

UN REGARD SUR L'ÉVOLUTION DE LA GÉOMATIQUE : ANALYSE DE 4 DÉCENNIES DE RECHERCHE AU SEIN DU DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE DE L'UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Roland BILLEN, Marc BINARD, Yves CORNET, Pierre HALLOT, Jean-Paul KASPRZYK,
David SHEEREN, René WARNANT

Résumé

La géomatique est un domaine en pleine évolution directement impacté par les progrès des technologies de l'information et de la communication. En 40 ans, les changements de pratiques ont été radicaux (des appareils optiques et du support papier aux capteurs numériques sophistiqués et à la dématérialisation de l'information). Cet article pose un regard sur l'évolution de la discipline à travers l'analyse de 4 décennies de recherche au sein de l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège. Cette analyse se base d'une part sur une étude historique des postes permanents dans le domaine de la géomatique au sein du Département de Géographie. Ensuite, les trajectoires de recherche de l'Unité sont présentées à partir de la situation établie en 2003. Une évaluation de ces recherches est enfin effectuée à travers plusieurs critères que sont les publications, les projets, l'impact sur l'enseignement et l'impact sur le monde professionnel. Même si cette analyse présente un biais méthodologique vu qu'elle ne porte que sur une seule Unité d'enseignement et de recherche, des constats généraux peuvent tout de même être dressés. Il ressort que la géomatique évolue à un tel rythme qu'elle déborde très largement des sciences géographiques tout en y étant solidement ancrée. Son enseignement et sa recherche nécessitent des ressources qui sont la plupart du temps difficiles à obtenir, ce qui a pour conséquence de limiter son rôle à un support technologique pour d'autres disciplines. En ce qui concerne spécifiquement l'Unité de Géomatique, cette analyse permet de dresser un état des lieux nécessaire à un moment clé de sa vie.

Mots clés

évaluation de la recherche, bibliométrie, histoire des sciences, géomatique

Abstract

Geomatics is an evolving field directly impacted by advances in information and communication technologies. In 40 years, domain's practices have radically changed (from optical devices and paper layout to sophisticated digital sensors and digitalization of information). This article sketches the evolution of the discipline through the analysis of 4 decades of research within the Geomatics Unit of the University of Liège. This analysis is based on one hand on a historical study of permanent positions in the field of geomatics within the Department of Geography. Then, the research trajectories of the Unit are presented starting from a situation established in 2003. An evaluation of this research is finally carried out through several criteria which are publications, projects, impacts on teaching and impacts on the industry. Although this analysis has a methodological bias since it only concerns a single teaching and research unit, general observations can still be made. It turns out that geomatics is evolving at such a rate that it extends well beyond the geographical sciences while firmly rooted in them. Geomatics' teaching and research require resources that are most of the time difficult to obtain. Therefore, Geomatics is often reduced to technological support for other disciplines. This contribution serves also as an inventory for the Geomatics Unit at a key moment in its life.

Keywords

research evaluation, bibliometry, history of sciences, geomatics

INTRODUCTION

La géomatique en tant que discipline regroupant les connaissances et technologies qui permettent de produire, traiter, stocker, et visualiser de façon numérique les données à caractère spatial est enseignée au sein du Département de Géographie

de l'Université de Liège depuis pas moins de 4 décennies. Suivant cette définition, la géomatique regroupe en plus des méthodes d'acquisition de données (télédétection, photogrammétrie, topométrie, lasergrammétrie, positionnement par satellite, etc.), la géodésie, la cartographie, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) et l'analyse

spatiale. C'est bien cette vision de la discipline qui a été adoptée au Département de Géographie et qui est à considérer dans la suite de l'article.

La géomatique est un domaine qui a émergé grâce à l'informatisation naissante que notre société a connue dans les années 1970 et 1980 et qui continue à évoluer profondément suite aux nouvelles avancées technologiques et l'entrée dans une nouvelle ère digitale.

L'objectif de cet article est de poser un regard sur cette évolution au travers de l'analyse de 40 ans de recherche au sein du Département de Géographie. Cette analyse « historique » de la discipline est évidemment biaisée car elle est influencée par les choix des enseignants-chercheurs qui se sont succédés et par les contraintes inhérentes à l'organisation de l'enseignement supérieur et de la recherche au sein de l'Université de Liège et plus largement en Fédération Wallonie-Bruxelles.

L'article est organisé en 5 parties. Suite à l'introduction, un historique de la présence de la géomatique au sein du Département de Géographie et des charges des cours associées est brièvement exposé. Ensuite, l'évolution des domaines d'expertise de l'Unité de Géomatique est présentée en 6 catégories (section I). Toute catégorisation relève d'un choix subjectif qui sépare des activités pouvant être intimement liées, mais ne pas se risquer à cet exercice en viendrait à se limiter à la présentation d'une suite d'activités, une succession de biographies, qui, bien qu'intéressantes, ne permettraient pas une mise en perspective critique des travaux réalisés. Analyser la recherche impose de se poser la question de son évaluation. Celle-ci change également au long des années et rend compte, tout autant que la recherche elle-même de l'évolution de son contexte, de la discipline et de sa place au sein de l'Université. La section II discute de cette évaluation à travers plusieurs critères que sont les publications, les projets, l'impact sur l'enseignement et l'impact sur le monde professionnel. Enfin, des conclusions et des perspectives clôturent l'article.

I. ÉVOLUTION DE LA GÉOMATIQUE AU SEIN DU DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE

L'évolution de la discipline de 1970 à 2003 est retracée de manière exhaustive dans l'article « De la cartographie à la géomatique » rédigé par Jean-Paul

Donnay dans le numéro spécial du BSGLG sur le centenaire de la géographie à l'Université de Liège (Donnay, 2003). En synthèse, les éléments suivants peuvent être relevés. L'informatisation grandissante caractérisant la fin des années 1970 et les années 1980 a permis la réunification de la cartographie jusque-là divisée en ses aspects thématiques et géométriques. On a assisté également dans la même période à l'émergence de la télédétection numérique et, comme le soulignait Jean-Paul Donnay : « Que ce soit sous l'aspect conceptuel, technique ou graphique, cartographie et télédétection numériques ne pouvaient que converger » (Donnay, 2003). Cette révolution numérique modifia en profondeur la façon d'aborder l'information géographique qui deviendra le commun dénominateur de plusieurs domaines et techniques et amena à l'émergence progressive d'une discipline intégrative, la géomatique.

L'évolution des structures et des chaires du Département de Géographie ont suivi une logique similaire. Avant 1986, la cartographie, la géographie quantitative, la photo-interprétation et la télédétection sont bien présentes dans le Département, mais dispersées entre différents professeurs, dont certains d'entre eux, les Professeurs Beguin et Wilmet, ayant leurs activités principales à l'Université Catholique de Louvain. C'est en 1986, avec la titularisation de Jean-Paul Donnay comme premier assistant et la création du laboratoire SURFACES (Service Universitaire de Recherches Fondamentales et Appliquées en Cartographie en Études Spatiales) que la géomatique a réellement débuté en tant que domaine de référence au sein du Département de Géographie. À cette époque, le laboratoire comprenait notamment Marc Binard arrivé en 1988 et qui deviendra par la suite logisticien de recherche lors de la création de la plateforme GITAN (*Geographic Information Technological Aid Network*) et Dimos Pantazis arrivé en 1992, qui deviendra premier assistant en 1998. En 1992, la filière de géométrologie est créée au sein des candidatures et des licences en sciences géographiques. Elle a été mise en place pour offrir une formation de niveau universitaire amenant à la profession de géomètre-expert. Pour assurer les enseignements de cette filière, notamment en topographie, géodésie et positionnement par satellite, Robert Arnould, jusque-là chef de travaux en Faculté des Sciences Appliquées, intègre le Département de Géographie. Afin d'assurer une formation en photogrammétrie, le département fera appel à temps partiel aux

services d'Albert Collignon, premier ingénieur en Chef-Directeur des Ponts & Chaussées. En 1997, l'Unité de Géomatique voit le jour et regroupe les responsables des enseignements de topographie (Robert Arnould), télédétection (Jules Wilmet), photogrammétrie (Albert Collignon), cartographie et SIG (Jean-Paul Donnay et Dimos Pantazis). Lors de l'année académique 2000-2001, suite au départ à la retraite du professeur Wilmet et au départ de Dimos Pantazis, Yves Cornet, collaborateur scientifique du FNRS au Laboratoire de Géomorphologie et Géologie du Quaternaire, intègre l'Unité comme premier assistant puis comme chargé de cours et reprendra progressivement les activités du domaine de la télédétection et d'une partie de l'analyse spatiale. Cette même année, René Warnant, alors chef de travaux à l'Observatoire Royal de Belgique (ORB), est chargé de la suppléance du cours de géodésie qu'il oriente résolument vers les techniques de la géodésie spatiale.

En 2004, la réforme de Bologne qui réorganise les études universitaires au niveau européen rentre en application. La licence en sciences géographiques option géométrie devient le master en sciences géographiques orientation géomatique et géométrie. Ce nouvel intitulé rend mieux compte de la nature des études. En effet, au fil des années, les cours de géomatique ont pris une part plus importante dans le cursus au détriment de cours transversaux. C'est cette année également que René Warnant assure la suppléance des cours de positionnement par satellites et de théorie des erreurs.

En 2005, suite à la mise à la retraite de Robert Arnould, les cours de topographie, de géodésie et de positionnement par satellites sont répartis en deux charges : la chaire de topographie et géométrie attribuée à Roland Billen et celle de géodésie et positionnement par satellites à René Warnant. Roland Billen quitta son poste permanent de Lecturer au département de géographie et géomatique de l'université de Glasgow qu'il avait obtenu après son mandat d'Aspirant FNRS. Ces deux nominations vont avoir un impact important sur l'enseignement et la recherche.

À cette époque, René Warnant est désigné pour un temps partiel englobant les suppléances qu'il assurait auparavant. En plus de ces enseignements, il développe, en collaboration avec l'ORB et, ensuite, avec l'Institut Royal Météorologique (IRM),

un programme de recherche principalement dédié à l'étude et à la correction de l'influence de l'ionosphère sur le positionnement par satellites. René Warnant a apporté une expertise internationale reconnue en recherche en Système de Navigation Globale par Satellite (*Global Navigation Satellite System – GNSS*) qui faisait jusque-là défaut à l'Unité.

Les enseignements de la topographie évoluent notamment vers une plus grande proximité avec les besoins du monde professionnel (pratiques professionnelles, application de la théorie des erreurs aux opérations topographiques, renforcement des contenus des stages et travaux de terrain). Roland Billen a étendu le spectre des recherches en SIG de l'Unité en développant des modèles originaux de raisonnement spatial et des domaines d'application en SIG 3D urbain et archéologique.

En 2010, suite à la mise à la pension d'Albert Collignon, Yves Cornet reprend dans son giron l'enseignement de la photogrammétrie. Il développera la photogrammétrie satellitaire et plus récemment les relevés par drones.

Avec le départ de Jean-Paul Donnay et Yves Cornet au 1 octobre 2019, l'Unité de Géomatique se trouve face à un grand défi. Le programme de cours de master va évoluer de manière significative pour l'année académique 2019-2020. La création de deux finalités, l'une en géomètre-expert et l'autre en *geodata* expert, a pour ambition de mieux correspondre aux profils professionnels suivis par les diplômés. Le terme géométrie disparaît de l'intitulé de l'orientation, affirmant ainsi le rôle prépondérant de la géomatique dans la formation de master.

II. DOMAINES D'EXPERTISE DE L'UNITÉ DE GÉOMATIQUE

Les champs d'étude du laboratoire SURFACES et ensuite de l'Unité de Géomatique ont été décrits dans un article publié dans l'ouvrage sur le centenaire de la géographie à l'Université de Liège (Binard *et al.*, 2003). On y retrouve explicitement la cartographie, les SIG, mais aussi réparties sur plusieurs items, la télédétection et l'analyse spatiale. Pour ces domaines, nous allons repartir des constats de l'époque et analyser leurs évolutions au sein de l'Unité de Géomatique. Les autres domaines

d'expertise plus récemment couverts, à savoir la Science de l'Information Géographique (SciG), les Global Navigation Satellite Systems (GNSS) et les modes d'acquisition 3D rapprochés sont présentés par la suite.

