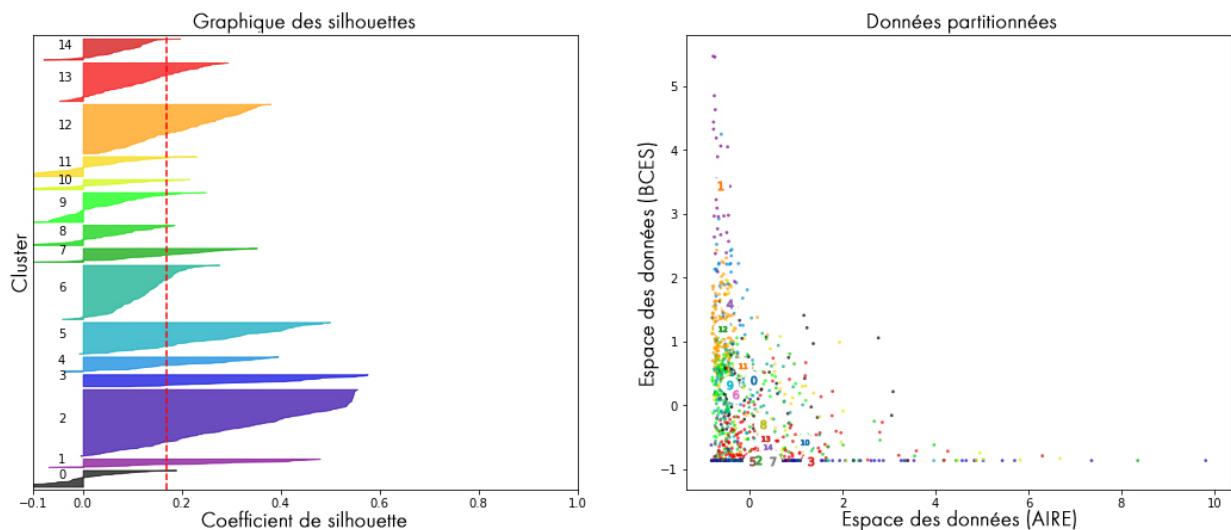


Figure 13 : Figure des silhouettes pour $k = 15$.

A noter qu'en plus de la classification réalisée sur l'ensemble des îlots et des indicateurs, différents tests ont également été lancés, avec systématiquement la même démarche de détermination du nombre optimal de *clusters*. Les approches suivantes ont été explorées pour les essais de classification :

- (1) Tous les îlots avec les indicateurs relatifs au bâti seulement ;
- (2) Tous les îlots avec les indicateurs relatifs à l'arboré seulement ;
- (3) Les petits îlots avec l'ensemble des indicateurs ;
- (4) Les grands îlots avec l'ensemble des indicateurs ;
- (5) Les petits îlots avec les indicateurs relatifs au bâti seulement ;
- (6) Les grands îlots avec les indicateurs relatifs au bâti seulement ;
- (7) Les petits îlots avec les indicateurs relatifs à l'arboré seulement ;
- (8) Les grands îlots avec les indicateurs relatifs à l'arboré seulement.

Les résultats obtenus pour ces classifications n'ont cependant pas été aussi concluants. Une représentation cartographique de ces différents partitionnements est disponible en Annexes 3, 4, 5 et 6.

Pour le partitionnement réalisé avec $k = 15$ sur l'ensemble des îlots et des indicateurs, une **labélisation des clusters** a été effectuée compte-tenu de connaissances du terrain, puis appuyée à l'aides de la série temporelle d'orthophotographies et des boîtes à moustaches présentées en Annexes 7, 8 et 9. Les classes dégagées sont représentées spatialement sur la Figure 14, avec une description proposée et résumée au sein d'un dictionnaire présenté dans le Tableau 7.

Evolution des îlots historiques

Nord de l'EMS de 1956 à 2013

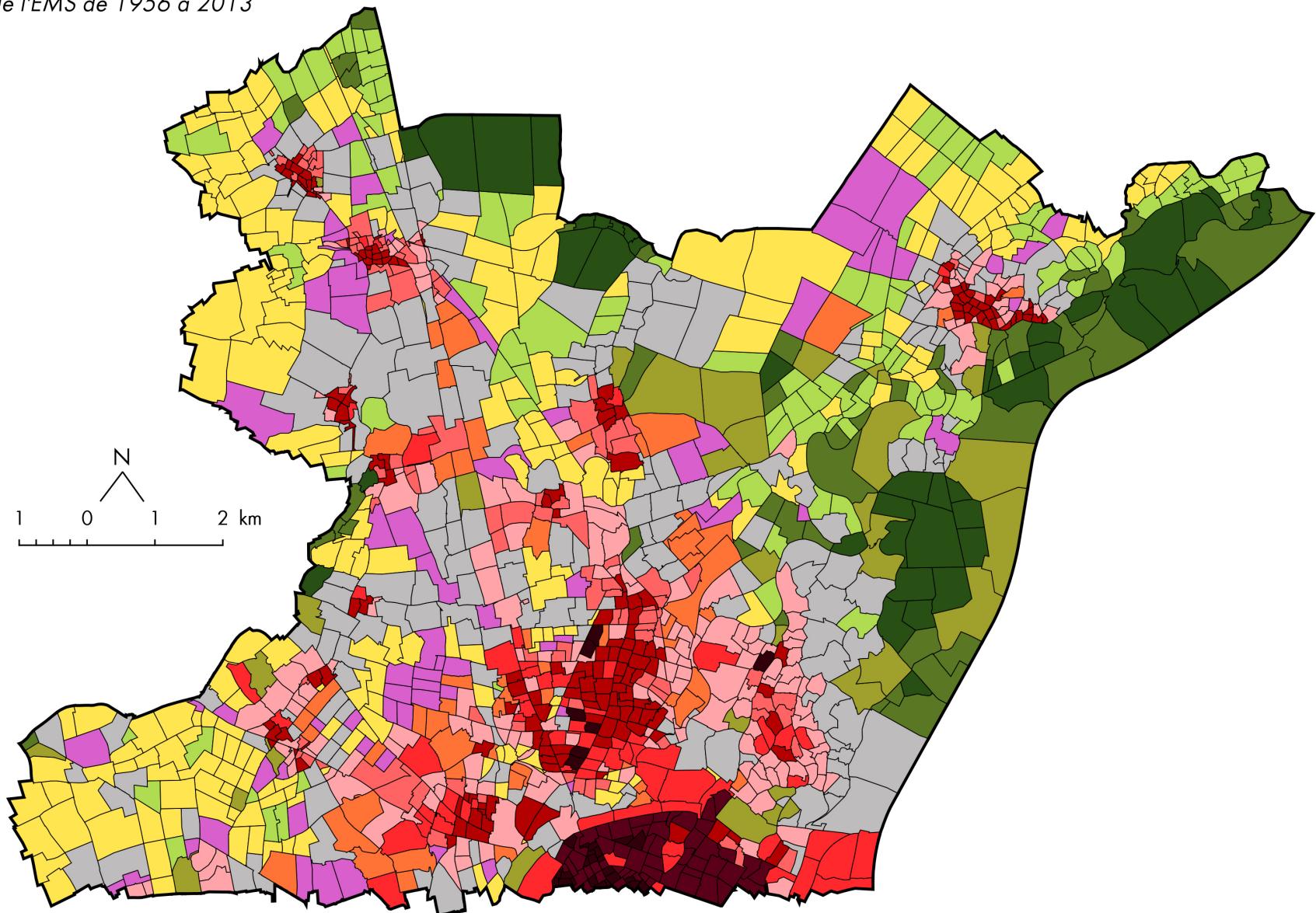


Figure 14 : Résultat de la classification des îlots historiques avec $k = 15$.

Classe	Série temporelle					Commentaire
	1956	1978	1998	2008	2013	
1						Tissu ancien avec habitat continu, peu végétalisé et sans évolution Ilots très artificialisés qui connaissent peu d'évolution en termes d'emprise au sol, avec maintien de leur densité élevée. La hauteur des bâtiments, proche d'une trentaine de mètres, reste elle aussi stable. La part de la végétation arborée, inférieure à 5 %, augmente légèrement au profit d'éléments isolés, principalement des arbres d'alignement.
4						Tissu haussmannien avec habitat continu, moyennement végétalisé et sans évolution Ilots très artificialisés, avec une emprise au sol du bâti qui augmente légèrement à partir des années 1970, traduisant un processus de densification, cependant négligeable. La part de la végétation, de l'ordre de 10 %, reste stable. La densité de patchs augmente entre 1978 et 2008, tandis que les surfaces arborées perdent de leur diversité. Cela sous-entend le remplacement d'éléments continus et de taille moyenne, par des arbres isolés.
12						Centre-bourg sans évolution Ilots moyenement artificialisés, caractérisés par une légère densification entre 1956 et 2013, avec peu d'évolutions par ailleurs. Les bâtiments conservent une hauteur d'environ 15m, peu diversifiée, et des surfaces de diversité moyenne. La part de la végétation, de l'ordre de 10 %, reste stable. La densité de patchs augmente, avec un maintien du manque de diversité des surfaces arborées. La production verte est donc favorable aux éléments isolés ou boqueteaux.

11



Tissu mixte (habitat, spécialisé et remarquable) avec densification à partir de 1956 et apparition de bâtiments hauts

Îlots moyennement artificialisés au départ, avec augmentation rapide de l'emprise au sol du bâti entre 1956 et 1978, puis à un rythme plus lent jusqu'à atteindre environ 20 % en 2013. Augmentation d'environ 5m de la hauteur du bâti entre 1956 et 1978, puis maintien aux alentours de 35m, ce qui suppose la mise en place d'un habitat collectif ou de zones spécialisées. Grande diversité de hauteur dans l'ilot, plus moyenne pour les surfaces. La part de la végétation connaît une augmentation modérée entre 1956 et 1978, puis entre 1978 et 1998, pour atteindre une emprise au sol d'environ 10 % en 2013, avec peu de diversité en matière de surface des éléments arborés. La densité de patchs est plutôt élevée et connaît une légère augmentation.

