

Localiser la population urbaine pour optimiser la gestion du territoire

Eric HALLOT¹, Lien POELMANS², Inge ULJEE², Benjamin BEAUMONT¹, Nathalie STEPHENNE¹

¹ISSeP, Institut Scientifique de Service Public, 200 rue du Chéra, 4000 Liège, Belgium – e.hallot@issep.be

² Environmental Modelling Unit, VITO, Mol, Belgium - lien.poelmans@vito.be

RÉSUMÉ

Construire les « Smart Cities » de demain est un enjeu de développement durable tant pour les pouvoirs publics régionaux que locaux. Pouvoir quantifier et localiser précisément la population est important pour la gestion des villes et l'analyse des risques (pollution, inondations, déchets...). Le projet SmartPop propose de désagréger les statistiques démographiques sur base de la carte d'occupation du sol wallonne (COSW). L'adaptation et la comparaison d'algorithmes de cartographie dassymétrique en Wallonie et en particulier à Liège sont présentées dans ce papier. La calibration et la validation des premiers résultats utilisent des données du Registre National des Personnes Physiques. La cartographie dassymétrique dépend fortement de la qualité et de la précision de la donnée ancillaire. Ce papier illustre l'influence de la rasterisation de cette donnée sur la qualité des résultats dans les centres urbains.

SUMMARY

Building the "smart cities" of tomorrow in the view of sustainable development is a challenging task for both regional and local authorities. Quantifying and localizing precisely the population is important for city's management and risk analysis (pollution, floods, waste...). The SmartPop project proposes a methodology for disaggregation of demographic statistics using the Walloon land use map (COSW). This paper addresses the implementation and comparison of existing dasymetric mapping algorithms for Wallonia with a focus on the city of Liège. Calibration and validation of the initial results use the dataset from the National Registry of Physical Persons. The accuracy of dasymetric mapping routines is highly dependent on the quality and precision of the ancillary input data. This paper illustrates the effect of rasterization of input data on the quality of the results in urban centers.

MOTS-CLÉS : *Cartographie dassymétrique, densité de population, affectation du sol, COSW, Région wallonne, Liège.*

KEY WORDS: *Dasymetric mapping, population density, land cover, COSW, Walloon Region, Liège.*

1. Introduction

Construire les « Smart Cities » (villes intelligentes) de demain est un enjeu de développement durable tant pour les pouvoirs publics régionaux que locaux. Quand la population se concentre dans l'espace restreint urbain, l'extension des surfaces imperméables (routes, bâtiments, parking...) augmente les risques d'ilots de chaleur (*urban heat island*), d'inondation, d'encombrement des déchets, de mobilité et de pollutions pour les citoyens urbains et pour l'ensemble du territoire. Selon l'analyse de risque (*modèle source-transfert-cible*), la population représente une cible mais sa concentration l'intègre également comme une source. L'analyse des risques nécessite donc des données géolocalisées de densité de population. Localiser précisément la population permet d'optimiser la gestion du territoire en optimisant l'utilisation de l'espace urbain, objectifs de la ville de Liège dans sa stratégie de « smartcity ».

Porté par l'ISSeP, le projet SmartPop¹ a pour but de développer des outils prédictifs d'analyse des risques sanitaires et environnementaux liés à l'urbanisation. Pour ce faire, il propose d'exploiter les nouvelles données

¹ <http://www.issep.be/smartpop>

disponibles en Région Wallonne (données satellitaires, Lidar²...). Ces données doivent améliorer les cartes d'occupation du sol en milieu urbain. Ces cartes seront ensuite utilisées dans la désagrégation des statistiques démographiques qui est envisagée actuellement sur base de la carte d'occupation du sol wallonne (COSW). Utilisation du sol et population seront également modélisées dans ce projet jusqu'à l'horizon 2050 afin de réfléchir à la stratégie spatiale d'une « smart city » [BEA 16].

Ce papier se concentre sur le développement d'un prototype de cartographie dasyométrique d'une part à l'échelle wallonne et d'autre part sur l'agglomération liégeoise. La calibration de l'algorithme et les premiers résultats sont discutés en fonction des commentaires du comité d'accompagnement du projet et des demandes des utilisateurs régionaux rassemblés au sein du groupe d'implémentation du projet.