A. Cartographie

Dans le domaine de la cartographie, le laboratoire SURFACES avait en 2003 des compétences en (Binard *et al.*, 2003) :

- a. Cartographie satellitaire : corrections géométriques ; mosaïques ; intégration de bases de données vectorielles ; habillage ; quadrichromie ; impression d'épreuves.
- b. Mise à jour de cartes à partir de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale.
- c. Généralisation automatique : développement de logiciels originaux pour la généralisation automatique de bases de données cartographiques à grande échelle (de 1 : 1 000 à 1 : 10 000).

Les compétences (a) et (b) ont eu une très grande importance dans le développement du laboratoire SURFACES de sa création jusqu'aux années 2000. La spatio-cartographie (Donnay, 2000) était sans doute une des plus grandes expertises du laboratoire et de nombreux contrats avec les Services Fédéraux pour la politique Scientifique Technique et Culturelle - actuel Belspo (SSTC) ont alimenté le groupe de recherche pendant des années. La multiplication des satellites et des capteurs, le développement des capacités logicielles, la démocratisation de la technologie (Google Earth), ont diminué l'importance de ces activités. Le savoir-faire acquis a alimenté la partie télédétection (cf. section II.C.). L'ensemble des activités n'a cependant pas été totalement arrêté. L'Unité de Géomatique maintient des compétences opérationnelles pour les services qu'elle rend à travers la plateforme GITAN. Un travail de longue haleine sur l'Atlas National de la Belgique est toujours assuré par l'Unité de Géomatique et dans le domaine de la vulgarisation, il faut mentionner les activités du Mapathon qui rencontrent chaque année un véritable succès.

La généralisation de bases de données spatiales, compétence (c), a également été un domaine d'expertise important dès le milieu des années 1990. Il résulte de plusieurs travaux d'expertise et de réalisation de mémoires en collaboration notamment avec l'Institut Géographique National (IGN),

l'administration du cadastre et les Services Publics de Wallonie (SPW). À l'époque, ces institutions entraient pleinement dans des processus de production de données spatiales numériques en s'appuyant sur des systèmes de gestion de bases de données à caractère spatial. À cette époque, l'Unité de Géomatique s'est révélée être un acteur incontournable pour ces organisations dans la modélisation conceptuelle des jeux de données de référence, dans la structuration de leurs bases de données multi-échelles ainsi que dans la définition des processus de migration de données.

Au fil du temps, le savoir-faire lié à la généralisation s'est fondu dans ces activités liées aux SIG (cf. II.B.).

En 2003, une expertise n'était pas mentionnée, la sémiologie graphique, ou plus largement, les règles de rédaction cartographique. Même si la production cartographique a fortement évolué, l'emploi de règles de représentation cartographique reste un problème d'actualité. Ceci est une conséquence de la démocratisation de l'accès aux données et aux outils cartographiques qui permettent à presque tout un chacun de réaliser des « cartes ». Jean-Paul Donnay qui a enseigné ces règles de cartographie a récemment rédigé un manuel de référence (Donnay, 2013a). Dans la lignée de ces travaux de formalisation des règles cartographiques, il faut mentionner le travail de thèse de Romain Neuville sur la sémiologie graphique 3D sous la direction de Roland Billen. La multiplication des données 3D et leur utilisation grandissante par des utilisateurs nombreux et divers devraient s'accompagner de règles claires de représentation. Un nouveau champ de recherche s'ouvre dans ce domaine et plusieurs travaux novateurs peuvent être signalés notamment sur la gestion des points de vue et d'autres variables visuelles (Poux *et al.*, 2018 ; Neuville *et al.*, 2019 ; Neuville *et al.*, 2018). Dans ce nouveau domaine, l'Unité de Géomatique peut jouer un rôle grâce à son expérience historique en la matière et sa spécialisation dans le 3D (cf. II.F.). Dans le même ordre d'idée, l'Unité s'est récemment dotée d'un laboratoire de réalité virtuelle et de réalité augmentée en partenariat avec d'autres départements de l'ULiège. Celui-ci est alimenté par le projet institutionnel *Teaching With VR – TWVR* ainsi que par le projet Interreg Terra Mosana qui promeut l'exploitation digitale du patrimoine en 3D sous la direction conjointe de Roland Billen et Pierre Hallot. La maîtrise de ces

nouveaux modes de visualisation de l'information géographique est un des nouveaux challenges que l'Unité se doit de relever.

B. Systèmes d'Information Géographique

En combinant certains items de l'article précité (Binard *et al.*, 2003), on peut retenir comme compétences en SIG du laboratoire SURFACES en 2003 :

- a. Conception : développement d'outils de conception et de reengineering de bases de données géographiques. Établissement de standards de qualité.
- b. SIG urbain : conception et implémentation de bases de données urbaines géocodées, notamment par adresse postale ; applicatifs dédiés à grande échelle (ex. : schémas directeurs) et moyenne échelle (ex. : tourisme).
- c. SIG répartis : développement des outils nécessaires à l'exploitation de SIG répartis en réseau (métadonnées, composants logiciels objets, transferts de schémas selon les spécifications de l'Open GIS Consortium - OGC).
- d. Analyse spatiale : développement de logiciels et d'applications utilisant conjointement les propriétés vectorielles et maillées des informations géocodées ; algèbre de carte ; géostatistique, densimétrie.
- e. Modélisation : transformation des informations discrètes en surfaces statistiques (modèles continus de type gravitaire, de potentiel, *etc.*); analyse combinatoire, corrélation des surfaces.

Il est manifeste que les travaux concernant la conception de SIG, compétence (a), entamés au début des années 90 représentent une des plus importantes contributions belges en géomatique émanant de l'Université de Liège. Dans la continuité des premiers travaux sur la cartographie numérique (Donnay, 1983, commenté dans Donnay, 2013b), Dimos Pantazis a développé une méthode originale de conception de SIG, MECOSIG (Méthode de CONception de SIG) à laquelle était adjoint le formalisme CONGOO. L'ouvrage « Méthode de conception de SIG » (Pantazis et Donnay, 1996) a été une référence importante dans le monde francophone des SIG. Au laboratoire SURFACES, elle a permis de concevoir et d'implémenter plusieurs projets. Par la suite, des travaux de doctorat ont été menés dans la même lignée, par Fatiha Ibannain pour une application cadastrale sous la direction de Jean-Paul Donnay (Ibannain, 2009) et par Rafika

Hajji pour une méthode de conception SIG 3D sous la direction de Roland Billen (Hajji, 2013 ; Hajji *et al.*, 2016). L'Unité de Géomatique continue à être sollicitée pour des travaux relatifs à la modélisation conceptuelle ou à la conception de SIG. De plus, cette thématique de recherche a été à la base du développement de la Science de l'Information Géographique au sein de l'Unité (cf. II.E).

L'Unité de Géomatique a continué à être sollicitée de façon récurrente par les organismes publics producteurs de données spatiales en vue d'élaborer une modélisation conceptuelle des jeux de données qu'ils fournissent et pour l'aide à la mise en place de SIG urbains, compétence (b). Bien que des modèles de données existent souvent lors de la création initiale des bases de données, la structuration des données évolue régulièrement dans le temps au gré des nouveaux processus de mise à jour, de la volonté de gérer une temporalité des données, de modifications requises par l'évolution des besoins et attentes des utilisateurs des données. Il en résulte une rapide inadéquation d'un modèle de données initial avec une base de données spatiales de plus en plus difficile à gérer et mettre à jour. Au travers de projets de reengineering, l'Unité de Géomatique a acquis une expertise dans la compréhension de l'état d'un jeu de données, de ses processus de production et de mise à jour en vue de proposer des modèles conceptuels indispensables à la décision stratégique de l'évolution de ces données et à leur gestion efficace. Citons les nombreux appuis scientifiques fournis au Centre Informatique de la Région Bruxelloise (CIRB) et au SPW au travers de projets dirigés par Jean-Paul Donnay ou Yves Cornet (INFRASIG, UrbIS, ORTHO-MNS...) et ensuite par Roland Billen et Pierre Hallot (UrbIS 3D, Reengineering du PICC, Qualigeo...). Le dernier projet en date porte sur le contrôle de la qualité et de l'authenticité des données du futur géoréférentiel wallon (Qualigéo). À l'heure où les données spatiales sont de plus en plus distribuées, utilisées dans des champs d'applications variés, la certification de la qualité spatiale, temporelle et sémantique des données produites devient un enjeu majeur de la géomatique.

Les travaux relatifs aux SIG 3D urbains sont d'une certaine manière les héritiers de cette compétence (b). L'importance de la 3D au sein de l'Unité de Géomatique à partir des années 2000 a été grandissante et se retrouve de manière transversale

dans plusieurs sections (II.A, II.E et II.F). Le projet européen COST TU0801 « *Semantic Enrichment of 3D urban models* » (2008-2012), pilotée par Roland Billen (Leduc *et al.*, 2012 ; Billen *et al.*, 2014) a rassemblé les plus grands laboratoires européens actifs dans le domaine de la 3D urbaine.

Les SIG répartis, compétence (c), et plus largement le développement de structures de données et de solutions opérationnelles, ont continué à évoluer au sein de l'Unité de Géomatique. Le travail de doctorat de François Laplanche sous la direction de Jean-Paul Donnay portait notamment sur le développement d'un environnement de conception de bases de données spatiales sur internet (Laplanche, 2006). A une époque où les outils SIG *open source* peinaient encore à concurrencer des architectures propriétaires complexes, l'objectif de la thèse fut de rassembler différents acteurs (chefs de projet, producteur de données, informaticiens, concepteurs et utilisateurs) et outils de conception de bases de données spatiales au sein d'une plate-forme web conviviale et ouverte baptisée «e-Space ». Cette plate-forme, construite à partir d'outils *open source* (PostGIS, MapServer, *etc.*), servit notamment de support à l'enseignement pratique des SIG à l'Unité de Géomatique pendant plusieurs années.

L'analyse spatiale, compétences (d) et (e), est une fonction importante des SIG aussi bien au niveau transactionnel que décisionnel. Ce dernier aspect constitue la base des travaux réalisés par Jean-Paul Kasprzyk dans le cadre de sa thèse de doctorat dirigée par Jean-Paul Donnay (Kasprzyk, 2015). Le but de cette recherche, inscrite dans le domaine plus large de l'informatique décisionnelle (*Business Intelligence*), fut d'enrichir les entrepôts de données spatiaux et outils SOLAP (*Spatial OnLine Analytical Processing*) avec des fonctionnalités propres au modèle de données raster, en opposition au modèle vectoriel sur lequel la technologie SOLAP fut initialement basée. Le modèle multidimensionnel SOLAP raster ainsi développé n'intègre plus l'espace comme des dimensions géographiques discrètes mais comme les axes *X* et *Y* d'un espace planimétrique continu, les calculs d'agrégation de l'entrepôt raster exploitant l'algèbre de carte. Cette approche ouvre la porte à l'analyse de phénomènes spatialement continus (analyse de polluants, climatologie, *etc.*) mais aussi l'analyse de phénomènes discrets dans un espace continu sur base de cartes de chaleur (*Kernel Density Estimation*), donnant lieu

à plusieurs travaux notamment sur le thème de la sécurité urbaine (Kasprzyk, 2016). Dans la même thématique, on peut citer le travail de doctorat de Marie Trotta sur le profilage géographique sous la direction de Jean-Paul Donnay (Trotta, 2014). Son travail portait sur l'enrichissement du profilage géographique par une meilleure prise en compte de l'anisotropie spatiale, notamment en intégrant le réseau routier dans le *journey-to-crime* (Trotta *et al.*, 2015). Dans ce domaine, l'Unité de Géomatique apporta son expertise dans plusieurs cas concrets directement soumis par la police.

Au-delà des compétences identifiées en 2003 et qui ont ultérieurement été amplifiées au sein de l'Unité de Géomatique, d'autres travaux et pistes de recherche ont vu le jour concernant les modes de structuration de l'information. Par exemple, Pierre Hallot et Roland Billen ont développé les concepts théoriques et méthodologiques permettant une gestion de la temporalité dans une plateforme logicielle de SIG. Ce modèle se base sur une structure de données qui, au travers de la gestion événementielle, permet l'ajout de la temporalité à un SIG de gestion urbaine (Projet Cit4D). Ces développements font directement suite aux recherches relatives à la gestion et au suivi de l'identité d'objets géographiques. Il s'agit d'une utilisation des travaux de recherche doctorale menés par Pierre Hallot jusqu'en 2012 (cf. section II.E). Les fonctionnalités développées (pour la société ISpatial) ont abouti à un prototype fonctionnel intégré dans l'environnement de travail SIG (Elyx).