Îlot faiblement à moyenemment artificialisé en 1956, avec habitat individuel, puis artificialisation entre 1956 et 1998 avec remplissage de l'ilot par un habitat mixte (à dominante pavillonnaire)

9



Îlots peu artificialisés au départ, avec une augmentation importante du coefficient d'emprise au sol entre 1956 et 1978, puis un ralentissement entre 1978 et 1998, pour atteindre des valeurs d'environ 20 % en 2013. L'habitat est à dominante pavillonnaire, avec des hauteurs d'environ 15m, dont la diversité évolue peu. Les surfaces se diversifient entre 1956 et 1978, puis se stabilisent ensuite. La part de la végétation augmente rapidement entre 1956 et 1978, puis régresse ensuite légèrement jusqu'en 2013 pour atteindre environ 15 %. La densité de patchs, élevée au départ, augmente brusquement entre 1956 et 1978, puis 1978 et 1998, avec donc une part importante des éléments de petite taille. Les surfaces arborées sont peu diversifiées, avec un indice de Simpson qui diminue même jusqu'en 2013.

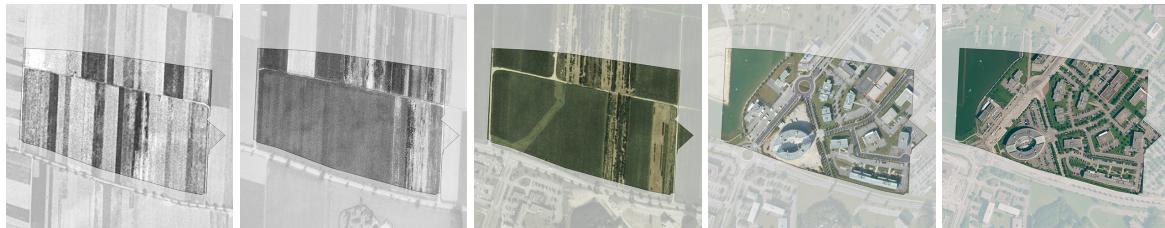
6



Îlot faiblement à moyenement artificialisé en 1956, avec habitat individuel, puis artificialisation entre 1956 et 2008 avec remplissage de l'îlot par un habitat mixte (à dominante collective)

Îlots peu artificialisés au départ, avec une augmentation importante de l'emprise entre 1956 et 1978, puis 1978 et 1998, par à-coups de 5 %, puis ralentissement jusqu'en 2013 pour atteindre des valeurs d'environ 20 %. La hauteur médiane varie peu, tandis que la hauteur maximale augmente légèrement pour atteindre environ 16m en 2013. La diversité de la surface du bâti augmente avec le temps, tandis que celle de la hauteur se maintient à des valeurs moyennes. Ces îlots sont moyenément végétalisés, avec une augmentation progressive de l'emprise au sol pour atteindre environ 15 % en 2013. La densité de patchs augmente, traduisant la mise en place d'éléments isolés, avec une diversité de surfaces faible sur toute la période.

8



Îlot agricole en 1956, puis artificialisation à partir de 1998 avec mise en place d'un tissu mixte à dominante spécialisée

Îlots au départ agricoles, ils connaissent une artificialisation tardive, à partir de 1998, avec une emprise au sol de moins de 10 % en 2013. Avec des bâtiments d'environ 15m de hauteur et une compacté médiane élevée, le tissu est mixte à dominante spécialisée. La part de la végétation haute est inférieure à 10 %, mais connaît une augmentation légère entre 1956 et 2013. La densité de patchs croît également à partir de 1998, avec des surfaces de moins en moins diversifiées, témoignant d'une production verte favorable aux éléments isolés.



0



Îlot agricole en 1956, puis artificialisation progressive entre 1956 et 2013 avec mise en place d'un tissu mixte (spécialisé et habitat mixte)

Îlots au départ agricoles, ils connaissent une forte artificialisation entre 1956 et 1978, avec mise en place de bâtiments hauts d'environ 15m. Le processus se poursuit entre 1978 et 1998, pour atteindre une emprise au sol d'environ 15 %. La hauteur augmente également jusqu'à des valeurs maximales d'environ 20m. De 1998 à 2013, l'artificialisation ralentit, tandis que les surfaces bâties et hauteurs, dont l'indice de Simpson est moyen, perdent en diversité. Concernant la végétation, son emprise au sol est d'abord inférieure à 5 %, puis augmente rapidement pour atteindre environ 10 % en 1998. Elle se maintient ensuite. La densité de patchs augmente, avec une diversité de surfaces faible, témoignant d'une production verte favorable aux éléments isolés.



13-14



Îlot mixte à dominante agricole en 1956, puis artificialisation progressive et légère jusqu'en 2013 avec mise en place d'un tissu mixte

Îlots peu ou pas artificialisés au départ, l'emprise au sol du bâti augmente de façon progressive et modérée pour atteindre 5 % en 2013. La hauteur augmente légèrement pour atteindre environ 15m en 2013. Les surfaces et hauteurs sont diversifiées et restent stables sur la période étudiée. La part de la végétation est d'environ 10 % en 1956, puis augmente progressivement, au même titre que la densité de patchs.



3



Espace forestier avec peu d'évolution

Îlots pas ou peu artificialisés, ils sont caractérisés par une emprise au sol élevée pour la végétation arboree, comprise entre 80 et 100 % sur l'ensemble de la période étudiée. La densité de patchs est faible et la diversité de surfaces importante, traduisant la présence d'entités forestières d'un seul tenant et de superficies variables.

5		Espace naturel mixte avec peu d'évolution
7		Espace naturel mixte à tendance forestière avec évolution variable
10		Espace naturel légèrement artificialisé avec fermeture de l'ilot par de l'arboré et déprise agricole progressive

2						Sol nu sans évolution	<p>Îlots à tendance agricole, pas ou peu artificialisés, avec quelques éléments arborés. L'emprise au sol de la végétation, bien que faible, augmente légèrement entre 1956 et 2013, processus favorable à une diversification relative des surfaces arborées. La densité de patchs est faible, mais présente quelques valeurs atypiques dues à la présence de bosquets ou vergers.</p>
---	--	--	--	--	--	------------------------------	---

Tableau 7: Dictionnaire des îlots historiques classifiés.

5. DISCUSSION

Compte tenu des résultats obtenus, la méthodologie employée nous est parue pertinente pour mener une classification de l'évolution des dynamiques urbaines du Nord de l'Eurométropole de Strasbourg. Celle-ci a été rendue possible notamment grâce à la production d'une couche de végétation arborée de 1956 à 2013, qui vient intelligemment compléter les informations apportées par le bâti.

Si les couches de végétation produites et les couches de bâti utilisées sont d'une qualité suffisante pour l'analyse qui a été réalisée, un certain nombre de biais subsistent et peuvent impacter leur utilisation. Un effet opérateur peut être notamment présent du fait de la digitalisation progressive par de nombreuses personnes, et ce surtout pour le bâti où différentes méthodes de saisie des entités ont été employées, comme souligné par Sauter & Schwartz (2017). Cette différence de digitalisation peut en effet impacter le calcul des indicateurs, puisque ceux-ci font appel à la morphologie (surface, périmètre...) des entités. Dans le cas du bâti également, les erreurs de géométrie, qui n'ont pas été corrigées faute de temps, peuvent également avoir un impact sur le calcul de certains indicateurs, ceux d'emprise au sol plus particulièrement.

Concernant la végétation, les choix de digitalisation sont également importants : lorsque les houppiers se touchaient, les entités ont été fusionnées en une seule, ce qui ne rend pas compte de la présence d'arbres d'alignement ou de vergers par exemple. Pour améliorer cet aspect, compléter la couche par une typologie de la végétation serait particulièrement intéressant et aurait apporté des informations en matière de diversité. En effet, les arbres d'alignement sont par exemple caractéristiques des espaces urbains. De plus, la qualité des orthophotographies varie d'une année de référence à l'autre, modifiant par ailleurs l'unité minimale interprétable d'un élément comme étant de l'arboré. Pour remédier à cela, il a été envisagé un temps de définir un seuil de surface au-dessous duquel les entités de végétation ne seraient pas considérées pour le calcul des indicateurs ou la classification. Ce seuil aurait ainsi été déduit à partir de l'orthophotographie la moins résolue. L'idée n'a finalement pas été retenue car les images étaient généralement d'une qualité suffisante pour repérer les petits éléments arborés, les plus anciennes y compris. De plus, cela aurait également réduit la quantité d'informations disponibles sur la végétation haute (Tableau 8), notamment pour les éléments isolés, typiquement les arbres d'alignement, qui apportent une information intéressante sur l'urbain, comme en témoignent les fiches décrivant les différents indicateurs calculés.

Année 2013	Q. Poterek	S. Medina-Kennedy	A. Sindt
< 2,5m ²	3 %	4 %	5 %
< 5m ²	8 %	11 %	16 %
< 10m ²	19 %	29 %	38 %
Nombre total	34 000	13 453	28 981

Tableau 8 : Quantité des éléments arborés disparaissant pour différents seuils de surface.

Des difficultés sont également apparues du fait de l'absence de valeurs dans certains champs, lorsqu'il n'y avait pas de végétation ou de bâti dans l'îlot, aboutissant à l'apparition de valeurs NaN pour les couples entité/attribut concernés. Après une série de tests, le remplissage manuel des cellules sans valeur nous est paru pertinent car il renvoyait les meilleurs résultats.

Enfin, les seuils retenus pour les calculs de diversité de surface et de hauteur ont été retenus à partir d'une discréttisation réalisée avec la méthode de Jenks, et de l'analyse des histogrammes de répartition des effectifs dans les classes. Le choix des bornes importe donc, puisqu'il peut modifier la dynamique d'un

espace en matière de diversité, notamment dans le cadre de cette étude où la discréétisation a été menée de façon empirique.

Nous pouvons cependant noter que les indicateurs ont été choisis pour éviter un maximum que toutes ces erreurs et biais n'aient un trop grand impact sur leur calcul. Certains attributs qui paraissaient intéressants dans la littérature ont de fait été mis de côté pour ne pas fausser nos résultats. Ainsi par exemple, le nombre de bâtiments par îlot n'a pas été retenu, car la différence dans les techniques de digitalisation des entités mitoyennes du centre dense (d'un seul tenant ou chaque immeuble séparé) d'une année à l'autre aurait biaisé les valeurs calculées pour l'indicateur.

A noter également que les îlots historiques constituent les éléments de base sur lesquels reposent le calcul des indicateurs et la classification. Cependant, malgré une classification en sortie de qualité suffisante, la pertinence du tracé des îlots est discutable par endroits pour une telle étude, bien qu'il s'agisse d'une analyse historique. En effet, les entités sont souvent constituées d'un tissu mixte, dont les dynamiques s'organisent sur différentes époques, tel l'îlot présenté sur le Tableau 9, ce qui ne crée pas un ensemble d'évolutions homogène. Cela s'explique notamment par le fait qu'ils aient été réalisés à partir de plans cadastraux antérieurs à 1956, ce qui peut empêcher de qualifier correctement les espaces qui ont connu une évolution durant les 60 dernières années.