2. Cartographie dasyométrique

La cartographie dasyométrique désagrège des données spatiales vers une unité d'analyse plus fine en utilisant des données complémentaires (ou « *ancillaire* ») pour affiner la localisation du phénomène [BAT 13]. Ce type de cartographie peut s'appliquer théoriquement à toute donnée spatiale quantitative agrégée par unité géographique administrative, environnementale... [MEN13]. Selon la technique de cartographie dasyométrique, des données ancillaires sont utilisées pour représenter géographiquement la variable quantitative mesurée à une résolution plus grossière [BAT 13]. La redistribution du nombre d'habitants/km² dans des zones spatiales homogènes améliore la précision et facilite l'analyse spatiale en éliminant les distorsions appelées « *modifiable areal unit problem* » (MAUP). En effet, les résultats de toute cartographie et de toute analyse cartographique spatiale dépendent de la définition des unités d'analyse. Le changement d'unités modifie le résultat comme l'illustre la figure 1 où les individus localisés intégrés dans trois types d'unités présentent une répartition spatiale différente.

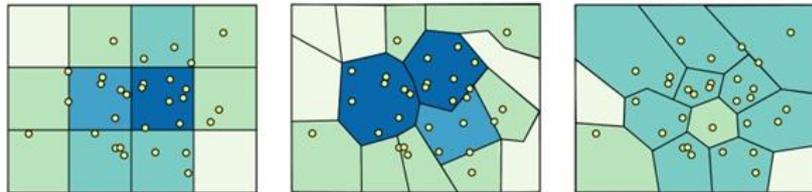


Figure 1. “Modifiable Areal Unit Problem”. La figure représente comment trois manières différentes d'agréger de données de comptage (par exemple, trois unités de recensement différentes) peuvent affecter l'apparence d'une carte choroplèthe (valeur/surface). Les trois cartes utilisent la même légende de couleurs et de classification (modifié d'après [GRU14]).

Les cartes de densité mondiales comme Landscan [DOB 00], Gridded Population of the World [BLK 06] et WorldPop [LIN 12] redistribuent les statistiques démographiques sur une maille régulière, une grille ou un raster. A l'échelle européenne, les données Eurostat de 2001 ont été désagrégées par dasyométrie en fonction des classes d'occupation du sol de Corine Land Cover - CLC - [GAL 01]. Aucune mise à jour de cette carte en fonction de la nouvelle CLC 2012 et de statistiques démographiques plus récentes n'a encore été produite. L'institut national des statistiques propose une carte à 1 km² de résolution basée sur le Census 2011 [INS 11]. En Flandre, l'algorithme de Gallego [GAL 01] a été adapté pour produire la carte de 2010 [ENG 11]. Le projet SmartPop propose d'adapter l'algorithme existant à la Wallonie avec comme objectifs d'obtenir une carte de meilleure résolution, une procédure plus transparente (plus de contrôles sur les inputs et les outputs) une mise à jour à la demande dès l'obtention des données de base validées par les responsables régionaux.

3. Méthodologie

Cette section décrit la méthode de cartographie dasyométrique envisagée en décrivant d'abord les données de population et d'occupation du sol qui existent en Wallonie.

² Light Detection And Ranging

3.1 Données existantes

3.1.1 Unités de recensements

Les données de population sont quantifiées selon les unités statistiques nationales. La division administrative belge datant de 1796 repose sur quatre unités territoriales : les régions, les provinces, les arrondissements administratifs et les communes. Depuis, 1970, le secteur statistique est l'unité territoriale de base. 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 socio-économiques des communes et d'obtenir une précision accrue sur la morphologie et les caractéristiques de l'habitat [VDH 72]. Le découpage a été remodelé en 1981 sur base de caractéristiques structurelles d'ordre social, économique, urbanistique ou morphologique et retouché pour l'Enquête socio-économique de 2001 afin d'épouser les modifications des limites communales et afin d'intégrer les grandes modifications de l'utilisation du sol. La taille de ces secteurs est variable de 1 à 6000 ha. C'est à ce niveau que les données de population les plus précises sont fournies [INS 11]. Pour la Région wallonne, les limites administratives sont emboîtées de la manière suivante : 1 région, 5 provinces, 20 arrondissements, 262 communes et 9875 secteurs statistiques.