Vu la popularité grandissante des systèmes de gestion de base de données NoSQL, la recherche au sein de l'Unité s'est tournée vers cette thématique dans le cadre du développement d'une approche originale de traitement de l'information liée aux bâtiments dans le projet Spatiodata (Carré *et al.*, 2013 ; Delfosse *et al.*, 2012). Les fonctionnalités spatiales de ces systèmes n'ayant pas encore atteint le niveau de maturité des SIG relationnels, plusieurs travaux portent sur la complémentarité SIG/NoSQL (bases de données de types document et graphe) (Holemans *et al.*, 2018). Des ontologies, à la base du web sémantique, sont développées et enrichies pour des domaines variés tels que la télédétection (Nys *et al.*, 2018a) ou l'archéologie (Nys *et al.*, 2018b). La thèse de doctorat de Gilles-Antoine Nys, entamée cette année sous la direction de Roland Billen, étudie la possible exploitation de normes OGC portant sur les données

issues de capteurs (*Sensor Observation Service - SOS, SensorThings API*) au sein des bases de données NoSQL.

Les SIG restent donc une des spécificités de l'Unité de Géomatique et un domaine d'expertise reconnu. Depuis 2003, les directions de recherche ont été maintenues et se sont adaptées aux évolutions technologiques et aux nouvelles demandes des utilisateurs.

C. Télédétection

À partir du constat réalisé en 2003 (Binard *et al.*, 2003), on peut retenir comme compétences en Télédétection du laboratoire SURFACES :

- a. Fusion d'images multi-sources : construction de scènes combinées au départ d'images enregistrées par des capteurs différents (dates, géométries, résolutions spatiales et radiométriques distinctes) ; combinaison d'images numériques et de photos scannées ; *etc.*
- b. Développement de méthodes et d'outils interactifs d'interprétation d'images assistée par ordinateur ; techniques hybrides raster/vecteur.
- c. Mosaïque d'images : construction de couvertures spatiales complètes à partir de plusieurs images ; développement de techniques spécifiques de validation radiométrique des mosaïques.
- d. Occupation du sol : statistiques et cartographie des modes d'occupation du sol par télédétection satellitaire et photo-interprétation ; constitution de bases de données selon différents découpages spatiaux ; construction d'indices urbanistiques et modélisation.
- e. Télédétection urbaine : étude des structures et textures urbaines ; analyse de la dynamique urbaine ; environnement résidentiel ; statistiques urbaines.

Un fil conducteur dans le développement de l'utilisation de la télédétection au sein de l'Unité est sa participation depuis 1985 jusqu'en 2015 aux différentes phases (TELSAT I à IV ; STEREO I à III) du *Programme national de télédétection spatiale d'Observation de la Terre* initié par les SSTC devenu BELSPO (Service public de programmation de la Politique scientifique fédérale). Les moyens informatiques en *hard* et *software* mis à disposition des équipes de recherche et financés par ces organismes ont fortement évolué pendant cette

période qui connut l'émergence de nombreux ordinateurs personnels équipés d'une riche collection de softwares dont la part de logiciels *Open Source* est de plus en plus grande en concomitance de l'amélioration des performances et de la réduction des coûts d'achat du matériel informatique. Beaucoup de fonctionnalités précédemment réservées à quelques chercheurs spécifiquement formés sont aujourd'hui disponibles à tout un chacun. Les prix des images-satellite ont aussi fortement diminué. Maintenant, certaines images sont ainsi mises à disposition gratuitement. Leur mode et support de distribution se sont aussi fortement simplifiés (téléchargements depuis des catalogues de données en ligne).

Des recherches sur la fusion d'image multispectrale/panchromatiques, compétence (a), avaient été initiées à la fin des années '90 (de Béthune *et al.*, 1998a et 1998b ; Muller & de Béthune, 2000). Les compétences de l'Unité dans ce domaine ont été reconnues par les équipes du CNES en préparation de la future mission PLIEADES-HR (Cornet *et al.*, 2001, 2003, 2004a ; Laporterie-Déjean *et al.*, 2005). Cette expérience a aussi stimulé notre réflexion sur les façons d'évaluer la qualité des produits obtenus de la fusion d'image (Cornet *et al.*, 2004b), un produit particulièrement utile en matière de planification territoriale (Binard *et al.*, 2006).

Une des premières grandes avancées observée fin des années 80 est le développement de la Photo Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO) d'images obtenues par des capteurs numériques ou par scannage de photos analogiques, compétence (b). Leur co-registation géométrique a permis de restituer par interprétation visuelle et de superposer des éléments géographiques tels que les limites de parcelles dans le but de contrôler les demandes de subventions agricoles ou de vérifier la conformité de l'évolution de l'utilisation du sol vis-à-vis des prescriptions du plan de secteur (Binard & Nadasdi, 1998). Actuellement, cette démarche d'interprétation visuelle est utilisée quotidiennement sur différents géoportails tels que celui du Service Public de Wallonie (<http://geoportail.wallonie.be/walonmap>). Cette opération est cependant moins riche que la PIAO originelle qui permettait l'application de diverses techniques de traitement d'image telles que la modification du contraste et le filtrage spatial, par exemple.

Les compétences (c), (d) et (e) ont émergé sous l'impulsion de Jean-Paul Donnay au travers de nombreux développements, adaptations et implémentations de techniques de traitement d'image à la télédétection en les combinant souvent aux méthodes relevant des SIG en mode raster (Donnay & Binard, 1993). Au début du XXIème siècle, les recherches en télédétection au sein de l'Unité de Géomatique se sont poursuivies dans les domaines de prédilection des années antérieures portant sur le milieu urbain (Donnay *et al.*, 2000) et la production de spatio-cartes d'occupation du sol par classification d'images à moyenne résolution spatiale (Binard & Donnay, 2000) (cf. II.A). Après 2003, on peut noter le projet intitulé MAMUD (*Measuring and modeling urban dynamics: impact on quality of life and hydrology*) en collaboration avec la VUB, l'UGent et le *Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek* (VITO). Il a notamment permis de produire des séries temporelles du taux d'imperméabilisation du sol par démixage spectral (*spectral unmixing*) depuis la fin des années '80 et différentes classifications d'images (Van de Voorde *et al.*, 2009 et 2010). La tri-stéréoscopie à très haute résolution spatiale a aussi été testée pour améliorer les classifications du milieu urbain (Binard *et al.*, 2010). Les produits obtenus ont permis d'améliorer l'input spatial des modèles hydrologiques en milieu urbain (Verbeiren *et al.*, 2013) et du modèle prédictif MOLAND de l'évolution des villes (Van de Voorde *et al.*, 2012 et 2016). Ils ont aussi permis une cartographie densimétrique dynamique (Cornet *et al.*, 2012). Enfin, la remise à jour de la carte urbaine a fait l'objet d'une recherche de doctorat de Loubna Elmansouri (Elmansouri, 2014), sous la direction d'Yves Cornet, portant sur la segmentation d'image et les classifications basées-objet exploitant des algorithmes relevant de l'Intelligence Artificielle (machines à supports vectoriels, réseaux de neurones et ensembles d'arbres de décision - *Bagging*, *Random Forest*, *Boosting*).

Le développement d'un logiciel de photogrammétrie aérienne à des fins didactiques (*Didactical Digital Photogrammetric Software* - DDPS) par plusieurs chercheurs du laboratoire SURFACES a été le déclencheur d'un enseignement pratique de la photogrammétrie aérienne et d'une série d'initiatives de recherche pour appliquer les principes d'orientations aérienne à des images terrestres (Da Col *et al.*, 2002). Sur cette base, des recherches en photogrammétrie terrestre ont été initiées (cf. II.F.)

mais aussi en photogrammétrie aérienne et satellitaire. Dès 2004, l'équipe d'Yves Cornet a participé à une initiative conjointe du CNES et de l'ISPRS (Baudoin *et al.*, 2004) portant sur l'extraction de MNS à partir d'images-satellite enregistrées par le capteur *pushbroom* HRS (Haute Résolution Stéréo), à bord de SPOT 5 et dont le modèle géométrique d'acquisition est très différent de celui des prises de vues en perspective centrale. En utilisant un programme spécifiquement développé pour traiter ces images, l'équipe a extrait et validé un MNS de la région liégeoise (Cornet *et al.*, 2005). Par la suite, des travaux ont porté sur la cartographie de la surface lunaire et le développement d'un logiciel d'estimation des risques d'alunissage et d'évaluation des conditions de survie, notamment énergétiques, d'une mission lunaire habitée (LandSAFE) en collaboration avec SPACEBEL et l'*Institute of Photogrammetry and GeoInformation* de l'Université de Hanovre (Schmidt *et al.*, 2012). Par ailleurs, la réduction progressive des moyens financiers et la difficulté de fixer des chercheurs à long terme a progressivement vu une amplification des recherches de qualité menées par des mémorants de master. Citons deux mémoires traitant de la détection des cratères (Renson *et al.*, 2013 ; Glaude, 2017) ainsi que le mémoire de Laura Laforge (2018) qui a mis à profit la complémentarité des séries d'images MODIS Aqua et Terra pour reconstituer l'évolution de la couverture neigeuse de l'Islande.

L'équipe de télédétection a également investigué le domaine de la modélisation prédictive des cycles phénologiques, notamment dans le cadre de la thèse de doctorat de Stéphane Horion sous la direction d'Yves Cornet (Horion *et al.*, 2010a et 2010b ; Horion 2012). Dans la même lignée, citons la production et l'exploitation éco-hydrodynamique et épidémiologique de séries temporelles validées de produits de télédétection sur le couleur et la température des eaux de surface de grands lacs africains (Tanganyika et Kivu) dans le cadre de plusieurs projets multidisciplinaires (CLIMLAKE, CLIMFISH, EAGLES et CHOL-TIC) financés par BELSPO (Bergamino *et al.*, 2010 ; Horion *et al.*, 2010c ; Plisnier *et al.*, 2011 ; Sorjamaa *et al.*, 2010).

D. Les GNSS

L'acronyme GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) désigne de manière générique l'ensemble

des systèmes globaux de positionnement par satellites comme GPS (USA), GLONASS (Russie), Galileo (Europe) et Beidou (Chine). De nos jours, les GNSS ont acquis une importance considérable tant pour les sciences de la Terre que dans de nombreux secteurs de la vie économique et de la « vie pratique ».

Au début des années 2000, le GPS reste le seul GNSS opérationnel et, grâce aux nombreux progrès réalisés tant au niveau de l'acquisition que du traitement des données, il permet, par exemple, au géodésien de mesurer des positions à quelques millimètres près en post-traitement et au géomètre d'effectuer des levés en temps réel à quelques centimètres près. Cependant, les effets de l'ionosphère sur les signaux émis par les GNSS sont, à cette époque, la principale limitation à la fiabilité de ces applications de haute précision. Cet effet, appelé « erreur ionosphérique » dépend de la fréquence du signal incident et du *Total Electron Content* (TEC). Ce dernier dépend de la densité d'électrons libres présents dans l'ionosphère et est extrêmement variable dans l'espace et dans le temps. Cette variabilité, souvent liée aux « soubresauts » de la météorologie spatiale, peut provoquer de fortes et subites dégradations de la précision des applications des GNSS et, ceci, à l'insu de leurs utilisateurs.

Sur base de ce constat, le service de Géodésie et GNSS a développé, dès l'année 2002, un programme de recherche ayant pour objectif l'étude et la correction de l'influence de l'ionosphère sur les applications précises des GNSS. Ce programme, mené dans un premier temps en collaboration avec l'ORB (2002-2006) et ensuite avec l'IRM (2007-2011), est organisé autour de deux axes :

1. L'étude de l'activité ionosphérique à l'aide de mesures GNSS : les mesures effectuées sur les signaux émis par les GNSS permettent de reconstruire de l'information sur l'activité ionosphérique, en particulier sur le *Total Electron Content* (Warnant & Pottiaux., 2000).
2. La correction de l'erreur ionosphérique : les informations reconstruites au sujet de l'activité ionosphérique sont exploitées afin de corriger l'influence de l'ionosphère.

