L'Institut wallon de l'évaluation,
de la prospective et de la statistique

Wallonie
Iweps

DYNAMIQUES RÉGIONALES

2019

N° 8

Nouveaux outils de suivi et d'anticipation pour le développement territorial wallon : apport du projet SmartPop



COLOPHON

La revue *Dynamiques régionales* s'inscrit dans les missions de l'IWEPS. Institut scientifique régional au carrefour des champs de la décision politique et de la recherche scientifique, l'IWEPS poursuit l'ambition de donner davantage de visibilité aux travaux scientifiques susceptibles de contribuer au débat public et à la conduite de la politique régionale. Dans cette visée mobilisatrice, *Dynamiques régionales* offre aux chercheurs une opportunité de diffusion des résultats de recherches dont le point commun est de porter sur des questions d'intérêt pour la Wallonie. Pour autant, ils ne se focalisent pas nécessairement sur la Wallonie : les études menées dans d'autres pays ou régions peuvent être riches d'enseignements, fertiliser l'expertise wallonne et éclairer les décisions de nos responsables politiques.

Création graphique : **Déligraph, Bruxelles**

Mise en page : **Snel Grafics SA, Vottem**
www.snel.be

Éditeur responsable : **Sébastien Brunet**
(Administrateur général, IWEPS)

Dépôt Légal : D/2019/10158/3

ISSN : 2593-4937

Disponible sur https : www.cairn.info/

Reproduction autorisée, sauf à des fins commerciales, moyennant mention de la source.

IWEPS

Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique

Route de Louvain-La-Neuve, 2
5001 BELGRADE - NAMUR

Tél : 32 (0)81 46 84 11

Fax : 32 (0)81 46 84 12

http ://www.iweps.be

info@iweps.be

COMITÉ DE RÉDACTION

Directeur de la publication : Sébastien Brunet

Rédactrices en chef : Claire Dujardin, Virginie Louis et Síle O'Dorchai

Coordination de l'édition : Évelyne Istace

Membres du Comité de rédaction :
Sébastien Brunet
Marc Debuisson
Jean-Luc Guyot
Abdeslam Marfouk
Amandine Masuy
Isabelle Reginster
Vincent Scourneau
Frédéric Verschueren
Frédéric Vesentini

CONSEIL SCIENTIFIQUE

Lionel Artige (ULg)
Marc Bourgeois (ULg)
Michele Cincera (ULB)
Éric Cornélis (UNamur)
Christian de Visscher (UCL)
Catherine Dehon (ULB)
Marcus Dejardin (UNamur et UCL)
Pierre Desmarez (ULB)
Thierry Eggericks (UCL)
Jean-Marie Halleux (ULg)
Bertrand Hamaide (FUSL)
Marc Jacquemain (ULg)
Benoît Mahy (UMons)
Quentin Michel (ULg)
Marthe Nyssen (UCL)
Dominique Peeters (UCL)
Nathalie Schiffino (UCL)
Ilan Tojerow (ULB)
Edwin Zaccai (ULB)
Marc Zune (UCL)

TABLE DES MATIÈRES

05 **INTRODUCTION : DES OUTILS POUR MIEUX AMÉNAGER LE TERRITOIRE ET LUTTER CONTRE L'ÉTALEMENT URBAIN**

Par Julien Charlier

15 **VERS UNE MÉTHODOLOGIE OPÉRATIONNELLE DE CARTOGRAPHIE À TRÈS HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE DE L'OCCUPATION ET DE L'UTILISATION DU SOL EN WALLONIE**

Par Benjamin Beaumont, Tais Grippa, Moritz Lennert, Nathalie Stephenne, Soukaina Zarougui, Jean-Claude Jasselette, Laura Van de Vyvere, Éléonore Wolff

35 **CARTOGRAPHIE DÉTAILLÉE DE LA DENSITÉ DE POPULATION : COMPARAISON DE MÉTHODES DASYMÉTRIQUES**

Par Eric Hallot, Odile Close, Tais Grippa, Benjamin Beaumont, Nathalie Stephenne, Éléonore Wolff

57 **LONG-TERM SIMULATION OF URBAN DEVELOPMENT IN SUPPORT OF SPATIAL PLANNING POLICY**

By Lien Poelmans, Inge Uljee, Wim Clymans, Éric Hallot

INTRODUCTION : DES OUTILS POUR MIEUX AMÉNAGER LE TERRITOIRE ET LUTTER CONTRE L'ÉTALEMENT URBAIN

Julien Charlier, IWEPS[1]

[1] Julien Charlier, Observatoire du développement territorial – IWEPS, j.charlier@iweps.be

Ce numéro de « Dynamiques régionales » est consacré à l'étude du territoire wallon et plus particulièrement au développement de nouveaux outils permettant de mieux connaître la façon dont il est utilisé et comment la population y est répartie, mais aussi de mieux appréhender ses évolutions futures.

Comme tous les territoires, le territoire wallon évolue, se transforme sous l'effet de démarches et d'actions menées par un ensemble d'acteurs (décideurs, ménages, entreprises, etc.). Il accueille différentes activités humaines qui ont une emprise plus ou moins grande au sol et qui échangent entre elles des flux de personnes et de matières. L'aménagement du territoire vise à organiser au mieux la façon dont les activités humaines sont réparties sur le territoire déterminant ainsi les flux qui y prennent place. Cette politique transversale fait face aux grands défis de nos sociétés occidentales du XXIe siècle : assurer le bien-être de tous dans le respect de l'environnement du niveau local au mondial. Au niveau wallon, l'enjeu est de faire face à ces défis tout en répondant à la demande en logements, liée à la croissance démographique (des ménages surtout[2]), et à la demande en espaces pour les activités humaines, économiques ou autres.

[2] Les dernières perspectives de population et de ménages du Bureau fédéral du Plan prévoient pour la Wallonie une croissance de population d'environ 188 000 habitants (129 000 ménages) sur la période 2017-2030 et 392 000 habitants (269 000 ménages) sur la période 2017-2050. La croissance du nombre des ménages implique la création de nouveaux logements sur le territoire. Source : Bureau fédéral du Plan et Statbel, 2018. Perspectives démographiques 2017-2070 - Population et ménages, Perspectives, Février 2018, 59 p.

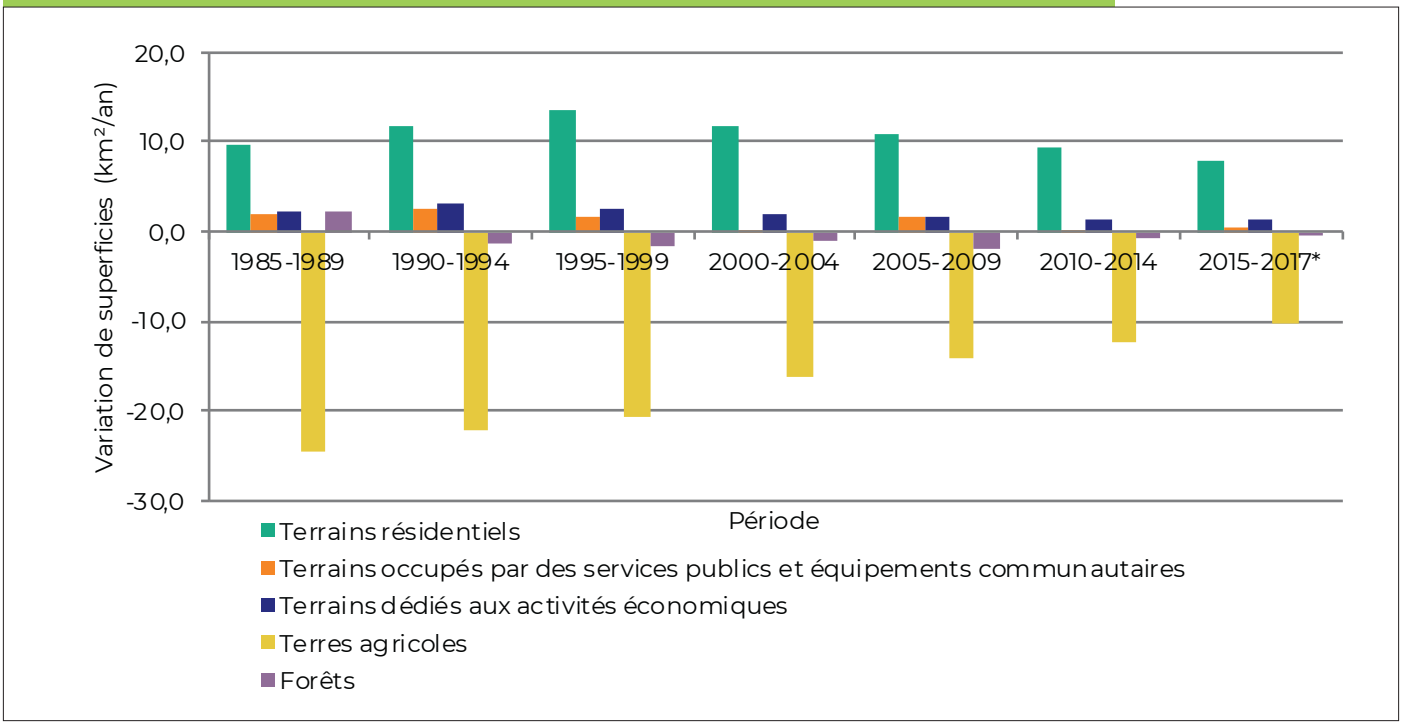
1 DEUX DYNAMIQUES TERRITORIALES MARQUANTES : L'ARTIFICIALISATION DU SOL ET SA DISPERSION SPATIALE

Sur le territoire, les occupations et utilisations du sol évoluent. Une des dynamiques les plus marquantes est l'artificialisation des terres, c'est-à-dire le retrait de surfaces de leur état naturel, forestier ou agricole pour des espaces artificialisés bâtis ou non bâtis (espaces verts urbains, équipements sportifs et de loisirs, etc.). Les espaces qui subissent une artificialisation ne sont généralement plus disponibles pour des usages tels que l'agriculture ou comme habitats naturels. Une fois artificialisé, un terrain ne retourne que très rarement à un état non artificialisé.

En Wallonie, en 2018, les terrains artificialisés occupaient entre 1 790 et 2 670 km² du territoire, soit entre 11 et 16 % de la superficie totale de la région[3] (la superficie de la Wallonie étant de 16 901 km²). Depuis 1985, ils ont connu une croissance de 42 %, soit un rythme moyen d'artificialisation de 16 km²/an. L'artificialisation du territoire wallon s'explique essentiellement par la consommation de terres pour la fonction résidentielle (logements, jardins et espaces associés), dont la superficie est passée de 723 km² à 1 083 km² sur la même période (soit une augmentation de 49,8 %), principalement au détriment des terres agricoles (figure 1). L'accroissement de la superficie dédiée aux terrains à usage industriel ou artisanal ainsi qu'aux terrains occupés par des services publics et équipements communautaires a également contribué à la progression de l'artificialisation, mais dans une moindre mesure.

De 1985 à 2018, le rythme de l'artificialisation n'a pas été constant (figure 1). La crois-

Figure 1 : Gains/pertes (annuels) de superficies des principales utilisations du sol par période de cinq ans



Source : SPF Finances/AGDP- Base de données Bodem/Sol au 1er janvier 1985, 1990, 1995, 2000 et de 2002 à 2018 ; Nomenclature Conférence permanente du développement territorial (CPDT)- Service Public de Wallonie (SPW)/DGO3-IWEPS ; Calculs IWEPS, 2018. Note* : La dernière période du graphique représente une période de trois ans plutôt que cinq.

[3] Source : IWEPS à partir des données du SPF Finances/ Administration générale de la Documentation patrimoniale (AGDP)

sance des terrains artificialisés a été la plus intense durant les années 90, avec une artificialisation moyenne de plus de 18 km²/an, soit plus de 4,9 ha par jour. Durant les années 2000, l'artificialisation moyenne est descendue à environ 16 km²/an. Elle a encore baissé entre 2010 et 2018, tombant à 12,2 km²/an, soit 3,3 ha/jour.

Une seconde dynamique territoriale en cours sur le territoire wallon accompagne l'artificialisation des terres : sa dispersion spatiale, soit l'éparpillement sur le territoire des zones bâties. Les deux dynamiques sont fréquemment rassemblées dans ce que l'on appelle l'étalement urbain (*urban sprawl* en anglais).

La problématique de l'étalement urbain, de ses causes, de ses conséquences et des remèdes à y apporter, fait depuis plusieurs années partie des champs d'analyses de nombreux chercheurs, tant au niveau international (OECD, 2018 ; EAA-FOEN, 2016), qu'au niveau wallon (CPDT, 2002 ; CPDT, 2003 ; CPDT, 2005 ; CPDT, 2010 ; CPDT, 2011 ; Eggerickx *et al.*, 2001 ; Charlier *et al.*, 2011).

L'artificialisation des sols et sa dispersion sur le territoire produisent des incidences négatives (pressions sur l'environnement et sur notre capacité à produire notre alimentation, coûts supplémentaires pour la collectivité par l'extension des réseaux notamment) et conduisent à la perte d'efficacité (économique et environnementale) de l'organisation territoriale.

Un état des lieux de l'étalement urbain des pays/régions européens a été réalisé en 2016 par l'Agence européenne de l'environnement (EAA-FOEN, 2016) et a montré que la Belgique présentait un étalement prononcé. D'autres études mettent en évidence la dispersion de l'habitat sur le territoire wallon (Charlier *et al.*, 2011 ; Halleux et Strée, 2012 ; CPDT, 2018 ; Charlier et Reginster, 2017 ; IWEPS, 2018[4] ; El Saeid Mustafa *et al.*, 2018a).

En particulier, en Wallonie, la dispersion de l'urbanisation (lieux d'habitat et de travail) sur le territoire a augmenté la dépendance des Wallons aux énergies fossiles pour leurs déplacements, rendant difficile la mise en place d'une « société bas carbone », pourtant nécessaire face aux défis climatiques[5] et énergétiques.

4 Fiche de développement territorial n°4 de l'ODT-IWEPS consultable à l'adresse https://www.iweps.be/wp-content/uploads/2018/12/Fiche-4_EtalementUrbain_vnov18.pdf

5 Dans le cadre de son décret «climat» du 20/02/2014, la Wallonie a prévu de réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à 1990 de 30 % d'ici 2020 et de 80 à 95 % d'ici 2050. Par ailleurs, dans le cadre du règlement (UE) 2018/842 et des directives relatives à l'énergie (directives 2009/28/CE et 2012/27/UE), qui s'inscrivent dans la suite de l'Accord de Paris sur le climat, le Plan wallon énergie climat 2030, contribution wallonne au futur Plan national énergie climat (PNEC), devrait prévoir des mesures encore plus ambitieuses.

2 LUTTER CONTRE L'ARTIFICIALISATION DU SOL ET L'ÉTALEMENT URBAIN : UN OBJECTIF POLITIQUE DIFFICILE À METTRE EN ŒUVRE

Bien qu'affichant depuis un certain nombre d'années la volonté d'utiliser plus parcimonieusement le sol et de lutter contre l'étalement urbain, les politiques d'aménagement du territoire et de développement territorial mises en place jusqu'à présent en Wallonie n'ont pas réussi à contenir l'étalement urbain et ses incidences négatives (SPW-DG03-DEMNA-DEE, 2017). Parallèlement, un désinvestissement chronique dans les villes de grande taille a continué à les rendre moins attractives pour les habitants, alimentant ainsi les dynamiques d'étalement urbain (Charlier *et al.*, 2016). Ces processus ont également été favorisés par la demande des ménages et par des coûts de mobilité relativement faibles[6].

Face à cette situation, vécue en Wallonie, comme dans d'autres pays et régions, et à l'urgence d'agir pour répondre aux défis environnementaux et de cohésion sociale, les intentions des pouvoirs publics ont été réaffirmées et de nouvelles décisions politiques sont aujourd'hui prises pour préserver cette ressource limitée qu'est le sol et lutter contre l'étalement urbain.

Au niveau européen, la Commission européenne a, dès 2011, invité les États membres à atteindre d'ici 2050 le « *no net land take* », c'est-à-dire d'éviter toute augmentation nette de la surface de terres artificialisées (« Feuille de route pour une Europe efficace dans l'utilisation des ressources (COM (2011) 571) »).

L'étalement urbain fait partie des défis en Belgique, où la compétence de l'aménagement et du développement territorial est régionalisée (voir encadré 1). Le Gouvernement flamand a approuvé en novembre 2016 un « Livre blanc » relatif à sa politique territoriale (Ruimte Vlaanderen, 2016). Une mesure phare concerne précisément la réduction de la consommation d'espaces bâtis. Dans une première étape, l'objectif est de réduire la consommation de terre pour le bâti de six à trois hectares par jour pour 2025. Dans une seconde étape, la consommation de nouveaux espaces serait définitivement stoppée en 2040. En Wallonie, le CoDT – Code wallon du développement territorial (voir encadré 1) – entré en vigueur le 1er juin 2017, a fait de la lutte contre l'étalement urbain un objectif principal, avec notamment la densification des villes et villages et la reconversion des friches visant à reconstruire la ville sur la ville, ainsi que la mise en œuvre de quartiers nouveaux moins consommateurs d'espace. Le Schéma de Développement du Territoire (SDT), au stade de projet en février 2019, devrait compléter le CoDT, avec une déclinaison de ces objectifs dans différents domaines et des principes de mise en œuvre pour la Wallonie. Le projet de SDT, adopté par le Gouvernement wallon le 12 juillet 2018, prévoit notamment la mesure suivante : « réduire la consommation des terres non artificialisées à 6 km²/an d'ici 2030, soit la moitié de la superficie consommée actuellement et tendre vers 0 km²/an à l'horizon 2050. Cette mesure devra s'accompagner, notamment, d'un mécanisme permettant de compenser un projet d'artificialisation par un recyclage de terres déjà artificialisées ». Cette mesure a été vulgarisée dans la presse par les termes « stop béton ».

Concrètement, outre les envies résidentielles des ménages et les autres raisons abordées plus haut, la lutte contre l'étalement urbain en Wallonie reste confrontée

[6] Dans leurs choix résidentiels, les ménages s'efforcent de maximiser leur bien-être individuel (ou « utilité » dans le domaine économique), tenant compte des contraintes de coût (avec deux grands postes : le coût du logement et le coût de la mobilité). Les choix résidentiels sont donc le fruit de compromis et d'arbitrages entre une série de critères liés à la localisation et de critères non liés à la localisation, comme le confort et la taille du logement. Pendant longtemps, l'offre foncière périphérique abondante, les faibles coûts de la mobilité individuelle et le développement des infrastructures de communication ont permis aux ménages d'élargir leur espace-temps et d'alimenter la dispersion de l'urbanisation.

à une difficulté juridique, morale et financière de taille : une superficie élevée de terrains à bâtir, principalement dans des territoires excentrés peu accessibles en transports en commun, qu'il est difficile de rendre non constructible. En effet, cette disponibilité foncière pour l'urbanisation est pratiquement irréversible, car le déclassement de ces terrains à bâtir en terrains non bâtissables pourrait impliquer le dédommagement financier des propriétaires et coûterait donc beaucoup à la collectivité, en plus de fâcher nombre de propriétaires. Aucun des gouvernements successifs n'a trouvé de solutions concrètes à cette problématique. D'autres approches sont dès lors envisagées, notamment en essayant de favoriser la construction et la rénovation dans des lieux de vie déjà existants et en particulier dans les villes où les services et équipements sont déjà présents. Une récente recherche de la CPDT (2018b) synthétise l'ensemble des facteurs alimentant l'étalement urbain et rassemble une série de politiques envisageables pour lutter contre celui-ci. Ces politiques concernent non seulement la politique spécifique de l'aménagement du territoire, mais également la politique fiscale, de la mobilité, du logement, de la ville, la gouvernance locale, etc. Vu cette transversalité dans les facteurs, les solutions et les impacts, vu aussi l'importance et l'urgence des enjeux, le développement territorial et la lutte contre l'étalement urbain, tout comme la transition vers une société bas carbone, devraient constituer une priorité et irriguer l'ensemble des politiques de façon transversale. Ils devraient s'accompagner de réflexions poussées sur les nouveaux modes d'habiter, la gestion foncière et les nouvelles mobilités, ainsi que d'une sensibilisation plus poussée des citoyens à ces enjeux afin de mieux les faire comprendre et accepter.

Encadré 1 : Les principaux documents légaux de l'aménagement du territoire en Wallonie

Le Code de développement territorial – CoDT – est entré en vigueur le 1er juin 2017. Il installe une nouvelle législation qui rassemble l'ensemble des règles applicables en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme. Il succède au CWATUP, le Code wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine.

Le CoDT définit des outils d'aménagement et d'urbanisme, dont le plan de secteur. Celui-ci définit principalement, par zones, les affectations auxquelles le sol doit être réservé. Le territoire wallon se trouve ainsi découpé en zones d'habitat, zones d'activités économiques, zones de services publics et d'équipements communautaires, zones agricoles, zones forestières, etc. Certaines zones peuvent être bâties (zones destinées à l'urbanisation) et d'autres pas (article D.II.23).

Le Schéma de Développement du Territoire pour la Wallonie (SDT) devrait, au même titre que le Schéma de Développement de l'Espace régional (SDER), définir la stratégie territoriale pour la Wallonie sur la base d'une analyse contextuelle, à l'échelle régionale (article D.II.2 du CoDT). Il est actuellement en cours d'élaboration.

3 L'IMPORTANCE DES OUTILS DE SUIVI ET D'ANTICIPATION POUR MIEUX AMÉNAGER LE TERRITOIRE

Dans ce contexte où les choix actuels et passés en matière de développement territorial sont plus que jamais importants, décrire l'état du territoire wallon et les dynamiques qui y prennent place, ainsi que modéliser ses évolutions futures possibles, sont des tâches essentielles. Ce numéro de « Dynamiques régionales » est consacré à des outils développés dans le projet SmartPop (*Spatially plan the population growth in Wallonia and, in particular, in Liège for shaping Smart Cities*). Ce projet, financé par le Fond Moerman et Belspo dans le cadre du programme STEREO III, a été réalisé de 2015 à 2018 par plusieurs partenaires : l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP), l'Université libre de Bruxelles (ULB), le *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* (VITO), le Service public de Wallonie (SPW) et la Ville de Liège.

Ce « Dynamiques régionales » synthétise trois « *working packages* » du projet SmartPop en autant d'articles.

Le premier article décrit la mise en place d'une nouvelle méthodologie opérationnelle de cartographie de l'occupation (*Land Cover – LC*) et de l'utilisation du sol (*Land Use - LU*) en Wallonie. Depuis la carte numérique d'occupation du sol de Wallonie (COSW) développée par le SPW-DGO3 en 2007, le suivi de l'occupation/utilisation du sol et donc de l'artificialisation du territoire se fait essentiellement à partir des données géographiques issues du cadastre (SPF Finances/AGDP) qui comportent plusieurs limites[7]. La principale est l'absence d'informations concernant les terrains non cadastrés (5,2 % du territoire en 2018). Elle empêche d'avoir une vue complète de l'occupation/utilisation du sol en Wallonie et notamment des terrains artificialisés.

Pour la politique d'aménagement du territoire (notamment le suivi des mesures du SDT), mais aussi pour la gestion de l'environnement, de l'agriculture et d'autres domaines, il est nécessaire de pouvoir disposer de données géographiques récurrentes et de qualité sur l'occupation et l'utilisation du sol. C'est d'ailleurs une obligation imposée par la directive européenne INSPIRE, qui fixe le cadre d'une infrastructure d'information géographique en Europe (voir encadré 2 de l'article 1). C'est pourquoi le SPW et, en particulier, le département de la Géomatique du Secrétariat général (SPW-SG-DGEO), développent avec différents partenaires une infrastructure d'information géographique wallonne. Dans ce cadre, les travaux sur les cartographies d'occupation et d'utilisation du sol développés dans le projet SmartPop (Beaumont *et al.*, 2017) sont d'une grande aide pour envisager une production récurrente et se poursuivent en 2018-2020 avec une autre équipe dans un autre projet appelé WALOUS[8]. Par rapport aux données utilisées précédemment (données du cadastre essentiellement), l'originalité de ces deux approches pour la Wallonie est qu'elles intègrent des images satellitaires et des photographies aériennes.

Le deuxième article cherche à évaluer plus précisément la localisation de la population sur le territoire wallon. Au début du projet SmartPop, le niveau géographique le plus fin pour lequel le chiffre de population au lieu de résidence était connu correspondait au secteur statistique[9]. L'intérêt était grand de désagréger cette information à un niveau encore plus fin comme, par exemple, dans une grille de carreaux de 1 ha (100m x 100m) découpant le territoire wallon. En effet, connaître la population à cette échelle spatiale offre des possibilités d'analyse

7 Pour une description de cet outil et de ses limites, voir : https://www.iweps.be/indicateur-statistique/utilisation-du-sol/

8 Le projet WALOUS, réalisé par l'UCL, l'ULB et l'ISSeP, est financé par le SPW (la DGO3 et le SG-DGEO). Plus d'informations sur le site : www.walous.be

9 Le secteur statistique est l'unité territoriale de base qui résulte de la subdivision du territoire des communes et anciennes communes par l'Institut national de Statistique (INS) pour la diffusion de ses statistiques à un niveau plus fin que le niveau communal (Jamagne, 2012).

beaucoup plus fine du territoire pour toute une série de domaines (voir article 2 et Charlier et Reginster, 2018) notamment pour améliorer les modèles de risques développés par l'ISSeP pour l'administration wallonne. Depuis, la localisation des adresses du Registre national des personnes physiques, réalisée par Statbel et le SPF Finances, permet de produire des données géographiques très précises (Charlier et Reginster, 2018). Cependant, les contraintes liées au respect de la vie privée restreignent la diffusion de ces données fines. La méthodologie proposée dans ce deuxième article aboutit à une cartographie fine de la localisation de la population anonyme et libre d'accès.

Enfin, le troisième et dernier article présente un travail de modélisation de l'évolution de l'utilisation du sol en Wallonie. À partir des projections de croissance de la population et de l'activité économique, le modèle développe des scénarios d'artificialisation et de répartition des activités et de la population sur le territoire jusque 2050. Les scénarios d'un tel modèle laissent entrevoir les futurs possibles en fonction de tendances ou de décisions prises aujourd'hui. Ils offrent aussi la possibilité d'anticiper certains risques et d'orienter les politiques actuelles (priorisation ou légitimation des actions). Les auteurs ont notamment simulé, à l'aide de leur modèle, le scénario où la Wallonie tendrait vers le « stop béton » en 2050, conformément à la mesure figurant dans le projet de SDT. Ce modèle, développé également en Flandre (Poelman *et al.*, 2015), est utilisé par le département de l'aménagement du territoire de la Région flamande (*Departement Omgeving*, précédemment *Ruimte Vlaanderen*) qui en a fait un outil d'aide à la décision. Il est également possible de combiner le modèle du projet Smartpop avec d'autres modèles développés récemment, prenant mieux en compte les différents niveaux de densité de l'urbanisation existante et modélisant des transitions entre ces niveaux de densité (plutôt qu'une approche binaire de l'urbanisation, c'est-à-dire construit versus non-construit) (El Saeid Mustafa *et al.*, 2018b).

Les différents outils développés dans le projet SmartPop et décrits dans ces trois articles apportent une meilleure connaissance de l'état du territoire wallon et une meilleure appréciation des dynamiques territoriales qui y prennent place. Ils doivent contribuer à une planification intelligente et durable du territoire wallon et permettre ainsi aux autorités locales et régionales de prendre les mesures les plus adéquates pour répondre aux enjeux sociaux et environnementaux actuels.

Les trois articles constituent des synthèses de rapports techniques disponibles à l'adresse : www.smartpop.be

Ces rapports sont les suivants :

- Beaumont B., Hallot E., Jacques D., Poelmans L. & Wolff E., 2019. Spatially plan the population growth in Wallonia and, in particular, in Liège for shaping Smart Cities. Final report, pp. 1-30.
- Beaumont B. & Wolff E., 2018. Land Cover and Land Use mapping. SmartPop WP2 final report, pp. 1-172.
- Jacques D. & Wolff E., 2018. Dynamic population mapping using mobile phone data. SmartPop WP3 final report, pp. 1-33.
- Poelmans L., Uljee I., Van der Meulen M., Verarchtert E., Lauwaet D. & Hallot E., 2018. Multi-level modelling of Land Use and population dynamics. SmartPop WP4 final report, pp. 1-96.

BIBLIOGRAPHIE

Beaumont B., Grippa T., Lennert M., Vanhuysse S., Stephenne N., Wolff E., 2017. Toward an operational framework for fine-scale urban land-cover mapping in Wallonia using submeter remote sensing and ancillary vector data. J. Appl. Remote Sens. 11(3), 036011 (2017).

Charlier J. et Reginster I., 2018. Mesures de la densité de population et du degré d'urbanisation dans le cadre des recommandations européennes : applications à la Belgique et la Wallonie. Working paper - IWEPS, n°25, mars 2018, Namur, 35p.

Charlier J. et Reginster R., 2017. Artificialisation et utilisation résidentielles du sol en Wallonie : quelles tendances récentes (2000-2015) ? dans Dynamiques régionales n°5, IWEPS, pp.52-69.

Charlier J., Debuisson M., Duprez J.-P., Reginster I., 2016. Mouvements résidentiels en Wallonie (1994-2014) : analyses des migrations intercommunales et construction de bassins résidentiels, Working paper de l'IWEPS n°21, Namur, 82 p.

Charlier J., Reginster I. et Juprelle J., 2011. Étude de la localisation résidentielle récente et analyse au regard de critères de développement territorial durable. Working Paper de l'IWEPS, n°2, août 2011.

Charlier J. & Reginster I, 2010. L'évolution de la superficie résidentielle par habitant : un indicateur de développement territorial durable ?, Discussion Paper – IWEPS, n°1001, janvier 2010, 38 p.

CPDT, 2002. Les coûts de la désurbanisation, Études et documents 1, CPDT-MRW, 135 p.

CPDT, 2003. Contribution du développement territorial à la réduction de l'effet de serre, Partie I, Évaluation de mesures à prendre en aménagement du territoire pour limiter la croissance de la mobilité – voiture, Conférence Permanente de Développement Territorial, Thème 2, Région wallonne, Rapport final de la subvention 2002-2003, septembre 2003

CPDT, 2005. Protocole de Kyoto : aménagement du territoire, mobilité et urbanisme – Mesures pour faciliter l'adhésion de la Région wallonne au Protocole de Kyoto et pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, Études et documents 6, CPDT-MRW, 230 p.

CPDT, 2010. Rapport final du thème 2A – Les effets du pic pétrolier sur le territoire, rapport final + annexes, octobre 2010.

CPDT, 2011. Rapport final du thème 2B - Structuration du territoire pour répondre aux objectifs de réduction des émissions des gaz à effets de serre, rapport final + annexes, octobre 2011, 99p.

CPDT, 2018a. *Schéma de Développement du Territoire : Contribution de la CPDT à l'analyse contextuelle*, Notes de recherche n°74, mars 2018, 101 p.

CPDT, 2018b. Gérer le territoire avec parcimonie - Rapport final de la recherche R.7. Conférence Permanente du Développement Territorial, Accessible en ligne sur : https ://cpdt.wallonie.be/

CPDT (Halleux JM et Strée J.), 2012. Production de l'habitat et enjeux territoriaux, partie 1 : les modes de production, rapport final de la partie 1 de la recherche CPDT I5, Région wallonne, octobre 2012.

EAA-FOEN- European Environment Agency and Federal Office for the Environment (2016), « Urban sprawl in Europe », Joint EEA-FOEN report, 135p.

Eggerickx T., Capron, C., Hermia, J-P., Oris, M., Poulain M. et Van der Straten E. (2001), « Démographie, aménagement du territoire et développement durable de la société belge », Services fédéraux des affaires scientifiques, techniques et culturelles, Leviers d'une politique de développement durable, Interactions entre population, environnement et développement, SSTC : Bruxelles, 2001.

El Saeid Mustafa A. M., Saadi I., Cools M. & Teller J. (2018a). "Understanding urban development types and drivers in Wallonia. A multi-density approach", *International Journal of Business Intelligence and Data Mining*, 13 (Nos. 1/2/3), 309–330. http ://hdl.handle.net/2268/215423

El Saeid Mustafa A. M., Heppenstall A., Omrani H., Saadi I., Cools M., & Teller J. (2018b). "Modelling built-up expansion and densification with multinomial logistic regression, cellular automata and genetic algorithm", *Computers, Environment and Urban Systems*, 67, 147-156. http ://hdl.handle.net/2268/215639

European Commission (2011) Roadmap to a Resource Efficient Europe, (COM/ 2011/0571). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. Available from : http ://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/about/roadmap/index_en.htm

Jamagne P. (avec la collaboration de Pierre Lebrun et de Claude Sajotte), 2012. Secteurs statistiques : Vade-mecum, Direction générale Statistique et Information économique - SPF Economie (ex-INS), Bruxelles, 66p.