3.1.2 Données de population INS

Seize recensements généraux de la population et des logements ont été réalisés entre 1846 et 2011. Le recensement n'était pas uniquement un comptage de la population mais revêtait un aspect administratif important en déterminant le chiffre officiel de la population de chaque commune qui permet, entre-autres, de calculer l'attribution des subsides, la rémunération des fonctionnaires communaux, le nombre de membres du conseil communal et du conseil provincial...

L'introduction du Registre National des Personnes Physiques dans les années 1980 a nettement facilité le comptage de la population et les chiffres de la population ont pu être publiés beaucoup plus vite. Le recensement général a de ce fait perdu son caractère administratif. A partir de 2001, la population n'est désormais plus comptée par le « recensement » mais bien via le registre national.

3.1.3 Registre national des personnes physiques (RNPP 2013)

Le registre national désigne le système de traitement d'informations qui assure l'enregistrement, la mémorisation et la communication d'informations relatives à l'identification des personnes physiques c'est-à-dire les citoyens. Le registre national assure le partage des données authentiques d'identification des personnes physiques (belges et étrangers, réfugiés compris résidants en Belgique) [IBZ 14].

Dans le cadre de cette recherche, nous avons reçu cette information pour l'année 2013 sous la forme d'un fichier raster (100 x 100 m de résolution) de l'IWEPS (Institut Wallon pour l'Évaluation et la Prospective Statistique). Ce raster a été réalisé à partir des lieux de résidence des personnes sous la forme de leur adresse postale. Cette dernière a été transformée en coordonnées XY Lambert Belge 1972 par le SPF Finances/AGDP qui fait le lien avec les adresses reprises à la matrice cadastrale. La coordonnée correspond majoritairement au centre du bâtiment de la parcelle dont l'emprise au sol est la plus grande. Chaque individu est localisé sur le territoire par un point. La rasterisation se fait en utilisant un outil de conversion de points vers un mode image où on assigne à la valeur de cellule le nombre de points tombant dans la cellule. Sujet à la loi sur la protection de la vie privée, la donnée est anonymisée et la valeur des pixels de 1 à 4 habitants a été portée à 5 habitants.

3.1.4 Carte d'occupation du sol (COSW 2007)

La Carte d'Occupation des Sols de Wallonie (COSW) date de 2007 mais intègre l'information de différentes sources de 2005 [BAL 07]. L'intégration de toutes les données existantes dans une légende alliant l'occupation et l'utilisation des sols s'inspirait de la carte européenne (CORINE Land Cover). La COSW se base principalement sur le Plan de Localisation Informatique (PLI) et associe d'autres thématiques par géotraitements effectués à l'échelle des entités surfaciques. L'application d'une typologie permet ensuite de classer et d'agréger ces entités surfaciques (polygones) dans les différentes classes d'occupation dans la légende.

Elle est utilisée par de nombreux services mais une mise à jour de ce produit n'a pu être réalisée et est discutée par ailleurs au sein du projet. Cette donnée va servir de base à la réflexion sur la cartographie d'assymétrie. La légende présente 5 thématiques hiérarchisées sur 5 niveaux.

3.2 Cartographie dassymétrique

L'utilisation du logiciel développé par notre partenaire flamand permet de consolider la cartographie de la population à l'échelle nationale. Le module de cartographie dassymétrique du logiciel WEISS, développé par le VMM et le VITO³, exploite les données ancillaires à deux niveaux d'échelle. L'intégration d'information plus précise sur les zones résidentielles renforce en effet la qualité de la désagrégation [VES 09]. La distribution dassymétrique de la population est réalisée au travers des classes LU/LC (Land Use / Land Cover) en fonction de leurs poids relatifs, en terme de densité de population, définis par l'utilisateur [POE 15].

Il existe d'autres algorithmes qui sont évalués dans leurs avantages et inconvénients par rapport au WEISS en particulier le modèle « *Random Forest* » [STV 15] ou la toolbox sous ArcGIS10 (©ESRI) développée par l'USGS⁴. La procédure automatique du logiciel de l'USGS est basée sur des densités relatives calculées avec un « pourcentage de recouvrement spécifique » des zones LU/LC par les unités de population qui égalent ou dépassent un seuil défini par l'utilisateur (figure 2) [MEN 06] [SLE 07]. Ce seuil fixe ne permet donc pas de calibrer l'algorithme avec des données spécifiques.