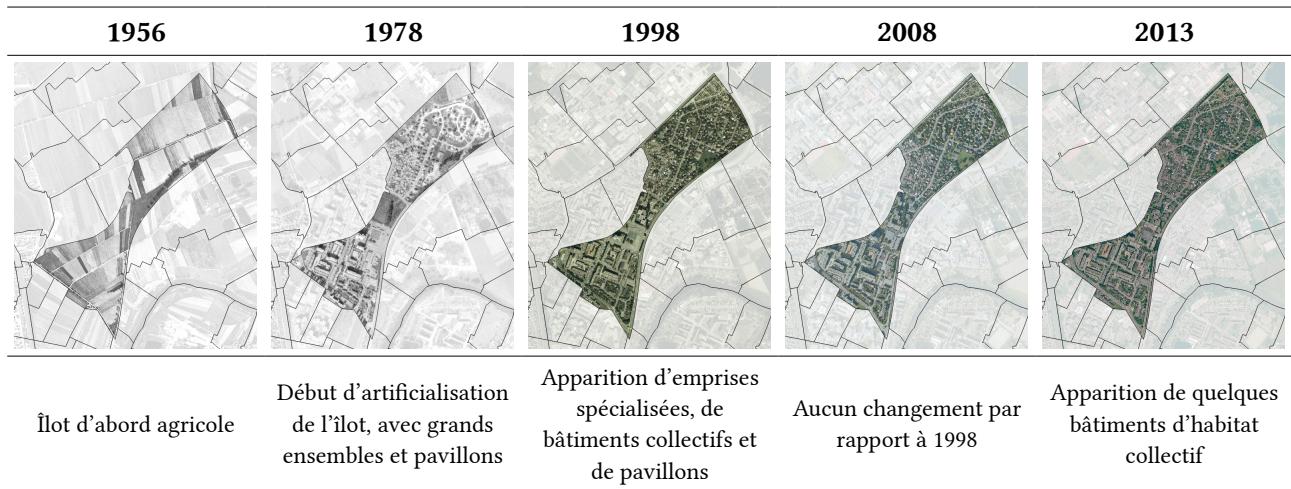


Tableau 9 : Exemple d'îlot mixte, avec entreprises spécialisées, habitat individuel et collectif.

Toutefois, malgré ces biais, la partitionnement et l'interprétation des *clusters* d'îlots a permis de faire ressortir des dynamiques cohérentes avec l'Histoire du territoire. Pour améliorer les résultats ici obtenus, l'utilisation d'îlots morphologiques plutôt qu'historiques serait selon nous plus adaptée, car ils traduirraient d'office une organisation de l'espace urbain qui découle d'une certaine histoire architecturale et urbanistique.

Concernant la classification, la méthode des k-moyennes nous a semblé pertinente pour sa facilité de mise en œuvre et sa capacité à traiter de gros volumes de données, sans avoir besoin de disposer d'une base d'îlots déjà labelisés. Cela aurait en effet été problématique d'identifier des classes d'évolution a priori, difficiles à dégager à partir d'orthophotographies. Cependant, d'autres méthodes auraient également pu être utilisées, notamment la Classification Hiérarchique Ascendante pour définir le nombre de classes *a posteriori*, à partir d'un dendrogramme et d'une mesure d'inertie. La fusion des résultats de différentes méthodes de partitionnement, initialisées aléatoirement ou avec un nombre de classes différent, est également une piste qui pourrait être explorée dans le suite de ce travail (Jain, 2010).

Concernant les résultats de la classification, il nous est paru pertinent de fusionner certaines classes qui semblaient proches en apparence, compte-tenu des valeurs de leurs attributs. Différentes statistiques ont

par ailleurs souligné le manque d'homogénéité de certaines classes, ce qui aurait justifié d'utiliser un nombre de clusters plus élevé, bien que les silhouettes aient montré une diminution de la compacité des classes avec k.

De façon globale, les choix méthodologiques ont permis de réaliser une classification d'une qualité acceptable compte-tenu de l'approche exploratoire qui a été menée. Ces résultats encouragent une poursuite de l'étude, qui pourrait notamment intégrer de nouvelles données, comme une typologie de la végétation, mais aussi des dates intermédiaires à celles retenues pour ce travail, ou la correction des données pour lesquelles la qualité peut être un frein au calcul de certains indicateurs.

CONCLUSION

Ce travail présente le potentiel de l'utilisation d'indicateurs de morphologie urbaine pour la classification d'îlots historiques. Ces derniers ne décrivent pas forcément un ensemble urbain homogène, mais plutôt des dynamiques spatio-temporelles en matière d'urbanisme, l'utilisation d'une base de données géo-historique a été nécessaire. Une série temporelle d'orthophotographies et produits vectoriels décrivant le bâti, la voirie et la végétation arborée ont ainsi permis d'extraire une information pertinente sur la coloration thématique des îlots historiques. En effet, le calcul de dix indicateurs a souligné des comportements différenciés dans le temps, utilisés ensuite à des fins exploratoires.

Ces données ont servi d'entrée à un algorithme de classification non supervisée k-moyennes qui, après avoir défini un nombre de classes optimal k fixé à 15, dont deux ont ensuite été fusionnées, nous a permis de dégager les grandes dynamiques du Nord de l'Eurométropole de 1956 à 2013. Les périodes charnières en matière d'urbanisation, pour l'Eurométropole de Strasbourg, correspondent aux années 1978 et 1998, qui ont vu se mettre un tissu majoritairement discontinu, formant ainsi deux couronnes périurbaines. D'autres espaces n'ont par contre connu que très peu d'évolutions, comme les centres denses, espaces forestiers et agricoles.

Compte-tenu des précédents travaux menés sur la question (Moisson, 2015 ; Sauter & Scwhartz, 2017 ; Humbert, 2017), les apports de la végétation arborée, puis d'une troisième dimension pour le bâti, nous ont permis d'affiner les résultats décrits par Humbert (2017) avec un total de 14 classes d'évolution dégagées.

La méthodologie ici développée mériterait d'être améliorée, en incorporant de nouvelles dimensions à l'étude, par le calcul de nouveaux indicateurs, ou la correction des données déjà existantes sur le site. Compte-tenu du fait que seule la partie Nord de l'intercommunalité a été traitée, il serait également intéressant de répéter l'analyse sur la partie Sud, auquel cas il faudrait également produire une information sur la végétation arborée pour cet espace.

Il serait également intéressant de coupler les résultats obtenus aux différentes politiques d'aménagement qui se sont succédées, avec une réflexion à porter sur l'élaboration de documents d'urbanisme par exemple. Outre les applications évidentes pour l'urbain, les espaces semi-naturels ont également montré des dynamiques, qu'il serait intéressant de préciser, puisque seules cinq classes ont été dédiées à ces espaces, qui connaissent pourtant des évolutions, en matière d'avancée ou de reculée au sein des îlots historiques.

BIBLIOGRAPHIE

- BESSY-PIETRI, Pascale, « Les formes récentes de la croissance urbaine », *Economie et Statistique*, vol. 336 / 1, 2000, p. 35 52.
- BOURDIC, Loeiz, SALAT, Serge et NOWACKI, Caroline, « Assessing cities: a new system of cross-scale spatial indicators », *Building Research & Information*, vol. 40 / 5, octobre 2012, p. 592 605.
- CORDEAU, Erwan, « Les îlots morphologiques urbains (IMU) - Délimitation et caractérisation des "IMU 2012" en Île-de-France », IAU Île-de-France, 2016.
- DUMONT, Gérard-François, « France : la fin de l'urbanisation ? », *Population & Avenir*, vol. 726 / 1, 2016, p. 3.
- GAUTHIER, Noémie, Analyses morphologiques de formes urbaines et étude de l'impact des formes urbaines sur les gains énergétiques solaires, Projet de fin d'études, INSA Strasbourg, 2014, 50 p.
- GUÉRIN-PACE, France et PUMAIN, Denise, « 150 ans de croissance urbaine », *Economie et Statistique*, vol. 230 / 1, 1990, p. 5 16.
- HAND, David J., « Principles of Data Mining », *Drug Safety*, vol. 30 / 7, 2007, p. 621 622.
- HEIDEN, Uta, HELDENS, Wieke, ROESSNER, Sigrid[*et al.*], « Urban structure type characterization using hyperspectral remote sensing and height information », *Landscape and Urban Planning*, vol. 105 / 4, Avril 2012, p. 361 375.
- HERMOSILLA, Txomin, PALOMAR-VÁZQUEZ, Jesús, BALAGUER-BESER, Ángel[*et al.*], « Using street based metrics to characterize urban typologies », *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 44, mars 2014, p. 68 79.
- HEROLD, Martin, SCEPAN, Joseph et CLARKE, Keith C., « The Use of Remote Sensing and Landscape Metrics to Describe Structures and Changes in Urban Land Uses », *Environment and Planning A*, vol. 34 / 8, Août 2012, p. 1443 1458.
- HUMBERT, Paul, SIG Géohistorique et dynamiques urbaines, Mémoire de Master I, Université de Strasbourg, 2017, 102 p.
- JAIN, Anil K., « Data clustering: 50 years beyond K-means », *Pattern Recognition Letters*, vol. 31 / 8, Juin 2010, p. 651 666.
- KETCHEN JR., David J. et SHOOK, Christopher L., « The application of cluster analysis in strategic management research: an analysis and critique », *Strategic Management Journal*, vol. 17 / 6, juin 1996, p. 441 458.
- MCGARIGAL, Kevin et MARKS, Barbara J., « Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure », Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER, Artificialisation : De la mesure à l'action, 2017, 46 p.
- MOISSON, Stella, Analyse des évolutions urbaines à partir de données multi-sources : Application à l'Eurométropole Strasbourgeoise, Mémoire de Master II, Université de Strasbourg, 2015, 57 p.
- ROUSSEAUX, Frederic, « Vers une simulation de l'évolution des structures urbaines à partir d'agents », 2013, [En ligne : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00819830/document>].
- ROUSSEEUW, Peter J., « Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis », *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, novembre 1987, p. 53 65.

SCHWARTZ, Jérôme et SAUTER, Jean-Yves, Constitution d'un SIG géohistorique et analyse des dynamiques urbaines : le cas de l'Eurométropole de Strasbourg, Mémoire de Master II, Université de Strasbourg, 2015, 42 p.

SERTIT et CUS, « Acquisition de données relatives à l'occupation du sol et une classification des espaces - Guide méthodologique », 2013, 37 p.