OECD (2018), Rethinking Urban Sprawl : Moving Towards Sustainable Cities, OECD Publishing, Paris.
http ://dx.doi.org/10.1787/9789264189881-en

Poelmans L., White R., Engelen G., Uljee I., 2015, Modeling in Support of Spatial Planning and Policy Making : The example of Flanders, chap. 11, in Modeling Cities and Regions as Complex Systems, WHITE, R. ET AL. EDS., The MIT Press, 330 p.

SPW-DG03-DEMNA-DEE, 2017. Rapport sur l'état de l'environnement wallon 2017 (REEW 2017), 368p.

VERS UNE MÉTHODOLOGIE OPÉRATIONNELLE DE CARTOGRAPHIE À TRÈS HAUTE RÉSOLUTION SPATIALE DE L'OCCUPATION ET DE L'UTILISATION DU SOL EN WALLONIE

Benjamin Beaumont, ISSeP[1]
Tais Grippa, ULB[2]
Moritz Lennert, ULB[3]
Nathalie Stephenne, SPW[4]
Soukaina Zarougui, ULB[5]
Jean-Claude Jasselette, SPW[6]
Laura Van de Vyvere, ISSeP[7]
Éléonore Wolff, ULB[8]

[1] Benjamin Beaumont, ISSeP, Attaché, b.beaumont@issep.be
[2] Tais Grippa, ULB, Chercheur, tgrippa@ulb.ac.be
[3] Moritz Lennert, ULB, Docteur, mlennert@ulb.ac.be
[4] Nathalie Stephenne, SPW, Attaché, nathalie.stephenne@spw.wallonie.be
[5] Soukaina Zarougui, ULB, Chercheur
[6] Jean-Claude Jasselette, SPW, Directeur DGEO, jeanclaude.jasselette@spw.wallonie.be
[7] Laura Van de Vyvere, ISSeP, Attaché, l.vandevyvere@issep.be
[8] Éléonore Wolff, ULB, Professeur, ewolff@ulb.ac.be

RÉSUMÉ

Pour répondre aux obligations et recommandations de la directive européenne INSPIRE, les autorités wallonnes souhaitent valoriser leur riche catalogue de géodonnées et de données d'observation de la Terre pour développer de nouvelles méthodologies opérationnelles de cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol. Les acteurs wallons compétents en aménagement du territoire et en gestion de l'environnement sont contraints, à l'heure actuelle, de travailler avec des données d'occupation et d'utilisation du sol non mises à jour, incomplètes et à l'information thématique mélangée. La carte de référence actuelle, la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie, en abrégé la COSW, a en effet plus de dix ans et une légende mixte en occupation et utilisation du sol. Cet article traite du développement de deux méthodes de classification semi-automatisée orientée-objet pour la cartographie à très haute résolution spatiale de l'occupation et de l'utilisation du sol en milieu urbain, avec la ville de Liège (Belgique) comme cas d'étude, dans le cadre du projet SmartPop. Premièrement, une carte d'occupation du sol est produite par classification automatisée de données d'observation de la Terre multispectrale et tridimensionnelle acquises par capteurs aéroportés sur la période 2012-2014. Cette carte est ensuite améliorée par combinaison avec des bases de données géographiques disponibles sur la Wallonie. Le produit final est une carte d'occupation du sol répondant aux recommandations techniques d'INSPIRE. L'exactitude globale de la carte est supérieure à 90 %. Un tel produit offre de nouvelles opportunités pour le suivi de l'environnement et du territoire à grande échelle, notamment par son unité minimale de collecte fixée à 15 m^2. Deuxièmement, une méthodologie automatique de cartographie de l'utilisation du sol, proposant plusieurs niveaux de représentation, a été développée. Ces premiers résultats ont permis d'envisager leur application à l'échelle de la Wallonie. L'automatisation et la robustesse des procédures doivent être renforcées. Des séries temporelles de données satellitaires Sentinel seront également intégrées au processus de cartographie de l'occupation du sol afin d'améliorer la qualité thématique des classes de végétation. Cette opérationnalisation devra déboucher sur de nouvelles cartographies régionales représentatives de l'année 2016, dont la publication est attendue pour 2020.

Mots-clés : occupation du sol, utilisation du sol, classification orientée-objet, observation de la terre, plan opérationnel géomatique pour la Wallonie.

ABSTRACT

Following the EU INSPIRE directive recommendations and obligations, the Walloon authorities want to develop operational land cover and land use mapping methods using existing geodata. Urban planners and environmental monitoring stakeholders of Wallonia currently have to rely on outdated, mixed and incomplete land cover and land use information. The current reference map is ten years old. This paper develops two semi-automated object-based classification frameworks for the detailed urban land cover and land use mapping of the city of Liège, Belgium. Firstly, the land cover mapping approach relies on the automated classification of multispectral and tridimensional data provided by aerial sensors for the period of 2012 to 2014. The land cover map is then improved by combining the classified Earth Observation data with existing geographical datasets. A land cover map, compliant with the INSPIRE directive specifications, is finally produced. Its overall accuracy value is above 90 %. Such a detailed land cover map offers new opportunities for fine-scale environmental monitoring and spatial planning activities. Secondly, an automated methodology is proposed for mapping land use at different scales. It integrates spatial variables derived from the land cover map and from existing geographical datasets into a multi-scalar land use mapping scheme. In line with INSPIRE, these first results pave the way for the development of complying regional datasets. The transfer of these methods at the scale of the whole region of Wallonia is under development, using the latest available data (2016). The automation and the robustness of the processes need to be reinforced. Time-series of Sentinel satellite data will be integrated in the workflow in order to improve the thematic accuracy of the vegetated land cover classes.

Keywords : land cover, land use, object-based classification, earth observation, operational geomatic plan for Wallonia

REMERCIEMENTS

Le projet SmartPop est financé par (i) le fond MOERMAN de l'ISSeP et (ii) par Belspo dans le cadre du programme STEREO III – SR/00/313. Le projet WALOUS est financé par le Service Public de Wallonie (SPW), la Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement (SPW – DGO3) et le Département de la Géomatique du Secrétariat Général (SPW – SG – DGEO). Le SPW est remercié pour l'accès aux données orthophotographiques, LiDAR et autres bases de données vectorielles (LIC 160128-1348, tous droits réservés au SPW). Les auteurs remercient l'ensemble des membres du comité de suivi du projet SmartPop et du projet WALOUS ainsi que l'IWEPS pour la publication de cette recherche.

1 INTRODUCTION

Il y a dix ans, les autorités wallonnes publiaient la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW, situation du territoire wallon au 01/01/2008). La COSW intègre des bases de données géographiques produites par les autorités fédérales et régionales, telles que les données cadastrales et le parcellaire agricole anonyme. Elle fournit une classification en cinq niveaux du territoire wallon avec, en son niveau le plus fin, 71 classes mixtes d'occupation et d'utilisation du sol. Selon les enquêtes menées auprès des utilisateurs wallons, respectivement en 2015 et en 2018, dans le cadre des projets SmartPop et WALOUS, la COSW est une source d'information importante et fréquemment utilisée pour le suivi territorial à petite et grande échelles. Notamment, la COSW a été utilisée dans la spatialisation des inventaires régionaux de gaz à effet de serre, la modélisation de risques environnementaux tels que les inondations, la production d'indicateurs statistiques régionaux et comme outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire régional et communal. Étant donné sa non-mise à jour, son utilisation s'est toutefois raréfiée au fur et à mesure des années et la carte est désormais considérée comme obsolète.

La nécessité de mise à jour et de production d'informations cartographiques distinctes en occupation et en utilisation du sol est renforcée par la directive Européenne INSPIRE[9]. Cette directive, adoptée en 2013, établit une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne. Elle définit l'occupation du sol comme la « couverture physique et biologique de la surface terrestre, y compris les surfaces artificielles, les zones agricoles, les forêts, les zones (semi-)naturelles, les zones humides et les masses d'eau ». Elle définit l'utilisation du sol comme le « territoire caractérisé selon sa dimension fonctionnelle prévue ou son objet socioéconomique actuel et futur (par exemple, résidentiel, industriel, commercial, agricole, forestier, récréatif) ». En pratique, INSPIRE recommande aux états membres de développer des cartographies distinctes et harmonisées de l'occupation et de l'utilisation du sol d'ici à 2020. Deux rapports de spécifications techniques encadrent les aspects de représentation, légende, qualité, description et mise à jour (INSPIRE, 2013a et 2013b). La transposition de la directive INSPIRE en droit wallon et le lien avec les développements proposés dans WALOUS pour répondre aux obligations en occupation et en utilisation du sol sont traités dans l'encadré 1.

La dernière décennie a vu une croissance exponentielle de la production de géodonnées sur le territoire régional. L'essor récent des outils d'acquisition de données sur le territoire à distance, par capteurs embarqués sur des drones, avions et satellites, communément appelées données d'observation de la Terre (OT), contribue à cette croissance. Pour preuve, le catalogue de données OT sur la Région wallonne a été enrichi depuis 2012 par l'acquisition de cinq nouvelles couvertures en photographies aériennes orthorectifiées, d'un jeu de données LiDAR permettant de caractériser le relief, la hauteur des constructions et de la végétation, et de plusieurs couvertures satellitaires à très haute résolution spatiale Pléiades. De plus, les nouvelles données satellitaires Sentinel-1 et -2 issues du programme européen *Copernicus* fournissent des informations hebdomadaires sur l'ensemble du territoire régional. Dans le même temps, les solutions technologiques de traitement de ces données ont été améliorées, ce qui permet aujourd'hui d'envisager le développement de méthodes de cartographie opérationnelles exploitant ces données OT. Malgré la disponibilité de ces nouvelles données,

[9] INSPIRE (directive 2007/2/EC) fixe les règles générales couvrant l'ensemble des étapes de production-description-consultation-téléchargement-transformation de toute donnée géographique pertinente pour l'établissement et le suivi des politiques environnementales de l'Union européenne (UE). Plus d'informations sont disponibles sur : http://geoportail.wallonie.be/INSPIRE.

la COSW n'a pas été mise à jour durant cette période.

Cet article explique les étapes du développement des prototypes SmartPop de classification de l'occupation et de l'utilisation du sol. La section 2 précise la portée du prototype, à savoir neuf communes urbaines de la région Liégeoise, et détaille le catalogue de géodonnées très riche mobilisé par SmartPop. Les sections 3 et 4 explicitent les méthodologies développées. Enfin, les défis liés à l'opérationnalisation de ces méthodes à l'échelle de toute la Wallonie, qui est l'objectif du nouveau projet WALOUS, sont discutés dans la section 5.

Encadré 1 : Produire des géodonnées en occupation et utilisation du sol de qualité dans le cadre géomatique wallon

Des géodonnées de qualité sont essentielles autant dans les politiques publiques de gestion du territoire que dans l'optimisation des ressources naturelles, humaines et de l'infrastructure de la Wallonie. **Elles peuvent, à terme, réduire les coûts et améliorer la qualité des décisions tant publiques que privées.** En Wallonie, les pouvoirs publics disposent de beaucoup de géodonnées qui sont complétées par celles des producteurs commerciaux. L'ensemble représente une richesse malheureusement sous-exploitée. Ces géodonnées sont, en effet, insuffisamment accessibles, interopérables et leur qualité n'est pas homogène et documentée ou ne répond pas aux différents besoins, malgré les efforts consentis et une évolution très importante ces dernières années.

La Wallonie a la volonté depuis le début des années 2000 de valoriser l'énorme potentiel de l'information géographique wallonne en développant la géomatique dans l'aide à la décision publique et privée. **La mise en place d'un géoréférentiel est essentielle dans cette démarche géomatique d'optimisation des géodonnées** (Jasselette et Stephenne, 2018). Ce géoréférentiel doit reprendre les géodonnées de référence qui rencontrent des critères d'appartenance définis par un groupe représentatif d'utilisateurs et qui répondent à un plan d'assurance qualité spécifique en vue de remplir les fonctions et usages nécessaires aux missions publiques.

Le **décret** relatif à l'infrastructure d'information géographique wallonne, ou décret géomatique wallon, a été adopté le 22 décembre 2010 par le Parlement de Wallonie et propose la mise en place d'un géoréférentiel. Ce décret transpose la directive européenne INSPIRE de 2007 qui a pour objectif de créer un cadre commun pour la gestion de l'information géographique. Sur la base de ce décret, deux plans stratégiques de la géomatique wallonne (PSGW) trisannuels ont été établis par le Comité stratégique de la géomatique[10] et approuvés par le Gouvernement wallon le 8 mai 2014 et le 16 février 2017. La mise en œuvre des objectifs du deuxième PSGW est concrétisée par un **plan opérationnel de la géomatique wallonne** (POGW) qui définit les aspects concrets de planning, de répartition des rôles, les livrables et leur valeur ajoutée.

L'axe 2 du PSGW propose **un cadre commun pour la production des géodonnées en vue de garantir le niveau de qualité, l'interopérabilité, la documentation** et ainsi faciliter les croisements, la valorisation et la production de résultats de qualité à partir du gisement de géodonnées wallonnes publiques. Faisant partie de cet axe, l'**action 4 du POGW vise à déterminer le contenu et les caractéristiques du**

[10] Plus d'informations disponibles sur : http://geoportail.wallonie.be/CSG

géoréférentiel et à assurer la disponibilité des premières données.

L'action 4 doit se concrétiser par la mise en place d'un **géoréférentiel fonctionnel** ne contenant, dans un premier temps, qu'un ensemble limité de géodonnées : le réseau routier (axes), les constructions (bâtiments), les limites administratives et les adresses. Selon le POGW, certaines données, comme les orthophotographies aériennes et les modèles altimétriques, répondent dès à présent aux critères de qualité requis pour rencontrer les besoins définis dans le PSGW.

À côté de ce géoréférentiel fonctionnel référencé dans l'action 4 du POGW, **d'autres géodonnées sont pressenties pour être intégrées ultérieurement dans le géoréférentiel.** Un inventaire consolidé des catégories de données géographiques nécessaires pour les différents métiers du SPW et des organismes d'intérêt public a été établi par un groupe de travail interne au SPW, avec l'aide des délégués géomatiques de chaque Direction Générale Opérationnelle du SPW. Ces données sont réparties en douze catégories, dont l'occupation du sol. **Des projets pilotes sont prévus par le POGW dans l'action 5. Un des premiers projets pilotes est celui qui traite de l'occupation et de l'utilisation du sol, le projet** WALOUS (Beaumont *et al.*, 2019). Ce projet est subventionné par le département de la géomatique (SPW – SG – DGEO) et la DGO3 avec le soutien du cabinet du ministre Di Antonio, en charge notamment de l'aménagement du territoire, pour profiter de l'expérience des universités et des centres de recherche dans le développement d'une application opérationnelle de cartographie d'occupation et d'utilisation du sol proposée dans le projet SmartPop. Pour définir une base de données de l'occupation et de l'utilisation du sol opérationnelle, efficace et robuste, Inglada *et al.* (2017) proposent cinq critères : l'automatisation pour l'efficacité et la mise à jour, la continuité spatiale, la cohérence temporelle entre les différentes mises à jour, la reproduction des résultats et la modularité du système permettant des adaptations de la nomenclature sans changer le système. Ces critères rencontrent une partie des critères qui sont envisagés dans le plan qualité qui doit être mis en place pour les données susceptibles d'entrer dans le géoréférentiel. La réponse des produits WALOUS à ces critères est une condition essentielle pour intégrer le géoréférentiel wallon ce qui est l'objectif de tous les acteurs de cette subvention à l'issue de celle-ci en 2020.

2 ZONE DE DÉVELOPPEMENT DES MÉTHODES ET SOURCES DES DONNÉES

Cette deuxième section présente la zone d'étude définie pour les développements des méthodes de cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol (sous-section 2.1) et détaille les données sources utilisées (sous-section 2.2).

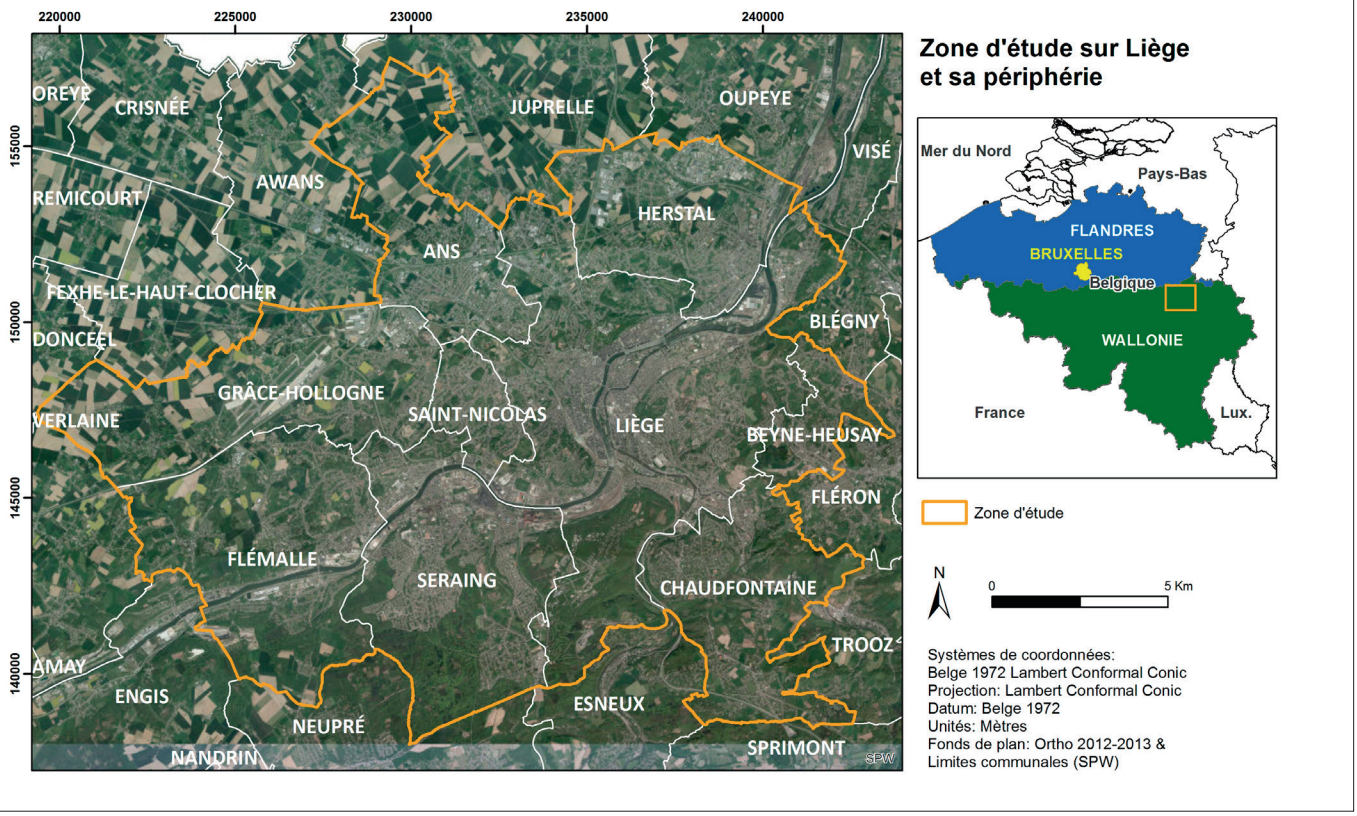
2.1. NEUF COMMUNES LIÉGEOISES DENSÉMENT URBANISÉES

Pour prendre en compte la complexité des occupations et utilisations du sol urbain (hétérogénéité de la morphologie du bâti et diversité des usages), SmartPop s'est focalisé sur neuf communes urbaines de l'agglomération liégeoise (figure 1). Outre les espaces urbanisés, des espaces forestiers et agricoles sont également présents. Ces neuf communes couvrent une superficie de 261 km². La densité de population y est très élevée avec en moyenne 1 663 habitants au km², ce qui dépasse largement la moyenne wallonne de 214 habitants au km².

2.2. LES DONNÉES MOBILISÉES SUR LA PÉRIODE 2013-2014

Pour être opérationnelle, une cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol doit utiliser des données régulièrement actualisées. Dans cet objectif, SmartPop exploite deux types de données d'OT issues du

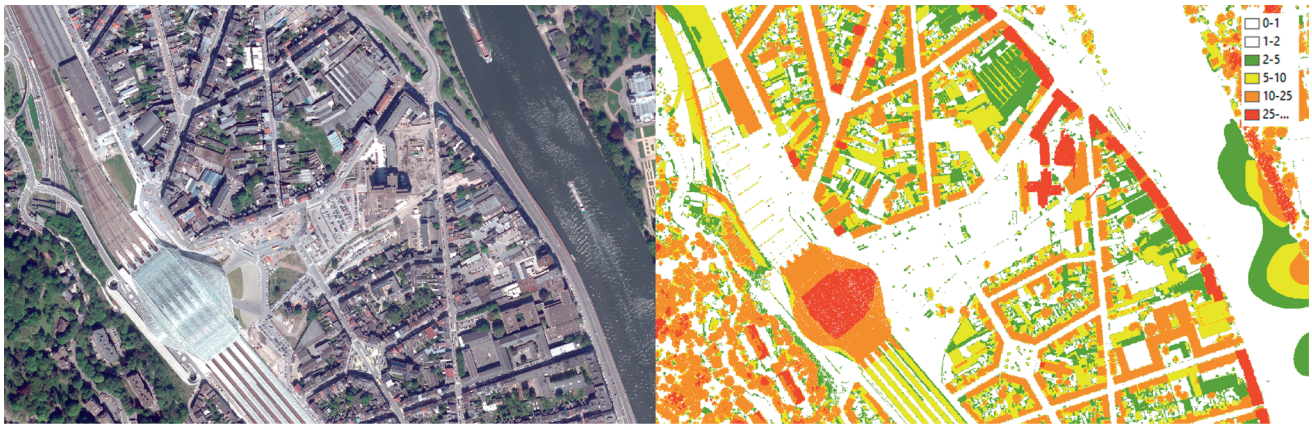
Figure 1 : SmartPop a étudié Liège et huit autres communes de sa périphérie



programme d'acquisition de données aériennes du Service Public de Wallonie (SPW) : les orthophotographies et les modèles numériques de hauteur (MNH) (figure 2). Les orthophotographies sont des images rectifiées géométriquement et égalisées radiométriquement. Elles fournissent une information spectrale en quatre bandes dans les gammes de longueurs d'onde du visible (rouge, vert et bleu), correspondant à la vision humaine, et du proche infrarouge, permettant la mise en évidence de la végétation. Sur la zone SmartPop, les données orthophotos ont été acquises en date du 14 mai 2013. L'information de hauteur de tout objet au-dessus du niveau du sol est déduite d'un MNH calculé soit à partir des données LiDAR acquises début 2014 sur la zone SmartPop, soit par le traitement photogrammétrique des orthophotographies de mai 2013.

La cartographie de l'occupation du sol intègre les bases de géodonnées disponibles, telles que la délimitation des bâtiments, voiries et cours d'eau fournie par le Projet Informatique de Cartographie Continue (PICC) du SPW ou le parcellaire agricole anonyme (SPW-DGO3). Ces bases de données sont disponibles en téléchargement sur le géoportail *WalOnMap* du Service Public de Wallonie et devraient bientôt être accessibles gratuitement. Définir l'utilisation du sol nécessite d'intégrer d'autres données externes permettant de préciser et localiser les activités de services et industrielles (e.g. la Banque Carrefour des Entreprises) et la nature des biens au sein de la matrice cadastrale du SPF Finances - Administration générale de la Documentation patrimoniale (AGDP) ainsi que des données thématiques (e.g. cartographie des réseaux, inventaire forestier, terrils, centres d'enfouissement technique).

Figure 2 : Illustration des données d'OT : orthophotographies et MNH LiDAR sur le quartier des Guillemins à Liège



Orthophotos 2012-2013
25 cm de résolution spatiale

Modèle Numérique de Hauteur LiDAR 2014 (m)
100 cm de résolution spatiale

3 CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL

Les spécifications du produit d'occupation du sol visé en termes de légende et d'unité de cartographie (sous-section 3.1), la procédure de classification automatisée (sous-section 3.2) et les règles de post-traitement appliquées pour la production de la carte finale (sous-section 3.3) composent la troisième section de cet article.

3.1. LÉGENDE ET UNITÉ MINIMALE DE CARTOGRAPHIE

La légende en occupation du sol proposée par SmartPop compte deux niveaux hiérarchiques composés de quatre classes au niveau 1 et de huit classes au niveau le plus fin. Cette légende d'occupation du sol s'appuie sur une revue de la littérature d'environ 25 références (Beaumont *et al.* 2017), l'expression des besoins exprimés par un panel d'utilisateurs wallons et les recommandations fournies par le rapport de spécifications techniques sur l'occupation du sol d'INSPIRE. Elle est dite « pure » dans le sens où elle ne fait pas intervenir de notion d'usage (e.g. culture, résidentiel, exploitation forestière).

Pour être utile à l'aménagement du territoire et à l'analyse des risques en milieu urbain, la cartographie doit représenter une granularité fine du territoire et des éléments de l'occupation du sol. Les enquêtes et l'analyse des bases de données utilisées par les acteurs wallons, telles que le PICC, ont permis de définir l'unité minimale de cartographie à 15 m^2. Cette échelle permet de représenter des éléments comme les arbres isolés et les petites constructions.

Tableau 1 : Description des huit classes d'occupation du sol cartographiées dans SmartPop

Niveau 1	Niveau 2	Description
Constructions artificielles	Constructions artificielles hors sol	Tout type de constructions artificielles anthropiques en hauteur (toitures, ponts, éoliennes, pylônes…)
	Constructions artificielles au sol	Tout type de constructions artificielles anthropiques au niveau du sol (réseaux routier et ferroviaire, parking…)
Sols nus	Sols nus	Tout type de surface minérale (non végétalisée) formée naturellement (roches apparentes) ou par exploitation anthropique (zones agricoles après travail du sol, carrière)
Végétation	Végétation herbacée	Tout type de plantes non ligneuses
	Végétation arbustive	Tout type de plantes ligneuses de taille moyenne (1-7m)
	Végétation arborée, feuillus	Végétation haute (> 7m) de type feuillus, incluant les espèces caduques et à feuilles persistantes
	Végétation arborée, conifères	Végétation haute (> 7m) de type conifères, incluant les espèces caduques et à feuilles persistantes
Surfaces d'eau	Surfaces d'eau	Tout type de surfaces d'eau incluant les fleuves, rivières, ruisseaux, lacs, étangs et mares.

3.2. LA PROCÉDURE AUTOMATISÉE DE CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL

Les informations spectrales et altimétriques sont analysées et labélisées selon la légende d'occupation du sol. Cette dernière utilise une méthode de classification par objet supervisée et automatisée en deux étapes. L'approche par objet ne traite pas chaque pixel/grain de l'image aérienne de manière isolée, mais regroupe, via une première étape de segmentation, les pixels voisins en objets relativement homogènes. L'algorithme de classification (deuxième étape) définit l'occupation du sol des groupes d'objets sur la base des valeurs spectrales et altimétriques, et également sur la base de paramètres morphologiques tels que la taille, la forme et le voisinage de l'objet. Pour les données à très haute résolution spatiale, cette approche améliore la qualité de l'information extraite et la qualité de la classification (Blaschke, 2010 ; Carleer and Wolff, 2006 ; Belgiu, Draguţ, and Strobl, 2014). La supervision de la classification fait référence à l'utilisation d'un échantillon d'apprentissage par l'algorithme. Les variables quantitatives et qualitatives caractérisant cet échantillon permettent la classification de l'ensemble de l'image. Cet échantillon est créé, soit par photo-interprétation par un opérateur expert, soit de manière automatisée sur la base de géodonnées existantes. Il est scindé en deux tiers pour l'apprentissage et un tiers pour la validation. À partir de l'échantillon de validation, on calcule l'indice Kappa et l'exactitude globale. L'indice Kappa mesure le degré de concordance entre le résultat cartographique et la réalité, par rapport à une classification aléatoire du territoire (Congalton, 1991). L'exactitude globale nous renseigne quant à elle la proportion des segments correctement classés par rapport à la réalité (%). Les détails techniques de la chaîne de traitement sont développés dans Grippa *et al.* (2017) et Beaumont *et al.* (2017). Ils sont résumés dans l'encadré 2.

Encadré 2 : Chaîne de traitement pour la classification de l'occupation du sol

La chaîne de traitement développée a pour objectif la plus grande automatisation possible des deux étapes de segmentation et de classification. Elle utilise exclusivement un logiciel libre : GRASS GIS.

La première étape, la segmentation, consiste en un regroupement de pixels adjacents en segments, ou objets. Idéalement, ces segments devraient correspondre à des objets réels, comme une maison, un arbre, une route, etc. La segmentation devrait donc regrouper le plus possible les pixels d'image d'un même objet réel, tout en évitant de regrouper des pixels similaires, mais appartenant à des objets réels différents. Néanmoins, les pixels représentant un même objet réel sont souvent assez hétérogènes (moitié du toit à l'ombre, présence de fenêtres dans un toit, passage piéton et voitures sur une route, etc.). Si on paramètre la segmentation afin de regrouper tous ces pixels, on risque de se retrouver avec beaucoup de segments contenant des objets réels différents. Pour trouver le bon paramétrage de segmentation, la chaîne de traitement inclut l'utilisation d'un algorithme d'optimisation qui teste différentes segmentations et sélectionne celle qui représente le meilleur compromis entre une grande homogénéité à l'intérieur des segments (mesurée par la variance) et une grande hétérogénéité entre les segments (mesurée par l'autocorrélation spatiale). Le résultat de la segmentation est un ensemble de segments qu'il faut ensuite classer, c'est-à-dire déterminer pour chaque segment à quelle classe d'occupation du sol il appartient.

Avant de pouvoir procéder à la classification proprement dite, deux

traitements sont indispensables. Tout d'abord, il faut caractériser les segments par un ensemble de variables les décrivant. Il s'agit à la fois de variables de formes (superficie, périmètre, compacité, etc.) et de variables spectrales (valeurs moyennes et variance dans les différentes bandes spectrales de l'image, indices de végétation, indices de texture, etc.).

Le deuxième traitement préalable à l'étape de classification constitue la seule intervention manuelle nécessaire au sein de la chaîne de traitement. En effet, la chaîne de traitement fait appel à des techniques de « *machine learning* » supervisées, techniques statistiques dans lesquelles la machine développe un modèle sur la base de données d'entraînement consistant en des segments dont la classe est connue. Il est donc nécessaire de fournir un ensemble de segments d'entraînement. Pour assurer une sélection aléatoire de ces segments, une couche de points positionnés aléatoirement dans l'espace a été créée. Ensuite, l'interprétation visuelle par un opérateur a permis de déterminer manuellement la classe à laquelle appartenait chaque segment dans lequel se trouvait un point. Une partie des segments ainsi caractérisés ont été mis de côté comme données de validation. Le reste sert comme source d'information pour l'entraînement de l'étape de classification.

L'étape de classification propose plusieurs modèles (ou algorithmes) de classification des segments référencés par la littérature, tels que *Random Forest* ou *Support Vector Machine*. À l'instar de la segmentation, cette étape intègre également l'optimisation de chaque modèle sur base d'une série de tests avec des valeurs de paramètres différentes. Pour chaque modèle une estimation de la qualité de sa classification au départ des données d'entraînement est obtenue. Ensuite, chaque segment est classé par chacun des modèles et la classification finale est déterminée par un système de vote parmi l'ensemble des modèles, vote pondéré par la qualité estimée de chacun. Cette approche permet une certaine indépendance des défauts spécifiques de chaque modèle.