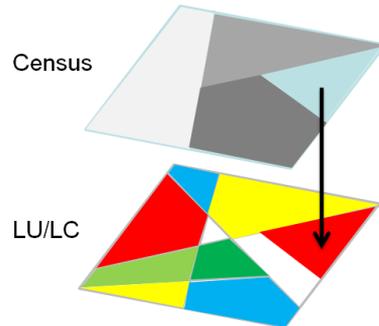


Figure 2. Pourcentage de recouvrement spécifique des zones LU/LC par les unités de population (census).

3.3 Calibration

Deux paramètres doivent être définis a priori :

- a. L'identification des classes de la COSW qui sont considérées comme « *non urbaines* » où il est possible de trouver des habitations (champs, forêts, centres scolaires...) et « *inhabitées* » (chemin de fer, routes, lacs...) où il est exclu de trouver des habitants;
- b. les densités de population relatives des classes « *habitées* »

Pour ce faire, les différentes classes de la COSW ont été croisées avec les données raster du RNPP 2013 par statistiques zonales en considérant les cellules nulles et sans données (*nodata*) comme zones sans habitant. En fonction de ces résultats, nous avons reclassé la légende de la COSW en 5 catégories : les 3 zones d'habitat de haute densité, densité moyenne et faible densité de population, les zones d'habitat possible (non urbaines) et les zones inhabitées (densité de population nulle ou quasi nulle). Cette analyse nous a également permis de calculer les valeurs de densités moyennes de population de chacune des classes à l'échelle de la Région wallonne et d'en déduire leur poids relatifs (0.6 – 0.25 – 0.12 – 0.03 – 0).

Les données du RNPP sont ici utilisées de manière binaire (absence / présence de population) et de manière relative (densité forte / faible). Les valeurs absolues de la cartographie raster du RNPP nous permettent par ailleurs de valider les résultats. Dans la suite du projet, des données vectorielles seront utilisées pour cette validation à l'échelle de la ville.

4. Résultats

La cartographie dassymétrique a été réalisée à deux échelles, la première au niveau de la Région wallonne et la seconde au niveau des 9 communes de l'agglomération liégeoise (Ans, Beyne-Heusay, Chaudfontaine, Flemalle, Grâce-Hollogne, Herstal, Liège, Saint-Nicolas, Seraing).

³ VMM : Vlaams Milieu Maatschappij - VITO : Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek - <http://weiss.vmm.be>

⁴ USGS : United States Geological Survey

A l'échelle de la région, les données de population de 2013 sont agrégées au niveau des 20 arrondissements (figure 3a). La désagrégation se base sur les données ancillaires de la COSW (2007). Cette base de données est d'abord rastérisée à 100 mètres de résolution et ensuite reclassée en 5 classes de densités de population relatives avant de répartir les données de populations par secteurs dans chaque classe de densité (cf. § 3.3). Les résultats de cette carte dassymétrique sont comparés aux données du RNPP 2013. L'erreur moyenne est de -1 habitant /ha avec un écart-type de 54 habitants/ha mais avec des valeurs extrêmes allant de -540 à 5122 habitants/ha. Le mode est de 5 habitants/ha correspondant à la valeur minimale du RNPP 2013 dû à l'anonymisation des données (cf. § 3.1.3). Ces erreurs peuvent, en partie, être expliquées par l'écart temporel entre les données de population (2013) et les données ancillaires (2007). En effet, les zones d'extension récentes de l'habitat ne sont pas prises en compte. De plus, nous avons remarqué que les valeurs des classes de population élevées variaient fortement entre les différents arrondissements, pouvant aller du simple au triple entre les arrondissements plus ruraux (Marche, Virton, Neufchâteau) aux arrondissements les plus urbanisés du Nord et l'Est de la Wallonie (Liège, Verviers, Namur, Huy). Une cartographie à l'échelle des arrondissements qui utilisera leur poids relatifs respectifs est prévue dans la suite du projet.