VANDERHAEGEN, Sven et CANTERS, Frank, « Developing urban metrics to describe the morphology of urban areas at block level », The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 38 / 4/C7, 2010, p. 192–197.

VANDERHAEGEN, Sven et CANTERS, Frank, « Mapping urban form and function at city block level using spatial metrics », Landscape and Urban Planning, vol. 167, novembre 2017, p. 399 409.

ANNEXES

Annexe 1 : Bibliothèques Python et fonctions utilisées dans le cadre du mémoire

Version logicielle : Python 3.5.

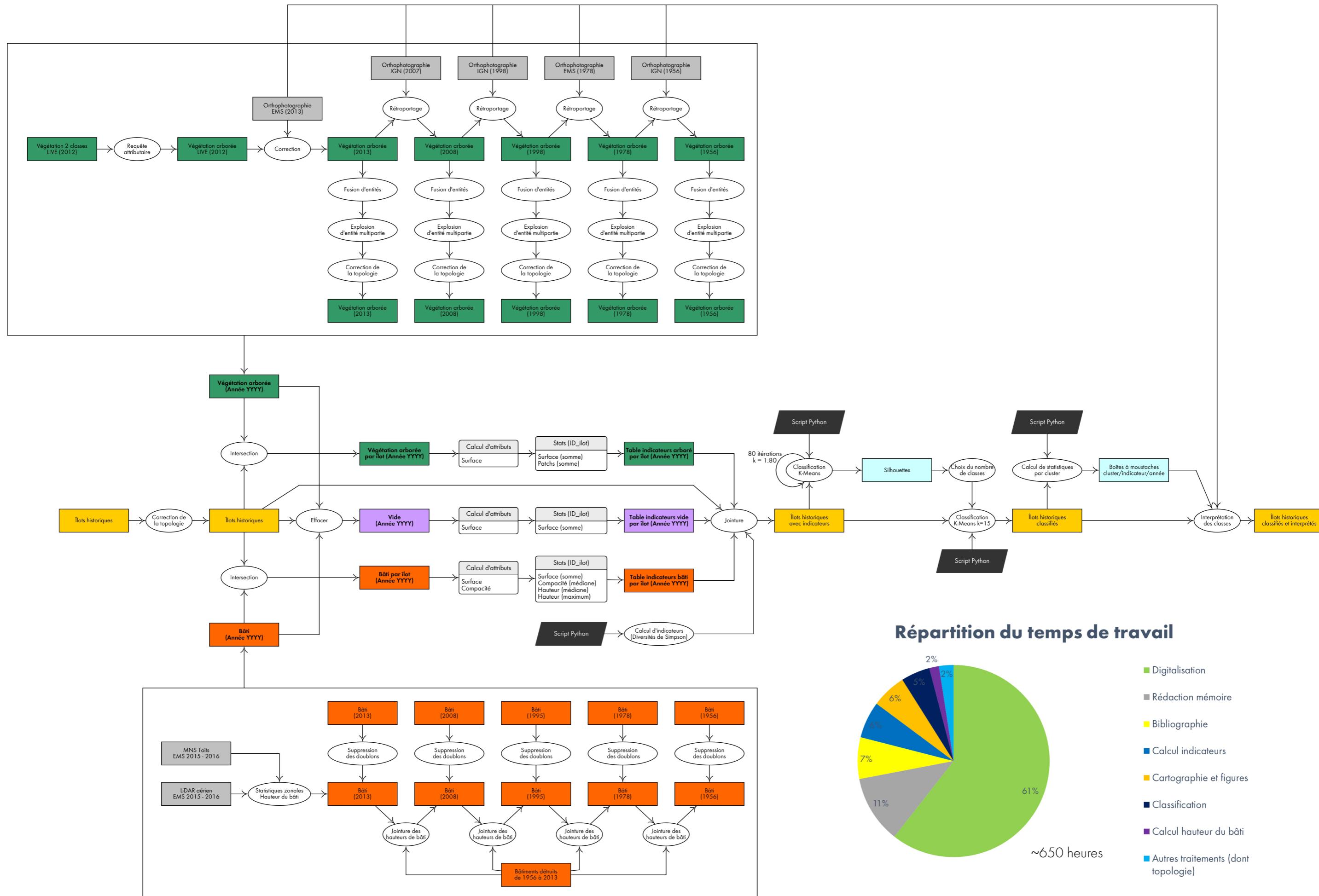
Environnement de programmation Anaconda disponible dans l’arborescence de fichiers.

Bibliothèques : os, gdal, math, collections, numpy, subprocess, pandas, matplotlib, sklearn.

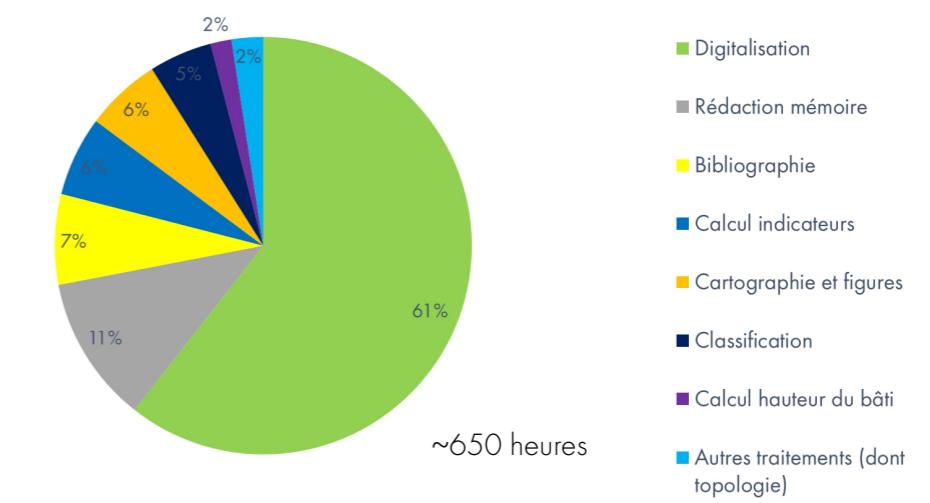
Fonctions :

- **Fonctions pour le traitements des produits rasters et dérivés du LiDAR**
 - raster_array : Lit un fichier raster et le transforme en array numpy
 - raster_metadata : Les les métadonnées d'un fichier raster et les enregistre dans une structure de données appriorié
 - geo2array : Transforme les coordonnées géographiques en coordonnées locales de l'array
 - array2geo : Trasnforme les coordonnées locales de l'array en coordonnées géographiques
 - projet_tiles : Définit le système de projection d'un répertoire de tuiles raster
 - set_xy_tiles : Définit les emprises, dans un système de projection donné, pour un répertoire de tuiles raster à partir de coordonnées fournies par l'utilisateur-trice
 - make_mosaic : Crée une mosaïque à partir d'un répertoire de tuiles raster
- **Fonctions pour le calcul des indicateurs**
 - read_dbf : Lit une table DBF dans laquelle sont stockées les valeurs d'attributs, et la transforme en tableau de données Pandas
 - reclassify_attribute : Reclassifie un champ selon des classes et seuils renseignés par l'utilisateur-trice
 - compute_simpson : Calcule l'indice de Simpson sur un champ reclassifié
- **Fonctions pour la mise en œuvre d'une classification non supervisée K-Means**
 - fit_data : Lit un tableau de données Pandas et standardise ses valeurs
 - perform_kmeans : Réalise un partitonnement d'un tableau de données Pandas à l'aide d'un algorithme K-Means
 - plot_elbow : Affiche la part de la variance expliquée en fonction du nombre de clusters issus d'un partitionnement K-Means
 - plot_silhouettes : Affiche les silhouettes obtenues pour un partitionnement K-Means

Annexe 2 : Organigramme des traitements



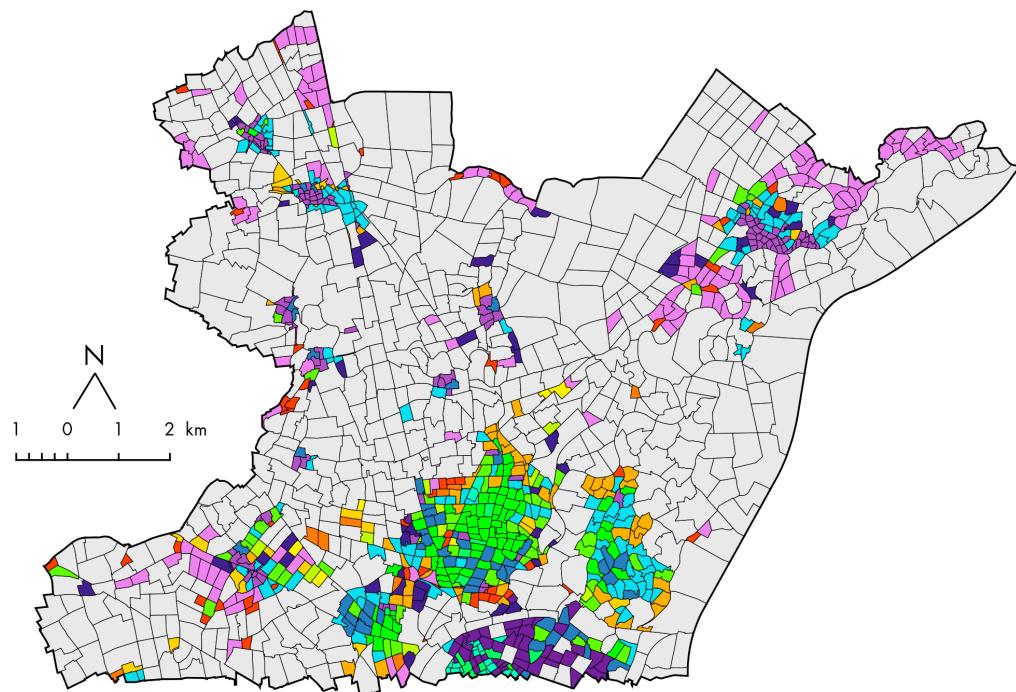
Répartition du temps de travail



Annexe 3 : Classification avec indicateurs de bâti seulement, sur petits et grands îlots