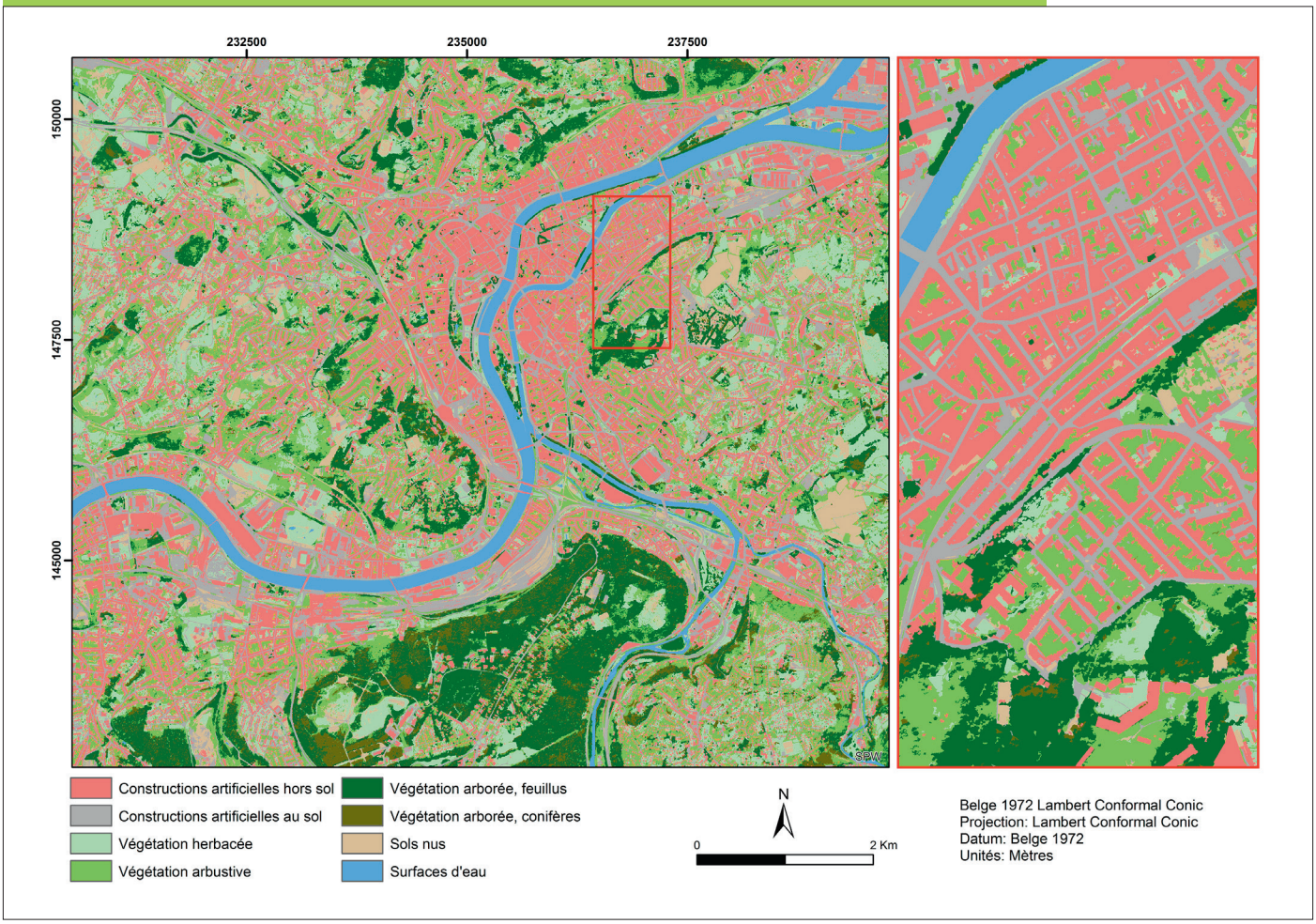
Pour évaluer la qualité de la classification finale, la classe déterminée visuellement pour les segments de validation est comparée à celle obtenue par le vote entre modèles. L'exactitude globale et l'indice de Kappa sont générés automatiquement.

3.3. LE POST-TRAITEMENT PAR RÈGLES ET LE RÉSULTAT CARTOGRAPHIQUE

Dans le prototype de la carte d'occupation du sol de la ville de Liège, l'exactitude globale atteint 85 %. En d'autres termes, l'algorithme prédit la bonne classe pour 85 % des points de l'échantillon de validation. Afin de répondre aux besoins les plus fréquents des utilisateurs urbains, des modifications ont été réalisées sur cette carte selon des règles de voisinage et par intégration d'autres couches d'informations pour atteindre une exactitude globale supérieure à 95 %. Inspirée par les travaux d'O'Neil-Dunne *et al.* (2013) et de Van De Kerchove *et al.* (2015), ces règles de reclassification ont été développées dans des logiciels libres (Python, GRASS et Jupyter Notebook). Par exemple, les erreurs de classification liées aux zones d'ombre d'objets hauts sur les orthophotographies sont corrigées selon les règles suivantes : un objet classé dans une zone d'ombre au pied d'un bâtiment caractérisé par un attribut de hauteur moyenne proche ou égal à 0 m et par un voisin classé « constructions artificielles au sol » sera reclassé dans cette même classe. Un autre

exemple a trait à la confusion fréquente entre « constructions artificielles au sol » et « sols nus » en zone agricole, à cause de la teinte grisée de certains sols. Les constructions erronées seront corrigées en « sols nus » à l'aide de l'information provenant de la carte du parcellaire agricole. Les 5 % d'erreurs restantes, majoritairement liées à des erreurs entre les différentes classes de végétation, nécessitent l'édition manuelle de ces objets. L'intégration de données satellitaires Sentinel multidates devrait permettre de mieux caractériser les différents types de végétation. Elle n'a pas été évaluée dans l'étude SmartPop, mais est envisagée dans le projet WALOUS. La figure 3 illustre le résultat final de la carte d'occupation du sol obtenue suite à cette étape de post-classification.

Figure 3 : Classification (niveau 2) de l'occupation du sol sur neuf communes liégeoises



4 CARTOGRAPHIE DE L'UTILISATION DU SOL

Deux approches de cartographie de l'utilisation du sol ont été comparées : la fusion de bases de données au sein d'un système d'information géographique (SIG) (sous-section 4.1) et des méthodes de classifications supervisées par entité spatiale (sous-section 4.2).

4.1. CARTOGRAPHIE PAR INTÉGRATION DE BASES DE DONNÉES AU SEIN D'UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

En 2016, la Direction du Développement Rural de la DGO3 (SPW) a réalisé une étude de faisabilité pour la mise à jour de la COSW sur la base d'une approche de fusion cartographique de bases de données vectorielles géolocalisées. Cette approche est inspirée de la méthode de production de la COSW en 2007 et est également comparable aux approches de la Flandre (Poelmans *et al.*, 2016) et de la France (IGN France, 2015).

Dans cette approche, une étape préliminaire à la classification repose sur la création d'une ossature surfacique structurant le territoire en unités homogènes d'utilisation du sol. Pour l'application wallonne, cette ossature est créée par combinaison d'objets des réseaux routier et ferroviaire issus du PICC, du réseau hydrographique wallon repris dans la base de données CENNIC (SPW-DGO3), du parcellaire de la base de données cadastrales (SPF-Finance-AGDP) et est complétée par les données de l'Institut Géographique National (IGN) belge. Les nombreuses incompatibilités géométriques entre ces données, liées aux dates de production des données et à leur contenu, doivent être corrigées par un traitement manuel, qui s'avère chronophage. Ensuite, la classification en utilisation du sol est réalisée par la consolidation des informations thématiques contenues dans les bases de données précitées à l'aide d'autres sources, telles que l'inventaire permanent des ressources forestières, les éléments structurants du paysage et le parcellaire agricole. Les principales conclusions tirées de cette étude démontrent la possibilité de mise à jour et de complétude, mais également la complexité de la gestion des erreurs topologiques et des incompatibilités spatiales, requérant le développement de méthodes d'intégration plus automatisées. Cette approche étudiée par la DGO3 n'a dons pas été mise en œuvre dans SmartPop qui s'est concentré sur le développement d'une alternative par classifications supervisées, présentée dans la sous-section suivante.

4.2. CLASSIFICATIONS SUPERVISÉES DE L'UTILISATION DU SOL

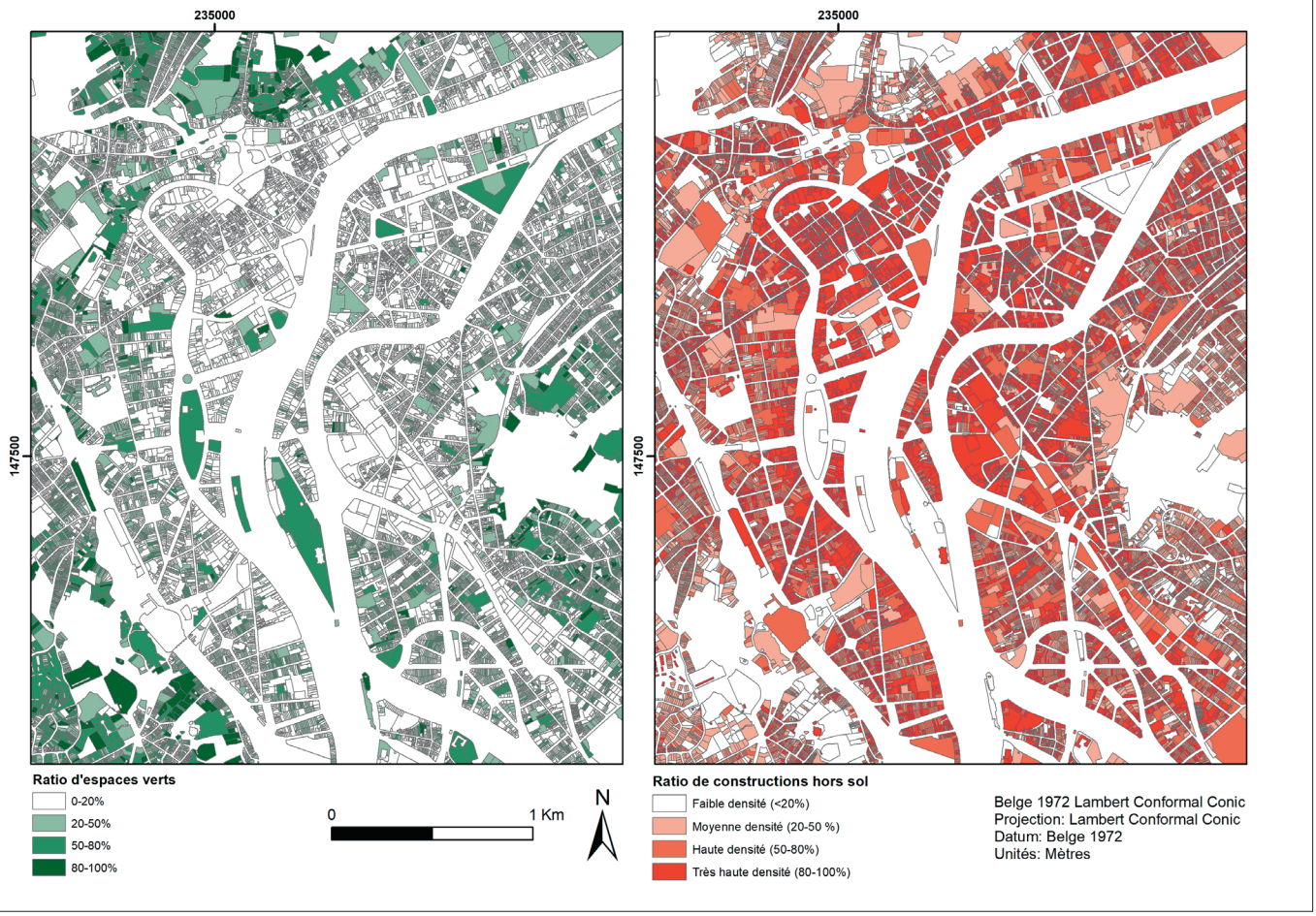
Pour favoriser l'automatisation du processus, SmartPop a étudié le développement de classifications supervisées pour définir l'utilisation du sol au niveau des parcelles cadastrales ou d'îlots urbains. Ces îlots urbains correspondent aux groupements des parcelles cadastrales contiguës, contenant des constructions hors sol dans la carte d'occupation du sol, et ceinturées par du non-cadastré (i.e. espaces viaires, réseaux ferroviaires et cours d'eau). Deux approches sont successivement discutées dans les lignes qui suivent : les classifications supervisées par règles et celles par algorithmes.

4.2.1. L'utilisation du sol par règles de classification

Dans cette première approche, l'utilisation du sol est classée au départ d'opérateurs logiques et conditionnels (e.g. si … > … et … < …

alors …; si non …) appliqués à des indicateurs spatiaux censés représenter la diversité typologique et de fonction des parcelles et îlots urbains. Dans SmartPop et à des fins de démonstration, les indicateurs spatiaux sont dérivés de la carte d'occupation du sol produite sur la Ville de Liège et de trois bases de données géographiques vectorielles fournies par la Ville de Liège, à savoir le nombre de façades au sein du code construction du cadastre, le registre national des personnes physiques (RNPP), détaillant le nombre d'habitants par logement, et la Banque Carrefour des Entreprises (BCE) géocodée. Les indicateurs dérivés incluent la proportion d'espace construit au sol, hors-sol et la proportion d'espaces verts, ces deux derniers étant illustrés à la figure 4, des indicateurs morphologiques du bâti (hauteur moyenne, surface habitable, typologie), la densité de population résidentielle, d'activités commerciales et de services ou la mixité des utilisations (e.g. résidentiel-commercial).

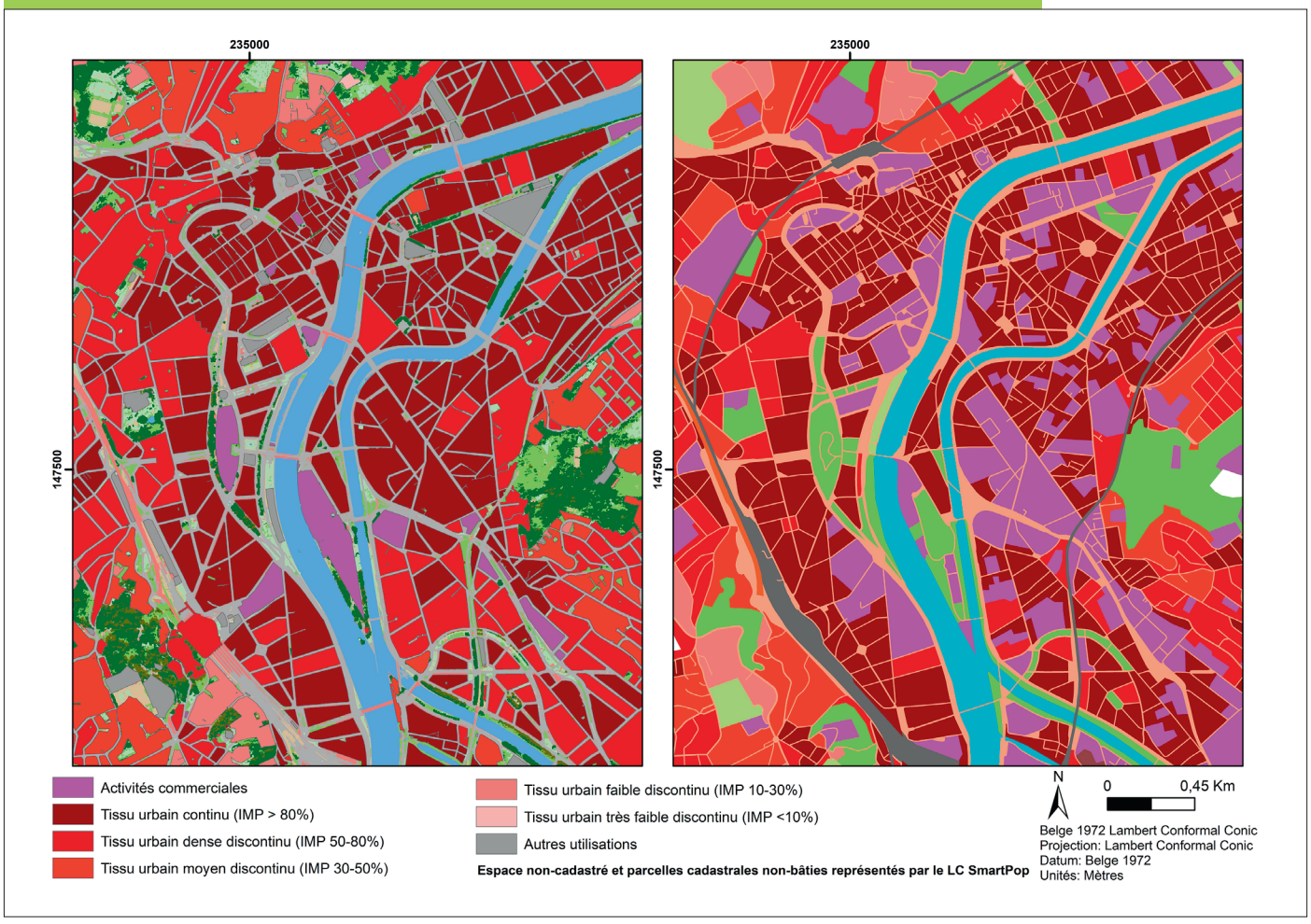
Figure 4 : Exemples d'indicateurs spatiaux : ratios d'espaces verts et de constructions hors-sol par parcelles cadastrales urbanisées sur le centre de Liège



Au départ de ces indicateurs, des statistiques par îlots urbains sont calculées. Des règles, définies par un expert en photo-interprétation et classification d'images, sont ensuite appliquées à ces statistiques pour caractériser l'utilisation du sol. Il existe autant de possibilités de classifications que de règles applicables. En l'absence d'un consensus avec les utilisateurs sur la légende d'utilisation du sol à adopter en Wallonie et avant l'étude de la mise en conformité avec INSPIRE réalisée dans le

projet WALOUS, le projet SmartPop s'est attelé à démontrer les possibilités d'automatisation offertes par ces différentes méthodes. La figure 5 illustre par exemple l'application de règles visant à reproduire une légende similaire à l'Atlas Urbain européen[11], dont la dernière version date de 2012. L'Atlas Urbain est un service du programme européen *Copernicus* offrant sur plus de 300 villes européennes une cartographie à haute résolution spatiale (unité minimale de cartographie de 0,25 ha) de l'utilisation du sol urbain. Les villes de Liège, Namur et Charleroi sont notamment cartographiées dans cet atlas. La version 2012 de l'Atlas a été réalisée par une approche semi-automatisée intégrant interprétation visuelle par un expert et classification automatique au départ de données sources variant selon la ville d'application. Ces données peuvent notamment comprendre des images satellitaires à haute résolution spatiale, des cartes topographiques à diverses échelles, des données de navigations (par exemple depuis *OpenStreetMap*) et le degré d'imperméabilisation des sols provenant des cartes à haute résolution (*High Resolution Layers*) offertes par le service *Land* de *Copernicus*. La maîtrise de la production de ce produit pourrait s'avérer intéressante pour les utilisateurs wallons afin d'améliorer la complétude et la reproductibilité de ce type de cartographie à l'échelle régionale. Sur base de trois indicateurs spatiaux produits dans SmartPop, à savoir

Figure 5 : Classification de l'utilisation du sol dans le centre de Liège sur inspiration de la légende de l'Atlas Urbain Européen – Carte d'utilisation du sol de SmartPop (gauche) et Atlas Urbain (droite)



[11] Disponible en téléchargement sur: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-urban-atlas

le ratio en « constructions artificielles » disponible au premier niveau de la carte d'occupation du sol, la densité de population résidentielle et le nombre d'entités commerciales, une classification en sept catégories d'utilisation du sol correspondant à la légende de l'Atlas Urbain a été produite. Étant donné la diversité des données d'entrées, des dates de production de celles-ci et en l'absence de validation, il apparaît complexe d'évaluer la qualité relative de ce produit, mais l'objectif principal dans l'étude SmartPop résidait dans le développement de méthodologies opérationnelles reproductibles et automatisées.

4.2.2. L'utilisation du sol par classification algorithmique automatisée

Détaillé dans Zarougui (2016), le prototype de classification algorithmique, développé dans l'environnement GRASS, permet de classifier automatiquement le territoire en quatre classes d'utilisation du sol : tissu urbain continu, tissu urbain discontinu, autres utilisations et espaces verts. La méthode est supervisée et nécessite donc un nombre d'éléments de référence, ici des îlots, pour lesquels la classification est connue, dénommés *jeu d'entraînement*. La donnée de référence utilisée pour ce prototype est l'Atlas Urbain européen (version de 2012). Pour chaque îlot, une série de métriques spatiales sont ensuite calculées avec comme donnée source unique la carte d'occupation du sol produite dans SmartPop. La validation par l'Atlas Urbain fait ressortir une exactitude globale variant entre 66 et 88 % pour les différentes classes. Cette méthode présente l'avantage principal de s'affranchir de choix arbitraires faits par un opérateur. L'amélioration de la classification passe par une consolidation de l'entraînement (une plus grande représentativité de l'échantillon d'apprentissage) et par l'intégration d'autres données sources telles que le MNH ou d'autres bases de données géographiques. De nouvelles perspectives pour cette approche émergent après la récente étude de Grippa *et al.* (2018) qui applique une méthode similaire à la classification des blocs urbains de la ville de Dakar (615 km^2) au Sénégal en six catégories d'utilisation du sol, avec une exactitude supérieure à 80 %.

5 CONCLUSION : DES PROTOTYPES À L'APPLICATION RÉGIONALE EN LIEN AVEC INSPIRE

Le projet SmartPop a démontré le potentiel des nouvelles données d'OT pour la cartographie à très haute résolution spatiale de l'occupation du sol en Wallonie. L'intégration de données géographiques vectorielles déjà disponibles sur le territoire wallon permet la production d'une cartographie exacte (exactitude globale de 95 %) et précise, ainsi que la production d'informations mises à jour sur l'utilisation du sol. Les prototypes développés en logiciel libre sont reproductibles à chaque nouvelle acquisition d'orthophotographies, ce qui dote les autorités wallonnes de nouveaux outils innovants pour la production pérenne de cartes d'occupation et d'utilisation du sol distinctes au départ des données d'OT gratuites ou acquises annuellement par la Wallonie.

L'opérationnalisation des méthodes développées dans SmartPop à l'échelle régionale a débuté en 2018 dans le cadre de la subvention WALOUS (2018-2020). L'approche de cartographie par objet de l'occupation du sol doit en effet être optimisée pour produire une carte conforme à INSPIRE sur les 16 844 km^2 de la Wallonie en 2016. Cette optimisation requiert de nouveaux développements dont : (1) l'automatisation de la sélection des échantillons d'apprentissage dans les bases de données géographiques vectorielles existantes, (2) la paramétrisation automatisée et locale de l'algorithme de segmentation des données d'OT (Georganos *et al.*, 2018), permettant de traiter les données par tuiles homogènes en termes de propriétés des données (date de prise de vue, modèle de capteur, angle de prise de vue, etc.; d'Andrimont *et al.*, 2017), (3) le traitement parallélisé des étapes de segmentation et de classification afin de réduire les temps de traitement machine, et (4) l'intégration de séries temporelles satellitaires Sentinel-1 et -2 afin d'améliorer la classification thématique des espaces végétalisés (espaces agricoles, forestiers et naturels). Dans WALOUS, les besoins des utilisateurs sont actualisés ainsi que la conformité avec INSPIRE (INSPIRE, 2013a).

Cette conformité avec INSPIRE s'applique particulièrement à la cartographie de l'utilisation du sol (INSPIRE, 2013b). INSPIRE définit une légende obligatoire à trois niveaux, avec 6, 27 et 65 classes d'utilisation du sol, dénommée *Hierarchical INSPIRE Land Use Classification System* (HILUCS). Une analyse détaillée des bases de données sources disponibles sur la Wallonie est réalisée dans le cadre de WALOUS. Les premiers résultats de cette analyse tendent à soutenir le développement d'une approche combinant la fusion de bases de données vectorielles au sein d'un SIG et la consolidation automatisée depuis l'information en occupation du sol.

Dès 2020, ces nouvelles cartographies de l'occupation et de l'utilisation du sol devraient constituer deux données de référence au sein du géoréférentiel wallon. Ainsi, de nombreux besoins métiers des utilisateurs exprimés dans SmartPop et WALOUS pourront être rencontrés. Ceux-ci sont, entre autre, de visualiser, créer et positionner leurs thématiques sur le territoire wallon (fond de plan) ou d'effectuer des analyses spatiales (positionnement relatif, voisinage, jointures,…) au regard de ces cartes de référence. La production renouvelée de ces cartographies devra notamment servir à améliorer le rapportage des émissions de gaz à effet de serre selon le protocole de Kyoto, à mesurer dans le temps l'imperméabilisation des terres ou la fragmentation du territoire pour évaluer l'état de l'environnement wallon, ou à mettre à jour des cartes d'aléas d'inondations.

BIBLIOGRAPHIE

d'Andrimont R., C. Marlier and P. Defourny, 2017. "Hyperspatial and multi-source water body mapping : A framework to handle heterogeneities from observations and targets over large areas," *Remote Sens.* 9(3) (2017) [doi :10.3390/rs9030211].

Beaumont B., T. Grippa, M. Lennert, S. Vanhuysse, N. Stephenne and E. Wolff, 2017. "Toward an operational framework for fine-scale urban land-cover mapping in Wallonia using submeter remote sensing and ancillary vector data, " *J. Appl. Remote Sens.* 11(3), 036011 (2017), doi : 10.1117/1.JRS.11.036011.

Beaumont B., L. Van de Vyvere, N. Stephenne and E. Hallot, 2019. "Users' consultation process in building a land cover and land use database for the official Walloon Georeferential," JURSE 2019 (accepted).

Belgiu M., L. Draguţ and J. Strobl, 2014. "Quantitative Evaluation of Variations in Rule-Based Classifications of Land Cover in Urban Neighbourhoods Using WorldView-2 Imagery," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87 : 205–15. doi :10.1016/j.isprsjprs.2013.11.007.

Blaschke T., 2010. "Object Based Image Analysis for Remote Sensing," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65 (1). Elsevier B.V. : 2–16. doi :10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.

Carleer A. P. and E. Wolff, 2006. "Urban Land Cover Multi-Level Region-Based Classification of VHR Data by Selecting Relevant Features," *International Journal of Remote Sensing* 27 (6) : 1035–51. doi :10.1080/01431160500297956.

Congalton E.G., 1991. "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data," *Remote Sens. Environ.* 37(1), 35–46 (1991) [doi :10.1016/0034-4257(91)90048-B].

European Union, 2016. "Mapping Guide v4.7 for a European Urban Atlas". Copernicus.

Georganos S., M. Lennert, T. Grippa, S. Vanhuysse, B. Johnson and E. Wolff, 2018. "Normalization in unsupervised segmentation parameter optimization : A solution based on local regression trend analysis," *Remote Sens.* 10(2) (2018) [doi :10.3390/rs10020222].

Grippa T., S. Georganos, S. Zarougui, P. Bognounou, E. Diboulo, Y. Forget, M. Lennert, S. Vanhuysse, N. Mboga and E. Wolff, 2018. "Mapping Urban Land Use at Street Block Level Using OpenStreetMap, Remote Sensing Data, and Spatial Metrics," *ISPRS Int. J. Geo-Information* 7, 246 (2018) [doi :10.3390/ijgi7070246].

Grippa, T., M. Lennert, B. Beaumont, S. Vanhuysse, N. Stephenne, and E. Wolff. 2017. "An Open-Source Semi-Automated Processing Chain for Urban Object-Based Classification," *Remote Sens.* 9 (4) : 358. doi :10.3390/rs9040358.

Inglada J., A. Vincent, M. Arias, B. Tardy, D. Morin and I. Rodes, 2017. "Operational High Resolution Land Cover Map Production at the Country Scale Using Satellite Image Time Series," *Remote Sens.* 9(1), 95.

Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) France, 2015. "Spécifications – Couche occupation du sol à grande échelle," Réf. SBV / 2015 – 9.

INSPIRE Thematic Working Group Land Cover, 2013a. "INSPIRE Data Specification for the spatial data theme Land Cover," D2.8.II.2_v3.0rc3, 4.2.2013 ; Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community.

INSPIRE Thematic Working Group Land Use, 2013b. "INSPIRE Data Specification for the spatial data theme Land Use," D2.8.III.4_v3.0rc3, 4.2.2013 ; Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community

Jasselette J-C. and N. Stephenne, 2018. "Building the reference geodatasets of Wallonia – importance of spatial data integration across INSPIRE themes," INSPIRE Conference 2018, available online : https ://inspire.ec.europa.eu/sites/default/files/presentations/pdfen-1615georeferential_wallonia_jcjasselette_v3.pdf

O'Neil-Dunne J., S. MacFaden, A. Royar and K. Pelletier, 2013. "An Object-Based System for LiDAR Data Fusion and Feature Extraction," *Geocarto International* 28 (3) : 227–42. doi :10.1080/10106049.2012.689015.

Poelmans L., L. Van Esch, J. Liliane and G. Engelen, 2016. "Landgebruikbestand voor Vlaanderen. Eindrapport ".

SPW-DGO3-DGARNE, 2007. "La Carte d'Occupation Du Sol de Wallonie (COSW)," WalOnMap. http ://geoportail.wallonie.be/catalogue/290e1fe8-0d99-410e-967b-a02f389b931a.html. Consulté en 07/2018.

Porta C., J. Marks and GRASS Development Team, 2017. "R.li – Toolset for multiscale analysis of landscape structure," Open Source Geospatial Foundation, https ://grass.osgeo.org/grass72/manuals/r.li.html

Van De Kerchove R., M. Strale, E. Hanson and E. Wolff, 2015. "Cartographie Des Surfaces Imperméables en Wallonie ».

Zarougui S., 2016. « Développement d'un outil permettant le passage d'une carte d'occupation du sol à une carte d'utilisation du sol à travers le calcul des métriques paysagères, » Rapport de stage, École Nationale des Sciences Géographiques (Paris, France).

CARTOGRAPHIE DÉTAILLÉE DE LA DENSITÉ DE POPULATION : COMPARAISON DE MÉTHODES DASYMÉTRIQUES

Eric Hallot, ISSeP[1]
Odile Close, ISSeP[2]
Tais Grippa, ULB[3]
Benjamin Beaumont, ISSeP[4]
Nathalie Stephenne, SPW[5]
Éléonore Wolff, ULB[6]

[1] Eric Hallot, ISSeP, Attaché, e.hallot@issep.be
[2] Odile Close, ISSeP, Attachée, o.close@issep.be
[3] Tais Grippa, ULB, Chercheur, tgrippa@ulb.ac.be
[4] Benjamin Beaumont, ISSeP, Attaché, b.beaumont@issep.be
[5] Nathalie Stephenne, SPW, Attachée, nathalie.stephenne@spw.wallonie.be
[6] Éléonore Wolff, ULB, Professeure, ewolff@ulb.ac.be

RÉSUMÉ

Les cartes de densité de population détaillées sont nécessaires à la planification territoriale, à la gestion des risques ou comme données de base pour différents modèles et outils d'aide à la décision. Le plus souvent calculées au niveau des entités administratives, elles en gomment les variations internes, parfois très importantes. De plus, elles sont sujettes à des biais liés à la taille et à la forme de ces entités par rapport aux zones de peuplement. Cet article examine les performances de trois méthodes de désagrégation spatiale des données de la population wallonne selon une grille régulière d'un hectare (ha). Les données utilisées sont la population de l'année 2013, agrégée au niveau des communes et des secteurs statistiques, la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW) (SPW, 2007) et le taux d'imperméabilisation du sol (EEA, 2012a). Ces trois méthodes sont adaptées des travaux de Batista *et al.* (2013) et sont implémentées dans le module WEISS développé par le *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* (VITO). Les résultats sont comparés et validés grâce aux données du Registre National des Personnes Physiques (RNPP) (2013) disponibles selon une grille identique, permettant une validation à la même échelle. Les meilleurs résultats sont obtenus par les méthodes utilisant les données d'imperméabilisation du sol.

Liste de mots-clés : densité de population, dasymétrie, taux d'imperméabilisation du sol, occupation du sol

ABSTRACT

Detailed population density maps are essential for territorial planning, risk management and to provide a baseline for developing models and decision support tools. Usually distributed at the level of municipalities, population density maps eliminate internal variations, sometimes very important. In addition, they are subject to biases related to the size and shape of these municipalities in relation to populated areas. This article examines the performance of three spatial disaggregation methods to generate a population density grid of Wallonia with a resolution of 1 hectare (ha). The data used here are the population data of the year 2013 aggregated at the scale of the statistical sectors, the Land Use/Land Cover map of Wallonia (SPW, 2007) and, the imperviousness map of 2012 (EEA, 2012a). The three methods are based on the work of Batista *et al.* (2013) and are implemented in the WEISS module developed by the Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO). The results are compared and validated thanks to the National Register of Natural Persons (2013) through an identical grid, allowing validation on the same scale. The best results have been reached by the use of the imperviousness data.