Ces activités connaîtront un nouvel essor à la fin des années 2000 suite à la modernisation des systèmes GPS et GLONASS et au développement

progressif de nouveaux GNSS comme Galileo et Beidou. Ces nouveaux GNSS émettent des signaux plus robustes et ces derniers sont répartis sur plusieurs bandes de fréquences (jusqu'à 5 fréquences porteuses pour Galileo). Ces nouvelles fonctionnalités ont été exploitées dans le cadre de cinq thèses de doctorat consacrées à cette problématique :

- Sandrine Lejeune (2009) étudie et quantifie l'influence de l'ionosphère sur le positionnement relatif en temps réel, encore appelé Real Time Kinematics ou RTK (Lejeune *et al.*, 2012).
- Justine Spits (2012) développe une technique originale permettant de reconstruire le Total Electron Content à l'aide des mesures effectuées sur le système Galileo (Spits *et al.*, 2011).
- Benoît Bidaine (2012) évalue les performances de l'algorithme de correction de l'erreur ionosphérique utilisé par Galileo. Cet algorithme est basé sur le modèle ionosphérique NeQuick (Bidaine *et al.*, 2013)
- Gilles Wautelet (2013) analyse l'influence des irrégularités locales dans l'ionosphère sur le positionnement relatif. Il effectue une étude climatologique de ces irrégularités (Wautelet & Warnant, 2012).
- Matthieu Lonchay (2019) étudie l'influence des scintillations ionosphériques équatoriales sur le positionnement absolu (Single Point Positioning et Precise Point Positioning). Par ailleurs, il développe une méthode originale permettant d'atténuer l'impact des scintillations ionosphériques sur la précision de ces 2 techniques de positionnement (Lonchay & Warnant, 2019).

En plus de ces travaux liés aux effets de l'ionosphère, le service Géodésie et GNSS contribue, depuis quelques années, à l'amélioration de la précision et de la fiabilité du positionnement relatif en temps réel en développant de nouvelles techniques de calcul qui exploitent l'ensemble des nouveaux signaux émis par les nouveaux GNSS ainsi que par le GPS et le GLONASS modernisés. Ces travaux se basent tant sur les données de récepteurs de qualité géodésique que de terminaux « low-cost » comme les smartphones.

E. La Science de l'Information Géographique

Sans entrer dans un débat épistémologique, on peut considérer que la Science de l'Information Géographique (SciIG) est apparue suite à un besoin

de théorisation, une volonté de sortir les SIG d'un canevas exclusivement technique (Fisher, 1997). Cette vision peut paraître réductrice, la Science de l'Information géographique, ou les Sciences de l'information Géographique, étant parfois définie comme englobant l'analyse spatiale, la télédétection, les GNSS, *etc.* et dès lors être synonyme de la géomatique telle que nous l'avons définie plus haut. Dans cet article, nous limiterons la Science de l'Information Géographique à ses aspects plus théoriques, relevant notamment du raisonnement spatial qualitatif et du raisonnement spatio-temporel qualitatif mais aussi des ontologies.

Les premiers travaux relevant du raisonnement spatial qualitatif sont ceux de Dimos Pantazis au travers du développement du formalisme CONGOO (cf. section II.B). Les relations topologiques décrites dans ce formalisme permettaient de décrire un ensemble large de configurations spatiales entre objets géographiques bien qu'elles ne reposaient pas sur une définition mathématique formelle telle que celle des modèles des 9-i et associés (Egenhofer *et al.*, 1991) ou bien le modèle CBM (Clementini *et al.*, 1993) adoptés par l'OGC.

Ces travaux ont été la source d'inspiration des recherches de Roland Billen dans sa thèse de doctorat, sous la direction de Jean-Paul Donnay, et le développement du modèle dimensionnel basé sur la géométrie projective et permettant une spécialisation des relations binaires (objet à objet) topologiques (Billen, 2002). Ce modèle défini sur des bases mathématiques strictes a eu le mérite de lancer l'investigation d'autres espaces géométriques que l'espace topologique dans la description formelle des configurations spatiales (Billen *et al.*, 2002, Billen et Zlatanova, 2003).

Une collaboration très fructueuse est apparue suite à ces premiers travaux. Avec Eliseo Clementini, plusieurs modèles ont été développés sur base de la géométrie projective. Les relations projectives ternaires ont la particularité de traiter les relations entre trois objets géographiques et sont la première description formelle en ScIG de relations de type colinéaires tel que « être à gauche », « à droite », « entre », *etc.* Ce modèle a fait l'objet de nombreuses publications, citons par exemple (Billen et Clementini, 2004 ; Clementini et Billen, 2006 ; Clementini et Billen, 2010) et continue à être exploité. Dans la même lignée, mentionnons les recherches

en raisonnement spatio-temporel résultant de la thèse de doctorat de Pierre Hallot (Hallot, 2012), sous la direction de Roland Billen. Ce modèle, toujours en évolution, définit formellement des états de présence dans un espace géographique et s'inscrit dans la lignée de travaux sur l'évolution de l'identité des objets géographiques. Le modèle vise à étendre les relations spatiales entre deux objets géographiques. Ce type de relations est habituellement défini entre deux objets co-occurents, ils partagent un espace et une temporalité commune. Cependant, la description de relations entre objets dans une perspectives de raisonnement spatiotemporel implique la gestion de relations entre objets ne partageant pas la même temporalité, comme dans le cas d'une relation anachronique entre objets (Hallot *et al.*, 2015). Le modèle des états spatio-temporels d'existence et de présence (STS-i) est à la base d'une extension appelée configurations de vie et de mouvements - *Life and Motion Configurations* (LMC) (Hallot et Billen, 2016). Ces configurations décrivent l'évolution de relations spatio-temporelles entre objets géographiques. Depuis deux ans, ce modèle se voit utilisé dans un nouveau champ d'application en lien avec le patrimoine culturel. En effet, cette thématique aborde de nombreux cas d'applications où des éléments sont détruits, dont la spatialité est toujours connue, et dont l'identité persiste sans connaissance de la forme d'un élément. L'utilisation des modèles STS-i et LMC apportent une réelle plus-value dans la gestion de ce type de données (Hallot, 2017). Les fondements théoriques de l'approche sont également à la base d'un modèle conceptuel de données permettant la gestion événementielle multi-temporelle d'information archéologique (Hallot et Billen, 2018).

Une autre direction de recherche héritée des travaux sur les modèles conceptuels concerne l'utilisation des ontologies. Après quelques travaux théoriques sur la question (Billen *et al.* 2008 ; Billen *et al.*, 2012 ; Metral *et al.*, 2010), les principales avancées relèvent des réflexions autour de la modélisation de l'information archéologique, qui est vue comme une information très proche de l'information géographique avec la particularité de devoir gérer des situations d'incomplétude, d'indécision tant d'un point de vue spatial, que temporel ou thématique. Citons, à ce sujet, les recherches de plusieurs chercheurs doctorants (Van Ruymbeke *et al.*, 2015 ; Van Ruymbeke *et al.*, 2018 ; Nys *et al.*, 2018b).

F. Les modes d'acquisition 3D rapprochés

Les applications de photogrammétrie terrestre ont connu plusieurs évolutions au sein de l'Unité de Géomatique, suite notamment à la dynamique générée par le logiciel didactique DDPS (cf. II.C). Ces évolutions sont concurrentes de la démocratisation (financière et technique) de la photographie numérique ainsi que du développement des algorithmes de détection automatique de points homologues, comme SIFT (Lowe, 2004). La mise au point d'un logiciel d'ajustement photogramétrique terrestre basé sur le principe de la « *Direct Linear Transformation* » ou DLT implémentée et testée par François Laplanche (Laplanche *et al.*, 2008) s'inscrit dans ce courant. Cette méthode d'ajustement a été appliquée à des cas d'urbanisme en vue de la description de bâtiments remarquables (Hôtel de ville de Liège et de Verviers). Le développement logiciel des années 2010 à nos jours a démocratisé le principe du *Dense Image Matching*. Ce processus d'ajustement multi-images a été à la base de nombreux travaux de fins d'études. Mentionnons par exemple le travail de Grégoire Liénart (2015) qui a appliqué la DLT à la modélisation de la rupture de barrage de surverse et celui de Manon Decalf (2018) a complété la méthode en exploitant la géométrie épipolaire pour la recherche automatique de point homologues afin de restituer l'évolution 3D de la hauteur du plan d'eau lors d'une rupture de digue fluviale. De nombreuses communications scientifiques de l'Unité de Géomatique ont porté sur la dissémination de ce processus de reconstruction 3D à partir d'images notamment dans des applications archéologiques, du patrimoine culturel ou de l'histoire de l'art.

La combinaison de cette technique d'acquisition avec les outils d'acquisition lasergrammétriques permettent des rendus de nuages de points dont la qualité colorimétrique est très élevée. Cette capacité est primordiale dans des applications relatives au patrimoine immobilier ou archéologique par exemple.

Ces outils technologiques changent fondamentalement la façon dont l'information spatiale est acquise et doit être gérée. Jusqu'à la dernière décennie, l'information spatiale était acquise soit à petite échelle sur un grand territoire et nécessitait des processus d'identifications manuels ou automatisés des objets géographiques, soit l'acquisition se faisait sur des objets à grande échelle

mais pour lesquels l'enrichissement sémantique de l'information collectée se faisait directement au moment de l'acquisition. Depuis l'avènement des techniques de lasergrammétrie et de *Dense Image Matching* l'acquisition d'un grand nombre de données à grande échelle sans enrichissement sémantique préalable devient la norme. Il devient donc indispensable de développer des modèles permettant l'identification automatique d'objets (géographiques ou non) dans ces jeux de données considérables, tout en gardant à l'esprit la complexité algorithmique nécessaire à un temps de traitement raisonnable. Cette approche a été la base de recherches initiées par Florent Poux et développées dans le cadre de sa thèse de doctorat (Poux, 2019) sous la direction de Roland Billen.

Au-delà du besoin de modèles de gestion de grandes quantités de données non structurées, on constate l'apparition de nouvelles primitives géométriques associées à ces modes d'acquisition. Le nuage de points est maintenant à considérer comme une nouvelle primitive géométrique de représentation de phénomènes spatiaux. L'utilisation de cette structuration de l'information géographique peut même être réalisée hors du cadre direct du traitement de données acquises via lasergrammétrie mais comme un format générique dans lequel des jeux de données peuvent être transformés puis stockés au travers de modèles tels le *Smart Point Cloud* (Poux *et al.*, 2018 ; Poux, 2019; Poux et Billen, 2019b)

À côté des applications propres à la géomatique, plusieurs chercheurs issus de l'Unité de Géomatique ont développé des recherches portant sur l'amélioration de la qualité d'acquisition d'information à grande échelle à l'aide de technique de photogrammétrie sur des matériaux réfléchissants (Hallot et Gil, 2018), la combinaison de différents modes d'acquisition pour aider à une classification automatique de matériaux archéologiques (Poux *et al.*, 2017), ou encore de la mise au point de reconstruction photogramétrique 3D sur base d'une imagerie multispectrale et d'une classification matérielle d'objets archéologiques (Mathys et Hallot, 2018) Le dernier projet en date de l'Unité de Géomatique, le développement d'un Système d'Information Archéologique 3D pour le Musée du Coudenberg à Bruxelles fait la synthèse des nouveaux modes d'acquisition 3D, des approches de modélisation ontologique, des structures de données en graphe, des modes de visualisation 3D.

III. ÉVALUATION DE LA RECHERCHE

La section précédente présente l'évolution des domaines d'activités depuis 2003 au sein de l'Unité de Géomatique ainsi que l'émergence de nouveaux domaines. Elle permet, tout comme la section I portant sur l'historique des structures et charges au sein du Département de Géographie, de poser un regard sur l'évolution de la géomatique au fil du temps. Mais l'analyse ne serait pas complète si on ne se penchait pas plus en détails sur les types de recherches entrepris et leurs impacts. En effet, si les choix opérés au sein de l'Unité de Géomatique traduisent vraisemblablement l'évolution globale de la discipline, ils peuvent aussi être le résultat de politique de financement ou de stratégies plus locales.