Sur la zone de liège, la même procédure de désagrégation est réalisée avec les données de population de 2013 agrégées au niveau des 560 secteurs statistiques (figures 3b et 4a) composant les 9 communes. Les résultats ont également été comparés aux données du RNPP 2013 (figure 4b). L'erreur moyenne de 2.7 habitants/ha avec un écart type de 77 habitants/ha, des valeurs extrêmes comprises entre -546 et 1680 habitants/ha et un mode à 5 habitants/ha pour les mêmes raisons que précédemment.

La figure 4c montre le résultat en quatre classes (habitat dense / eau / non habité / autres) de la rastérisation à 100 mètres pour le centre-ville de Liège. On observe à la figure 4e que la qualité de la carte de densité est directement liée à la précision des données ancillaires, y compris leur mode de rastérisation, avec la présence de « pixels habités » au niveau des voies d'eau ou du réseau routier. La distribution des densités n'est pas homogène. Plusieurs quartiers affichent une densité de population nulle, tandis que les autres sont représentés avec quelques pixels de densité moyenne et une majorité de pixels de très forte densité. Il apparaît que ces zones à haute densité correspondent à des secteurs statistiques ou des délimitations LU/LC très petits. Dans cet environnement, une résolution de désagrégation trop importante, ici 100 m, conduit à des résultats aberrants avec, par exemple, l'ensemble de la population d'un seul secteur statistique concentrée sur un ou deux pixels.

Pour les quartiers densément urbanisés une résolution inférieure à 100 mètres est donc indispensable. La figure 4d est le résultat, avec les mêmes classes, de la rastérisation à 10 mètres puis ré-aggrégé à 50 mètres à l'aide du logiciel SpatAggr [RIK 05] qui force la conservation des surfaces totales de chacune des classes. La figure 4f montre la cartographie dassymétrique avec les mêmes données de population et les données ancillaires à 50 mètres de résolution. La distribution des densités est plus homogène et la répartition des classes « habitées » vs « non-habitées » est mieux respectée.

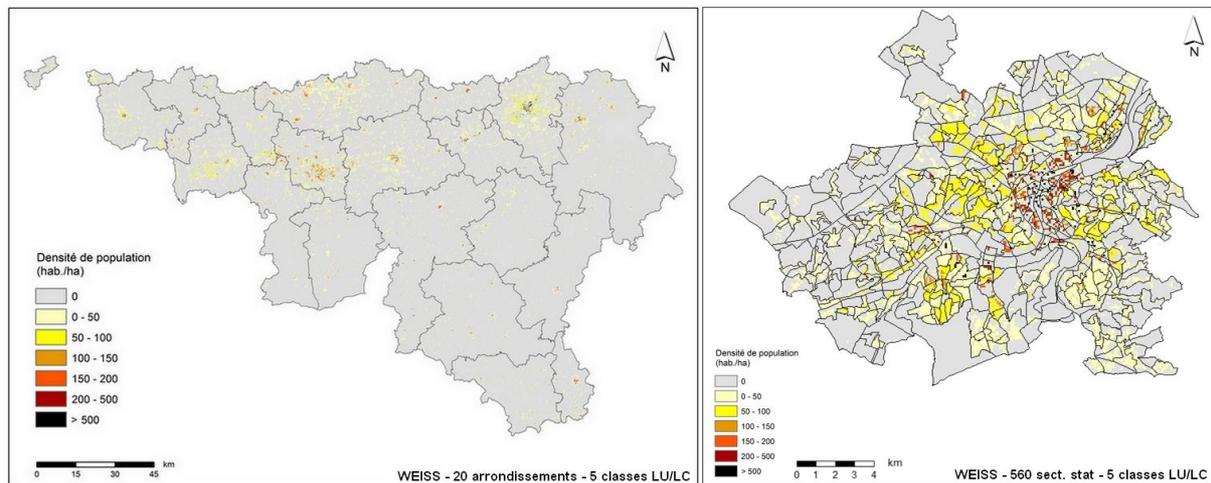


Figure 3. Cartes de densité de population réalisées avec le logiciel WEISS. A gauche, la Région wallonne sur base de 20 arrondissements et à droite, les neuf communes de l'agglomération liégeoises sur base de 560 secteurs statistiques.