Keywords : population density, dasymetric mapping, soil sealing rate, land cover

1 INTRODUCTION : DE L'IMPORTANCE DE BIEN LOCALISER LA POPULATION POUR BIEN GÉRER LE TERRITOIRE

Localiser avec précision la population est un enjeu de développement durable tant pour les pouvoirs publics régionaux que locaux. La densité de population est le rapport entre la population habitant un territoire et la superficie de celui-ci. La connaissance de la densité de la population est utile pour apprécier et répondre à de nombreux problèmes sociaux, politiques, économiques et environnementaux (Liu, 2003). À titre d'exemple, les cartes de densité de population à haute résolution spatiale sont nécessaires à la planification territoriale, à la gestion des risques ou comme données de base pour différents modèles et outils d'aide à la décision, tels que ceux qui sont développés par l'Institut Scientifique de Service Public (ISSeP) pour l'administration wallonne. En termes d'analyse des risques, la population représente une cible, mais sa concentration est également considérée comme une source de risque. Par exemple, la densité de la population influe significativement sur la propagation de la grippe (Dalziel *et al.*, 2018), tout comme le virus de la dengue est présent en plus grand nombre dans les zones urbaines les plus denses (Schimdt *et al.*, 2011). La concentration de la population dans les zones urbaines, associée aux vulnérabilités spatiales et économiques, rend les centres urbains plus susceptibles d'être affectés par les risques naturels (Gencer, 2013). En effet, cette concentration augmente sensiblement les facteurs de vulnérabilité de la population face à l'occurrence de phénomènes d'îlots de chaleur (Mirzaei, 2015), d'inondations (Pistocchi *et al.*, 2015) ou d'accumulation des déchets (Who, 2007). Elle peut également être responsable d'une diminution de la mobilité (Cooke et Behrens, 2017) et d'une augmentation de la pollution de l'air (Eriksson et Zehaie, 2005).

Depuis les années 1980, les territoires hors régions urbaines ont connu une croissance démographique plus poussée que les régions urbaines (IWEPS, 2017). Ce phénomène s'appelle l'étalement urbain et est caractérisé par une migration des ménages des grandes villes vers la périphérie. L'étalement urbain par la construction de bâtiments, d'infrastructures et d'équipements s'accompagne d'une artificialisation[7] du territoire ou imperméabilisation[8] du sol. Celle-ci a une incidence marquée sur les sols, car elle réduit leurs fonctions écosystémiques augmentant notamment les risques d'inondation et de sécheresse (Commission européenne, 2012).

Le plus souvent représentées au niveau d'entités administratives (*e.g.* communes), les cartes de densité de population (cartes choroplèthes[9]) soulèvent une certaine controverse (e.g. Mennis, 2003). En effet, la valeur de densité correspond à une moyenne calculée sur l'ensemble de l'entité administrative. On a donc l'impression que la variable est distribuée de manière homogène sur chaque unité de surface, même lorsque des parties plus ou moins importantes de l'unité sont en réalité inhabitées (Dorling, 1993). De fortes disparités locales peuvent donc être masquées (*e.g.* faible densité de population dans les forêts). De plus, les limites de ces entités ne correspondent pas toujours à des limites naturelles (cours d'eau) ou artificielles (grandes routes) qui traduisent un phénomène géographique réel (Forster, 1985), mais à des limites imposées politiquement

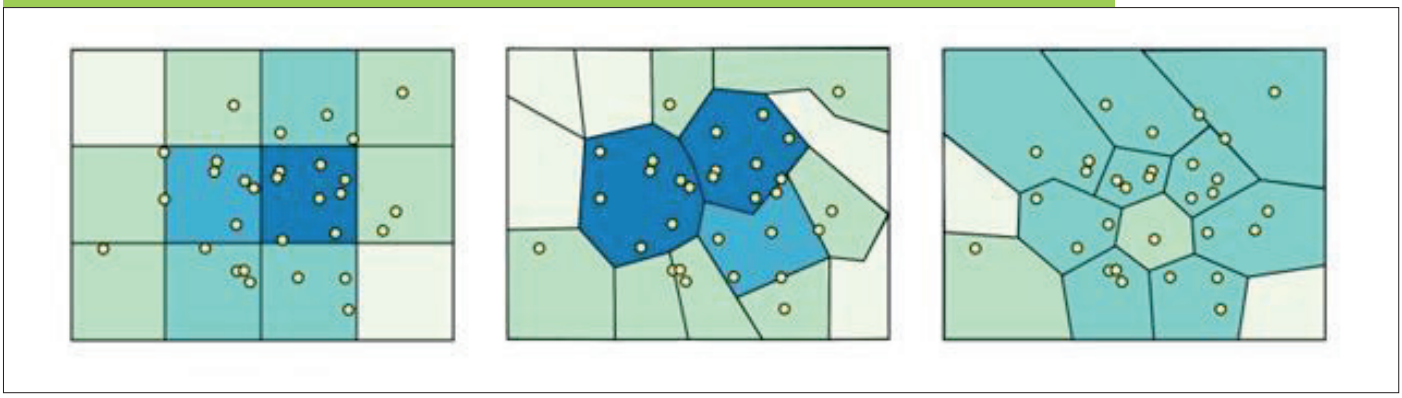
7 L'artificialisation se définit comme la conversion de surfaces agricoles ou naturelles en espace urbain. En Wallonie, entre 1985 et 2018, les terrains artificialisés ont connu une croissance d'environ 530 km² ce qui correspond à une artificialisation moyenne de 16,0 km²/an (IWEPS, 2018).

8 L'imperméabilisation du sol est le recouvrement permanent d'une parcelle de terre et de son sol par un matériau artificiel imperméable qui empêche l'infiltration naturelle des eaux.

9 Une carte choroplèthe est une carte thématique dans laquelle une variable quantitative continue (par exemple, la densité de la population) est représentée sur une unité surfacique selon une plage de couleurs ou un motif particulier.

(commune, fusions, remembrements, *etc.*). Dès lors, le fait de ne pas distinguer les différentes utilisations du sol dans le calcul de la densité de la population peut entraîner une représentation trompeuse de celle-ci (Liu et Clarke, 2002). Par exemple, les alentours des noyaux villageois périphériques ont été fortement urbanisés ces dernières décennies et les limites des entités ne correspondent plus à leur extension actuelle. Pour résoudre ces distorsions, décrites dans le concept de « *Modifiable Areal Unit Problem* » (MAUP) (Openshaw et Taylor, 1979), le nombre d'habitants est redistribué par unité de surface dans des zones spatiales homogènes ou une grille régulière. Ce concept signale que les résultats de toute cartographie dépendent de la définition des unités d'analyse. Pour une même répartition spatiale, modifier la taille ou la forme des unités peut affecter de manière importante la valeur de l'indicateur calculé. La figure 1 représente comment trois agrégations différentes de données de comptage (par exemple, trois unités de recensement différentes) peuvent affecter l'apparence d'une carte de densité de la population (densité/surface). Les trois cartes utilisent les mêmes limites de classes de densité et les mêmes teintes, mais les découpages sont différents (grille régulière à gauche, appliquée dans les méthodes décrites ci-après, et polygones arbitrairement définis au centre et à droite) et donnent des résultats de densité de population significativement différents.

Figure 1 : Modifiable Areal Unit Problem



Note de lecture : L'utilisation de découpages du territoire différents affecte la représentation et les résultats du calcul de densité de population (modifié d'après Gruver, 2014).

L'Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique (IWEPS), en respectant la grille régulière à 1 km² proposée par la Direction générale de la Politique régionale et urbaine de la Commission européenne (DG REGIO), a publié une carte de densité de population pour la Wallonie (Reginster et Charlier, 2018). Cette carte suit les recommandations européennes visant à une meilleure harmonisation des mesures spatiales et résout les problèmes de MAUP. Elle agrège les données de population obtenues par la géolocalisation des adresses du Registre National des Personnes Physiques (RNPP) sur la base des parcelles cadastrales (voir 2.1.1.b pour une description plus détaillée). Néanmoins, cette carte à 1 km2 ne représente pas encore suffisamment précisément la répartition réelle de la population. Une agrégation des données du RNPP à une échelle plus fine (ici à 1 ha) permet de proposer des cartes plus détaillées qui répondent aux besoins décisionnels, mais pourraient enfreindre la protection des données relatives à la vie privée (cf. RGPD, EU, 2016), principalement dans les zones de faible densité, en publiant des données permettant l'identification de personnes.

Introduite pour la première fois par Wright en 1936, la cartographie dasymétrique est une méthode d'interpolation de données surfaciques (Vignes *et al.* 2013). Il s'agit d'un processus de désagrégation des données spatiales en unités d'analyse plus fines à l'aide de données thématiques permettant d'affiner la localisation de ces données, populations ou d'autres phénomènes (Mennis, 2003). Ce type de cartographie peut s'appliquer théoriquement à toute donnée spatiale quantitative agrégée par unité géographique administrative, environnementale, etc. Ces dernières années ont vu le développement de différentes approches et techniques dasymétriques. Les travaux de Wu *et al.* (2005), Petrov (2012) et Batista *et al.* (2013) passent en revue la plupart des méthodes existantes d'estimation de la densité de population. Au niveau global, plusieurs projets désagrègent les statistiques démographiques dans une grille régulière et proposent une mise à jour en continu (Lloyd *et al.*, 2017). Pour les précurseurs à l'échelle globale, le projet *Gridded Population of the World* (Balk *et al.*, 2006), propose une désagrégation spatiale des données les plus récentes disponibles à l'échelle mondiale[10], tandis que les projets *Landscan* (Dobson *et al.*, 2000) et *WorldPop* (Linard et Tatem, 2012) se basent respectivement sur des régressions multivariées[11] de différentes données thématiques ou des méthodes de *Machine Learning*[12]. À l'échelle européenne, les données d'Eurostat de 2001 ont été désagrégées en fonction des classes d'occupation du sol issues de la base de données européennes d'occupation du sol *Corine Land Cover* (Gallego et Peedell, 2001) ou en combinaison avec des données de luminosité artificielle du ciel nocturne (Briggs *et al.*, 2007). Partant de l'hypothèse que la population est localisée là où il y a des terrains imperméables, le taux d'imperméabilisation des sols, obtenu notamment à partir d'images satellitaires, est souvent utilisé pour évaluer la densité de la population (Cornet *et al.*, 2012 ; Crols *et al.*, 2017). Grâce à ce type de données, Batista *et al.* (2013) ont produit une carte de la population européenne de 2006 à une échelle de 100 m. Pour la Flandre, Engelen *et al.* (2011) utilisent des données d'utilisation du sol à très haute résolution pour produire des cartes de densité de population (100 m), associées aux résultats d'un modèle dynamique d'utilisation du sol. Crols *et al.* (2017) ont également proposé, pour la Flandre, des cartes de densité de population pour les dernières décennies en se basant sur des séries chronologiques de données d'imperméabilisation du sol (2001-2013).

Dans leur grande majorité, ces différentes approches ne peuvent être validées qu'en tenant compte du fait que la désagrégation effectuée doit conserver le chiffre de la population totale à tous les niveaux de généralisation spatiale. Le résultat (la population désagrégée) est comparé aux données de recensement disponibles à ce niveau (Ledant, 2009 ; Batista *et al.*, 2013 ; Cornet *et al.*, 2015).

Depuis peu, le nombre d'adresses par unité de recensement est utilisé comme méthode la plus précise pour calculer des cartes de densité de population à haute résolution (Tapp, 2010). Les données de téléphonie mobile nocturne peuvent également affiner l'échelle des cartes de population (Deville *et al.*, 2014). Malheureusement, les points d'adresses et les données relatives aux téléphones mobiles ne sont généralement que peu ou pas disponibles, au vu des réglementations concernant le respect de la vie privée. De plus, la valeur marchande importante de ce type d'information pour les opérateurs de téléphonie mobile freine leur mise à disposition dans un cadre de recherche.

Cet article s'appuie sur le projet Smartpop[13] et propose de comparer les performances de trois approches de désagrégation pour générer une grille de densité de population

[10] La grille utilisée a une résolution de 30 secondes d'arc, sous-unités du degré correspondant à 1/3600e.

[11] La régression multivariée (ou multiple) se base sur la relation entre plusieurs variables indépendantes ou prédictives (e.g. occupation ou imperméabilisation du sol) et une variable dépendante ou de critère (e.g. population).

[12] Le machine learning ou « apprentissage automatique » utilise des approches statistiques pour « apprendre » à partir des données et améliorer les performances d'un modèle.

[13] Porté par l'ISSeP, en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles (ULB), le projet SmartPop propose d'améliorer les modèles de risques développés par l'ISSeP pour l'administration wallonne en intégrant des cartes de densité de population par hectare, plus fines ou plus précises que celles qui existent (1km²). Le choix d'un algorithme optimal de désagrégation des statistiques démographiques permet de mettre à jour à la demande des cartes de densité de population, dès l'obtention des données de base mises à jour et validées par les responsables régionaux.

de la Wallonie avec une résolution spatiale de 1 ha (100m x 100m) à partir de données libres et anonymes.

Les données utilisées, décrites ci-après (section 2.1), sont la population au 1er janvier 2013, agrégée au niveau des communes et des secteurs statistiques, le taux d'imperméabilisation du sol (EEA, 2012a) ainsi que la Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW ; SPW, 2007). Les approches dasymétriques sont basées sur les travaux de Batista *et al.* (2013). Dans le cadre de cette recherche nous avons utilisé le logiciel WEISS, développé par le Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), qui intègre un module de désagrégation de la population au travers des classes d'utilisation/d'occupation du sol et de leurs valeurs de densité de population, définies par l'utilisateur (Poelmans *et al.*, 2015). Ce module offre également la possibilité d'utiliser, dans le processus de désagrégation, une régression linéaire basée sur d'autres données thématiques comme le taux d'urbanisation ou l'imperméabilisation du sol. Les résultats de chaque approche sont interprétés et validés grâce aux données de populations extraites, au 1er janvier 2013, du RNPP, agrégées selon une grille identique.

2 MÉTHODOLOGIE

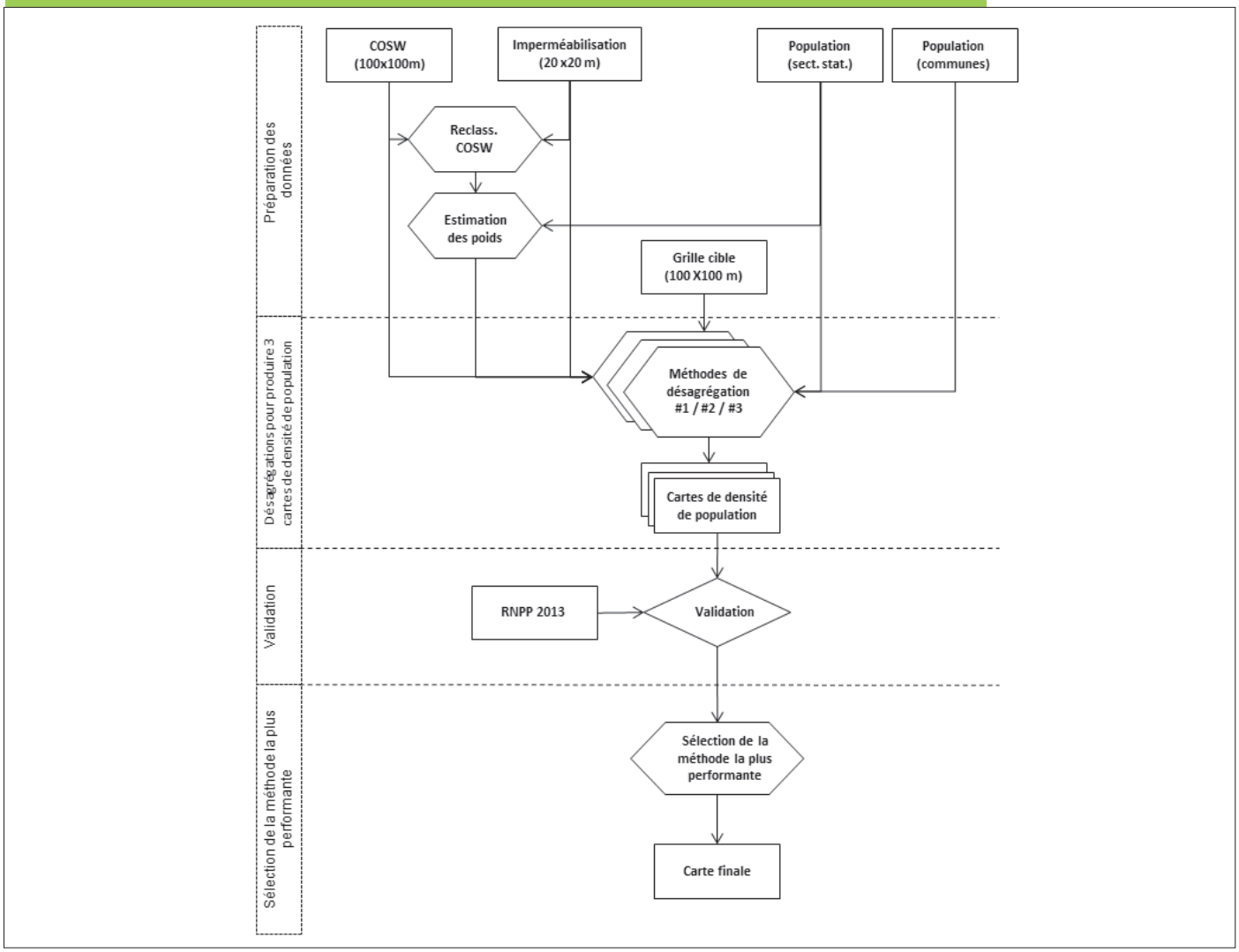
L'information de population connue au niveau d'une zone source est distribuée dans plusieurs zones cibles sur base de cartes thématiques. On peut l'exprimer selon la formule générale suivante (Eicher et Brewer, 2001) :

$$P_c = P_s \times \frac{A_c \times W_c}{\Sigma_c (A_c \times W_c)} \quad \text{(Équation 1)}$$

avec Pc = population estimée dans la zone cible, Ps= population connue dans la zone source (avec Pc ≤ Ps), A_c = surface de la zone cible et W_c = pondération associée à la densité de la population dans la zone cible.

Les quatre étapes suivies dans cet exercice cartographique sont décrites à la figure 2 : la préparation des données (reclassification de la COSW et estimation des pondérations ou densités (Wc) des différentes classes), la mise en œuvre des trois approches de désagrégation des données de population (par communes et secteurs statistiques) sur une grille de 100 x 100 mètres de résolution, la validation grâce aux données du RNPP et, enfin, la sélection de la méthode la plus efficace.

Figure 2 : Étapes méthodologiques



2.1. DESCRIPTION DES DONNÉES

Deux types de données sont utilisés, les données de population agrégées selon différents découpages territoriaux et des données thématiques.

2.1.1. Données de population

2.1.1.1. Découpage territorial

Les données de population produites par Statbel (l'Office belge de Statistiques) sont disponibles selon les différentes entités administratives belges. Le territoire se subdivise en quatre niveaux administratifs hiérarchiques (régions, provinces, arrondissements, et communes). À ces quatre niveaux administratifs, s'ajoute depuis 1970 un niveau développé pour la publication de données statistiques destinées aux analyses infracommunales : le secteur statistique. Ce découpage a été créé à l'occasion du Recensement Général de la Population et des Logements de 1970, afin d'obtenir une vision détaillée des réalités socioéconomiques des communes, tout en ayant une précision accrue sur la morphologie et les caractéristiques de l'habitat (Van Der Haegen et Brulard, 1972). Le découpage a été remodelé en 1981 sur la base de caractéristiques structurelles d'ordre social, économique, urbanistique ou morphologique et retouché pour l'Enquête socioéconomique de 2001, pour assurer la correspondance avec les modifications des limites communales et intégrer les grandes modifications de l'utilisation du sol (INS, 2011). La taille des secteurs statistiques est beaucoup plus petite que celle des communes, mais néanmoins très variable.

Le tableau 1 met en évidence la grande variabilité en taille et en densité des entités de recensement, très marquée au niveau des secteurs statistiques, ce qui illustre l'effet MAUP. C'est à ce niveau que les données de population les plus précises sont actuellement fournies annuellement, à l'exception de la carte de l'IWEPS à 1 km. En Région wallonne, les entités statistiques, auxquelles sont fournies les statistiques de population, sont structurées de la manière suivante : 1 région, 5 provinces, 20 arrondissements, 262 communes et 9 875 secteurs statistiques.

Tableau 1 : Entités de population disponibles en Wallonie

	Communes	Secteurs statistiques
Nombre	# 262	# 9 875
Surface moyenne	64,5 km²	1,7 km²
Surface minimale	6,8 km²	0,013 km²
Surface maximale	215 km²	63,15 km²
Densité de population maximale (2013)	3 423 hab/km²	17 500 hab/km²
Densité de population moyenne (2013)	317 hab/km²	974 hab/km²

2.1.1.2. Données de population Statbel (2013)

Seize recensements et *census* de la population et des logements ont été réalisés entre 1846 et 2011 par Statbel. Les recensements avaient surtout un rôle administratif (compter la population), mais également une valeur socioéconomique (calcul d'attribution des subsides, rémunération des fonctionnaires communaux, nombre de membres du conseil communal et du conseil provincial, *etc.*). Le RNPP désigne le système de traitement d'information qui assure l'enregistrement, la mémorisation et la communication d'informations relatives à l'identification des personnes physiques (Belges et étrangers,

réfugiés compris, résidant en Belgique) (IBZ, 2014). Son introduction dans les années 1980 a facilité le comptage de la population et les chiffres de la population ont été publiés beaucoup plus rapidement et annuellement selon les différentes unités administratives. Depuis 2001, la population n'est désormais plus comptée par le « recensement », mais bien via le Registre National. C'est à partir de ce dernier que Statbel publie les chiffres de la population légalement enregistrée en Belgique au 1er janvier par entités administratives. Dans le cadre de cette recherche, l'IWEPS a mis à notre disposition cette information pour l'année 2013 agrégée selon une grille de 100 x 100 m de résolution. Elle localise les personnes physiques à leur lieu de résidence grâce à leur adresse postale. L'adresse postale a été transformée en coordonnées géographiques par l'Administration Générale de la Documentation Patrimoniale (AGDP/Service public fédéral Finances), grâce au lien avec la matrice cadastrale. La localisation correspond majoritairement au centre du bâtiment de la parcelle dont l'emprise au sol est la plus grande. Chaque individu est alors localisé sur le territoire par un point. Le nombre de points est ensuite comptabilisé dans une maille de 100 x 100 m. Même sous cette forme, ces données sont sujettes à la loi sur la protection de la vie privée et ne peuvent être utilisées que pour la recherche et en particulier pour la validation des résultats.

2.1.2. Données thématiques

2.1.2.1. Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW 2007)

Traditionnellement, la cartographie dasymétrique se base sur la relation entre densité de population et utilisation/occupation du sol pour désagréger la population (Zandbergen et Ignizio, 2010). La carte thématique de l'équation 1 est souvent une carte d'occupation du sol. La COSW est encore actuellement la seule carte fournissant une information détaillée sur l'utilisation et l'occupation du sol en Wallonie. Elle a été publiée en 2007, mais se base sur des sources datant de 2005 (Baltus *et al.*, 2007). Elle est donc sensiblement dépassée par rapport à la situation actuelle. L'intégration de toutes les données existantes dans une légende alliant l'occupation et l'utilisation du sol s'est inspirée de la carte européenne CORINE *Land Cover*. La COSW se base principalement au niveau géométrique sur le Plan de Localisation Informatique[14] (PLI) wallon et, au niveau thématique, sur les données issues de la matrice cadastrale (nature des parcelles). Notons cependant que la nature cadastrale peut parfois accueillir différentes occupations du sol et qu'il n'est pas possible de les distinguer (par exemple, une parcelle bâtie comprenant un jardin ou un pré). La COSW associe d'autres thématiques par géotraitements effectués à l'échelle des entités surfaciques. L'application d'une typologie permet de classer et d'agréger ces entités surfaciques dans les classes d'occupation et d'utilisation du sol dans la légende. L'échelle de référence est fixée au 1/10 000e, ce qui correspond à l'échelle de travail de la plupart des utilisateurs ainsi qu'à de nombreuses données existantes au sein de l'administration wallonne (SPW, 2008). Elle est encore utilisée par de nombreux services en l'attente d'une mise à jour. Beaumont *et al.* (voir l'article de Beaumont *et al.* dans ce numéro) ont proposé, à l'échelle de la région liégeoise, la mise en place d'une nouvelle méthodologie opérationnelle de cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol applicable à l'ensemble de la Wallonie.

2.1.2.2. Pourcentage d'imperméabilisation du sol (2012)

L'imperméabilisation du sol est une mesure robuste pour caractériser le développement urbain (Schueler *et al.*, 2009 ; Theobald *et al.*, 2009) par sa forte corrélation avec la densité de population. Par rapport aux cartes d'utilisation/occupation du sol qui représentent généralement la population en termes de haute, moyenne et faible densité, les cartes d'imperméabilisation du sol présentent l'avantage d'être plus détaillées et de fournir une information continue en pourcentage d'imperméabilisation du sol (1-100 %) par unité de surface (Zandbergen et Ignizio, 2010).

[14] Le Plan de Localisation Informatique (PLI) vise à enrichir le fond de plan IGN 1:10 000 d'un référentiel cadastral continu sur le territoire de la Région wallonne. Il est constitué des communes, des divisions, des sections, des parcelles et du bâti, issus des planches cadastrales, vectorisés et calés sur les cartes topographiques. Depuis 2013, l'AGDP fournit une version numérique du plan parcellaire (CADMAP). En conséquence, le SPW n'assure plus la mise à jour du PLI et le remplace progressivement par le CADMAP.

L'Agence Européenne pour l'Environnement (EEA) fournit un produit à 20 mètres de résolution du pourcentage d'imperméabilisation du sol, pour les années de référence 2006, 2009, 2012 et 2015. Ces données sont issues de l'analyse et du traitement de données satellitaires à haute résolution spatiale et d'autres sources de données existantes pour la zone des 39 états membres et pays affiliés à l'EEA. Le pourcentage d'imperméabilisation du sol est principalement basé sur l'indice de végétation par différence normalisée (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI). Il s'agit d'un indice de végétation (biomasse relative) qui repose sur le contraste entre l'absorption du pigment chlorophyllien dans le canal rouge et la haute réflectivité des matières végétales dans le canal proche infrarouge (NIR) (Lillesand *et al.*, 2004). Le degré d'imperméabilité est exprimé par maille entre 0-100 %. Nous utilisons ici les données de 2012, les plus proches de notre année de référence.

2.2. RECLASSIFICATION DE LA COSW

La première étape de notre méthode (voir figure 2) consiste à reclasser la légende de la COSW selon un masque binaire : zones habitées et zones inhabitées. Cela permet de ne pas redistribuer les données de population dans des zones urbanisées, mais non habitées, comme les zones d'activité économique, les infrastructures de transports (routes, aéroports, *etc.*) ou les équipements communautaires. Au niveau des zones inhabitées, deux classes différentes sont créées : une « réellement » inhabitée (plan d'eau, réseau routier, *etc.*) et une autre où la présence d'habitat est « possible » (voir classes 5 et 6 du tableau 2) (Langford *et al.*, 1991).

Ensuite, les zones habitées qui comprennent les onze classes résidentielles[15] de la COSW sont réparties en quatre classes en fonction du taux d'imperméabilisation (TI) du sol. Les limites utilisées pour le taux d'imperméabilisation sont les mêmes que dans la classification de l'*Urban Atlas* (EEA, 2012b) à savoir (1) TI > 80 % pour le « tissu urbain continu », (2) TI de 50 à 80 % pour le « tissu urbain dense discontinu », (3) TI de 30 à 50 % pour le « tissu urbain discontinu de densité moyenne » et (4) TI de 10 à 30 % pour le « tissu urbain discontinu de faible densité » (Büttner *et al.*, 2006). Le « tissu urbain discontinu très basse densité » de la nomenclature de l'*Urban Atlas* caractérisé par un TI <10 % est assimilé à la classe 5 « habitat possible ».

Enfin, une densité de population moyenne est calculée pour chacune de ces nouvelles classes à partir des données de population des secteurs statistiques (définition des pondérations). Cette méthode est plus robuste que les méthodes empiriques (Batista *et al.*, 2013). Pour chaque classe, seules les valeurs de densités moyennes des quartiles supérieurs sont utilisées afin d'éliminer les valeurs aberrantes. Pour la même raison, les calculs de densité sont réalisés dans les secteurs statistiques inclus à plus de 90 % dans une classe. Cette procédure s'inspire du calcul des densités relatives par « pourcentage de recouvrement spécifique » décrit par Mennis *et al.* (2006) et Sleeter et Gould (2007). Le tableau 2 présente les différentes densités de population calculées par cette méthode, ainsi que le nombre de valeurs prises en compte pour calculer cette moyenne.

2.3. DÉSAGRÉGATION ET PRODUCTION DES TROIS CARTES DE DENSITÉ DE POPULATION

Nous avons appliqué les trois méthodes suivantes à la fois au niveau communal et au niveau des secteurs statistiques.

2.3.1. Méthode 1 : Densité moyenne dérivée de l'utilisation/occupation du sol

La première méthode (#1) suit une procédure standard de cartographie dasymétrique telle qu'utilisée dans les travaux d'Eicher et Brewer (2001) et Gallego *et al.* (2011).

[15] La classe 12131 (activités de vente au détail) a été assimilée aux zones résidentielles. En effet, nous avons estimé que ces activités, en milieu urbain, sont généralement intimement liées au logement (par exemple, rez-de-chaussée commercial et appartements aux étages suivants).

Tableau 2 : Reclassification de la COSW

Nouvelles classes		Légende COSW (niveau 2)		Taux d'imperméabilisation (%)	Densité (hab/ha)
1	Tissu urbain continu	1111	Tissu urbain continu à très haute densité	98	120 (8 sect. stat.)
		1112	Tissu urbain continu à haute densité	93	
		11213	Tissu urbain discontinu à haute densité	91	
		12131	Magasin	88	
2	Tissu urbain dense discontinu	11211	Tissu urbain continu de densité moyenne	68	65 (15 sect. stat.)
		11214	Tissu urbain discontinu de densité moyenne	66	
		11221	Tissu urbain continu	58	
		11216	Complexe résidentiel dans des bâtiments disjoints	50	
3	Tissu urbain moyen discontinu	11212	Tissu urbain continu à faible densité	36	40 (18 sect. stat.)
		11215	Tissu urbain discontinu à faible densité	33	
4	Tissu urbain faible discontinu	11222	Tissu urbain discontinu	22	10 (1 000 sect. stat.)
5	Habitat possible	Non résidentiel	Habitat possible	<10	5 (estimé)
6	Zone inhabitée	Non résidentiel	Zone inhabitée	<10	0 (imposé)

Le taux d'imperméabilisation correspond aux valeurs moyennes calculées par classes de la COSW sur l'ensemble de la Wallonie. Le nombre de secteurs statistiques utilisés pour calculer la densité de population moyenne est indiqué entre parenthèses.

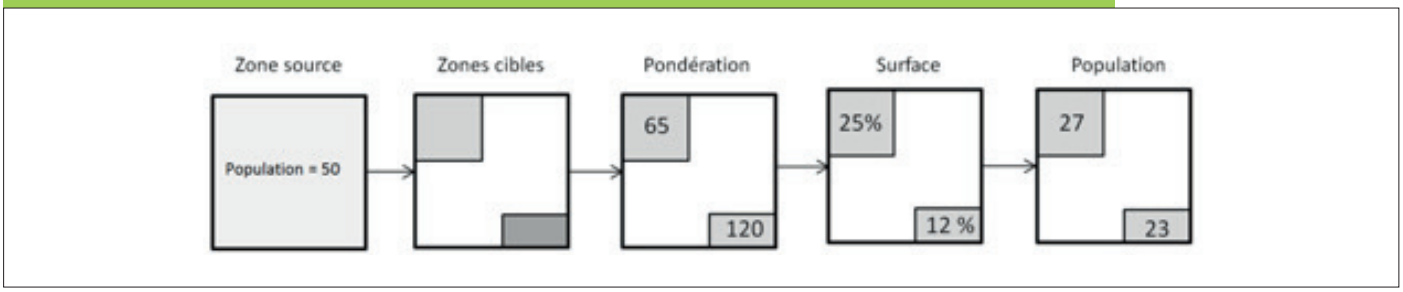
Cette méthode considère que la distribution de la population est directement liée à l'utilisation/occupation du sol (Langford *et al.*, 1991). Elle peut être généralisée selon l'équation suivante :

$$P_s = \beta_0 + \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \ldots + \beta_n U_n + \varepsilon_s \quad \text{(Équation 2)}$$

Où P_s correspond à la densité de population dans la zone source S, β_c est un coefficient correspondant à la densité de population relative pour chaque classe d'occupation du sol U_c avec c = {1,2, … , n}, et ε_s représente l'erreur due à la régression linéaire (Batista *et al.* 2013).

Dans cette méthode, une densité de population moyenne est attribuée à chacune des classes d'occupation du sol, conformément au tableau 2, et est utilisée comme pondération pour désagréger les données de population (figure 3).