Afin d'analyser la recherche au sein de l'Unité de Géomatique, quatre critères ont été retenus : les publications, les projets, l'impact sur l'enseignement et l'impact sur le monde professionnel. Cette analyse est d'autant plus utile qu'il n'existe pas de processus institutionnel officiel d'évaluation continue de la recherche au sein de l'Université de Liège.

A. Les publications et thèses de doctorat

L'évaluation de la recherche dans le milieu académique se fait principalement sur base des publications. Dans le domaine des sciences et techniques, elle se fait plus particulièrement sur base des articles dans des revues internationales à comité de lecture dont la notoriété peut être appréciée à travers le facteur d'impact ou bien des statistiques de citation (ex : h-index) avec toutes les réserves et le regard critique qu'il est nécessaire d'avoir sur ces indicateurs bibliométriques. Mais ces critères évoluent au fil du temps et une analyse de plusieurs décennies de recherche doit être contextualisée si l'on souhaite garder une vue la plus objective possible.

La méthodologie suivante a été adoptée afin d'analyser les publications produites par les membres de l'Unité de Géomatique. Les données ont été collectées à partir du dépôt institutionnel ORBi (*Open Repository and Bibliography*) de l'Université de Liège. Les membres de l'ULiège ont l'obligation d'encoder toutes leurs publications sur ce dépôt et ce depuis 2007. Bon nombre de chercheurs ont encodé l'ensemble de leur production (antérieure à cette date) ce qui fait d'ORBi une base d'infor-

mation relativement exhaustive et très facile d'accès. Pour ce travail d'analyse, il a été demandé au gestionnaire d'ORBi l'ensemble des publications recensées sous l'étiquette « Unité de Géomatique ». Cette étiquette est associée aux membres de l'Unité de Géomatique même pour les publications sorties avant la création de l'Unité de Géomatique. Il faut cependant être prudent par rapport à la fiabilité de l'information. En effet, certaines publications peuvent être absentes de la liste pour des membres de l'Unité (ou du Laboratoire SURFACES) n'ayant pas encodé toutes leurs publications. Cela pourrait être le cas de personnes ayant cessé d'y travailler avant 2008 et ayant publié sans s'associer à d'autres membres de l'Unité. Un autre problème concerne les publications qui seraient antérieures à l'incorporation de leurs auteurs à l'Unité de Géomatique et qui dès lors augmenteraient les chiffres de production scientifique de l'Unité. De plus, la justesse des données présentes dans la liste fournie est sous la responsabilité des déposants, même si un contrôle automatique est réalisé par le système pour certains types de publications. Des erreurs d'interprétation de catégorisation peuvent se produire (par exemple le caractère national ou international d'une revue). Il nous est apparu opportun de limiter les analyses à la période du 1 janvier 1989 au 31 décembre 2018. D'une part, cela permet de limiter les problèmes de fiabilité évoqués qui, logiquement, affectent principalement les données plus anciennes. Ainsi la liste nous paraît atteindre un degré de fiabilité amplement suffisant pour permettre une analyse des tendances de publications de l'Unité de Géomatique. D'autre part, c'est durant cette période que les postes permanents en géomatique ont augmenté et se sont diversifiés (cf. I).

Sur 30 ans, le nombre de publications se répartit comme suit :

- 28 articles dans des revues nationales,
- 105 articles dans des revues internationales (avec comité de lecture),
- 64 livres et chapitres de livres,
- 192 publications à des conférences et des colloques,
- soit un total de 389 publications.

La Figure 1 reprend les chiffres des quatre catégories et du total de publication regroupés par périodes de cinq années.

La présentation des résultats regroupés par périodes de cinq années permet de mettre en évidence

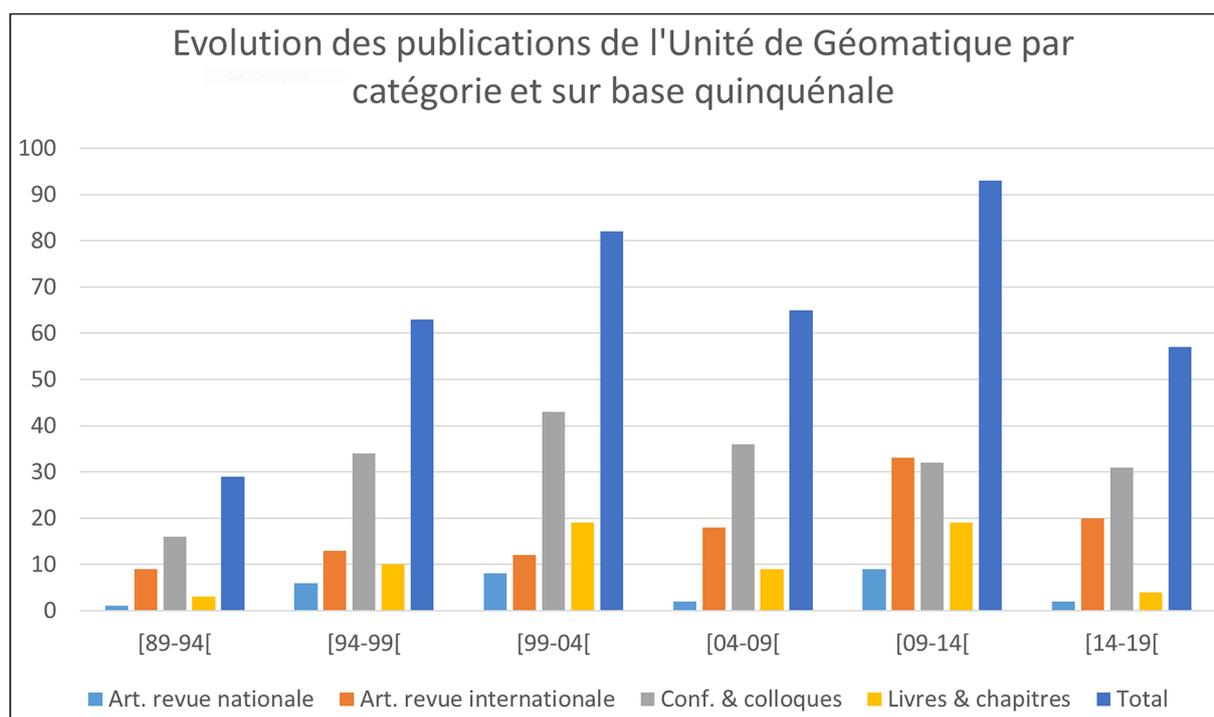


Figure 1. Évolution des publications de l'Unité de Géomatique par catégorie et sur base quinquennale (données provenant du dépôt institutionnel ORBi)

quelques tendances. Pendant les trois premières périodes, on remarque une augmentation du nombre total de publications et une certaine stabilité des publications dans des revues internationales. Entre 1989 et 2004, Jean-Paul Donnay était le seul académique à publier, rejoint en 2000 par Yves Cornet. On remarque ensuite une augmentation de la production d'articles dans des revues internationales sur les périodes 2004-2009 et 2009-2014. Cette augmentation est à mettre en relation avec l'augmentation de l'activité de publications d'Yves Cornet et l'arrivée de Roland Billen et René Warnant. La dernière période présente un certain recul qui peut s'expliquer par une diminution de l'activité de recherche d'Yves Cornet et Jean-Paul Donnay.

Le nombre relativement élevé de publications à des conférences et des colloques s'explique par la volonté des jeunes chercheurs de confronter leurs résultats à la communauté internationale, par l'implication de certains professeurs dans l'organisation de colloques et conférences et par l'importance des publications dans des conférences de haut niveau dans les domaines de la géomatique plus proches de l'informatique.

Le nombre de publications dans des revues nationales est relativement faible et constant ce qui traduit

le peu de poids de ce type de publications dans les évaluations de la recherche sans néanmoins négliger leurs impacts sur le monde professionnel (cf. III.D).

Concernant les articles dans des revues internationales, on peut remarquer à l'analyse des thématiques abordées et des auteurs qu'on est en face de cycle dépendant du stade de la carrière des chercheurs et de l'évolution des thématiques de recherche (cf. I).

Globalement, le taux de publications dans les revues internationales est dans la fourchette basse par rapport au standards internationaux (en France, on considère un minimum d'une publication dans des revues internationales par an pour un chercheur et une publication dans des revues internationales tous les deux ans pour un enseignant-chercheur). Pour autant, la qualité des publications et leur pertinence au regard des agendas de recherche internationaux sont bien réelles. Pour preuve, on peut mettre en avant le nombre de citations de certains articles et la reconnaissance internationale de membres de l'Unité dans certains domaines (réseaux et projets internationaux, jury de thèse, etc.). Ce relatif manque de « productivité » (pour peu que ce terme ait un sens en recherche) peut s'expliquer de plusieurs façons. La charge d'enseignement et de citoyenneté des académiques est très lourde en comparaison avec

celle de collègues actifs dans des départements étrangers de très haut niveau. L'accès au financement de recherche est particulièrement difficile. Cette constatation est assez générale en FWB, mais elle est plus particulièrement problématique pour certains domaines de la géomatique qui ne sont pas clairement associés à des commissions du FNRS. Ce manque de financement de recherche fondamentale est compensé par une activité de recherche appliquée importante mais très chronophage (montage de projet) et ne pouvant pas toujours être valorisée en recherche (rapports internes).

Le nombre de thèses défendues est de 21 sur les 15 dernières années (Pantazis, 1994 ; Tahiri, 1997 ; Semlali, 1999 ; Ali, 2000 ; Billen, 2002 ; Ndayikengurukiye, 2003 ; Laplanche, 2006 ; Cornélis, 2006 ; Ibannain, 2009 ; Lejeune, 2009 ; Spits, 2012 ; Hallot, 2012 ; Horion, 2012 ; Wautelet, 2013 ; Bidaine, 2012 ; Hajji, 2013 ; Elmandouri, 2014 ; Trotta, 2014 ; Kasprzyk, 2015 ; Lonchay, 2019 ; Poux, 2019). On remarque également un moment pivot, en 2009, où l'on passe d'une moyenne de 0,6 thèse défendue par an pour la période 1994 à 2008 à une moyenne de 1,1 thèse par an pour la période de 2009 à juin 2019. Ceci s'explique très facilement par le fait que Jean-Paul Donnay était seul à encadrer des thèses pendant la première période alors que par la suite, René Warnant, Yves Cornet et Roland Billen ont également été actifs. Le même constat que pour les articles dans des revues internationales peut être dressé, ce nombre de thèses peut apparaître un peu faible mais il doit être mis en rapport avec le manque de financement de la recherche fondamentale.

B. Les projets

Un autre critère d'évaluation de la recherche est la capacité d'un groupe à obtenir des projets de recherche. Ceci démontre une reconnaissance des compétences au niveau régional, national ou international (en fonction des organismes finançant) et une réelle aptitude à obtenir, gérer et mener à bien des projets. De ce point de vue, depuis l'origine du laboratoire SURFACES à l'Unité de Géomatique actuelle, les différents porteurs de projet et les équipes de recherche ont été particulièrement actifs.

On peut dénombrer au moins 170 projets ou contrats depuis 1989. Ces projets ont été de tailles diverses, le plus souvent commandités par des

organismes régionaux ou nationaux et ont générés des rentrées de plusieurs millions d'euros même si le chiffre exact est difficile à calculer (estimation de 8 000 000 € sans compter les projets antérieurs à l'année 2000 comptés en francs belges).

Ce très grand dynamisme a été favorisé par la forte demande d'activités de services, de développements et de recherches appliquées dans le domaine de la géomatique mais est aussi une réponse au sous-financement de la recherche fondamentale en géomatique, à l'exception peut-être du domaine des GNSS.

Le bilan est globalement très positif. Ce type d'activité a permis de mettre en place des équipes de recherche qui n'auraient pas pu voir le jour autrement, de développer des compétences de pointe, d'avoir une certaine proximité avec l'industrie et les institutions (régionales et fédérales) ce qui dans l'ensemble a grandement impacté l'enseignement. Par contre, comme évoqué dans la section 4.1, les activités de montage de projet et de gestion sont chronophages et diminuent la disponibilité des chercheurs et des porteurs pour la valorisation des résultats au travers de publications. De plus, certains types de projet ne permettent pas de publication (rapports internes, confidentialité). Il faut néanmoins constater que l'obtention de projets de recherche est de plus en plus compliquée. Par le passé, le laboratoire SURFACES puis l'Unité de Géomatique ont bénéficié de nombreux projets BELSPO. La recherche fédérale diminuant d'année en année, les membres de l'Unité doivent se tourner vers des fonds régionaux mettant l'accent sur la recherche appliquée ou bien vers des fonds européens extrêmement compétitifs.