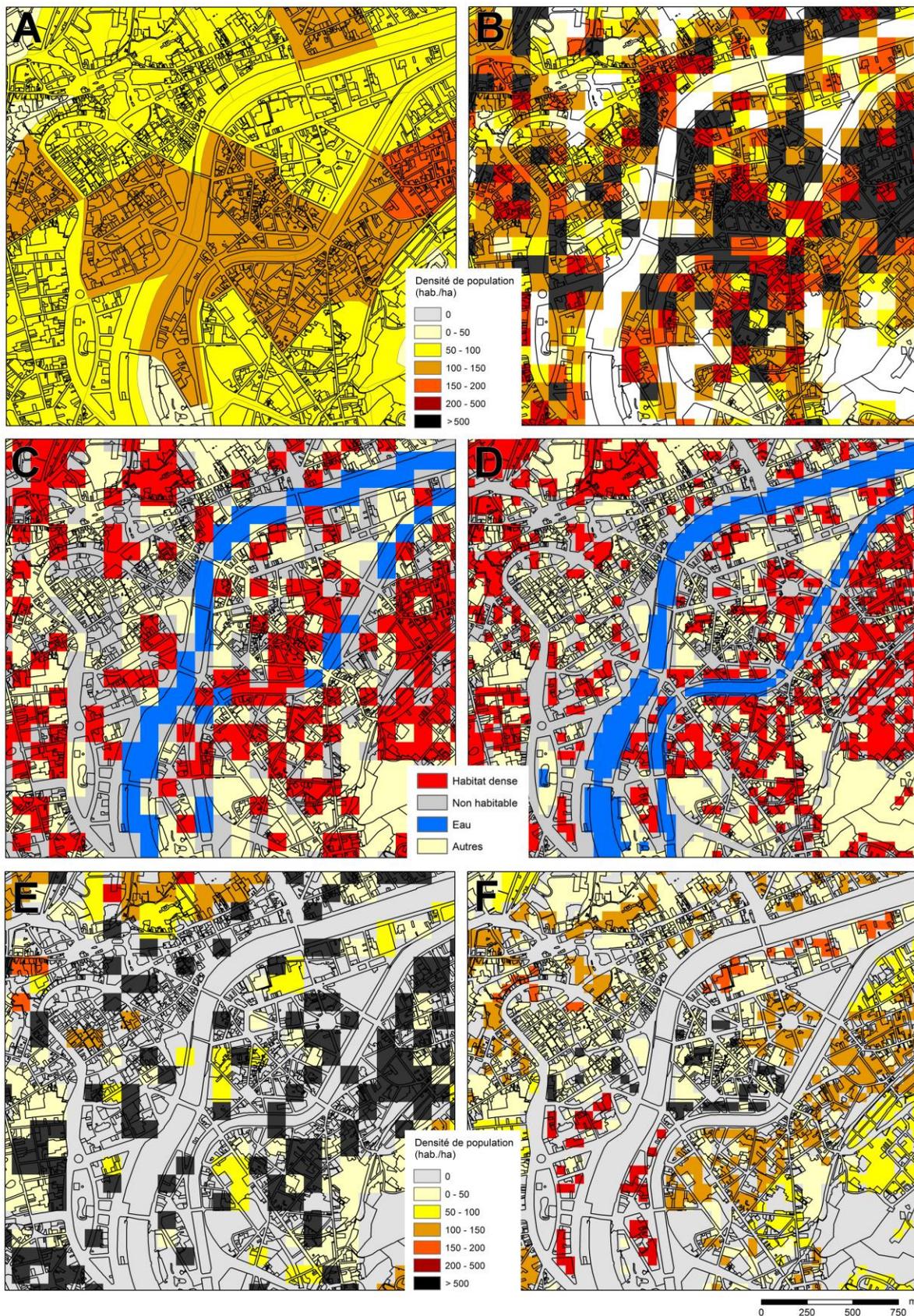


Figure 4. Centre-ville de Liège. Fond de plan COSW (2007) - A) densité de population représentée au niveau des secteurs statistiques - B) densité de population selon le RNPP13 - C) rasterisation de la COSW à 100 x 100 m - D) rasterisation de la COSW à 50 x 50 m (VITO - SpatAggr) - E) carte d'assymétrie population de 2013 à 100 x 100 m - F) carte d'assymétrie de la population de 2013 à 50 x 50 m.