Figure 3 : Méthode #1



La population de la zone source est répartie au niveau de zones cibles en fonction des zones habitées (cf. section 2.2). La population totale de la zone source est pondérée par la densité de population relative de la zone cible (cf. tableau 2) et par sa surface relative.
Exemple : $50 \times \frac{65 \times 25}{(65 \times 25) + (120 \times 12)} \approx 27$

2.3.2. Méthode 2 : Désagrégation à partir du taux d'imperméabilisation du sol

La seconde méthode (#2) utilise uniquement des données thématiques corrélées à la densité de population dans le processus de désagrégation (figure 4). Dans ce travail, le taux d'imperméabilisation du sol est utilisé comme donnée thématique pour désagréger la population, considéré comme proxy robuste des zones urbanisées. Cette relation est matérialisée par les équations suivantes :

$$k_s = \frac{P_s}{\sum_c (U_c \times S_c)}$$ (Équation 3) (Batista *et al.*, 2013)

$$P'_{cs} = k_s \times S_c$$ (Équation 4)

$$P_s = \sum_c P'_{cs}$$ (Équation 5)

Dans ces équations, le facteur k est une constante établissant la relation linéaire entre la densité de population et S le degré moyen d'imperméabilisation. Ce facteur peut être interprété comme le nombre d'habitants par unité (%) de surface imperméabilisée pour chaque zone source. Un masque binaire (0,1) identifiant les zones inhabitées (plans d'eau, réseau routier, *etc.*) et les zones habitées (cf. tableau 2) est d'abord appliqué aux données d'imperméabilisation.

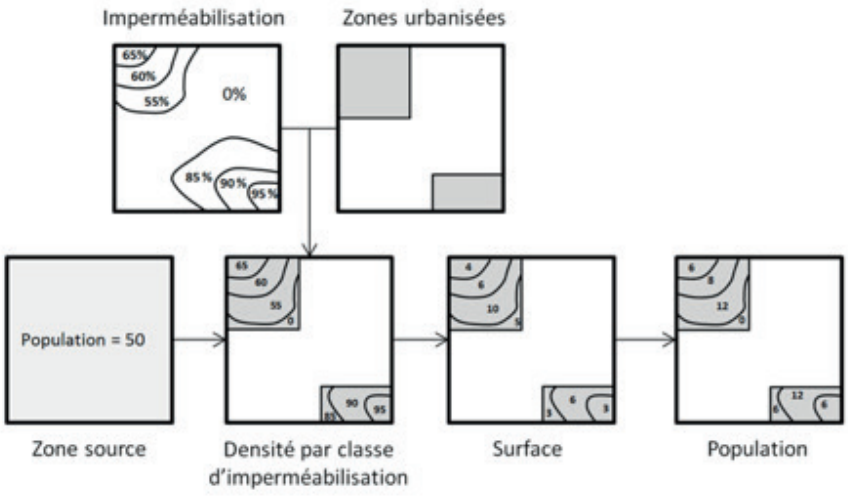
2.3.3. Méthode 3 : Double pondération via l'occupation et l'imperméabilisation du sol

La troisième méthode se base sur une pondération multiple (#3), dans notre cas, à partir des méthodes #1 et #2. Elle s'exprime par la combinaison de l'équation (2) et de l'équation (5) :

$$k_s = \frac{\beta_0 + \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \beta_3 U_3 + \varepsilon_s}{\sum_c (U_c \times S_c)}$$ (Équation 6)

La population est redistribuée à la fois à partir des pondérations calculées au niveau des six classes d'occupation du sol (#1) et en fonction du taux d'imperméabilisation (#2) (figure 5).

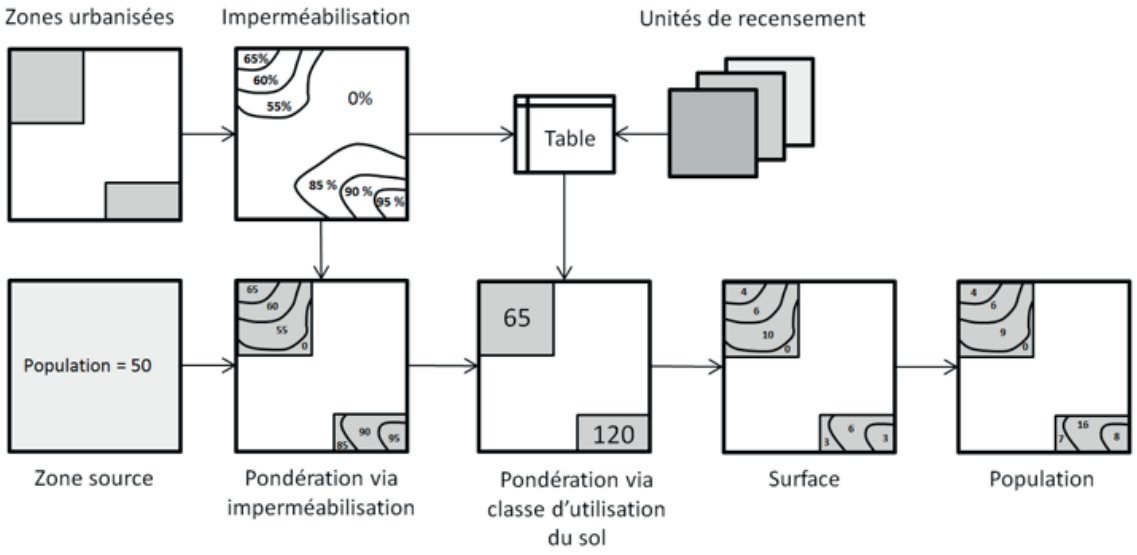
Figure 4 : Méthode #2



La population de la zone source est répartie au niveau de zones cibles en fonction des zones habitées (cf. section 2.2). Elle est ensuite pondérée par une densité relative obtenue à partir du taux d'imperméabilisation et par sa surface relative.

Exemple : $50 \times \frac{65 \times 4}{(65\times4)+(60\times6)+ \ldots +(95\times3)} \approx 6$

Figure 5 : Méthode #3



La population de la zone source est répartie au niveau de zones cibles en fonction des zones habitées (cf. section 2.2). Elle est ensuite pondérée par une densité relative obtenue à partir du taux d'imperméabilisation, mais également par la densité de population relative de la zone cible (cf. tableau 2) et enfin par sa surface relative. Exemple : 50 × $\frac{65\times65\times4}{(65\times65\times4)+(60\times65\times6)+\ldots+(95\times120\times3)} \approx 4$

2.4. VALIDATION

Contrairement à plusieurs études, dont Batista *et al.* (2013), nous disposons d'une donnée de référence à la même résolution que nos résultats (RNPP 2013). Il n'est donc pas nécessaire de réagréger les résultats obtenus à l'échelle d'une maille de 100 mètres vers des entités statistiques différentes des données sources, pour comparer et valider les différentes méthodes. Ceci nous a d'ailleurs permis de désagréger à la fois les données à l'échelle des communes et des secteurs statistiques. Pour calculer l'écart par rapport à la référence, les résultats sont soustraits (maille par maille) du RNPP 2103 pour chacune des six désagrégations (2 niveaux hiérarchiques X 3 méthodes).

Pour quantifier l'exactitude de chaque désagrégation, outre l'erreur type (*root mean square error*, RMSE), nous avons calculé l'erreur absolue totale (TAE) en raison de sa robustesse face aux valeurs aberrantes (Legates et McCabe, 1999 ; Willmott et Matsuura, 2005 ; Gallego *et al.*, 2011 ; Batista *et al.*, 2013),

$$TAE = \Sigma_j |P_j - P_{j,ref}| \qquad \text{(Equation 7)}$$

où P_j et $P_{j,ref}$ sont respectivement les valeurs de la densité de population désagrégée et de référence au niveau de la maille j (Gallego *et al.*, 2011). Pour une interprétation plus aisée, nous utilisons l'indice pondéré (RTAE) dont le résultat est borné entre 0 (désagrégation parfaite) et 2 (mauvaise désagrégation) :

$$RTAE = \frac{TAE}{P_t} \qquad \text{(Équation 8)}$$

avec $P_t = \Sigma P_j$. Les résultats sont présentés dans le tableau 3. L'ensemble des six méthodes de désagrégation effectuées donne une population totale wallonne de 3 562 519 habitants. Elles conservent donc la population à tous les niveaux de généralisation spatiale (propriété pycnophylactique), la différence avec la population totale de référence (3 560 476 hab.) est inférieure à 0,06 %.

Tableau 3 : Statistiques de validation

Unité statistique	Méthode	RMSE	RTAE
Communes	Méthode 1 : Densités calculées (#1_com)	29,50	1,34
	Méthode 2 : Imperméabilisation (#2_com)	8,62	0,94
	Méthode 3 : Double pondération (#3_com)	13,63	1,11
Secteurs statistiques	Méthode 1 : Densités calculées (#1_ss)	15,60	1,20
	Méthode 2 : Imperméabilisation (#2_ss)	8,72	0,93
	Méthode 3 : Double pondération (#3_ss)	11,24	1,05

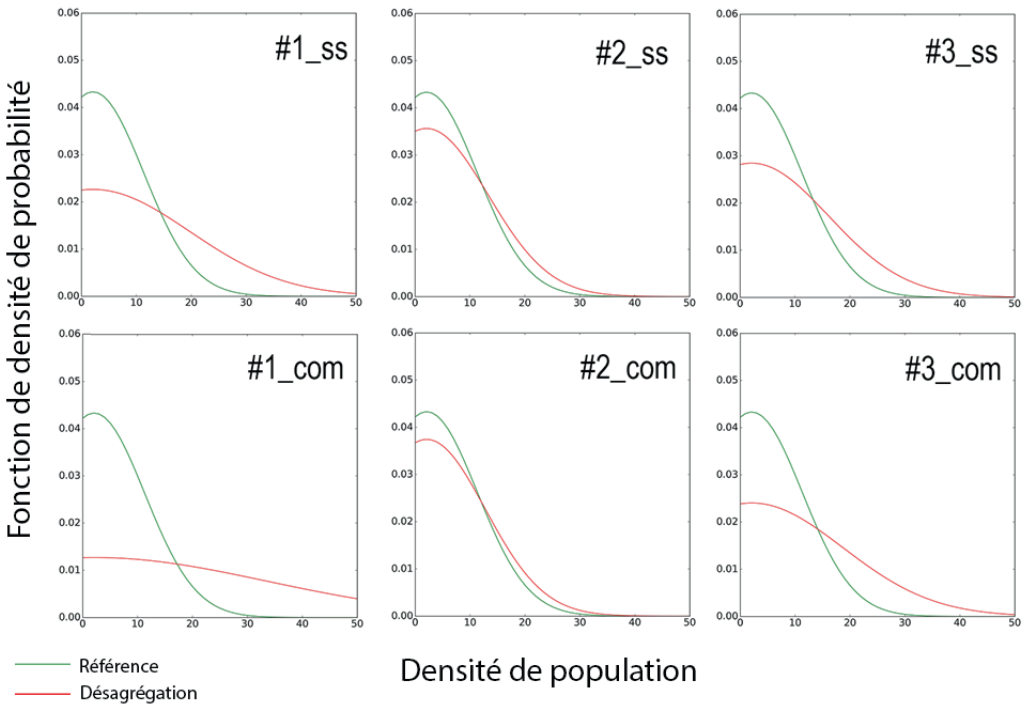
L'écart quadratique moyen (root-mean-square error, RMSE) permet de caractériser la « précision » d'un estimateur (dans ce cas, le résultat de la désagrégation). Au contraire du RTAE, il n'est pas borné et donc d'une interprétation moins aisée.

2.5. SÉLECTION DE LA MÉTHODE LA PLUS PERFORMANTE ET CARTOGRAPHIE

Logiquement, les méthodes basées sur les secteurs statistiques, dont la résolution spatiale est plus fine, offrent de meilleurs résultats par rapport aux communes. Cependant, ce gain n'est pas fortement marqué. Cela pourrait être attribué au fait que les données thématiques utilisées (COSW ou taux d'imperméabilisation) ont une résolution spatiale beaucoup plus fine que les unités de découpage territorial. Ceci impliquerait que la résolution de ces dernières aurait moins d'influence sur le résultat de la désagrégation.

La première méthode, suivant une procédure standard qui utilise la carte d'utilisation/occupation du sol de Wallonie, est de loin la moins performante. La troisième méthode, utilisant une double pondération à partir de l'occupation du sol et du taux d'imperméabilisation, présente, de manière inattendue, de moins

Figure 6 : Fonctions de densité de probabilité du percentile supérieur 99 %



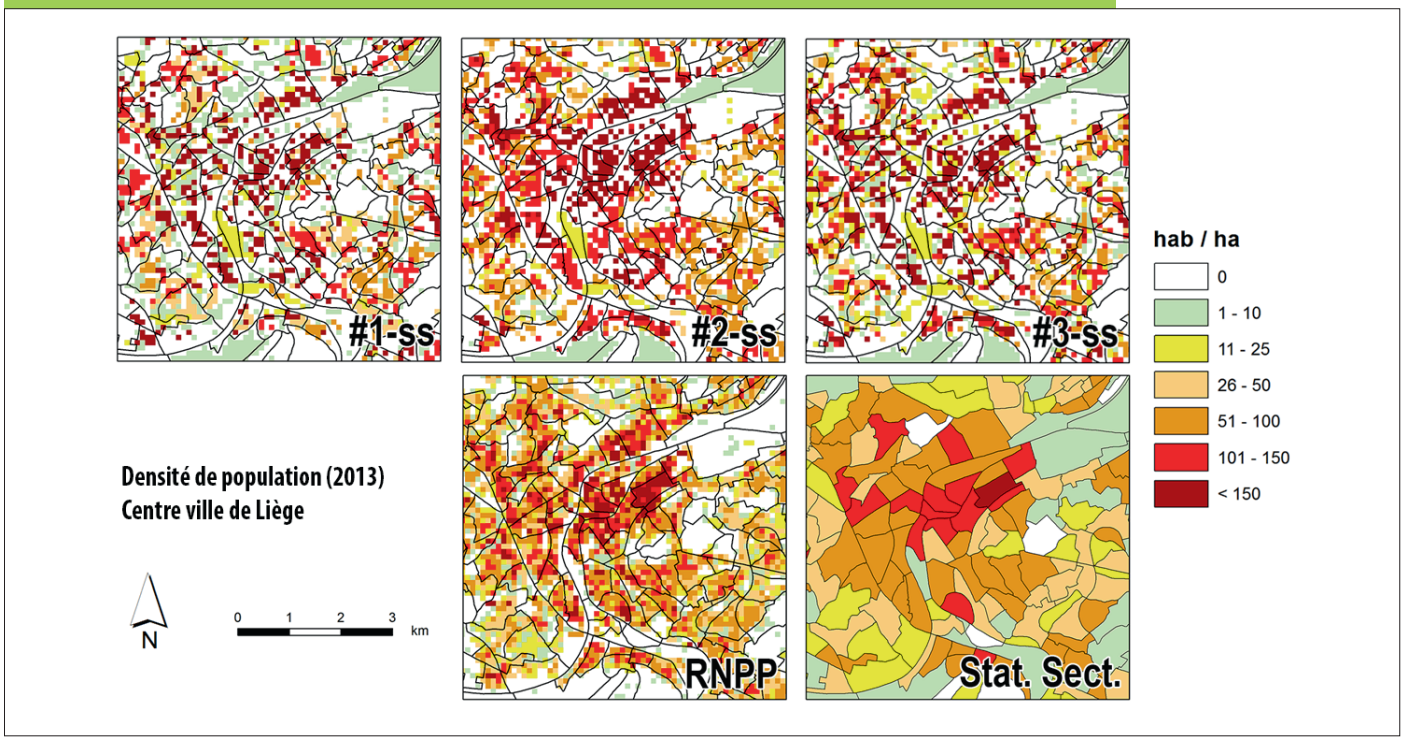
bons résultats que la deuxième méthode, basée uniquement sur le taux d'imperméabilisation. En effet, cette dernière présente les meilleurs résultats, quelle que soit l'unité statistique désagrégée.

Afin de visualiser la distribution des résultats en fonction de la densité de population des mailles, nous avons également calculé une fonction de densité de probabilité[16] du percentile supérieur 99 % des résultats (voir figure 6). La courbe verte représente la distribution de densité de probabilité des données du RNPP (la référence) tandis que la courbe rouge représente la distribution de la densité de population désagrégée selon les différentes méthodes. Cette représentation permet d'observer la position et la forme des courbes. Elle confirme les observations effectuées à partir du RTAE (Tableau 3), mais permet également de déterminer dans quelles classes de valeur de densité l'erreur est la plus importante. Par exemple, la méthode #1_com (méthode 1 – communes) est la méthode la moins efficace de toutes, alors que les méthodes #3_com (méthode 3 – communes) et #3_ss (méthode 3 – secteurs statistiques) sous-estiment fortement les zones de faibles densités de population. Les méthodes #2_com (méthode 2 – communes) et #2_ss (méthode 2 – secteurs statistiques) sont très nettement plus efficaces, mais sous-estiment également légèrement les zones de faibles densités de population.

La figure 7 présente le résultat des trois méthodes dasymétriques basées sur les secteurs statistiques au niveau du centre-ville de Liège. Chaque maille représente une zone d'un hectare. Les données de validation (RNPP 2013) sont également représentées ainsi que les données agrégées par secteur statistique. Visuellement, on observe, par rapport au RNPP, que l'ensemble des méthodes sous-estime les zones de faibles densités, mais qu'elles ont également tendance à attribuer des habitants dans des zones non peuplées.

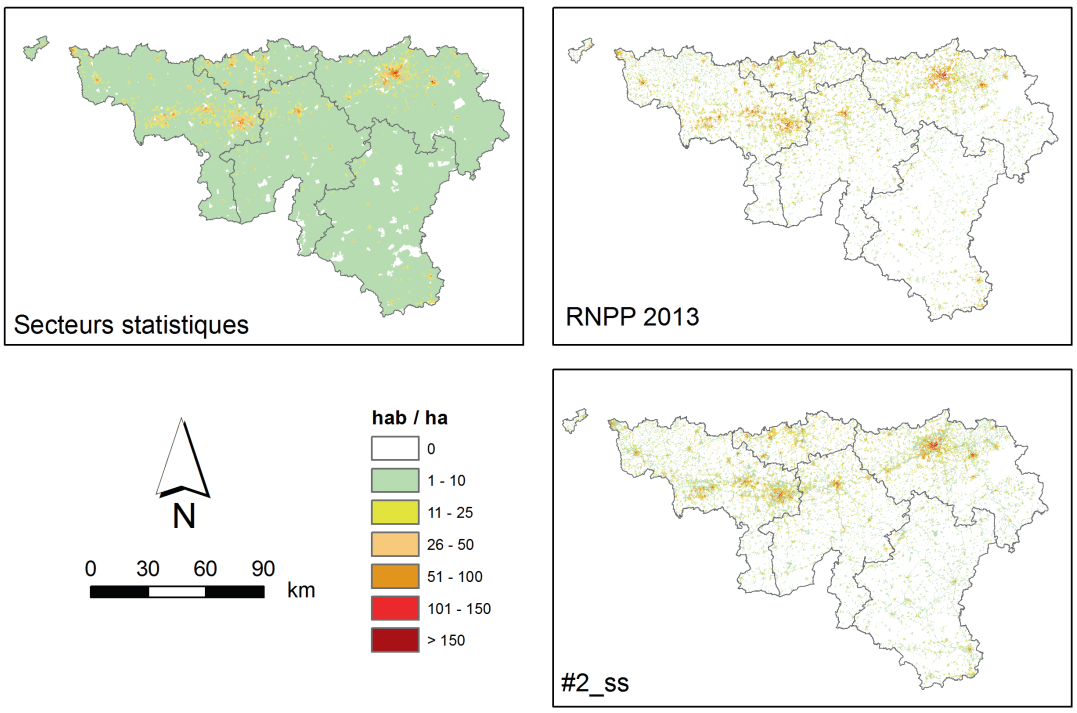
Les résultats de la méthode la plus efficace (#2_ss) sont présentés pour la Wallonie, à la figure 8, en comparaison avec la cartographie directe des secteurs statistiques et le RNPP. À cette échelle, peu de différences

Figure 7 : Résultats des trois méthodes de désagrégation des secteurs statistiques au niveau du centre de la ville de Liège (2013)



[16] Une fonction de densité de probabilité permet de déterminer des zones de fortes et de faibles probabilités pour les valeurs d'une variable. De manière intuitive, une densité de probabilité est similaire à la limite d'un histogramme pour lequel on disposerait d'un échantillon de valeurs suffisamment important, représentée par un histogramme des fréquences relatives des différentes classes de valeurs, pourvu que les classes de valeurs soient suffisamment étroites.

Figure 8 : Comparaison du meilleur résultat (#2_ss) avec les secteurs statistiques et le RNPP 2013



se marquent entre la dasymétrie et les données du Registre National. Par contre, du fait de l'utilisation d'une grille de 100 x 100 m de résolution, les zones de densités nulles sont bien représentées, ce qui n'est pas le cas pour les données agrégées au niveau des secteurs statistiques.

Ces résultats montrent que la qualité de la dasymétrie est fortement influencée par les caractéristiques des cartes thématiques utilisées. Les moindres résultats de la méthode #3 (double pondération), notamment au regard de la méthode #2 (imperméabilisation seule), posent question. Comme l'ont observé Zandbergen et Ignizio (2010), l'utilisation seule de données thématiques qualitatives de type utilisation/occupation du sol donne des résultats moins performants qu'avec l'utilisation de données thématiques quantitatives continues, comme la carte d'imperméabilisation du sol. De même, Jensen (1983) considère qu'il y a une perte d'une partie de l'information biophysique obtenue par capteurs satellitaires avec l'utilisation de données d'utilisation/occupation du sol. On peut également expliquer cette différence de résultats à la fois par la résolution spatiale et la résolution temporelle des données thématiques. L'hypothèse principale pour expliquer cette différence est l'écart temporel entre la production des données d'utilisation/occupation du sol (COSW, 2007) et les données d'imperméabilisation (2012), soit plus de cinq ans. Comme énoncé au point 2.1.3, un masque binaire, extrait de la reclassification de la COSW, définissant les zones habitées et inhabitées, a été appliqué au préalable à l'ensemble des méthodes. Ce masque a eu pour effet de supprimer des zones cibles, les zones nouvellement urbanisées entre 2007 et 2012. La différence observée entre les méthodes #2 et #3 provient donc du fait que les extensions récentes des zones d'habitat, prises en compte au niveau des données d'imperméabilisation, sont affectées par une pondération biaisée des données non actualisées de la COSW. Cette pondération sous-estime artificiellement les zones à faible et moyenne densité, comme on le remarque à la figure 7. L'ancienneté des données d'utilisation/occupation du sol semble donc être à l'origine de ce moins bon résultat, plutôt que la double pondération en elle-même.

3 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au travers de ce travail, nous proposons un prototype de cartographie dasymétrique permettant de produire des cartes de densité de population wallonne. La pertinence de ces premiers résultats a été démontrée par comparaison et validation avec les données du RNPP. L'utilisation d'un algorithme de dasymétrie offre la possibilité de fournir un modèle de répartition de la population libre d'accès et anonymisé, selon différentes échelles en fonction des besoins des utilisateurs. Elle offre également la possibilité d'une mise à jour à la demande, dès l'obtention des données de base.

Mais la qualité de la technique dasymétrique nécessite des données thématiques précises et à jour. Par exemple, la donnée d'imperméabilisation de 2015 (HRL) en cours de validation pourrait permettre une mise à jour de cette carte. Les méthodes de désagrégation décrites dans ce papier se basent sur des cartes d'occupation et d'imperméabilisation du sol. La première, la COSW (2007), n'a pas été mise à jour depuis 2007, mais reste à ce jour la seule donnée exhaustive d'occupation du sol en Wallonie. La recherche présentée dans ce papier se base sur cette carte malgré cet inconvénient. Selon Batista *et al.* (2013), améliorer la qualité des données d'occupation du sol pour les classes urbaines augmente notablement la qualité de la carte finale. Les nouvelles acquisitions de données satellitaires (données du programme Copernicus, High Resolution Layers, Pléiades), aériennes (LiDAR, photographie aérienne) ainsi que d'autres données thématiques (télécommunication, cadastrales) devraient permettre une mise à jour plus régulière des cartes d'occupation du sol (Patino et Duque, 2013). À ce titre, le projet SmartPop a développé une classification orientée-objet en utilisant des données aériennes ou satellitaires et des informations sur la hauteur et la fonction des bâtiments, pour actualiser les informations spatiales sur les zones urbanisées de la ville de Liège (Van de Kerchove *et al.*, 2014 ; Beaumont *et al.*, 2017 ; Beaumont *et al.*, dans ce numéro). Le projet EO4LULUCF a permis la production d'une carte d'utilisation du sol en Wallonie à haute résolution spatiale pour l'année 2016 basée sur des données satellitaires Sentinel-2 (Close *et al.*, 2018). Le projet WalOUS, en collaboration avec les Universités Catholique de Louvain et Libre de Bruxelles et l'ISSeP, produira une cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol à très haute résolution spatiale sur base des données orthophotos (SPW) et Sentinel-1 et -2 de l'année 2016. Cette cartographie devrait voir le jour en 2020.

Enfin, le projet SmartPop utilise également des techniques de modélisation quantitative de l'occupation et de l'utilisation du sol en collaboration avec le VITO. Cette simulation de l'évolution de l'utilisation du sol permet également, grâce aux méthodes dasymétriques, de prévoir les modifications de distribution de la population jusqu'à l'horizon 2050 (Poelmans *et al.*, dans ce numéro).

BIBLIOGRAPHIE

Balk, D.L., Deichmann, U., Yetman, G., Pozzi, F., Hay, S.I., Nelson, A., 2006. Determining Global Population Distribution, Methods, Applications and Data Advances in Parasitology, 62, 119-156. Close, O., Beaumont, B., Petit, S., Fripiat, X., 2018. Use of Sentinel-2 and LUCAS Database for the Inventory of Land Use, Land Use Change, and Forestry in Wallonia, Belgium. Land 7 (4), 154.

Baltus, C., Lejeune,P., Feltz, C., 2007. Mise en œuvre du projet de cartographie numérique de l'Occupation du Sol en Wallonie (PCNOSW), Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Batista, S.F., Gallego, J., Lavalle, C., 2013. À high-resolution population grid map, Journal of Maps, 9, 16-28.

Beaumont, B., Grippa, T., Lennert, M., Vanhuysse, S., Stephenne, N., Wolff, E. (2017). Toward an operational framework for fine-scale urban land-cover mapping in Wallonia using submeter remote sensing and ancillary vector data. J. Appl. Remote Sens. 11(3), 036011 (2017).

Briggs D. J., Fecht D., Gulliver J., and Vienneau D. 2007 Dasymetric modelling of small-area population distribution using land cover and light emissions data. Remote Sensing of Environment 108 :451-466.

Büttner, G., Feranec, G., Jaffrain, G., 2006. Corine land cover nomenclature illustrated guide (Addendum 2006).

Close, O., Benjamin, B., Petit, S., Fripiat, X., Hallot, E. Use of Sentinel-2 and LUCAS Database for the Inventory of Land Use, Land Use Change, and Forestry in Wallonia, Belgium. Land 2018, 7, 154.

Commission européenne, 2012. Lignes directrices concernant les meilleures pratiques pour limiter, atténuer ou compenser l'imperméabilisation des sols. 62p.

Cooke, S., Behrens, R., 2017. Correlation or cause ? The limitations of population density as an indicator for public transport viability in the context of a rapidly growing developing city. Transportation Research Procedia 25, 3003-3016.

Cornet, Y., Binard, M., Ledant, M. van der Kwast, J., Van de Voorde, T., Canters, F., 2012. Predicting the spatial distribution of population based on impervious surface maps and modeled land use change. in Perakis, Konstantinos G. ; Moysiadis, Athanasios K. (Eds.) European Association of Remote Sensing Laboratories 32nd EARSeL Symposium Proceedings Advances in Geosciences Mykonos Island, Greece, 21 May - 24 May 2012 (2012).

Crols, T ;, Vanderhaegen, S., Canters, F., Engelen, G., Poelmans, L., Uljee, I., White, R. 2017. Downdating high-resolution population density maps using sealed surface cover time series. Landscape and Urban Planning, 160, 96-106.

Dalziel, B.D., Kissler, S., Gog, J.R., Viboud, C., Bjornstad, O.N., Metcalf, C.J.E., Grenfell, B.T., 2018. Urbanization and humidity shape the intensity of influenza epidemics in U.S. cities. Science 362, 75 –79.

Deville, P., Linard, C., Martin, S., Gilbert, M., Stevens, F.R., Gaughan, A.E., Blondel, V.D., Tatem, A.J., 2014. Dynamic population mapping using mobile phone data. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America , National Academy of Sciences, 2014, 111 (45), 15888-15893.

Dobson, J.E., Bright, E.A., Colemane, P.R., Durfee, R.C., Worley, B.A., 2000. Landscan : A Global Population Database for Estimating Populations at Risk, Photogrammetric Engineering et Remote Sensing, 66, 849-857.

Dorling, D., 1993. Map design for census mapping. The Cartographic Journal 30, 167–83.

EEA, 2012a. Copernicus Land Monitoring Service - High Resolution Layers - Imperviousness (https ://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-imperviousness-2).

EEA, 2012b. Copernicus Land Monitoring Service - Urban Atlas (https ://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/copernicus-land-monitoring-service-urban-atlas).

Eicher, C.L., Brewer, C.A., 2001. Dasymetric Mapping and Areal Interpolation : Implementation and Evaluation. Cartography and Geographic Information Science, l1Jl.28, No.2, 2001, pp.125-138

Engelen, G., Van Esch, L., Uljee, I., De Kok, J., Poelmans, L., Gobin, A., Van der Kwast, H., 2011. RuimteModel : Ruimtelijk-dynamisch landgebruiksmodel voor Vlaanderen. Steunpunt Ruimte en Wonen, 2011/RMA/R/242.

Eriksson, C., Zehaie, F., 2005. Population Density, Pollution and Growth. Environmental & Resource Economics, 30, 465-484.

Forster, B. C., 1985. An examination of some problems and solutions in monitoring urban areas from satellite platforms. International Journal of Remote Sensing, 6, 139 – 151.

Gallego, F. J., Peedell, S., 2001. Using Corine Land Cover to map population density. In European Environment Agency. “Towards agri-environmental indicators : Integrating statistical and administrative data with land cover information”. Copenhagen, 94-105.

Gallego, F.J., Batista, F., Rocha, C., Mubareka, S., 2011. Disaggregating population density of the European Union with CORINE Land Cover. International Journal of GIS, 25 (12) pp. 2051-2069.

Gencer, E., 2013. An Overview of Urban Vulnerability to Natural Disasters and Climate Change in Central America & the Caribbean Region. FEEM Working Paper No. 78.2013.

Gruver, A., 2014. Cartography and Visualization. Online Geospatial Education Program Office, Department on Geography of the Pennsylvania State University, http ://www.geog.psu.edu, GEOG 486.

Jensen, J.R., 1983. Biophysical remote sensing. Annals of the Association of American Geographers, 73 (1983), pp. 111-132

IBZ, 2014. SPF Intérieur - Direction générale Institutions et Population, http ://www.ibz.rrn.fgov.be/fr.

IWEPS, 2017. Fiche 4 : Étalement urbain (et périurbanisation). Une dispersion continue de l'habitat sur le territoire. Observatoire du développement territorial (ODT). 4p.

IWEPS, 2018. Fiche T005-ARTiF.SOL – dernière données régionales disponibles au 01/12/2018. https ://www.iweps.be/wp-content/uploads/2018/12/T005-ARTIF.SOL-122018_full1.pdf

Langford, M., Maguire, D. J., Unwin, D. J., 1991. The areal interpolation problem : Estimating population using remote sensing in a GIS framework. Handling Geographical Information, Ed : Goodchild M.F., Gopal S., Taylor and Francis. pp. 55–77.

Ledant, M., 2009. Évaluation du potentiel de la cartographie densimétrique appliquée à des données de très grande échelle spatiale 2D et 3D. Le cas de la région liégeoise. Master thesis in geographical sciences, University of Liège.

Legates, D.R., McCabe, G. J., 1999. Evaluating the Use of "Goodness-of-Fit" Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation. Water Resources Research, 35, 233-241.

Lillesand, T. M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W., 2004. Remote Sensing and Image Interpretation, fifth edition. John Wiley et Sons, Inc., New York, New York, 736p.

Linard, C., Tatem, A. J., 2012. Large-scale spatial population databases in infectious disease research. Int Journal of Health Geogr, 11(7).Lloyd, C.T., Sorichetta, A., Tatem, A.J., 2017. High resolution global gridded data for use in population studies. Scientific 4, 170001, 1-17.