Résultats des partitionnements K-Means

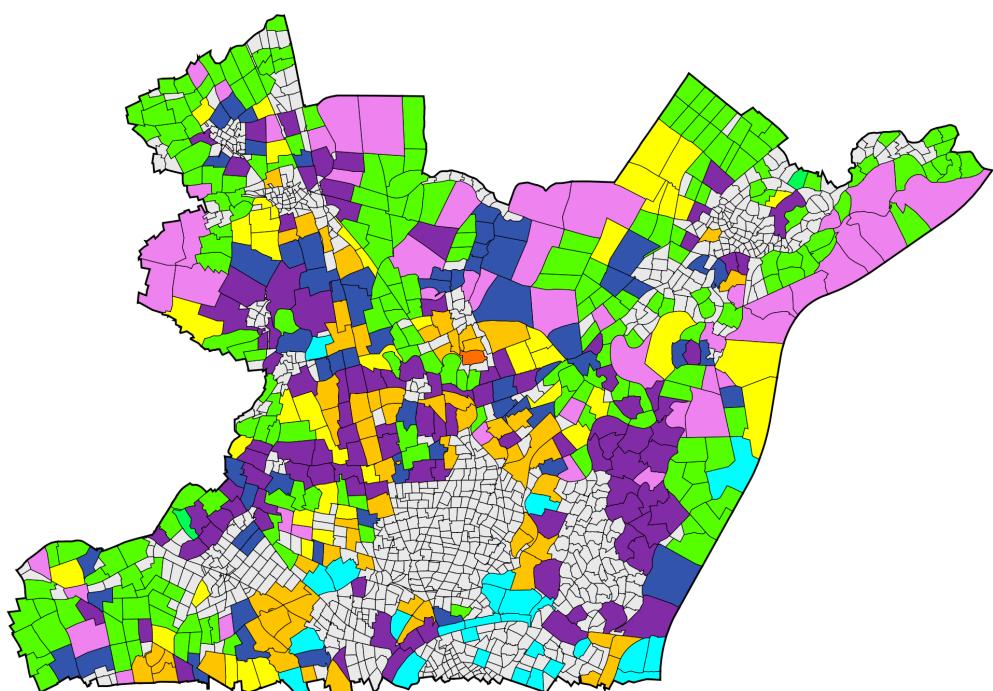
Petits îlots - Indicateurs de bâti



Clusterisation (10 classes)

■ 0 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 ■ 6 ■ 7 ■ 8 ■ Pas de label

Grands îlots - Indicateurs de bâti

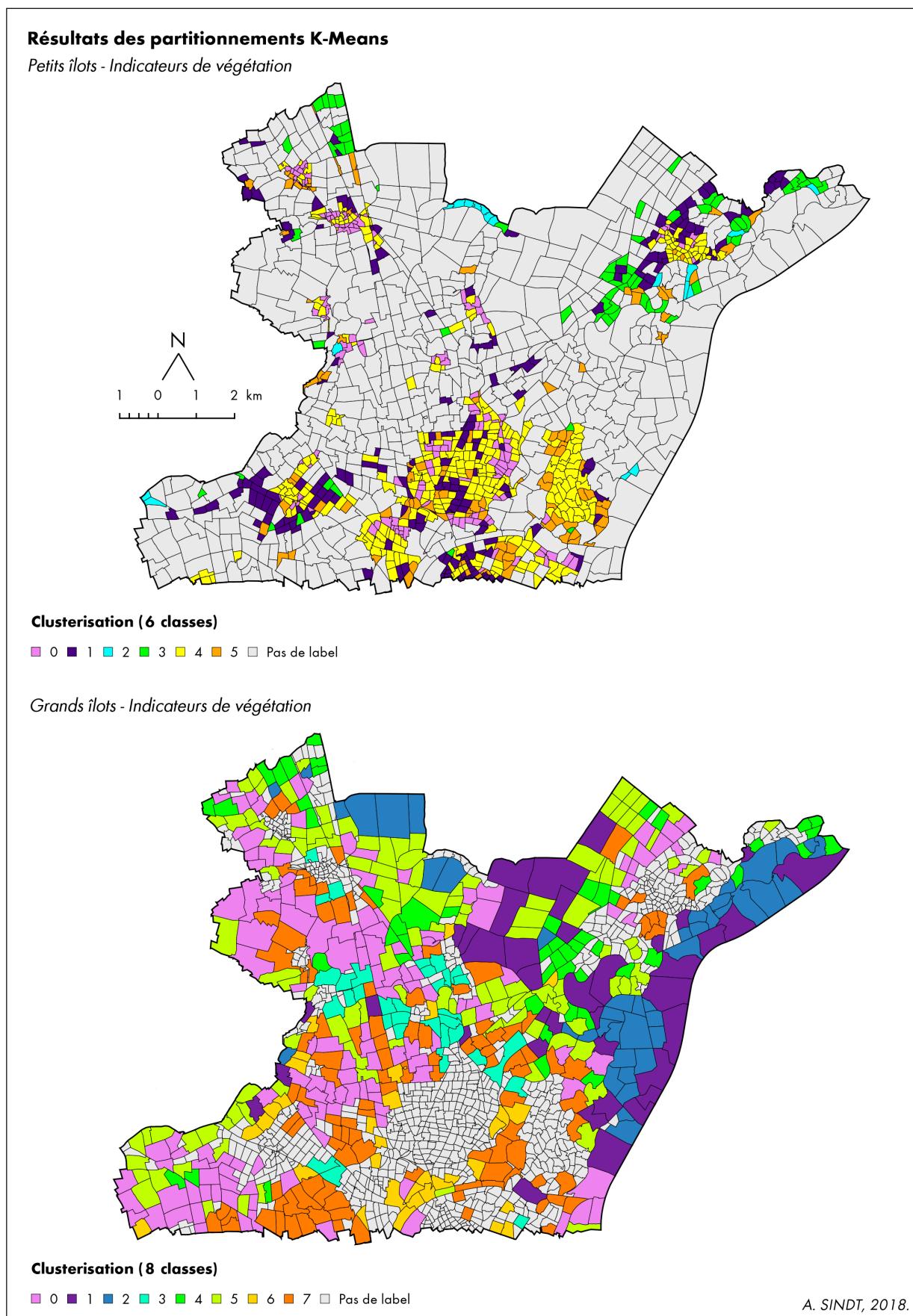


Clusterisation (9 classes)

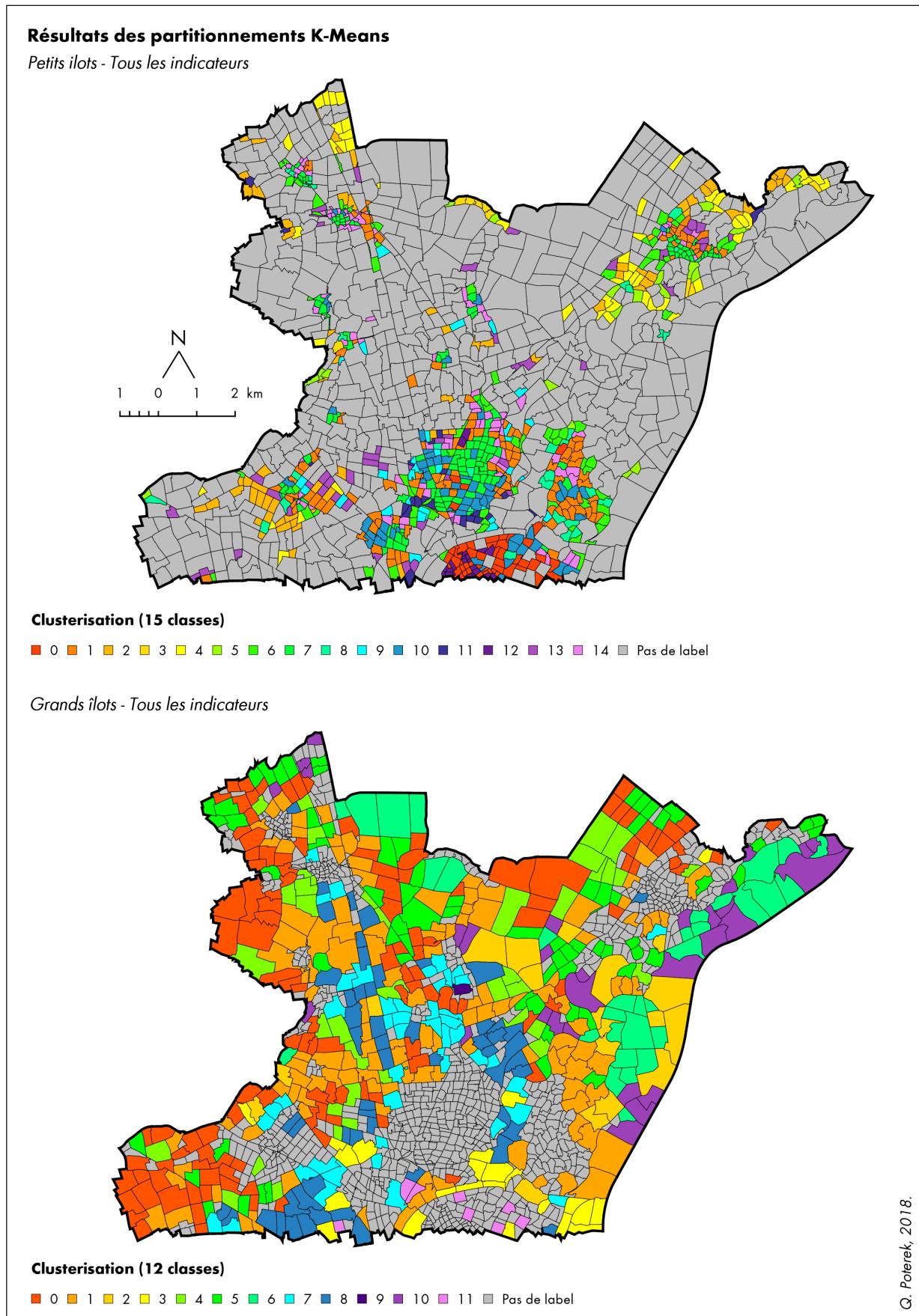
■ 0 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 ■ 6 ■ 7 ■ 8 ■ Pas de label