5. Conclusions et perspectives

La cartographie dassymétrique est un outil puissant pour obtenir des données géolocalisées de densité de population. A l'échelle de la Wallonie, il n'existe aucun prototype dassymétrique spécifique et le projet SmartPop propose de développer un algorithme permettant de produire cette carte à la fréquence voulue par les utilisateurs. Ces cartes doivent améliorer non seulement l'analyse des risques en Wallonie mais également la comparaison avec les cartes produites en Flandre, en se référant au même modèle. Les premiers résultats démontrent la pertinence des résultats dassymétriques par une comparaison avec les données rasterisées du RNPP. Des développements ultérieurs sont néanmoins nécessaires pour discuter de la pertinence d'utiliser des données de 2013 (RNPP) pour calibrer une cartographie dassymétrique utilisant les données LU/LC de 2007 (COSW). De même, l'obtention et l'utilisation des données RNPP au format original (points) permettra de calibrer et de valider les cartes à toutes les échelles.

Par rapport à la carte du RNPP, le développement d'un algorithme de dassymétrie offre la possibilité de fournir ces données de manière régulière et avec des échelles plus précises sur certaines zones, si nécessaire. L'outil utilisé par le Vito a été préféré à d'autres méthodes pour sa robustesse et sa modularité. Cependant, la comparaison avec d'autres logiciels est utile d'un point de vue scientifique et permettra éventuellement de donner des perspectives d'amélioration de l'outil WEISS avec, par exemple, la possibilité de prendre en compte des poids relatifs différents en fonction de zones déterminées.

L'intégration des nouvelles cartes de densité dans les analyses de risque et l'analyse de leur valeur ajoutée dans l'évaluation de ce risque sera réalisée dans la suite du projet SmartPop. La présentation des premiers résultats lors du comité d'évaluation a été très positive, la diffusion de ceux-ci au sein du groupe d'implémentation sera réalisée dans les prochains mois afin de permettre une appropriation des résultats pour les utilisateurs au sein du projet et un suivi de l'implémentation par des formations si nécessaire.

La technique dassymétrique nécessite une donnée ancillaire la plus précise et la plus à jour possible. Pour la cartographie de la population, la désagrégation se base sur une carte d'occupation du sol. La carte d'occupation du sol européenne, CLC, produite par les Etats Membres à l'aide de données satellitaires nécessite un processus de validation long et une lenteur de diffusion de ces données. La cartographie dassymétrique européenne de 2006 utilisant des données de population de 2001 est actuellement encore utilisée en input des modèles de risque sanitaire et environnemental. En Wallonie, la COSW 2007, inspirée de la légende CLC, a intégré plusieurs bases de données vectorielles existantes mais n'a pas été mise à jour depuis. La recherche présentée dans ce papier se base sur cette carte tout en connaissant les inconvénients. La réflexion sur la mise à jour de cette dernière est primordiale et fait partie du projet SmartPop.

La qualité de la carte de densité de population est en effet fortement dépendante de la qualité de la carte d'occupation du sol utilisée. Selon [BAT 13], améliorer la qualité des données d'occupation des sols pour les classes urbaines augmente notablement la qualité de la carte finale. Les zones urbaines changeant rapidement, les données satellitaires et aériennes comme le LIDAR, les photographies aériennes, et les données GSM acquises régulièrement ou d'autres données, comme les données cadastrales, permettent de mettre à jour les cartes d'occupation du sol [PAT 13]. La Wallonie a un plan d'acquisition annuel de photos aériennes et deux couvertures LIDAR et Pléiades acquises en 2013. Pour actualiser les informations spatiales sur les zones urbanisées, SmartPop propose de développer une classification orientée-objet en utilisant des données aériennes ou satellitaires et des informations sur la hauteur et la fonction des bâtiments [VDK 14].