C. L'enseignement

Au sein des universités, la recherche, fondamentale ou appliquée, doit idéalement alimenter l'enseignement. Ce lien recherche/enseignement est surtout prégnant pour les cours plus spécialisés qui sont donnés en master. Dans le domaine de la géomatique qui comporte une très grande composante technique, il est important également d'arriver à un certain degré d'opérationnalité, par exemple pour les cours de topographie ou bien de SIG. Ainsi, l'enseignement de la géomatique, pour être complet, nécessite des compétences théoriques et pratiques issues à la fois de la recherche fondamentale et appliquée mais aussi d'une certaine proximité avec les pratiques professionnelles.

La diversité des domaines d'expertise (cf. section 2), les activités de recherche tant fondamentale qu'appliquée (cf. section 3.1 et section 3.2), a permis aux membres de l'Unité de Géomatique d'alimenter directement leurs enseignements pendant de nombreuses années. L'évolution grandissante de la discipline rend ce lien recherche/enseignement de plus en plus difficile à assurer. Le nombre restreint de titulaire de cours, la difficulté de développer et de maintenir des équipes de recherche vu les problèmes de financement évoqués, sont autant de facteurs qui rendent la transmission recherche vers enseignement difficile. Les choix opérés dans les changements de programme de cours successifs permettent de toujours garder un niveau d'excellence dans les cours spécialisés.

D. L'impact sur le monde professionnel

La recherche peut également être évaluée au regard de son impact sur le monde professionnel. Une partie importante des projets de recherche ou d'expertise de l'Unité sont en lien avec les secteurs public et privé. Ainsi, l'implication de chercheurs de l'Unité dans des développements régionaux et nationaux est très importantes comme le montre les nombreuses références tout au long de cet article. Plusieurs projets ont été directement liés à des partenaires privés tels que le projet Cit4D, le projet EORegions, et également le projet Spatiodata qui a amené à la création d'une spin-off.

Notons que de nombreux diplômés de la section géomatique et géométrie se retrouvent à des niveaux divers dans le domaine public et privé. L'Université de Liège jouant ainsi son rôle sociétal en formant des universitaires en adéquation avec les attentes du monde professionnel.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

A. L'évolution de la Géomatique au sein du Département de Géographie

Le regard porté sur les 4 dernières décennies atteste que la géomatique, même si le terme n'apparaît que dans les années 1990, est profondément ancrée au sein du Département de Géographie de l'Université de Liège. La création du laboratoire SURFACES et la stabilisation de Jean-Paul Donnay en 1986 sont certainement les événements qui ont permis un développement significatif des activités de recherche

en géomatique. La création de la filière en géomatique et géométrie en 1992 et le rassemblement de plusieurs enseignants et enseignants-chercheurs dans l'Unité de Géomatique a été l'étape suivante du renforcement des aspects enseignement et recherche. Les activités ont évolué au gré des départs et des ouvertures de postes mais aussi de l'obtention de projets de recherche structurant. A l'heure d'écrire ces lignes, ce sont les départs combinés des professeurs Cornet et Donnay qui représentent les prochains grands défis de l'Unité de Géomatique.

L'évolution des domaines d'activité de recherche présentée dans la section II démontre un réel dynamisme des équipes qui se sont succédé. Évidemment, les directions prises résultent des choix des enseignants-chercheurs qui se sont succédé et par les contraintes inhérentes à l'organisation de l'enseignement supérieur et de la recherche au sein de l'Université de Liège et plus largement en FWB. Néanmoins, on peut remarquer que la couverture des domaines d'activité est relativement large et a permis d'alimenter l'enseignement et aussi de répondre aux besoins d'acteurs régionaux et nationaux.

L'évaluation de la recherche démontre également un fort ancrage national dans les domaines de la recherche appliquée et un rôle très important dans le développement de la géomatique dans les institutions régionales et nationales. Le point fort est sans nul doute le nombre très important de projets de recherche entrepris au sein de l'Unité particulièrement au travers de financements extérieurs. Ce type d'activité a permis de maintenir un haut niveau de recherche malgré le relativement faible taux de financement de la recherche fondamentale. Au sein de la FWB, l'Unité de Géomatique occupe une place particulière en ce qui concerne les SIG (plutôt pour les aspects théoriques et conceptuels), l'acquisition de données 3D et les GNSS. Elle est aussi un acteur historique important en télédétection, analyse spatiale et cartographie. Le monopole dont jouit l'Université de Liège en FWB pour la formation en sciences géographiques orientation géomatique, amenant notamment au métier du géomètre-expert, est sans nul doute un atout majeur pour l'avenir de l'Unité de Géomatique.

Les membres de l'Unité de Géomatique jouissent en général d'une très bonne renommée internationale dans leurs domaines d'expertise. Cependant,

la taille du groupe ainsi que le nombre relativement peu élevé de postes académiques, ne permettent pas réellement de positionner l'Unité de Géomatique comme un acteur global majeur. L'analyse du nombre de publications conforte cette analyse. Des articles de très bons niveaux ont été écrits mais le volume et la fréquence de publications est parfois un peu faible. On remarque également des cycles dans les domaines de recherche, ce qui s'explique une fois de plus par la taille réduite du groupe et la dépendance aux financements extérieurs. Malgré tout, régulièrement, les chercheurs de l'Unité publient des travaux de très hauts niveaux et qui s'inscrivent parfaitement dans les agendas de recherche internationaux.

Si l'Unité de Géomatique a des forces indéniables pour continuer à remplir son rôle au niveau régional et national, elle a également de réels atouts pour affirmer son rôle à l'international : une tradition d'enseignement et de recherche, la qualité des chercheurs, une approche plus théorique de la discipline qui l'affranchit des domaines d'applications. La géomatique y est étudiée pour elle-même, pas seulement comme un outil au service d'autres sciences. Le défi principal est de pouvoir maintenir et si possible augmenter les ressources humaines dédiées à l'enseignement et la recherche en géomatique. Vu la situation économique actuelle, ceci ne pourra se faire que, d'une part, en envisageant des synergies avec d'autres groupes en interne ou à l'international et, d'autre part, en continuant à développer des projets de recherches, en essayant, au niveau de la FWB, de faire reconnaître les aspects fondamentaux de la discipline finançables par le FNRS.

B. L'évolution de la géomatique au niveau international

Cet article s'est penché sur l'évolution de la Géomatique dans une seule Unité d'enseignement et de recherche de la FWB. Cela représente un biais méthodologique et une comparaison plus large, avec d'autres départements belges et internationaux, serait nécessaire pour dresser un constat général. On peut noter que l'évolution technologique de la discipline amène progressivement les géomaticiens à se spécialiser, tant dans le monde académique que dans celui de l'entreprise. Alors qu'autrefois il était relativement habituel pour les enseignants et les premiers étudiants formés de passer de la conception d'une base de données spatiales à un levé

topographique, il devient très difficile aujourd'hui de maintenir des compétences pointues dans l'éventail des disciplines relevant de la géomatique. Les moyens d'acquisition de données par exemple, se sont fortement développés avec l'apparition de nouveaux vecteurs (comme les drones) ou capteurs (comme le LiDAR aérien ou terrestre). Les données spatiales sont également produites par un nombre d'acteurs plus important qui ne se limitent plus aux acteurs historiques institutionnels. Chaque individu peut contribuer à la production de données spatiales de façon volontaire (via Google MapMaker par exemple ou OpenStreetMap) ou involontaire (par la collecte de traces GSM). Cela génère une grande hétérogénéité qu'il faut pouvoir gérer. Le mode de diffusion des données a aussi fortement évolué avec un partage en accès libre (mouvement de l'*Open-Data*) et une mise en ligne presque instantanée via des serveurs et des outils de *Webmapping* dédiés. Cette diffusion demande de nouveaux savoir-faire sur des techniques qui changent en permanence. Ces évolutions engendrent par ailleurs une quantité considérable de données spatiales (on parle de *déluge* de données) de nature très diverse et de qualité très variable qui nécessitent de repenser la façon de stocker, d'interroger et d'analyser ces données, pour être capable de tirer profit de leur complexité. De nouveaux défis scientifiques, mais aussi pédagogiques attendent donc les enseignants-chercheurs en géomatique. Du point de vue de la recherche, un grand nombre de questions est actuellement posé autour du *BigData* qui touche à la fois les télédéTECTEURS (suite à l'arrivée des séries temporelles d'images Sentinel ou des nuages de points LiDAR) et les concepteurs/administrateurs de bases de données spatiales (Chi *et al.*, 2016 ; Goodchild 2016). Les techniques d'intelligence artificielle deviennent également incontournables pour extraire des informations pertinentes dans ces gros volume de données avec des méthodes de plus en plus sophistiquées comme l'apprentissage profond (ou *deep learning*). Enfin, on voit également émerger de nouveaux outils pour explorer et analyser ces données de façon graphique avec de nouvelles formes de représentation dans le domaine de la *data visualization* (Yau, 2013).

D'un point de vue pédagogique, le défi des enseignants n'est plus seulement de former les étudiants aux concepts théoriques et outils spécifiques. Ces derniers deviennent rapidement obsolètes au bout de quelques années. L'enjeu est aussi de rendre les étudiants capables de s'adapter aux changements

constants des techniques. Ils doivent également avoir les compétences pour analyser et interpréter les questionnements spatiaux et spatio-temporels et, par conséquent, ne pas perdre le contact avec les sciences géographiques. Et ce constat est évidemment réciproque pour la formation des géographes à l'utilisation et au développement de méthodes relevant de la géomatique pour répondre à leurs questions scientifiques spécifiques.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier notre collègue Anna Poletto pour le travail de référencement.

BIBLIOGRAPHIE

- Ali, M. (2000). *Defining high risk areas of endemic cholera with environmental risk factors - Implications of geographical information system*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit.
- Baudoin, A., Schroeder, M., Valorge, C., Bernard, M., & Rudowski, V. (2004). The HRS-SAP initiative: a scientific assessment of the High Resolution Stereoscopic Instrument on Board of SPOT 5 by ISPRS Investigators. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35/Part B1:372-378.
- Bergamino, N., Horion, S., Stenuite, S., Cornet, Y., Loïselle, S., Plisnier, P.-D., & Descy, J.-P. (2010). Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and primary production in Lake Tanganyika using a MODIS based bio-optical time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(4):772-780, DOI: [10.1016/j.rse.2009.11.013](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.013)
- Bidaïne, B. (2012). *Ionosphere modelling for Galileo single frequency users*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 96 p., <http://hdl.handle.net/2268/131216>
- Bidaïne, B., Lonchay, M., & Warnant, R. (2013). Galileo single frequency ionospheric correction: performances in terms of position. *GPS Solutions*, 17, 63-73, doi:10.1007/s10291-012-0261-0, <http://hdl.handle.net/2268/117284>
- Billen, R. (2002). *Nouvelle perception de la spatialité des objets et de leurs relations. Développement d'une modélisation tridimensionnelle de l'information spatiale*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 194 p., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/20255>
- Billen, R., Zlatanova, S., Mathonet, P., Boniver, F. (2002). The Dimensional Model : a framework to distinguish spatial relationships. In Richardson, D., Van oosterom, P. (eds), *Advances in Spatial Data Handling*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 285-298, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/20260>
- Billen, R., & Zlatanova, S. (2003). 3D spatial relationships model: a useful concept for 3D cadastre? *Computers, Environment and Urban Systems*, 27(4):411-425, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/19056>
- Billen, R., & Clementini, E. (2004). Introducing a reasoning system based on ternary projective relationships. In Fisher, P. (ed.), *Developments in Spatial Data Handling*. 11th International Symposium on Spatial Data Handling, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 381-394, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/20252>
- Billen, R., Laplanche, F., Zlatanova, S., & Emgard, L. (2008). Vers la création d'un méta-modèle générique de l'information spatiale 3D urbaine. *Revue XYZ*, 114(1):37-42, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/2786>
- Billen, R., Zaki, C., Servières, M., Moreau, G., & Hallot, P. (2012). Developing an ontology of space: application to 3D city modeling. In Leduc, T., Moreau, G., Billen, R. edp Sciences, Les Ulis, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/126680>
- Billen, R., Cutting-Decelle, A.-F., Ognen, M., de Almeida, J.-P., Caglioni, M., Falquet, G., Leduc, T., Métral, C., Moreau, G., Perret, J., Rabino, G., San Jose, R., Yatskiv, I. & Zlatanova, S. (2014). *3D City Models and urban information: current issues and perspectives*. Les Ulis : EDP Sciences ? 92+26 p., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/162974>
- Binard, M., & Nadasdi, I. (1998). Utilisation des images satellitaires à très haute résolution pour la mise en œuvre de la révision des plans de secteur. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 34:85-94, <https://popups.uliege.be/0770-7576/>
- Binard, M., & Donnay, J.-P. (Editeur critique) (2000). Les spatiocartes d'occupation du sol. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 38(1):63-78, <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=2508>
- Binard, M., Devillet, G., Erpicum, M. (2003). La géographie appliquée à l'université de Liège. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 43 :127-139, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/5450>
- Binard, M., Cornet, Y., & Donnay J.-P. (2006). The usefulness of VHR images for public administrations in an urban hilly region. in Marçal, André (Ed.) "Global Developments in Environmental Earth Observation from Space", 25th symposium of the EARSeL, 6-11 juin 2005, 567-574, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/3621>
- Binard, M., Tack, F., Van de Voorde, T., Cornet, Y., & Canters, F. (2010). Use of multi-angle high-resolution imagery and 3D information for urban land-cover classification: a case study on Istanbul. *Proceedings of EARSEL Joint SIG Workshop Urban*