A. SINDT, 2018.

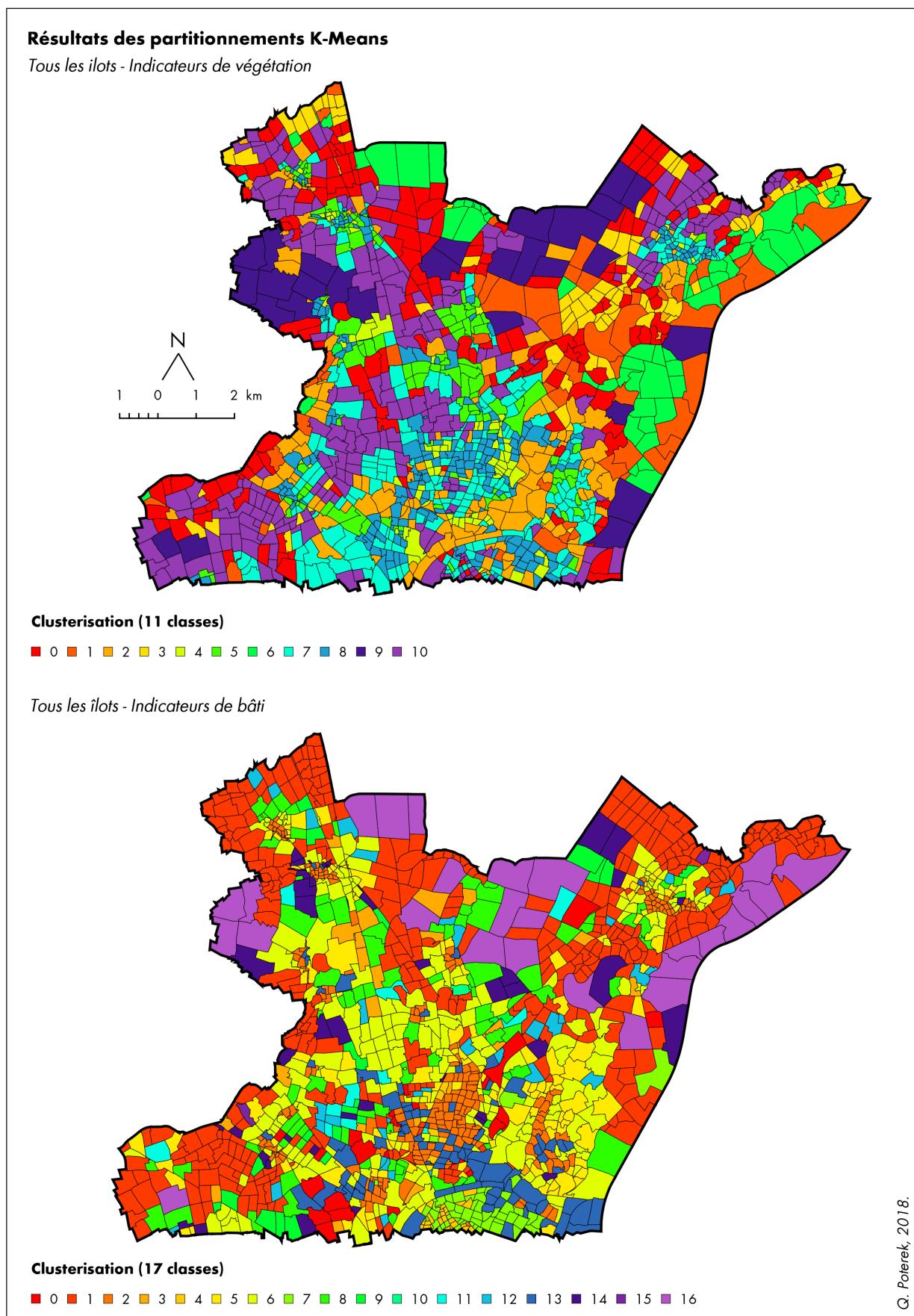
Annexe 4 : Classification avec indicateurs de végétation seulement, sur petits et grands îlots



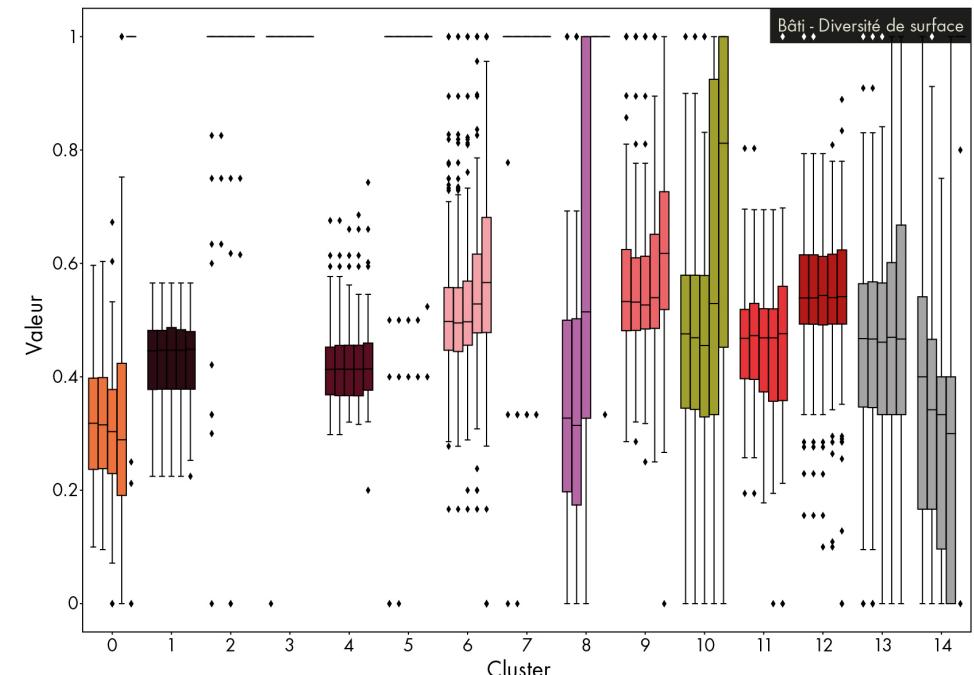
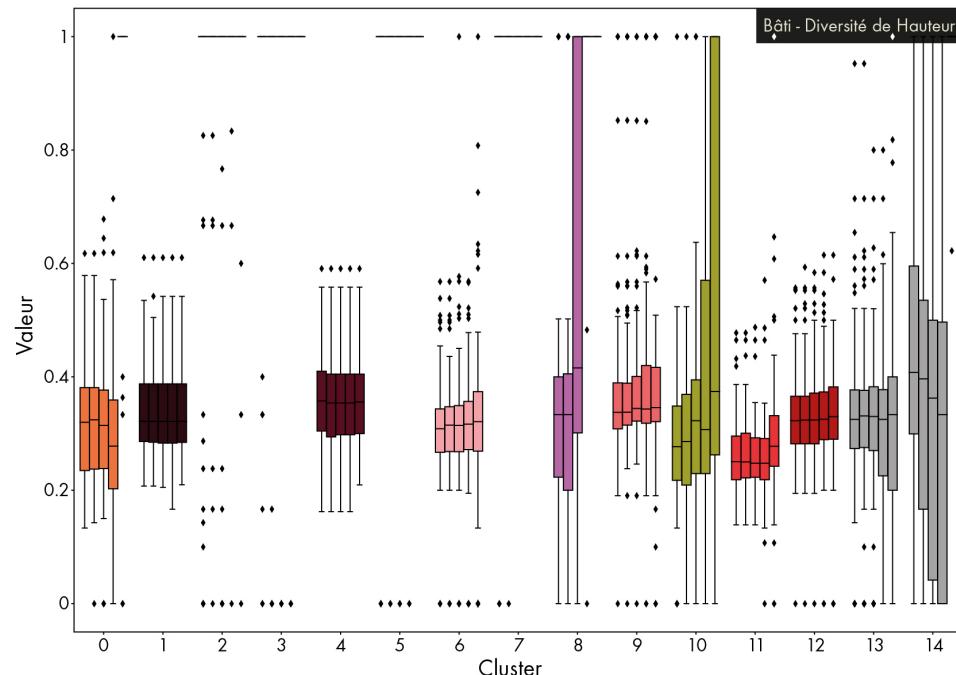
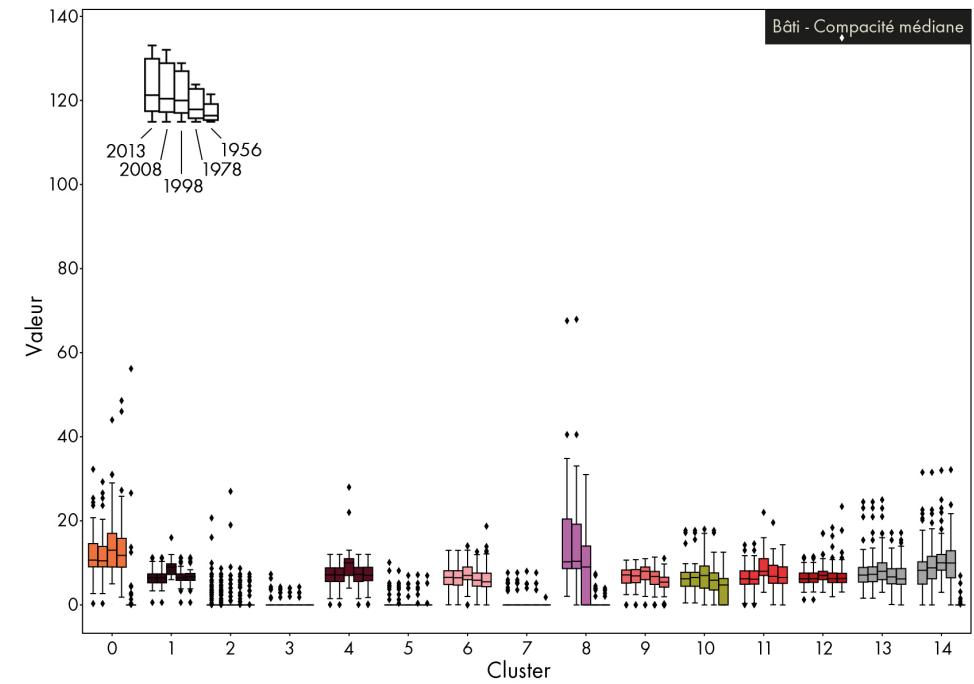
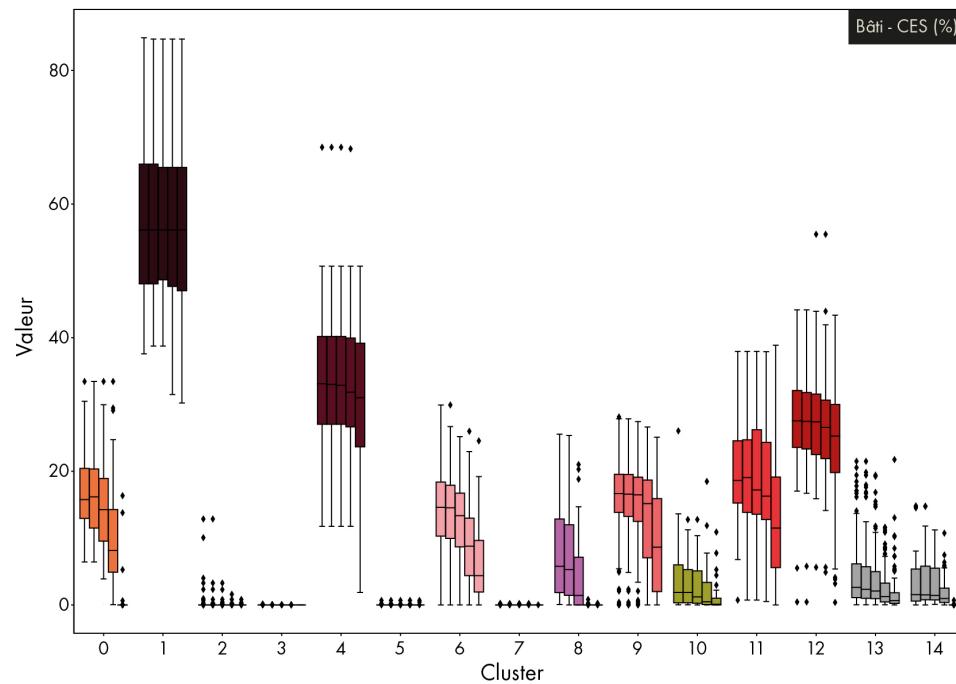
Annexe 5 : Classification avec tous les indicateurs sur petits et grands îlots