Une autre solution pour obtenir une carte d'occupation du sol plus récente est de la modéliser. La modélisation de l'occupation et de l'utilisation du sol a évolué d'une approche qualitative à une approche quantitative ; celle-ci fut d'abord empirique et statistique puis mécaniste, systémique et dynamique en prenant en compte les facteurs de changement [STE 02]. Les modèles d'automates cellulaires ont démontré leur efficacité pour la simulation dynamique à très haute résolution spatiale [WHI 12]. A l'échelle de l'Europe, et appliqué en Flandre, le modèle Moland utilise la technique des automates cellulaires pour prédire la répartition de l'utilisation des sols dans le temps sur base de règles de transitions répondant à des changements d'activité à l'échelle d'une grille spatiale de 1ha [LAV 04]. Le projet SmartPop utilise également cette technique en collaboration avec le VITO pour simuler l'évolution de l'utilisation du sol et donc obtenir une estimation des changements de distribution de population jusqu'à l'horizon 2050. Mais ce papier se limite à l'utilisation de la carte actuelle, la COSW.

6. Bibliographie

- [BAL 07] 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.
- [BAT 13] BATISTA SILVA F., GALLEGO J.& LAVALLE C., 2013. A high-resolution population grid map, *Journal of Maps*, 9, 16-28.
- [BEA 16] BEAUMONT B., STEPHENNE N., HALLOT E., POELMANS L. & CLOSE O., 2016. A common land-use change model for both the Walloon and Flanders regions in Belgium. *GEOProcessing 2016 (Venice, Italy, 24-28/04/2016)* (Accepted).
- [BLK 06] 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.
- [DOB 00] DOBSON J. E., BRIGHT E. A., COLEMAN P. R., DURFEE R. C. & WORLEY B. A., 2000. Landsat: A Global Population Database for Estimating Populations at Risk, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66, 849-857.
- [ENG 11] 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.
- [GAL 01] 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.
- [GRU14] 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.
- [IBZ 14] IBZ, 2014. SPF Intérieur - Direction générale Institutions et Population, <http://www.ibz.rn.fgov.be/fr>.
- [INS 11] INS, 2011. Census 2011, Service Public Fédéral Economie, http://statbel.fgov.be/fr/statistiques/collecte_donnees/recensement/Census2011.
- [LAV 04] LAVALLE C., BARREDO J. I., MCCORMICK N., ENGELEN G., WHITE R., & ULJEE I., 2004. The MOLAND model for urban and regional growth forecast. A tool for the definition of sustainable development paths. Italy: Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission.
- [LIN 12] LINARD C., & TATEM A. J., 2012. Large-scale spatial population databases in infectious disease research. *Int Journal of Health Geogr*, 11(7).
- [MEN 06] MENNIS J., & HULTGREN T. 2006. Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation, 33(3), 179-194.
- [MEN 13] MENNIS J., 2013. Generating surface models of population using dasymetric mapping. *The Professional Geographer*, n°55, vol. 1, 31-42.
- [MEN 06] MENNIS, J., & HULTGREN, T. 2006. Intelligent Dasymetric Mapping and Its Application to Areal Interpolation, 33(3), 179-194.
- [PAT 13] 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.
- [POE 15] 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.
- [RIK 05] VAN DER MEULEN M. & HURKENS J., 2005. SpatAggr: Consistente aggregatie over meerdere jaren, Eindrapport, Research Instituut voor Kennis Systemen, 14 p.
- [SLE 07] 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.
- [STE 02] STEPHENNE N., 2002. *Un modèle dynamique de simulation pour comprendre le processus de changement d'utilisation du sol dans la région soudano-sahélienne*. Brussel: Koninklijke academie voor overzeese wetenschappen, 146 p.
- [STV 15] STEVENS F.R., GAUGHAN A.E., LINARD C. & TATEM A.J., 2015. Disaggregating census data for population mapping using random forests with remotely-sensed and ancillary data, *PLoS ONE* 10(2): e0107042. doi:10.1371/journal.pone.0107042.
- [VDH 72] VAN DER HAEGEN TH. & 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.

- [VDK 14] 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 WorldView-2 imagery, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- [VES 09] VAN ESCH L., ENGELEN G., GOBIN A. & ULJEE I., 2010. Landgebruikskartaat Vlaanderen en Brussel, Intern rapport 2010/RMA/R/158, Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek.
- [WHI 12] 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 Geographic Information System*, 26, 1251-1280.