- 3D - Radar - Thermal Remote Sensing and Developing Countries, 22-24 septembre 2010, Ghent, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/142950>.
- Carré, C., Delfosse, V., Billen, R., Jeunejean, A., Boulanger, C., Vandervreken, A., Lefèbvre, P.-H., Michel, B., & Leclercq, P. (2013). SPATIODATA, une approche alternative pour la gestion des données spatialisées relatives aux bâtiments. In Thibaud, Gourmelon, Gensel, J., Joliveau, T., Claramunt, C. (eds), *SAGEO 2013 - Conférence internationale de Géomatique et d'analyse spatiale - ACTES* de la Conférence, <http://hdl.handle.net/2268/159431>
- Chi, M., Plaza, A., Benediktsson, J., Sun, Z., Shen, J., & Zhu, Y. (2016) Big Data for Remote Sensing: Challenges and Opportunities. In *Proceedings of the IEEE*, 104(11):2207-2219.
- Clementini, E., Di Felice, P., & van Oosterom, P. (1993). A small set of formal topological relationships suitable for end-user interaction. In Abel, David; Ooi, Beng Chin (eds.). *Advances in Spatial Databases: Third International Symposium, SSD '93*, Singapore, June 23–25, 1993 Proceedings. Lecture Notes in Computer Science, 692/1993, Springer, 277–295, DOI :[10.1007/3-540-56869-7_16](https://doi.org/10.1007/3-540-56869-7_16)
- Clementini, E., & Billen, R. (2006). Modeling and computing ternary projective relations between regions. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 18(6):799-814, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/1679>
- Clementini, E., Skiadopoulos, S., Billen, R., & Tarquini, F. (2010). A Reasoning System of Ternary Projective Relations. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(2):161-178, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/29964>
- Cornéilis, B. (2006). *Towards a spatial decision theory*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège (co-tutelle avec la Prof. Zwetkoff, Département de Sciences politiques), inédit.
- Cornet, Y., de Béthune, S., Binard, M., Muller, F., Legros, G., & Nadasdi I. (2001). RS Data Fusion by Local Mean and Variance Matching Algorithms: their Respective Efficiency in a Complex Urban Context. *Proceedings of IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 8-9 November 2001, Roma, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/3830>
- Cornet, Y., Schenke, Chr., de Béthune, S., Binard, M., & Muller, F. (2003). Stratégies de fusion d'images P/XS basées sur les principes colorimétriques et l'Egalisation de Statistiques Locales. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 169:35-45, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/3790>
- Cornet, Y., Binard, M., & Donnay, J.-P. (2004a). Intérêt de la fusion d'images à haute résolution spatiale pour la classification de l'occupation du sol en milieu urbain. *Revue Internationale de Géomatique*, 14(3-4):417-439, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/3773>
- Cornet, Y., & Binard, M. (2004b). Which metrics to assess and compare the quality of image fusion products ? *Proceedings of 24th EARSeL symposium, New Strategies for European Remote Sensing*, 25-27 may 2004, Dubrovnik, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/3786>
- Cornet, Y., Grevesse, J., Binard, M., Peeters, C., Tihon, G., Bastin, T. & Donnay, J.-P. (2005). DSM from SPOT5-HRS images: extraction and validation. *Proceeding of the EARSeL Workshop 3D-Remote Sensing*, Porto, June 10-11, 2005, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/3769>
- Cornet, Y., Binard, M., Ledant, M., Van der Kwast, H., Van de Voorde, T., & Canters, F. (2012). Predicting the spatial distribution of population based on impervious surface maps and modeled land use change. *European Association of Remote Sensing Laboratories, 32nd EARSeL Symposium Proceedings Advances in Geosciences*, Mykonos Island, Greece, 21-24 May 2012, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/144921>
- Da Col, A., Billen, R., Schumacker, B., Ewiak, I. & Kaczynski, R. (2002). Educational Software for Digital Photogrammetry. *Arch. of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing*, Polish Society for Photogrammetry and Remote Sensing bi-annual Conference, 12b:79-84.
- De Bethune, S., Muller, F., & Binard, M. (1998a). Adaptive intensity matching filters: a new tool for multi-resolution data fusion. *AGARD conference proceedings 595, Multi-Sensor Systems and Data Fusion for Telecommunications, Remote Sensing and Radar*, 29 September - 2 October, 1997, Lisbon, Portugal, p. 28.1-28.15.
- De Bethune, S., Muller, F., Binard, M., & Donnay, J.-P. (1998b). Fusion of multispectral and panchromatic images by local mean and variance matching filtering techniques. *Proceedings of the Second International Conference en Fusion of Earth Data, EARSeL*, Sophia-Antipolis, p. 31-36.
- Decalf, M. (2018). *Création d'un Modèle Numérique Dynamique de Surface (MNDS) à l'aide de l'algorithme de la Direct Linear Transformation (DLT) et détermination des champs de vitesses de l'écoulement à partir d'appareils vidéographiques*. Mémoire de Master en Sciences géographiques, Université de Liège, 96 p., <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/5584>
- Delfosse, V., Billen, R., & Leclercq, P. (2012). UML as a schema candidate for Graph databases <https://orbi.uliege.be/handle/2268/124328>
- Donnay, J.-P. (1983). Un logiciel de cartographie assistée par micro-ordinateur. *Actes du sixième Symposium sur la cartographie automatisée : Auto-Carto Six*, 2:25-32, Ottawa, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/84368>
- Donnay, J.-P., & Binard, M. (1993). Gipsy : un système d'information géographique orienté image. *Actes des*

- journées scientifiques du réseau de télédétection de l'UREF : Outil micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux*, Toulouse, 1990, AUPELF, Presses de l'Université du Québec, 281-307, <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/69131>
- Donnay, J.-P. (ed.) (2000). *La Spatiocartographie (Hommage à Istvan Nadasdi)*. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 38, 136 p, <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=2502>
- Donnay, J.-P., Collet, Cl., & Weber, Chr. (2000). La télédétection urbaine à l'aube de la très haute résolution spatiale. *La télédétection en Francophonie : analyse critique et perspectives*, Éd. AUF, p. 3-13, http://www.bibliotheque.auf.org/doc_num.php?explnum_id=767
- Donnay, J.P. (2003) La cartographie et la géomatique. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 43, 89-95, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/82532>
- Donnay, J.-P. (2013a). *Guide de rédaction des cartes thématiques. Méthodes et consignes*. Liège, Université de Liège, 194 p., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/156190>
- Donnay, J.-P. (2013b). *AutoCarto Six Retrospective*. Wellar, B. Ottawa : Information research Board, Inc., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/158450>
- Egenhofer, M.J., & Franzosa, R.D. (1991). Point-set topological spatial relations. *Int. J. GIS*. 5(2):161–174, DOI : [10.1080/02693799108927841](https://doi.org/10.1080/02693799108927841)
- Elmansouri, L. (2014). Une approche basée objet combinée avec les classifieurs avancés (SVM, RF, Extra Trees) pour la détection des changements du bâti. *Revue Internationale de Géomatique*, 24(2):181-210, DOI : [10.3166/riig.24.181-210](https://doi.org/10.3166/riig.24.181-210)
- Fisher, P. (1997). 'Editorial'. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 11(1):1–3.
- Glaude, Q. (2017). *CraterNet : a fully convolutional Neural Network for lunar crater detection based on remotely sensed data*. Mémoire de Master en Sciences géographiques, Université de Liège, 159 p., <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/2486>
- Goodchild, M-F. (2016). GIS in the Era of Big Data. *Cybergeog*, <https://journals.openedition.org/cybergeog/27647>
- Hajji, R. (2013). *Vers une méthode de conception de SIG 3D collaboratif*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 188 p., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/156447>
- Hajji, R., & Billen, R. (2016). Collaborative 3D Modeling: Conceptual and Technical. *Issues. International Journal of 3-D Information Modeling*, 5(3):47-67, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/207644>
- Hallot, P. (2012). *L'identité à travers l'espace et le temps. Vers une définition de l'identité et des relations spatio-temporelles entre objets géographiques*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 276 p., <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/113244>
- Hallot, P., Stewart, K., & Billen, R. (2015). Les états spatio-temporels d'existence et de présence. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(2), 173-196.
- Hallot, P., Billen, R. (2016). Enhancing Spatio-Temporal Identity: States of Existence and Presence. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5 (62), <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/196677>
- Hallot, P. (2017). Considering Rich Spatiotemporal Relationships in Cultural Heritage Information Management. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Proceedings of Workshops and Posters at the 13th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2017), <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/213692>
- Hallot, P., Billen, R. (2018). States of knowledge: a basis for spatio-temporal model of cultural heritage information. *CEUR Workshop Proceedings*, RWTH Aachen University, <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/227539>
- Hallot, P., Gil, M. (2018). e-thesaurus—Données liées à un modèle 3D de pièces d'orfèvrerie—modélisation sémantique et définition des besoins. *Présentation à la journée d'étude Moyen Age 2.0 Reconstructions numériques et histoire de l'art: Recherche et Communication*, Lausanne, Suisse.
- Horion, S., Tychon, B., & Cornet, Y. (2010a). Climatological characteristics of NDVI time series: challenges and constraints. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 54:137-144, <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=1023>
- Horion, S., Tychon, B., & Cornet, Y. (2010b). Modelling climate control on cropland and grassland development using phenologically tuned variables. *Geophysical Research Abstracts*, 12, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/94239>
- Horion, S., Bergamino, N., Stenuite, S., Descy, J.-P., Plisnier, P.-D., Loiselle, S., & Cornet, Y. (2010c). Optimized extraction of daily bio-optical time series derived from MODIS/Aqua imagery for Lake Tanganyika, Africa. *Remote Sensing of Environment*, 114(4):781-791, DOI : [10.1016/j.rse.2009.11.012](https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.012)
- Horion, S. (2012). *Climate-driven growth of croplands and grasslands: analysis and modeling at regional scale*. Thèse de doctorat en Sciences, Université de Liège, 172 p., <http://hdl.handle.net/2268/128682>
- Hajji, R. (2013). *Vers une méthode de conception de SIG 3D collaboratif*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 188 p., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/156447>
- Hajji, R., & Billen, R. (2016). Collaborative 3D Modeling: Conceptual and Technical. *Issues. International Journal of 3-D Information Modeling*, 5(3):47-67, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/207644>
- Holemans, A., Kasprzyk, J.-P., & Donnay, J.-P. (2018). Coupling an Unstructured NoSQL Database with a Geographic Information System. In Rückemann, C.-P., Doytsher, Y. (eds), *GEOProcessing 2018. The*