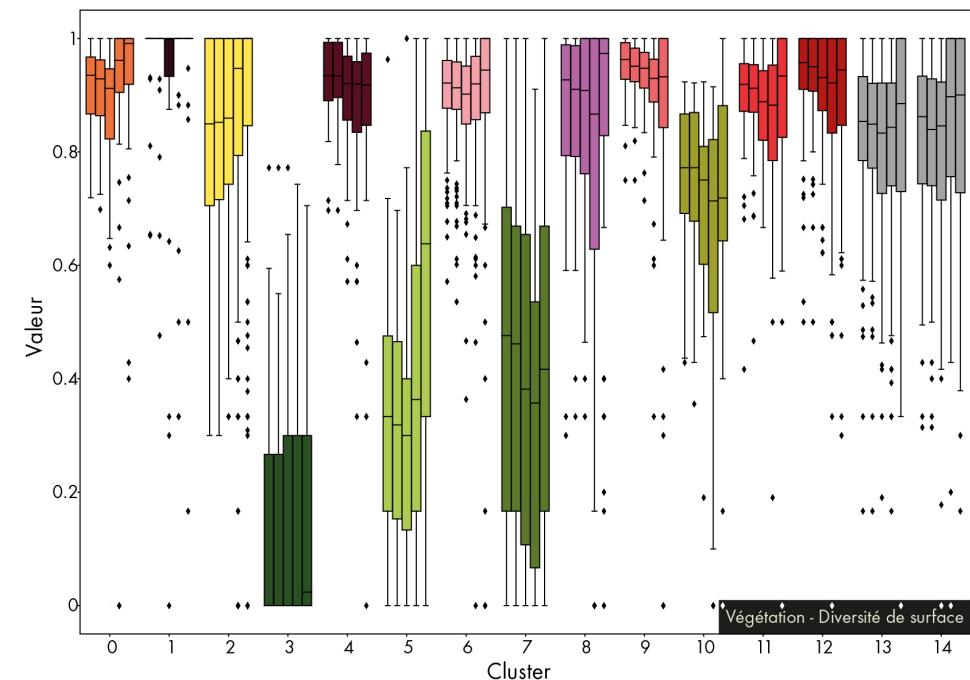
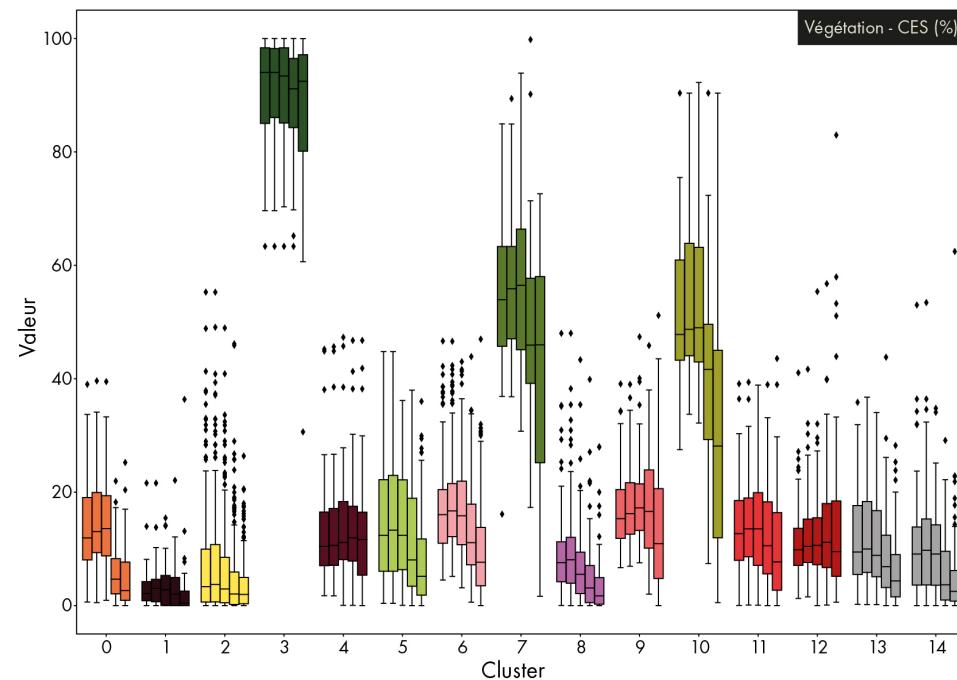
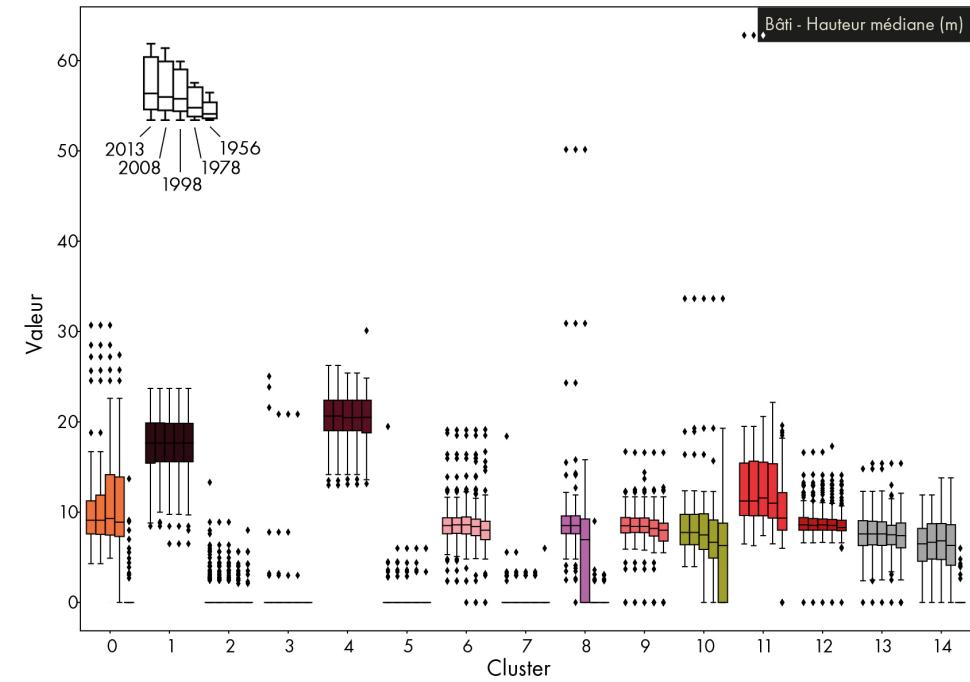
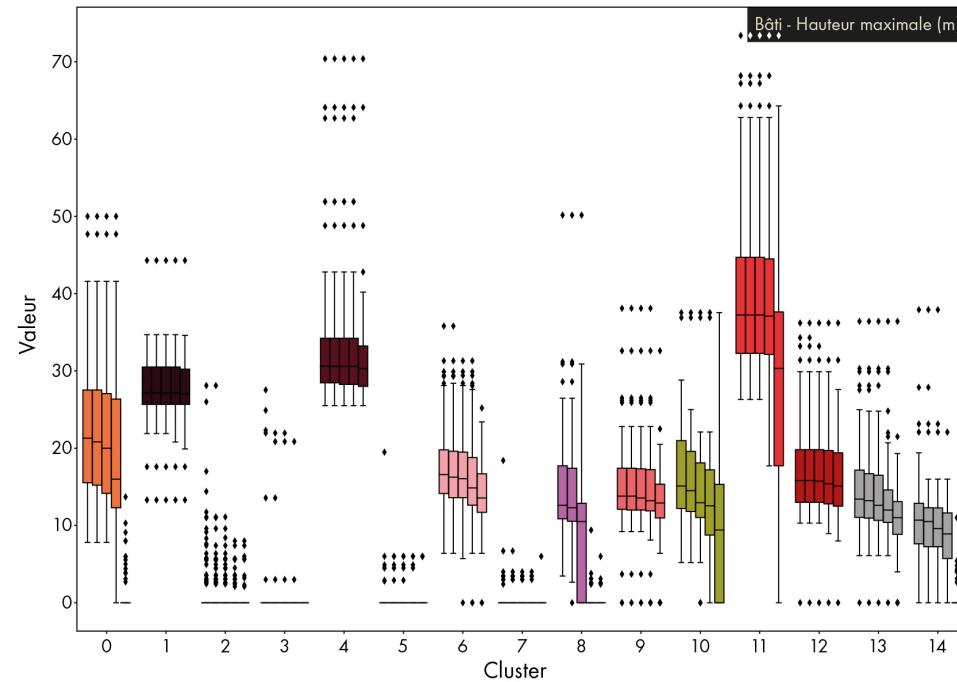
Annexe 6 : Classification avec indicateurs de bâti puis de végétation, sur tous les îlots