Liu, X., Clarke, K. C., 2002. Estimation of Residential Population Using High Resolution Satellite Imagery. Proceedings of the 3rd Symposium in Remote Population Estimation Methods 95 Sensing of Urban Areas, Maktav, D., Juergens, C., and F. Sunar-Erbek, June 11–13, 2002, Istanbul, Turkey : Istanbul Technical University, 153-160.

Liu, X., 2003, Estimation of the spatial distribution of urban population using high spatial resolution satellite imagery. PhD Thesis, University of California, Santa Barbara, CA, USA.

Lloyd, C.T., Sorichetta, A., Tatem, A.J., 2017. High resolution global gridded data for use in population studies. Scientific Data, 4, 170001.

Mennis, J., 2003. Generating Surface Models of Population Using Dasymetric Mapping. The Professional Geographer, 55 (1), 31-42.

Mennis, J., Hultgrent, T., 2006. Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation, 33(3), 179-194.

Mirzaei, P.A., 2015. Recent challenges in modelling of urban heat island. Sustainable Cities and Society, 19, 200-206.

Openshaw, S., Taylor,P.J., 1979. A Million or so Correlation Coefficients : Three Experiments on the Modifiable Areal Unit Problem. In N. Wrigley, ed. Statistical Applications in the Spatial Sciences, 127–144. London : Pion. Patino, J.E.,Duque, J.C., 2013. A review of regional science applications of satellite remote sensingin urban settings Computers, Environment and Urban Systems, 37, 1-17.

Patino, J.E., Duque, J.C., 2013. A Review of Regional Science Applications of Satellite Remote Sensing in Urban Settings. Computers, Environment and Urban Systems, 37, 1-17.

Petrov, A. 2012. One Hundred Years of Dasymetric Mapping : Back to the Origin. The Cartographic Journal, 49, 256-264.

Pistocchi, A., Calzolari, C., Malucelli, F., Ungaro, F. 2015. Soil sealing and flood risks in the plains of Emilia-Romagna, Italy. Journal of Hydrology : Regional Studies, 4, 398-409.

Poelmans, L., White, R., Engelen, G., Uljee, I., 2015. Modeling in Support of Spatial Planning and Policy Making : The example of Flanders, chap. 11, in Modeling Cities and Regions as Complex Systems, WHITE, R. ET AL. EDS., The MIT Press, 330 p.

Reginster, I., Charlier, J., 2018. Mesures de la densité de population et du degré d'urbanisation dans le cadre des recommandations européennes : applications à la Belgique et la Wallonie. Working paper - IWEPS, n°25, mars 2018, Namur, 35p.

Schmidt W-P, Suzuki M, Dinh Thiem V, White RG, Tsuzuki A, Yoshida L-M, *et al.* (2011) Population Density, Water Supply, and the Risk of Dengue Fever in Vietnam : Cohort Study and Spatial Analysis. PLoS Med 8(8) : e1001082.

Schueler, T.R., Fraley-McNeal, L., Cappiella, K., 2009. Is impervious Cover Still Important? Review of Recent Research. Journal of Hydrologic Engineering 14, 4, pp.309-315.

Sleeter, R., Gould,M., 2007. Geographic information system software to remodel population data using dasymetric mapping methods : U.S. Geological Survey Tech. and Methods, 11-C2, 15 p.

SPW, 2007. Carte d'Occupation du sol de Wallonie (COSW).

SPW, 2008. Carte d'Occupation du Sol de Wallonie [COSW] (version 2_07)-Série. http ://geoportail.wallonie.be/catalogue/290e1fe8-0d99-410e-967b-a02f389b931a.html

Tapp, A. F., 2010. Areal interpolation and dasymetric mapping methods using local ancillary data sources. Cartography and Geographic Information Science. 37, 215–228.

Theobald, D.M., Goetz, S.J., Norman, J.B., Jantz, P., 2009. Watersheds at Risk to Increased Impervious Surface Cover in the Conterminous United States. Journal of Hydrologic Engineering 14, 4, pp.362-368.

UE 2016/679. Règlement UE n° 679/2016 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données, et abrogeant la directive 95/46/CE (règlement général sur la protection des données).

Van Der Haegen, T.H., Brulard, H., 1972. Small area statistics and their use for social geographical and planological research, ed. by Th. Brulard and H. Van Der Haegen, Acta Geographica Lovaniensia, 448 p.

Van De Kerchove, R., Kaszta, Z.,Wolff, E., 2014. A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of a savanna landscape using World-View-2 imagery, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.

Vignes, C., Rimbourg, S., Ruiz-Gazen, A., Thomas-Agnan, C., 2013. Fiches méthodologiques. Méthodes statistiques d'allocation spatiale : interpolation de données surfaciques. 72p.

Willmott, C.J., Matsuura, K., 2005. Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in Assessing Average Model Performance. Climate Research, 30, 79-82.

WHO, 2007. Population health and waste management : scientific data and policy options. Report of a WHO workshop, Rome, Italy, 29-30 March 2007.

Wright, J.K., 1936. A method of mapping densities of population with Cape Cod as an example. Geographical Review 26, 103–10.

Wu, S., Qiu, X., Wang, L. 2005. Population Estimation Methods in GIS and Remote Sensing : A Review. GIScience et Remote Sensing. 42 (1), 90-96.

Zandbergen, P.A., Ignizio, D.A., 2010. Comparison of Dasymetric Mapping Techniques for Small-Area Population Estimates. Cartography and Geographic Information Science 37, 3, pp.199-214.

LONG-TERM SIMULATION OF URBAN DEVELOPMENT IN SUPPORT OF SPATIAL PLANNING POLICY

Lien Poelmans, VITO[1]
Inge Uljee, VITO[2]
Wim Clymans, VITO[3]
Éric Hallot, ISSeP[4]

[1] Lien Poelmans, VITO, lien.poelmans@vito.be
[2] Inge Uljee, VITO, inge.uljee@vito.be
[3] Wim Clymans, VITO, wim.clymans@vito.be
[4] Éric Hallot, ISSeP, e.hallot@issep.be

SUMMARY

Presently both the Walloon region and the Flemish region are characterised by a high degree of urban sprawl which continues to expand and fragment remaining open space. To tackle the urban sprawl challenge, policy makers in both regions are in direct need of a method that allows to simultaneously (1) explore how the use of land can develop in space and time and (2) evaluate the possible impact of different spatial planning policies, like for example restricting available building area, on the simulated land-use changes.

The RuimteModel Vlaanderen is such a land-use simulation model developed to simulate integrated scenarios that take into account present and future socio-economic conditions and physical and legal drivers of land-use transitions. The spatial planning department of the Flemish region (Departement Omgeving, formerly Ruimte Vlaanderen) has successfully used the RuimteModel Vlaanderen to investigate societal costs related to urban sprawl. This paper describes the application of a tailored RuimteModel Vlaanderen for the Walloon region, called SmartPop land-use model, to simulate land-use development in the Walloon region towards 2050.

The SmartPop model is a land-use model that explains land-use change in a spatially-explicit way, at a spatial resolution of 1 hectare. Land-use changes are explained by the current activity (i.e. population and employment by economic sector) in a specific area in Wallonia, represented by a 1 ha cell in the model, and by the changes of activity within its neighbouring cells. Concretely, the model evaluates how likely a cell, presently still undeveloped (e.g. pasture), will change to for example residential or industrial area, based on the land-use, population density and employment levels in its surroundings and on a set of physical and institutional factors that will determine the suitability for such transition. As such the model can be used to explore the effect of various proposed policies in Wallonia on the spatial distribution of the population, and in particular on the annual allowed land take for new housing.

In this paper, two different scenarios are implemented within the SmartPop model : a business-as-usual scenario using present trends in population and employment growth to predict the future growth and a policy-induced 'stop au béton' scenario in which the proposed goal of no additional land take for urban settlement by 2050 is implemented. The results show that limiting the available land does not lead to excessive increases in population density by 2050. Moreover, the average population density will actually further decrease by 0.5 inhabitants per ha of built-up area in the whole of the Walloon region. Locally, the 'stop au béton' leads mainly to a densification of existing urban centres like Liège, Verviers and Mouscron. This densification under a 'stop au béton' condition doesn't take extreme proportions : by 2050 not a single municipality within the Walloon region will reach the currently observed population density of the Brussels-Capital Region.

Keywords : Land-use scenarios, land-use simulation model, 'stop au béton', spatial planning.

RÉSUMÉ

Les Régions wallonne et flamande font face à un étalement urbain marqué qui contribue à la fragmentation progressive du territoire. Afin de faire face aux défis environnementaux liés à l'étalement urbain, les décideurs politiques régionaux ont besoin de nouveaux outils permettant à la fois (1) d'étudier l'évolution spatiale et temporelle de l'utilisation du sol et (2) d'évaluer l'impact potentiel de différentes politiques d'aménagement du territoire, comme la limitation des surfaces constructibles disponibles, sur les changements d'utilisation du sol.

Le RuimteModel Vlaanderen est un modèle de simulation de l'utilisation du sol intégrant, selon plusieurs scénarios, les conditions socioéconomiques actuelles et futures, ainsi qu'une série de facteurs physiques et législatifs affectant l'évolution de l'aménagement du territoire. Le Département d'Environnement de la Région flamande utilise avec succès ce modèle pour étudier les coûts sociaux liés à l'étalement urbain. Cet article décrit l'adaptation du modèle à la Wallonie, appelé modèle SmartPop, pour simuler l'aménagement du territoire wallon à l'horizon 2050.

Le modèle SmartPop modélise l'utilisation du sol de manière spatialement explicite, à une résolution spatiale de 1 hectare (ha). Les changements d'utilisation du sol s'expliquent par l'activité actuelle au sein de chaque cellule de 1 ha, c'est-à-dire la distribution de la population et l'emploi par secteur économique par cellule de 1 ha, ainsi que par les changements d'activité dans les cellules voisines. Concrètement, le modèle évalue la probabilité qu'une cellule, qui n'est pas encore développée à l'heure actuelle, par exemple un pâturage, se transforme en zone résidentielle ou industrielle, en fonction de différents critères spatialisés qui détermineront la pertinence de cette transition. En tant que tel, le modèle peut être utilisé pour étudier l'effet de différentes politiques proposées en Wallonie sur la répartition spatiale de la population, et en particulier les politiques relatives à l'emprise maximale des terres dédiées la construction de nouveaux logements.

Dans ce papier, deux scénarios sont testés : un scénario maintenant le statu quo, utilisant les tendances actuelles de la croissance de la population et de l'emploi pour prédire la croissance future, et un scénario stop au béton, décidé par les autorités politiques, dans lequel est implémentée une politique de transition vers l'interdiction totale de toute nouvelle urbanisation du territoire à l'horizon 2050. Les résultats montrent que la limitation des surfaces disponibles n'entraîne pas d'augmentation excessive de la densité de population dans les prochaines décennies. Au contraire, la densité de population moyenne diminuera de 0,5 habitant par ha au niveau des surfaces bâties sur l'ensemble du territoire wallon. Localement, le stop au béton conduit principalement à une densification des centres urbains existants, comme Liège, Verviers et Mouscron. Face à cette contrainte, la densification ne prend pas des proportions importantes ; d'ici 2050, aucune commune wallonne ne devrait atteindre la densité de population actuellement observée dans la Région de Bruxelles-Capitale.

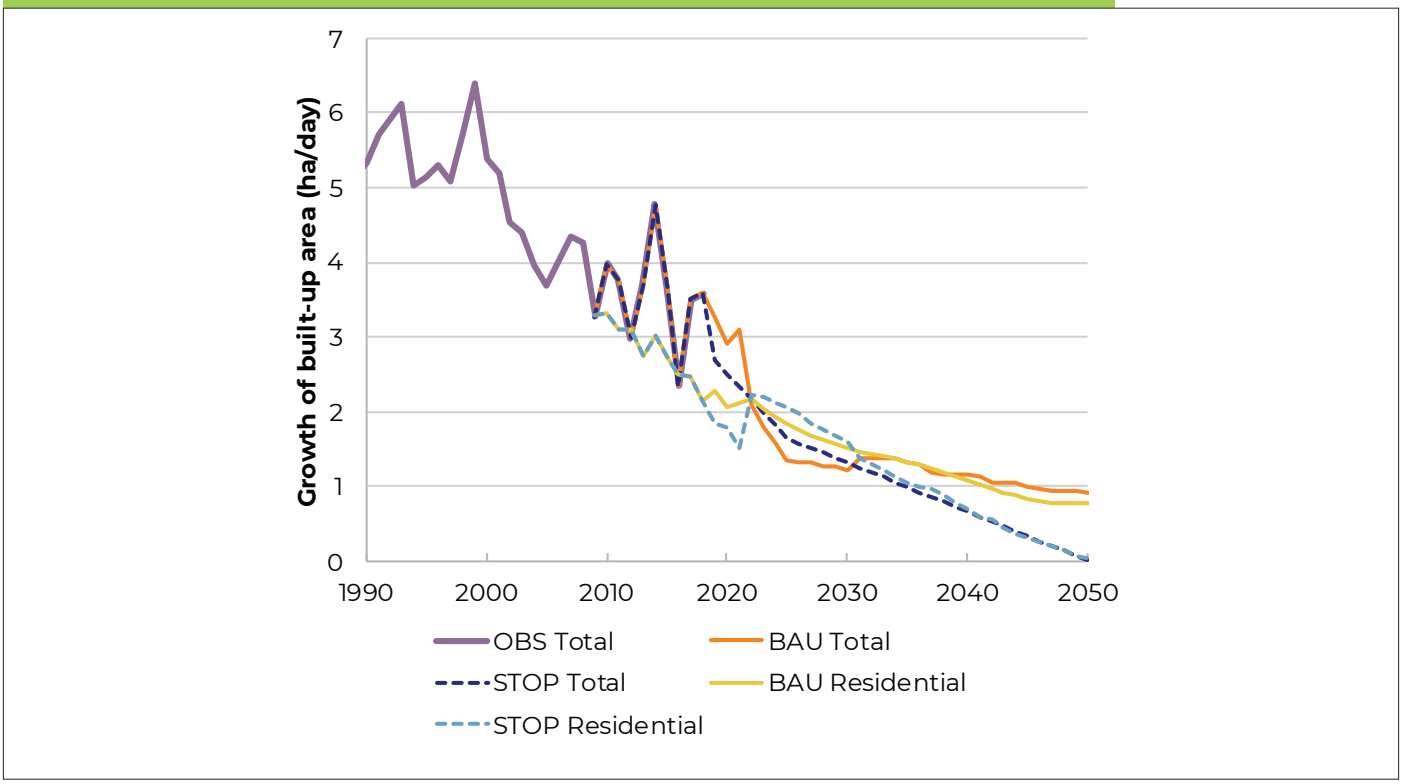
Mots-clés : Scénarios d'utilisation du sol, modèle de simulation d'utilisation du sol, stop au béton, aménagement du territoire.

1 INTRODUCTION

The Walloon region, and in fact the whole of Belgium, is characterised by a high degree of urban sprawl. Compared to other European member states, Belgium shows a very high proportion of urban land, with a relatively low average activity rate expressed in terms of total population and number of jobs per hectare. Moreover, urban land is highly dispersed and penetrates the countryside (EEA, 2016). Although for a part, the urban landscape can be explained by historical settlement patterns, the trend towards urban sprawl, with residential, industrial and commercial activities claiming more precious undeveloped land, continues. Especially over the last decades, urban sprawl has penetrated the countryside at a rapid rate in both the Walloon and the Flemish regions.

Since the 1980s, the growth rate of built-up area in the Walloon region has been 4.6 ha/day on average. Although this trend has been slowing down since 2000 in comparison with the 1980-1990s, the average growth rate over the last 10 years was still around 3.5 ha/day. This means that built-up area grows annually by 1,278 hectares or 1 % of new urban developments (Figure 1).

Figure 1 : Growth rate of total built-up area[5] (dark) and residential area[6] (light) in the Walloon region for the period 1990-2050 in ha/day reflecting official observations (Obs) for the period 1990-2017 and SmartPop model growth rate results for both the business-as-usual scenario (BAU) and Stop-au-béton (STOP) scenarios for the period 2008-2050[7]



Source : Utilisation du sol selon le Registre cadastral, Statbel, 2018, SmartPop project

[5] Measured by 'Terrains bâtis et terrains connexes' from Statbel for the observed period and by the sum of the areas of the land-use types 'residential', 'industry', 'services' and 'commerce' from the SmartPop model for the period 2008-2050.

[6] Measured by 'Terrains résidentiels' from Statbel for the observed period and by the area of the land-use type 'residential' from the SmartPop model for the period 2008-2050.

[7] There is a 10 year overlap between the availability of cadastral data and the timeframe within which the SmartPop model predicts land-use change. Since the most recent land-use map for the whole of the Walloon region (Carte d'Occupation du Sol de Wallonie) refers to the year 2008, the model simulations run for the period 2008-2050. The modelling period 2008-2018 however, is driven by real observations of the growth of the built-up area in this period. Therefore, observations (in purple) and model results (in blue and orange) for the period 2008-2018 are identical.

A recent report of the European Environmental Agency on urban sprawl in Europe (EEA, 2016) evidences and lists environmental impacts, as well as social and economic impacts. An example of an environmental effect is the threat for biodiversity by fragmentation caused by urban expansion. Another example is the increased risk for both flooding and droughts by the increase in sealed surfaces. Sealed surfaces can cause, on the one hand, increased runoff when heavy rainfall occurs, which in turn increases the flooding risk. On the other hand, the sealing of surfaces prevents water from infiltrating in the top soil and from maintaining the groundwater level. Examples of monetary costs directly related to urban sprawl include the increased cost for infrastructure, but also costs related to an increased congestion and a hampered organisation of public transport in regions subject to urban sprawl (EEA, 2016).

Recently, these threats related to urban sprawl have entered the public and political debate, which has resulted in several guidelines and plans to tackle urban sprawl. At the European level, the 2011 Roadmap for a resource efficient Europe, which is part of the Europe 2020 Strategy, has the following aim : 'By 2020, EU policies take into account their direct and indirect impact on land use in the EU and globally, and the rate of land take is on track with an aim to achieve no net land take by 2050' (EC 2011). In the summer of 2018, the Flemish government approved the strategic vision of the new Spatial Policy Plan, which has a clear target of no extra land take by 2040. Recently, also the Walloon government has proposed a '*stop au béton*' policy in its proposal for a *Schéma de développement du territoire (SDT)*.

In order to investigate the effects of possible policy targets such as the 'stop au béton', land-use models can play an important role. A land-use model uses, besides present land-use conditions, typically socio-economic (population and employment data per sector), physical and regulatory criteria to simulate the transition between land-use types and map the future distribution of these land-use types, e.g. residential, industrial, agricultural and forested area, for a specific region in time. As such, these models can help to envisage several scenarios of future urban development, taking into account for example the population growth that is expected in a region. For the Walloon region, the Federal Planning Bureau (FPB, 2018) is expecting a further growth of the population of about 375,000 inhabitants by 2050. In the context of a 'stop au béton', with no more urban expansion by 2050, these new inhabitants should find a place to live without creating new built-up area. This means that a gradual trend towards densification of the existing built-up area with sufficient space for residential, industrial, commercial and public service use is needed by 2050. Simulating these trends and targets in a land-use model can help to study the feasibility of the specific target and the possible effects on urban patterns (e.g. conversion of industrial to residential areas), population densities (e.g. higher number of inhabitants/ha) and a series of (environmental) indicators (e.g. increased flooding risk).

One of the main objectives of the SmartPop project is to implement a land-use change model for the Walloon region, the so-called SmartPop model. In this paper, this model is used to run two different scenarios for the future (up to 2050) for the Walloon region : a business-as-usual scenario (BAU) and a 'stop au béton' scenario (STOP) in which the goal of no additional land take for urban settlement by 2050 is implemented. This paper subsequently introduces the two scenarios (section 2) and the SmartPop model and its main inputs (section 3). Lastly the main results of both scenarios in terms of land-use change (section 4) and population indicators (section 5) in the Walloon region are discussed.

2 EXPLORATIVE SCENARIOS FOR POLICY SUPPORT

Future scenarios are often used to address long-term challenges of how a feature or phenomena characterised by uncertainty (of not knowing what is to come) and complexity (of predicting how controlling factors interact) will change over time. By setting different boundary conditions and assumptions, scenarios can help to explore different alternative future pathways, and be a useful tool to support policy and guide action towards sustainability. Land-use change models, such as the SmartPop model, are helpful tools to visualise different pathways towards future landscapes (up to 2050), thereby allowing the exploration of options to reach specific targets, such as the 'stop au béton'. This 'stop au béton' scenario (STOP) is compared to a business-as-usual development (BAU) in which present observed trends of urban development (Figure 1) are extrapolated towards 2050.

2.1. BUSINESS-AS-USUAL

2.1.1. Decreasing population densities in residential areas

Since the 1980s, the Walloon region has 'artificialized' at a rate of 4.6 ha/day (Charlier & Reginster, 2017; Statbel, 2018). Although this average growth rate has decreased from more or less 5.5 ha/day in the 1990s, over 4.3 ha/day in the period 2000-2010, to 3.3 ha/day in the last decade (Figure 1), the rate of urban growth is still relatively high, compared to the growth rate of the population in the same period (Figure 2). While there was a 60 % growth of residential land in the period 1985 - 2017, the population increased with more or less 10 % in the same period.

As a result, the number of inhabitants per hectare of residential area is decreasing over time, or the land needed for living per person (referred to as land uptake) has increased. While average population density in the Walloon region was still at 55 inhabitants per hectare of residential area in 1985, it has decreased to 36.5 inhabitants per hectare of residential area in 2017 (Figure 2). These are of course average values for the whole of the Walloon region. In reality we observe that new residential developments are occurring at higher densities (mainly new residential development in highly urbanised areas) while other places in the countryside are characterised by very low density urban development.

A decreased population density in residential areas is one of the characteristics of urban sprawl. The European Environment Agency (EEA, 2016) defines urban sprawl as a phenomenon that can be visually perceived in the landscape. A landscape is affected by urban sprawl "if it is permeated by urban development or solitary buildings and when land uptake per inhabitant or job is high. The larger the built-up area in a given landscape and the more dispersed this built-up area is in the landscape, and the higher the uptake of built-up area per inhabitant or job (lower utilization intensity in the built-up area), the higher the degree of urban sprawl" (Jaeger and Schwick, 2014). These types of sprawled urban landscapes are created when the spread of urban development across the landscape by far outpaces the population growth (Ewing *et al.*, 2002) as observed for the Walloon region in the period 1985-2017 (Figure 2). Mustafa *et al.* (2018) mention the oversized zoning plans (*fr. plan de secteur*) as the main driver of urban sprawl in the Walloon region. These zoning plans have been mostly drawn up in the 1970s and 1980s, well before the current sustainability agenda. Even though these documents have been partially revised since then, areas open to

urban development are still overabundant in some parts of the region and promote the continuing trend of urban sprawl.

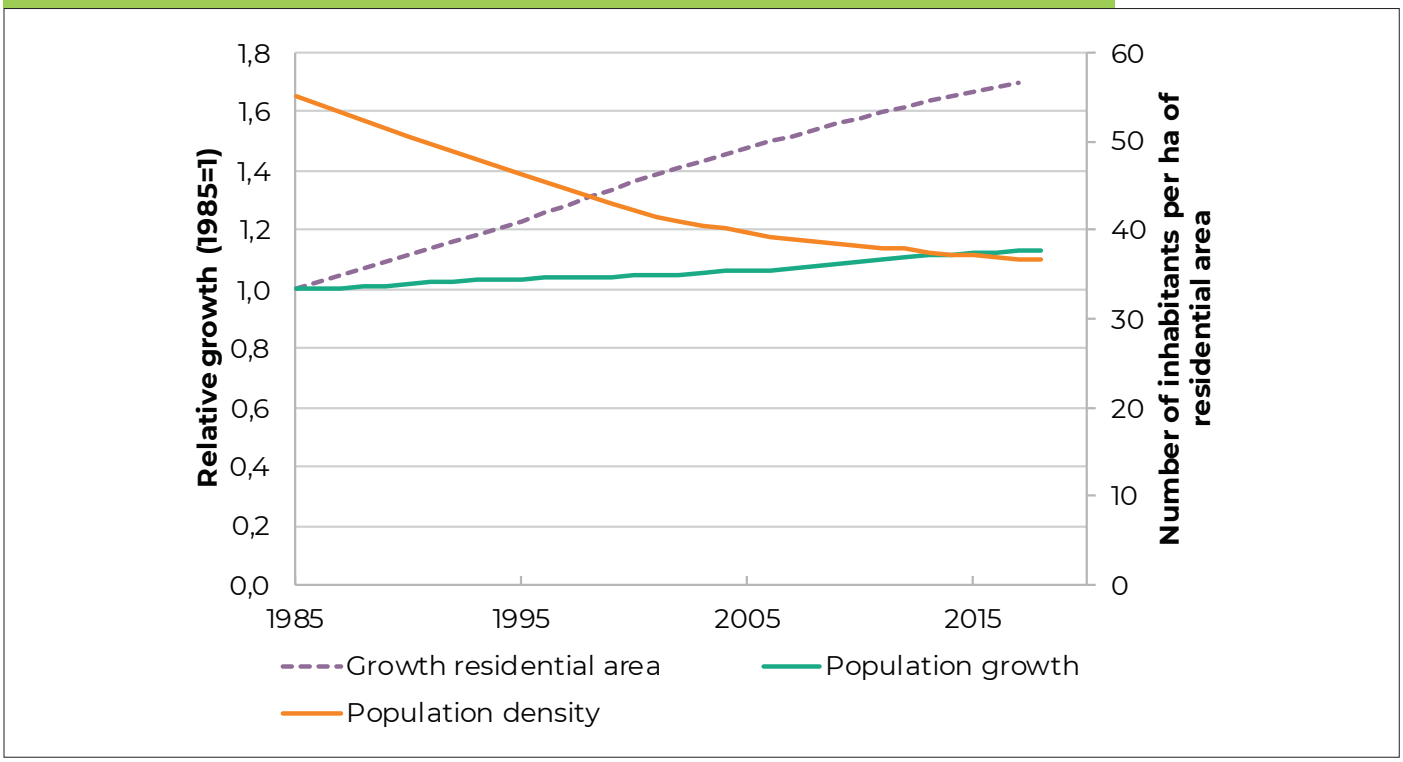
Nevertheless, the observations also indicate that this trend of further decreasing population densities is slowly coming to a stop (Figure 2). Or in other words, nowadays the growth in built-up area still outperforms population growth, but to a lesser degree than in the 1980s and 1990s.

In the Business-as-Usual (BAU) scenario we assume that the decrease in population densities will come to a stop in 2018 and that population densities will remain more or less constant at the current density of 35 inhabitants per hectare of residential land. This average population density of 35 inhabitants per hectare is combined with the population growth projections of the Federal Planning Bureau (FPB, 2017) to calculate residential area needs. Given these calculations, residential area in the Walloon region will grow further with more or less 16,000 hectares or 15 % by 2050 with an average growth rate of 1.5 ha/day during the 2018-2050 period (Figure 1, BAU). For the whole modelled period (2008-2015) an average growth of 1.9 ha/day leads to 26,000 ha or 24 % more newly developed residential area.

2.1.2. Growth in industry, commerce and (public) services

Besides the growth of the residential area, urban expansion is also driven by growth of the area needed for industry, services and commerce. These built-up categories have also known a substantial growth in the past. Within the Smartpop model, a distinction is made between industry, commerce and services. The land-use category 'services'

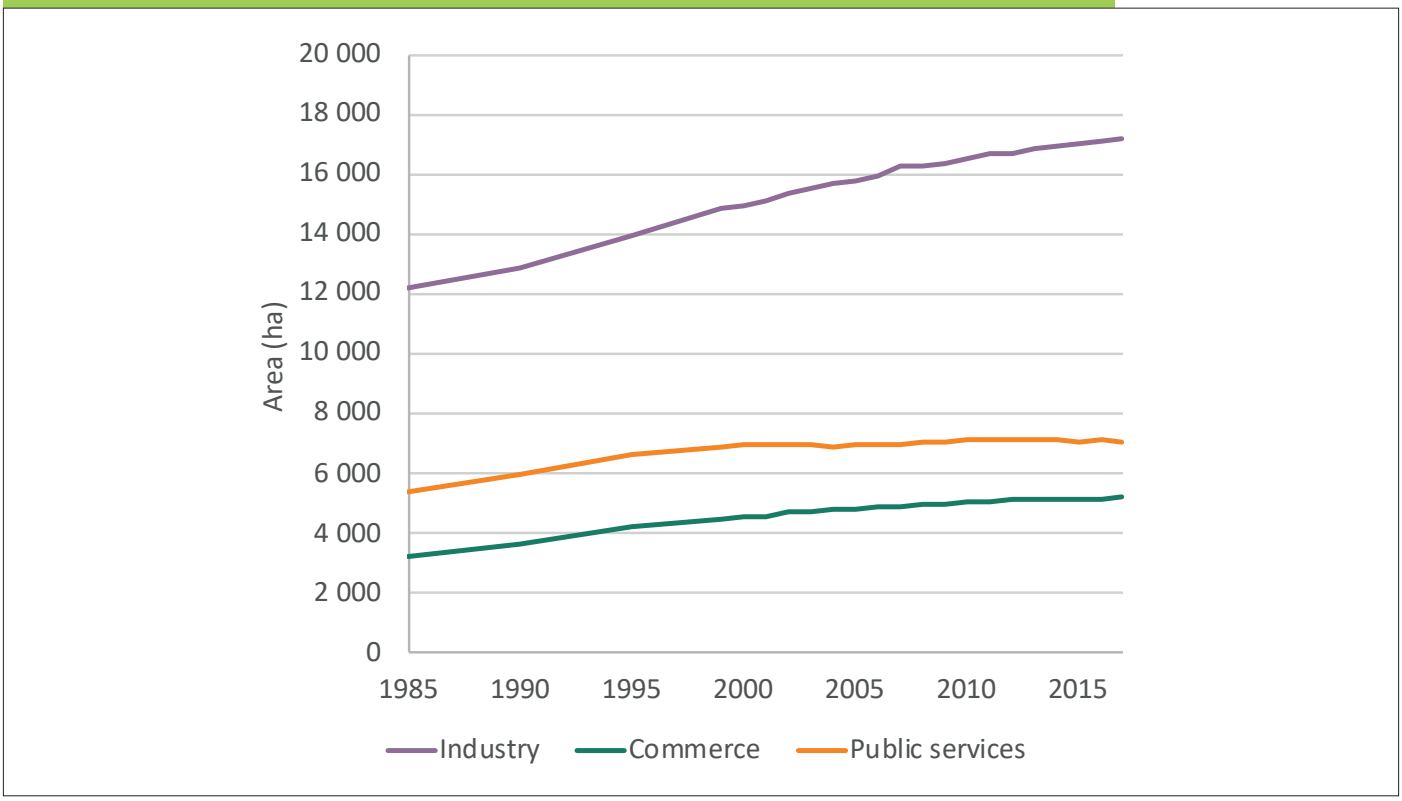
Figure 2 : Decreasing population densities evidenced through comparison of relative growth (1985 = 1) of residential area[8] (blue-dashed) vs. population growth (orange-solid), and number of inhabitants per ha of residential area (grey-solid) for the period 1985-2017



Source : Utilisation du Sol, Statbel, 2018

[8] 'Terrains résidentiels' from Statbel.

Figure 3 : Evolution of land-use (ha) per economic sector in the Walloon region for the period 1985-2017



Source : Utilisation du Sol, Statbel, 2018

in the model includes public services, but also other services and offices (see section 3.2.1). Because of data availability, however, for the historical trends, the sector 'public services' is taken as a proxy for the 'services' sector as a whole.

Between 1985 and 2017, land take by industry, commerce and public services has increased with 40 %, 60 % and 30 % respectively. This is equivalent to about 8,500 ha (Figure 3).

For each type of economic land-use, current job densities (number of employees in an economic sector over the area occupied by the sector) are calculated using the regional employment data per sector from the labour statistics (Vlaamse Arbeidsrekening) of the Policy Research Centre Work and Social Economy (Steunpunt Werk en Sociale economie, 2018). Job densities are presently ± 10 employees / ha for industry, ± 75 employees / ha for (public) services and ± 63 employees / ha for commerce. For the industry and commercial sector, these densities have proven to be stable over the last decades. The (public) services sector, however, has known an increase in average job density from 71 employees/ha in 2013 to 75 employees/ha in 2018. The BAU scenario builds upon these observations. Towards 2050 the scenario assumes constant job densities in the sectors industry and commerce and a further increase of job density up to 80 employees per hectare in 2025 for (public) services. This density of 80 employees per hectare for (public) services is kept constant up to 2050.