- Tenth International Conference on Advanced Geographic Information*, 23-28, <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/221769>
- Ibannain, F. (2009). *Modélisation des données géographiques de référence au Maroc. Préalable à la mise en place d'une infrastructure nationale de données spatiales*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit.
- Kasprzyk, J. P. (2015). *Intégration de la continuité spatiale dans la structure multidimensionnelle d'un entrepôt de données - SOLAP raster*. Thèse de doctorat en Sciences, Université de Liège, 247 p. + xxxii, <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/182360/>
- Kasprzyk, J.-P. (2016). A Raster SOLAP for the Visualization of Crime Data Fields. in Rückemann, Claus-Peter (ed), *GEOProcessing 2016*, 109-117, <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/196272>
- Laforge, L. (2018). *Comparaison de l'enneigement en Islande des produits satellitaires MODIS - Terra et MODIS - Aqua avec le modèle MAR lors de la période de fonte estivale*. Mémoire de Master en Sciences géographiques, Université de Liège, 94 p., <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/5559>
- Laplanche, F. (2006). *e-Space - Environnement de conception de bases de données spatiales sur Internet*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit
- Laplanche, F., Billen, R., & Teller, J. (2008). Méthode de relevé rapide de scènes urbaines tridimensionnelles dans le cadre d'évaluations environnementales stratégiques. *Revue Internationale de Géomatique*, 18:147-167, DOI : [10.3166/geo.18.147-167](https://doi.org/10.3166/geo.18.147-167)
- Laporterie-Déjean, F., de Boissezon, H., Flouzat, G. & Lefèvre-Fonollosa, M.-J. (2005). Thematic and statistical evaluations of five panchromatic/multispectral fusion methods on simulated PLEIADES-HR images. *Information Fusion*, 6(3):193-212. DOI : [10.1016/j.inffus.2004.06.006](https://doi.org/10.1016/j.inffus.2004.06.006)
- Leduc, T., Moreau, G., & Billen, R. (eds) (2012). *Usage, Usability, and Utility of 3D City models*. Les Ulis : EDP Sciences, 320 p., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/126674>
- Lejeune, S. (2009). *Influence de l'ionosphère sur le positionnement différentiel par GNSS*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 222 p.
- Lejeune, S., Wautelet, G., & Warnant, R. (2012). Ionospheric effects on relative positioning within GPS dense network. *GPS Solutions*, 16(1):105-116, <http://hdl.handle.net/2268/86750>
- Liécart, G. (2015). *Évaluation de la Direct-Linear Transformation (DLT) pour la restitution tridimensionnelle d'un modèle réduit d'une retenue d'eau et considérations dynamiques pour sa rupture par surverse*. Mémoire de Master en Sciences géographiques, Université de Liège, 114 p., <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/6039>
- Lonchay, M. (2019). *Ingestion of Ionospheric Scintillation Skymaps into GNSS Algorithms*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 347 p., <http://hdl.handle.net/2268/234995>
- Lonchay, M., & Warnant, R. (2019). Intégration de cartes de scintillations ionosphériques dans des algorithmes de positionnement par satellites. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 72 (même numéro).
- Lowe, D. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2):91-110.
- Mathys, A., & Hallot P. (2018). "Classification of Multi-spectral Point Clouds applied to Archaeological Material." Présentation à la conférence Art&Archeology 2018, Jerusalem, Israel.
- Metral, C, Billen, R., Cutting-Decelle, A.-F., & Van Ruymbeke, M. (2010). Ontology-based approaches for improving the interoperability between 3D urban models. *Journal of Information Technology in Construction*, 15:169-184, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/26716>.
- Muller, F., & de Béthune, S. (2000). La fusion d'images. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 38, <https://popups.uliege.be:443/0770-7576/index.php?id=2541>
- Ndayikengurukiye, G. (2003). Belief-based fusion framework for land cover discrimination. A synergic approach with SAR and VIR images. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit.
- Neuville, R., Pouliot, J., Poux, F., De Rudder, L., & Billen, R. (2018). A Formalized 3D Geovisualization Illustrated to Selectivity Purpose of Virtual 3D City Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(5), <https://orbi.uliege.be/handle/2268/223553>
- Neuville, R., Pouliot, J., Poux, F., & Billen, R. (2019). 3D Viewpoint Management and Navigation in Urban Planning: Application to the Exploratory Phase. *Remote Sensing*, 11 (3), <https://orbi.uliege.be/handle/2268/232114>
- Nys, G.-A., Kasprzyk, J.-P., Hallot, P., & Billen, R. (2018a). Towards an ontology for the structuring of remote sensing operations shared by different processing chains. Elsevier, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII (4):483-490, <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/228011>
- Nys, G.-A., Van Ruymbeke, M., & Billen, R. (2018b). Spatio-temporal reasoning in CIDOC CRM: an hybrid ontology with GeoSPARQL and OWL-Time. *COARCH 2018 - Computing Techniques For Spatio-Temporal Data in Archaeology And Cultural Heritage*, RWTH Aachen University, 2230, <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/228461>
- Pantazis, D. (1994). *Méthode de conception des SIG : MECOSIG et CONGOO*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit.
- Pantazis, D., & Donnay, J.-P. (1996). *La Conception de SIG. Méthode et formalisme*. Hermès. Paris, 343 p.,

- Plisnier, P.-D., Mgana, H., Kimirei, I., Chande, A., Makasa, L., Chimanga, J., Zulu, F., Cocquyt, C., Horion, S., Bergamino, N., Naithani, J., Deleersnijder, E., André, L., Descy, J.-P., & Cornet, Y. (2009). Limnological variability and pelagic fish abundance (*Stolothrissa tanganicae* and *Lates stappersii*) in Lake Tanganyika. *Hydrobiologia*, 625(1):117-134, DOI : [10.1007/s10750-009-9701-4](https://doi.org/10.1007/s10750-009-9701-4)
- Poux, F., Neuville, R., Van Wersch, L., Nys, G.-A., & Billen, R. (2017). 3D Point Clouds in Archaeology: Advances in Acquisition, Processing and Knowledge Integration Applied to Quasi-Planar Objects. *Geosciences*, 7(4), <https://orbi.uliege.be/handle/2268/214931>
- Poux, F., Neuville, R., Nys, G.-A., & Billen, R. (2018). 3D Point Cloud Semantic Modelling: Integrated Framework for Indoor Spaces and Furniture. *Remote Sensing*, 10(9), <https://orbi.uliege.be/handle/2268/227787>
- Poux, F. (2019). *The Smart Point Cloud: Structuring 3D intelligent point data*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 268 p., <https://orbi.uliege.be/handle/2268/235520>
- Poux, F., Billen, R. (2019). Voxel-Based 3D Point Cloud Semantic Segmentation: Unsupervised Geometric and Relationship Featuring vs Deep Learning Methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(5), <https://orbi.uliege.be/handle/2268/235425>
- Renson, P., Poncelet, N., Vandeloise, Y., Schmidt, R., & Cornet, Y. (2013). Automatisation de la détection des cratères lunaires sur des images et MNT planétaires. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 61:81-96, <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=416>
- Schmidt, R., Bostelmann, J., Cornet, Y., Heipke, Chr., Philippe, Chr., Poncelet, N., de Rosa, D., & Vandeloise, Y. (2012). LandSAFE: Landing site risk analysis software. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX/B4:505-510, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/144922>
- Semlali, E. H. (1999). *La géomatization des projets de remembrement rural au Maroc. Essai de conception et d'implémentation*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit.
- Sorjamaa, A., Lendasse, A., Cornet, Y., & Deleersnijder, E. (2010). An improved methodology for filling missing values in spatiotemporal climate dataset: application to Tanganyika Lake dataset. *Computational Geosciences*, 14(1):55-64, DOI : [10.1007/s10596-009-9132-3](https://doi.org/10.1007/s10596-009-9132-3)
- Spits, J., & Warnant, R. (2011). Total Electron Content Monitoring using triple frequency GNSS: results with Giove-A/-B data. *Advances in Space Research*, 47, 296-303, <http://hdl.handle.net/2268/84597>
- Spits, J. (2012). *Total Electron Content reconstruction using triple frequency GNSS signals*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 181 p., <http://hdl.handle.net/2268/107156>
- Tahiri, D. (1997). *Propagation d'erreurs dans la constitution des modèles numériques de terrain*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit.
- Trotta, M. (2014). *Modelling serial offenders' spatial behaviours: new assumptions for geographic profiling*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, xix , 238 p., <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/172158>
- Trotta, M., Deprez, C., & Donnay, J.-P. (2015). Impact de l'anisotropie du milieu dans les études de profilage géographique. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(4):561-579, <https://ORBi.uliege.be/handle/2268/172997>
- Van Ruymbeke, M., Carré, C., Delfosse, V., Pfeiffer, M., & Billen, R. (2015). Towards an Archaeological Information System: Improving the Core Data Model. In Giligny, F., Djindjian, F., Costa, L., Moscati, P., Robert, S. (eds), *CAA 2014 21st century Archaeology : Concepts methods and tools : Proceedings of the 42nd Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, Archaeopress, Oxford, 245-253, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/180080>
- Van Ruymbeke, M., Hallot, P., Nys, G.-A., & Billen, R. (2018). Implementation of multiple interpretation data model concepts in CIDOC CRM and compatible models. *Sociedad Española de Arqueología Virtual*, 9(19):50-65, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/221219>
- Van de Voorde, T., van der Kwast, J., Engelen, G., Binard, M., Cornet, Y., & Canters, F. (2009). Quantifying intra-urban morphology of the Greater Dublin area with spatial metrics derived from medium resolution remote sensing data. *IEEE Proceedings of the 7th International Urban Remote Sensing Conference*, Shanghai, May 20-22, 2009, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/15024>
- Van de Voorde, T., Binard, M., Cornet, Y., & Canters, F. (2010). Inferring urban morphology for the greater Dublin area from continuous sealed surface data: a metric based approach. *Proceedings of EARSEL Joint SIG Workshop Urban - 3D - Radar - Thermal Remote Sensing and Developing Countries*, 22-24 septembre 2010, Ghent, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/142945>.
- Van de Voorde, T., van der Kwast, J., Canters, F., Engelen, G., Binard, M., Cornet, Y., & Uljee, I. (2012). A Remote Sensing Based Calibration Framework for the MOLAND Urban Growth Model of Dublin. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, 3/2:1-21, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/142960>
- Van de Voorde, T., van der Kwast, J., Poelmans, L., Canters, F., Binard, M., Cornet, Y., Engelen, G., Uljee, I., Shahumyan, H., Williams, B., Convery,

- S., & Lavalley, C. (2016). Projecting alternative urban growth patterns: The development and application of a remote sensing assisted calibration framework for the Greater Dublin Area. *Ecological Indicators*, 60:1056-1069, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/188294>
- Verbeiren, B., Van de Voorde, T., Canters, F. Binard, M., Cornet, Y., & Batelaan, O. (2013). Assessing urbanisation effects on rainfall-runoff using a remote sensing supported modelling strategy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21:92-102, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/142954>
- Warnant, R. & Pottiaux, E. (2000). The increase of the ionospheric activity as measured by GPS. *Earth, Planets and Space*, 52 (11), 1055-1060, <http://hdl.handle.net/2268/84663>
- Wautelet, G., & Warnant, R. (2012). Local climatological modeling of ionospheric irregularities detected by GPS in the mid-latitude region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 89, 132-143, <http://hdl.handle.net/2268/130990>
- Wautelet, G. (2013). *Characterization of ionospheric irregularities and their influence on high-accuracy positioning with GPS over mid-latitudes*. Thèse de doctorat, Liège, Université de Liège, inédit, 197 p., <http://hdl.handle.net/2268/143834>
- Yau, N. (2013). *Data visualisation. De l'extraction de données à leur représentation graphique*, Edition Eyrolles, 358 p.

Coordonnées des auteurs :

- Roland BILLEN
Marc BINARD
Yves CORNET
Jean-Paul KASPRZYK
René WARNANT
Unité de Géomatique, Département de Géographie, UR Sphères
17 allée du 6 août
Liège, Belgique
rbillen, Marc.Binard, ycornet, JP.Kasprzyk, Rene.
Warnant@uliege.be
- Pierre HALLOT
Laboratoire LNA/DIVA, UR Art Archéologie et Patrimoine
41 Bd de la Constitution
Liège, Belgique
p.hallot@uliege.be
- David SHEEREN
Laboratoire DYNAFOR, Université de Toulouse, INPT/INRA
31321 Castanet-Tolosan, France
david.sheeren@ensat.fr