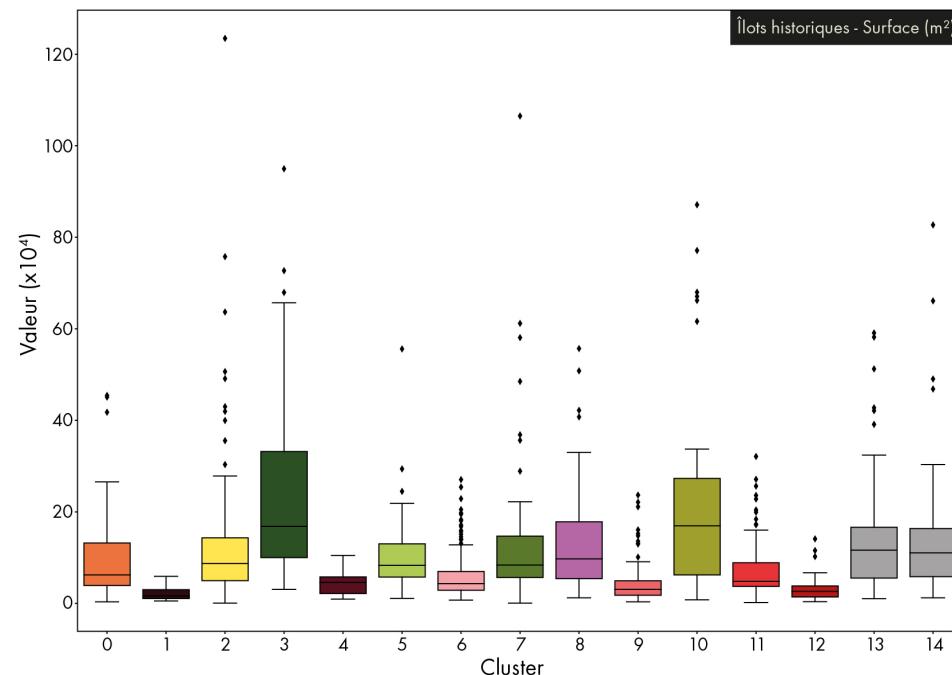
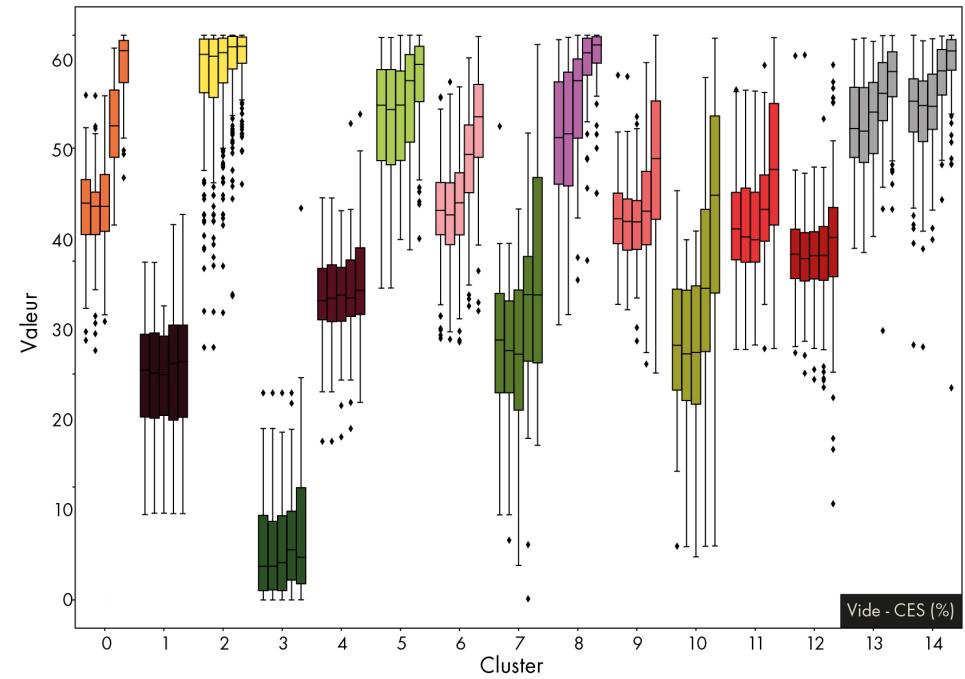
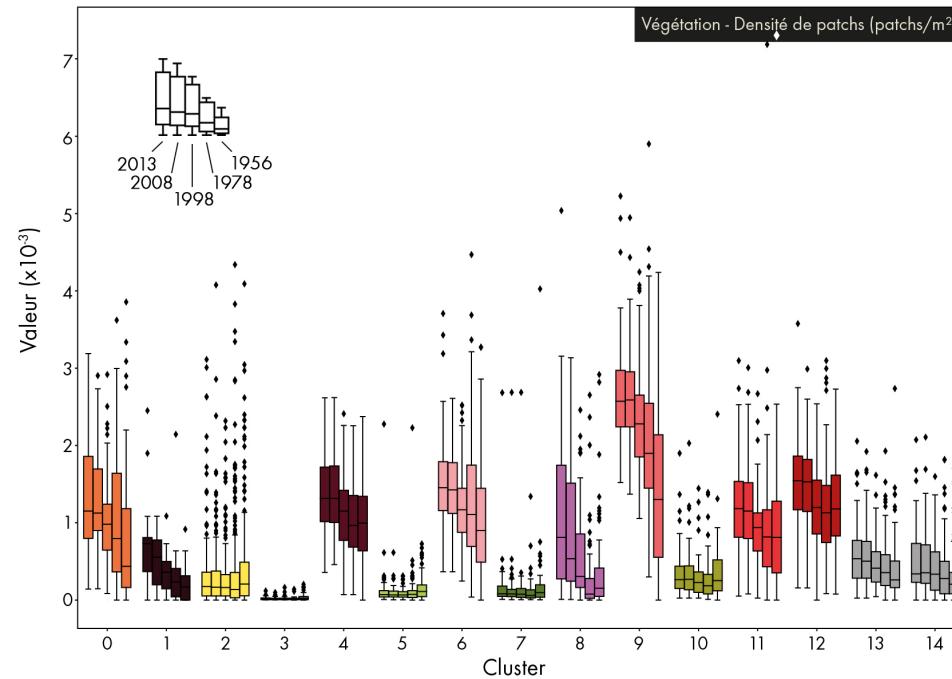
Annexe 7 : Valeurs de la série temporelle d'indicateurs pour chaque classe (Partie 1)



Annexe 8 : Valeurs de la série temporelle d'indicateurs pour chaque classe (Partie 2)



Annexe 9 : Valeurs de la série temporelle d'indicateurs pour chaque classe (Partie 3)



SIG Géohistorique et dynamiques urbaines : Nord de l'Eurométropole de 1956 à 2013

Santiago MEDINA-KENNEDY, Quentin POTEREK, Aurore SINDT

Résumé : Ce mémoire présente les résultats d'une démarche exploratoire visant à qualifier les dynamiques urbaines du Nord de l'Eurométropole de Strasbourg de 1956 à 2013. Afin d'étudier les évolutions connues par la région Strasbourgeoise, une base de données géohistoriques a été créée par le Laboratoire Image, Ville et Environnement, puis régulièrement enrichie. Elle contient notamment des orthophotographies et couches vectorielles décrivant le bâti et la voirie depuis les années 1930, ainsi qu'une couche d'îlots historiques. Les traitements réalisés lors du travail décrit dans ce mémoire ont notamment permis d'incorporer à cette base une série couches décrivant la végétation du Nord de l'Eurométropole pour les années 1956, 1978, 1998, 2008 et 2013, puis de renseigner la hauteur du bâti à l'aide d'un relevé LiDAR. Des corrections ont également été apportées à certaines données préexistantes, qui comportaient un nombre import d'erreurs de géométrie et de topologie. A l'aide des couches de végétation nouvellement créées et de celles du bâti enrichies, dix indicateurs morphologiques ont été calculés à l'échelle des îlots historiques : coefficient d'emprise au sol pour la végétation, le bâti puis le vide, diversité des surfaces de végétation et de bâti, diversité des hauteurs du bâti, densité de patch de la végétation, compacité médiane du bâti, puis les hauteurs maximale et médiane du bâti. Une classification k-moyennes a ensuite été réalisée sur la série temporelle des indicateurs calculés entre 1956 et 2013, afin d'identifier des classes de dynamiques urbaines. Cette classification a permis d'identifier les grandes étapes de l'évolution du Nord de l'Eurométropole des soixante dernières années, dont les dates charnières sont les années 1970 et 1990. Ces évolutions concernent ainsi les espaces urbains (artificialisation, densification...) mais également ruraux (déprise agricole) et forestiers (fermeture, fragmentation...).

Mots clés : Système d'Information Géographique (SIG), Dynamiques urbaines, Morphologie urbaine, Indicateurs morphologiques, Classification, Analyse diachronique, Eurométropole de Strasbourg.

Resumen : Este trabajo presenta los resultados de una metodología exploratoria que busca describir las dinámicas urbanas del norte de la Euro-metrópolis de Estrasburgo entre los años 1956 a 2013. Dentro de la óptica del estudio de las dinámicas urbanas de la Región de Estrasburgo, una base de datos Geo-historica fue creada por el Laboratorio imagen, ciudad y ambiente (LIVE) contenidoendo orto-fotografías, capas de vectores que describen las edificaciones y carreteras después los años 1930, además de una capa de islotes históricos. Los tratamientos realizados en el trabajo han permitido de ajustar a esta base de datos, capas de información que describen la vegetación al norte de la Euro-metropolis, por los años 1956, 1978, 1998, 2008 y 2013. Con la ayuda de informaciones derivadas del LiDAR se obtuvo la altura de los edificios y también fueron corregidos ciertos datos que poseían errores topológicos y geométricos. Con la ayuda de los datos recientemente creados de vegetación y de las edificaciones mejoradas, diez indicadores morfológicos han sido calculados: coeficientes de influencia en el suelo para la vegetación, áreas construidas y no construidas, Diversidad de las superficies de vegetación y de edificaciones, Diversidad de las alturas de edificaciones, Densidad del parche de la vegetación, Compacidad media del edificado, Altura media y Altura máxima de edificaciones. Una clasificación K-Means ha sido realizada posteriormente al conjunto de los indicadores sobre cada período de estudio con el fin de identificar clases de dinámicas urbanas. Esta clasificación a permitido identificar las grandes etapas de la evolución del norte de la Euro-metrópolis dentro de los últimos sesenta años, donde las fechas principales son los años 1970 y 1990. Estas evoluciones conciernen así a los espacios urbanos (artificialización, densificación), rurales (declive agrícola) y forestal (densificación, fragmentación).

Palabras claves: Sistema de Información Geográfica (SIG), Dinámica urbana, morfología urbana, indicadores morfológicos, clasificación, análisis diacrónico, Euro-metrópolis de Estrasburgo.