These future job densities are combined with projections of employment development per economic sector from the PLANET model of the Federal Planning Bureau (FPB, 2015, Figure 4). As was mentioned before, the calculated density of the 'public services' sector hereby serves as a proxy for the 'services' sector as a whole simulated in the

[9] Industry is represented by the category 'Terrains industriels', Commerce is represented by the category 'Terrains commerciaux' and Services is represented by the category 'Terrains utilisés pour des services publics, excepté les infrastructures de transport, de communication et techniques' from Statbel.

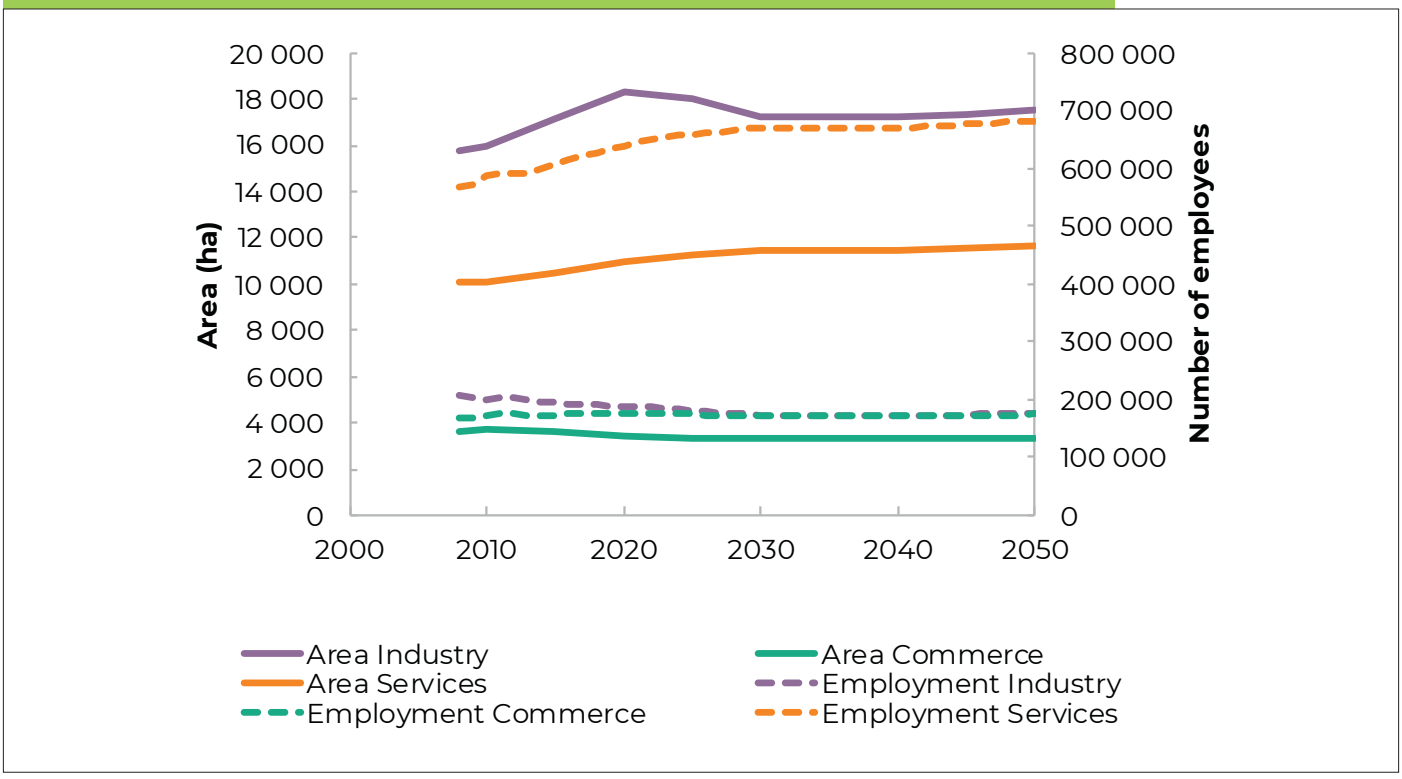
model. Figure 4 shows the evolution in land-use area by economic sector with an increased area for services in 2050 (mainly due to the rather large growth of employment in the sector by 2050), a small decrease for the area of commerce (due to increased job density by 2050 and rather small growth in employment in the sector) and a status quo for the area of industry (decrease in employment by 2050 combined with decreasing job density). Combined area used for industrial, commercial and services will thus grow with only 400 ha by 2050 as compared to the present situation (2018). For the whole modelled period, starting in 2008, a combined growth of 3,000 ha or 10 % is predicted with the fastest expansion taking place in the first decade (Figure 4).

The total area of urban land will thus increase with more or less 16,400 ha in the period 2018-2050 (16,000 ha residential area + 400 ha economic sectors). For the whole modelled period (2008-2050) the total growth of the urban area is around 29,000 ha (26,000 ha residential area + 3,000 ha economic sectors).

2.2. "STOP AU BÉTON"

In the 'stop au béton' (STOP) scenario the same trends for population and employment growth are used as in the BAU scenario. The scenario differs from BAU as to the total area of new urban land, i.e. residential and economic sectors combined, that will be developed in the period 2018-2050. The first decade of the total simulated period (2008-2018) is similar for both scenarios, since the model inputs are based on the observations for this period. In the STOP scenario, the current growth rate of 4.6 ha/day decreases to 1.6 ha/day in 2025 (or 6 km^2 per year) and further to 0 ha/day

Figure 4 : Evolution of land-use (ha, solid) and employment (dashed) per economic sector in the Walloon region as simulated using the business as usual (BAU) scenario for the period 2008-2050



Source : PLANET model (FPB, 2015), SmartPop project

in 2050 (Figure 1). The urbanised area grows with more or less 12,700 ha or with 12 % by 2050 compared with 2018, which is about 3,700 ha less than in the BAU scenario. The total growth is divided over the residential sector and the economic sectors, which will both evolve towards zero growth by 2050 (see Figure 1 for growth of residential land). This zero growth, however, represents the 'net growth'. In reality, some reconversions can be possible between residential land and economic sectors or between the different economic sectors.

Because of the smaller growth rate of the total urban land, combined with the same growth in population and employment, average population densities in the residential area and average employment density in industry, commerce and services will have to increase substantially compared to the BAU-scenario by 2050.

3 SMARTPOP LAND-USE MODEL

In order to visualise and compare the effects of the BAU and STOP scenarios in a spatially-explicit way, a land-use model called SmartPop is set up for the Walloon region. The SmartPop model is based on the RuimteModel Vlaanderen, a land-use model for Flanders and the Brussels-Capital Region developed by VITO (Flemish Institute for Technological Research). RuimteModel Vlaanderen is used successfully since 2007 to support spatial planning policy by Flemish administrations and agencies (see Box 1). The SmartPop model uses Walloon input data and calibrates the model parameters to simulate land-use change in a Walloon context. The model output will directly indicate how urban sprawl is expected to evolve in space and time following both scenarios.

Box 1 : RuimteModel Vlaanderen

In 2007, VITO began working on developing a spatially dynamic land-use model in collaboration with Founding Fathers with the aim of mapping the existing situation and possible developments in land-use in Flanders as accurately as possible, and at a high resolution of 1 ha, in the form of yearly land-use maps and spatial indicators derived from land-use. Since 2007 the RuimteModel Vlaanderen has shifted from a pure land-use simulation model to a spatial toolbox, including a large spatial database that is able to find solutions for a broad range of spatial problems (www.ruimtemodel.vlaanderen). In the last 5 years, the RuimteModel Vlaanderen has been used for land-use simulation studies, comparable to the one described in this publication, but also to solve spatial optimization problems (e.g. in support of Natura 2000 management plans) and to create spatial indicators in support of policy documents (e.g. urban development potential of Flanders based on locations that have a lot of stores and facilities in the vicinity, and terrains with a good public transport connection, in preparation of the Flemish Spatial Policy Plan *(Beleidsplan Ruimte Vlaanderen)*).

The land-use simulation part of the RuimteModel Vlaanderen differentiates between 40 land-use classes. It takes into consideration annual time steps for periods of up to 50 years in the future and provides cartographic and other quantitative output for each year. A tangible example of the output can be seen in the online Indicator atlas that was drawn up within the scope of the 2030 *Milieu- en Natuurverkenning* [Environment and Nature Study].

The RuimteModel Vlaanderen is currently used by various parties within the Flemish government, including Departement Omgeving, VMM [Flanders Environment Agency], INBO [Research Institute Nature and Forest], VREG [Flemish Regulator for Electricity and Gas], VLM [Flemish Land Agency], ANB [Agency for Nature and Forests], OVAM [Public Waste Agency of Flanders], Flanders Innovation and Entrepreneurship and VVC [Association of Flemish Culture Centres], provinces, in particular the province of Limburg and cities, including Ghent.

3.1. METHODOLOGICAL BACKGROUND OF THE SMARTPOP LAND-USE MODEL

Land-use changes in urban areas are often simulated with cellular automata-based (CA) models. In a CA model, a geographical area (e.g. Walloon region) is divided in a regular grid of cells (in the SmartPop model, cells of 1 ha resolution) to simplify computation and the model will attribute a specific land-use (e.g. residential, industrial, agriculture etc.) to each cell. The land-use will initially correspond with the observed situation, i.e. dominant land-use within the cell, which is based on a land-use map. Subsequently, CA models can simulate the land-use for each cell in each of the coming time steps using a set of transition rules that describe the likeliness of a cell with a certain land-use to convert to another land-use type. Typically in CA models, these transition rules are made up of neighbourhood rules that capture the influence of nearby land-use on the probability of a cell changing from one land-use to another. As a consequence, CA models allow to explicitly handle spatial interactions between different land-use categories. This is an important advantage of these types of models in regions such as Wallonia, that are characterised by a rather complex spatial structure with a large mix of different functions and types of land-use in a relatively small area and thus with small distances between them. Because of these characteristics, CA models have become one of the most popular ways to model land-use changes in urban areas.

Recently, White, Uljee and Engelen (2012) proposed an activity-based model of urban dynamics that directly models spatial changes in the density of different activities (such as population and employment in several economic sectors) instead of land-use categories. The activity-based CA model (or ACA model) will therefore attribute besides land-use an activity like population to each cell and is an interesting alternative to handle mixed and multifunctional land-use. Moreover, since the model intrinsically deals with population (as an activity), the model is very suitable to be used to explore the effect of various proposed policies on the spatial distribution of population, and in particular on the annual total land take by this population for new housing (see section 2).

The SmartPop ACA-model is an implementation of the ACA-model originally developed by White, Uljee and Engelen (2012) and further improved by Crols (2017). The model directly simulates land-use, population and employment by economic sector at a 1 ha resolution. The model is fed with two types of input trends for the time period that is modelled : (1) area demand (yearly growth in hectares) for residential and economic land-use types and (2) yearly population and employment numbers. In the SmartPop project two scenarios are simulated using the ACA-model, meaning that the model is fed with two different sets of trends : one for the BAU scenario and one for the STOP scenario (see sectio n 2).

The transition rules of the ACA model are based on 4 main components :

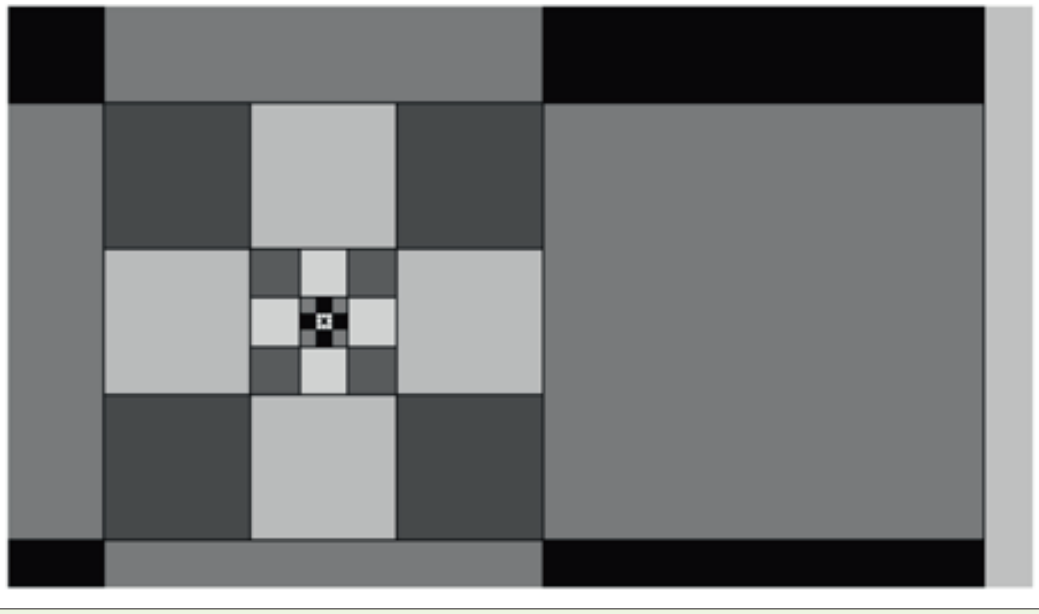
- *Neighbourhood rules* that describe the spatial interactions between the different land-use categories and activity types.
- *Suitability* that describes the degree to which each cell is suitable to be allocated a particular land-use type, based on ecological, physical, historical, technical or economic factors.
- *Zoning status* that represents the legal possibility to develop a certain land-use type at a certain location or in a certain cell.
- *Accessibility* of each cell to transport infrastructure.

Supplementary technical details about the ACA-model are provided in Box 2. Paragraph 3.2 will describe the different inputs that are used in the SmartPop model application.

Box 2 : Activity-based variable grid CA models

In activity- and cellular automata (ACA)-based land-use models, land-use change is explained by the current activity (i.e. population and employment) in a cell as well as by changes in activity within its neighbouring cells. Potentials for future land-use are mainly determined by the neighbourhood effect in the ACA model which is a function representing the influence of activities and land-use on each other at different distances. The neighbourhood effect includes influences at all scales by using a variable grid: land-use category and activity totals are summed in increasingly large 'super-cells' around the cell for which the future land-use potential is computed (Figure 5).

Figure 5 : Structure of the variable grid



Source : Crols, 2017

The influence rules in the variable grid depend on travel time between the (super)cells instead of Euclidian distance, which is usually used in CA-type models.

Transition potentials V_{Ki} on a cell i are computed for each activity K and for each annual time step:

$$V^{Ki} = r\, Z_{Ki}\, S_{Ki}\, X_{Ki}\, N_{Ki} \text{ (Equation 1)}$$

with r a random perturbation term, Z_{Ki} the zoning status (i.e. legal framework), X_{Ki} accessibility to the transport network, S_{Ki} physical suitability, and N_{Ki} the neighbourhood effect. The neighbourhood rules are a function of travel time between the focal cell and a variable grid cell that influences the focal cell:

$$N_{Ki} = \sum_J \sum_j W_{JK,dij} (T_{Jj} / T_J) \text{ (Equation 2)}$$

with $W_{JK,dij}$ the weight given by the influence function f_{JK} to the influence of activity J on activity K at (time) distance d_{ij}, T_{Jj} the total activity J on variable grid cell j, and T_J the total activity J in the studied area. Travel times are computed between the centres of gravity of the population in the variable grid cells.

The land-use transition potential VT_{Ki} for the associated active land-use K on cell i is calculated as:

$VT_{Ki} = D_{Ki}(V_{Ki})mK + (IK)P$ *(Equation 3)*

with D_{Ki} the diseconomies of agglomeration, representing the effect of high land prices and congestion on location decisions, and mK parameters to be calibrated. Next, IK is the inertia value, which deals with the tendency of land-use to remain fixed at a location, with P a parameter to decrease inertia outside the associated land-use of activities. All cells are ranked by their highest potential for land-use. The transition rule gives each cell the land-use for which it has the highest potential until there is no more demand for that land-use. The annual demand for all land-use types is an external input.

Activity values T_{Ki} are updated to T'_{Ki} in two steps, followed by a rescaling operation to ensure that total demand values are respected. Firstly, the allocation of activity in cells with a changed land-use state is in proportion to the relative value of the activity potential V_{Ki} within all cells of this land-use state. Next, activity is increased in cells with a high neighbourhood effect, by calibrating a densification exponent. More information on the ACA-model can be found in Crols (2017).

3.2. APPLICATION OF THE SMARTPOP MODEL IN THE WALLOON REGION

The most important input of any land-use model is of course a land-use map of the current situation. Besides a land-use map, the ACA-model also needs current activity maps for population and employment in different economic sectors. Hereafter, the ACA-model is driven by population and employment growth numbers (demand for activity) and a demand for both residential area and area for the three economic sectors (demand for land). As was mentioned in section 2, both scenarios use the same trends in population and employment growth by 2050, but different area demands. In addition, as was mentioned in the previous section, the model needs a suitability map, a zoning map and an accessibility map for each land-use type as input. The selection and implementation of all input maps and data for the Walloon context are described in detail below.

3.2.1. Land-use map

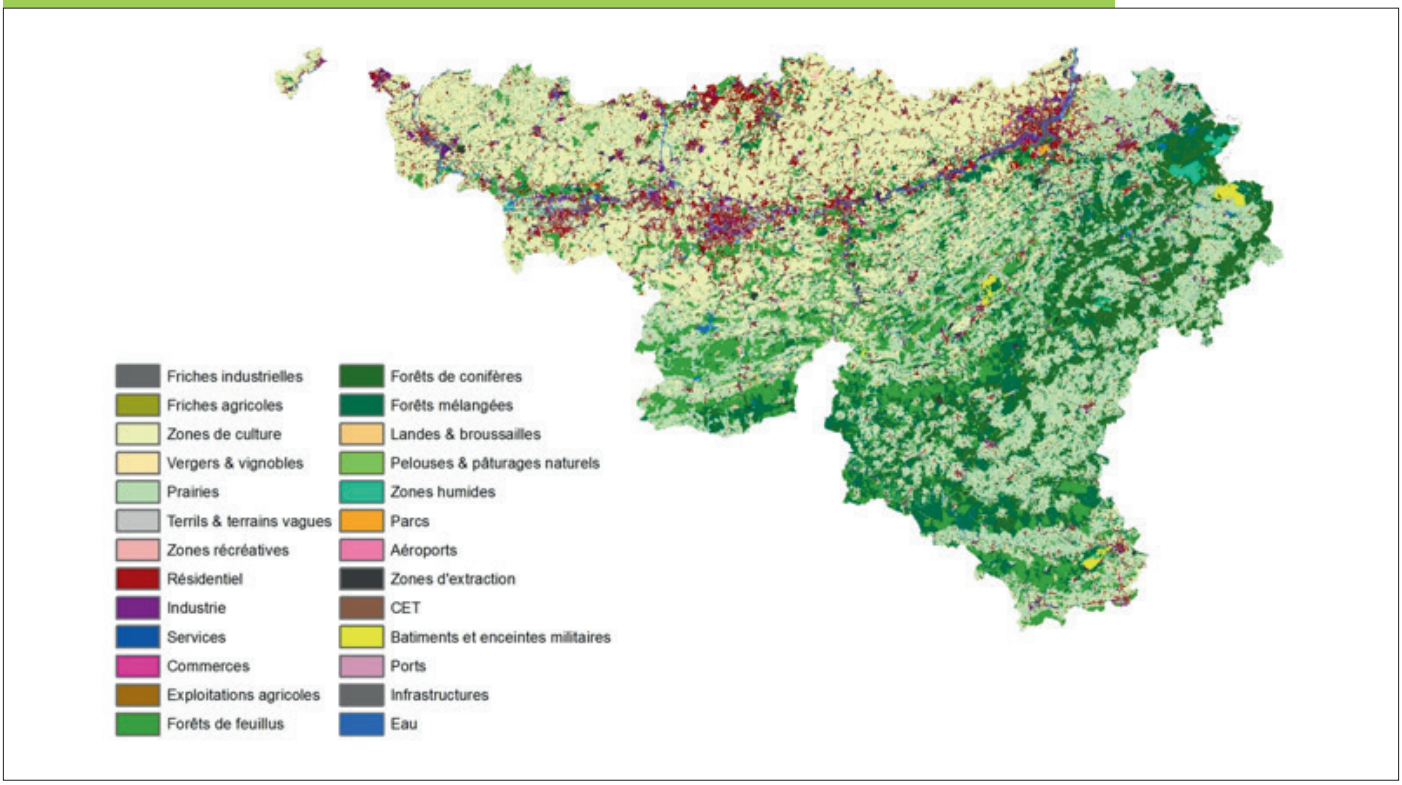
The land-use map is derived from the "Carte d'Occupation du sol de Wallonie" or COSW (SPW-DGARNE, 2016). For use in the model, the original COSW vector map is translated to a raster map with a 1 ha resolution. Each 1 ha cell has been attributed the dominant land-use type in the cell, but taking into account a conservation of area of each land-use type within the Walloon region. The original 68 categories in the COSW map are merged into 26 different land-use categories following the classification key in Appendix 1. The original COSW legend was simplified to optimise the model calibration effort whilst ensuring a relevant and easily interpretable output. Since the COSW map represents land-use in the Walloon region in 2007, the model simulations start in 2008 and run up to 2050.

3.2.2. Activity maps

The SmartPop project aimed to develop a population map for the Walloon region using open data within a dasymetric mapping procedure. Hereby, population data at administrative levels, e.g. community level, is distributed spatially using available land-use data. Hallot *et al.* (Publication 2 in this issue) discuss the creation of such a population map at a resolution of 1 hectare for 2008. The SmartPop model uses this population map as an input activity map.

Besides a population map, the ACA-model also needs employment density maps for all of the three economic sectors at a reso-

Figure 6 : Land-use map used for the SmartPop model (see Appendix 1 for corresponding COSW classification)



Source : based on Carte d'Occupation du Sol de Wallonie 2007, SPW-DGARNE, 2016

lution of 1 hectare. These maps are produced by means of the same dasymetric mapping technique as was used for population. Employment figures for 2008 are used at the spatial level of the 12 *Comités Subrégionaux de l'Emploi et de la Formation (CSEF)* in the Walloon region and are retrieved from the labour statistics (*Vlaamse Arbeidsrekening*) of the Policy Research Centre Work and Social Economy (*Steunpunt Werk en Sociale economie*, 2018).

3.2.3. Suitability maps

Suitability is a composite measure based on ecological, physical, historical, technical or economic factors determining appropriateness for a certain land-use type. It describes the degree to which a cell is suitable to be allocated a particular land-use type. The suitability map has a 1 ha resolution and expresses the weighted sum of the influence of different factors that are characterized by spatial data. The weights are values between 0 and 10 and reflect the relative importance of each of the factors. Each factor, on its turn, consists of several categories that all have a weight of between 0 and 10 representing the suitability of this category for a certain land-use type. For example, the factor 'slope' is an important factor determining the suitability for residential development and will thus receive a large weight. Within the slope map a flat area is more likely to be suitable for residential housing than a very steep slope which results in a high weighting value for a flat area and a low value for a steep slope. Subsequently, these weights are synthesized into a single measure which is linearly rescaled to the interval [0, 10]. Box 3 gives an overview of all locational factors which have been taken into account in the suitability maps for the different land-use types. Figure 7 gives the result for 3 land-use types : residential land, cropland and deciduous forest. The factors that are implemented in the suitability maps have been reviewed by several stakeholders.

Box 3 : Inputs used for suitability

Both the suitability and zoning map are created using several input layers. This box gives an overview of the layers that are used for creating the suitability maps and the land-use types they impact on[10]. The number of x illustrates the relative importance of each factor in the suitability map: x represents a weight of 5, xx represents a weight of 7, xxx represents a weight of 10.

	Brownfields	Barren land	Croplands	Orchards	Pastures	Other open land	Recreation	Residential	Industry	Services	Commerce	Farm houses	Deciduous forest	Coniferous forest	Mixed forest
Slope based on MNT LiDAR (2013-2014)[11]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Aspect (Slope orientation) based on MNT LiDAR (2013-2014)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Erosion risk based on ERRUISOL data (SPW)[12]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Flood risk derived from flood hazard by overflow and runoff (SPW)[13]	X	X	X	X	X	X	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X	X	X
Groundwater protection zones Protection of the well area (SPW)[14]	XX	X	XXX	XXX	XXX	X	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	X	X	X
Soils Map of the Main Soil Types of Wallonia (CNSW20)[15]	X	X	XXX	XXX	XXX	X	X	X	X	X	X	XX	XX	XX	XX
Land- Use land-use map of the SmartPop model	XXX	XX	X	X	X	X	X	XXX	XXX	XXX	XXX	XX	XXX	XXX	XXX
Optimal forest locations Based on "Definition of the aptitude of forest stations" (1991)[16]													XXX	XXX	XXX
Suitability for arable land (PCNSW, 2007)[17]		XX	XXX	XXX	XXX										

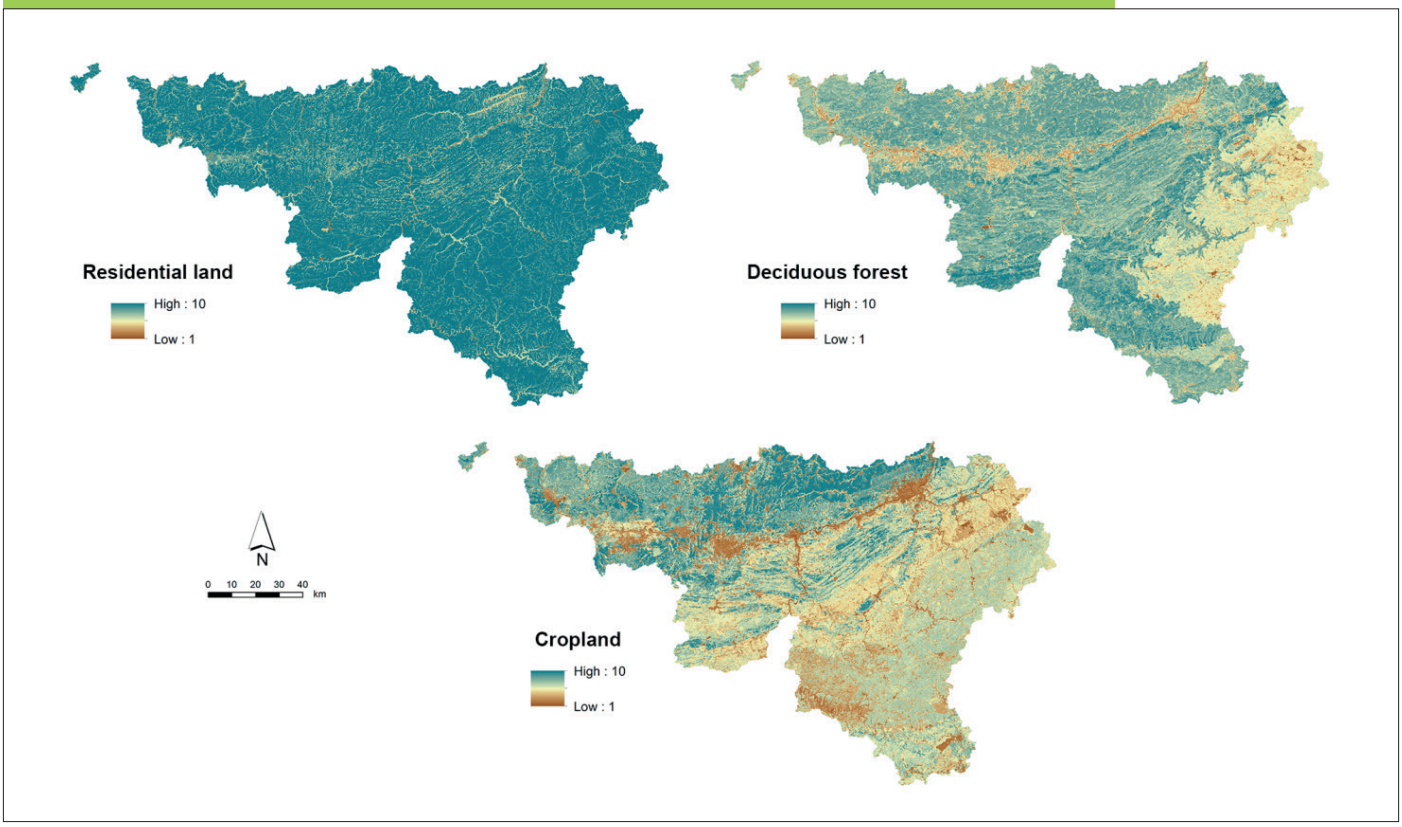
3.2.4. Zoning maps

Zoning maps represent the legal possibility to develop a certain land-use type at a certain location. Obviously, the regulatory framework with respect to spatial planning is liable to changes, and by 2025 the restrictions on converting economic zones into residential area might be lifted. The SmartPop model accounts explicitly for future shifts in spatial planning documents. The model makes a distinction between three planning periods : 2008-2015, 2015-2025 and 2025-2050.

Zoning maps scores between 0 to 3 indicate for each cell from which period onwards a specific land-use is allowed in each cell : 0 if the land-use is always allowed during the modelled period (2008-2050), 1 if

[10] Most of the data can be consulted and are described on the SPW mapping portal (geoportail.wallonie.be)
[11] http://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/fre/search?uuid=0bc90b40-74f9-43d6-9a18-468a65e6f048
[12] http://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/fre/search?uuid=647202ae-b1fe-4e42-accf-431c71bc62ad
[13] http://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/fre/search?uuid=04c3ee3d-4036-4aea-a80c-9da59dad3b87
[14] http://metawal.wallonie.be/geonetwork/srv/fre/search?uuid=74f81503-8d39-4ec8-a49a-c76e0cd74946
[15] http://geoportail.wallonie.be/catalogue/38c2a87e-d38a-4359-9899-9d4a6b9f0c2a.html
[16] http://environnement.wallonie.be/publi/dnf/fichier_ecolo_essences1.pdf
[17] https://fichierecologique.be/resources/LCNSW_V2.pdf

Figure 7 : Suitability maps of the SmartPop model for residential land (upper, left), deciduous forest (upper, right) and cropland (lower) ranging between a high suitability (score of 10, in blue) and low suitability (score of 1, in brown)



Source : SmartPop project

it is allowed from 2015 onwards, 2 if it is allowed from 2025 onwards, and 3 if the land-use is never allowed throughout the modelled period (2008-2050).

Similar to the suitability maps, the maps are based on expert judgement and presented to several stakeholders for review. The main input for the zoning maps are the '*plans de secteur*'[18]. Appendix 2 links each category of the '*plans de secteur*' with the zoning status of the different land-use types. Besides the '*plans de secteur*' there is also an effect of regions subject to karst, risk of rock fall, risk of landslides, flood risk and nature conservation. The different factors are combined using conditional functions based on the different regulations.

The zoning maps for residential land and industry are shown in Figure 8.

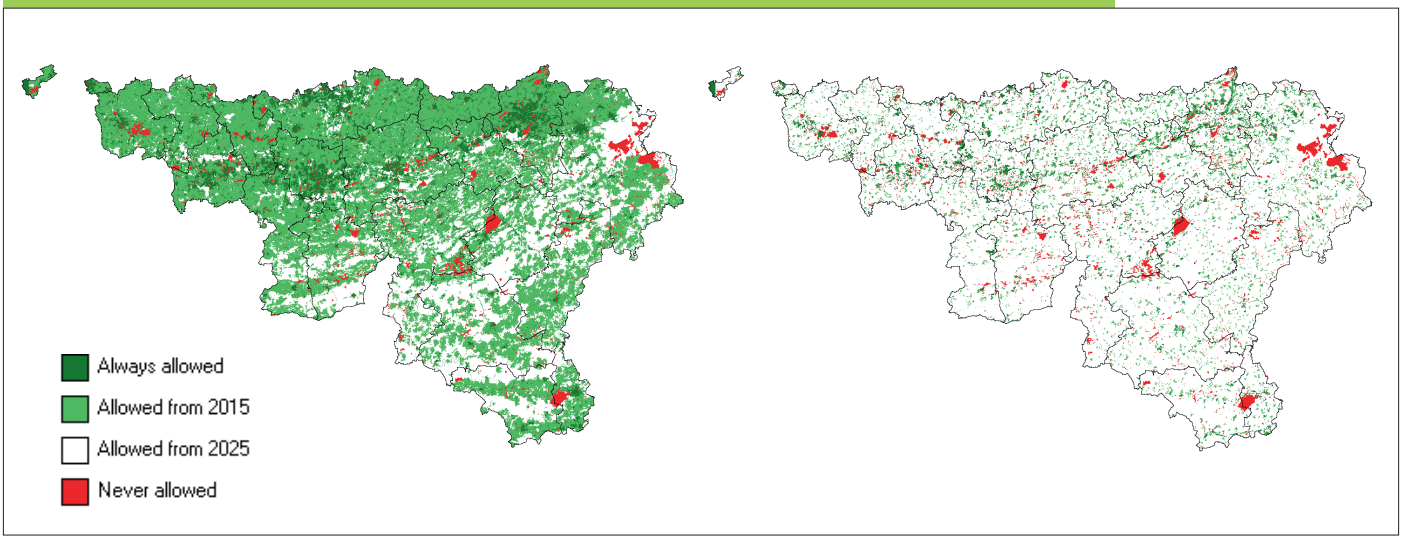
3.2.5. Accessibility

Accessibility is a map expressing the degree to which a cell can be accessed through transport infrastructure.

Local accessibility reflects the distance of a cell to transport infrastructure. Transport infrastructure consists of a number of networks, that in turn may consist of either points (such as access points to motorways) or lines (such as roads). A cell that is positioned closer to a line or point of a network has a higher local accessibility. The following networks are taken into account in the evaluation of accessibility : highway entry/exit points, highways, express roads, primary roads, secondary roads and tertiary roads. The road network is based on Open Street Maps (Figure 9).

[18] http://lampspw.wallonie.be/dgo4/site_amenagement/site/directions/dar/pds

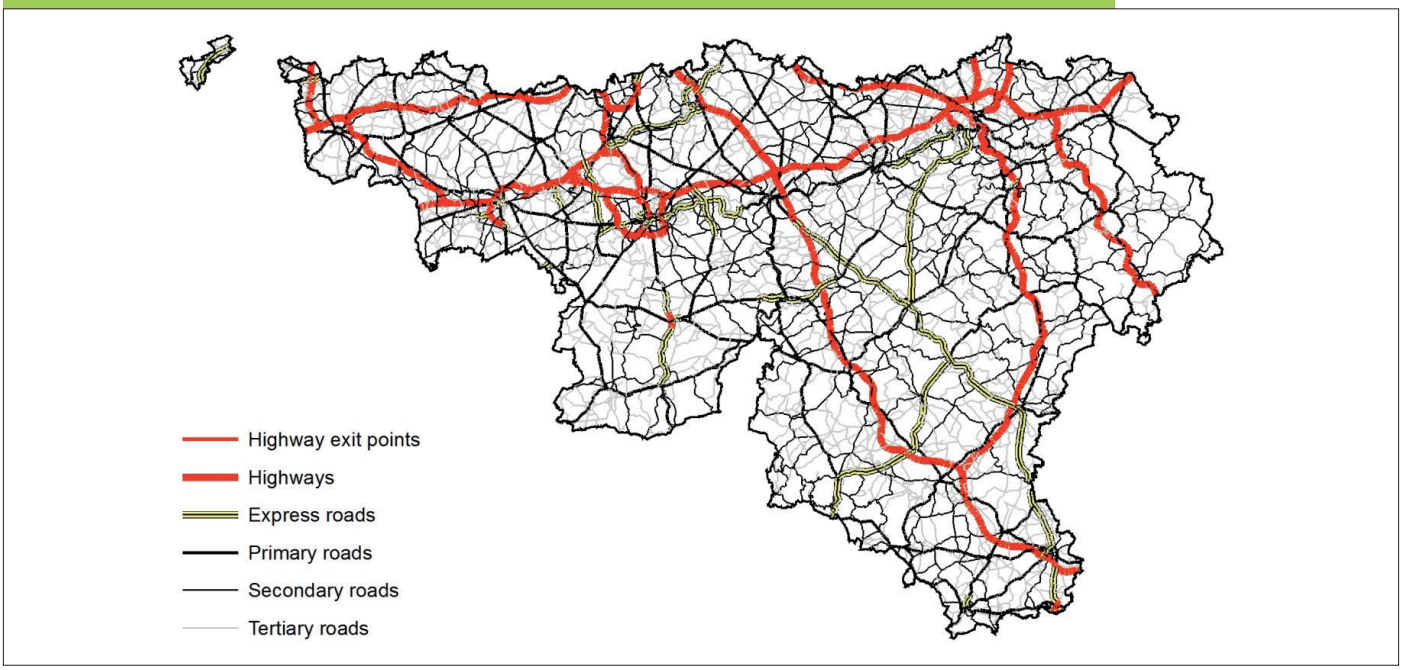
Figure 8 : Zoning maps of the SmartPop model for residential land (left) and industry (right)



Source : SmartPop project

Although it is possible to take into account in the ACA-model the network of public transport, it is not the case in the SmartPop project. Mustafa *et al.* (2018) have found that no significant effect of location of train stations on urban development was observed in the past. Therefore, when applying a 'business-as-usual' scenario of urban development, the location of train stations is of minor importance. Although it would be interesting to test and compare this scenario with others in which e.g. transit-oriented development is implemented in spatial planning practices, this was not possible within the scope of the SmartPop project. The SmartPop model could however be used to test the effects of such scenarios in the future.

Figure 9 : Road network



Source : Open Street maps

4 LAND-USE CHANGE IN THE WALLOON REGION BY 2050

As was already described in section 2, the residential area in the Walloon region will expand with approximately 26,000 ha, which is a growth of about 27 % compared to 2008 in a BAU scenario. The economic sectors will increase in area with approximately 3,000 ha or 10 % (Figure 10). In a STOP-scenario, urban expansion is more modest with 23,000 ha and 2,000 ha growth in residential land and area occupied by the economic sectors respectively. For both scenarios, the modelled urban growth is mainly concentrated around existing urban centres and primarily replaces pastures and croplands. In a BAU-scenario the area for pastures decreases by 14,000 ha and that for croplands by almost 8,500 ha. In a STOP scenario, the decrease of pastures is only 12,000 ha and of croplands 7,000 ha. The implementation of a 'stop au béton' will thus have a positive impact on safeguarding agricultural land, mainly in the more urbanised districts (*fr. arrondissement*) of *Liège*, *Verviers* and *Nivelles*. These districts show a lower residential growth in the STOP-scenario compared to the BAU-scenario (Figure 11, upper). In relative terms however, the largest difference between BAU and STOP can be found in the districts of *Verviers*, *Philippeville* and *Mouscron* (Figure 11). Figure 12 shows the difference in residential area between the BAU and STOP scenario in 2050 by a zoom on the *Charleroi* district. Cells in red represent locations that will be transformed to residential land in BAU, but will not be transformed to residential land in the STOP scenario. The figure shows that these locations are not limited to the surroundings of larger cities such as *Charleroi* and *La Louvière*, but can be found in the surroundings of almost all smaller urban centres and towns as well. These findings show that in a BAU scenario the further urban expansion is not only limited to large urban centres, but also concerns smaller urban centres and towns within these districts. Organising a 'stop au béton' will thus affect all types of urbanised centres within these districts.

Figure 10 : Modelled land-use change between 2008-2050 for the BAU and STOP scenario within the SmartPop model

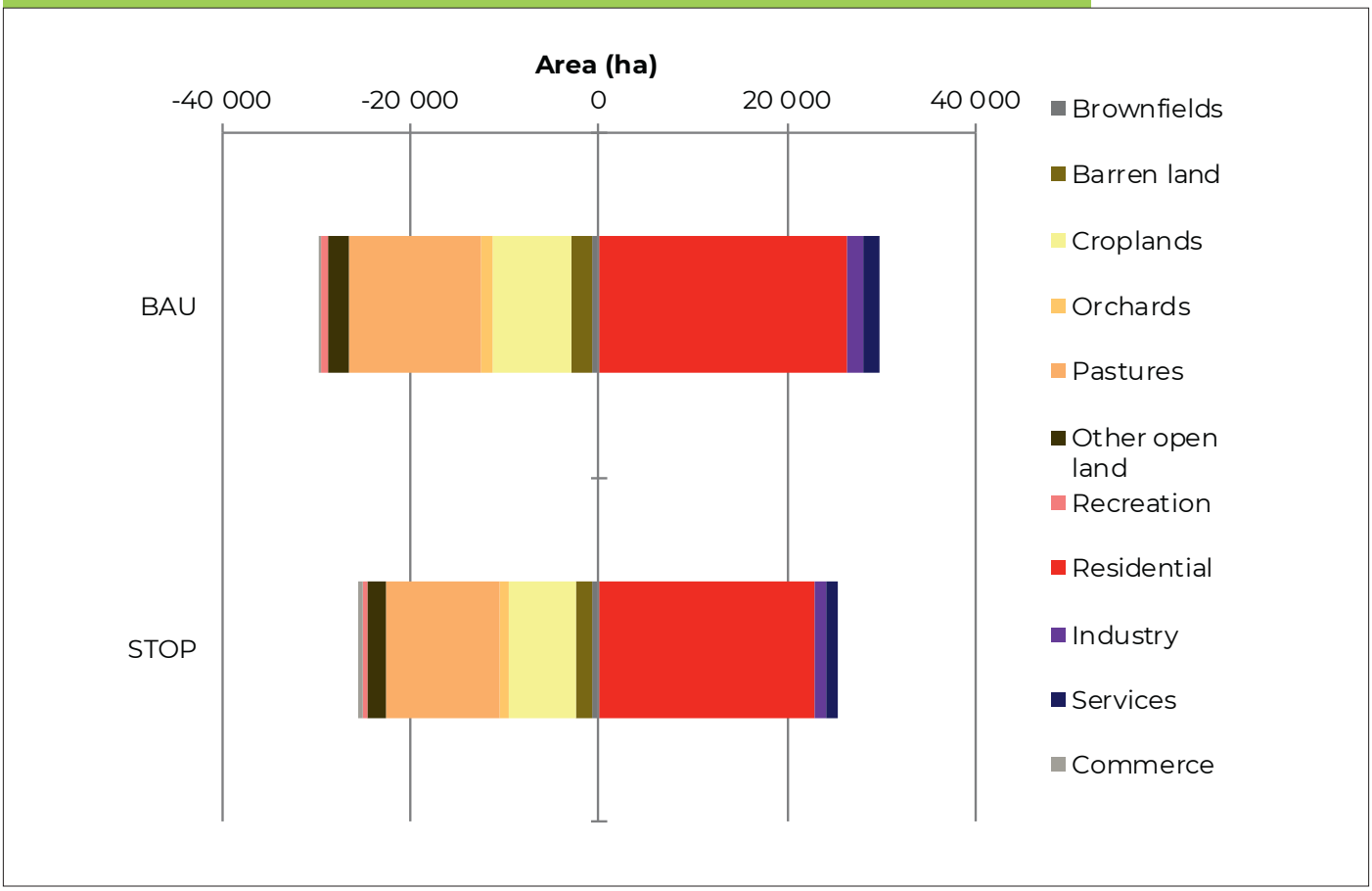


Figure 11 : Residential growth in the period 2008-2050 in hectares (upper) and in percentage (lower) for the BAU (left) and STOP scenario (middle) and difference between both scenarios in 2050 (right)

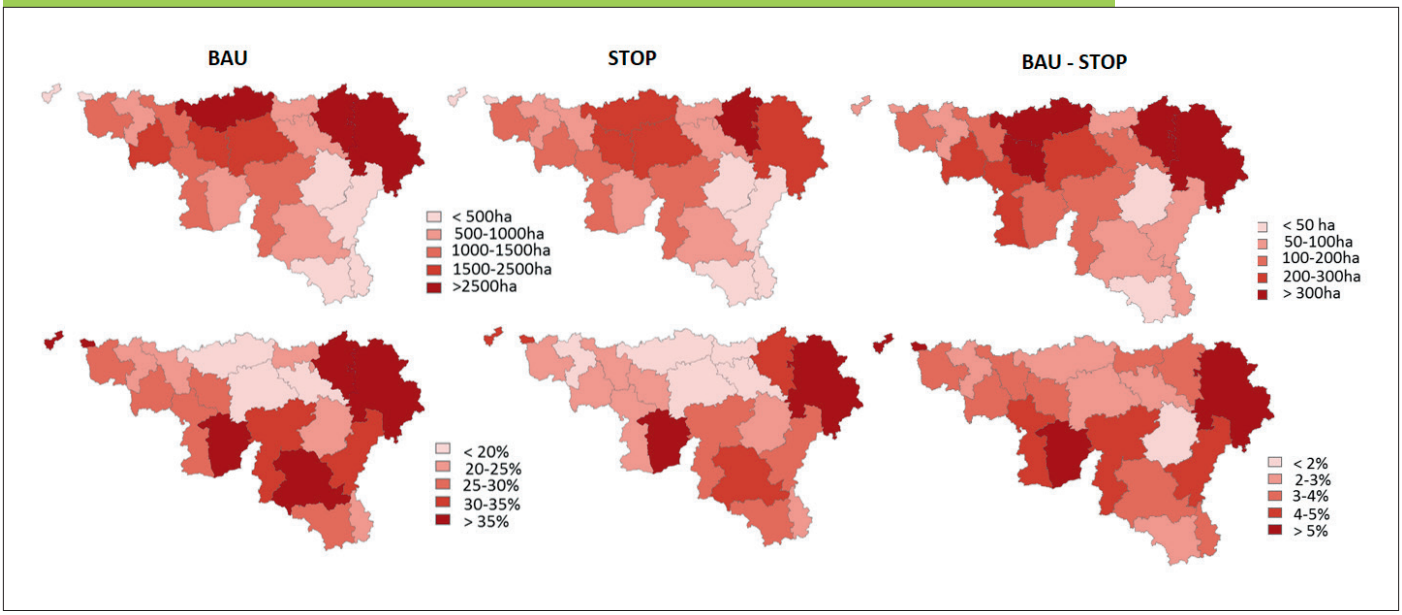
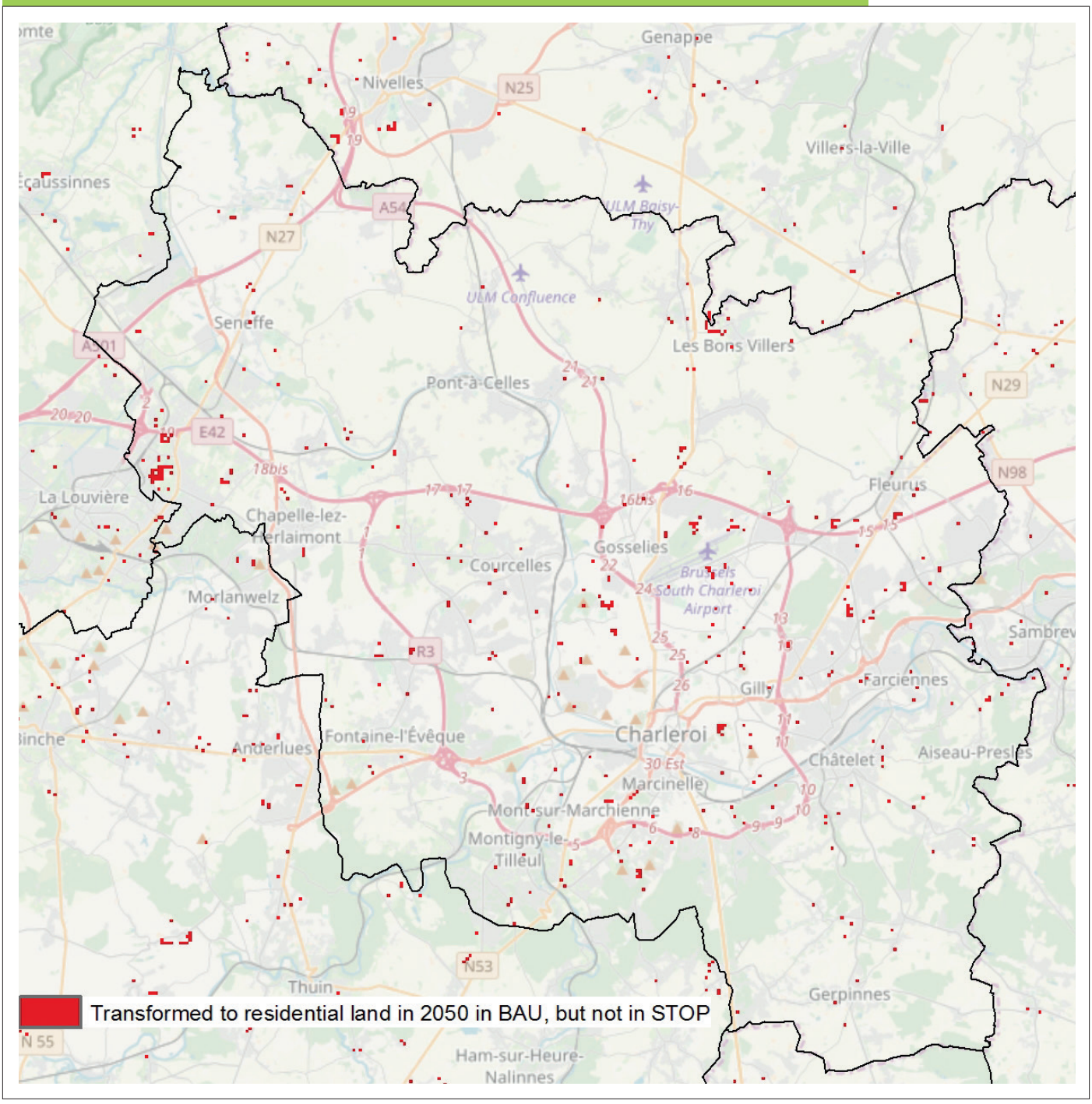


Figure 12 : Difference in residential land between BAU and STOP in 2050 for the Charleroi district



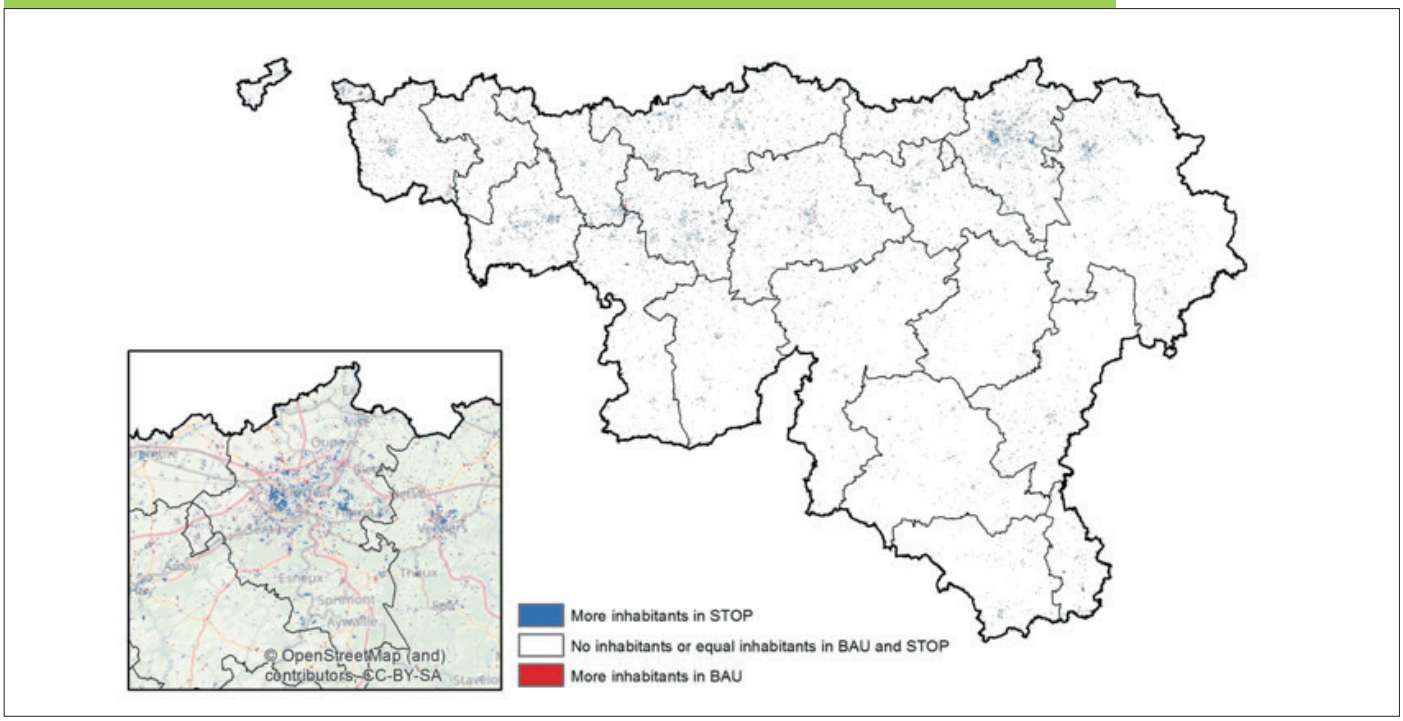
Source : Open Street maps

5 POPULATION DENSITIES

In the BAU-scenario average population density in the Walloon region still slightly decreases by 1.2 inhabitants per hectare of built-up area. In the STOP scenario this further decrease in average population density is limited to 0.5 inhabitants per hectare of built-up area. In both scenarios, however, there is still a decrease in the average population density, meaning that the growth of the total built-up area outperforms the growth of the population. Locally, however, in and around urbanised centres, population densities are expected to increase with more than 25 % under the 'stop au béton' scenario compared to the present situation.

Figure 13 shows the difference in population density per cell between the BAU 2050 and STOP 2050 scenarios. Blue cells represent locations with a higher population density in the STOP scenario compared to the BAU scenario. Figure 13 shows that, on average, population density is higher in the STOP scenario than in the BAU scenario. The largest difference between both scenarios can be found in city centres, but in general all residential locations show a slightly higher population density in the STOP scenario compared to the BAU scenario. This shows that the effect of the STOP principle will be distributed over the entire Walloon region and will not only affect cities. The absolute effect of the STOP principle on population densities will thus be rather limited : not a single municipality within the Walloon region will reach the same population density that is currently observed within the municipalities of the Brussels-Capital Region. This shows that implementing a 'stop au béton' by 2050 in the Walloon region would not lead to extreme population densities and should thus be feasible.

Figure 13 : Change in population density per cell (inhabitants/ha) between BAU 2050 and STOP 2050 in the Walloon region and in the Liège district. Values in blue represent locations with a higher population density in the STOP scenario compared to the BAU scenario, and vice versa for red cells



The results of both scenarios can be compared in terms of the changes in overall land-use and settlement patterns, but also in terms of consequences for several spatial and environmental indicators, such as the typology developed by Charlier and Reginster (2018) based on population concentrations in the Walloon region. They have created a settlement typology for the Walloon region based on the number on inhabitants within a 500m radius around each cell of 1 ha. This typology was implemented in the SmartPop model in order to compute the effects of land-use and population change on the concentration of the population. Table 1 shows that towards 2050 a larger part of the Walloon population will live in cities, small cities 2 and villages 1. The share living in small cities 1 and villages 2 will decrease compared to the current situation. This means that several small villages and small cities will grow in size by 2050 and thus be classified in a higher category (small city 1 → city, village 2 → village 1/ small city 2). At the local level, such growth comes with infrastructural challenges and opportunities that policy makers will need to tackle.

Table 1 : Effect of both scenarios on the number of inhabitants per morphological type

Number of inhabitants in a 500m radius	Type		% of the population in 2015	% of the population in BAU 2050	% of the population in STOP 2050
	Eng. Nomencl.	Fr. Nomencl.			
1-50	Isolated homes	Maisons isolées	1.7	1.4	1.4
51-100	Hamlet 2	Hameau 2	2.5	2.3	2.4
101-250	Hamlet 1	Hameau 1	10.4	8.4	8.6
251-500	Village 2	Village 2	16.9	14.5	14.4
501-1000	Village 1	Village 1	19.7	21.1	21.0
1001-2000	Small city 2	Petite ville 2	21.2	25.8	25.5
2001-3000	Small city 1	Petite ville 1	13.5	11.6	11.8
> 3001	City	Ville	14.1	14.8	14.9

6 CONCLUSIONS

Over the last decades, the Walloon region has undergone a large expansion of its urban area without a congruent increase in its population. The urban sprawl phenomena in the Walloon region has led to low population densities within the existing residential area, and likewise low employment densities within the constructed built-up area. The fragmentation is clearly visible in the urbanised districts of the Walloon region and urban expansion continues to reduce the remaining open space with negative environmental and economic consequences as a result.

Although the growth rate has been declining since the year 2000, the Walloon government has proposed the intention to implement a zero growth, called 'stop au béton', in built-up area by 2050. This will have an impact on the total area of additional urban land that will be developed by 2050. The spatially-explicit output of the SmartPop model allows policy makers to investigate possible consequences of the implementation of this zero-growth policy. The results show that if urban growth rates follow present decreasing trends, i.e. business-as-usual (BAU), a further growth in total built-up area by 29,000 ha is expected in the Walloon region (26,000 ha residential land + 3,000 economic land) in the period 2008-2050. In the case of a 'stop au béton', this growth is limited to almost 26,000 ha (23,400 ha residential land + 2,200 ha economic land). The overall effect on the population densities within city centres and smaller towns is however limited.

Land-use models, such as the SmartPop model allow policy makers to anticipate expected future changes in population and employment and the corresponding changes in land-use. This is typically done by simulating different explorative scenarios that are represented by different boundary conditions and assumptions. Within the scope of the SmartPop project, only a first prototype of the model has been built and the model has only been tested for two scenarios. These scenarios only differ in the total demand of new built-up area, while all other model inputs and parameters are kept unchanged. It is however possible to further investigate the effect of policy measures that can come along with a 'stop au béton' development, such as a transit-oriented development, by changing other inputs and parameters in the model. For example, by changing the accessibility parameters in the model, new urban development can be attracted to the surroundings of train stations or other public transport hubs.

Finally, it is important for users of the model's results to keep in mind that land-use models are not predictive models in the sense that they try to *predict* future land-use changes at a specific location, such as for example weather forecast models. Rather, the results should be interpreted in the same way as the results of for example climate models : as explorative tools that are applicable at a regional scale-level. This can, however, still give valuable information to policy makers at the regional level. For example, the Flemish government has recently used the RuimteModel Vlaanderen to study the effect of implementing the Strategic Vision of the Spatial Policy Plan (*Beleidsplan Ruimte Vlaanderen*) on the level of urban sprawl by 2050 and on the costs associated with it. The results of such a study can help stimulate the awareness of citizens and increase the sense of urgency among politicians and policy makers.

BIBLIOGRAPHY

Charlier, J. & Reginster,I. (2018). Mesures de la densité de population et du degré d'urbanisation dans le cadre des recommendations Européennes : application à la Wallonie. Working paper n°25. Institut Wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique (IWEPS).

Crols, T. (2017). Integrating network distances into an activity based cellular automata land-use model – Semi-automated calibration and application to Flanders, Belgium. PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel.

Ewing, R., Pendall, R. & Chen, D. (2002). Measuring sprawl and its impacts. The character and consequences of metropolitan expansion. Washington DC : Smart Growth America.

European Environment Agency (EEA) (2016). Urban sprawl in Europe – Joint EEA-FOEN report.

Jaeger, J. & Schwick, C. (2014). Improving the measurement of urban sprawl : Weighted Urban Proliferation (WUP) and its application to Switzerland. Ecological Indicators(38) : 294-308.

Federal Planning Bureau (2018), Perspectives démographiques 2017-2070, Population et ménages, Brussels, Federaal Planning Bureau.

Federal Planning Bureau (2015), Vooruitzichten van de transportvraag in België tegen 2030, Brussels, Federaal Planning Bureau.

Mustafa, A., Van Rompaey, A., Cools, M., Saadi, I., Teller, J. (2018). Addressing the determinants of built-up expansion and densification processes at the regional scale. Urban Studies, 1-20.

Policy Research Centre Work and Social Economy (Steunpunt Werk en Sociale Economie), 2018. Vlaamse Arbeidsrekening o.b.v. RSZ-DMFA, RSZPPO, RSVZ, RIZIV, CBS, IGSS, OEA, SEE, RVA, IWEPS, FOD Economie - Bevolkingsstatistieken, DWH AM&SB bij de KSZ (Bewerking Steunpunt Werk).

SPW-DGARNE, 2016. La Carte d'Occupation du Sol de Wallonie (COSW). Retrived from : http ://geoportail.wallonie.be/catalogue/5bbc54bb-69ec-4f1b-afd7-d70a7287835b.html

Statistics Belgium - *Statbel. Utilisation du sol [En ligne] https ://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/utilisation-du-sol (Page consultée le 4 juin 2018)*

White, R., Uljee, I. & Engelen, G. (2012). Integrated modelling of population, employment and land-use change with a multiple activity-based variable grid cellular automaton. International Journal of Geographical Information Science 26 (7), 1251-1280.

APPENDIX 1 : OVERVIEW OF LAND-USE TYPES USED IN THE SMARTPOP MODEL AND CORRESPONDING CATEGORIES OF THE ORIGINAL COSW MAP

Land use category		Original COSW categories[19]
English Nomencl.	French Nomencl.	
Brownfields	Friches industrielles	1341 – 1342
Barren land	Friches agricoles	25
Croplands	Zones de culture	21110 – 21111 – 21112 – 21113 – 2112 – 21131 – 21132
Orchards	Vergers & vignobles	2221 - 2222
Pastures	Prairies	2311 – 2312 - 232
Slag heaps and other open land	Terrils & terrains vagues	3242 - 325
Recreation	Zones récréatives	1242 – 14211 – 14212 - 1422
Residential	Résidentiel	1111 – 1112 – 11211 – 11212 – 11213 – 11214 – 11215 – 11216 – 11221 – 11222 - 11223
Industry	Industrie	12111 - 12112
Services	Services	12121 – 12122 – 12123 -12124 – 12127 – 12128 – 12129 - 12134
Commerce	Commerces	12131 – 12132 - 12133
Farm houses	Exploitations agricoles	12141 - 12142
Deciduous forest	Forêts de feuillus	311
Coniferous forest	Forêts de conifères	312
Mixed forest	Forêts mélangées	310 - 313
Heathland	Landes & broussailles	322
Grasslands	Pelouses & paturages naturels	321
Wetlands	Zones humides	411 - 412
Parks	Parcs	12125 - 141
Airports	Aéroports	1241
Extraction sites	Zones d'extraction	1311 - 1312
Landfills	CET	132
Military Services	Bâtiments et enceintes militaires	12126
Port	Ports	123
Infrastructure	Infrastructures	1221 - 1222
Water surfaces	Eau	5111 – 5112 - 512

[19] See geoportail.wallonie.be for labels

APPENDIX 2 : TRANSLATION OF 'PLANS DE SECTEUR' TO ZONING STATUS IN THE SMARTPOP MODEL

		Friches industrielles	Friches agricoles	Zones de culture	Vergers & vignobles	Prairies	Terrils & terrains vagues	Zones récréatives	Résidentiel	Industrie	Services	Commerces	Exploitations agricoles	Forêts de feuillus	Forêts de conifères	Forêts mélangées
A01	Activité économique mixte	0	3	3	3	3	3	1	1	0	0	0	3	0	0	0
A02	Activité économique industrielle	0	3	3	3	3	3	1	1	0	0	0	3	0	0	0
A11	Activité éco. spécifique agro-économique	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
A12	Activité éco. spécifique grande distribution	0	3	3	3	3	3	1	1	1	1	0	1	0	0	0
D01	Aménagement communal concerté	3	3	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	0	0	0
D02	Aménagement communal concerté à caractère industriel	1	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	3	0	0	0
E01	Plan d'eau	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
H01	Habitat	3	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0
H02	Habitat à caractère rural	3	3	0	0	0	3	0	0	3	3	0	0	0	0	0
L01	Loisirs	3	3	3	3	3	3	0	3	3	0	0	3	0	0	0
P01	Services publics et équipements communautaires	3	3	3	3	3	3	3	1	1	0	1	0	0	0	0
P02	Centre d'enfouissement technique	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	3	2	2	2
P11	Servitude particulière	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0
P12	Non affecté ("zone blanche")	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R01	Agricole	3	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	0	0	0	0
R02	Forestière	3	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0
R03	Espaces verts	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0
R04	Naturelle	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3	3	0	0	0
R05	Parc	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	3	3
V01	Vierge de toute affectation (annulation du Conseil Etat)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X01	Extraction	0	3	3	3	3	3	1	3	2	3	3	3	2	2	2

Allowed to change (value=0), allowed to change from 2015 (value=1), allowed to change from 2025 (value=2) and never allowed to change (value=3).

Wallonie

Iweps

L'Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique (IWEPS) est un institut scientifique public d'aide à la prise de décision à destination des pouvoirs publics. Autorité statistique de la Région wallonne, il fait partie, à ce titre, de l'Institut Interfédéral de Statistique (IIS) et de l'Institut des Comptes Nationaux (ICN). Par sa mission scientifique transversale, il met à la disposition des décideurs wallons, des partenaires de la Wallonie et des citoyens, des informations diverses qui vont des indicateurs statistiques aux études en sciences économiques, sociales, politiques et de l'environnement. Par sa mission de conseil stratégique, il participe activement à la promotion et la mise en œuvre d'une culture de l'évaluation et de la prospective en Wallonie.
Plus d'infos : https://www.iweps.be

2019

Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique
Vous pouvez consulter ou télécharger cette publication sur notre site : www.iweps.be